

Отзыв официального оппонента
о диссертационной работе
Бисти Вероники Евгеньевны
«Коллективные возбуждения в многокомпонентных двумерных
электронных системах»,
представленной на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук
по специальности 01.04.07 - физика конденсированного состояния

Актуальность темы диссертации.

Экспериментальные и теоретические исследования двумерных электронных систем, начавшиеся в 70-е годы 20-го века, привели к выдающимся открытиям (отмеченным несколькими Нобелевскими премиями) и практическим применениям, радикально изменившим информационно-коммуникационную структуру цивилизации. Эти исследования продолжаются, вовлекая в круг интересов новые сложные системы и модели. Экспериментальное исследование спектров коллективных возбуждений многокомпонентных двумерных систем является одним из методов получения информации об их структуре и свойствах электронных состояний. Интерпретация результатов таких экспериментальных исследований и извлечение необходимой информации является важной задачей теории. Именно этому посвящена диссертация В.Е. Бисти, и таким образом, **тема диссертации является весьма актуальной.**

Содержание диссертации, новизна и достоверность полученных результатов.

В диссертации В.Е. Бисти решается задача описания спектра коллективных возбуждений в многокомпонентных двумерных электронных системах. "Многокомпонентность" электронной системы может быть обусловлена подзонами квантования в квантовых ямах, уровнями Ландау, наличием нескольких связанных квантовых ям или слоев. Проводится систематическое исследование зарядовых, спиновых и смешанных коллективных электронных мод в таких системах, интерпретируется ряд экспериментальных результатов.

Структура диссертации: введение, включающее список основных публикаций автора по теме диссертации, четыре главы, заключение и список литературы.

Введение содержит краткое описание систем, экспериментальных исследований и проблем теоретического осмысления результатов, что является мотивацией и обоснованием актуальности и новизны выполненного исследования. Введение содержит также формулировку целей диссертации. В нем же описывается краткое содержание четырех глав диссертации, перечисляются основные результаты, приводится список конференций и семинаров, где проходила их апробация, и дается список использованных в диссертации публикаций автора.

В первой главе диссертации рассматривается квазидвумерная система электронов в квантовой яме на основе GaAs при наличии нескольких уровней размерного квантования. Изучаются межподзональные коллективные возбуждения спиновой и зарядовой плотности в сильном магнитном поле, даются оценки вклада различных возбуждений в интенсивность линий комбинационного рассеяния. Обнаружены новые моды коллективных возбуждений вблизи четных целочисленных факторов заполнения, что подтверждается в экспериментах. Вычислена энергия комбинированного спин-флип возбуждения (возбуждения с переворотом спина и изменением уровня Ландау электрона) при учете электрон-электронных корреляций. В системе без магнитного поля исследованы состояния межподзонного экситона. Исследуется также спиновая структура электронно-

примесных комплексов в сильном магнитном поле; сравнение расчетов с экспериментальными данными позволило сделать вывод о пространственном расположении заряженных примесей.

Во **второй главе** диссертации изучаются плазменные и магнитоплазменные возбуждения в двойных квантовых ямах. Для системы в параллельном магнитном поле показано, что энергия коллективных возбуждений зависит от взаимной ориентации магнитного поля и импульса возбуждения. Анизотропия обусловлена конечной толщиной электронных слоев; теоретические результаты хорошо соответствуют экспериментальным. Исследована также зависимость энергии коллективных возбуждений от асимметрии квантовых ям.

В **третьей главе** изучаются магнитоэкситоны в чистом двуслойном графене. Вычислены энергии уровней Ландау для двуслойного графена при учете слоевой и электронно-дырочной асимметрии и исследованы длинноволновые циклотронные возбуждения (магнитоэкситоны) в двуслойном графене при наличии слоевой и электронно-дырочной асимметрии и учете кулоновского взаимодействия в приближении Хартри-Фока. Сделан вывод о том, что величина расщепления энергий циклотронных возбуждений в больших магнитных полях определяется кулоновским взаимодействием, а в меньших полях - электронно-дырочной асимметрией.

В **четвертой главе** рассматриваются двумерные системы с сильным спин-орбитальным взаимодействием. Вовлекая и перемешивая орбитальные и спиновые степени свободы, это взаимодействие значительно усложняет структуру электронных состояний в валентной зоне (дырок). В свою очередь, это влияет на структуру дырочных уровней Ландау в магнитном поле, и циклотронные переходы. Вычислены уровни Ландау двумерной системы дырок в узкой квантовой яме (Si и GaAs) в перпендикулярном магнитном поле, в квазиклассическом случае получены выражения для циклотронных энергий и циклотронных масс. Для дырок в GaAs в сильном наклонном магнитном поле определены эффективные массы дырок на различных уровнях Ландау. Изучается также влияние одноосной деформации вдоль слоя на положение уровней дырочных Ландау.

В **заключении** сформулированы основные научные результаты, полученные в диссертации, и выводы по проведенному систематическому исследованию.

Приведенное выше содержание диссертации и совокупность решенных в ней задач подтверждает **новизну результатов**. Их **достоверность** обеспечена проведенным анализом на основе диаграммных методов теории многих тел. Результаты являются взаимно согласованными и согласуются также с результатами ряда экспериментальных работ. Результаты опубликованы в рецензируемых научных журналах и докладывались на многих конференциях и семинарах.

Несомненна **научная и практическая значимость** диссертации В.Е. Бисти как для физики многокомпонентных двумерных электронных систем, так и для потенциальных практических применений таких систем. Ряд полученных результатов позволяют сделать выводы о том, какие именно физические процессы обуславливают экспериментально наблюдаемые особенности спектра коллективных возбуждений таких систем.

Диссертационная работа В.Е. Бисти вызывает несколько **вопросов и замечаний**:

1) При рассмотрении межподзонного экситона в нулевом магнитном поле с помощью численного решения уравнения Бете-Солпитера (1.22), наличие в нижней подзоне электронного газа конечной концентрации учитывается в приближении Хартри-Фока (т.е., перенормировкой электронных энергий в подзонах). Однако, этот подход не учитывает перенормировку (экранирование) потенциала взаимодействия электронным газом, в уравнение подставляется "голый" кулоновский потенциал (1.17), усредненный по функциям поперечного движения. Кроме того, использованный подход игнорирует возможность безызлучательного распада экситона на совокупность электронных возбуждений нижней подзоны. Учет таких процессов (типа Оже) привел бы к конечному времени жизни экситона (т.е., комплексным собственным значениям уточненного уравнения Бете-Солпитера). Следовало бы, если не изучить, то хотя бы обговорить наличие указанных процессов.

2) При изучении спиновой структуры электронно-примесных комплексов в сильном магнитном поле, решается, по существу, задача о двух электронах в поле заряженной примеси. Однако, ответы, найденные для этой двухэлектронной задачи, применяются к системам, где имеется электронный газ конечной и при том не слишком малой плотности. Именно, для приведенных параметров (плотность электронов и диапазон значений магнитного поля) упомянутого в пункте 1.4 примера GaAs ямы, межэлектронное расстояние сравнимо с магнитной длиной. Возможность пренебречь в такой ситуации многоэлектронными эффектами неочевидна.

3) Есть также замечания по оформлению диссертации и автореферата. Имеется заметное количество опечаток. Некоторые формулы автореферата даны без определения фигурирующих величин. Имеется ряд неудобных сокращенных обозначений, о смысле некоторых приходится догадываться.

Однако, эти вопросы и замечания не ставят под сомнение выводы и результаты работы и не снижают положительной оценки диссертации.

Диссертация Вероники Евгеньевны Бисти является завершенной научной работой. Она охватывает многие вопросы физики многокомпонентных электронных систем, и, в особенности, те, которые были инициированы экспериментальными исследованиями или сами инициировали такие исследования. Результаты работ, включенных в диссертацию, опубликованы в профессиональных рецензируемых журналах, докладывались на многих международных конференциях и получили широкое признание. Автореферат правильно и достаточно полно отражает содержание диссертации.

Резюмируя, по актуальности тематики, обоснованности выводов, новизне и достоверности полученных результатов, диссертационная работа В.Е. Бисти «Коллективные возбуждения в многокомпонентных двумерных электронных системах» полностью отвечает критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук в соответствии с п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. (ред. от 01.10.2018), а ее автор, Бисти Вероника Евгеньевна, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-

математических наук по специальности 01.04.07 - физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент:



«14» мая 2021 года

Юдсон Владимир Исаакович

Доктор физико-математических наук по специальности 01.04.02 «теоретическая физика»,
главный научный сотрудник Лаборатории физики конденсированного состояния,
Факультет физики, Национальный исследовательский университет «Высшая школа
экономики»

E-mail: vyudson@hse.ru

Тел.: + 7 916 958 74 85

Адрес: 101000, Москва, ул. Мясницкая, д. 20.

Согласен на обработку персональных данных.



«14» мая 2021 года

Юдсон Владимир Исаакович

Подпись В.И. Юдсона удостоверяю:

Управление персонала НИУ ВШЭ



«14» мая 2021 года