

**Отзыв официального оппонента
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**

Двумерные электронные системы начали активно изучаться с начала 80-х годов 20 века. Такой интерес с фундаментальной точки зрения был обусловлен возможностью подтверждения законом квантовой механики на примере твердых тел, а с прикладной точки зрения оказалось, что с помощью квантового эффекта Холла можно точно определить отношение фундаментальных физических констант. Дальнейшее развитие технологии позволило синтезировать квантовые структуры, в которых заселены несколько подзон размерного квантования и можно было поставить вопрос о переходе от двумерных систем к трехмерным. Данная диссертационная работа посвящена развитию теории ряда явления, в которых принципиальную роль играет наличие носителей заряда в двух слоях или в туннельно связанных квантовых ямах или в нескольких подзонах размерного квантования.

Актуальность исследований, представленных в диссертации, обусловлена тем, что для описания структур с промежуточной размерностью нельзя применить ни теорию трехмерных структур, ни двумерных. Важной отличительной особенностью работы представляется то, что в ней теоретически исследуются многочастичные явления, интерпретация которых весьма сложна, и во многих случаях требуется интуиция для правильного выбора параметров теории или физической модели. Проверкой правильности служит сравнение результатов теории с экспериментальными данными. В диссертационной работе приведены результаты такого сравнения и продемонстрировано хорошее согласие предложенной теории и эксперимента, что свидетельствует о **достоверности** результатов работы. **Новизна** работ, вошедших в диссертацию, состоит в предложениях по проведению оригинальных экспериментов объяснению и в развитии теоретические методов применительно к новым объектам исследования.

Диссертация состоит из введения и четырех глав, в которых изложены результаты теории и приведено сравнение с экспериментальными данными.

В первой главе рассматривается система электронов в квазидвумерной квантовой яме на основе GaAs, в которой существует нескольких уровней размерного квантования и, следовательно, нескольких типов электронов. В пределе сильного магнитного поля рассчитаны спектры межподзонных коллективных возбуждений спиновой и зарядовой плотности. Рассмотрены как переходы без изменения уровня Ландау, так и переходы с изменением уровня Ландау. Спектры рассчитывались при факторах заполнения от 2 до 10 в рамках приближения Хартри-Фока. Показано, что все возбуждения имеют многомодовую структуру, число мод определяется фактором заполнения. Предсказано появление новых мод коллективных возбуждений вблизи четных

целочисленных факторов заполнения, связанное с началом заполнения следующего уровня Ландау. Рассмотрена возможность существования межподзонных коллективных возбуждений спиновой и зарядовой плотности в отсутствие магнитного поля в системе с различными значениями проекции момента на нормаль к плоскости движения. Рассчитан энергетический спектр комплекса, состоящего из двух электронов в квантовой яме и неподвижной заряженной примеси в сильном магнитном поле.

Во второй главе рассмотрены плазменные и магнитоплазменные возбуждения в двух связанных квантовых ямах. Наличие дополнительной степени свободы приводит к существованию новых ветвей в спектре плазменных и магнитоплазменных возбуждений. Показано, что энергия коллективных возбуждений зависит от взаимной ориентации магнитного поля и импульса возбуждения, что определяется влиянием конечной ширины квантовых ям. Изучено влияние пространственной симметрии системы на спектр, дисперсионные и физические свойства плазменных возбуждений без магнитного поля. Изучено взаимодействие межподзонных экситонов и плазмонов с близкими энергиями в зависимости от параметров асимметрии и туннелирования в сильном перпендикулярном к слоям магнитном поле.

Третья глава посвящена магнитоэкситонам в чистом двуслойном графене. Особенностью графена является наличие двух долин, состояния носителей заряда в которых обладают киральностью (без учета спинового вырождения). Коллективные возбуждения в таких системах обладают рядом интересных свойств. В диссертации рассмотрены циклотронные переходы между уровнями Ландау в сильном перпендикулярном магнитном поле в нелегированном двуслойном графене (нулевой фактор заполнения). Учитывались влияние кулоновского взаимодействия, слабой асимметрии слоев графена и электронно-дырочной асимметрии. Показано, что при учете электронно-дырочной асимметрии происходит расщепление линии циклотронного резонанса, и энергии циклотронных переходов для разных долин различны.

В четвертой главе рассматриваются особенности энергетического спектра в двумерных структурах с сильным спин-орбитальным взаимодействием. Объектом исследования являлись дырочные двумерные каналы в Si и GaAs в перпендикулярном и наклонном магнитном поле. В перпендикулярном поле получены спектры уровней Ландау дырок в узкой квантовой яме с учетом спин-орбитального взаимодействия и непараболичности. Изучено влияние одноосной деформации вдоль слоя на спектр носителей в нулевом и ненулевом магнитном поле. Показано, что линейные по волновому слагаемые в спектре дырок возникают в квантовых ямах при учете деформации в плоскости структуры. Это весьма общий результат, поскольку такие деформации естественным образом возникают при синтезе структур.

Результаты диссертационной работы опубликованы в ведущих рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ для представления результатов диссертаций и входящих в базы Scopus, Web of Science и РИНЦ.

Апробация результатов была сделана на ведущих российских и международных конференциях по физике полупроводников и конденсированного состояния.

В процессе чтения диссертационной работы возникли следующие замечания.

Вопросы по первой главе

1. Суммировании диаграмм предполагает малость газового параметра, и в этом смысле претензий к расчету нет. Однако, в тексте не указана величина этого параметра в реальных структурах, к которым данная теории применяется.

2. В выражении 1.22 суммирование ведется по всему фазовому пространству квазиимпульсов. Однако, электроны занимают только часть состояний нижней подзоны. Возникает вопрос: не следует ли включать в область интегрирования только квазиимпульсы с величиной меньшей, чем квазиимпульс Ферми в заполненной подзоне. И второе: как учитывается экранирование в 1.22, 1.23 и 1.33

Вопрос по второй главе

В выражении 2.14 присутствует расстояние между слоями, но отсутствует параметр связи их. В диссертации указано, что формула верна для длинноволновых акустических колебаний с квазиимпульсом, стремящимся к нулю. Тогда в 2.14 должно существовать ограничение на расстояние между слоями, соответствующий параметр не приведен.

Общий вопрос к двум главам: в четвертой главе изучается роль спин-орбитального взаимодействия. В первых двух главах рассматриваются асимметричные наноструктуры на основе кубических кристаллов 3-5 групп, в которых могут быть существенны эффекты Рашбы и Дрессельхауза. В тексте не пояснено, когда этими эффектами можно пренебречь, например при сравнении с данными экспериментов. Также хотел бы отметить, что в русскоязычной литературе кулоновское взаимодействие пишется со строчной буквы.

Вопросы к четвертой главе

В выражении для спектра дырок во внешнем магнитном поле не принимается во внимание линейный по магнитному полю член, связанный с кубической симметрией кристаллов, т.е. член в гамильтониане : $g_2(J_x^3 N_x + J_y^3 N_y + J_z^3 N_z)$. Не пояснено, когда этим вкладом можно пренебречь. Также в четвертой главе упоминается, что результаты теории могут быть применены для слоев на поверхности кремния. Это не очевидно, поскольку для описания валентной зоны надо использовать другой гамильтониан, поскольку спин-орбитальное

расщепление в валентной зоне мало и может быть меньше, чем расщепление уровней за счет размерного квантования.

Эти замечания не носят принципиального значения и не влияют на общую оценку диссертации.

Считаю, что данная диссертационная работа полностью соответствует требованиям, предъявляемым ВАК к диссертациям на соискание степени доктора физико-математических наук, а ее автор Бисти Вероника Евгеньевна заслуживает присуждения ей степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 - физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент

доктор физ.-мат. наук (01.04.10 - физика полупроводников), профессор, заведующий сектором Теории оптических и электрических явлений в полупроводниках Центра физики наногетероструктур



Аверкиев Никита Сергеевич

23 июня 2021 г.

ФГБУН Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе
Российской академии наук

194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

Тел.: +7 812 292 7155, e-mail: averkiev@les.ioffe.ru

Согласен на обработку персональных данных.



Н.С. Аверкиев

23 июня 2021 г.

Подпись Н.С. Аверкиева заверяю
Ученый секретарь ФТИ им. А.Ф. Иоффе
кандидат физ.-мат. наук



М.И.Патров