

ОТЗЫВ

официального оппонента Васильевского Ивана Сергеевича на диссертацию Мехии Альберто Бандурина «Магнитотранспортные явления в дираковском полуметалле $(\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x)_3\text{As}_2$ и модельных магнитных системах с сильным беспорядком», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

Диссертация Мехии А.Б. посвящена экспериментальному исследованию магнетотранспортных свойств тонких пленок и поликристаллов сплава $(\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x)_3\text{As}_2$, представляющего собой дираковский полуметалл Cd_3As_2 с добавлением магнитного MnAs , а также изучению особенностей транспортных свойств модельных тривиальных магнитных систем с высоким уровнем беспорядка. Исследования топологических материалов во многом мотивированы специфическими особенностями нетривиальных электронных состояний, позволяющих реализовывать ряд уникальных эффектов, а также представляющими интерес для различных приложений. Введение магнитных атомов в систему интересно, в первую очередь, для спинтронных приложений. При этом исследования влияния магнитной примеси на свойства топологических систем являются довольно редкими. Недостаток таких исследований и их важность с точки зрения фундаментальных представлений и возможного практического использования топологических материалов определяет **актуальность** исследований диссертационной работы Мехии А.Б. В свою очередь, изучение корреляции уровня беспорядка в системе с тривиальным спектром и её магнетотранспортных свойств также представляет важную задачу, решение которой позволит не только проводить исследования и характеризацию подобных систем, но и использовать беспорядок в качестве дополнительного управляющего параметра при создании спинтронных устройств.

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения и списка цитируемой литературы из 186 наименований. Общий объем диссертации составляет 148 страниц, включая 59 рисунков и 8 таблиц.

Во **введении** обоснована актуальность темы исследований, сформулированы цель и задачи работы. Представлены выносимые на защиту положения и обоснована научная новизна и значимость работы. Приведены информация об апробации работы и список публикаций автора по теме, отмечен личный вклад автора.

Первая глава представляет собой обзор состояния проблемы по физике магнетотранспортных явлений в системах с сильным беспорядком и магнитными примесями. Кратко рассмотрены квантовые поправки к проводимости, механизмы возникновения аномального эффекта Холла и проявления вклада спин-зависимого рассеяния на температурных и полевых зависимостях сопротивления магнетодопированной системы. Рассмотрены ранее известные особенности материалов, исследуемых в работе. Описаны характерные свойства топологически нетривиальных носителей заряда. Обсуждаются особенности полиморфных превращений в Cd_3As_2 и влияние замещения различными атомами на спектр и магнетотранспортные эффекты в данной системе. В завершении главы приводится краткая постановка задач работы.

Во **второй главе** кратко описаны методы получения и параметры исследуемых образцов, охарактеризован их фазовый состав. Описаны геометрические параметры включений второй фазы в модельных магнитных системах и оценены толщины тонкопленочных систем. Описана методика проведения магнетотранспортных исследований и описана используемая установка.

В **третьей главе** описываются результаты расчётов зонной структуры $(\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x)_3\text{As}_2$ и анализируются магнетотранспортные свойства образцов тонких плёнок на основе данного материала. Композиционная зависимость транспортных параметров исследуемых образцов согласуется с изовалентным характером примеси марганца в данной системе и указывает на существенный уровень структурного беспорядка, привносимого таким замещением. Исследования магнетотранспортных свойств данных плёнок при низких температурах выявило отсутствие различного вклада аномального эффекта Холла в рассмотренном диапазоне составов, а также смену знака магнетосопротивления при увеличении содержания Mn. Показано, что основной вклад в магнетосопротивление исследуемых плёнок связан с квантовыми поправками к проводимости, таким образом, при увеличении содержания марганца наблюдается переход от антилокализации к слабой локализации, что автор интерпретирует как следствие разрушение фазы дираковского полуметалла. В рамках дополнительного анализа параметров образцов и их сопоставления с результатами теоретических расчётов показывается, что смена знака магнетосопротивления происходит при энергиях Ферми носителей заряда, примерно равным величине энергетической щели, возникающей вследствие добавления марганца.

Четвёртая глава посвящена изучению свойств объемных поликристаллов $(\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x)_3\text{As}_2$. Представлена оценка средних размеров кристаллитов для рассматриваемых образцов и показано, что увеличение содержания марганца приводит лишь к небольшому уменьшению среднего размера кристаллитов для обеих тетрагональных фаз. Образцы демонстрируют выраженный металлический характер температурной зависимости сопротивления, уменьшение амплитуды соответствующего изменения, а также уменьшение холловских подвижностей, подтверждает заметный рост уровня беспорядка в системе при увеличении содержания магнитных атомов. Сопутствующий рост плотности носителей заряда автор объясняет наличием малой доли атомов марганца в междоузлиях решётки. Такое поведение заметно отличается от случая тонких плёнок, однако, в обоих случаях не наблюдается вклад аномального эффекта Холла, несмотря на довольно высокое содержание магнитных атомов. При низких температурах для всех образцов в полях выше 1 Тл наблюдается линейное магнетосопротивление, относительная амплитуда которого уменьшается с ростом содержания марганца. Автор описывает основные модели возникновения данного эффекта, том числе характерные для топологических систем, и делает заключение, что отсутствие качественного изменения характера магнетосопротивления, а также корреляция амплитуды эффекта с транспортными параметрами исследуемых образцов указывают на сохранение фазы дираковского полуметалла в рассматриваемых кристаллах. Такое отличие в поведении тонкоплёночных и объемных кристаллов автор связывает с различия в энергиях Ферми носителей заряда, в согласии с результатами зонных расчётов. Автор отмечает высокий уровень беспорядка в исследованных образцах, что может влиять на проявление эффектов, характерных для магнито-допированных систем. Для выяснения такой возможности далее в работе рассматриваются модельные магнитные системы.

В **пятой главе** исследуются магнетотранспортные свойства объемных композитов InSb-MnSb эвтектического состава с различной ориентацией игольчатых включений MnSb относительно измерительного тока. Просуммированы результаты исследований барических зависимостей транспортных параметров данных кристаллов. Гистерезис в полученных кривых указывает на наличие необратимого изменения свойств исходных кристаллов после барических воздействий. В частности, автор отмечает смену характера температурных зависимостей сопротивления образцов, а также подавление анизотропии.

Такое поведение автор объясняет сопутствующим подавлением вклада ферромагнитных включений в проводимости системы и существенный ростом уровня беспорядка. Таким образом, магнетотранспортный отклик системы после барических воздействий определяется матрицей InSb. В области низких температур обнаружены отчетливые вклады отрицательного магнетосопротивления субквадратичной формы и аномального эффекта Холла. Автор связывает данные эффекты с наличием малого количества атомов марганца, растворённых в матрице. В результате показывается, что высокий уровень беспорядка в системе не приводит к исчезновению соответствующих эффектов, характерных для магнито-допированных систем.

В **шестой главе** исследуются свойства многослойных структур Ta-FeNi при вариации толщины слоёв. Увеличение эффективной толщины слоя FeNi приводит к переходу от наноостровковой морфологии к сплошному слою, это также сопровождается изменением характера температурной зависимости сопротивления на металлический, ввиду шунтирования проводимости слоёв Ta слоями FeNi. При меньших толщинах FeNi перенос заряда происходит по слоям Ta, чья температурная зависимость сопротивления оказывается близка к линейной с отрицательным наклоном. Оценка параметров для таких образцов показывает линейную корреляцию сопротивления системы и наклона, что согласуется с правилом Моойа. В свою очередь, вариация сопротивления определяется уровнем беспорядка. Так, уменьшение толщины слоёв тантала приводит к существенному росту сопротивления, который автор частично связывает с ростом магнитного беспорядка, создаваемого наноостровами FeNi. Автор утверждает, что уменьшение этого беспорядка происходит за счет косвенного обмена (аналогично механизму РККИ) между магнитными островами как в слое, так и между слоями. На основании магнетотранспортных исследований показано, что сильный магнитный беспорядок не приводит к подавлению эффектов (в том числе аномального эффекта Холла), типичных для магнито-допированных систем.

В **заключении** формулируются основные результаты и выводы диссертационной работы.

Работа Мехии А.Б. носит выраженный характер комплексного исследования. Помимо исследования нескольких физически и химически различных систем, представлено моделирование зонной структуры методом функционала плотности. Из экспериментальных данных определены основные фундаментальные параметры, характеризующие энергетические и кинетические параметры носителей тока. Применены взаимодополняющие экспериментальные методы исследования образцов.

В работе получен ряд **новых научных результатов**, в качестве наиболее ярких можно отметить следующие:

- Обнаружен переход из фазы дираковского полуметалла в фазу тривиального полупроводника в тонких плёнках $(\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x)_3\text{As}_2$ при увеличении содержания магнитных атомов. В случае объемных поликристаллов указания на данный переход не наблюдаются, что автор связывает с заметно более высокой концентрацией носителей заряда в них по сравнению с плёнками.
- В объемных поликристаллах $(\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x)_3\text{As}_2$ полях выше 1 Тл наблюдается линейное магнетосопротивление, относительная амплитуда которого уменьшается с ростом содержания марганца, что объясняется сохранением фазы дираковского полуметалла.
- Показана существенная роль сильного структурного и магнитного беспорядка в проводимости модельных магнитных систем на основе магнитных нанометаллических структур Ta-FeNi и анизотропного композита InSb-MnSb. Тем не менее, в данных

системах отчетливо наблюдаются магнетотранспортные эффекты, характерные для магнитных систем.

- Отсутствие аномального эффекта Холла в пленках и поликристаллах $(\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x)_3\text{As}_2$ не связано со сравнительно высоким уровнем беспорядка.

Достоверность представленных результатов работы определяется использованием современного экспериментального оборудования, комплекса взаимодополняющих методов исследования, а также общепринятых алгоритмов обработки и анализа данных. Полученные результаты не противоречат известным теоретическим моделям, а также в целом согласуются с результатами других групп.

Основные результаты, выводы и положения, выносимые на защиту, достаточно **обоснованы**, являются оригинальными, и, несомненно, обладают достаточной **новизной**. Полученные результаты имеют значение для расширения фундаментальных представлений о физике топологических и магнитных материалов и композитов и могут использоваться в приборах спинтроники. **Автореферат** соответствует содержанию диссертации. Материалы диссертации достаточно полно представлены в публикациях. Всего соискателем было опубликовано 5 статей в рецензируемых научных журналах, два из которых входят в первый квартиль Q1 международных баз научного цитирования. Результаты прошли апробацию в 9 сообщениях на конференциях.

По диссертации Мехии А.Б. можно сделать следующие замечания:

1) Объекты исследования в работе достаточно разнородны, это может служить помехой при сопоставительной интерпретации данных в Главах 3 и 4. Так, в тонкопленочных образцах $(\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x)_3\text{As}_2$ на ситалле способ синтеза методом вакуумного термического испарения и осаждения на холодную подложку может нарушать стехиометрию объемного кристалла из-за потери легколетучего компонента - мышьяка, вакансии которого возможно будут влиять на концентрацию носителей тока. Отклонения в стехиометрии и дополнительный структурный беспорядок в тонкопленочных образцах, на мой взгляд, могли быть причиной значительных качественных и количественных отличий в температурных зависимостях сопротивления, значениях концентрации и подвижности носителей тока.

2) Довод о влиянии сверхпроводящих контактов на артефакты в слабополевом магнетосопротивлении в разделе 4.4 следовало бы проверить заменой контактов к образцу на несверхпроводящие, например выполненные серебряной пастой или искровой приваркой платины.

3) При анализе магнетосопротивления в образцах $(\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x)_3\text{As}_2$ необходимо было бы привести прямые экспериментальные данные до симметризации, так как в работе представлены только данные после предобработки.

4) В разделе 5.3 при анализе аномального вклада в эффект Холла анизотропного композита InSb-MnSb полезно было бы рассмотреть набор образцов с различной плотностью нитевидных кристаллов MnSb для уточнения проводимости в модели спинового стекла.

5) На мой взгляд, в работе после исследований дополнительных модельных систем недостает раздела со взаимным сопоставлением результатов для обсужденных моделей, что несколько снижает целостный синергетический эффект.

Указанные замечания носят характер рекомендаций и не снижают общей высокой оценки квалификации, продемонстрированной соискателем.

На основании изложенного считаю, что диссертация Мехии Альберто Бандурина «Магнитотранспортные явления в дираковском полуметалле $(\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x)_3\text{As}_2$ и модельных магнитных системах с сильным беспорядком» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, удовлетворяющую требованиям к кандидатским диссертациям, установленным Положением о присуждении учёных степеней, утверждённым постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 года, а её автор, Мехия Альберто Бандурин, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры физики конденсированных сред Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Васильевский Иван Сергеевич
05.03.2025

Контактные данные:

Тел.: +7 (495) 788-56-99 доб. 81-70

e-mail: ISVasilyevskij@mephi.ru

Адрес организации: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31.

Список основных работ официального оппонента И.С. Васильевского по тематике диссертации А.Б. Мехии «Магнитотранспортные явления в дираковском полуметалле $(\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x)_3\text{As}_2$ и модельных магнитных системах с сильным беспорядком» в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. A.N. Klochkov, A. Yskakov, A.N. Vinichenko, D.A. Safonov, N.I. Kargin, M.V. Bulavin, A.V. Galushko, V.R. Yamurzin and I.S. Vasil'evskii, "Effect of Neutron Irradiation on the Electronic and Optical Properties of AlGaAs/InGaAs-Based Quantum Well Structures", *Materials* 16, 6750 (2023).
2. Д. Цунваза, Р.В. Рыжук, И.С. Васильевский, Н.И. Каргин, В.А. Клоков, "Разработка нелинейной модели псевдоморфного 0.15 мкм pHEMT AlGaAs/InGaAs/GaAs транзистора", *Микроэлектроника* 52(3), 200-206 (2023).
3. E.I. Vasilkova, A.N. Klochkov, A.N. Vinichenko, N.I. Kargin, I.S. Vasil'evskii, "Comparison of the thermal interdiffusion phenomena in InGaAs/GaAs and InGaAs/AlGaAs strained heterostructures", *Surfaces and Interfaces* 29, 101766 (2022).
4. V. Krivenkov, P. Samokhvalov, I.S. Vasil'evskii, N.I. Kargin, I. Nabiev, "Plasmon-exciton interaction strongly increases the efficiency of a quantum dot-based near-infrared photodetector operating in the two-photon absorption mode under normal conditions", *Nanoscale* 47, 19929-19935 (2021).
5. D.A. Safonov, A.N. Klochkov, A.N. Vinichenko, Yu. D. Sibirmovsky, N.I. Kargin, I.S. Vasil'evskii, "Electron effective masses, nonparabolicity and scattering times in one side delta-doped PHEMT AlGaAs/InGaAs/GaAs quantum wells at high electron density limit", *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures* 133, 114787(2021).
6. I.M. Dobush, I.S. Vasil'evskii, D.D. Zykov, D.S. Bragin, A.S. Salnikov, A.A. Popov, A.A. Gorelov, N.I. Kargin, "Development of a 0.15 μm GaAs PHEMT process design kit for low \square noise applications" *Electronics (Switzerland)* 10(22), 2775 (2021).
7. V.Y. Fominski, R.I. Romanov, I.S. Vasil'evskii, D.A. Safonov, A.A. Soloviev, A.A. Ivanov, P.V. Zinin, S.Y. Krasnoborodko, Y.E. Vysokikh, V.P. Filonenko, "Pulsed laser modification of layered B-C and mixed BC_x films on sapphire substrate", *Diamond and Related Materials* 114, 108336 (2021).
8. Р.А. Хабибуллин, К.В. Маремьянин, Д.С. Пономарев, Р.Р. Галиев, А.А. Зайцев, А.И. Данилов, И.С. Васильевский, А.Н. Виниченко, А.Н. Клочков, А.А. Афоненко, Д.В. Ушаков, С.В. Морозов, В.И. Гавриленко, "Квантово-каскадный лазер на 3.3 ТГц на основе активного модуля из трех квантовых ям GaAs/AlGaAs с рабочей температурой $> 120 \text{ K}$ " *Физика и техника полупроводников* 55(11), 989-994 (2021).