

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу
Переваловой Александры Николаевны «Особенности электронных свойств
монокристаллов топологических полуметаллов WTe_2 и $MoTe_2$ »,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного
состояния

Диссертационная работа Переваловой А.Н. посвящена экспериментальному исследованию электронных, магнитотранспортных и оптических свойств монокристаллов топологических вейлевских полуметаллов WTe_2 и $MoTe_2$.

Актуальность темы диссертации:

Поиск и изучение новых топологических материалов, в частности топологических диэлектриков и полуметаллов, является одной из важнейших задач физики конденсированного состояния. И дираковские и вейлевские полуметаллы характеризуются наличием в объеме безмассовых квазичастиц - дираковских или вейлевских фермионов, которые обладают высокой подвижностью. Такие материалы обладают необычными свойствами как в объеме, так и на поверхности. Ярким примером дираковского полуметалла, исследованию которого посвящены тысячи работ, является графен. Исследование таких полуметаллов представляет большой интерес не только с точки зрения фундаментальной науки, но и благодаря высокому потенциалу их использования в различных приложениях сверхбыстрой электроники и спинтроники.

Таким образом, тема диссертации, посвященной экспериментальному исследованию транспортных и оптических свойств монокристаллов вейлевских полуметаллов WTe_2 и $MoTe_2$, несомненно, является актуальной как с точки зрения исследования фундаментальных физических эффектов, так и в прикладном смысле.

Структура и основное содержание работы: представленная диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения.

Во **Введении** приводится анализ актуальности и текущего состояния проблемы исследования, определены цели и задачи проводимых в диссертации исследований, отмечена их новизна, научная и практическая значимость.

В **Главе 1** приведен обзор литературы, посвященной экспериментальному и теоретическому исследованию топологических полуметаллов. Рассмотрена классификация и основные особенности электронной структуры таких систем. Описана кристаллическая структура и электронные свойства топологических полуметаллов Вейля WTe_2 и $MoTe_2$. Рассмотрены основные методы выращивания монокристаллов таких систем.

В **Главе 2** описаны экспериментальные методы, использованные при проведении исследования. Представлена методика синтеза монокристаллов WTe_2 и $MoTe_2$. Приведены результаты аттестации их структуры методами рентгеновской дифракции, сканирующей электронной микроскопии и рентгеновского энергодисперсионного микроанализа. Описаны методы измерения электросопротивления, гальваномагнитных и оптических свойств. Приведены основные формулы и модели, использованные для анализа полученных экспериментальных данных.

В **Главе 3** рассмотрены особенности поведения электросопротивления, магнито-транспортных (магнитосопротивления и эффекта Холла) и оптических свойств (комплексная диэлектрическая проницаемость, оптическая проводимость, отражательная способность) монокристалла WTe_2 в широком диапазоне температур (2 - 300 К) и магнитных полей (до 9 Тл.).

В **Главе 4** приведены результаты аналогичного исследования для монокристалла $MoTe_2$ как в полупроводниковой фазе, так и в полуметаллической T_d фазе, получаемой после закалки.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Научная новизна диссертационной работы состоит в комплексном экспериментальном исследовании электронных транспортных и оптических свойств монокристаллов вейлевских полуметаллов WTe_2 и $MoTe_2$ в широком диапазоне температур (2 - 300 К) и магнитных полей (до 9 Тл.). Новыми являются следующие результаты работы:

1. Установлено, что наблюдаемая при температурах ниже 15 К квадратичная зависимость электросопротивления монокристалла WTe_2 связана с рассеянием носителей тока на поверхности (рассеяние «электрон-фонон-поверхность»), как наблюдалось ранее в монокристаллах чистых металлов.

2. Выявлено, что минимум на температурной зависимости сопротивления WTe_2 в магнитном поле вызван переходом от эффективно сильных к эффективно слабым магнитным полям, который наблюдался в компенсированных проводниках с замкнутой поверхностью Ферми. Впервые на основе данного утверждения были проведены оценки длины свободного пробега носителей тока в WTe_2 .
3. Показано, что нелинейная полевая зависимость сопротивления Холла WTe_2 и $MoTe_2$, наблюдавшаяся ранее в монокристаллах чистого вольфрама, связана, наряду с известным механизмом компенсации/раскомпенсации электронных и дырочных носителей тока, с рассеянием электронов на поверхности.
4. Впервые проведен сравнительный анализ оптических спектров $MoTe_2$, полученных до и после структурного фазового перехода из полупроводниковой модификации в полуметаллическую.

Достоверность результатов диссертационной работы не вызывает сомнений. Проведена тщательная аттестация структуры выращенных методом химического газового транспорта монокристаллов с помощью сканирующей электронной микроскопии и рентгеновского энергодисперсионного микроанализа. Для дальнейшего исследования использовались апробированные экспериментальные методики. Автор также демонстрирует достоверность полученных результатов путем их сравнения с данными независимых работ.

Научная и практическая значимость результатов диссертационной работы состоит в том, что получены новые данные о транспортных и оптических свойствах монокристаллов WTe_2 и $MoTe_2$ в широком интервале температур и магнитных полей. Полученные результаты способствуют развитию фундаментальных знаний об электронных свойствах топологических полуметаллов и могут быть использованы при разработке на их основе устройств микро- и нанoeлектроники.

В диссертационной работе представлено добротное цельное и законченное экспериментальное исследование. Приятно отметить, что весь цикл работ (от выращивания монокристаллов WTe_2 и $MoTe_2$ и их аттестации до комплексного исследования их транспортных и оптических свойств в широком интервале температур и магнитных полей) удалось провести в рамках ИФМ УрО РАН.

Замечания по диссертационной работе

Основное замечание связано с тем, что в ходе достаточно обширного исследования, к сожалению, не удалось выделить особенности, связанные с вейлевским безмассовым характером спектра квазичастиц в WTe_2 и $MoTe_2$.

1. Безмассовость квазичастиц должна приводить к их высокой подвижности. В диссертации в рамках двухзонной модели оценивалась подвижность носителей заряда (и электронов и дырок) в WTe_2 и $MoTe_2$. Полезно было бы провести сравнение с подвижностью в обычных металлах, в частности, в чистом W.
2. Безмассовый релятивистский спектр квазичастиц в дираковских или вейлевских полуметаллах приводит к неэквидистантным релятивистским уровням Ландау в магнитном поле и необычным полуцелым значениям квантовой холловской проводимости, как это и наблюдается в графене. На полевой зависимости холловского сопротивления достаточно чистого монокристалла WTe_2 (Рис.3.15) при 2 К хорошо видна структура, характерная для квантового эффекта Холла в этой достаточно двумерной слоистой системе. Было бы полезно обработать эти экспериментальные данные под квантовый эффект Холла.
3. Неплохо было бы привести в диссертации хотя бы качественное обсуждение несущественности вклада в сопротивление ($\sim T^5$ при $T < 0.2T_D$ и $\sim T$ при $T > 0.2T_D$ (T_D – дебаевская температура)) от электрон-фононного взаимодействия, который является основным для обычных металлов при не очень низких температурах.

Оформление диссертационной работы проведено на достаточно высоком уровне, но есть и некоторые недостатки:

4. На Рис. 1.12 приведена полевая (а не температурная, как в подписи) зависимость сопротивления WTe_2 .
5. При описании Рис. 2.4(a) надо было бы обратить внимание, что монокристалл WTe_2 получился достаточно чистый и в масштабе рисунка дефектов не наблюдается (а наблюдается лишь на масштабе Рис. 3.4(a)), чтобы не складывалось впечатление, что такая однородность есть следствие дефекта рисунка.

Заключение

Представленная диссертационная работа является цельным и законченным научным исследованием. По результатам этого исследования опубликовано 10 статей в ведущих российских и международных рецензируемых журналах, входящих в Перечень ВАК.

Результаты работы доложены на 16 российских и международных конференциях. Диссертационная работа соответствует пункту 1 Паспорта специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния. Автореферат соответствует содержанию диссертационной работы.

Считаю, что диссертационная работа «Особенности электронных свойств монокристаллов топологических полуметаллов WTe_2 и $MoTe_2$ » соответствует всем требованиям «Положения о присуждении учёных степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Перевалова Александра Николаевна достойна присуждения ей учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Ведущий научный сотрудник,
заведующий лабораторией теоретической физики
ФГБУН Институт электрофизики Уральского отделения
Российской академии наук (ИЭФ УрО РАН)
доктор физико-математических наук

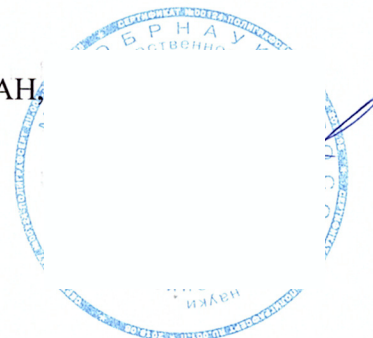
Э.З. Кучинский
«12» октября 2023 г.

Почтовый адрес: 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 106

Тел.: (+7 343) 2678823

E-mail: kuchinsk@iep.uran.ru

Подпись Э.З. Кучинского заверяю
ученый секретарь ФГБУН ИЭФ УрО РАН,
кандидат физико-математических наук



Е.Е. Кокорина

С отзывом ознакомлена,
18.10.2023

Перевалова А.Н.

Сведения об официальном оппоненте

ФИО: Кучинский Эдуард Зямович

Ученая степень, звание: доктор физико-математических наук, специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Полное наименование организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук

Должность: ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией теоретической физики

Почтовый адрес: 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 106

Тел.: (+7 343) 2678823

E-mail: kuchinsk@iep.uran.ru

Публикации в сфере исследований, которым посвящена диссертация

1. Эффект Холла в допированном мотт-халльбардовском диэлектрике / Э.З. Кучинский, Н.А. Кулеева, М.В. Садовский, Д.И. Хомский // ЖЭТФ. – 2023. – Т. 163. – С. 417-427.
2. Эффект Холла в легированном моттовском диэлектрике: DMFT-приближение / Э.З. Кучинский, Н.А. Кулеева, Д.И. Хомский, М.В. Садовский // Письма в ЖЭТФ. – 2022. – Т. 115. – С. 444-447.
3. Электрон-фононная перенормировка массы в металле за пределами адиабатического приближения / Э.З. Кучинский, Н.А. Кулеева // ЖЭТФ. – 2021. – Т. 160. – С. 434-442.
4. Разложение Гинзбурга-Ландау и верхнее критическое поле в неупорядоченной модели Хаббарда с притяжением (Миниобзор) / Н.А. Кулеева, Э.З. Кучинский, М.В. Садовский // Письма в ЖЭТФ. – 2020. – Т. 112. – С. 603-616.
5. Температурная зависимость парамагнитного критического магнитного поля в неупорядоченной модели Хаббарда с притяжением / Э.З. Кучинский, Н.А. Кулеева, М.В. Садовский // ЖЭТФ. – 2018. – Т. 154. – С. 881-889.

Ученый секретарь ИЭФ УрО РАН,
кандидат физико-математических наук

Е.Е. Кокорина