

ОТЗЫВ

**официального оппонента на диссертационную работу
Кунцевича Александра Юрьевича**

**“Экспериментальное исследование термодинамических и кинетических эффектов в
двумерных системах”**

**представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по
специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния**

В диссертации Кунцевича А.Ю. “Экспериментальное исследование термодинамических и кинетических эффектов в двумерных системах”, представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния, приведены результаты исследования новых эффектов в транспортных и термодинамических свойствах двумерных систем и создания методов исследования низкоэнергетических явлений, применимых к различным материальным системам.

Актуальность темы данных исследований обусловлена возросшим в последние годы в мировой литературе интересом к двумерным системам. Если в 70-90е годы прошлого века исследования двумерных систем ограничивались, в основном, гетероструктурами и квантовыми ямами из широкозонных полупроводников (Si, Ge и GaAs), то за последние 15 лет данное направление физики конденсированного состояния получило взрывное развитие благодаря расслоению материалов до атомной толщины (Гейм и Новоселов, Нобелевская премия 2010) и открытию топологических материалов на основе узкозонных полупроводников, полуметаллов, а также квантово-размерных структур.

Ограниченность возможностей существующих методик определяет актуальность создания новых методик исследования спектра, взаимодействия и беспорядка в двумерных проводящих системах, чему и посвящена данная диссертация. Основной предложенной методикой в данной диссертации является исследование термодинамической намагниченности двумерной системы методом модуляции химического потенциала, а так же разработанная по аналогии методика измерения энтропии двумерных систем.

Общая характеристика работы.

Надо отметить, что использованные методики отличаются филигранным исполнением, а проведённый анализ полученных результатов – глубиной и высокой экспериментальной

честностью, что позволяет уверенно судить об авторе как о сложившемся физике-экспериментаторе.

Основное содержание диссертации изложено в 7 главах.

Во **Введении** даётся общая характеристика работы, сформулированы цели, задачи работы, обоснована актуальность исследований, новизна полученных результатов.

Глава 1 посвящена методике измерений производной химического потенциала по магнитному полю. Принципиальным продвижением стало исследование намагниченности в области малых магнитных полей и не очень низких температур, таких что зеэмановская энергия меньше или порядка температуры. Это, в свою очередь, дало возможность получить данные в фазе изолятора.

Глава 2 посвящена измерениям сопротивления и эффекта Холла в образцах Si-MOP структур с макроскопическим массивом антиоточек, в которых один затвор управляет концентрацией в двумерном газе формы решетки с круглыми отверстиями, а второй, независимо, - в двумерном газе в отверстиях. В данном разделе объясняется новизна исследований таких образцов, а также то, что в классическом пределе, к которому они близки, отверстие в двумерной системе никак не должно влиять на эффект Холла. Однако, обнаружено положительное магнитосопротивление и добавка к холловскому коэффициенту, примерно квадратичная по магнитному полю. Добавка увеличивает коэффициент Холла с полем и растет с понижением температуры. Предлагается простая качественная модель, объясняющая данный эффект.

Глава 3 посвящена методике измерения энтропии на электрон, где модулируется температура, а измеряется ток перезарядки в емкостной структуре. Проведён подробный анализ методики, рассмотрен ряд вспомогательных, но принципиальных вопросов - анализ погрешности измерений, роль беспорядка в системе, соотношение между энтропийными и транспортными данными.

Глава 4 посвящена применению разработанного метода измерения энтропии для измерения плотности состояний в тяжелой подзоне дырок в квантовых ямах теллурида ртути. Проведено сравнение результатов с методом исследования магнитоосцилляций. Показано, что два разных

метода дали согласующиеся между собой результаты, обсуждаются другие материальные системы, где могут быть использованы эти методы измерения тяжелых масс. Обсуждаются эффекты, связанные с зависимостью спектра от температуры и их влияние на методику измерений.

Глава 5 посвящена исследованию тех же структур в квантовых ямах теллурида ртути, но методами измерений производной химического потенциала по магнитному полю.

Продемонстрирован парамагнетизм всех групп носителей (электроны, лёгкие и тяжёлые дырки в таких структурах).

Глава 6 посвящена тонким эффектам, наблюдаемым в магнитосопротивлении и холловском сопротивлении в двумерных системах и тонких пленках методом анализа квантовых поправок к проводимости. В различных двумерных системах (не только Si-MOП структурах, но и в GaAs/AlGaAs гетеропереходах, GaAs и InGaAs квантовых ямах) наблюдалось немонотонное магнитосопротивление с максимумом, положение максимума примерно пропорционально температуре, а амплитуда, в целом, также растет с температурой во всех образцах. Данное явление не объясняется существующими теориями.

Глава 7 обзорно-теоретического характера, посвящена анализу широко распространенного, начиная с первых экспериментов на графене, утверждения, что фаза магнитоосцилляций соответствует фазе Берри, то есть топологической характеристике спектра. Констатируется ненадежность интерпретации такой величины, как фаза магнитоосцилляций и предлагается стратегия, которая позволит правильно интерпретировать данную величину.

Научная новизна работы.

В результате проведённых экспериментальных исследований был получен ряд новых результатов:

1. Задача исследования спиновой намагниченности в пределе малых полей ранее не ставилась, так как считалось, что система представляет собой Ферми-жидкость и должна иметь только одно характерное магнитное поле - поле полной спиновой поляризации. Данное исследование показало, что это представление ошибочно и позволило впервые обнаружить

суперпарамагнитное состояние в двумерной системе.

2. Модулированная двумерная система с управляемой глубиной макропотенциала со столь большим периодом модуляции (5 мкм) исследуется впервые, что позволило впервые наблюдать добавку к эффекту Холла в широком диапазоне полей.
3. Идея измерения энтропии через соотношение Максвелла была реализована впервые. Лишь впоследствии другие группы начали проводить измерения по схожей схеме.
4. Методы измерения термодинамической намагниченности впервые применены к квантовым ямам HgTe, в результате чего впервые обнаружен парамагнетизм данной системы.
5. Исследования поправки к проводимости за счет электрон-электронного взаимодействия, дающей добавку в эффект Холла, впервые выполнены для двумерных электронных систем на основе Si. Применение данной методологии к тонким пленкам трехмерных топологических изоляторов также осуществлено впервые.
6. Роль термодинамических факторов для фазы квантовых осцилляций отмечена и исследована впервые.

Новизну и значимость полученных результатов подтверждает их опубликование в ведущих отечественных и международных журналах.

Практическая значимость работы.

Результаты проведенных исследований послужили проверке ряда теоретических моделей, предложенных для объяснения перехода металл-изолятор в двумерных системах и связанных с ним явлений.

Достоверность и обоснованность полученных результатов.

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечивается тем, что все экспериментальные результаты воспроизводились на нескольких образцах, а некоторые - и на нескольких материальных системах. Результаты оказались в согласии с литературными данными, подтвержденными другими группами и другими способами, большинство из них согласуется с имеющимися теоретическими моделями. Все измерения проводились поверенными приборами, а косвенно измеряемые величины (например магнитное поле и температура) калибровались по эталонам.

Личный вклад автора.

В проведённых исследованиях автору принадлежит решающий вклад в постановке экспериментальных задач, разработке методики экспериментов, проведении экспериментов, обработке и интерпретации полученных результатов.

Апробация работы.

Основные результаты работы докладывались на многочисленных российских и международных конференциях а так же на семинарах в ФИАН, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Курчатовском институте, МПГУ, ИТПЭ, ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН, Сколковском технологическом институте, университете Технион (Хайфа, Израиль), Институте Джозефа Штефана (Любляна, Словения), Массачусетском технологическом институте (Бостон, США), Университете Миннесоты (Минеаполис, США), Техническом университете Дрездена (Германия), Тата Институте (Мумбаи, Индия).

Основные результаты опубликованы в 19 статьях в научных реферируемых журналах, индексируемых международной реферативной базой данных Web of Science, и одном патенте на изобретение.

Вместе с тем по диссертации можно сделать некоторые замечания:

1. С точки зрения оппонента, стоило бы чётче обосновать использование в некоторых методиках высоких температур. В частности, в Главе 1, например, температура повышалась для проведения измерений в фазе изолятора. Очевидно, это даёт повышение проводимости, что принципиально важно для применимости метода, но при этом возникает проблема принципиального (физического свойства): каким определением изолятора (и перехода металл-изолятор) пользуется автор? Навскидку можно предложить три, не всегда эквивалентных, варианта определения изолятора: нулевая проводимость при абсолютном нуле температур (теоретически обоснованный критерий, экспериментально принципиально непроверяемый), знак производной проводимости по температуре (т.е. экстраполяция из области достижимых значений, при этом знак производной априори предполагается константой), и абсолютное значение проводимости при конечной температуре (например, по сравнению с квантом проводимости). Понятно, что обоснование сохранения именно фазы изолятора при повышении температуры возможно не при любом из этих определений. Ясность в используемых критериях фазы изолятора улучшила бы чёткость изложения полученных результатов.

2. Тот же вопрос возникает в Главе 3 – насколько режим температуры, превышающей энергию Ферми можно считать режимом изолятора, да и вообще корректно ли говорить о спектре в таких условиях?

3. Похожая ситуация возникает в Главе 6: режим локализации носителей предполагает минимальную температуру. Можно ли (принципиально, методически) получить информацию об этом режиме, проводя измерения при температуре, превышающей масштаб энергии, связанный с беспорядком (стр. 187)? Возможно, обсуждению этого момента стоило бы уделить большее внимание.

4. Глава 2. На стр 77 есть некоторая неясность в модели, используемой для интерпретации полученного результата. А именно, локальная проводимость у шуб антиточек действительно может иметь более слабую зависимость от магнитного поля. Но при этом для объёмной проводимости само абсолютное значение – выше, а перераспределение тока должно происходить при сравнении абсолютных значений проводимости в объёме и в шубах. Возможно, тут требуется дополнительно разъяснение модели.

5. Глава 6. При первом взгляде на полученные результаты напрашивается вывод, что автор исключает наличие топологической поверхностной проводимости в исследованных образцах, поскольку наблюдаемая поправка к общей проводимости системы свидетельствует об общей (суммарной) двумерной проводимости. Либо, исследуется именно поверхностная двумерная проводимость?

6. Кроме того, можно отметить отдельные стилистические неточности: на стр. 123 речь идёт о разных эффективных массах, что очевидно специалисту, но может быть неправильно истолковано, например, студентами-физиками. Во введении, наоборот, стройная педагогическая концепция “спектр-взаимодействие-беспорядок” иллюстрируется забавным утверждением о конечной эффективной массе при дираковском (линейном!) спектре носителей.

Отмеченные недостатки не снижают, однако, общей высокой оценки представленной диссертации. В целом следует отметить что диссертационная работа Кунцевича А.Ю. является существенным вкладом в развитие нового направления – термодинамических исследований

двумерных систем.

Полученные результаты представляют большой интерес как с научной так и с практической точек зрения и могут быть использованы в следующих научных коллективах: Институт физики твёрдого тела РАН, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Институт физики металлов УрО РАН (Екатеринбург), Институт физики полупроводников СО РАН (Новосибирск), Физический институт РАН, Институт физики микроструктур РАН (Нижний Новгород), Институт физики микроструктур и особо чистых материалов РАН и других научных центрах, занимающихся исследованиями по данной проблеме.

Изложенные в диссертации материалы могут быть использованы в учебных курсах для студентов вузов, специализирующихся по физике полупроводников.

Диссертация и автореферат написаны хорошим понятным языком. Автореферат и опубликованные работы правильно отражает содержание диссертации.

Оценивая диссертацию Кунцевича А.Ю. в целом, можно заключить что она соответствует всем требованиям “Положения о присуждении ученых степеней”, утвержденного постановлением правительства РФ №842 от 24 сентября 2013 г., предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, и соискатель заслуживает присвоения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

01.09.2020

Официальный оппонент

Девятков Эдуард Валентинович - доктор физико-математических наук, профессор РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела Российской академии наук (ИФТТ РАН), заместитель директора
г. Черноголовка, Московская обл., ул.Академика Осипьяна д.2, 142432, Россия

+79160419538

dev@issp.ac.ru

Подпись Девяткова Э.В. заверяю, учёный секретарь ИФТТ РАН Терещенко Алексей Николаевич, кандидат физико-математических наук.



Список основных работ Девятова Э.В. по теме защищаемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (не более 15):

1. O. O. Shvetsov, V. D. Esin, Yu. S. Barash, A. V. Timonina, N. N. Kolesnikov, and E. V. Deviatov, Lateral Josephson effect on the surface of the magnetic Weyl semimetal $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$, *Phys. Rev. B* 101, 035304 (2020).
- 2 O.O. Shvetsov, V.D. Esin, A.V. Timonina, N.N. Kolesnikov, and E.V. Deviatov Surface superconductivity in a 3D Dirac semimetal Cd_3As_2 at the interface with a gold contact *Phys. Rev. B* 99, 125305 (2019).
3. A. Kononov, O.O. Shvetsov, A.V. Timonina, N.N. Kolesnikov, E.V. Deviatov Spin Wave Effects in Transport between a Ferromagnet and a Weyl Semimetal Surface *JETP Letters* 109, 180-184 (2019).
4. O.O. Shvetsov, A. Kononov, A.V. Timonina, N.N. Kolesnikov, E.V. Deviatov Realization of a Double-Slit SQUID Geometry by Fermi Arc Surface States in a WTe_2 Weyl Semimetal, *JETP Lett.* 107, 774 (2018).
5. A. Kononov, O.O. Shvetsov, S.V. Egorov, A.V. Timonina, N.N. Kolesnikov, E.V. Deviatov Signature of Fermi arc surface states in Andreev reflection at the WTe_2 Weyl semimetal surface *EPL* 122, 27004 (2018).
6. O.O. Shvetsov, A. Kononov, A.V. Timonina, N.N. Kolesnikov, E.V. Deviatov Subharmonic Shapiro steps in a.c. Josephson effect for a three-dimensional Weyl semimetal WTe_2 *EPL* 124, 47003 (2018).
7. A. Kononov, S.V. Egorov, N. Titova, B.R. Semyagin, V.V. Preobrazhenskii, M.A. Putyato, E.A. Emelyanov, E.V. Deviatov Interlayer current near the edge of an InAs/GaSb double quantum well in proximity with a superconductor, *JETP Letters* 105, 508 (2017).
8. O.O. Shvetsov, V.A. Kostarev, A. Kononov, V.A. Golyashov, K.A. Kokh, O.E. Tereshchenko, E.V. Deviatov, Conductance oscillations and zero-bias anomaly in a single superconducting junction to a three-dimensional Bi_2Te_3 topological insulator *EPL* 119, 57009 (2017).
9. A. Kononov, V.A. Kostarev, B.R. Semyagin, V.V. Preobrazhenskii, M.A. Putyato, E.A. Emelyanov, E.V. Deviatov, Proximity-induced superconductivity within the InAs/GaSb edge conducting state *Phys. Rev. B* 96, 245304 (2017).
10. A. Kononov, S. V. Egorov, Z. D. Kvon, N. N. Mikhailov, S. A. Dvoretzky, E. V. Deviatov, Andreev reflection at the edge of a two-dimensional semimetal, *Phys. Rev. B* 93, 041303(R) (2016).
11. A. Kononov, S. V. Egorov, V. A. Kostarev, B. R. Semyagin, V. V. Preobrazhenskii, M. A. Putyato, E. A. Emelyanov, E. V. Deviatov, Specular Andreev Reflection at the Edge of an InAs/GaSb Double Quantum Well with Band Inversion, *Pis'ma v JETP* 104, 24 (2016).
12. A. Kononov, S.V. Egorov, Z.D. Kvon, N.N. Mikhailov, S.A. Dvoretzky, E.V. Deviatov, Strong coupling between a permalloy ferromagnetic contact and helical edge channel in a narrow HgTe quantum well, *JETP* 150, 1003 (2016).
13. А.А. Кононов, Э.В. Девятов, Спиновые эффекты в краевом транспорте для двумерных топологических изоляторов, *Pis'ma v JETP* 104, (2016).
14. A. Kononov, S.V. Egorov, N. Titova, Z.D. Kvon, N.N. Mikhailov, S.A.

Dvoretzky, E.V. Deviatov, Conductance oscillations at the interface between a superconductor and the helical edge channel in a narrow HgTe quantum well, *Pis'ma v ZhETF* 101, 44 (2015).

15. A. Kononov, S. V. Egorov, Z. D. Kvon, N. N. Mikhailov, S. A. Dvoretzky, E. V. Deviatov, Evidence on the macroscopic length scale spin coherence for the edge currents in a narrow HgTe quantum well, *JETP Letters* 101, 814 (2015).