

О Т З Ы В

официального оппонента

о диссертации А.С. Боголюбского “Квантовые гальваномагнитные эффекты в полупроводниковых гетероструктурах на основе HgTe и InGaAs”, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 – “Физика полупроводников”.

Физика полупроводников последних десятилетий фактически стала физикой полупроводниковых структур пониженной размерности. Исследования таких структур чрезвычайно интересны с научной точки зрения и перспективны для применений благодаря значительному прогрессу полупроводниковой технологии. Их малые размеры приводят к кардинальной перестройке энергетического спектра и к возникновению принципиально новых физических явлений, которые трудно, а зачастую невозможно наблюдать в объемных полупроводниках. Важнейшим объектом для этих исследований являются двумерные электронные системы (ДЭС). Это связано с тем, что в двумерных системах обнаружено много принципиально новых физических явлений таких как, например, целочисленный и дробный квантовые эффекты Холла. Существенно и то, что параметры ДЭС перестраиваются в широких пределах при изменении электронной плотности или приложении внешнего магнитного поля. Это делает двумерные электронные системы уникальным объектом для исследования многочастичных коллективных эффектов в твёрдом теле. Основные исследования этих эффектов были проведены для структур на основе GaAs. Другими уникальными материалами, привлекающими особый интерес исследователей, являются CdTe, HgTe (с нулевой запрещенной зоной), их сплавы, в которых возможна сильная перестройка ширины запрещенной зоны (вплоть до нуля) при изменении состава (материал с низким содержанием кадмия < 20%), а также квантово-размерные структуры на их основе.

Диссертационная работа А.С. Боголюбского посвящена как раз исследованиям квантовых гальваномагнитных эффектов в двумерных слоях теллурида ртути. В силу сказанного выше, **актуальность** тематики диссертации не вызывает сомнений.

Диссертация состоит из введения, семи глав и заключения. Список цитированной литературы включает 122 ссылки. Во **введении** дана общая характеристика работы: обоснована ее актуальность, объявлены цели и задачи работы, изложены новизна и практическая значимость полученных результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** дан краткий обзор методов определения параметров исследуемых структур и известных из литературы данных. Сформулированы нерешенные проблемы и обоснован выбор объекта исследований.

Вторая глава посвящена описанию методик экспериментальных исследований и методов анализа экспериментальных результатов. Приведены параметры исследуемых образцов. Обосновано использование квантового эффекта Холла для нахождения спектра уровней Ландау в двумерных системах со сложным законом дисперсии.

Третья глава посвящена исследованию продольного и холловского сопротивления в структуре HgTe/HgCdTe с широкой (20 нм) квантовой ямой в режиме целочисленного квантового эффекта Холла. По активационным температурным зависимостям продольного сопротивления определены щели подвижности и их зависимость от магнитного поля.

В **четвертой главе** приведены результаты измерений продольного и холловского магнетосопротивления в режиме осцилляций Шубникова - де Гааза. Обнаружен аномальный сдвиг фазы осцилляций магнетосопротивления на π в области вырождения по спине. Предложено объяснение, связывающее эту аномалию с превышением спинового расщепления уровней Ландау над циклотронной энергией.

В **пятой главе** представлено исследование осцилляций Шубникова - де Гааза в гетероструктуре HgCdTe/HgTe/HgCdTe с широкой (20.3 нм) квантовой ямой HgTe с инвертированным зонным спектром. По периоду осцилляций определена концентрация носителей заряда и показано ее хорошее согласие с концентрацией, найденной по эффекту Холла. По температурной зависимости амплитуды осцилляций Шубникова - де Гааза найдены значения эффективной массы. Обсуждаются расхождения величин эффективной массы, определенных в работах разных авторов. Установлено, что правильное значение эффективной массы может быть получено только в достаточно сильных магнитных полях, когда полностью снято перекрытие близлежащих уровней Ландау.

В **шестой главе** приведены результаты квазиклассических расчетов эффективной массы, а также спектра уровней Ландау валентной зоны квантовой ямы HgTe с инвертированной зонной структурой в модели «петли экстремумов», предложенной в работе Э.И. Рашбы и В.И. Шеки (ФТТ. 1959. Т. 2. С. 162.). Расчеты проведены как в изотропной модели, так и с учетом гофрировки.

В **седьмой главе** представлены результаты измерений продольного магнетосопротивления гетероструктур n-GaAs/InGaAs, когда магнитное поле направлено вдоль квантовой ямы перпендикулярно направлению тока. Обнаружен новый эффект - анизотропия магнетосопротивления в зависимости от направления тока. Эффект связывается с различным рассеянием на разных гетерограницах.

В **заключении** суммируются полученные в диссертационной работе научные результаты.

В целом, в диссертационной работе получен целый ряд **новых** результатов, интересных в **фундаментальном** отношении и перспективных для **практического** применения. **Достоверность** результатов основана на использовании апробированных экспериментальных методов и подтверждена согласием с расчетами.

Некоторые замечания по работе.

1. Первое замечание – общее. В диссертации практически не обсуждаются экспериментальные сложности, естественно возникающие при проведении опытов, и способы их преодоления автором. На самом деле, это часто встречающаяся недооценка экспериментаторами собственной изобретательности и важности экспериментальных деталей. Мне кажется, что диссертация – это именно то место, где эти детали можно изложить во всей полноте.

2. При определении энергетической щели между уровнями Ландау (гл. 3) желательно было бы учесть распределение электронной плотности в полосе локализованных состояний, а также температурную зависимость транспортного времени.

3. При интерпретации аномального сдвига фаз осцилляций магнетосопротивления (гл. 4) с помощью графика Берри желательно было бы обосновать пренебрежение минимумом при $\nu=6$.

4. Желательно определить (по возможности экспериментально) пространственный и энергетический масштаб флуктуаций потенциала, выяснить происхождение этих флуктуаций и их влияние на проводимость и гальваномагнитные эффекты.

5. Некоторые замечания по оформлению диссертации. Необходимо отметить следующие: известная лаконичность в описании экспериментов; недостаточная зачастую расшифровка аббревиатур; ссылки на формулы и рисунки из других работ, не приведенные в диссертации; почти повсеместное отсутствие указаний на долю x кадмия в сплаве HgCdTe. Хотя в целом диссертация написана ясно и хорошим языком, встречаются оригинальные обороты и выражения. Например, "волновые функции размерного квантования электронов" (с. 5, 21), значения g -фактора зависят от метода определения" (с. 6), "гальваномагнитные методы исследования", "гетероструктуры, имеющие холловскую геометрию" (с. 9), "спектр уровней ... стартует при $B=0$ " (с. 12), "магнитное поле толкает электроны" (с. 21), "высокоподвижные структуры" (с. 36), "вырождение спина" (с. 57).

Все эти замечания (за исключением 5) фактически являются пожеланиями к дальнейшему развитию работы и не снижают высокой оценки диссертационной работы в целом. Диссертация А.С. Боголюбского представляет собой законченную фундаментальную

научную работу в актуальном направлении физики полупроводников. Результаты работы опубликованы в ведущих научных журналах и известны по докладам на конференциях. Автореферат полно и правильно отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа А.С. Боголюбского полностью удовлетворяет всем требованиям п.9 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Боголюбский Андрей Сергеевич, безусловно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 – Физика полупроводников.

Официальный оппонент:

зав. лаб. электронных процессов в полупроводниковых материалах ИРЭ РАН,

доктор. физ.-мат. наук

(Мирон Соломонович Каган)

Специальность: 1.3.11 Физика полупроводников

Ученое звание: старший научный сотрудник

тел.: +7(495)6293361, e-mail: kagan@cplire.ru

Наименование организации: ФГБУН Институт радиотехники и электроники им.

В.А.Котельникова Российской академии наук

Адрес: 125009 Москва, ГСП-9, Моховая ул., 11, корп. 7

Сайт: www.cplire.ru; тел.: +7 (495) 629 3574; факс: +7 (495) 629 3678; e-mail: ire@cplire.ru

Отзыв удостоверяю

Ученый секретарь Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН

кандидат физ.-мат. наук



(И.И. Чусов)

3 ноября 2022 г.