

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу 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.

Представленная диссертационная работа посвящена изучению влияния добавления магнитных атомов на свойства дираковского полуметалла Cd_3As_2 и оценке роли сильного структурного и магнитного беспорядка в наблюдаемых эффектах. Изучение топологических материалов составляет одно из ключевых направлений современной физики, как с точки зрения теоретических изысканий, так и экспериментальных работ. Особенности нетривиальных электронных состояний в таких материалах определяют ряд наблюдаемых уникальных эффектов, представляющих интерес для прикладных задач. В частности, понимание механизмов взаимодействия топологических носителей заряда с магнитными атомами играет определяющую роль при создании энергоэффективных спинтронных устройств. Исследования, представленные в диссертации Мехии А.Б., определённо являются *актуальными*, поскольку нацелены на решение ряда основополагающих задач в этой области. Так, изучение фазовых переходов в топологической системе является важным аспектом развития фундаментальных представлений о физике таких материалов, тогда как вопросы устойчивости топологических состояний к вариациям состава или сильному беспорядку очевидным образом определяют перспективы использования таких систем на практике. Исследования модельных магнитных систем с тривиальным спектром носителей, представленные в данной работе, важны не только для корректной интерпретации данных для системы $(\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x)_3\text{As}_2$, но и для дополнения имеющихся данных об общем влиянии структурного и/или магнитного беспорядка на магнитотранспортные эффекты, возникающие ввиду взаимодействия магнитной и проводящей подсистем. Это также составляет *актуальную* задачу, учитывая возрастающий интерес к исследованиям систем со специфической спиновой структурой (в том числе, содержащих скирмионы), для корректного проведения которых необходимо глубокое понимание роли характерных особенностей реальных систем в получаемых результатах.

Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, заключения и списка цитируемой литературы. Работа изложена на 148 страницах, включает 59 рисунков и 8 таблиц. Список использованной литературы содержит 186 наименований.

Во **введении** приведено обоснование актуальности выбранной темы исследования, сформулированы цель исследования и решаемые научные задачи. Сформулированы выносимые на защиту положения и обоснована научная новизна и значимость работы. Дана необходимая информация об апробации работы и личном вкладе автора. Приведен список публикаций автора по теме работы.

В **первой главе** описываются основные модели магнитотранспортных эффектов в проводящих системах и особенности влияния структурного беспорядка на перенос заряда. Описаны интерференционные эффекты в зарядовом транспорте, а также эффекты, связанные с наличием магнитных атомов. Кратко просуммированы особенности структуры и магнитных свойств бинарных систем марганец-сурьма и железо-никель, исследуемых в работе. Описаны основные свойства топологических материалов, в частности

топологических полуметаллов. Отмечены основные детектируемые эффекты, характеризующие наличие топологических состояний в спектре системы. Обсуждаются результаты структурных, спектроскопических и магнитотранспортных исследований арсенида кадмия, показывающие присутствие в нём фазы дираковского полуметалла. Описаны имеющиеся данные по расчёту зонной структуры данного материала и изменения его свойств при замещении магнитными и немагнитными атомами.

Во **второй главе** автор описывает процессы получения образцов исследуемых систем с кратким описанием используемых методик. Приводятся данные структурной характеристики полученных образцов, в основном выполненной методами рентгенофазового анализа, электронной микроскопии и энергодисперсионной спектроскопии. Представлено описание измерительной установки и методики измерений транспортных и магнитотранспортных свойств, а также оценены характерные величины ошибок измерений.

В **третьей главе** исследуются магнитотранспортные свойства тонких плёнок $(\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x)_3\text{As}_2$. В рамках анализа холловских данных отмечается, что увеличение содержания марганца не оказывает заметного влияния на концентрацию электронов, однако, сопровождается существенным падением подвижностей. Поведение температурных зависимостей сопротивления также указывает на соответствующий рост беспорядка в системе. Анализируются кривые низкотемпературной магнетопроводимости. Показывается, что в слабых полях кривые хорошо описываются моделью Хиками-Ларкина-Нагаоки, свидетельствуя о наличии вклада эффектов квантовой интерференции, имеющих двумерный характер. Переход от антилокализации к режиму слабой локализации при росте содержания магнитных атомов интерпретируется автором как свидетельство разрушения исходной фазы дираковского полуметалла. Сравнение с результатами зонных расчетов подтверждает такую интерпретацию, поскольку согласно последним замещение атомами марганца приводит к открытию энергетической щели в дираковской точке и заметному изменению формы спектра в диапазоне энергий порядка величины щели.

В **четвёртой главе** анализируются магнитотранспортные свойства объемных кристаллов $(\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x)_3\text{As}_2$. Показывается, что замещение кадмия марганцем не приводит к существенному изменению средних размеров кристаллитов. Характер температурной зависимости сопротивления оказывается металлическим, а полевая зависимость холловского сопротивления оказывается линейной. Таким образом, по аналогии с плёнками, показывается отсутствие заметного вклада аномального эффекта Холла. Однако, обнаруживается заметная вариация плотности носителей заряда. Для всех образцов серии обнаружено линейное магнетосопротивление. Автор показывает, что на основании существующих моделей снижение амплитуды данного эффекта при увеличении содержания Mn можно объяснить в рамках свойств чистого Cd_3As_2 , соответственно, указаний на разрушение топологической фазы не наблюдается. Автор связывает такое поведение с заметным увеличением энергий Ферми носителей заряда, что согласуется с результатами теоретических расчетов, описанных в предыдущей главе.

В **пятой главе** исследуются свойства композитных систем InSb-MnSb эвтектического состава после барических воздействий. В результате приложения и снятия гидростатического давления происходит подавление различий в поведении образцов с разными ориентациями включений MnSb , то есть анизотропии системы, определяемой их формой. Автор заключает, что основной вклад в проводимость системы после барических воздействий вносит матрица InSb . Показано, что вследствие сильного роста уровня

беспорядка, возникающего ввиду необратимости перехода под давлением, меняется характер температурной зависимости сопротивления образцов. Возникновение заметных вкладов аномального эффекта Холла и отрицательного магнетосопротивления при температурах ниже 14 К автор связывает с наличием малого количества атомов Mn, растворённых в матрице InSb. Полученные результаты указывают на то, что наличие сильного структурного беспорядка не приводит к подавлению характерных эффектов в магнитотранспорте магнито-допированных систем.

В **шестой главе** исследуются многослойные структуры Ta-FeNi. В частности, исследуется зависимость транспортных параметров данных систем от толщины магнитного и немагнитного слоёв. Так, при малых толщинах слои FeNi представляют собой ансамбль нанокластеров, а перенос заряда осуществляется через слои Ta. При этом температурная зависимость электросопротивления оказывается практически линейной и характеризуется отрицательным наклоном, который показывает линейную корреляцию с сопротивлением системы. Наиболее ярким результатом является увеличение проводимости структуры при уменьшении толщины слоёв тантала, что автор связывает с уменьшением магнитного беспорядка в системе, ввиду усиления межслоевого обмена между магнитными нанокластерами FeNi через носители заряда в немагнитных слоях. Тем не менее, высокий уровень магнитного беспорядка также не приводит к подавлению характерных магнитотранспортных эффектов, поскольку для структур с нанокластерной морфологией слоёв FeNi отчетливо наблюдается вклад аномального эффекта Холла.

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

В работе получен ряд *новых научных результатов*, включая детектирование перехода в тривиальную фазу в арсениде кадмия при добавлении атомов марганца, а также оценку роли энергии Ферми носителей заряда в экспериментальном наблюдении данного перехода в рамках магнитотранспортных исследований. Проанализированы сопутствующие изменения транспортных параметров рассматриваемой системы. Охарактеризованы модельные магнитные системы, в частности оценено влияние сильного структурного и магнитного беспорядка на характерные эффекты в магнитотранспорте, свидетельствующие о наличии взаимодействия магнитной и проводящей подсистем. На основании сравнения полученных результатов для тривиальных и топологических систем показано, что отсутствие характерных эффектов, в частности аномального эффекта Холла, в $(\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x)_3\text{As}_2$ является особенностью данной системы и не связано с ограниченным структурным качеством исследуемых образцов. Сделанные выводы и сформулированные положения хорошо аргументированы и *обоснованы*. Полученные результаты имеют важное значение для развития фундаментальных представлений о физике топологических материалов, а также для практического применения исследованных систем и уточнения принципов создания ряда спинтронных устройств. *Достоверность* полученных результатов подтверждается использованием современного экспериментального оборудования вкупе с общепринятыми алгоритмами обработки и анализа данных, сопоставимостью с экспериментальными результатами, представленными в работах других авторов, и отсутствием противоречий известным физическим моделям.

Основные результаты работы докладывались на международных и российских конференциях и были опубликованы в 14 печатных работах, включая 9 тезисов докладов и 5 статей в ведущих научных журналах (в том числе, две статьи в журналах Q1 согласно базам Web of Science и Scopus).

Автореферат и публикации правильно и в полной мере отражают содержание диссертации.

Несмотря на довольно широкий круг рассматриваемых в диссертационной работе Мехии А.Б. эффектов и материалов, в тексте последовательно изложены необходимые литературные сведения и обсуждения полученных результатов. Тем не менее, при ознакомлении с работой возник ряд вопросов и замечаний:

1. Для получения плёнок $(\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x)_3\text{As}_2$ использовался метод вакуумно-термического напыления. Учитывая, что последние работы для плёнок арсенида кадмия фокусировались на исследованиях эпитаксиальных плёнок, возникает вопрос – как соотносятся характеристики/свойства плёнок, полученных различными методами. В таблице 3.2 приведены значения толщин пленок, которые различны для каждого образца. Могут ли наблюдаемые транспортные и магнитотранспортные свойства в том числе объясняться и размерным эффектом? Чем обусловлен выбор подложки?
2. Для измерения температурных зависимостей электросопротивления зачастую важно соблюдать условие равномерной скорости нагрева и охлаждения образцов, однако описанная методика измерений в Главе 2 в ряде случаев этого не предполагает. Была ли принципиальная разница между результатами, полученными при фиксированной скорости и произвольной?
3. Оценка среднего размера кристаллитов в Главе 4 проводилась на основании простейшей формулы Шеррера, хотя как следует из статьи, цитируемой в Главе 2, полученные дифрактограммы уже аппроксимировались по методу Ритвельда. Почему оценка не бралась из этих результатов? Что понимается под кристаллитом (зерно, субзерно)?
4. Один из ключевых результатов работы состоит в том, что энергия Ферми носителей заряда оказывается определяющим параметром в наблюдении перехода между различными электронными фазами. Была ли возможность отдельно рассмотреть влияние данного фактора на полученные результаты, например посредством дополнительного немагнитного допирования? Особенно учитывая, что типичные концентрации электронов соответствуют легированию на уровне 0,01 % от общего количества атомов, что не должно существенно влиять на зонную структуру системы
5. В Главе 6 при переходе через порог перколяции слоёв FeNi (увеличение эффективной толщины с 1,5 нм (N6) до 2,0 нм (N7)) происходит качественное изменение характера температурной зависимости сопротивления образцов, что автор объясняет шунтированием проводимости слоёв тантала сплошными слоями FeNi. Тем не менее, полевые зависимости холловского сопротивления при этом меняются только по амплитуде, а качественный «скачок» происходит при меньших толщинах. Может ли автор дать объяснение такому рассогласованию изменений характера магнитотранспортного отклика как функции эффективной толщины магнитных слоёв?

6. Работа не лишена ряда опечаток, например в тексте на рисунках 2.12(б) и 3.7(а), и пунктуационных ошибок. В подпункте 2.1.1 автор не указал чистоту используемых химических элементов.

Указанные замечания и вопросы не затрагивают защищаемые положения диссертационной работы, не ставят под сомнение ее основные выводы и не уменьшают ценности полученных результатов.

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, по содержанию и объему соответствующую 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:

Кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник лаборатории «Многофункциональные магнитные наноматериалы» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

Середина Марина Андреевна
05.03.2025

Контактные данные:

Тел.: +7 (925) 318-61-44

e-mail: nmseredina@gmail.com

Адрес организации: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4, стр. 1.

Список основных работ официального оппонента М.А. Серединой 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. M.A. Hassan, E.V. Chernyshova, D. Karpenkov, M.S. Ali, M. Seredina, M. Gorshenkov, A. Voronin, V. Khovaylo, The effect of preparation method on transport and thermoelectric properties of $\text{Hf}_{1.75}\text{Ti}_{0.25}\text{FeNiSb}_{2-x}\text{In}_x$ double half-Heusler alloys. J Mater Sci: Mater Electron 35, 947 (2024)
2. M.A. Hassan, E.V. Chernyshova, E.V. Argunov, A. Khanina, D. Karpenkov, M. Seredina, F. Bochkanov, S.K. Elshamndy, M. Gorshenkov, A. Voronin, V Khovaylo, A. El-Khouly "Thermoelectric properties of $\text{HF}_{2-x}\text{Ti}_x\text{FeNiSB}_2$ double-half Heusler alloys", Physica Scripta. 2023. 98(8). 085913 (2023)
3. M. Seredina, A. Bogach, D. Karpenkov, V. Kurichenko, E. Kolesnikov, S. Taskaev, R.Y. Umetsu, Xiaoguang Xu, T. Inerbaev, V. Khovaylo, "Magnetotransport properties of Mn_2CoSb " IEEE Transactions on Magnetism 59(11), 2600104 (2023).
4. M.A. Seredina, D.Yu. Karpenkov, E.A. Kolesnikov, M.V. Gorshenkov, A.Yu. Degtyarenko, S.V. Taskaev, P.N. Degtyarenko, Xiaoguang Xu, V.V. Khovaylo, "Compensated ferrimagnetism and compensation temperatures in $\text{Mn}_{2-2x}\text{Co}_{0.5+x}\text{V}_{0.5+x}\text{Ga}$ Heusler alloys", Journal of Magnetism and Magnetic Materials 562, 169808 (2022).
5. F. Abuova, T. Inerbaev, A. Abuova, N. Merali, N. Soltanbek, G. Kaptagay, M. Seredina, V. Khovaylo, "Structural, electronic and magnetic properties of $\text{Mn}_2\text{Co}_{1-x}\text{V}_x\text{Z}$ ($\text{Z} = \text{Ga}, \text{Al}$) Heusler alloys: An insight from DFT study", Magnetochemistry 7(12), 159 (2021).