

ОТЗЫВ

официального оппонента Ольшанецкого Евгения Борисовича на диссертационную работу Попова Михаила Рудольфовича «Квантовый эффект Холла в одиночных и двойных квантовых ямах на основе теллурида ртути», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 - Физика полупроводников

Актуальность диссертационной работы

Теллурид ртути является хорошо известным полупроводником с нулевой запрещенной зонной, в котором сильное спин-орбитальное взаимодействие приводит к инверсии зонного спектра. Пик его интенсивного экспериментального и теоретического исследования приходится в основном на 60-70 годы двадцатого столетия. Новая волна интереса к этому полупроводнику, а, точнее, к квантовым ямам на его основе, обусловлена экспериментальным наблюдением в 2007 году в квантовой яме HgTe состояния двумерного топологического изолятора, незадолго до этого предсказанного теоретически. Это открытие сделало квантовые ямы HgTe в последние годы одним из наиболее популярных объектов в физике низкоразмерных систем. Последующие исследования свойств квантовой ямы теллурида ртути показали, что в зависимости от ее толщины на ее основе может быть реализован широкий спектр двумерных электронных систем: при толщинах ниже критической - обычный изолятор с нормальным законом дисперсии, при критической толщине ямы - бесщелевая система двумерных дираковских фермионов – своеобразный аналог монослойного графена, а также, при толщине выше критической, - двумерный топологический изолятор и двумерный полуметалл – системы с инвертированным зонным спектром. Указанное многообразие становится еще большим при переходе от одиночных ям HgTe к системам, содержащим, например, двойные ямы различной толщины. Наличии туннельной связи между квантовыми ямами приводит к разнообразным и интересным модификациям энергетического спектра, проявляющихся в транспорте подобных систем иногда весьма необычным и неожиданным образом. Все это делает квантовые ямы HgTe интереснейшим объектом для исследования.

Поэтому высокая научная актуальность диссертационной работы М.Р. Попова, посвященной экспериментальному исследованию транспортных свойств систем на основе квантовых ямы HgTe не вызывает сомнений.

Диссертационное исследование М.Р. Попова является в полной мере современным и практически востребованным.

Общая характеристика работы

Диссертация, организованная по традиционной схеме, состоит из введения, двух вводных и четырех основных глав, заключения и списка использованной литературы.

Во введении автором сформулированы цели и задачи исследования, раскрыта актуальность темы, обозначены научная новизна исследования, его теоретическая и практическая значимость и представлены положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены особенности бесщелевых полупроводников и описан их энергетический спектр. Обсуждаются свойства одиночных и двойных квантовых ям HgTe. Дается обзор квантового эффекта Холла как в двумерных электронных системах в целом, так и его особенностей в квантовых ямах HgTe. Обсуждается теория скейлинга в режиме квантового эффекта Холла (КЭХ).

Во второй главе обсуждаются основные характеристики использованных в экспериментальных исследованиях квантовых ям HgTe и образцов, изготовленных на их основе. Описана технология их изготовления, включающая литографию и нанесение электростатического затвора. Дано описание измерительных установок, на которых проводилась экспериментальная работа.

В третьей главе представлены результаты исследований фазовых переходов в режиме КЭХ в квантовой яме HgTe с инвертированным энергетическим спектром. Для описания наблюдаемого в эксперименте перехода между целочисленными заполнениями уровней Ландау $\nu=1 \rightarrow \nu=2$ с критическим значением $\nu_c=1.5$ используется теория скейлинга, основанная на предположении о расходимости по степенному закону длины локализации $\xi(E)$, по мере того, как энергия электрона E приближается к критической энергии $E = E_c$ фазового перехода в центре уширенного уровня Ландау: $\xi(E) \sim |E - E_c|^{-\gamma}$ где γ - критический индекс длины локализации. Вводится понятие ширины полосы делокализованных состояний в центре уровня Ландау при конечной температуре, определяемой из условия $\xi(E) \geq L_\phi$, где $L_\phi \sim T^{-p/2}$ - длина фазовой когерентности. Из этого следует теоретический вывод, что ширина перехода между соседними плато КЭХ, должна стремиться к нулю по степенному закону $\nu_0 \sim T^\kappa$, где $\kappa = p/2\gamma$. Определенное из эксперимента

значение показателя степени $\kappa = 0.54 \pm 0.01$ находится в хорошем согласии с экспериментальными данными для систем с крупномасштабным примесным потенциалом

В четвертой и пятой главах приводятся результаты исследования магнетотранспорта в структурах с двойной квантовой ямой HgTe. Важной особенностью этих структур является то, что, с одной стороны, составляющие их квантовые ямы имеют большую толщину $d=20.3$ нм, а, с другой, то, что из-за значительной (6-10 нм) ширины барьера между ямами туннельная связь между ними является слабой. Последнее обстоятельство означает, что энергетический спектр в каждой из составляющих структуру квантовых ям остается примерно таким же, как в одиночной яме той же толщины, где, как известно, он соответствует полуметаллическому состоянию, вызванному перекрытием минимума зоны проводимости, расположенного в центре зоны Бриллюэна, с боковыми максимумами валентной зоны. **Четвертая глава** посвящена в основном определению подвижности и концентрации носителей заряда разных типов, присутствующих структуре при различных затворных напряжениях, для чего используется несколько методик: сравнение магнетотранспорта в слабых полях с классической моделью Друде, Фурье-анализ магнетопольных осцилляций, анализ особенностей поведения КЭХ. **В пятой главе** автор продолжает анализ магнетотранспорта, используя подход, при котором зависимость уровней Ландау от магнитного поля в исследуемых структурах представляется в виде суммы веерных диаграмм уровней Ландау от каждой ямы по отдельности, сдвинутых относительно друг друга по энергии на величину, зависящую от затворного напряжения. Автор делает вывод о высокой эффективности этого метода для описания различных особенностей магнетопольных зависимостей холловского сопротивления во всем исследованном диапазоне затворных напряжений, включая наблюдаемое «возвратное» знакопеременное поведение $\rho_{xy}(B)$ при промежуточных значениях напряжения на затворе.

В шестой главе продолжается обсуждение магнетотранспортных свойств двухслойных структур на основе КЯ HgTe с шириной, в данном случае, 6.5 и 8.5 нм. В частности, интересные результаты получены для структуры, состоящей из двух КЯ с шириной близкой к критической $d=6.5$ нм, в которых, как известно реализуется бесщелевая система двумерных дираковских фермионов. Кроме того, в силу небольшой (~ 3 нм) толщины барьера, туннельная связь между ямами приводит к существенной модификации спектра такой двухслойной структуры по сравнению со спектрами исходных КЯ. Подобная структура является неким аналогом двухслойного графена с некоторыми важными отличиями – такими, как, например, присутствие в

спектре боковых максимумов валентной зоны с высокой плотностью состояний. Одной из наиболее ярких особенностей такой системы является немонотонная «возвратная» зависимость $\rho_{xy}(B)$ в окрестности факторов заполнения $\nu=1$ и $\nu=2$ целочисленного КЭХ. Наблюдаемая особенность объясняется совокупностью факторов, связанных со сложной структурой энергетического спектра исследуемой системы в магнитном поле.

В заключении сформулированы основные выводы диссертационной работы.

По содержанию диссертации имеются следующие **замечания**:

1. В третьей главе анализ поведения образца в режиме КЭХ с использованием скейлинговой модели приводит автора к выводу о крупномасштабном характере рассеивающего потенциала. Как известно в справедливости подобного вывода легко убедиться из сравнения величин квантового и транспортного времени рассеяния, - в данном случае последнее должно существенно превосходить первое. Была ли проведена подобная проверка?

2. В четвертой главе речь идет о двухслойных структурах, в которых, из-за значительной толщины барьера, разделяющего квантовые ямы HgTe, их туннельная связь является слабой, а значит имеет место параллельная проводимость по двум ямам, обладающим невозмущенным спектром, соответствующим спектру одиночной ямы. К сожалению, это важное для понимания приведенных экспериментальных данных обстоятельство в главе никак не отмечено. Об этом упоминается лишь в пятой главе, где речь, судя по всему, идет о тех же структурах.

3. В четвертой главе классическая модель проводимости Друде модифицированная для случая трех различных типов носителей заряда используется для описания поведения системы в интервале магнитных полей до 10 Т. В окрестности высокополевой границы этого интервала условие применимости модели Друде $\mu B \leq 1$ нарушается даже для самой низкоподвижной группы носителей. Является ли правомерным использование данной модели в таком случае?

4. Есть замечания по языку. Текст диссертации написан несколько небрежно. Встречаются некорректно построенные фразы, странные обороты: «Первым звоночком является сдвиг вниз фундаментальных значений КЭХ...», стр.60.

Отмеченные недостатки и замечания не влияют на общую положительную оценку работы и не снижают её высокого научного уровня. В целом, диссертация Попова М.Р. по **актуальности** темы, **новизне** и **практической значимости** полученных результатов, **достоверности** и **обоснованности** сформулированных научных положений и выводов не

вызывает никаких сомнений. Диссертационная работа соответствует научной специальности 1.3.11. Физика полупроводников.

Считаю, что диссертационная работа «Квантовый эффект Холла в одиночных и двойных квантовых ямах на основе теллурида ртути» представляет собой законченное научное исследование и полностью **отвечает требованиям** п. 9 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а Попов Михаил Рудольфович **заслуживает** присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 - физика полупроводников.

Официальный оппонент

Ольшанецкий Евгений Борисович

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории №26, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук

«15» ноября 2023 г.

Е.Б. Ольшанецкий

Подпись Ольшанецкого Е.Б. удостоверяю

Ученый секретарь

Контактные данные:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 630090, г. Новосибирск, проспект Лаврентьева, д. 13, тел. +7(913) 7541833, e-mail: eolsh@isp.nsc.ru