

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.133.01,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТА ФИЗИКИ
МЕТАЛЛОВ ИМЕНИ М.Н. МИХЕЕВА УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (ИФМ УрО РАН)
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ
НАУК**

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 10.11.2023, № 14

О присуждении Переваловой Александре Николаевне, гражданке России, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Особенности электронных свойств монокристаллов топологических полуметаллов WTe_2 и $MoTe_2$ » по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния принята к защите 23.06.2023, протокол № 4, диссертационным советом 24.1.133.01, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук (ИФМ УрО РАН), Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 620108, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18, приказы Минобрнауки РФ № 714/нк от 02.11.2012 и № 188/нк от 26.02.2015.

Соискатель Перевалова Александра Николаевна, 1994 года рождения, в 2018 году с отличием окончила Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по направлению подготовки 11.04.04 «Электроника и нанoeлектроника». Перевалова А.Н. освоила программу подготовки научно-педагогических кадров в очной аспирантуре при Федеральном государственном бюджетном

учреждении науки Институте физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург, год окончания аспирантуры 2022, работает в должности научного сотрудника лаборатории низких температур Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург.

Диссертация выполнена в лаборатории низких температур Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук Марченков Вячеслав Викторович, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией низких температур Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург.

Официальные оппоненты:

1) Васильев Александр Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики низких температур и сверхпроводимости, Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва;

2) Кучинский Эдуард Зямович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией теоретической физики, ФГБУН Институт электрофизики УрО РАН, г. Екатеринбург

– дали положительные отзывы на диссертацию А.Н. Переваловой.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Челябинский государственный университет», г. Челябинск в своем положительном заключении, подписанном Бучельниковым Василием Дмитриевичем, доктором физико-математических наук, профессором, заведующим кафедрой физики конденсированного состояния, указала, что «диссертационная работа А.Н. Переваловой «Особенности электронных свойств монокристаллов топологических полуметаллов WTe_2 и $MoTe_2$ » является законченной научно-

квалификационной работой, в которой получены новые экспериментальные результаты. Автореферат полно и правильно отражает основное содержание диссертации.

Результаты, полученные в диссертационной работе, могут быть использованы в научно-исследовательских и образовательных организациях, в которых занимаются исследованиями топологических материалов и разработкой новых функциональных устройств на их основе, например, в Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова, Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Санкт-Петербургском государственном университете, Институте физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Челябинском государственном университете, Уральском федеральном университете.

Считаем, что диссертационная работа «Особенности электронных свойств монокристаллов топологических полуметаллов WTe_2 и $MoTe_2$ » соответствует всем требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней и пункту 1 «Теоретическое и экспериментальное изучение физической природы и свойств неорганических и органических соединений как в кристаллическом (моно- и поликристаллы), так и в аморфном состоянии, в том числе композитов и гетероструктур, в зависимости от их химического, изотопного состава, температуры и давления» Паспорта специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния, а ее автор, Перевалова Александра Николаевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния».

Соискатель имеет 90 (30.3 п.л.) опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 26 работ, из них статей, опубликованных в рецензируемых российских и зарубежных научных изданиях и входящих в Перечень ВАК – 10, тезисов докладов в материалах российских и международных конференций – 16.

В результате проведённых автором комплексных экспериментальных исследований электронных свойств монокристаллов топологических вейлевских полуметаллов WTe_2 и $MoTe_2$ были решены задачи по установлению основных закономерностей поведения и взаимосвязи структурных, электро-, магнитотранспортных и оптических характеристик.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Кинетические свойства монокристалла топологического полуметалла WTe_2 / А.Н. Перевалова, С.В. Наумов, С.М. Подгорных, В.В. Чистяков, Е.Б. Марченкова, Б.М. Фоминых, В.В. Марченков // ФММ. – 2022. – Т. 123. – С. 1131-1137.

2. Peculiarities of the electro- and magnetotransport in semimetal $MoTe_2$ / A.N. Perevalova, S.V. Naumov, V.V. Marchenkov // Metals. – 2022. – V. 12. – P. 2089.

3. Peculiarities of electronic transport in WTe_2 single crystal / V.V. Marchenkov, A.N. Perevalova (Domozhirova), S.V. Naumov, S.M. Podgornykh, E.B. Marchenkova, V.V. Chistyakov, J.C.A. Huang // J. Magn. Magn. Mater. – 2022. – V. 549. – P. 168985.

4. Features of the electronic transport of topological semimetal $PtSn_4$ and WTe_2 single crystals / A.N. Perevalova, S.V. Naumov, S.M. Podgornykh, E.B. Marchenkova, V.V. Chistyakov, J.C.A. Huang, V.V. Marchenkov // AIP Adv. – 2022. – V. 12. – P. 35225.

5. Galvanomagnetic and optical properties of type-II Weyl semimetal candidate WTe_2 / A.N. Domozhirova, S.V. Naumov, A.A. Makhnev, E.I. Shreder, S.M. Podgornykh, E.B. Marchenkova, V.V. Chistyakov, J.C.A. Huang, V.V. Marchenkov // IEEE Trans. Magn. – 2022. – V. 58. – P. 2600305.

6. Peculiarities of the electro- and magnetoresistivity of WTe_2 and $MoTe_2$ single crystals before and after quenching / A.N. Domozhirova, S.V. Naumov, S.M. Podgornykh, E.B. Marchenkova, V.V. Chistyakov, J.C.A. Huang, V.V. Marchenkov // AIP Adv. – 2021. – V. 11. – P. 15226.

7. Electro- and magnetotransport properties of a WTe_2 single crystal / A.N. Domozhirova, S.V. Naumov, S.M. Podgornykh, E.B. Marchenkova, V.V. Chistyakov, A.A. Semiannikova, J.C.A. Huang, V.V. Marchenkov // J. Phys. Conf. Ser. – 2021. – V. 1851. – P. 12023.

8. Effect of quenching on the electrical and optical properties of MoTe_2 / V.V. Marchenkov, A.N. Domozhirova, R.A. Parulin, S.V. Naumov, A.A. Makhnev, E.I. Shreder, E.I. Patrakov, V.V. Chistyakov, A.D. Ivanov, J.C.A. Huang // J. Phys. Conf. Ser. – 2020. – V. 1482. – P. 12004.

9. Electronic transport features of MoTe_2 caused by quenching / V.V. Marchenkov, A.N. Domozhirova, S.V. Naumov, S.M. Podgornykh, V.V. Chistyakov, P.S. Korenistov, J.C.A. Huang // J. Phys. Conf. Ser. – 2020. – V. 1695. – P. 12144.

10. Electronic properties of WTe_2 and MoTe_2 single crystals / A.N. Domozhirova, A.A. Makhnev, E.I. Shreder, S.V. Naumov, A.V. Lukoyanov, V.V. Chistyakov, J.C.A. Huang, A.A. Semiannikova, P.S. Korenistov, V.V. Marchenkov // J. Phys. Conf. Ser. – 2019. – V. 1389. – P. 12149.

На диссертацию и автореферат поступило 4 отзыва:

1. От д.ф.-м.н. Вайнштейна Ильи Александровича, профессора, профессора РАН, директора Научно-образовательного центра «Наноматериалы и нанотехнологии» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург.

Без замечаний.

2. От д.ф.-м.н. Свалова Андрея Владимировича, старшего научного сотрудника отдела магнетизма твёрдых тел Института естественных наук и математики ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург.

Без замечаний.

3. От к.ф.-м.н. Тимиргазина Марата Аликовича, старшего научного сотрудника отдела теоретической физики Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», г. Ижевск.

Замечание 1: «Из автореферата не вполне понятно насколько обнаруженные особенности электронных свойств рассматриваемых материалов (квадратичная зависимость сопротивления, нелинейная зависимость холловского сопротивления и др.) обусловлены топологией энергетических зон. Являются ли эти особенности прямым следствием нетривиальной топологии или могут быть в каком-то роде совпадением?»

Замечание 2: «Ряд отличий между экспериментальными данными для WTe_2 и $MoTe_2$ объясняется в работе разными значениями отношения сопротивлений, характеризующего “чистоту” образца. Для подтверждения данного утверждения было бы полезно, если это возможно, провести эксперименты с несколькими образцами одного материала, но обладающими разной “чистотой”».

4. От к.ф.-м.н. Платонова Вадима Васильевича, доцента, ведущего научного сотрудника Научно-производственного центра физики Федерального государственного унитарного предприятия Российского федерального ядерного центра – Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ)», Нижегородская обл., г. Саров

Замечание: «Отсутствует сравнение преимущества данных материалов с другими топологическими системами и их возможностью использования в промышленности».

Выбор официальных оппонентов доктора физико-математических наук, профессора А.Н. Васильева и доктора физико-математических наук Э.З. Кучинского, а также ведущей организации Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Челябинский государственный университет», г. Челябинск обосновывается публикациями оппонентов и тематикой структурного подразделения ведущей организации, относящимися к сфере исследований, которым посвящена диссертация.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований в диссертационной работе:

1. Проведена структурная аттестация монокристаллов WTe_2 и $MoTe_2$, выращенных методом химического газового транспорта: исследована микроструктура их поверхности, подтвержден химический состав.

2. Обнаружены особенности в поведении электросопротивления и гальваномагнитных характеристик полуметаллических WTe_2 и $MoTe_2$, а именно:

– квадратичная температурная зависимость электросопротивления полуметаллических WTe_2 и $MoTe_2$ в температурных интервалах от 2 до 70 К и от 4,2 до 45 К, соответственно; причиной квадратичного по температуре вклада в электросопротивление WTe_2 при температурах ниже 15 К является рассеяние носителей тока на поверхности, где имеет место интерференционный механизм рассеяния «электрон-фонон-поверхность», как наблюдалось ранее в монокристаллах чистых металлов;

– минимум на температурной зависимости сопротивления WTe_2 в магнитном поле, объяснением которого является переход от эффективно сильных к эффективно слабым магнитным полям, характерный для компенсированных проводников с замкнутой поверхностью Ферми;

– нелинейная полевая зависимость сопротивления Холла WTe_2 и $MoTe_2$, причиной которой является, наряду с механизмом компенсации/раскомпенсации электронных и дырочных носителей заряда, рассеяние носителей тока на поверхности, как наблюдалось ранее в монокристаллах чистого вольфрама.

3. Получены новые экспериментальные данные об оптических свойствах полуметаллических WTe_2 и $MoTe_2$ в диапазоне спектра (0,2-5,0) эВ. Показано, что спектр оптической проводимости данных материалов

представляет собой широкую полосу, сформированную в основном межзонными переходами.

4. Показано, что закалка MoTe_2 приводит к сильному изменению температурной зависимости электросопротивления: вид зависимости изменяется с «полупроводникового» на «металлический», а величина электросопротивления при низких температурах уменьшается на 10 порядков. Оптические характеристики MoTe_2 в результате закалки также существенно изменились: при энергиях менее 1,5 эВ мнимая часть диэлектрической проницаемости и отражательная способность возросли. Это свидетельствует о появлении вклада от свободных носителей в оптическое поглощение и улучшении проводящих свойств.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что получены новые данные об электронных характеристиках монокристаллов WTe_2 и MoTe_2 , которые позволяют сформировать более полное представление об электронной структуре и свойствах топологических полуметаллов, а также интерпретирован ряд особенностей поведения электронных свойств монокристаллов WTe_2 и MoTe_2 , а именно: квадратичная температурная зависимость электросопротивления при низких температурах, минимум на температурной зависимости сопротивления в магнитном поле, нелинейная полевая зависимость сопротивления Холла.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что электронные характеристики исследуемых в работе монокристаллов WTe_2 и MoTe_2 и информация об их зависимости от внешних воздействий (температура, магнитное поле, термообработка) могут быть использованы при разработке различных датчиков и устройств на основе данных материалов.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что экспериментальные данные, представленные в диссертационной работе, получены с помощью метрологически аттестованного оборудования и

апробированных методик, хорошо воспроизводятся при проведении измерений на разных образцах одинакового состава. Результаты исследования хорошо согласуются с известными литературными данными, опубликованы в рецензируемых научных изданиях и обсуждались на российских и международных научных конференциях.

Личный вклад соискателя состоит в том, что автор совместно с научным руководителем участвовал в формулировке цели и постановке задач исследования, анализе и интерпретации полученных результатов. Автором проведены подготовка образцов к измерениям электросопротивления и гальваномагнитных свойств, измерение температурных зависимостей электросопротивления, обработка полученных экспериментальных данных и их представление в виде докладов на научных школах и конференциях. Выращивание монокристаллов и рентгеноструктурный анализ проводились к.ф.-м.н. С.В. Наумовым в лаборатории магнитных полупроводников ИФМ УрО РАН. Исследования микроструктуры поверхности методом сканирующей электронной микроскопии и рентгеновский энергодисперсионный микроанализ осуществлялись автором совместно с к.ф.-м.н. Е.Б. Марченковой, а также с к.х.н. Е.И. Патраковым в Центре коллективного пользования (ЦКП) «Испытательный центр нанотехнологий и перспективных материалов» ИФМ УрО РАН. Электросопротивление и гальваномагнитные свойства были измерены совместно с к.ф.-м.н. С.М. Подгорных и д.ф.-м.н. В.Н. Неверовым в ЦКП ИФМ УрО РАН. Измерения оптических характеристик были проведены совместно с к.ф.-м.н. Е.И. Шредер и А.А. Махневым в лаборатории оптики металлов ИФМ УрО РАН. Публикации по теме диссертационной работы были подготовлены автором совместно с научным руководителем и соавторами.

Диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, посвящённую решению актуальной задачи по установлению основных закономерностей поведения и взаимосвязи структурных, оптических, электро- и магнитотранспортных характеристик монокристаллов

топологических полуметаллов WTe_2 и $MoTe_2$, и соответствует критериям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 (в редакции от 26.05.2022 г. № 751 с изменениями от 18.03.2023 г. № 415).

В ходе защиты диссертации критических замечаний высказано не было.

На заседании 10.11.2023, проведенном в очном режиме, диссертационный совет принял решение присудить Переваловой Александре Николаевне учёную степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 18 человек, из них 6 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации 1.3.8. Физика конденсированного состояния, 6 докторов наук по специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений, 6 докторов наук по специальности 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов, участвовавших в заседании, из 21 человека, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту – нет, проголосовали: «за» – 18, «против» – нет, «недейств.» – нет.

Председатель диссертационного совета,

доктор физ.-мат. наук

В.В. Устинов

Ученый секретарь диссертационного совета,

доктор физ.-мат. наук

Т.Б. Чарикова

13 ноября 2023 г.