РЕШЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА УрФУ 1.3.04.16 ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

от «30» ноября 2023 г. № 3

о присуждении Попову Михаилу Рудольфовичу, гражданство Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Квантовый эффект Холла в одиночных и двойных квантовых ямах на основе теллурида ртути» по специальности 1.3.11. Физика полупроводников принята к защите диссертационным советом УрФУ 1.3.04.16 «23» октября 2023 г., протокол № 2.

Соискатель, Попов Михаил Рудольфович 1990 года рождения, в 2013 году окончил Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по направлению подготовки 011200 Физика; в 2017 году окончил очную аспирантуру Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния; был прикреплен в качестве соискателя ученой степени кандидата наук к ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по специальности 1.3.11 – Физика полупроводников с 18.05.2023 по 17.11.2023 для сдачи кандидатского экзамена; работает в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук в лаборатории полупроводников и полуметаллов в должности старшего научного сотрудника.

Диссертация выполнена в лаборатории полупроводников и полуметаллов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского

отделения Российской академии наук, Минобрнауки России.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук Якунин Михаил Викторович, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, лаборатория полупроводников и полуметаллов, главный научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

Гавриленко Владимир Изяславович, доктор физико-математических наук, профессор, Институт физики микроструктур РАН - филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук", заместитель директора по научной работе;

Ольшанецкий Евгений Борисович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук (г. Новосибирск), Лаборатория №26, старший научный сотрудник;

Иконников Антон Владимирович, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», физический факультет, кафедра общей физики и физики конденсированного состояния, старший научный сотрудник;

дали положительные отзывы о диссертации.

Соискатель имеет 26 опубликованных статей, в то числе по теме диссертации – 6, все в рецензируемых научных изданиях и проиндексированы в международных базах цитирования Scopus и Web of Science. Общий объем опубликованных работ по теме диссертации – 3,13 п.л., авторский вклад – 0.46 п.л.

Наиболее значительные научные работы по теме диссертации:

статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ:

1. Temperature scaling in the quantum-Hall-effect regime in a HgTe quantum well with an inverted energy spectrum / Yu. G. Arapov, S. V. Gudina, V. N. Neverov, S. M. Podgornykh, M. R. Popov, G. I. Harus, N. G. Shelushinina, M. V. Yakunin, N. N. Mikhailov, S. A. Dvoretsky // Semiconductors. — 2015. — V. 49, № 12 — P. 1545—1549; 0,31 п.л. / 0,05 п.л. (Scopus, WOS).
2. HgTe/CdHgTe double quantum well with a spectrum of bilayer graphene and peculiarities of its magnetotransport / M. V. Yakunin, S. S. Krishtopenko, S. M. Podgornykh, M. R. Popov, V. N. Neverov, N. N. Mikhailov, S. A. Dvoretsky // JETP Letters. — 2016. — V. 104, № 6 — P. 403—410; 0,5 п.л. / 0,07 п.л. (Scopus, WOS).
3. Magnetotransport in double quantum well with inverted energy spectrum: HgTe/CdHgTe / Yakunin M.V., Suslov A.V., Popov M.R., Novik E.G., Dvoretsky S.A., Mikhailov N.N. // Physical Review B. — 2016. — V. 93, № 8 — 85308; 0,88 п.л. / 0,15 п.л. (Scopus, WOS).
4. On the Thermal Activation of Conductivity Electrons in a p-Type HgTe/CdHgTe Double Quantum Well with HgTe Layers of Critical Width / S. M. Podgornykh, M. V. Yakunin, S. S. Krishtopenko, M. R. Popov, N. N. Mikhailov, S. A. Dvoretskii // Semiconductors. — 2019. — V. 53, № 7 — P. 919—922; 0,25 п.л. / 0,04 п.л. (Scopus, WOS).
5. Unconventional reentrant quantum Hall effect in a HgTe/CdHgTe double quantum well / M. V. Yakunin, S. S. Krishtopenko, W. Desrat, S. M. Podgornykh, M. R. Popov, V. N. Neverov, S. A. Dvoretsky, N. N. Mikhailov, F. Teppe, B. Jouault // Physical Review B. — 2020. — V. 102, № 16 — 165305; 0,63 п.л. / 0,08 п.л. (Scopus, WOS).
6. Features of Magnetotransport in a HgTe/CdHgTe Double Quantum Well with an Intermediate Degree of Band Inversion / M. V. Yakunin, V. Ya. Aleshkin, S. M. Podgornykh, V. N. Neverov, M. R. Popov, N. N. Mikhailov, S. A. Dvoretsky // JETP Letters. — 2022. — V. 116(6). — P. 385—393; 0,56 п.л. / 0,07 п.л. (Scopus, WOS).

На автореферат поступило 4 положительных отзыва:

Девятова Эдуарда Валентиновича, доктора физико-математических наук, профессора РАН, заместителя директора Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук (г. Черноголовка, Московская область).

Отзыв содержит следующие замечания: «Замечанием к оформлению автореферата является несколько избыточное использование аббревиатур, что особенно видно на стр.19. Такое использование достаточно характерно

для технических журналов, но обычно не приветствуется в физических текстах. С точки зрения содержания, можно обратить внимание автора на фразу на стр. 9 «Концепция скейлинга основана на предположении расходимости по степенному закону длины локализации $\xi(E)$, когда энергия электрона E приближается к критической энергии $E = E_c$ фазового перехода в центре уширенного уровня Ландау». Вообще говоря, концепция скейлинга появилась в работе «банды четырёх» вне всякой связи с уровнями Ландау, и описание сути скейлинговой гипотезы можно было бы дать несколько более корректно в рамках автореферата (в отличие от статьи в журнале, где такого рода фраза является приемлемой)»;

Дричко Ирины Львовны, доктора физико-математических наук, старшего научного сотрудника, ведущего научного сотрудника лаборатории кинетических явлений в твердых телах при низких температурах Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук (г. С.-Петербург).

В отзыве замечания отсутствуют;

Здоровейщева Антона Владимировича, кандидата физико-математических наук, старшего научного сотрудника лаборатории спиновой и оптической электроники, отдела твердотельной электроники и оптоэлектроники Научно-исследовательского физико-технического института, ФГАОУВО «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского».

Отзыв содержит следующие замечания: «На с.12 автореферата вводится сокращение быстрого преобразования Фурье как БПФ, при этом дальше в тексте и на подписи к рисунку 6 используется сокращение БФП, что непреднамеренно сбивает с толку при прочтении. Так же на с.13 упоминается, что состояние с равными концентрациями электронов и дырок не было достигнуто в системе InAs/GaSb. При таком упоминании следовало бы сделать дополнительные пояснения о вероятной схожести, исследуемой в работе и приводимой в пример систем.»;

Козлова Дмитрия Андреевича, кандидата физико-математических наук, старшего научного сотрудника лаборатории физики низкоразмерных электронных систем ФГБУН Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук (г. Новосибирск).

Отзыв содержит следующие замечания: «В автореферате наблюдается некоторая проблема с представлением полученных результатов. Это касается не только текста, в котором присутствуют неожиданные неологизмы (самые яркие из которых - «техника реверсивного постоянного тока», «квантовом холловском диапазоне полей», «оценочное продление», «энергетическая картина», «холловское магнетосопротивление»), но и дизайна рисунков, что более важно. В частности, на рис. 11 и 13 положение уровня Ферми обозначается привычным штрих-пунктиром, а на рис. 8 -сплошными линиями, что существенно затрудняет понимание этого рисунка, и так уже перегруженного деталями. Далее, на рис. 6, посвященном зависимостям концентрации носителей в двойной КЯ, зачем-то так же показаны и подвижности носителей, что сбивает с толку, т.к. концентрации и подвижности имеют схожие функциональные зависимости от затворного напряжения. Очевидно, что информация о подвижностях избыточна на рисунке, к тому же она никак не обсуждается в тексте. Наконец, в тексте есть фраза «Холловское МС $\rho_{xy}(B)$ в своей эволюции с увеличением V_g становится полностью отрицательным при V_g = 3.5 В (рисунок 4)», при этом на рисунке 4 представлен диапазон лишь от -3 до 3В, а обсуждаемый график отсутствует.»; а также вопрос: «Вопрос касается КЭХ в двойной КЯ с полуметаллическим спектром. При расчете положения уровня Ферми фиксируется полная концентрация носителей, и этими носителями заполняются два веера уровней Ландау, которые по факту принадлежат двум квантовым ямам. Эти квантовые ямы и затвор в сумме представляют собой единую электростатическую систему. При этом, с точки зрения электростатики заполнение уровня Ландау в первой яме не эквивалентно заполнению уровня Ландау во второй яме. Вопрос: учитывалось ли это в используемых расчетах? Если нет, то почему?».

Выбор официальных оппонентов обосновывается их широкой известностью своими достижениями в данной отрасли науки, их высокой научной компетентностью в области физики низкоразмерных полупроводниковых систем.

Диссертационный совет отмечает, что представленная диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук соответствует п. 9 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ, является научно-квалификационной работой, в которой выявлен ряд характерных экспериментальных особенностей квантового эффекта Холла в одиночных и двойных квантовых ямах теллурида ртути с инвертированным зонным спектром и проведена их интерпретация на основе расчетов энергетического спектра и спектра уровней Ландау, что имеет существенное значение для физики полупроводников.

Диссертация представляет собой самостоятельное законченное исследование, обладающее внутренним единством. Положения, выносимые на защиту, содержат новые научные результаты и свидетельствуют о личном вкладе автора в науку:

впервые показана реализуемость режима скейлинга для квантового фазового перехода между плато квантового эффекта Холла в 2D-структурах на основе теллурида ртути;

впервые экспериментально, методом изучения квантового эффекта Холла, исследована двойная квантовая яма, состоящая из 2D-слоев HgTe с инвертированным зонным спектром. Обнаружены новые особенности магнитопроводимости: повторяющиеся знакопеременные состояния квантового эффекта Холла и состояния с нулевым фактором заполнения. Получена возможность регулировать перекрытие зон, притом можно сделать его существенно больше, чем в одиночном слое;

впервые экспериментально исследована двойная квантовая яма HgTe/CdHgTe со слоями HgTe критической толщины. Обнаружен ряд ранее не наблюдавшихся аномалий кинетических свойств: «возвратное» поведение квантового эффекта Холла, существенное различие эффективных

концентраций дырок, участвующих в проводимости, в разных диапазонах магнитных полей;

Практическая значимость полученных результатов может быть связана с применением квантового эффекта Холла в метрологии (полученные в эксперименте необычно широкие плато квантового эффекта Холла способствуют повышению точности измерения холловского сопротивления в области плато) и с активно разрабатываемой в настоящее время физикой топологических краевых состояний.

На заседании 30 ноября 2023 г. диссертационный совет УрФУ 1.3.04.16 принял решение присудить Попову М.Р. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет УрФУ 1.3.04.16 в количестве 15 человек, из них 6 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 20 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 13, против – нет, недействительных бюллетеней – 2.

Председатель
диссертационного совета
УрФУ 1.3.04.16 Германенко Александр Викторович

Ученый секретарь
диссертационного совета
УрФУ 1.3.04.16 Овчинников Александр Сергеевич

30 ноября 2023 г.