

О Т З Ы В

официального оппонента на диссертационную работу Прудкогляда Валерия Андреевича «Свойства электронного транспорта в топологических материалах на основе HgTe и Bi_2Se_3 », представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 — физика конденсированного состояния

Диссертационная работа Прудкогляда Валерия Андреевича посвящена экспериментальному изучению электронного транспорта в двумерном и трехмерном топологических изоляторах. Исследования топологически нетривиальных материалов в настоящее время являются основной тематикой исследований в области физики твердого тела, что связано как с новой физикой, проявляющейся в таких соединениях, так и с надеждами на построение на их основе практически значимых устройств спинтроники и квантовой обработки информации, так что актуальность исследований не вызывает никаких сомнений. Объекты исследования — квантовые ямы $\text{HgTe}/\text{CdHgTe}$ и трехмерный топологический изолятор Bi_2Se_3 — являются одними из первых предложенных, соответственно двумерных и трехмерных, топологических изоляторов. При этом квантовые ямы $\text{HgTe}/\text{CdHgTe}$ — это один из наиболее совершенных и хорошо изученных объектов в области топологически нетривиальных материалов, так как они выращены по стандартам полупроводниковой технологии и находят свое применение в приёмниках излучения, а топологический изолятор Bi_2Se_3 — один из наиболее подробно охарактеризованных топологических материалов. В диссертационной работе была предпринята попытка ответить на ряд нерешенных вопросов, связанных с влиянием взаимодействия между носителями заряда и гидростатического давления на зарядовый транспорт. Используемые методы исследований вполне адекватны поставленным задачам и включают в себя изучение электронного транспорта в широком диапазоне температур, магнитных полей и давлений, что и позволило найти ответы на поставленные вопросы.

Содержание диссертационной работы изложено на 117 страницах. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и библиографии. Диссертация включает 30 рисунков, одну таблицу и список литературы из 161 наименований, списков иллюстраций и таблиц. Результаты исследований, представленных в диссертации, опубликованы в четырех статьях и четырех трудах российских и международных конференций и школ.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, обозначена научная новизна работы, ее теоретическая и практическая зна-

чимось, описаны положения, выносимые на защиту, обоснована достоверность полученных результатов, перечислены конференции, на которых проводилась апробация работы, указаны личный вклад автора, а также структура и объем диссертации.

В главе 1 представлен обзор современного состояния области исследований. Обзор охватывает более сотни статей. Приведены основные формулы и соотношения, использовавшиеся диссертантом для интерпретации результатов исследований. Обзор исчерпывающий и свидетельствует о знании диссертантом как истории, так и современного состояния научных исследований по тематике диссертации, а большое число работ, опубликованных в ведущих научных журналах — об актуальности этой тематики.

В главе 2 представлены описания объектов исследований и использованных экспериментальных методик. Кратко описана технология создания гетероструктур HgTe/CdHgTe и геометрия использовавшихся образцов, описаны пленочные образцы Bi_2Se_3 . Приведены описания использовавшейся камеры для создания высокого давления и подробности методики. Описана техника низких температур, в том числе приведена схема низкотемпературного транспортного эксперимента и описаны технические подробности магнитотранспортных измерений. Следует отметить использование очень хорошей измерительной техники, заключающейся, в частности, в применении оптоизолированных преобразователей напряжение-ток и усилителей с автономным питанием, что обеспечивало гальваническую развязку образца от сети переменного тока.

Третья глава диссертации посвящена описанию результатов исследования перехода металл-изолятор в квантовой яме HgTe под давлением. Выбранный диссертантом объект исследования является одной из немногих реализаций двумерной электрон-дырочной системы с высокой подвижностью и концентрацией носителей, причем параметры носителей управляются внешними воздействиями и изменяются в широких пределах при приложении напряжения на затвора и давления, а также при изменении ширины квантовой ямы. Диссертанту удалось использовать эту возможность управления параметрами носителей для поиска состояния экситонного конденсата. Следует отметить, что подобные исследования квантовых ям HgTe были проведены впервые. В результате проведенных исследований при низких температурах был обнаружен переход металл-диэлектрик, который связывается диссертантом с переходом в состояние экситонного изолятора. Предположительное обнаружение этой необычной фазы является одним из важнейших результатов диссертационной работы.

Четвертая глава посвящена систематическому исследованию электронного транспорта в квантовых ямах HgTe в широком диапазоне давлений. Исследования, проведенные в этой главе, отличаются использованием многомерного пространства параметров: параметры структуры, температура, магнитное поле, напряжение на затворе, давление (в том числе его предыстория). Соответственно, именно в этой главе представлено наибольшее количество разнообразных наблюдений и интересных результатов. В результате проведенных исследований было обнаружено, что приложение давления к квантовым ямам HgTe принципиально изменяет их транспортные свойства. В частности, обнаружена немонотонная зависимость энергии активации и других параметров температурных зависимостей проводимости от давления, обнаружена и изучена прыжковая проводимость, при этом наблюдались зависимости типа $\rho \propto 1/T$, а также обнаружены необратимые изменения транспортных свойств изучаемых квантовых ям после снятия давления. Полученные результаты проанализированы и интерпретированы в рамках существующих представлений, в том числе в рамках моделей, описывающих проводимость системы проводящих «озёр», возникающих в пространственно неоднородном потенциале.

Пятая глава диссертации посвящена изучению квантовых поправок к проводимости эпитаксиальных пленок Bi₂Se₃. Проведено детальное исследование низкотемпературного магнитосопротивления нескольких тонких пленок, определены их транспортные параметры. С помощью изучения ориентационной зависимости магнитосопротивления выделены вклады объемных и поверхностных состояний. Показано, что в изучаемых пленках доминантную роль в переносе заряда играют поверхностные состояния. Также в магнитосопротивлении наблюдалось слабая антилокализация, которая свидетельствует о преобладающей роли топологических поверхностных состояний. Представлен детальный анализ полученных результатов, в результате которого удалось выделить поправку к проводимости, связанную с электрон-электронным (ee) взаимодействием и определить константу ee -взаимодействия K_{ee} . Аномально большая величина K_{ee} связывается с наличием в изучаемых пленках нескольких слабосвязанных проводящих каналов.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы, перечислены новые перспективные направления исследований, основанные на полученных результатах и разработанных методиках, и приведены благодарности.

В последних разделах приведены публикации автора по теме диссертации, список литературы, иллюстративного материала и таблиц.

Таким образом, в диссертации представлены аргументы в пользу возникновения под давлением перехода металл-изолятор в широких квантовых ямах HgTe, а также обнаружены немонотонные зависимости проводимости этих ям от давления, определены квантовые поправки к проводимости топологического изолятора Bi_2Se_3 , связанные с электрон-электронным взаимодействием. Полученные в настоящей работе разнообразные данные по транспортным свойствам широких квантовых ям HgTe дали новую и интересную информацию, часть из которой ещё предстоит осмыслить и которая позволяет сформулировать новые вопросы и определить перспективные направления дальнейших исследований. Достоверность результатов подтверждается воспроизведением результатов исследований на нескольких образцах.

По материалам диссертации опубликовано 4 работы, в том числе две в журнале Письма в ЖЭТФ и две в журнале Physical Review B. Публикация результатов диссертационной работы в этих журналах свидетельствует как о новизне полученных результатов, так и об обоснованности выводов.

Диссертация написана ясным языком, свидетельствующим о понимании диссертантом сути дела. Тем не менее, у оппонента есть несколько замечаний по сути работы:

1. На стр. 30 указано, что «Одним из характерных свойств одномерных краевых и двумерных поверхностных состояний в топологических материалах является отсутствие рассеяния назад в случае сохранения в системе симметрии относительно обращения времени [81–83]. Это обстоятельство должно проявляться в отсутствии эффекта слабой локализации и появлении вместо него эффекта слабой антилокализации [65, 84].» Хотелось бы отметить, что слабая антилокализация в топологических материалах возникает вследствие ненулевого значения фазы Берри на замкнутых траекториях поверхностных состояний, а не из-за запрета на рассеяние назад.

2. Главы 3 и 4 диссертации посвящены изучению широких квантовых ям HgTe под давлением, но в введении и литературном обзоре подробно обсуждаются лишь свойства структур HgTe/CdHgTe как топологического материала, но ничего не говорится о проводившихся ранее исследованиях объемных образцов этого материала под давлением.

3. Для гетероструктур CdHgTe, как и для многих полупроводников, характерна зависимость энергетической структуры от температуры. Так, в квантовых ямах HgTe/Cd_{0.65}Hg_{0.35}Te критической толщины (≈ 6.5 нм) инверсия зон, необходимая для возникновения свойств топологического изолятора, возникает лишь при температурах менее 30 К (см., например, M. Zholudev, *et al.*, *Condens. Matter*, **4**(1), 27 (2019); <https://doi.org/10.3390/condmat4010027>). В диссертации нет обсуждения возможного влияния температурной перестройки зонной струк-

туры на свойства изучаемых структур. В частности, возникает вопрос, не может ли быть связан обнаруженный переход металл-диэлектрик с такой температурной перестройкой зонной структуры?

4. На стр. 49 имеется утверждение, что обнаруженная диэлектризация электронного спектра (рис. 3.2 и 3.4) не совместима с наличием диэлектрической щели в энергетическом спектре при высоких температурах. Это утверждение не выглядит абсолютно убедительным, так как величина щели мала, $\Delta/k = 1.68$ К, и, следовательно, можно ожидать исчезновения влияния наличия щели на температурную зависимость сопротивления при $T \gg \Delta/k$, что и наблюдается в эксперименте при $T > 10$ К $\gg \Delta/k$. Возможно, проведённые исследования имели бы смысл дополнить результатами исследования эффекта Холла, который в случае перехода показал бы уменьшение концентрации носителей и, возможно, изменение их подвижности из-за изменения законов дисперсии при образовании энергетической щели.

5. В разделе 4.2.2. на рис. 4.3 представлены результаты изучения энергии активации проводимости, которые интерпретируются как следствие прыжковой проводимости, в то время как более простой случай обычной полупроводниковой зависимости не обсуждается.

6. На стр. 63 при объяснении механизма возникновения отрицательного магнитосопротивления в рамках модели Райха и Глазмана приводится также ссылка на работу [137], в которой, однако, приведена модель, дающая положительное магнитосопротивление.

Есть также несколько замечаний по стилю изложения:

1. В разделе «Научная новизна» (стр. 8) есть неудачная формулировка: «измерены без использования модельных предположений».
2. На стр. 10 имеется утверждение: «транспорт заряда в толстых пленках Bi_2Se_3 имеет двумерный характер как для объемных, так и поверхностных состояний». Вообще-то из этого утверждения следует, в частности, что поперечная проводимость Bi_2Se_3 равна нулю, что заведомо неверно.
3. На стр. 18 указано, что в постоянном электрическом поле электроны приобретают постоянную скорость $v = \mu E$ (имеется ввиду, конечно же, средняя скорость $v = \mu E$).
4. В паре мест диссертации вместо значка \propto , означающего «пропорционально», используется значок \sim , означающий «порядка» (стр. 71, стр. 83).

Все указанные замечания носят непринципиальный характер и не влияют на положительную оценку диссертации. Считаю, что содержание работы Прудкогляда Валерия Андреевича и форма её представления полностью соответствует требованиям Положения о присуждении учёных степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Фе-

дерации № 842 от 24 сентября 2013 года, а автор достоин присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния.

Автореферат и опубликованные работы полностью и точно отражают содержание диссертации.

Официальный оппонент,
главный научный сотрудник,
лаборатория электронных процессов
в квантовых системах,
доктор физико-математических наук

С.В. Зайцев-Зотов

28 февраля 2022 г.

Зайцев-Зотов Сергей Владимирович, лаборатория электронных процессов в квантовых системах, ФГБУН Институт радиотехники и радиоэлектроники им. В.А. Котельникова РАН, 125009, Москва, ул. Моховая 11, корп.7, тел.: (495) 629 33 87, e-mail: serzz@cplire.ru,

Подпись С.В. Зайцева-Зотова заверяю

Ученый секретарь ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН



И.И. Чусов

Список публикаций официального оппонента С.В. Зайцева-Зотова по тематике диссертации
В.А. Прудкогляда

1. I.A. Cohn, S.G. Zybtsev, A.P. Orlov, S.V. Zaitsev-Zotov, Magnetoresistance in Quasi-One-Dimensional Weyl Semimetal $(\text{TaSe}_x)_2\text{I}$, JETP Letters 112 (2), 88-94 (2020).
2. S.V. Zaitsev-Zotov, I.A. Cohn, Non-Quadratic Transverse Magnetoresistance in the Nodal Line Dirac Semimetal InBi , JETP Letters 111 (1), 50-54 (2020).
3. N. Fedotov, S. Zaitsev-Zotov, Experimental Observation of Bound States of 2D Dirac Electrons at Surface Steps of the Topological Insulator Bi_2Se_3 , Physica Status Solidi (RRL)—Rapid Research Letters, 13, 1800617 (2019).
4. N.I. Fedotov, S.V. Zaitsev-Zotov, Numerical analysis of surface and edge states in slabs, stripes, rods and surface steps of topological insulators, Journal of Physics: Condensed Matter, 30 (48), 485301 (2018).
5. N.I. Fedotov, S.V. Zaitsev-Zotov, Experimental search for one-dimensional edge states at surface steps of the topological insulator: Distinguishing between effects and artifacts, Physical Review B 95 (15), 155403 (2017).