

Отзыв

официального оппонента 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. Диссертационная работа М.Р.Попова посвящена исследованиям электронного транспорта в гетероструктурах с одиночными и двойными квантовыми ямами HgTe/CdHgTe. Такие структуры в последние годы вызывают повышенный интерес исследователей во всем мире в связи с их замечательными свойствами. В зависимости от ширины квантовой ямы в ней может реализовываться либо нормальная (для узких ям) либо инвертированная последовательность зон. Квантовые ямы с инвертированной зонной структурой являются двумерными топологическими изоляторами, на краю которых возникают защищенные от рассеяния одномерные транспортные каналы. При дальнейшем увеличении ширины квантовых ям имеет место перекрытие валентной зоны и зоны проводимости и возможно возникновение полуметаллического состояния. Двойные квантовые ямы HgTe/CdHgTe, исследование которых только начинается, обладают еще большим разнообразием фазовых состояний. В этой связи поставленная в диссертационной работе задача исследования квантового эффекта Холла в таких структурах с целью выявления особенностей их нетривиальной зонной структуры несомненно является актуальной.

Диссертация состоит из введения, обзорной и методической глав, четырех оригинальных глав, заключения и списка литературы. Полученные в диссертационной работе результаты опубликованы в 6 статьях в ведущих зарубежном и российских журналах.

Новизна результатов. В работе получен ряд новых научных результатов. Приведем лишь некоторые из них, представляющиеся наиболее важными и интересными.

В широкой (20 нм) одиночной квантовой яме HgTe/CdHgTe на основе исследований магнитотранспорта в широком интервале температур сделан вывод о крупномасштабном характере примесного рассеяния на ионизованных донорах в селективно легированных барьерных слоях CdHgTe.

Наиболее интересными и значимыми представляются результаты исследования двойных квантовых ям HgTe/CdHgTe. Диссертант и его научный руководитель были первыми, кто обратились к этой богатой на аналогии физической системе. В гетероструктурах с двумя широкими квантовыми ямами

продемонстрировано, что величина перекрытия зоны проводимости с боковыми максимумом валентной зоны может регулироваться с помощью затворного напряжения. В гетероструктуре с двумя квантовыми ямами HgTe с толщинами близкими к критической (6,5 нм), разделенными туннельно прозрачным барьером CdHgTe, являющейся неким аналогом двуслойного графена, обнаружен «возвратный» квантовый эффект Холла. Выполненные детальные исследования магнитотранспорта позволили установить природу этого эффекта и связать его с особенностями зонной структуры: наличием двух расщепленных вследствие асимметрии системы дырочноподобных «нулевых» уровней Ландау ($n = -2$), наличием электроноподобного «нулевого» уровня Ландау ($n = 0$), относящегося к валентной зоне и «пиннингом» уровня Ферми вблизи энергии бокового максимума валентной зоны с большой плотностью состояний в широком интервале концентраций дырок.

Наконец, в гетероструктуре с двумя квантовыми ямами HgTe большей толщины (8.5 нм), разделенными туннельно прозрачным барьером CdHgTe, (структура с двойной инверсией состояний) обнаружено резкое возрастание холловского сопротивления практически до 1 (в единицах h/e^2), указывающая на малость концентрации дырок в центральном максимуме в Γ -точке зоны Бриллюэна, расположенного близко по энергии к боковому максимуму валентной зоны.

Достоверность основных результатов работы не вызывает сомнений. Используются современные хорошо известные высокоточные экспериментальные методики. Экспериментальные исследования проводились как в ИФМ УрО РАН, так и в известных зарубежных лабораториях. Автором применялись надежные и хорошо апробированные методы численных расчетов. Интерпретация полученных экспериментальных результатов, базирующаяся на обоснованных физических моделях, согласуется с существующими теоретическими представлениями и доступными литературными данными.

Научная и практическая значимость работы несомненна. Исследования автора расширили понимание фундаментальных закономерностей целочисленного квантового эффекта Холла, проявляющихся в нетривиальной системе одиночных и особенно двойных квантовых ям HgTe/CdHgTe с инверсией зон и наличием «аномальных» нулевых уровней Ландау. Практическая значимость полученных результатов связана с возможностью создания на основе гетероструктур с квантовыми ямами HgTe/CdHgTe более доступного по сравнению с существующим (GaAs/AlGaAs, $T = 1,5$ К, $B = 12$ Тл) эталона сопротивления. Малость эффективных масс электронов и, соответственно, большие расстояния между уровнями Ландау позволяют реализовывать фундаментальные плато квантового эффекта Холла при $T = 4,2$ К в магнитных полях порядка 1 Тл, получаемых с помощью постоянных магнитов.

Замечания и вопросы.

1. В разделе «Методология и методы исследования» (стр.9) упоминается «уникальная методика проведения эксперимента в наклонных магнитных полях». Здесь, во-первых, не вполне понятно, в чем заключается уникальность, если

возможность наклона образца предусмотрена, насколько мне известно, в используемом коммерческом криостате. Во-вторых, в тексте диссертации не приведены результаты измерений в наклонных магнитных полях. Упоминания о них есть в подписи к Рис.6.1, но на самом рисунке соответствующих кривых (которые были на рисунке в журнальной публикации) нет!

2. На стр.5 и в других местах работы говорится, что при критической толщине квантовой ямы HgTe происходит «касание» дна зоны проводимости и вершины валентной зоны. Все-таки в математике и других точных науках этот термин занят, и о касании уместно говорить применительно к энергетическому спектру типа двуслойного графена, когда касаются вершинами две параболы, а не два конуса углами.

3. В положениях, выносимых на защиту, говорится об осцилляциях края валентной зоны при изменении магнитного поля, а на стр.73 об «осциллирующем поведении вершины профиля подзоны в зависимости от квантующего магнитного поля». Непонятно о чем идет речь, вводятся какие-то новые термины. В квантующем поле энергетический спектр описывается совокупностью уровней Ландау, энергия некоторых в валентной зоне действительно немонотонно зависит от магнитного поля.

4. Некоторым преувеличением представляется утверждение, что «Квантовый эффект Холла является ... эффективным методом экспериментального исследования спектра носителей в двумерных (2D) системах». Во-первых, квантовый эффект Холла наблюдается только в 2D системах, его проявление в 3D системах – большая экзотика. А во-вторых, универсальность квантового эффекта Холла (КЭХ) как раз и состоит в том, что квантование сопротивления, будучи оно наблюдается, не зависит от вида 2D системы ибо кратность вырождения всех уровней Ландау одинакова. Поэтому из измерений КЭХ никак нельзя восстановить спектр уровней Ландау (стр.29), не привлекая другие методы и расчеты.

5. Вызывает недоумение «упрощенная схема наложения электронного и дырочного вееров уровней Ландау» на Рис.4.3 очевидно для рассматриваемой квантовой ямы с инверсией зон, которая противоречит в частности Рис.5.3. При инверсии зон меняется «принадлежность» двух «нулевых» уровней Ландау: «электронный» уровень $n = 0$ уходит в валентную зону, а «дырочный» уровень $n = -2$ – в зону проводимости.

6. Результаты глав 4 и 5 опубликованы в авторской работе 3, а не в работах 2,3, как указано на стр. 72 и 84 соответственно.

7. Неточно указан ряд ссылок, например, на стр. 27 указана ссылка на работу Клитцинга [19], а должна быть [31], на стр. 31 дана ссылка [36] на обзор, а должна быть [35]. В списке литературы присутствует множественное повторное цитирование. Так на англоязычную книгу И.М.Цидильковского даны ссылки [9] и [22], а на русскоязычный вариант еще и [19]. Ссылка [85] повторяет [2], [100] - [87], а [101] - [88]. Автореферат в целом верно отражает содержание диссертации, но складывается впечатление, что перепутаны вообще все ссылки на литературу.

Указанные замечания не являются принципиальными и не влияют на общую

достаточно высокую оценку работы.

Оценивая диссертацию в целом, следует отметить высокий научно-методический уровень выполнения работы, внимание автора к деталям эксперимента, большой объем проведенных экспериментальных исследований, новизну полученных результатов. В диссертации М.Р.Попова решен ряд научных задач, имеющих значение для развития физики полупроводников. Работа является цельным и законченным исследованием. Основные результаты диссертация опубликованы в ведущих научных журналах, представлялись на российских и международных конференциях.

Таким образом, диссертация Попова Михаила Рудольфовича является законченной научно-исследовательской работой, выполненной на актуальную для современной физики полупроводников тему, и полностью удовлетворяет требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ, а он сам несомненно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 «Физика полупроводников».

Официальный оппонент

Гавриленко Владимир Изяславович
доктор физико-математических наук, профессор
заместитель директора по научной работе
Институт физики микроструктур РАН – филиал
Федерального государственного бюджетного
научного учреждения «Федеральный исследовательский
центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова
Российской академии наук» (ИФМ РАН)
603087, Нижегородская обл., Кстовский район,
д. Афонино, ул. Академическая, д. 7.
Адрес сайта: <http://www.ipmras.ru/>
E-mail: gavr@ipmras.ru
Тел.: +7 (831) 417-94-62

Согласен на обработку персональных данных.

21.11.2023

Подпись Гавриленко В.И. заверяю.

Ученый секретарь ИФМ РАН

к.ф.-м.н.

21 ноября 2023 г.

Д.М. Гапонова