

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Институт
физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна
РАН (ИФТТ РАН)



д.ф.-м.н. Левченко Александр Алексеевич

“31” 01 2022 г.

Отзыв ведущей организации

на диссертационную работу Прудкогляда Валерия Андреевича “Свойства электронного транспорта в топологических материалах на основе HgTe и Bi_2Se_3 ”, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния

В диссертации Прудкогляда Валерия Андреевича “Свойства электронного транспорта в топологических материалах на основе HgTe и Bi_2Se_3 ”, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния, приведены результаты исследования новых эффектов в транспортных свойствах двумерных систем и создания методов исследования транспортных свойств под давлением, применимых к различным материальным системам.

Актуальность темы данных исследований обусловлена возрастающим интересом к системам с инверсным спектром, проявляющим топологические эффекты, в частности, к системам с топологически защищёнными краевыми

состояниями. Также, проблема реализации состояния экситонного изолятора, несмотря на свою давнюю историю, является актуальной в силу значительного фундаментального интереса, и любое экспериментальное продвижение в этой области актуально и значимо.

Общая характеристика работы.

Диссертация имеет стандартную структуру, содержит литературный обзор, описание методик и полученных результатов. Основное содержание диссертации изложено в 5 главах.

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

Глава 1 дает обзор современного состояния области исследований. Первая ее часть посвящена описанию свойств гетероструктур с квантовыми ямами HgTe. Обсуждаются особенности электронного спектра родительских полупроводниковых материалов CdTe и HgTe и объясняется явление инверсии электронного спектра. Далее более подробно описываются свойства гетероструктур с квантовыми ямами HgTe различной толщины.

Во второй части рассматриваются транспортные свойства трехмерных топологических изоляторов Bi_2Se_3 и Bi_2Te_3 . Особое внимание уделено особенностям электронного транспорта в тонких эпитаксиальных пленках данных материалов.

Глава 2 описывает экспериментальные образцы и методы измерений, применявшиеся в ходе работы. Подробно описана техника измерений при высоких давлениях, сравнительно мало распространённая и требующая для своей реализации высокой экспериментальной культуры.

Глава 3 представляет результаты транспортных измерений, проведенных с квантовой ямой (КЯ) HgTe с ориентацией подложки (100) шириной 20 нм при

гидростатическом давлении около 14.4 кбар. Интерпретация полученных результатов дана в терминах образования состояния экситонного изолятора в исследуемой системе.

Глава 4 описывает результаты систематического изучения магнитотранспортных свойств КЯ HgTe в перпендикулярном магнитном поле при гидростатическом давлении от 0 до 15.1 кбар. Проведены систематические измерения магнитотранспорта при давлениях, которые изначально прикладывались в следующей последовательности: 0 → 15.1 → 14.1 → 12 → 13.2 → 10.5 → 8.6 → 5.8 → 4.5 → 0 кбар. Наблюдаемое поведение отчасти согласуется с теоретической моделью транспорта в двумерном полуметалле в присутствии длинноволнового беспорядка.

Глава 5 представляет результаты изучения вклада квантовых поправок к проводимости, обусловленных эффектами слабой антилокализации и электрон-электронного взаимодействия в магнитотранспортные свойства эпитаксиальных пленок Bi₂Se₃. Результаты измерений магнитосопротивления в наклонном и перпендикулярном магнитных полях были проанализированы двумя независимыми способами, что позволило отделить друг от друга квантовые поправки к проводимости, обусловленные различными механизмами. На основе анализа полученных данных сделан вывод о наличии в системе нескольких независимых каналов проводимости.

В **Заключении** сформулированы основные результаты проведенных исследований и дано обсуждение направлений дальнейшего развития работы.

Научная новизна работы.

В результате проведенных экспериментальных исследований был получен ряд новых результатов:

1. Впервые исследованы магнитотранспортные свойства широких квантовых ям топологического полуметалла HgTe под действием гидростатического давления. Обнаружена немонотонная зависимость сопротивления от

давления, в т.ч. вблизи точки зарядовой нейтральности, и сильное отрицательное магнитосопротивление.

2. При давлениях около 14 кбар в широких квантовых ямах HgTe наблюдается резкий переход от металлического типа проводимости к диэлектрическому, возникающий при понижении температуры ниже 10 К.
3. На основе феноменологического подхода была проанализирована квантовая поправка к проводимости эпитаксиальных пленок Bi_2Se_3 за счет электрон-электронного взаимодействия. Полученные данные об аномально больших значениях префактора логарифмической температурной зависимости указывают на то, что в пленке возникает несколько независимых двумерных проводящих каналов.

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 полученных результатов подтверждается тем, что все они были повторены на нескольких образцах с использованием различных методов измерения. Измерения производились с использованием сертифицированных измерительных приборов. Результаты обоснованы сопоставлением полученных экспериментальных данных с имеющимися теоретическими моделями и известными из литературы данными, полученными другими группами.

Апробация работы.

Результаты работы докладывались на российских и международных

конференциях. Материалы диссертации опубликованы в 8 печатных работах, из них 4 в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе данных Web of Science, и 4 в сборниках тезисов конференций.

Вместе с тем по диссертации можно сделать некоторые замечания:

1. Обсуждение полученных результатов страдает некоторой фрагментарностью. Так, при обсуждении результатов главы 3, внимание уделено только одному механизму локализации при увеличении давления, а именно переходу в состояние экситонного изолятора. Это соответствует тексту оригинальной работы автора, но в диссертации можно было бы ожидать чуть большей полноты, в частности, обсуждения других механизмов локализации и обоснования их нерелевантности в данном случае.

Этот недостаток особенно бросается в глаза при сравнении глав 3 и 4, где, в главе 4, как раз обсуждаются в том числе и другой механизм локализации (образование капель электрон-дырочной жидкости в длиннопериодном потенциале).

От текста диссертации можно было бы ожидать несколько более расширенного, по сравнению с оригинальными статьями, обсуждения взаимосвязи полученных результатов. Так же было бы полезно иметь исторический экскурс в проблему локализации под давлением для более «классических» систем.

2. Включённая в текст критика гетеропереходов InAs-GaSb, вообще говоря, не слишком нужна в данном тексте, сравнение полученных результатов с такими гетеропереходами не производится. С другой стороны, есть обоснованное мнение в научном сообществе о фактически полной эквивалентности физических результатов, полученных на гетеропереходах

InAs-GaSb и квантовых ямах HgTe. Возможно, данная полемика является излишней в данной диссертации.

Отмеченные недостатки не снижают, однако, общей высокой оценки представленной диссертации. Высказанные замечания не являются принципиальными и не влияют на общую положительную оценку работы.

Автореферат и опубликованные работы правильно отражают содержание диссертации. Она является законченным научным трудом по актуальной тематике, основные результаты которого опубликованы в высокорейтинговых научных журналах, индексируемых в международных библиографических базах данных Web of Science и Scopus, и представлены на ведущих конференциях по ее проблематике. Научные положения обоснованы и достоверны.

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.

Оценивая диссертацию Прудкогляда В.А. 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 кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

Доклад автора по материалам диссертации был представлен на семинаре

"Физика низких температур" ИФТТ РАН 19 января 2022 г.

Отзыв подготовлен заместителем директора ИФТТ РАН доктором физико-математических наук, профессором РАН Девятовым Эдуардом Валентиновичем и утвержден на заседании Ученого совета ИФТТ РАН «31» января 2022 г., протокол № 3

Заместитель директора
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Институт физики твердого тела
имени Ю.А. Осипьяна РАН
доктор физико-математических наук,
профессор РАН
Девятов Эдуард Валентинович

г. Черноголовка, Московская обл.,
ул.Академика Осипьяна д.2, 142432, Россия
тел.: +79160419538
e-mail: dev@issp.ac.ru

Подпись сотрудника ИФТТ РАН
Девятова Э.В. заверяю,
Учёный секретарь ИФТТ РАН
кандидат физико-математических наук
Терещенко Алексей Николаевич



Список публикаций сотрудников ведущей организации Института физики твердого тела РАН
по тематике диссертации В.А. Прудкогляда

1. Kononov, A. Proximity-induced superconductivity within the InAs/GaSb edge conducting state / A.Kononov, V.A. Kostarev, B.R. Semyagin, V.V. Preobrazhenskii, M.A. Putyato, E.A. Emelyanov, E.V. Deviatov // *Physical Review B*. – 2017. – Vol. 96, No. 24. – P. 245304
2. Shvetsov, O.O. Conductance oscillations and zero-bias anomaly in a single superconducting junction to a three-dimensional Bi₂Te₃ topological insulator / O.O. Shvetsov, V.A. Kostarev, A. Kononov, V.A. Golyashov, K.A. Kokh, O.E. Tereshchenko, E.V. Deviatov // *Europhysics Letters*. – 2017. – Vol. 119, No. 5. – P. 57009
3. Kononov, A. Signature of Fermi arc surface states in Andreev reflection at the WTe₂ Weyl semimetal surface / A. Kononov, O.O. Shvetsov, S.V. Egorov, A.V. Timonina, N.N. Kolesnikov, E.V. Deviatov // *Europhysics Letters*. – 2018. – Vol. 122, No. 12. – P. 27004.
4. Kononov, A. Spin Wave Effects in Transport Between a Ferromagnet and a Weyl Semimetal Surface / A. Kononov, O.O. Shvetsov, A.V. Timonina, N.N. Kolesnikov, E.V. Deviatov // *JETP Letters*. – 2019. – Vol. 109, No. 3. – P. 180–184.
5. Shvetsov, O.O. Surface superconductivity in a three-dimensional Cd₃As₂ semimetal at the interface with a gold contact / O.O. Shvetsov, V.D. Esin, A.V. Timonina, N.N. Kolesnikov, E.V. Deviatov // *Physical Review B*. – 2019. – Vol. 99, No. 12. – P. 125305.
6. Shvetsov, O.O. Multiple magnon modes in the Co₃Sn₂S₂ Weyl semimetal candidate / O.O. Shvetsov, V.D. Esin, A.V. Timonina, N.N. Kolesnikov, E.V. Deviatov // *Europhysics Letters*. – 2019. – Vol. 127, No. 5. – P. 57002.
7. Shvetsov, O.O. Lateral Josephson effect on the surface of the magnetic Weyl semimetal Co₃Sn₂S₂ / O.O. Shvetsov, V.D. Esin, Yu.S. Barash, A.V. Timonina, N.N. Kolesnikov, E.V. Deviatov // *Physical Review B*. – 2020. – Vol. 101, No. 3. – P. 35304.
8. Esin, V.D. Spin-dependent transport through a Weyl semimetal surface / V.D. Esin, D.N. Borisenko, A.V. Timonina, N.N. Kolesnikov, E.V. Deviatov // *Physical Review B*. – 2020. – Vol. 101, No. 15. – P. 155309.
9. Orlova, N.N. Band gap reconstruction at the interface between black phosphorus and a gold electrode / N.N. Orlova, N.S. Ryshkov, A.A. Zagitova, V.I. Kulakov, A.V. Timonina, D.N. Borisenko, N.N. Kolesnikov, E.V. Deviatov // *Physical Review B*. – 2020. – Vol. 101, No. 23. – P. 235316.
10. Esin, V.D. Magnon modes as a joint effect of surface ferromagnetism and spin-orbit coupling in CoSi chiral topological semimetal / V.D. Esin, A.V. Timonina, N.N. Kolesnikov, E.V. Deviatov // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2021. – Vol. 540. – P. 168488.
11. Bubis, A.V. Localization of helical edge states in the absence of external magnetic field / A.V. Bubis, N.N. Mikhailov, S.A. Dvoretzky, A.G. Nasibulin, E.S. Tikhonov // *Physical Review B*. – 2021. – Vol. 104. – P. 195405
12. Denisov, A.O. Charge-neutral nonlocal response in superconductor-InAs nanowire hybrid devices / A.O. Denisov, A.V. Bubis, S.U. Piatrusha, N.A. Titova, A.G. Nasibulin, J. Becker, J. Treu, D. Ruhstorfer, G. Koblmüller, E.S. Tikhonov, V.S. Khrapai // *Semiconductor Science and Technology*. – 2021. – Vol. 36, No. 9. – P. 09LT04.
13. Piatrusha, S.U. Topological Protection Brought to Light by the Time-Reversal Symmetry Breaking / S.U. Piatrusha, E.S. Tikhonov, Z.D. Kvon, N.N. Mikhailov, S.A. Dvoretzky, V.S. Khrapai // *Physical Review Letters*. – 2019. – Vol. 123, No. 5. – P. 56801.
14. Piatrusha, S.U. Edge states in lateral p-n junctions in inverted-band HgTe quantum wells / S.U. Piatrusha, V.S. Khrapai, Z.D. Kvon, N.N. Mikhailov, S.A. Dvoretzky, E.S. Tikhonov // *Physical Review B*. – 2017. – Vol. 96, No. 24. – P. 245417.