

О Т З Ы В

официального оппонента

о диссертации А.С. Боголюбовского “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”.

Квантовые ямы и тонкие пленки на основе HgTe находятся в неослабевающем внимании физики конденсированного состояния уже более десяти лет. Эта популярность во многом связана с уникальными свойствами двумерных систем на основе HgTe и достижениями современной технологии молекулярно-лучевой эпитаксии, позволяющей создавать квантовые ямы CdTe/HgTe/CdTe контролируемой толщины с атомарно-гладкими интерфейсами. Комбинация инвертированного спектра объемного теллурида ртути с эффектами размерного квантования привело к реализации целого ряда новых двумерных систем, таких как двумерный полуметалл, система однодолинных безмассовых двумерных дираковских фермионов (ДДФ), двумерных и трехмерных топологических изоляторов (2Д и 3Д ТИ), причем переходы между ними определяются толщиной квантовой ямы. В частности, при толщине ямы 6.3-6.6 нм, наблюдается переход от прямого к инвертированному спектру, а при толщинах 14-18 нм - переход от спектра с энергетической щелью между зонами к перекрытию между ними, т.е. к полуметаллическому состоянию. Таким образом, квантовые ямы на основе HgTe являются новым универсальным полигоном по изучению явлений двумерной физики полупроводников.

Несмотря на прогресс, достигнутый в изучении и понимании свойств этих систем, до сих пор существуют пробелы в описании даже некоторых базовых свойств их электронного спектра. В частности, для квантовых ям в диапазоне толщин 18-22 нм существует достаточно противоречивая информация о величине эффективной массы электронов, полученная на разных образцах и разными методами, а также величины g-фактора. В валентной зоне противоречий между теорией и экспериментом еще больше, поскольку, в дополнение к проблемам с величиной эффективной массы, нет даже соответствия между предсказываемой (2-4, в зависимости от ориентации ямы и учета асимметрии интерфейсов) и измеряемой (1) величиной долинного вырождения.

Диссертация на 80% направлена на разрешение поставленных абзацем выше вопросов. Для этого автором использовались различные экспериментальные магнетотранспортные методики, основанные на эффекте осцилляций Шубникова-де Гааза и квантового эффекта Холла, дополненные расчетами электронного спектра в магнитном поле с помощью k-p метода на основе 8-зонного гамильтониана Латтинжера. Оставшиеся 20% диссертации посвящены не менее интересному магнетотранспортному эффекту сдвига волновой функции магнитным полем, приложенным параллельно плоскости квантовой ямы. Диссертация написана чистым и понятным языком. **Актуальность, новизна и достоверность** полученных данных не вызывает никаких сомнений.

Первая глава диссертации является введением, и в ней дан всесторонний обзор теории гальваномагнитных эффектов, и применение этой теории в реальных двумерных системах. Далее автор переходит к весьма подробному обзору современного состояния дел в изучении электронного спектра двумерного полуметалла в квантовых ямах HgTe и показана противоречивость экспериментальных данных о величине эффективной массы и g-фактора. Дальнейшие главы, кроме седьмой главы и заключения, посвящены квантовым ямам на основе HgTe толщиной порядка 20 нм. **Во второй главе** представлено описание экспериментальных установок, исследуемых образцов и методик анализа. **Третья глава** посвящена анализу активационной проводимости в квантовом эффекте Холла. Определены величины щели подвижности для нескольких факторов заполнения. Проведено сравнение с расчетом, выполненным по k-p методу. Показана сложная структура уровней Ландау и продемонстрировано хорошее соответствие теории и эксперимента. **В четвертой главе** проводится анализ экспериментально измеренных осцилляций Шубникова-де Гааза с точки

зрения проявления в них фазы Берри и приводится сравнение с дираковскими системами, такими как графен и однодолинные дираковские фермионы в квантовых ямах HgTe критической толщины. Показано, что в слабых полях наблюдается двукратное вырождение уровней Ландау и наблюдаются нечетные факторы заполнения, что в других системах может быть интерпретировано как проявление фазы Берри. Впрочем, автором дается честная ремарка, что исчезновение четных факторов заполнения в исследуемой системе при слабых полях связано с совпадением параметров циклотронного и Зеемановского расщепления, а не с фазой Берри. **Пятая глава** посвящена анализу температурных зависимостей осцилляций Шубникова-де Гааза в той же системе, при этом разделяются данные в слабых и сильных магнитных полях, разделение происходит по степени вырождения уровней Ландау. В сильных полях по скорости уменьшения амплитуды осцилляций с ростом температуры определена величина эффективной массы и g-фактора. В слабых магнитных полях, т.е. в условиях двукратно вырожденных уровней Ландау, определена только эффективная масса, которая оказалась в полтора раза меньше, чем в сильных полях, и этому дано объяснение в рамках модели перемешивания волновых функций разных подзон размерного квантования. **Шестая глава** является теоретической и посвящена расчету спектра валентной зоны квантовых ям HgTe. Показано, что в приближении изотропного спектра валентная зона описывается моделью "петли экстремума", т.е. потолок валентной зоны представляет собой не точку, а окружность в k-пространстве. Показано, что модель "петли экстремумов" дает качественно верное поведение уровней Ландау в магнитном поле, а добавление эффектов гофрировки приводит к формированию 4-х изолированных экстремумов, сливающихся в петлю по мере увеличения энергии. **Седьмая глава** не связана с теллуридом ртути и посвящена эффекту асимметричного рассеяния в квантовых ямах InGaAs при приложении магнитного поля, перпендикулярного к направлению протекания тока, но в плоскости структуры, за счет силы Лоренца. Показано, что предсказанный эффект наблюдаем и позволяет экспериментально определять более шероховатый интерфейс в квантовых ямах. **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.

Одним из основных достоинств диссертации является всесторонний литературный обзор и глубокий теоретический анализ наблюдаемых явлений, представленный как отдельно во введении, так и в каждой главе с экспериментальными результатами. Автор диссертации, Боголюбов А.С., не только безусловно владеет методиками расчета электронного спектра, но и понимает границы применимости, при этом не злоупотребляет им, что выгодно отличает его от многих других расчетчиков. В тексте неоднократно встречаются объяснения тех или иных наблюдаемых явлений "на пальцах", например, в рамках смещения волновых функций размерного квантования, что, с моей точки зрения, является индикатором истинного понимания физики. Вторым достоинством работы является комбинация различных экспериментальных методик (как минимум, трех!), примененная к одной и той же системе, что позволяет сравнить их возможности.

Диссертация не лишена и некоторых недостатков, состоящих в следующем:

1. Экспериментальное определение величины g-фактора изначально основано на предположении, что величина спинового расщепления превышает циклотронное (что, в свою очередь, следует из расчетов спектра). Несмотря на тот факт, что отсутствие четных факторов заполнения в осцилляциях Шубникова-де Гааза в слабых магнитных полях действительно указывает на близость этих величин, из эксперимента не следует, что спиновое расщепление превышает циклотронное.

2. Использование формулы Косевича-Лившица при анализе температурных зависимостей, основанной только на первой гармонике осцилляций Шубникова-де Гааза, в условиях большого спинового расщепления может давать неверный результат (в частности, первая гармоника просто зануляется при величине спинового расщепления, равной половине циклотронного). Не может ли быть малая величина определенной эффективной массы в слабых полях связана с этим

фактором? Хотелось бы увидеть анализ влияния следующих гармоник осцилляций на получаемые величины эффективной массы, либо объяснение незначительности этого эффекта.

3. Не понятна мотивация всей четвертой главы, т.е. анализа фазы осцилляций Шубникова-де Гааза. Насколько мне известно, анализ осцилляций Шубникова-де Гааза и КЭХ в условиях вырожденных уровней Ландау не может дать информации о фазе Берри, а является спекуляцией (о чем, к чести автора диссертации, и указано в конце главы). При этом фаза Берри, как поправка к положению уровней Ландау, может наблюдаться в виде фазы невырожденных осцилляций Шубникова-де Гааза только в условиях зафиксированного уровня Ферми, что может быть реализовано, например, в многокомпонентных системах с двумя видами носителей.

4. При обсуждении практической применимости эффекта анизотропного рассеяния за счет приложенного в плоскости структуры магнитного поля автор диссертации, по-видимому, хотелось бы упоминания достаточно давно открытого магнитогиротропного эффекта, состоящего в возбуждении постоянного тока под воздействием линейно поляризованного излучения в условиях приложенного параллельного плоскости структуры магнитного поля (см. например, *Semiconductor Science and Technology*, Vol. 23, 11).

Представленные замечания не являются существенными 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, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 – Физика полупроводников.

Старший научный сотрудник лаборатории

физики низкоразмерных электронных систем ИФП СО РАН,

кандидат. физ.-мат. наук



(Козлов Дмитрий Андреевич)

Подпись заверяю:

3 ноября 2022 г.



Козлова Д.А.
Удостоверяю
Заведующий Отделом кадров ИФП СО РАН
А.Золотарская

Информация об оппоненте:

Специальность: 1.3.11 Физика полупроводников

Ученое звание: без звания

тел.: +7(923)2331875, e-mail: dimko@isp.nsc.ru

Наименование организации: ФГБУН Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук.

Адрес: 630090, Россия, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 13.

Сайт: www.isp.nsc.ru; тел.: +7(383)330-90-55; e-mail: ifp@isp.nsc.ru

[Handwritten signature]
Ученый секретарь
ИФП СО РАН
Е.И. Жанникова

