

На правах рукописи

Антоненко Анастасия Олеговна

**Ядерный магнитный резонанс в
топологических изоляторах Bi_2Te_3 и Bi_2Se_3**

Специальность 01.04.07 — Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург - 2018

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном университете

Научный руководитель: **Чарная Елена Владимировна**
доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры физики твердого тела ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет»

Официальные оппоненты: **Немов Сергей Александрович**
доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры «Технология и исследование материалов»
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Скрипов Александр Владимирович
доктор физико-математических наук, старший научный
сотрудник, главный научный сотрудник лаборатории
кинетических явлений Института физики металлов имени
М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург

Ведущая организация: Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, г. Санкт-Петербург

Защита состоится «__» _____ 2018 г. в _____ на заседании диссертационного совета Д 212.232.33 по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук на базе Санкт-Петербургского государственного университета по адресу: 198504, Санкт-Петербург, Петродворец, Ульяновская ул., д. 1, малый конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке им. М. Горького Санкт-Петербургского государственного университета по адресу: 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7/9. Диссертация и автореферат диссертации размещены на сайте <https://disser.spbu.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба направлять по адресу: 198504, Санкт-Петербург, Петродворец, Ульяновская ул., д. 1, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.232.33 А.М. Поляничко.

Автореферат разослан «__» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к. ф.-м. наук, доцент

А.М. Поляничко

Общая характеристика работы

Актуальность темы. В настоящее время одной из наиболее актуальных задач физики твердого тела является поиск и проведение исследований новых материалов, демонстрирующих уникальные электронные свойства. Недавно было обнаружено существование широкого класса кристаллических материалов с нетривиальной топологией, приводящей к возникновению необычных электронных состояний. К ним относятся, например, вейлевские полуметаллы и топологические изоляторы.

Отличительной особенностью трехмерных топологических изоляторов (ТИ) является наличие энергетической щели в объеме материала и металлической проводимости, которая возникает на поверхности. Необычные свойства поверхности ТИ, а именно, наличие бесщелевых поверхностных состояний, благодаря которым спин-поляризованный ток течет по поверхности практически без потери энергии, дают потенциальную возможность для их использования в спинтронике и оптоэлектронике, а также для создания новых магнитоэлектрических приборов и квантовых компьютеров.

Несмотря на значительный интерес к ТИ, возникший после их обнаружения, подробных исследований свойств ТИ методом ядерного магнитного резонанса (ЯМР) до сегодняшнего дня не проводилось. Более того, в научной литературе полностью отсутствовали данные ЯМР-измерений в ТИ в широком диапазоне температур вплоть до гелиевых. Поскольку ЯМР позволяет получать ценную информацию о локальных свойствах кристаллических материалов, то представляется важным и целесообразным применить этот метод для изучения особенностей электронной подсистемы в трехмерных ТИ. Сдвиг и форма линий спектра ЯМР и скорость спиновой релаксации зависят от спиновой поляризации электронов и электрон-ядерного сверхтонкого взаимодействия, что особенно существенно для ТИ, так как нетривиальная топология ТИ связана с инверсией зон в присутствии сильной спин-орбитальной связи.

Целью настоящей диссертационной работы является изучение спектров ЯМР ^{125}Te в теллуриде висмута, Bi_2Te_3 , в широком диапазоне температур, интерпретация вида спектров, выделение вклада в сдвиги компонент спектров ЯМР взаимодействия с подвижными носителями заряда, исследование процессов ядерной спин-решеточной релаксации ^{125}Te в Bi_2Te_3 и выяснение применимости к ним соотношения Корринги, а также исследование спектров ЯМР ^{77}Se в селениде висмута, Bi_2Se_3 , в широком температурном диапазоне и их интерпретация.

В соответствии с целью диссертационной работы были поставлены следующие **задачи**:

1. Выявить оптимальную методику получения спектров ЯМР ^{125}Te и ^{77}Se в теллуриде и селениде висмута соответственно при условии слабых сигналов и широких резонансных линий.
2. Получить спектры ЯМР ^{125}Te для порошка Bi_2Te_3 при комнатной температуре. Провести анализ вида спектров и моделирование спектров с учетом кристаллической структуры Bi_2Te_3 . Исследовать температурную эволюцию спектров ЯМР. Разделить вклады различных механизмов в сдвиги резонансной частоты. Выделить вклад в сдвиги взаимодействия ядер с носителями заряда и найти в случае установления термоактивационного характера концентрации подвижных зарядов соответствующие энергии активации.
3. Исследовать процессы ядерной спин-решеточной релаксации ^{125}Te в порошке и монокристаллах ТИ Bi_2Te_3 для отдельных компонент спектра ЯМР. Оценить применимость соотношения Корринги.
4. Получить спектры ЯМР ^{125}Te для ориентированных монокристаллических образцов Bi_2Te_3 в широком диапазоне температур. Провести сопоставление результатов моделирования спектров, полученных на основании измерений для порошка Bi_2Te_3 , с данными для монокристаллов. По температурным зависимостям сдвигов компонент спектров ЯМР, найденных для монокристаллов, рассчитать энергию активации и проанализировать согласованность полученных результатов с расчетами для порошка.

Выявить аномалии спектров ЯМР при низких температурах.

5. Получить спектры ЯМР ^{77}Se в кристаллах ТИ Bi_2Se_3 в широком диапазоне температур. Провести интерпретацию спектров на основе данных о кристаллической структуре Bi_2Se_3 . Выявить изменения с температурой сдвигов резонансных частот. Исследовать особенности спектров ЯМР при низких температурах.

Научная новизна.

1. Впервые продемонстрирован двухкомпонентный спектр ЯМР ^{125}Te для порошка и монокристаллических образцов Bi_2Te_3 . Наблюдаемые линии соотнесены с двумя кристаллографически неэквивалентными позициями Te1 и Te2. Определены значения компонент тензора сдвига линий ЯМР при комнатной температуре.
2. Впервые проведены детальные исследования температурной зависимости сдвигов компонент спектра ^{125}Te в топологическом изоляторе Bi_2Te_3 в широком диапазоне температур. Продемонстрирован термоактивационный характер сдвига Найта, обусловленный изменением концентрации носителей заряда. Рассчитаны значения энергии активации, отвечающие сдвигу уровня Ферми к зоне проводимости. Показано, что энергия активации совпадает для обеих компонент спектра ЯМР.
3. Впервые измерены времена спин-решеточной релаксации для монокристалла Bi_2Te_3 в сравнении с порошком, приготовленным из того же кристалла. Для монокристаллического и порошкового образцов продемонстрирована применимость соотношения Корринги при температурах выше 130 К.
4. Впервые проведены детальные исследования температурной зависимости спектров ЯМР ^{77}Se в монокристалле Bi_2Se_3 . Показано, что сдвиг компонент спектра слабо изменяется при понижении температуры от комнатной до 11.4 К в отличие от ситуации, наблюдаемой для Bi_2Te_3 . Для интерпретации спектра ^{77}Se предложена модель, учитывающая наличие двух положений

селена, Se1 и Se2, в кристаллической решетке. Оценены изотропный сдвиг и анизотропия тензора сдвига.

5. Впервые обнаружен аномальный вид спектров ЯМР ^{125}Te в Bi_2Te_3 и ^{77}Se в Bi_2Se_3 при низкой температуре для монокристаллов в ориентации, при которой кристаллографическая ось c была направлена параллельно внешнему магнитному полю. При этом нарушалась пропорциональность между интенсивностями компонент спектра и числом ионов в двух кристаллографических позициях.

Положения, выносимые на защиту:

1. Спектры ЯМР ^{125}Te в кристаллическом порошке Bi_2Te_3 состоят из двух компонент, которые не связаны с вкладом поверхности и могут быть объяснены наличием двух кристаллографически неэквивалентных позиций ионов теллура Te1 и Te2. Соотношение интенсивностей компонент спектра соответствует отношению числа ионов в позициях Te1 и Te2.
2. Спектры ЯМР ^{125}Te в монокристаллах Bi_2Te_3 при ориентации $c \perp \mathbf{B}_0$ во всем исследуемом температурном диапазоне и при ориентации $c \parallel \mathbf{B}_0$ выше 130 К согласуются с результатами моделирования спектра порошка. Спектры ЯМР ^{125}Te для $c \parallel \mathbf{B}_0$ при более низких температурах противоречат виду спектров порошка. При этом изотропные сдвиги и интенсивности компонент спектра имеют аномальные величины по отношению к спектру порошка.
3. Температурные зависимости положений компонент спектра ЯМР ^{125}Te для порошка и монокристаллов Bi_2Te_3 в ориентации $c \perp \mathbf{B}_0$ определяются уменьшением сдвига Найта с понижением температуры, обусловленным термоактивационной природой носителей заряда. Энергии активации, рассчитанные для позиций Te1 и Te2, совпадают в пределах экспериментальной погрешности.
4. Ядерная спин-решеточная релаксация ^{125}Te в порошке и монокристаллах Bi_2Te_3 подчиняется экспоненциальному закону. При комнатной температуре

время спин-решеточной релаксации для компоненты спектра, соответствующей позиции Te1, значительно короче, чем для второй компоненты спектра. Время релаксации увеличивается при уменьшении температуры до 130 К в соответствии с соотношением Корринги.

5. Спектры ЯМР ^{77}Se при низкой температуре для монокристалла Bi_2Se_3 в ориентации $c \perp \mathbf{B}_0$ состоят из двух компонент, связанных с наличием двух кристаллографически неэквивалентных позиций ионов селена Se1 и Se2, что согласуется с данными других авторов, полученными при комнатной температуре. Положение компоненты спектра ЯМР ^{77}Se , соответствующее позиции Se1, имеет слабую зависимость от температуры, что обусловлено большой концентрацией носителей заряда дефектной природы. Интенсивности компонент спектра ЯМР ^{77}Se для монокристалла Bi_2Se_3 в ориентации $c \parallel \mathbf{B}_0$ при низкой температуре имеют аномальные величины по отношению к спектрам в другой ориентации.

Научная и практическая значимость. Топологические изоляторы являются новым классом материалов, которые благодаря особым свойствам поверхностных состояний, в частности, сильной связи спина электрона с его импульсом, рассматриваются в качестве перспективных материалов в спинтронике и оптоэлектронике, а также для разработки новых магнитоэлектрических приборов и квантовых компьютеров.

Полученные в настоящей работе результаты для величин сдвигов линий ЯМР и скорости спиновой релаксации, обусловленных электрон-ядерным взаимодействием, дают информацию об электронной подсистеме и могут быть использованы на практике при разработке элементов и устройств на основе ТИ. Кроме того, полученные результаты могут служить основой для дальнейших теоретических и экспериментальных исследований особенностей электронных свойств в трехмерных ТИ, а также для построения теоретических моделей взаимодействия ядер и электронов при наличии сильной спин-орбитальной связи.

Степень достоверности и апробация результатов. Степень достоверности результатов проведенных исследований определяется корректностью постановки задач работы, использованием новейшего ЯМР-оборудования для достижения поставленных целей и воспроизводимостью полученных экспериментальных результатов.

Основные результаты настоящей диссертации были представлены на шести научных конференциях и школах: XIX Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике (Санкт-Петербург, Россия, 2017), The 10th Alpine Conference on Solid-State NMR (Chamonix Mont-Blanc, France, 2017), 3^d PhD Student Conference “New Frontiers in Physics” (St. Petersburg, Russia, 2017), 13th International Youth School-Conference “Magnetic resonance and its applications” (St. Petersburg, Russia, 2016), Ampere NMR School 2016 (Zakopane, Poland, 2016), Международная молодежная конференция Физика.СПб (Санкт-Петербург, Россия, 2015) и опубликованы в трех научных статьях в журнале, рекомендованном ВАК РФ для опубликования результатов кандидатских и докторских диссертаций и входящем в базы данных РИНЦ, Web of Science и Scopus, и шести тезисах докладов конференций.

Личный вклад автора заключается в непосредственном проведении измерений спектров ЯМР ^{125}Te и ^{77}Se и времен спин-решеточной релаксации в порошке Bi_2Te_3 и монокристаллах Bi_2Te_3 и Bi_2Se_3 в широком диапазоне температур, а также в самостоятельной обработке и анализе полученных данных, расчетах энергии активации и параметров спектров ЯМР и моделировании спектров, участии в обсуждениях результатов, в подготовке докладов и публикаций по тематике диссертации.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, 8 глав, основных результатов диссертации, списка публикаций автора по теме диссертации и списка цитируемой литературы из 105 наименований. Работа изложена на 119 страницах и содержит 36 рисунков и 3 таблицы.

Содержание диссертации

В главе 1 приводится краткий обзор основных теоретических представлений о свойствах исследуемых материалов, необходимых для дальнейшего анализа экспериментальных данных, полученных в рамках диссертационной работы.

Глава 2 посвящена описанию процесса выращивания исследуемых в настоящей работе монокристаллов ТИ Bi_2Te_3 и Bi_2Se_3 методом Бриджмена-Стокбаргера. Кроме того, в этой главе обсуждается их кристаллическая структура, описываются детали эксперимента и методики, применяемые в настоящей работе.

В главе 3 приводятся результаты исследования формы спектральных линий ЯМР ^{125}Te для кристаллического порошка ТИ Bi_2Te_3 высокой чистоты при комнатной температуре в поле 9.4 Т. Впервые был продемонстрирован двухкомпонентный спектр ЯМР ^{125}Te для порошка Bi_2Te_3 . Две линии в спектре были соотнесены с двумя кристаллографически неэквивалентными позициями теллура Te1 и Te2 с учетом числа атомов в этих позициях. Был проведен анализ вида спектра и предложено два подхода к его моделированию, один из которых (рис. 1) был позднее подтвержден измерениями на монокристаллах теллурида висмута.

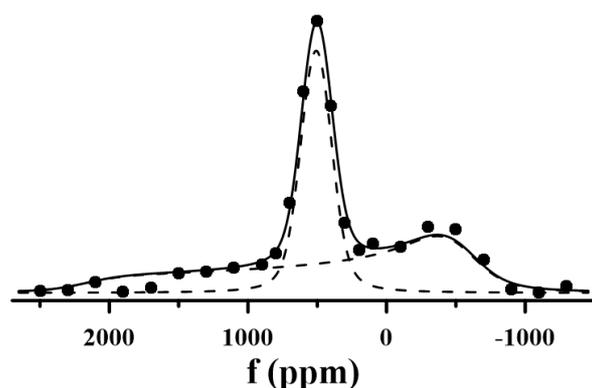


Рис.1. Огибающая сигналов эха ^{125}Te для порошка Bi_2Te_3 при комнатной температуре и разложение спектра ЯМР на компоненты.

Глава 4 посвящена исследованиям порошка ТИ Bi_2Te_3 в диапазоне температур от 16 до 293 К в поле 9.4 Т. Демонстрируется сильная зависимость сдвигов обеих компонент спектра ЯМР ^{125}Te от температуры (рис. 2). Был выявлен

термоактивационный характер носителей заряда и рассчитана энергия активации для обеих компонент спектра ЯМР ^{125}Te . Ее значение оказалось одинаковым в пределах экспериментальной погрешности для обеих компонент спектра и равным 28 ± 6 meV, что составляет примерно одну треть ширины запрещенной зоны Bi_2Te_3 . Последнее свидетельствует о сдвиге уровня Ферми к зоне проводимости в исследуемом образце теллурида висмута.

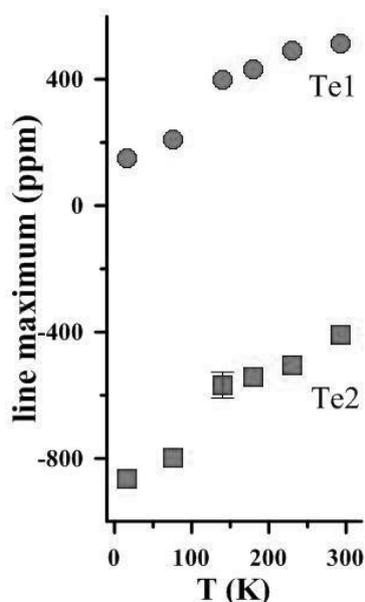


Рис.2. Зависимость максимумов линий ЯМР ^{125}Te для порошка Bi_2Te_3 от температуры. Погрешность показана там, где она превышает размер экспериментальной точки.

В главе 5 приводятся результаты ЯМР-измерений монокристаллических пластин Bi_2Te_3 при комнатной температуре в поле 9.4 Т. Образцы исследовались в двух ориентациях: когда кристаллографическая ось c была направлена перпендикулярно и параллельно внешнему магнитному полю \mathbf{B}_0 . Впервые показано, что спектр ЯМР ^{125}Te для монокристаллического Bi_2Te_3 состоит из двух компонент (рис. 3), которые были соотнесены с позициями атомов Te1 и Te2. Для изучаемых ориентаций пластин наблюдаются сильные различия в положениях этих компонент. В рамках двух способов моделирования спектров, предложенных в главе 3 для разложения спектра порошка Bi_2Te_3 , были рассчитаны параметры тензора сдвига для монокристаллических пластин теллурида висмута и показано, что наличие компоненты меньшей интенсивности в случае ориентации образца $c \parallel \mathbf{B}_0$ может быть объяснено только в рамках одного из способов разложения спектра порошка на две компоненты (рис. 1).

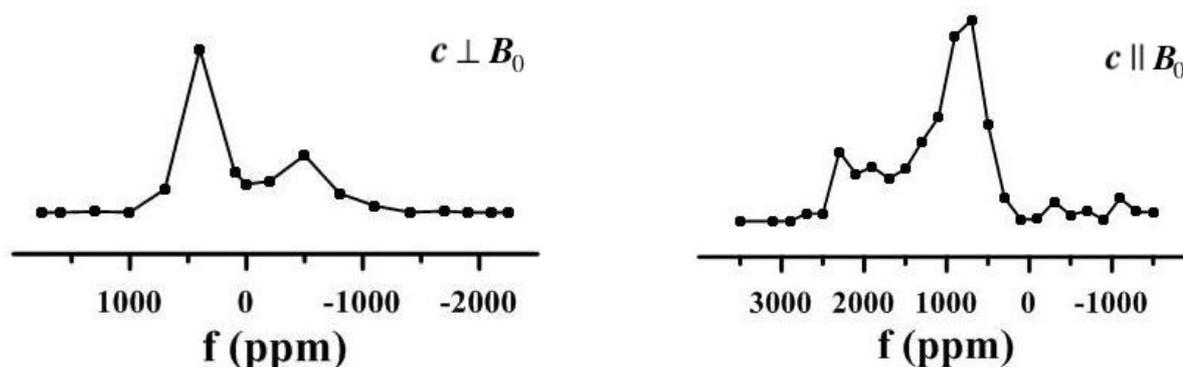


Рис.3. Огибающая сигналов эха ^{125}Te для монокристаллического Bi_2Te_3 в двух ориентациях при комнатной температуре.

Глава 6 посвящена ЯМР-измерениям монокристаллических пластин Bi_2Te_3 в двух ориентациях ($c \perp B_0$ и $c \parallel B_0$) в температурном диапазоне от 12.5 до 293 К в поле 9.4 Т. Продемонстрирована сильная зависимость сдвигов обеих линий спектра ЯМР ^{125}Te от температуры. Для образца в ориентации $c \perp B_0$ была оценена энергия активации для обеих компонент спектра. В пределах экспериментальной погрешности ее значение совпало с найденным в главе 4 значением энергии активации для порошка Bi_2Te_3 . Были обнаружены особенности в поведении спектров ЯМР с уменьшением температуры при ориентации монокристаллических пластин $c \parallel B_0$: при температурах ниже 91 К изменялось соотношение интенсивностей компонент спектра, что приводило к доминированию компоненты, отвечающей позиции Te2.

В **главе 7** приведены результаты измерений времени спин-решеточной релаксации ядер ^{125}Te в Bi_2Te_3 как для кристаллического порошка, так и для монокристаллических пластин в обеих ориентациях. Был выявлен экспоненциальный характер спин-решеточной релаксации при комнатной температуре и обнаружено сильное различие скорости спиновой релаксации для двух ориентаций монокристаллических пластин в магнитном поле. Времена продольной релаксации, найденные для обеих компонент спектра ЯМР ^{125}Te , представлены в таблице 1. Также была оценена справедливость соотношения Корринги для данных образцов. Показано, что соотношение Корринги выполняется при температурах от комнатной вплоть до 130 К.

Образец	Порошок Bi_2Te_3	Монокристалл Bi_2Te_3 , $c \perp \mathbf{B}_0$	Монокристалл Bi_2Te_3 , $c \parallel \mathbf{B}_0$
T_1 , ms (Te1)	140±20	64±15	130±20
T_1 , ms (Te2)	400±50	230±30	

Таблица 1. Времена спин-решеточной релаксации, T_1 , ^{125}Te , рассчитанные для всех исследуемых образцов Bi_2Te_3 при комнатной температуре для линий, относящихся к Te1 и Te2.

Глава 8 посвящена ЯМР-измерениям монокристалла Bi_2Se_3 в двух ориентациях ($c \perp \mathbf{B}_0$ и $c \parallel \mathbf{B}_0$) в температурном диапазоне от 11.4 до 293 К в поле 9.4 Т. Были продемонстрированы двухкомпонентные спектры ЯМР ^{77}Se для обеих ориентаций монокристалла в магнитном поле. Полученные линии были соотнесены с двумя кристаллографически неэквивалентными позициями селена Se1 и Se2. Для данного образца сдвиг Найта практически не зависел от температуры, что связано с несовершенством исследуемого кристалла Bi_2Se_3 . Плотность носителей заряда не подчинялась термоактивационному закону. Было обнаружено аномальное изменение формы спектра ЯМР ^{77}Se при температуре 15.8 К для образца в ориентации $c \parallel \mathbf{B}_0$. В отличие от спектра при другой ориентации, спектр при $c \parallel \mathbf{B}_0$ состоял из достаточно узкой линии в высокочастотной области и широкой и несколько менее интенсивной компоненты в области более низких частот. По данным для монокристалла были рассчитаны параметры спектра ЯМР ^{77}Se для порошка селенида висмута. По рассчитанным параметрам произведено моделирование спектра порошка (рис. 4).

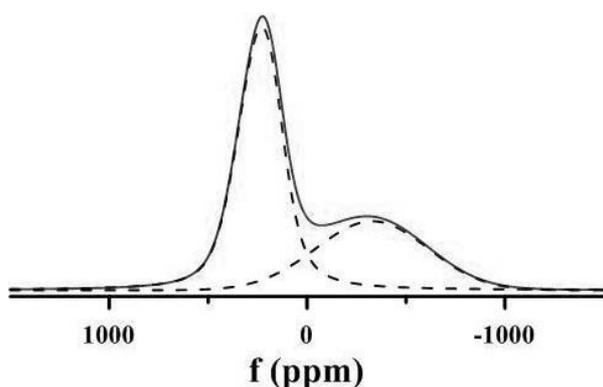


Рис.4. Модель спектра ЯМР ^{77}Se для порошка Bi_2Se_3 .

В конце диссертации приведены основные результаты работы и список публикаций автора по теме диссертации, а также список цитируемой литературы.

К основным результатам исследований ТИ Bi_2Te_3 и Bi_2Se_3 методом ЯМР, полученным в рамках настоящей работы, можно отнести следующие:

1. Были подобраны оптимальные методики получения спектров ЯМР ^{125}Te в Bi_2Te_3 и ^{77}Se в Bi_2Se_3 при условии слабых сигналов и широких резонансных линий, а именно: построение суммарного спектра сигналов спинового эха, полученных на разных отстройках от резонансной частоты, (VOCS) и построение огибающих сигналов спинового эха.
2. Было продемонстрировано, что для всех исследованных образцов спектр ЯМР при комнатной температуре состоял из двух линий. Эти линии были сопоставлены двум кристаллографически неэквивалентным позициям теллура (Te1 и Te2) и селена (Se1 и Se2) в кристаллических структурах Bi_2Te_3 и Bi_2Se_3 соответственно. Такой двухкомпонентный спектр для теллурида висмута наблюдался впервые. Были определены значения компонент тензора сдвига линий ЯМР для порошка Bi_2Te_3 . Подобные оценки проведены также для Bi_2Se_3 на основе данных, полученных для монокристалла, что позволило построить модель спектра ЯМР ^{77}Se для порошка Bi_2Se_3 .
3. Было выявлено различие температурного поведения компонент спектра ЯМР в теллуриде и селениде висмута, несмотря на одинаковую структуру этих халькогенидов висмута. Для порошка и монокристаллического Bi_2Te_3 в ориентации $c \perp \mathbf{B}_0$ наблюдалось монотонное смещение спектров ЯМР в сторону низких частот с понижением температуры, при этом обе компоненты спектров сдвигались идентично в соответствии с термоактивационным характером носителей заряда, что позволило оценить их энергию активации. В обоих случаях значение энергии активации совпало с точностью до экспериментальной погрешности. Рассчитанное значение энергии активации указывает на смещение уровня Ферми к зоне

проводимости, что согласуется с проводимостью Холла n -типа в исследованных образцах Bi_2Te_3 . Для монокристалла ТИ Bi_2Se_3 в ориентации $c \perp \mathbf{B}_0$ спектр ЯМР ^{77}Se слабо смещался с понижением температуры, при этом для данной ориентации не наблюдалось изменения ширины спектра ЯМР ^{77}Se с температурой. Отсутствие значительной температурной эволюции спектров ЯМР показывает, что плотность носителей заряда не подчиняется термоактивационному закону, что объясняется значительным количеством дефектов, возникших в процессе роста исследуемого кристалла Bi_2Se_3 .

4. Был обнаружен аномальный вид спектров ЯМР ^{125}Te в Bi_2Te_3 и ^{77}Se в Bi_2Se_3 при низкой температуре для монокристаллов в ориентации, когда кристаллографическая ось c была направлена параллельно внешнему магнитному полю. Полученные спектры не допускают объяснения в рамках представлений о топологически тривиальных полупроводниковых кристаллах, не имеющих структурного фазового перехода. Спектры ЯМР значительно уширились при понижении температуры в случае обоих рассматриваемых образцов.
5. Были определены времена спин-решеточной релаксации в порошке и монокристалле Bi_2Te_3 в обеих ориентациях при комнатной температуре для двух компонент спектра ЯМР ^{125}Te , за исключением линии, относящейся к Te_2 , для монокристалла в ориентации $c \parallel \mathbf{B}_0$. Продемонстрирован экспоненциальный характер восстановления продольной намагниченности. Обнаружено сильное различие скорости ядерной спин-решеточной релаксации для двух ориентаций монокристаллических пластин в магнитном поле. Показано, что соотношение Корринги хорошо выполняется при температурах выше 130 К. При дальнейшем понижении температуры это соотношение перестает выполняться, поскольку сказываются другие механизмы спин-решеточной релаксации. Для монокристалла Bi_2Se_3 были проведены оценки времени спин-решеточной релаксации ^{77}Se для компоненты, отвечающей позиции Se1.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

[I] Д.Ю. Подорожкин, Е.В. Чарная, А. Антоненко, Р. Мухамадьяров, В.В. Марченков, С.В. Наумов, J.C.A. Huang, H.W. Weber, А.С. Бугаев, “Исследование топологического изолятора Bi_2Te_3 методом ЯМР”, Физика твердого тела **57**, 1698 (2015) // D.Yu. Podorozhkin, E.V. Charnaya, A. Antonenko, R. Mukhamad'yarov, V.V. Marchenkov, S.V. Naumov, J.C.A. Huang, H.W. Weber, A.S. Bugaev, “Nuclear Magnetic Resonance Study of a Bi_2Te_3 Topological Insulator”, Physics of the Solid State **57**, 1741 (2015).

[II] А.О. Антоненко, Е.В. Чарная, Д.Ю. Нефедов, Д.Ю. Подорожкин, А.В. Усков, А.С. Бугаев, М.К. Lee, L.J. Chang, С.В. Наумов, Ю.А. Перевозчикова, В.В. Чистяков, Е.Б. Марченкова, H.W. Weber, J.C.A. Huang, В.В. Марченков, “ЯМР-исследования монокристаллов топологического изолятора Bi_2Te_3 при низких температурах”, Физика твердого тела **59**, 836 (2017) // А.О. Antonenko, E.V. Charnaya, D.Yu. Nefedov, D.Yu. Podorozhkin, A.V. Uskov, A.S. Bugaev, M.K. Lee, L.J. Chang, S.V. Naumov, Yu.A. Perevozchikova, V.V. Chistyakov, E.B. Marchenkova, H.W. Weber, J.C.A. Huang, V.V. Marchenkov, “NMR Studies of Single Crystals of the Topological Insulator Bi_2Te_3 at Low Temperatures”, Physics of the Solid State **59**, 855 (2017).

[III] А.О. Антоненко, Е.В. Чарная, Д.Ю. Нефедов, Д.Ю. Подорожкин, А.В. Усков, А.С. Бугаев, М.К. Lee, L.J. Chang, С.В. Наумов, Ю.А. Перевозчикова, В.В. Чистяков, J.C.A. Huang, В.В. Марченков, “Исследования топологического изолятора Bi_2Te_3 методом ЯМР в широком температурном диапазоне”, Физика твердого тела **59**, 2308 (2017) // А.О. Antonenko, E.V. Charnaya, D.Yu. Nefedov, D.Yu. Podorozhkin, A.V. Uskov, A.S. Bugaev, M.K. Lee, L.J. Chang, S.V. Naumov, Yu.A. Perevozchikova, V.V. Chistyakov, J.C.A. Huang, V.V. Marchenkov, “NMR Study of Topological Insulator Bi_2Te_3 in a Wide Temperature Range”, Physics of the Solid State **59**, 2331 (2017).

[IV] А.О. Антоненко, Е.В. Чарная, Д.Ю. Подорожкин, Р.И. Мухамадьяров, В.В. Марченков, С.В. Наумов, J.C.A. Huang, H.W. Weber, А.С. Бугаев,

“Исследование топологического изолятора Bi_2Te_3 методом ЯМР”, Международная молодежная конференция Физика.СПб, Санкт-Петербург, Россия, 26-29 октября 2015, Тезисы докладов, с. 194 (2015).

[V] A.O. Antonenko, E.V. Charnaya, D.Yu. Podorozhkin, D.Yu. Nefedov, V.V. Marchenkov, S.V. Naumov, “NMR of the topological insulator Bi_2Te_3 ”, Ampere NMR School 2016, Zakopane, Poland, 12-18 June 2016, Book of abstracts, p. 43 (2016).

[VI] A.O. Antonenko, E.V. Charnaya, V.V. Marchenkov, S.V. Naumov, “NMR ^{125}Te in the topological insulator Bi_2Te_3 ”, 13th International Youth School-Conference “Magnetic resonance and its applications”, St. Petersburg, Russia, 20-26 November 2016, Abstracts, p. 163 (2016).

[VII] A.O. Antonenko, “ ^{125}Te NMR studies of the topological insulator Bi_2Te_3 single crystal”, 3^d PhD Student Conference “New Frontiers in Physics”, St. Petersburg, Russia, 19 April 2017, Conference abstracts, p. 26 (2017).

[VIII] A. Antonenko, E. Charnaya, V. Marchenkov, S. Naumov, “Low-temperature NMR of the topological insulator Bi_2Te_3 single crystal”, The 10th Alpine Conference on Solid-State NMR, Chamonix Mont-Blanc, France, 10-14 September 2017, Book of abstracts, R 3 (2017).

[IX] А.О. Антоненко, Д.Ю. Нефедов, Д.Ю. Подорожкин, Е.В. Чарная, “Низкотемпературный ЯМР монокристалла топологического изолятора Bi_2Se_3 ”, XIX Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике, Санкт-Петербург, Россия, 27 ноября-1 декабря 2017, Тезисы докладов, с. 9 (2017).