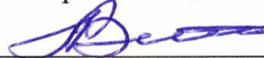




УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Институт
физики полупроводников им. А.В. Ржанова

Сибирского отделения Российской академии наук

 академик РАН А.В. Латышев

«8» июня 2021 г.

Отзыв ведущей организации

на диссертационную работу Бисти Вероники Евгеньевны

«Коллективные возбуждения в многокомпонентных двумерных электронных системах»,

представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук

по специальности 01.04.07 - физика конденсированного состояния.

Низкоразмерные системы являются основой современной микроэлектроники, достигшей громадного прогресса за последние пятьдесят лет. Теоретическое исследование низкоразмерных электронных и дырочных систем в 70-80 годы прошлого века казалось академическим и далеким от применения, но успехи технологии выдвинули этот вопрос теории на первый план. Одной из особенностей рассматриваемых низкоразмерных систем является наличие в них разных типов частиц и разных состояний отдельных их групп, то есть многокомпонентность. Информацию об исследуемых системах, их основном состоянии, роли кулоновского взаимодействия можно получить, изучая коллективные возбуждения. Исследование спектров коллективных возбуждений, содержащих информацию о структуре и взаимодействии элементарных возбуждений и позволяющих установить связи с макроскопическими характеристиками исследуемых объектов, делает тему представленной диссертации несомненно **актуальной**.

В диссертации В.Е. Бисти «Коллективные возбуждения в многокомпонентных двумерных электронных системах» исследуются следующие электронные системы: квантовые ямы с несколькими уровнями размерного квантования, двойные квантовые ямы, обладающие спиновой и изоспиновой (слоевой или подзонной) степенями свободы, квантовые ямы в сильном магнитном поле с несколькими заполненными уровнями Ландау, двумерные углеродные системы – графены. В таких системах особенно важна роль

межэлектронного кулоновского взаимодействия. Изучение спектров коллективных возбуждений в этих многокомпонентных электронных системах является основной целью проделанной работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Во введении сформулированы цели работы, обоснованы актуальность темы, научная новизна, достоверность полученных результатов и их апробация, представлены основные положения, выносимые на защиту, структура диссертации и список основных публикаций по теме диссертационной работы.

В первой главе рассмотрены коллективные возбуждения в магнитном поле в квантовой яме на основе GaAs. Имеются нескольких подзон размерного квантования и, следовательно, нескольких типов электронов, отличающихся видом волновых функций в направлении квантования. Существенна зависимость кулоновского взаимодействия от вида волновых функций электронов в подзонах. Получены спектры межподзонных коллективных возбуждений спиновой и зарядовой плотности в пределе сильного магнитного поля. Были рассмотрены как переходы без изменения уровня Ландау, так и переходы с одновременным изменением подзоны и уровня Ландау. Показано, что все возбуждения имеют многомодовую структуру, число мод определяется фактором заполнения. Впервые дано объяснение появления новых мод коллективных возбуждений вблизи четных целочисленных факторов заполнения, обусловленное началом заполнения следующего уровня Ландау, что было подтверждено экспериментально. Также в этой главе в системе без магнитного поля рассмотрена возможность существования межподзонных коллективных возбуждений зарядовой и спиновой плотности с различными значениями проекции момента на нормаль к плоскости движения.

Во второй главе рассмотрены плазменные и магнитоплазменные возбуждения в двойных квантовых ямах - системах с двумя близко расположенными уровнями размерного квантования. Исследованы акустические и оптические плазмоны в двойных квантовых ямах в параллельном плоскости квантовой ямы магнитном поле. Показано, что энергия плазмонов зависит от взаимной ориентации магнитного поля и импульса возбуждения, эта зависимость объясняется влиянием конечной ширины квантовых ям. В системе со слабым туннелированием без магнитного поля исследовано влияние пространственной симметрии системы на дисперсионные и другие характеристики плазменных возбуждений. Для магнитоплазмонов и магнитоэкситонов в двуслойной электронной системе в сильном перпендикулярном магнитном поле при факторе заполнения 2 показано, что существует изоспиновое синглетное возбуждение, не зависящее от симметрии системы, и изоспиновый

триплет, энергия которого определяется параметрами асимметрии и туннелирования и разницей в энергиях внутрислоевого и межслоевого магнитоэкситонов.

В третьей главе рассмотрены циклотронные переходы между уровнями Ландау в сильном перпендикулярном магнитном поле в чистом двухслойном графене, что соответствует нулевому фактору заполнения. Получены уровни Ландау при учете слабой асимметрии слоев графена и электронно-дырочной асимметрии. Электронно-дырочная асимметрия обусловлена учетом переходов между следующими после ближайших соседями в приближении сильной связи, асимметрия слоев графена - влиянием подложки или приложенного поперек слоев графена электрического поля. Учитывались влияние кулоновского взаимодействия на энергию циклотронных переходов. Показано, что при учете слоевой и электронно-дырочной асимметрии происходит расщепление линии циклотронного резонанса; энергии циклотронных переходов различны для разных долин. Величина расщепления зависит от магнитного поля; в области меньших магнитных полей разница в энергиях обусловлена электронно-дырочной асимметрией, в больших магнитных полях расщепление определяется электрон-электронным взаимодействием.

В четвертой главе рассмотрены возбуждения в двумерных структурах с сильным спин-орбитальным взаимодействием. Изучались дырочные двумерные каналы в Si и GaAs в перпендикулярном и наклонном магнитных полях. В перпендикулярном поле рассчитаны спектры уровней Ландау дырок в узкой квантовой яме с учетом спин-орбитального взаимодействия и непараболичности. Для случая сильного поля вычислены значения эффективных масс дырок на различных уровнях Ландау вдоль направления поля, показано, что в наклонном магнитном поле уровни размерного квантования определяются изменением квантующего потенциала вдоль направления поля. Изучалось влияние одноосной деформации вдоль слоя на положение уровней Ландау; показано, что линейная по деформации поправка к энергии уровней Ландау возникает только для двумерного канала с пониженной симметрией (поверхность 110).

Можно выделить следующие наиболее значимые результаты работы.

1. Межподзонные коллективные возбуждения зарядовой и спиновой плотности в квазидвумерной электронной системе в сильном магнитном поле имеют многомодовую структуру. Как для межподзонных возбуждений без изменения уровня Ландау, так и для переходов с повышением или понижением номера уровня Ландау новые моды появляются вблизи целочисленных факторов заполнения. Наиболее значительный эффект, доступный для экспериментального наблюдения, существует для переходов без изменения уровня Ландау.

2. Для системы электронов в квантовой яме с несколькими уровнями размерного квантования возможно существование межподзонных коллективных возбуждений спиновой и зарядовой плотности с различными значениями проекции момента на нормаль к плоскости движения.

3. Энергия коллективных возбуждений зарядовой плотности (акустических и оптических плазмонов) для системы электронов в двойных квантовых ямах в параллельном магнитном поле демонстрирует анизотропию, то есть зависит от взаимной ориентации магнитного поля и импульса возбуждения. Анизотропия определяется влиянием конечной ширины квантовых ям.

4. Показано, что в асимметричной двуслойной электронной системе в сильном перпендикулярном магнитном поле при факторе заполнения 2 существует изспиновое синглетное возбуждение (для возбуждений зарядовой плотности это оптический плазмон, для возбуждений спиновой плотности - внутрислойный магнитоэкситон), не зависящее от симметрии системы, и изоспиновый триплет, энергия которого определяется параметрами асимметрии и туннелирования и разницей в энергиях внутрислойного и межслойного магнитоэкситонов.

9. Для электронов в чистом двуслойном графене в сильном магнитном поле происходит расщепление линии циклотронного резонанса. Для разных долин энергии циклотронных переходов различны. При учете Кулоновского взаимодействия, слабой асимметрии слоев графена и электронно-дырочной асимметрии разница в энергиях обусловлена в малых полях электронно-дырочной асимметрией, а в сильных магнитных полях определяется электрон-электронным взаимодействием.

Критические замечания по диссертации сводятся к следующим.

В первой главе в пункте 1.2.1 автор исследует коллективные возбуждения в квантовой яме и ограничивается двумя подзонами, принимая условие, что влиянием остальных подзон можно пренебречь. Критерий применимости такого приближения не обсуждается. Структура спектра подзон квантовой ямы не содержит нужного буквенного параметра малости, так что следовало бы пояснить, идет ли речь о численной малости или о некоторой резонансной области частот или о чем-либо еще.

На стр. 23-24 не вполне ясно, о числе каких мод идет речь. Казалось бы, число мод определяется рангом характеристического детерминанта, а в приведенном результате такого параметра нет.

Во второй главе, посвященной двойным квантовым ямам, на стр. 68 странным представляется утверждение, что «расщепление существует только в случае

одновременного наличия туннелирования и асимметрии слоев». В симметричной структуре расщепление происходит из-за конечной прозрачности барьера, а в асимметричной уровни не совпадают изначально именно из-за асимметрии.

Замечание по стилю изложения: нередко встречаются почти буквальные повторы (напр., при описании метода туннельного гамильтониана), из чего ясно видны «нитки», которыми сшиты отдельные вошедшие в диссертацию статьи. Следовало бы, конечно, писать текст типа монографии, а не сборника трудов. В небольшом количестве, но все же встречаются опечатки.

Сделанные замечания не изменяют общую положительную оценку работы и не снижают ее научной ценности.

В целом, диссертация В.Е. Бисти является самостоятельным завершенным оригинальным научным исследованием, **достоверность результатов и обоснованность выводов** не вызывают сомнений. **Достоверность** полученных результатов основывается на надежности и обоснованности применяемых методов. Полученные в диссертации теоретические результаты являются новыми. Были даны новые предсказания для проведения экспериментов или даны новые объяснения полученных экспериментальных данных, развиты теоретические методы применительно к новым объектам исследования, что определяет также и **практическую значимость** результатов диссертационной работы, прежде всего, для такой интенсивно развивающейся сейчас области как плазмоника.

Материалы диссертации опубликованы в ведущих российских и международных рецензируемых журналах из списка Web of Science. Результаты работы докладывались на многих престижных российских и международных семинарах и конференциях. Полученные в диссертации результаты соответствуют специальности 01.04.07 - физика конденсированного состояния. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Доклад В.Е. Бисти по материалам диссертации был заслушан и обсужден на семинаре ИФП СО РАН на базе лаборатории теоретической физики 26 мая 2021 г, протокол № 4. На семинаре присутствовало 10 человек. Из них д.ф.-м.н. 3 чел., к.ф.-м.н. – 7 чел.

Отзыв на диссертационную работу В.Е. Бисти одобрен ученым советом ФГУН ИФП СО РАН, протокол № 6 от 7 июня 2021 г.

Диссертационная работа В.Е. Бисти «Коллективные возбуждения в многокомпонентных двумерных электронных системах» в полной мере соответствует критериям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней (Постановление Правительства РФ № 842 от 24.09.2013), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук, а ее автор Бисти Вероника Евгеньевна заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Главный научный сотрудник лаборатории теоретической физики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, академик РАН, доктор физ.-мат. наук - 01.04.07 физика конденсированного состояния, профессор Александр Владимирович Чаплик

 /А.В. Чаплик /

Федеральное государственное бюджетное учреждения науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук (ФГБУН ИФП СО РАН), Россия, 630090 г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 13, тел.(383)330-9-55, факс 8(383)333-27-71, <http://www.isp.nsc.ru/>; IFP@isp.nsc.ru.

Подпись академика РАН, д.ф.-м.н., профессора А.В. Чаплика удостоверяю


 **Заместитель секретаря
ФГБУН ИФП СО РАН
А.В. Ржанова
А.В. Чаплик**