

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель декана

(должность)

Физического факультета СПбГУ

(подпись)

А.В.Титов

(инициалы, фамилия)

« 21 » 02 2025

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

По итогам рассмотрения и обсуждения
Диссертации Хачатряна Андраника Шотаевича
(ф.и.о. соискателя ученой степени)

представленной на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
Ученая степень

по теме **«Магнитные свойства топологических материалов,
легированных переходными металлами»**
(тема диссертации)

по научной специальности 1.3.8. «Физика конденсированного состояния»
цифр и наименование научной специальности (научных специальностей)

и выполненной в Федеральном государственном бюджетном образовательном
учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный
университет», кафедра физики твердого тела, год представления 2025
наименование организации и год представления

а также представленных соискателем научных публикаций, в которых излагаются
основные научные результаты диссертации, приняты следующие решения,
замечания и рекомендации :

Представленная работа является актуальной в связи с тем, что легированные магнитными примесями топологические изоляторы и полуметаллы Вейля имеют большие перспективы практического применения в спинтронике и других областях благодаря модификации поверхностных электронных состояний, отражающихся на транспортных характеристиках. С фундаментальной точки зрения актуальность работы связана с решением проблемы устойчивости определенной нетривиальной топологии электронных зон к нарушению симметрии по отношению к обращению времени в условиях возникновения магнитного порядка.

Основной целью диссертационной работы являлось исследование магнитных свойств легированных магнитными примесями кристаллов топологического изолятора селенида висмута и вейлевского полуметалла теллурида вольфрама в

широком диапазоне магнитных полей и температур. Проводился анализ температурных зависимостей намагниченности и изотерм намагниченности, что позволило выявить характер магнитного упорядочения в исследованных материалах, в том числе сосуществование разных видов магнитного порядка в зависимости от концентрации и вида парамагнитных примесей, а также обнаружить метамагнетизм и определить зарядовое состояние примесных ионов. Измерения теплоемкости топологических материалов дало возможность выявить независимость температуры Дебая от легирования и найти константы Зоммерфельда. Исследуемые материалы были протестированы на совершенство кристаллической структуры и однородность распределения примесных ионов.

Автором диссертационного исследования были получены следующие **основные научные результаты**:

1. Методами рентгеновской дифракции, а также энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии проведены исследования структурных и элементных характеристик монокристаллов топологических изоляторов **$\text{Bi}_{2-x}\text{Fe}_x\text{Se}_3$** ($x=0.006$; **0.03**; **0.06**), **$\text{Bi}_{2-x}\text{Cr}_x\text{Se}_3$** ($x=0.01$; **0.03**; **0.06**) и вейлевского полуметалла **$\text{Fe}_{0.03}\text{W}_{0.97}\text{Te}_2$** . Установлено наличие высокого структурного совершенства образцов и гомогенности распределения магнитных примесных атомов железа и хрома в диамагнитных матрицах на основе **Bi_2Se_3** и **WTe_2** .
 2. С использованием СКВИД-магнитометрии проведены детальные исследования температурных зависимостей магнитной восприимчивости, коэрцитивной силы и полевых зависимостей намагниченности (изотерм намагниченности) монокристаллов **$\text{Bi}_{2-x}\text{Fe}_x\text{Se}_3$** , **$\text{Bi}_{2-x}\text{Cr}_x\text{Se}_3$** и **$\text{Fe}_{0.03}\text{W}_{0.97}\text{Te}_2$** в широком диапазоне температур 1.8 – 400 К и магнитных полей ± 70 kOe. Выявлено сосуществование в определенных температурных областях ферромагнитного и антиферромагнитного порядка. Определены температуры фазовых переходов.
 3. При исследовании изотерм намагниченности монокристаллов **$\text{Bi}_{2-x}\text{Cr}_x\text{Se}_3$** и **$\text{Fe}_{0.03}\text{W}_{0.97}\text{Te}_2$** впервые обнаружены явления метамагнетизма, связанного с электронами проводимости. Выявлены температурные области существования зонного метамагнетизма и зависимость от ориентации кристаллов в магнитном поле.
 4. При исследовании температурной зависимости магнитной восприимчивости легированных и нелегированного кристаллов **WTe_2** впервые продемонстрировано наличие температурно-зависимого диамагнетизма, предположительно обусловленного нетривиальной топологией электронных зон.
 5. Проведено теоретическое описание и интерпретация полученных экспериментальных данных о магнитных свойствах исследованных монокристаллов в рамках существующих моделей магнетизма для разбавленных магнетиков. Определены валентные состояния атомов магнитных примесей железа и хрома в диамагнитных матрицах на основе **Bi_2Se_3** и **WTe_2** .
 6. Проведены исследования легированного **WTe_2** в рамках метода теории функционала плотности. Показана устойчивость структуры относительно легирования ионами железа и хрома. Выявлены локализованные электронные состояния при легировании ионами железа.
-

Научная и практическая значимость диссертационной работы определяется получением новых данных о магнитных свойствах топологических материалов, легированных переходными металлами. Результаты, полученные в рамках диссертационной работы, могут быть применены в исследованиях в области магнитоэлектроники, в частности, при создании новых классов магнитных топологических изоляторов и вейлевских полуметаллов, а также других материалов с уникальными свойствами.

Данные по магнитной восприимчивости легированных топологических материалов используются при исследовании фазовых переходов, связанных с изменением магнитного порядка. Полученные, описанные и систематизированные в рамках диссертационной работы данные будут способствовать более точному прогнозированию свойств подобных материалов и созданию новых материалов с желаемыми характеристиками, что является критически важным в дизайне новых материалов и устройств.

Изученные в работе материалы могут найти практическое применение в магнотронике, квантовых компьютерах или других высокотехнологичных устройствах благодаря уникальной комбинации их физических свойств. Полученные результаты будут полезны при расширении областей применения топологических материалов в различных технологических процессах и устройствах, включая магнитные устройства и наноэлектронику.

Обоснованность и достоверность полученных результатов подтверждаются использованием современного высокоточного экспериментального оборудования при получении результатов и тестировании материалов, применением строгих математических методов и проверенных численных алгоритмов, доказавших свою надежность в предыдущих исследованиях. Там, где это возможно, достоверность результатов проверяется сравнением с данными других авторов.

Личное участие автора заключается в самостоятельном изучении необходимой литературы по теме диссертации, в проведении исследования магнитных и тепловых свойств монокристаллов селенида висмута и теллурида вольфрама, легированных магнитными примесями, совместно с операторами экспериментальных установок, в самостоятельной обработке экспериментальных результатов и их интерпретации в рамках современных теоретических представлений, в написании черновых вариантов статей и докладов на конференциях, в формулировании выводов исследования. Все основные научные результаты были получены автором самостоятельно.

Полнота изложения материалов диссертации в публикациях и апробация работы. По материалам диссертации опубликованы 3 статьи в ведущих международных и российских рецензируемых физических журналах, входящих в перечень ВАК и базы данных РИНЦ, Web of Science и Scopus. Все положения, выносимые на защиту, нашли отражение в публикациях. Результаты работы были доложены на 5 всероссийских и международных конференциях.

Диссертационное исследование Хачатряна Андраника Шотаевича **«Магнитные свойства топологических материалов, легированных переходными металлами»** соответствует паспорту по научной специальности 1.3.8. **«Физика конденсированного состояния»** и рекомендуется к защите на соискание ученой

степени кандидата физико-математических наук.

Нарушения со стороны Хачатряна Андраника Шотаевича

ФИО соискателя

п. 11 Приказа СПбГУ от «19» ноября 2021 г. №11181/1

не выявлены

не выявлены, выявлены

и Приказа СПбГУ от 03.07.2023 № 9287/1

не выявлены

не выявлены, выявлены

Все основные выносимые на защиту научные материалы диссертацию опубликованы в предложенных соискателем статьях.

Коллектив сотрудников кафедры физики твердого тела СПбГУ и кафедры электроники твердого тела

наименование подразделения

рекомендовал

рекомендовал / не рекомендовал / рекомендовал при условии устранения замечаний

диссертацию Хачатряна Андраника Шотаевича

фио соискателя

по теме «Магнитные свойства топологических материалов, легированных переходными металлами»

тема диссертации

к защите на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

ученая степень

по научной специальности 1.3.8. «Физика конденсированного состояния»

шифр и наименование научной специальности (научных специальностей)

При проведении голосования коллектива сотрудников подразделения (протокол заседания № 44/12/15-02-2 от 21.02.2025 г.) в количестве 17 человек, участвовавших в заседании из 20 человек штатного состава:

Проголосовали «за»: 17,

«против»: 0,

«воздержались»: 0.

Подписал: Профессор с возложением
обязанностей заведующего кафедрой
физики твердого тела

(должность)

Физический факультет СПбГУ

(наименование структурного подразделения)

доктор физ.-мат. наук

(ученая степень)

доцент (снс)

(ученое звание)

С.Ю.Вербин 21.02.2025

(подпись)

Расшифровка подписи, дата

