О Т З Ы В

на диссертацию **Боголюбского Андрея Сергеевича**

"**Квантовые гальваномагнитные эффекты в полупроводниковых гетероструктурах на основе HgTe и InGaAs**", представленную на соискание ученой степени кандидата физико - математических наук по специальности 1.3.11 – физика полупроводников.

Диссертационная работа посвящена исследованию закономерностей магнитотранспортных характеристик низкоразмерных гетероэпитаксиальных структур HgTe/CdTe и InGaAs/GaAs с нанометровыми слоями HgTe и InGaAs. В широком диапазоне температур и магитных полей изучено поведение резонансных особенностей, наблюдаемых на магнитополевых зависимостях указанных гетерокомпозиций, и рассмотрены механизмы их обусловливающие. Основное внимание в работе уделено измерению и анализу Шубниковских осцилляций в системе HgTe / $Hg_{1-x}Cd_xTe$, и обсуждению особенностей проявления в данной системе смены электронных фаз и других эффектов, обусловленных перекрытием и обращением энергетических зон. В частности, на основании данных активационного анализа определены характерные энергии переходов между уровнями Ландау, и на их основе оценены значения эффективных масс носителей заряда и величины g-фактора в обращенной подзоне легких дырок.

Дополнительно в квазиклассической модели «петли экстремумов» автором диссертации получено аналитическое выражение для спектра уровней Ландау валентной зоны, Показано, что учет эффектов кубической симметрии приводит к довольно сложному поведению энергетического спектра дырок, характеризуемого аномальной, логарифмического вида, зависимостью циклотронной эффективной массы от энергии в окрестности седловых точек. Полученные экспериментальные значения эффективной массы носителей заряда и эффективного g-фактора в квантовой яме HgTe шириной 20 нм показали заметные разногласия с существующими теоретическими предсказаниями, а в ряде случаев, и с результатами экспериментов других авторов. Чрезвычайно сложный вид спектра энергетических уровней рассматриваемой системы, особенно в присутствие квантующего магнитного поля, делает весьма желательным проведение как можно большего объема измерений разнообразных характеристик структур Hg(Cd)Te, способствуя лучшему пониманию наблюдаемых закономерностей и построению более совершенных теоретических моделей.

Системы на основе полупроводниковых соединений с узкой запрещенной зоной, в данном случае In(Ga)As, также характеризуемых малой эффективной массой электронов и большой величиной g-фактора, на сегодняшний день получили широкое распространение при изготовлении высокоэффективных скоростных полевых транзисторов и при конструировании оптических лазеров. Несмотря на высокую степень завершенности большинства задач, касающихся физики квантовых напряженных гетероструктур на основе соединений A_3B_5, ряд вопросов все еще требует проведения дальнейших фундаментальных исследований. Особенно это касается проблем, связанных с совершенствованием технологии и выявлением разнообразных факторов, оказывающих влияние на явления переноса носителей заряда по слоям структуры. В связи с этим автором диссертации, в рамках отдельной небольшой главы, уделено также внимание изучению и анализу электронного магнитополевого транспорта в двумерных слоях напряженных гетероструктур n-InGaAs/GaAs, получаемых методом МОС гидридной эпитаксии. В рассматриваемых гетерокомпозициях важную роль играет структура интерфейсов, определяемая высокими скоростями роста слоев, влиянием упругих напряжений и спецификой накопления на поверхности продуктов пиролиза газов. Учет влияния возможной несимметричности выращиваемых квантовых слоев и неоднородного, относительно разных границ, их легирования, приводит к значительным трудностям при попытках объяснить с единых позиций всю совокупность наблюдаемых явлений, в частности, связанных с введением в квантовую яму дополнительного потенциального барьера.

Кратко обсудим основные результаты, полученные в диссертации.

В **первой главе** на базе обширного списка литературы дан краткий обзор современного состояния рассматриваемых в диссертации вопросов, касающихся магнитотранспортных характеристик ряда двумерных систем. Представлены известные из литературы аналитические выражения, позволяющие проводить анализ экспериментальных зависимостей в широком диапазоне магнитных полей и температур. Для понимания наблюдаемых особенностей магнитотранспорта в изучаемых напряженных квантовых гетероструктурах автором диссертации в данном разделе детально, хотя и в краткой форме, проанализированы основные результаты, полученные другими авторами. Особое внимание при этом уделено поведению далеко не тривиальных характеристик структур на основе сединений халькогенидов ртути, вызывающих уже длительное время повышенный интерес. Перечислены выполненные на рассматриваемых структурах разными авторами в разное время основные эксперименты с указанием существующих на сегодняшний день проблем и нестыковок по результатам измерений важнейших параметров материала (таких как эффективные массы носителей заряда и величина g-фактора).

Во второй главе диссертации приводится описание использованных автором методик измерения магнитотранспортных характеристик исследуемых образцов. Также указаны отдельные параметры изучаемых в диссертации гетероструктур. Какие - либо принципиально новые оригинальные методы в работе не рассматриваются, методика измерений достаточно давно аппробирована данным коллективом исследователей на различных материалах. В работе используются достаточно хорошо показавшие себя за прошедшие десятилетия методики измерений на образцах, выращенных в различных хорошо зарекомендовавших себя технологических группах, что обеспечивает достоверность полученных автором диссертации экспериментальных результатов. Явно не хватает в данном разделе диссертации, на мой взгляд, так это более детального описания характеристик использованных в экспериментах образцов.

Последующие главы, начиная с третьей главы диссертации, являются оригинальными и посвящены магнитотранспортным, в сильном магнитном поле, и температурным характеристикам гетероструктур HgTe/CdHgTe и InGaAs/GaAs. В связи со чрезвычайно высокой сложностью спектра энергетических уровней в слоях структуры HgTe/CdTe автор диссертации в первом параграфе третьей главы был вынужден уделить значительное внимание обзору существующих на сегодняшний день теоретических моделей, описывающих спектр носителей заряда в пленках HgTe. В обзоре на базе обширного списка литературы им проанализированы особенности энергетического спектра носителей заряда в тонких, нанометровой толщины, пленках HgTe, связанные с одновременным воздействием на электронную подсистему эффектов пространственного ограничения, упругих напряжений и магнитного поля и обусловливающих трансформацию системы из полуметаллического состояния в полупроводниковое с уменьшением толщины квантового слоя. Особое внимание, в связи с проводимыми экспериментами, диссертант уделил обсуждению спектра уровней Ландау в полуметаллических пленках HgTe в присутствие сильного магнитного поля. Одновременное действие двух близких по порядку величины механизмов расщепления уровней (орбитального и зеемановского) обусловливает трудности их идентификации и, как следствие, приводит к сложностям анализа поведения наблюдаемых Шубниковских осцилляций. В работе автор в магнитных полях до 9 Тл в диапазоне температур T = (2.9 – 50) K измерил и провел исследование активационной проводимости в областях плато квантового эффекта Холла (КЭХ) для системы $Cd_{1-x}Hg_xTe/HgTe/Cd_{1-x}Hg_xTe$ с инвертированной зонной структурой. Им с использованием ранее апробированного в данной исследовательской группе метода были расчитаны плотности состояний в щелях подвижности и определены энергии активации в режиме КЭХ для номеров пиков проводимости n = 1, 2 и 3. По полученным значениям энергетических щелей диссертантом были проведены оценки значения эффективной массы на уровне Ферми. Для исследуемой системы наблюдались также довольно высокие значения g-фактора (~80) электронов, существенно превышающие величину g-фактора, измеренную другими авторами в более слабых магнитных полях. Проведено сопоставление результатов эксперимента с результатами теоретических расчетов и сделан вывод о приемлемом совпадении результатов, найденных экспериментально и полученных численным методом.

В четвертой главе диссертации автор обсуждает магнитополевые зависимости, наблюдаемые в структурах со спектром электронов в широкой квантовой яме полуметаллического типа. Автором подмечены особенности Шубниковских осцилляций, а именно аномальный сдвиг фазы магнитоосцилляций для двукратно вырожденных квантовых уровней с большими номерами. Поведение последних, наряду с присутствием в спектре дополнительного невырожденного по спину нулевого уровня Ландау, делает рассматриваемую электронную систему в слоях HgTe подобной системе энергетических уровней в слоях графена. Соответственно теория в таких материалах, конкретно в безщелевых слоях HgTe толщиной более 18нм, предсказывает возможность появления краевых состояний, характерных для 2D топологического изолятора с нетривиальной фазой Берри. Результаты проведенного диссертантом для расматриваемых Hg(Cd)Te гетерокомпозий анализа зависимости положения пиков проводимости от их номера говорят в пользу возможности проявления в данной системе такой фазы. Автор, однако, не поддался соблазну объявить о наблюдении в данной топологически тривиальной системе соответствующей экзотической фазы, а тщательно проанализировал обнаруженный им эффект с разных позиций. Им было показано, что наблюдаемые закономерности являются следствием тривиального совпадения уровней с соседними номерами, характеризуемых близкими по энергии значениями орбитального и спинового расщепления квантовых состояний. Этому способствуют также большая величина g-фактора и специфические соотношения между параметрами Латтинжера в спектре энергий.

В пятой главе диссертации для широкой (20нм) квантовой ямы HgTe значения эффективных масс электронов определены из периода Шубниковских осцилляций в разных интервалах магнитных полей. Проведено сопоставление полученных значений как с результатами анализа активационных характеристик, найденных в режиме квантового эффекта Холла и представленных в разделе 3, так и с результатами других исследователей. Продемонстрировано значительное несовпадение (в полтора раза в области сильных магнитных полей, где снимается вырождение уровней, и в 2 раза в области более слабых полей, где уровни Ландау двукратно вырождены) полученных экспериментальных данных с выводами теории. Обсуждаются возможные причины расхождения результатов экспериментов и теории.

В **шестой главе** для квантовой ямы HgTe/HgCdTe с инвертированной зонной структурой рассмотрен энергетический спектр тяжелых дырок. Для проведения оценок при анализе экспериментов в связи с непростым видом спектра дырок в валентной зоне и сложностью проводимых расчетов автором диссертации разработана упрощенная квазиклассическая модель «петли экстремумов». На основе предложенной модели рассчитан спектр уровней Ландау и определена зависимость эффективной массы тяжелых дырок от энергии. Показано, что в данной модели спектр уровней Ландау стартует при нулевом поле B=0 с энергии, соответствующей энергии боковых максимумов валентной зоны, что вполне естественно, перекрываясь с веером уровней Ландау зоны проводимости. Учет эффекта гофрировки, выполненный в диссертационной работе, продемонстрировал для данной модели аномальный характер зависимости циклотронной массы от энергии электрона с логарифмической расходимостью в седловых точках.

Последняя **седьмая глава** посвящена обсуждению зависимости магнитосопротивления в квантовых ямах InGaAs от магнитного поля в несколько нестандартной геометрии (поперек как к направлению протекающего тока, так и нормали к плоскости слоя). Обнаружена явная зависимость магнитосопротивления от направления протекания тока. Эффект связывается с более эффективным взаимодействием электронов с рассеивающими центрами в окрестности той или иной границы квантовой ямы. Делается вывод о более низком качестве гетерограницы со стороны подложки, но четких указаний относительно механизма проявления данного эффекта не делается.

Из сказанного можно сделать вывод, что выбранная в диссертации тема исследования, направленная на применение гальваномагнитных методов для анализа характеристик носителей заряда в квантовых ямах узкозонных полупроводников и полуметаллов, представляется достаточно важной и нужной задачей. Выполненная работа не только повышает уровень наших знаний об электронных свойствах изучаемых гетерокомпозиций, но и способствует развитию соответствующей ростовой технологии, используемой для выращивания плоскослоистых

планарных напряженных гетероструктур на базе современных материалов. В процессе выполнения работы диссертант не только показал хорошее знание современной проблематики и владение низкотемпературными методиками измерений, но и умение проводить соответствующий анализ наблюдаемых экспериментальных зависимостей. Автор показал также отличное знание литературы, что позволило ему не только проанализировать результаты выполненных экспериментов на качественном уровне, но в ряде случаев провести также количественный анализ полученных результатов и сопоставить их с результатами других авторов. Выполненные автором диссертации эксперименты проведены с использованием современного оборудования на апробированных образцах. Расчеты выполнены с использованием хорошо зарекомендовавших себя на практике методик, что не дает оснований сомневаться в достоверности полученных результатов.

Необходимо высказать ряд замечаний к диссертационной работе, возникшие при ее прочтении.

1. Информация, представленная по характеристикам использованных в экспериментах образцов (по одному образцу в каждой серии), довольно скудна и базируется на голословных утверждениях со ссылкой на работы других авторов, где впрочем также отсутствует информация по тестированию образцов соответствующими конкретными методами, например, такими как TEM, Raman, SIMS и др. Хотелось бы иметь более полную информацию как о структурных характеристиках слоев, формирующих транспортные каналы, так и их границ. В частности, в диссертации совершенно не обсуждается характер деформации слоев структуры. Утверждается только, что решетка HgTe соответствует решетке CdTe, то есть деформация предполагается весьма незначительной из-за близости постоянных решеток контактирующих материалов. В то же время исследования показывают, что влияние деформации на спектр электронов и дырок в слоях HgTe весьма существенно. В связи с этим вполне естественно предположить, что напряжения, проявляющиеся в слоях структуры, в значительной степени могут быть обусловлены и влиянием подложки, а точнее степенью релаксации напряжений на границе буферного слоя CdTe и подложки GaAs, характеризуемых значительным несоответствием постоянных решеток.

2. Важным также является и характер расплывания состава в окрестности гетерограниц. Уширение границ и связанная с ним шероховатость интерфейсов может иметь место как вследствие проявления стандартных механизмов, обусловленных сегрегацией и диффузией атомов, так и вследствие причин, связанных с конструктивными особенностями ростовой установки. Отклонение формы потенциала в яме от прямоугольной вследствие возможного расплывания состава тройного соединения в окрестности границ, особенно в случае предельно тонких слоев, также может сказаться на результатах расчета характеристик спектра электронов.

3. При проведении оценок результатов измерений, претендующих на получение более точных значений важнейших параметров материала, какими являются энергетические промежутки между уровнями Ландау, эффективные массы носителей заряда, энергия спинового расщепления, которые ранее уже неоднократно изучались разными методами в других измерительных группах, важное значение приобретает методика расчета, используемая для анализа экспериментальных данных. Большинство выводов настоящего исследования основано на использовании спектра энергетических уровней аналогичной квантовой ямы HgTe (рисунок 3.1), полученного в работах [67,68]. При использовании данных расчетов для анализа результатов проводимых экспериментов также не мешало бы указать параметры системы, которые были использованы при вычислениях. Критичными параметрами, оказывающими заметное влияние на положение уровней энергии в системе, кроме толщины рабочего слоя являются также величины разрывов зон на гетерограницах, степень упругой деформации слоев, форма потенциала в яме. В диссертации по этим вопросам нет никаких разъяснений. В то же время в литературе полученные результаты, например, для энергии разрыва валентной зоны на границе между HgTe и CdTe, довольно противоречивы. У разных авторов энергия разрыва зон варьируется в пределах от 0.25 до 0.75 эВ.

4. Автором диссертации с использованием разных методов, активационного и из периода Шубниковских осцилляций, рассчитаны плотности состояний в щелях подвижности, определены энергии активации в режиме КЭХ для n = 1, 2 и 3 и значения электронной эффективной массы.

Продемонстрировано значительное несовпадение эффективной массы электронов (в полтора раза раза в области сильных магнитных полей, где снимается вырождение уровней, и в два раза в области более слабых полей, где уровни Ландау двукратно вырождены), полученной в ходе проведенных экспериментов, с результатами теории. Объяснение наблюдаемого несовпадения путем аппелляции к зависимости эффективной массы от механизмов рассеяния в инверсионных каналах Si на мой взгляд не правомерно с связи большой шириной запрещенной зоны последнего и многодолинного характера его энергетического спектра. Было бы более естественным провести сопоставление полученных результатов с соответствующими закономерностями, наблюдаемыми в узкозонных соединениях A_3B_5, в том числе полученных более прямыми методами, например, методом квантового циклотронного ризонанса.

5. Один из результатов, полученных в диссертации, касается расчета в модели «петли экстремумов» веера уровней энергии электронов и дырок. Результаты проведенных расчетов сопоставляются с расчетами, выполненными разными авторами в рамках k-p модели (рис.6.2). При этом наблюдается несколько иная ситуация – вееры уровней Ландау дырок и электронов в слабом магнитном поле не пересекаются, что никак в диссертации не обсуждается. Кроме того, автор, основываясь на предложенной квазиклассической модели, делает вывод, что с ростом концентрации дырок их эффективная масса должна довольно сильно расти по логарифмическому закону (примерно на порядок величины от ее значения 0.2 m_0 в окрестности потолка валентной зоны). В эксперименте (см., например, Г.Миньков и др. Rhys Rev B (2017)) рост действительно наблюдается, но не столь сильный. Автор утверждает о возможности использования результатов педложенной модели, в частности, найденной зависимости массы дырок от энергии, для анализа проводимых экспериментов. Но для этого хорошо было бы предварительно убедиться в корректности модели путем ее сопоставления с соответствующими результатами уже проведенных измерений и с результатами расчетов на базе более точных моделей. Этого, однако, автором диссертации проделано не было, хотя соответствующие зависимости можно найти в литературе.

6. Относительно подмеченной в диссертации зависимости магнитосопротивления в квантовых ямах InGaAs от лежащего в плоскости слоя магнитного поля можно высказать следующее замечание. Наблюдаемая асимметрия проводимости при смене направления протекающего по структуре тока связывается со смещением волновой функции электронов в симметричной квантовой яме к той или иной границе слоя. Смещение к границе слоя со стороны подложки приводит к более низким значениям проводимости, что говорит о более низком качестве этой границы по сравнению с интерфейсом у внешней поверхности. Однако автором не учитывается влияние приповерхностного потенциала, который изначально предполагает изменение формы ямы, обусловливая даже для идеальной структуры нарушение симметрии потенциала ямы. Легирующие δ-слои в потенциале треугольной формы находятся на разном расстоянии от противоположных сторон транспортного канала, что должно сказаться на транспортных характеристиках даже в отсутствие магнитного поля. Это особенно относится к выбранному для проведения измерений образцу с широким практически непрозрачным для электронов (7nm) внутренним туннельным барьерным слоем. Очевидно, что высказанные на основе проведенных измерений предположения о разных свойствах противоположных границ слоя требуют проведения более тщательного анализа, и не на одном образце (тем более, что автор располагал серией из трех образцов с близкими характеристиками, но разной толщиной промежуточного барьерного слоя).

В заключение хочу отметить, что результаты, полученные в диссертации Боголюбского А.С., представляются достаточно актуальными и востребованными, так как развивают наши представления о характере энергетического спектра носителей заряда в гетероэпитаксиальных структурах со слоями HgTe. Основные результаты выполненной диссертантом работы опубликованы в общедоступных научных журналах, доложены на представительных конференциях и совещаниях и хорошо известны научной общественности. Андрей Сергеевич продемонстрировал свое мастерство, как физик, который не только владеет современной техникой измерений, но и хорошо понимает состояние дел в обсуждаемой им области знаний и умеет

проводить оценки с использованием современных теоретических моделей. Высказанные выше замечания не снижают научной ценности проделанной автором диссертации работы. Считаю, что автор представленной диссертации, Боголюбский А.С., внес достойный вклад в развитие соответствующей области знаний, продемонстрировав высокую эрудицию и способность самостоятельного проведения исследований на высоком уровне.

По актуальности темы, по обоснованности выводов, новизне положений и достоверности полученных результатов представленная работа отвечает требованиям п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней в УРФУ», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Боголюбский Андрей Сергеевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 – физика полупроводников.

Я, Орлов Лев Константинович, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент -
ведущий научный сотрудник Института
физики микроструктур – филиала Федерального
исследовательского центра Институт
прикладной физики Российской
академии наук
доктор физико- математических наук Орлов Л.К.

Подпись Орлова Л.К. заверяю
Начальник ОК ИФМ РАН Осипенко М.Л.

«26» октября 2022 г.

Контактная информация: Институт физики микроструктур РАН – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук», 603087, Нижегородская область, Кстовский район, д. Афонино, ул. Академическая, д.7,

тел. 8 (831) 4601931, E-mail: orlov@ipm.sci-nnov.ru /