

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

Физика низкоразмерных электронных систем (НЭС) вот уже более полувека остается наиболее важным направлением физики конденсированного состояния, что не удивительно, так как ее рождение и развитие полностью связано с возможностью, благодаря высоким, прежде всего полупроводниковым, технологиям, исследовать электронный отклик в практически бесконечном разнообразии потенциальных полей, в которые можно "поместить" электрон в современном физическом эксперименте. Что гарантирует не менее бесконечное разнообразие новых наблюдаемых физических эффектов. Здесь следует отметить, что первые два десятилетия нынешнего века, не внося ничего принципиально нового в основы физики НЭС, ознаменовались экспоненциально широким размножением их номенклатуры. Графен, топологические изоляторы, вейлевские полуметаллы, кристаллические и аморфные системы, образованные двумерными и одномерными слоями атомов - все это многообразие материалов возникло как раз в 21 веке. Докторская диссертация А.Ю. Кунцевича ярко иллюстрирует сказанное выше. Число различных низкоразмерных электронных систем, которые фигурируют в его диссертации, не может не впечатлять. Это и классические на основе кремниевых инверсионных слоев и GaAs квантовых ям, и новые, которые представляют HgTe квантовые ямы и висмутовые трехмерные топологические изоляторы. Поэтому **актуальность темы** его диссертационной работы не вызывает никаких сомнений.

Однако основное достоинство диссертации не в этом, а в **глубине и новизне** физических явлений, которые были изучены и исследованы А.Ю. Кунцевичем. Наиболее яркие и ценные для всей физики НЭС результаты приведены в первой, третьей и седьмой главах его труда. Первая посвящена изложению, описанию и анализу метода экспериментального изучения производной магнитного момента по концентрации в двумерной электронной системе, основанного на измерении емкостного тока, возбуждаемого переменным магнитным полем, и его дальнейшему развитию для исследования сильновзаимодействующей двумерной электронной системы в кремниевом МОП-транзисторе; в третьей главе излагаются

и анализируются данные по первому экспериментальному исследованию энтропии двумерных систем. Наконец в седьмой главе подвергаются грамотному и критическому анализу многочисленные работы по трехмерным топологическим изоляторам, в которых из анализа шубниковских осцилляций провозглашается наблюдение аномальной фазы Бери. Ниже дается подробный анализ и оценка этих результатов.

Начну с экспериментов по измерению производной магнитной восприимчивости.

1. Особенно интересны результаты, полученные при исследовании магнитной восприимчивости в окрестности перехода металл-изолятор. Измеряя ее в двумерных электронных системах кремниевых МОП-транзисторов, автор диссертации обнаружил новую яркую особенность в ее поведении в слабых магнитных полях. И здесь следует особо отметить, что ее изучение позволило впервые измерить магнитный отклик в диэлектрической фазе и получить уникальную информацию о характере спиновой восприимчивости сильно взаимодействующей двумерной системы при концентрациях электронов ниже критической. Именно благодаря этому вполне уникальному эксперименту в работе сделан новый и принципиально важный вывод о наличии спиновых капель вблизи перехода металл-изолятор. Причем анализ поведения сигнала как при изменении магнитного поля, так и температуры позволяет сделать весьма интригующий вывод о возможности существования стонеровской неустойчивости в исследуемой системе. Полученные в первой главе результаты вносят принципиально новый вклад в решение одного из основных вопросов физики двумерных электронных систем - вопроса о том, какова взаимная роль беспорядка и взаимодействия при переходе металл-изолятор.

2. Метод был также успешно применен для исследования парамагнитного отклика квантовых ям на основе теллурида ртути. Тем самым впервые была получена информация о поведении магнитной восприимчивости в системах с сильным спин-орбитальным взаимодействием. В частности, очень интересна зависимость величины намагниченности квантовой ямы от положения уровня Ферми. Она свидетельствует о том, что, когда уровень Ферми находится в валентной зоне, она достаточно велика, но при переходе в зону проводимости резко падает практически до нулевого значения. Этот результат является своего рода новым вызовом как для теории двумерных систем, где релятивистские эффекты играют ключевую роль, так и для дальнейших экспериментов с ними.

Не менее если не более важным достижением диссертации является разработка и

реализация принципиально нового метода измерения энтропии двумерных электронных систем. В этом методе также используется возбуждение емкостного тока, но уже не переменным магнитным полем, а переменным нагревом системы. Как правильно пишет А.Ю. Кунцевич "Эта методика на три с лишним порядка более чувствительна чем калориметрия, что открывает возможности исследования тонких эффектов". И результаты, полученные в "энтропийных" экспериментах подтверждают эти слова. Во-первых, показано, что в режиме квантовых магнитных полей предложенная методика позволяет получить информацию не только о величине циклотронных и спиновых расщеплений, но также об уширении уровней Ландау. Во-вторых, впервые удалось наблюдать как происходит переход от состояния сильно взаимодействующей Ферми-жидкости к сильно взаимодействующей невырожденной Ферми-системе и наблюдать немонотонную зависимость эффективной массы от концентрации в окрестности перехода металл-изолятор. И, в-третьих, поведение самой энтропии, как и следовало, ожидать оказалось предметом "первоосновной" физики. В частности, показано, как она при понижении температуры стремится к нулю. Результат очевидный, но очень наглядно демонстрирующий, что и двумерные электронные системы также подчиняются третьему началу термодинамики.

Глубину и широту знаний диссертанта хорошо демонстрирует седьмая глава диссертации, в которой А.Ю. Кунцевич подверг критическому анализу популярную и полуграмотную деятельность огромной армии, скорее, материаловедов, чем физиков, связанную с пресловутой фазой Бери, легко извлекаемой из фазы шубниковских осцилляций, но в большинстве случаев связанной не с топологическими свойствами исследуемых ими трехмерных топологических изоляторов (ТИ), а с огромным количеством дефектов. Эти дефекты приводят к возникновению большой плотности состояний в объеме и приводят к "пинингу" на них уровня Ферми, что, как убедительно показано в диссертации, может привести к любой фазе осцилляций, включая желанную всеми фазу Бери. В главе также показано, что еще одним источником мнимой "фазы Бери" могут быть неоднородности, также присутствующие во всех висмутовых трехмерных ТИ в силу их низкого качества. Крайне важный результат, о котором необходимо знать всем, кто занимается экспериментальным изучением трехмерных ТИ.

Две главы диссертации, одна посвященная квантовым поправкам, связанным со взаимодействием, а другая системе антиоточек в инверсионном канале кремния стоят, вообще говоря, особняком. Но и в них А.Ю. Кунцевич продемонстрировал высокий класс физика-

экспериментатора, прекрасно владеющего материалом и умеющего даже в, скажем, не очень интересной, на первый взгляд, ситуации увидеть глубокую и нетривиальную физику. К примеру, изучая магнетотранспорт двумерного электронного газа у поверхности кремния, помещенного в потенциал периодически расположенных антиоточек, он обнаружил нелинейное поведение эффекта Холла и предложил для его объяснения вполне адекватную, но что более важно, неожиданно привлекательную и поучительную модель того, как оно может возникнуть. В ней он предположил, что введение антиоточек приводит к разделению двумерного электронного газа на две компоненты: с низкой концентрацией, имеющей низкую подвижность и с высокой концентрацией, имеющей высокую подвижность. Разная реакция на магнитное поле, возникающая из-за различной подвижности электронов в них, может привести к появлению нелинейной добавки в холловском сигнале. Интересная модель, ставящая, как правильно заметил диссертант, интересную задачу перед теорией протекания в неоднородных средах.

Изучая же магнетотранспорт в классических двумерных системах в инверсионных слоях кремния в GaAs гетеропереходах, он обнаружил магнитосопротивление (МС) при высоких температурах, когда, казалось бы, все эффекты слабой локализации и взаимодействия, вызванные квантовой интерференцией, должны быть подавлены. Причем вполне убедительно продемонстрировал их универсальность. Тогда он сделал смелое предположение, что обнаруженное МС - это какое-то новое проявление эффектов взаимодействия, перелопатив при этом практически всю литературу по квантовым поправкам к проводимости, начиная с пионерских работ Альтшулера, Аронова и Ли и кончая теми, что вышли в последнее время.

Наконец в поле зрения автора диссертации попали трехмерные ТИ на основе пленок халкогенидов висмута и поэтому имеющие низкую (несколько тысяч) подвижность. Тогда он правильно решил, что в такой ситуации интереснее всего исследовать квантовые поправки к проводимости указанных пленок. Им было найдено, что они характеризуются аномальным положительным МС и логарифмической температурной зависимостью проводимости, что говорит о типичном поведении квантовых поправок в квазидвумерных системах с сильной спиновой релаксацией. Новым оказалось обнаружение температурной зависимости холловской проводимости, однозначно свидетельствующей о наличии в исследованных пленках эффектов взаимодействия.

Перехожу к замечаниям. Начну с имеющих общий характер. Структура диссертации

выглядит с моей точки зрения не вполне оптимальной и слегка сбивающей ее читателя с толку. К примеру, идет первая, прекрасная, глава, посвященная измерениям производной магнитного момента. Затем она, можно сказать, прерывается, и автор внезапно переходит к второй главе, где говорится об магнетотранспорте в двумерной системе с антиточками, содержание которой не имеет практически никакого отношения к материалу первой главы. А в третьей главе речь идет уже об энтропии. То есть между двумя главами, посвященными термодинамическим свойствам, возникает разрыв в виде "антиточек". Между тем, описание экспериментов по измерению магнитного момента снова появляются в 5-й главе. Кажется очевидным, что если бы пятая глава была поставлена на место второй, а глава по "антиточкам" в конец, то это бы сделало изложение материала диссертации более последовательным и ясным. Тут следует отметить, что последовательность изложения материала уже внутри глав также страдает некоторой скачкообразностью. Автор начинает изложение материала, а затем вдруг объявляет, что продолжение следует в приложении. К примеру, в первой главе, приступив к обсуждению метода измерения производной магнитного момента по концентрации, он на самом интересном месте, когда читатель ждет, что последует его детальное изложение, отвлекается, а продолжение приходится искать в специальном приложении 1, уже, можно сказать, потеряв нить рассуждений автора.

Текст диссертации грешит риторическими излишествами. Они особенно сильно бросаются в глаза во введении. Если верить ему, то в современной физике низкоразмерных систем происходят "взрывное развитие" и "революция" и наблюдаются сплошные "прорывы" и "настоящие триумфы". И в основном материале то и дело встречаются "идейно аналогична", "обнуляются", "квантовость", "на поверхности лежал вопрос", "нельзя списать". Отмеченная склонность автора к сильным выражениям особенно наглядна в его описках. Приведу наиболее интересную: на стр. 178 написано "влияние ЭЭП стало менее выдающимся на фоне проводимости Друде". Конечно, он хотел написать "менее заметным". Наконец название параграфа 3.4.3 "Проверка третьего начала термодинамики". Неужели автор усомнился в его справедливости?

Теперь более конкретные замечания.

На странице 7 введения написано "Каждое из вышеперечисленных направлений представляет собой новое физическое явление, а также открывает возможность создания новых потенциальных приборов". С первой частью приведенного предложения можно согласиться, правда, отметив небольшой стилистический сбой, а вторую оппонент считает

чистой схоластикой.

На стр.87 написано "квантовые осцилляции являются универсальным инструментом для исследования электронного спектра". Все же, прежде всего, они сами обладают непосредственной ценностью, демонстрируя квантовую природу различных физических систем, а уж затем являются "инструментом".

На стр. 130 утверждается "Конечно, точный вид спектра в HgTe КЯ остается неизвестным". Вообще говоря, точный вид спектра остается неизвестным для любой системы. А спектр HgTe КЯ в целом известен достаточно хорошо.

На стр. 157 написано, что измерительный ток был 1 μ А, чтобы не перегреть электронную систему. Такой ток, вообще говоря, кажется великоватым. Оппонент надеется, что эффекты разогрева проверялись.

В главе, посвященной квантовым поправкам к проводимости пленок на основе халькогенидов висмута много места уделено технологическим аспектам их изготовления, но, как оппонент ни пытался, он не нашел данных ни о концентрации, ни о подвижности, можно сказать, основных параметров при исследовании транспортного отклика. На стр. 202 написано: "Результаты, полученные этим методом (полые звезды на рис.6.16)". Но на указанном рисунке 6.16 их нет, как, впрочем, и каких-либо других.

Оценивая диссертацию в целом можно сказать, что благодаря ей в физике низкоразмерных электронных систем появилось новая интересная область, связанная с изучением их термодинамического отклика. Замечания оппонента носят исключительно частный характер и не затрагивают ни основных результатов, ни защищаемых положений. **Достоверность и обоснованность** полученных диссертантом результатов очевидны. Это подтверждается публикациями ее результатов в ведущих физических журналах мира, начиная с Писем в ЖЭТФ и кончая PRB и Nature Comm., а также выступлениями с многочисленными приглашенными докладами как на российских, так и на международных конференциях. Но более всего говорят о достоверности и обоснованности научная добросовестность самого автора диссертации, его критичность и дотошность при анализе собственных результатов, когда он не боится говорить, что далеко не все из них описываются развитыми теориями и далеко не все результаты удастся объяснить до конца. Полученные в диссертации результаты, всегда привлекали пристальное внимание многих ведущих научных (и экспериментальных и теоретических) групп мира и широко обсуждались на многочисленных форумах физиков,

занимающихся низкоразмерными электронными системами. Часть результатов, полученных в диссертации, относящиеся к экспериментам по измерению энтропии и магнитной проницаемости уже сейчас можно считать классическими. Они вносят принципиальный и существенный вклад и в физику конденсированного состояния. Поэтому их следует настоятельно рекомендовать для использования не только в исследовательской деятельности ведущих физических институтов, таких как ФИАН, ФТИ им. Иоффе, ИФТТ РАН, ИПТМ РАН, ИРЭ РАН, ИФМ РАН, ИФП СО РАН, но и в университетских курсах физики конденсированного состояния. И в этом заключается несомненная **практическая значимость** работы.

Личный вклад автора.

Решающий вклад автора диссертации во все стадии (постановка задачи, подготовка экспериментальных образцов, проведение экспериментов, их анализ и написание статей) его диссертационной работы не вызывает никаких сомнений.

Апробация работы.

Основные результаты работы докладывались на многочисленных российских и международных конференциях, а также на семинарах ФИАН, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Курчатовского института, МПГУ, ИТПЭ, ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН, ИФП СО РАН, Сколковского технологического института, университета Технион (Хайфа, Израиль), Института Джозефа Штефана (Любляна, Словения), Массачусетского технологического института (Бостон, США), Университета Миннесоты (Минеаполис, США), Технического университета Дрездена (Германия).

Они также опубликованы в 19 статьях в научных реферируемых журналах, индексируемых международной реферативной базой данных Web of Science и даже в патенте на изобретение.

Следует отметить живой и свободный стиль написания как диссертации, так и автореферата, говорящий о том, что диссертант прекрасно владеет языком современной физики. Автореферат и опубликованные работы в полной мере отражают содержание диссертации.

Переходя к заключению можно сказать, что диссертационная работа А.Ю. Кунцевича, безусловно, удовлетворяет 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, а соискатель заслуживает присвоения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент

Квон

Квон Зе Дон - доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук (ИФП СО РАН), заведующий лабораторией физики низкоразмерных электронных систем.

Новосибирск, пр. Лаврентьева, 13, 6300090, Россия

9.09.2020

7-383-3306733

kvon@isp.nsc.ru

Подпись сотрудника ИФП СО РАН Квона Зе Дона заверяю

Ученый секретарь ИФП СО РАН

канд. физ.-мат. наук



[Handwritten signature]

Аржанникова София Андреевна

Список основных работ Квона З.Д. по теме защищаемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (не более 15):

1. S. U. Piatrusha, E. S. Tikhonov, Z. D. Kvon, N. N. Mikhailov, S. A. Dvoretzky, and V. S. Khrapai, Topological Protection Brought to Light by the Time-Reversal Symmetry Breaking, *Phys. Rev. Lett.* **123**, 056801 (2019).
2. S. Hubmann, S. Gebert, G. V. Budkin, V. V. Bel'kov, E. L. Ivchenko, A. P. Dmitriev, S. Baumann, M. Otteneder, J. Ziegler, D. Disterheft, D. A. Kozlov, N. N. Mikhailov, S. A. Dvoretzky, Z. D. Kvon, D. Weiss, and S. D. Ganichev, High-frequency impact ionization and nonlinearity of photocurrent induced by intense terahertz radiation in HgTe-based quantum well structures, *Phys. Rev. B* **99**, 085312 (2019).
3. Dobretsova A.A., Chepelianskii A.D., Mikhailov N.N., Kvon Z.D., Spin mixing between subbands and extraordinary Landau-level shift in wide HgTe quantum wells, *Physical Review B*, **98**, 155310 (2018).
4. Levin A.D., Gusev G.M., Levinson E.V., Kvon Z.D., Bakarov A.K., Vorticity-induced negative nonlocal resistance in a viscous two-dimensional electron system, *Physical Review B* **97**, 245308 (2018).
5. Otteneder M., Dmitriev I.A., Candussio S., Savchenko M.L., Kozlov D.A., Bel'kov V.V., Kvon Z.D., Mikhailov N.N., Dvoretzky S.A., Ganichev S.D. Sign-alternating photoconductivity and magnetoresistance oscillations induced by terahertz radiation in HgTe quantum wells, *Physical Review B* **98**, 245304 (2018).
6. Otteneder M., Kvon Z.D., Tkachenko O.A., Tkachenko V.A., Jaroshevich A.S., Rodyakina E.E., Latyshev A.V., Ganichev S.D., Giant Terahertz Photoconductance of Quantum Point Contacts in the Tunneling Regime, *Physical Review Applied* **10**, 014015 (2018).
7. Ziegler J., Kozlovsky R., Gorini C., Liu M.-H., Weishupl S., Maier H., Fischer R., Kozlov D.A., Kvon Z.D., Mikhailov N., Dvoretzky S.A., Richter K., Weiss D, Probing spin helical surface states in topological HgTe nanowires, *Physical Review B* **97**, 035157 (2018).
8. K.-M. Dantscher, D.A. Kozlov, M.T. Scherr, S. Gebert, J. Brenfnger, M.V. Durnev, S.A. Tarasenko, V.V. Bel'kov, N.N. Mikhailov, S.A. Dvoretzky, Z.D. Kvon, J. Ziegler, D. Weiss, S.D. Ganichev, Photogalvanic probing of helical edge channels in two-dimensional HgTe topological insulators, *Physical Review B* **95**, 201103 (2017).
9. G.M. Gusev, D.A. Kozlov, A.D. Levin, Z.D. Kvon, N.N. Mikhailov, S.A. Dvoretzky, Robust helical edge transport at $\nu=0$ quantum Hall state, *Physical Review B* **96**, 045304 (2017).
10. T. Herrmann, Z.D. Kvon, I.A. Dmitriev, D.A. Kozlov, B. Jentsch, M. Schneider, L. Schell, V.V. Bel'kov, A. Bayer, D. Schuh, D. Bougeard, T. Kuczmiak, M. Oltcher, D. Weiss, S.D. Ganichev, Magnetoresistance oscillations induced by high-intensity terahertz radiation, *Physical Review B* **96**, 115449 (2017).

11. A.D. Levin, S.A. Mikhailov, G.M. Gusev, Z.D. Kvon, E.E. Rodyakina, A.V. Latyshev, Giant microwave-induced B-periodic magnetoresistance oscillations in a two-dimensional electron gas with a bridged-gate tunnel point contact, *Physical Review B* **95**, 081408 (2017).
12. H. Maier, J. Ziegler, R. Fischer, D. Kozlov, Z.D. Kvon, N. Mikhailov, S.A. Dvoretzky, D. Weiss, Ballistic geometric resistance resonances in a single surface of a topological insulator, *Nature Communications*, **8**, 3045 (2017).
13. T. Herrmann, I.A. Dmitriev, D.A. Kozlov, M. Schneider, B. Jentzsch, Z.D. Kvon, P. Olbrich, V.V. Bel'kov, A. Bayer, D. Schuh, D. Bougeard, T. Kuczmik, M. Oltcher, D. Weiss, S.D. Ganichev, Analog of microwave-induced resistance oscillations induced in GaAs heterostructures by terahertz radiation, *Physical Review B* **94**, 081301(R) (2016)
14. D.A. Kozlov, D. Bauer, J. Ziegler, R. Fischer, M.L. Savchenko, Z.D. Kvon, N.N. Mikhailov, S.A. Dvoretzky, D. Weiss, Probing Quantum Capacitance in a 3D Topological Insulator, *Physical Review Letters* **116**, 166802 (2016).
15. A. Shuvaev, V. Dziom, Z.D. Kvon, N.N. Mikhailov, A. Pimenov, Universal Faraday Rotation in HgTe Wells with Critical Thickness, *Physical Review Letters* **117**, 117401 (2016).