

На правах рукописи

**Есин Варнава Денисович**

**Транспорт в топологических полуметаллах в нелинейном  
режиме: спиновый диод и нелинейный эффект Холла**

Специальность 1.3.8 –  
Физика конденсированного состояния

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Черноголовка – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт физики твёрдого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук

**Научный руководитель:** **Девятков Эдуард Валентинович**  
доктор физико-математических наук, доцент

**Официальные оппоненты:** **Дмитрий Харитонович Квон**  
доктор физико-математических наук, профессор, чл.-корр. РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, заведующий лабораторией физики низкоразмерных электронных систем

**Игорь Витальевич Загороднев,**  
кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова Российской академии наук, старший научный сотрудник

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук

Защита состоится 28 ноября 2023 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 24.1.136.01 (Д 002.100.02) при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт физики твёрдого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук (ИФТТ РАН), расположенном по адресу: 142432, Московская обл., г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна д. 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФТТ РАН и на сайте диссертационного совета ИФТТ РАН: <http://www.issp.ac.ru/main/index.php/ru/dis-council.html>

Автореферат разослан \_\_\_\_\_

Врио учёного секретаря диссертационного совета  
24.1.136.01 (Д 002.100.02)  
доктор физико-математических наук

Гаврилов С. С.

© Есин В.Д., 2023  
© ИФТТ РАН., 2023

## Общая характеристика работы

### Актуальность выбранной тематики.

В области физики твёрдого тела растёт интерес к новому классу объектов – топологические материалы. Первые теоретические исследования в этой области следует отнести к модели Б. А. Волкова и О. А. Панкратова, которые рассмотрели новую, полупроводниковой структуру на основе контакта двух материалов со взаимной инверсией энергетических зон [1]. Оригинальность предложенной идеи заключалась в образующихся, в подобных структурах, поверхностных состояниях, которые сохраняются независимо от степени чистоты поверхности. Авторы показали, что уравнение Дирака для такой модели всегда будет иметь локализованные у контакта решения, при наличии зонной инверсии и сильного спин-орбитального взаимодействия.

Первые экспериментальные реализации предложенной модели относятся к исследованиям двумерных систем в режиме спинового квантового эффекта Холла [2], в которых удалось подтвердить наличие краевого транспортного тока. Такой успех заложил основу для поиска нового класса материалов (позже, топологических изоляторов [3]), характеризующихся наличием щели в объёмном спектре и топологически защищёнными поверхностными состояниями.

В настоящее время, классическими примерами в области топологических материалов стали полуметаллы Вейля и Дирака [4], для которых характерна инверсия энергетических зон. В отличие от топологических изоляторов, спектр полуметаллов Вейля и Дирака

содержит особые точки с линейным спектром, в которых валентная зона соприкасается с зоной проводимости. Поверхностные состояния в таких материалах можно визуализировать. Например, для вейлевских полуметаллов [5], в которых поверхностные состояния реализованы в виде Ферми арок, используется методика ARPES (Angle-resolved photoemission spectroscopy) [6]. Нетривиальность энергетического спектра является источником необычных эффектов, исследуемых в настоящее время. Например, магнитосопротивление [7], сверхпроводимость [8], а также некоторые оптические свойства данных материалов [9].

В частности, популярным направлением в этой области является исследование динамики намагниченности в магнитных системах. Исторически, предсказанный Д. Слончевским механизм спиновой прецессии в магнитных материалах [10] был подтверждён в искусственно созданных магнитных многослойках (спиновый диод) [11]. В свою очередь, ряд топологических материалов обладают магнитными свойствами, что позволяет ожидать в них возникновение магнонов – волновых возбуждений спиновых систем (спиновые волны) [12]. Более того, для магнитных вейлевских полуметаллов предсказана возможность появления магнонных возбуждений [13], что стимулирует проводить исследования в данной области.

Другим популярным направлением в физике топологических материалов являются нелинейные эффекты, связанные с измерениями на второй гармонике. Существование поверхностных состояний основано на ненулевой кривизне Берри в импульсном пространстве. Теоретически

предсказано, что прямой демонстрацией отличной от нуля кривизны Берри в транспортном эксперименте является наблюдение нелинейного эффекта Холла, ожидаемый для широкого класса материалов: топологических изоляторов, двумерных дихалькогенидов переходных металлов и трёхмерных полуметаллов Вейля и Дирака [14]. Однако, в отличие от классического эффекта Холла, зафиксировать холловский сигнал в этих случаях можно на второй гармонике. Экспериментально, такие работы были проведены в 2019 г., для случаев слоистых дихалькогенидов переходных металлов [15, 16]. Подобный успех стимулирует исследовать нелинейный эффект Холла в топологических материалах.

**Целью** работы является исследование динамики намагниченности спинового диода на основе топологических материалов и нелинейного эффекта Холла.

Для достижение установленной цели, возникает **задача** – создание гетероструктур на основе проводника и топологического материала, и, как следствие, проведение транспортных экспериментов.

В качестве используемых **методов** выступают транспортные измерения в условиях низких ( $1.4 - 4.2 K$ ), сверхнизких ( $0.03 - 1.2 K$ ) температур, а также при наличии внешнего магнитного поля (до  $\sim 5 T$ ).

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Было подтверждено наличие новых магнетонных ветвей в ферромагнитном  $Co_3Sn_2S_2$ . В отличие от ранних исследований с ферромагнитными многослойками, было показано, что полученные

результаты отражают влияние топологически защищённых поверхностных состояний в магнитном вейлевском полуметалле  $Co_3Sn_2S_2$ .

2. Показаны, качественно, одинаковые результаты на двух типах интерфейсных структур с магнитным и немагнитным полуметаллами Вейля, для которых общим является только поверхностные состояния в вейлевском полуметалле. Сильная температурная зависимость и нетривиальная эволюция магнанных пиков во внешнем магнитном поле подтверждает спин-поляризованный перенос через поверхностные состояния в вейлевских полуметаллах.

3. Экспериментально исследован спин-поляризованный транспорт в монокристаллическом  $CoSi$ . Была показана индуцированная током спиновая поляризация из-за сильной спин-орбитальной связи, а также возникновение магнанных мод с нетривиальной эволюцией в магнитном поле как совместный эффект поверхностного ферромагнетизма и спин-орбитальной связи в киральном топологическом полуметалле  $CoSi$ .

4. Впервые исследован нелинейный эффект Холла в немагнитных трёхмерных топологических полуметаллах Вейля ( $WTe_2$ ) и Дирака ( $Cd_3As_2$ ). Показано, что сигнал нелинейного эффекта Холла имеет нечётную зависимость от внешнего магнитного поля, в отличие от термоэдс, демонстрирующего чётную зависимость.

5. Для магнитного вейлевского полуметалла  $Co_3Sn_2S_2$  исследован продольный и поперечный отклик на второй гармонике, отражающий сложное взаимодействие нелинейного эффекта Холла и термоэлектрического отклика. В сильном магнитном поле, квадратичная

зависимость поперечного отклика на второй гармонике соответствует теоретическим предсказаниям, в то время как линейная зависимость в слабых полях может отражать вклад как нелинейного эффекта Холла, так и вклада Ферми арок в магнитотермический транспорт в вейлевских полуметаллах.

6. Экспериментально исследован нелинейный эффект Холла в ферромагнетике  $Fe_3GeTe_2$ . Впервые был использован гармонический анализ Холла для исследования спиновых текстур на поверхности топологического полуметалла с узловой линией – магнитных скирмионов. Была продемонстрирована нетривиальная зависимость поперечного сигнала на второй гармонике от магнитного поля с гистерезисом в сильных полях и плоской, не зависящей от магнитного поля, областью в слабых полях.

#### **Научная новизна работы:**

1. Впервые были обнаружены новые магнотонные ветви в ферромагнитном  $Co_3Sn_2S_2$ . Было показано влияние топологически защищённых поверхностных состояний на полученные результаты.
2. Были продемонстрированы, качественно, одинаковые результаты на двух интерфейсных структурах с магнитным и немагнитным полуметаллами Вейля, для которых общим является только поверхностные состояния.
3. Экспериментально показано возникновение магнотонных мод как совместный эффект поверхностного ферромагнетизма и спин-орбитальной связи в киральном топологическом полуметалле  $CoSi$ .

4. Впервые обнаружен нелинейный эффект Холла в немагнитных трёхмерных полуметаллах Вейля и Дирака. Подтверждена нечётная зависимость холловского сигнала от внешнего магнитного поля.
5. Продемонстрировано сложное взаимодействие нелинейного эффекта Холла и термоэлектрического отклика для магнитного вейлевского полуметалла  $Co_3Sn_2S_2$ . Подтверждена квадратичная зависимость поперечного отклика на второй гармонике в сильном магнитном поле.
6. Обнаружена связь между гармоническим анализом Холла и нетривиальными спиновыми текстурами в топологическом полуметалле с узловой линией  $Fe_3GeTe_2$ .

**Научную и практическую значимость работы** составляют экспериментальные исследования динамики намагниченности в спиновом диоде на основе топологических материалов и нелинейного эффекта Холла, что даёт понимание вклада поверхностных состояний в транспорт заряда. Также, для подобных исследований существуют теоретические предпосылки и экспериментальная база. Наконец, подобные исследования, потенциально, могут быть приложены в области спинтроники.

**Степень достоверности и апробации работы.** В диссертационной работе представлены оригинальные результаты, которые были получены впервые и докладывались с последующим обсуждением на следующих конференциях:

1. Стендовый доклад «Нелинейный эффект Холла в трёхмерных Вейлевском и Дираковском полуметаллах» – 24-й международный симпозиум «Нанозфизика и нанозлектроника», Нижний Новгород, 2020 г.
2. Устный доклад «Демонстрация нескольких ветвей магнанных возбуждений в магнитном Вейлевском полуметалле  $Co_3Sn_2S_2$ » – 24-й международный симпозиум «Нанозфизика и нанозлектроника», Нижний Новгород, 2020 г.
3. Приглашённый доклад «Спиновые эффекты в транспортных свойствах топологических полуметаллов» – Совещание по теории твёрдого тела в ФТИ им. А. Ф. Иоффе, 2021 г.
4. Международная конференция с конкурсным отбором участников. «Возбуждение магнонов в структурах на основе топологических полуметаллов» – 24-я уральская международная зимняя школа по физике полупроводников, Екатеринбург, 2022 г.
5. Стендовый доклад «Измерение второй гармоники как инструмент для обнаружения спиновых текстур в магнитном полуметалле с узловой линией  $Fe_3GeTe_3$ » – 27-й международный симпозиум «Нанозфизика и нанозлектроника», Нижний Новгород, 2023 г.
6. «Получение объёмных слитков спин-поляризованного бесщелевого полупроводника  $Ti_2MnAl$ » – 2-я Международная научно-практическая конференция «Редкие металлы и материалы на их основе: технологии, свойства и применение», Москва, 2022 г.
7. Семинары и учёные советы в ИФТТ РАН.

**Личный вклад автора.** Представленные результаты были получены лично автором диссертационной работы. Соискатель принимал активное участие в постановках задач и выборе методологических подходов, изготовлении образцов в чистой комнате, проведении измерений, обработке и интерпретации полученных результатов, а также в подготовке и написании статей.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, 3-х глав и заключения. Полный объём представленной диссертации составляют 96 стр., включающих в себя основной текст и 53 иллюстрации. Список используемой литературы насчитывает 155 наименования.

## **Содержание работы**

**Введение** диссертационной работы обосновывает актуальность выбранной тематики, сформулированы цели, задачи и методы их решения. Помимо этого, перечислены положения, выдвигаемые на защиту и аргументирована научная новизна проведённых исследований. Дополнительно, описывается научная и практическая значимость работы, степень достоверности и апробации работы, а также личный вклад автора.

**Первая глава** представляет из себя обзор научной литературы, связанной с выбранной тематикой. **Первый параграф** главы посвящён рассмотрению нового класса материалов в физике твёрдого тела –

топологических материалов. Проиллюстрировано появление бесщелевого спектра из полуметаллов с инверсией энергетических зон и образование топологически защищённых поверхностных состояний, реализованных в виде Ферми арок в таких классах материалов, как полуметаллы Вейля и Дирака. Дополнительно, описана методика ARPES (Angle-resolved photoemission spectroscopy) для визуализации Ферми арок в перечисленных классах топологических материалов. Во втором параграфе уделяется внимание исследованию динамики намагниченности в спиновом диоде на основе топологических материалах. Продемонстрировано историческое развитие данного направления, начиная с предсказанного Д. Слончевским механизма спиновой прецессии в магнитных материалах, и заканчивая серией экспериментальных работ, посвящённых исследованию индуцированных током спиновых возбуждений (магнонов) в ферромагнитных многослойках. В конце приводятся теоретически предсказания аналогичной динамики намагниченности в магнитных топологических полуметаллах. Третий параграф посвящён исследованию нелинейного эффекта Холла в топологических материалах и эффектам, связанным с ней. В качестве примера, рассмотрен нелинейный эффект Холла, возникающий из-за ненулевой кривизны Берри в материалах с нарушенной инверсионной симметрией или симметрией по обращению времени. Приведён пример материалов-кандидатов, в которых возможно возникновение данного эффекта, включая топологические материалы, и описан ряд экспериментальных работ по исследованию нелинейного эффекта Холла в двумерных

дихалькогенидах переходных металлов. В конце описана актуальность исследования нелинейного эффекта Холла в магнитных топологических материалах.

**Вторая глава** диссертации описывает методику проводимых исследований. В **первом параграфе** описан процесс выращивания всех кристаллов, с которыми проводились исследования. В качестве экспериментальных, были выбраны: немагнитные полуметаллы Вейля ( $WTe_2$ ) и Дирака ( $Cd_3As_2$ ), магнитные вейлевские полуметаллы (ферромагнетик  $Co_3Sn_2S_2$  и ферримагнетик  $Ti_2MnAl$ ), киральный топологический полуметалл ( $CoSi$ ), а также ферромагнитный полуметалл с узловой линией ( $Fe_3GeTe_2$ ). Все перечисленные материалы были выращены в лаборатории Физико-химических основ кристаллизации ИФТТ РАН, под руководством Н.Н. Колесникова. **Второй параграф** посвящён процессу изготовления экспериментальных образцов. Рассмотрены процедуры оптической фотолитографии и термического напыления контактных площадок на оксидированные кремниевые подложки  $SiO_2$ , а также описана новая, запатентованная методика изготовления контактов к тонким трехмерным чешуйкам слоистых кристаллов, заключающаяся в прижиге кристалла к предварительно сформированным контактам. В **третьем параграфе** затронуты аспекты работы в условиях низких и сверхнизких температур. Рассмотрена конструкция криостата откачки паров жидкого гелия  ${}^4_2He$ , а также принцип работы криостата растворения непрерывного действия, работающего на циркуляции изотопов  ${}^3_2He$  в смеси  ${}^3_2He + {}^4_2He$ . Также описано устройство сверхпроводящего соленоида, которым оснащён

криостат и процедура генерации магнитного поля. В четвёртом параграфе представлены электрические схемы с задачей тока, используемые в экспериментах. Для исследования интерфейсных эффектов и спиновой прецессии в магнитных материалах, описана трёхточечная схема измерения, сигнал которой отражает сопротивление соединённых последовательно контакта, интерфейса образца и часть его объёма. Напротив, для исследования нелинейного эффекта Холла на второй гармонике, приводится четырёхточечная схема измерения, которая позволяет исключить сопротивление контактов и отражает только объём исследуемого образца.

Третья глава посвящена экспериментальным результатам, полученным в Лаборатории квантового транспорта ИФТТ РАН.

Первая часть диссертации посвящена исследованию транспортных свойств поверхностных состояний в спиновом диоде на основе топологического материала. Для изготовления образцов, была использована разработанная и запатентованная методика изготовления контактов к тонким трехмерным чешуйкам слоистых кристаллов, заключающаяся в прижиме кристалла к контактам, предварительно сформированным на поверхности оксидированного кремния.

Матрица металлических контактных дорожек необходимой геометрии формируется стандартными методами литографии на поверхности оксидированного кремния. Исходный монокристалл механически расслаивается на тонкие чешуйки. Отдельная чешуйка помещается на поверхность уже сформированных контактов и однократно прижимается при помощи второй пластины

оксидированного кремния. Подобная методика изготовления позволяет получить омические контакты, демонстрирующие стабильность и выживаемость в последующих циклах охлаждения (см. рис. 1).

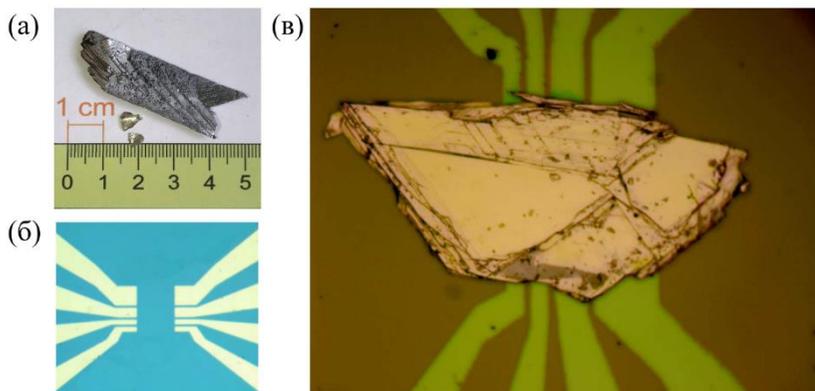


Рис. 1. (а) Исходный слиток кристалла. (б) Матрица предварительно сформированных контактов с помощью оптической фотолитографии. (с) Изображение чешуйки кристалла поверх контактов на оксидированной кремниевой подложке  $SiO_2$ .

Для исследования динамики намагниченности, по аналогии с ферромагнитными многослойками, был создан ряд интерфейсных структур на основе магнитных и немагнитных топологических материалов. В качестве примера, ниже, на рис. 2 изображены две созданные структуры: одна из них представляет контакт между нормальным слоем золота и магнитным полуметаллом Вейля  $Ti_2MnAl$ . Другая — это контакт между ферромагнитным слоем никеля и немагнитным вейлевским полуметаллом  $WTe_2$  (см. рис. 2). Несмотря на то, что взятые кристаллы различаются по химическому составу, общим

для них будет слой спин-поляризованных поверхностных состояний. Тогда, с технической точки зрения, созданные интерфейсные структуры представляют из себя последовательно соединённый ферромагнитный слой и слой поверхностных состояний топологического полуметалла.

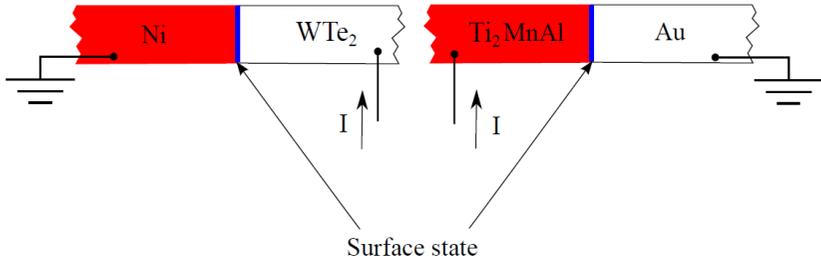


Рис. 2. Схематическое изображение интерфейсов  $Ni - WTe_2$  и  $Au - Ti_2MnAl$ , которые характеризуются поверхностными состояниями Вейля на интерфейсе (синий цвет). В каждом случае, одна сторона интерфейса имеет значительную спиновую поляризацию носителей ( $Ni$  или  $Ti_2MnAl$  соответственно, обозначено красным цветом). Таким образом, для этих контактов исследуется спин-зависимый перенос через топологически защищенные поверхностные состояния в вейлевском полуметалле.

Для созданных интерфейсных структур были продемонстрированы, качественно, похожие кривые  $dV/dI$  с ярко выраженными пиками, подобными тем, которые приписываются индуцированным током спин-волновым возбуждениям в ферромагнитных многослойках (см. рис. 3). Положение пиков не зависит от направления развертки тока. При этом все наблюдаемые эффекты связаны именно с рассматриваемым интерфейсом, так как мы не наблюдаем каких-либо особенностей  $dV/dI$

в объемных свойствах  $Ti_2MnAl$ , что демонстрируют четырехточечные измерения на левой вставке к рис. 3.

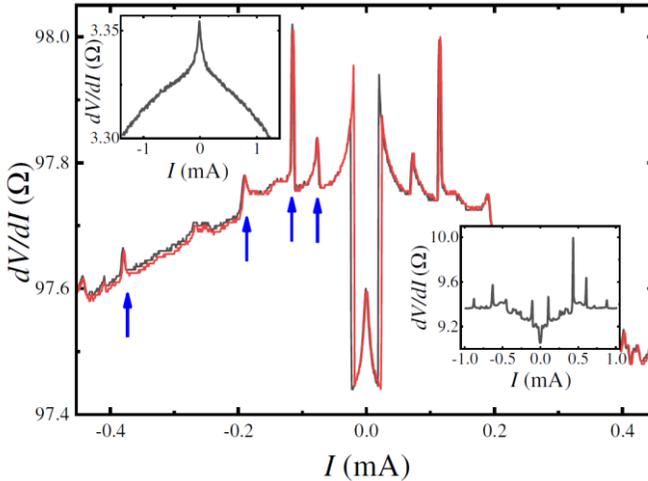


Рис. 3. Типичные примеры кривых  $dV/dI$  для транспорта через интерфейс  $Au - Ti_2MnAl$  для двух противоположных направлений развертки тока. Наблюдаются резкие пики  $dV/dI$  при больших токах (выделены синими стрелками), положение которых не зависит от направления развертки. Особенности  $dV/dI$  возникают из-за интерфейса  $Au - Ti_2MnAl$ , поскольку никаких особенностей  $dV/dI$  не наблюдается при четырехточечных измерениях для объемного  $Ti_2MnAl$ , как показано на вставке слева. На правой вставке показано аналогичное поведение  $dV/dI$  для интерфейса  $Ni - WTe_2$ . Кривые получены при  $30\text{ mK}$  в нулевом магнитном поле.

Эволюция положения пиков  $dV/dI$  для интерфейса  $Au - Ti_2MnAl$  для параллельного (а) и перпендикулярного (б) магнитных полей показана на рис. 4. Для обеих ориентаций поля положение пиков немонотонно смещается в сторону меньших токов, вплоть до полного

исчезновения выше некоторого значения, различного для разных направлений – для нормальной ориентации поля  $0.2 T$ , для параллельной  $0.6 T$ .

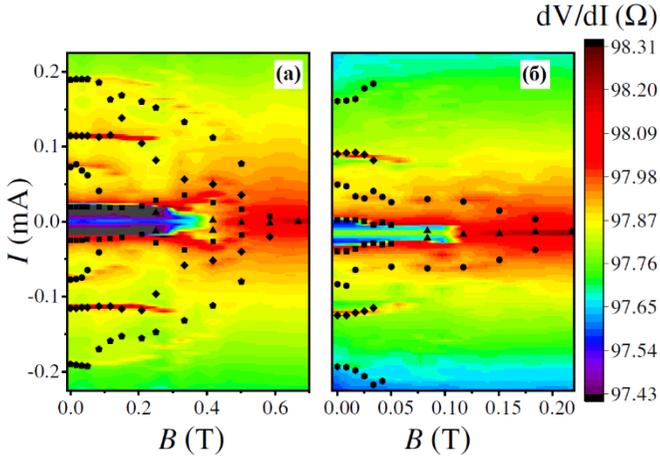


Рис. 4. Эволюция пиков  $dV/dI$  для интерфейса  $Au - Ti_2MnAl$  при параллельной (а) и нормальной (б) ориентации магнитного поля. Пики  $dV/dI$  смещаются в сторону меньших токов с увеличением поля. Данные получены при температуре  $30 mK$ .

Удивительно, что не только вид кривых  $dV/dI$  похожи для интерфейсов  $Ni - WTe_2$  и  $Au - Ti_2MnAl$ , но и особенности  $dV/dI$  показывают аналогичное поведение. Для  $Ni - WTe_2$  положения пиков  $dV/dI$ , также, смещаются к нулевому току с магнитным полем, подавление пиков происходит вдвое быстрее в нормальном поле (см. рис. 5).

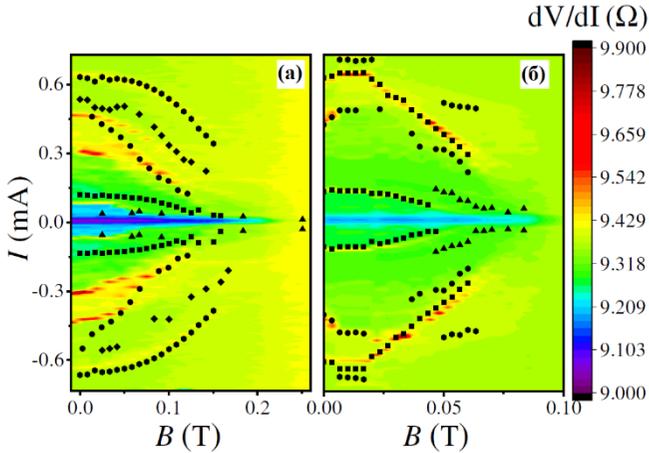


Рис. 5. Эволюция положения пиков  $dV/dI$  для интерфейса  $Ni - WTe_2$  для параллельной (а) и нормальной (б) ориентации магнитного поля. Поведение, качественно, аналогично случаю  $Au - Ti_2MnAl$  на рис. 24. Данные получены для температуры  $30\text{ mK}$ .

Положение пиков описывается моделью Слончевского  $I_{sw} \sim \alpha \gamma \sigma H$ , где  $\sigma$  – полный спин свободного слоя. Он уменьшается до нуля, когда сильное магнитное поле или температура разрушают спиновые текстуры в топологических поверхностных состояниях. Так как поверхностные состояния в полуметаллах Вейля являются единственной общей характеристикой интерфейсов, а объёмная часть образца не демонстрирует никаких эффектов, то следует заключить, что подобные кривые  $dV/dI$  возникают при спин-поляризованном переносе через поверхностные состояния на интерфейсе вейлевского полуметалла.

Вторая часть диссертации посвящена изучению нелинейного эффекта Холла в трёхмерных топологических полуметаллах. Эффект проявляется как ненулевой поперечный сигнал на второй гармонике, имеющий квадратичную зависимость. Для исследования эффекта, была использована четырёхточечная схема измерений, которая позволяет исключить сопротивление контактов и отражает только объём исследуемого образца (см. рис. 6).

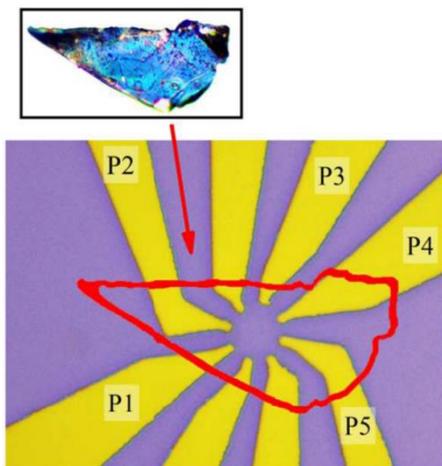


Рис. 6. Оптическое изображение золотых  $Au$  контактов на изолирующей подложке  $SiO_2$ . Переменный ток подается между контактами  $P1$  и  $P4$ , а поперечное (холловское) напряжение  $V_{xy}$  измеряется между контактами  $P3$  и  $P5$ . Дополнительно, измеряется продольный сигнал  $V_{xx}$  между контактами  $P2$  и  $P3$ .

В нулевом внешнем магнитном поле показано типичное поведение нелинейного эффекта Холла в виде квадратичного поперечного холловского сигнала  $V_{xy}^{2\omega}$  для двух различных образцов (см. рис. 7).

Зависимость  $V_{xy}^{2\omega} \sim I^2$  продемонстрирована на нижней вставке к рис. 7. Продольный сигнал на второй гармонике  $V_{xx}^{2\omega}$  на порядок меньше, что подтверждает правильность выбранной геометрии. Заметной температурной зависимости в диапазоне 1.4 – 4.2 K нет, что продемонстрировано на верхней вставке рис. 7.

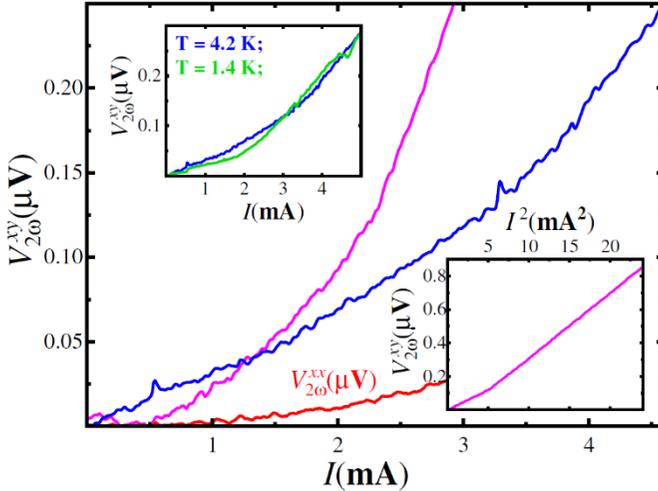


Рис. 7. Кривые  $V_{xy}^{2\omega}$  для нелинейного эффекта Холла в нулевом внешнем магнитном поле. Продольное напряжение на второй гармонике  $V_{xx}^{2\omega}$  на порядок меньше. Данные представлены для двух разных образцов (синяя и пурпурная кривые соответственно) при 4.2 K.

Также, при фиксированном значении переменного тока, к образцу, перпендикулярно, прикладывалось внешнее магнитное поле (см. рис. 8). Зависимость сигнала  $V_{xy}^{2\omega}(B)$  демонстрирует нечётную зависимость, близкую к линейной, что подтверждает теоретические предсказания.

Аналогичные результаты были получены для разных немагнитных топологических полуметаллов.

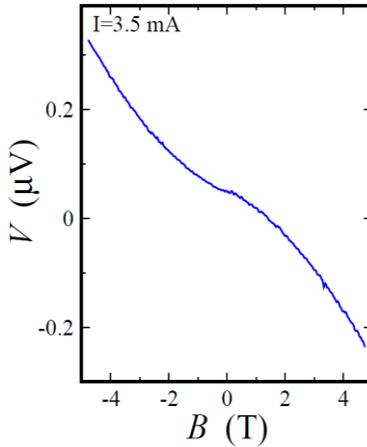


Рис. 8. Зависимость сигнала  $V_{xy}^{2\omega}$  нелинейного эффекта Холла от магнитного поля, при фиксированном переменном токе  $I$ , демонстрирует нечетное поведение.

Кроме немагнитных топологических материалов, нелинейный эффект Холла был исследован и в магнитных системах. Сигнал  $V_{xy}^{2\omega}(I)$  демонстрировал такую же нелинейную зависимость, как и в немагнитных системах. Однако, зависимость сигнала  $V_{xy}^{2\omega}$  от внешнего магнитного поля демонстрирует дополнительные особенности (см. рис. 9). Линейная зависимость, действительно, наблюдается, но в сильных магнитных полях с выраженным гистерезисом. Дополнительно, имеется плоская (независящая от магнитного поля) область с касанием кривых в малых полях в пределах  $\pm 0.5$  Т. Такое поведение  $V_{xy}^{2\omega}(B)$ , качественно,

одинаково для двух разных образцов с сильно различающимися значениями  $V_{xy}^{2\omega}$  на рис. 9 (а) и (б).

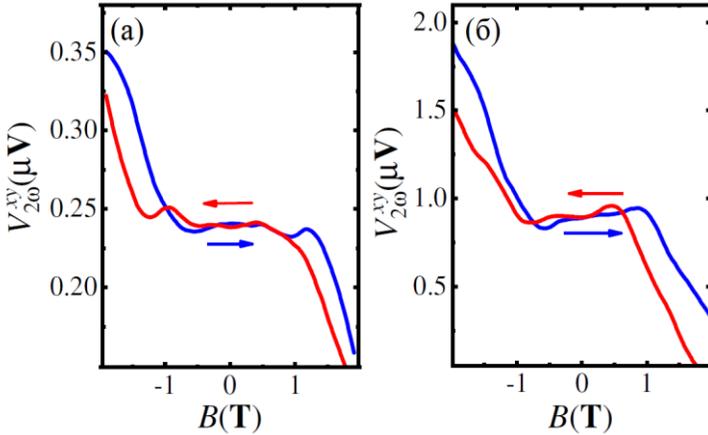


Рис. 9. Асимметричная зависимость  $V_{xy}^{2\omega}(B)$  от магнитного поля, качественно, подобная для двух разных образцов (панели (а) и (б)) для фиксированного переменного тока  $I = 4.5 \text{ mA}$ ). Ожидаемый линейный вклад от поля  $B$  достигается в сильном поле с выраженным гистерезисом и плоской (независящей от поля) областью в слабом поле ( $\pm 0.5 \text{ T}$ ), с касанием кривых. Гистерезис определяется направлением развертки магнитного поля, как показано стрелками того же цвета. Кривые показаны для перпендикулярного магнитного поля при температуре  $4.2 \text{ K}$ .

**В заключении** сформулированы основные результаты проделанной работы:

1. Для ферромагнетика  $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ , мы экспериментально исследовали электронный транспорт. Мы продемонстрировали кривые  $dV/dI$  с ярко выраженными асимметричными пиками, подобными тем,

которые приписываются индуцированным током спин-волновым возбуждениям в ферромагнитных многослойках. В отличие от многослоек, для толстого монокристаллического кристалла  $Co_3Sn_2S_2$ , в режиме полностью спин-поляризованного объема, наблюдается несколько последовательностей пиков  $dV/dI$  при низкой,  $\sim 10^4$  A/cm<sup>2</sup>, плотности тока. Мы приписываем пики  $dV/dI$  новым ветвям магнонов в магнитных полуметаллах Вейля, которые можно понимать как прямой результат связи между двумя магнитными моментами, опосредованными фермионами Вейля. В этом случае наблюдаемое расщепление магнонных ветвей в магнитном поле может отражать предсказанное разделение зон для магнитного полуметалла Вейля. Наличие в  $Co_3Sn_2S_2$  эффектов переноса спина при низких плотностях тока делает этот материал привлекательным для применения в спинтронике.

2. Мы экспериментально сравнили два типа интерфейсных структур с магнитными и немагнитными полуметаллами Вейля. Они представляют собой соединения между нормальным слоем золота с магнитным вейлевским полуметаллом  $Ti_2MnAl$  и слоем ферромагнитного никеля с немагнитным полуметаллом Вейля  $WTe_2$  соответственно. Благодаря ферромагнитной части контакта, мы исследуем спин-поляризованный транспорт через поверхность вейлевского полуметалла. Для обеих структур мы демонстрируем, качественно, похожие вольтамперные характеристики с гистерезисом при малых токах и резкими пиками дифференциального сопротивления при больших. Несмотря на то, что такое поведение напоминает

известную индуцированную током динамику намагниченности в ферромагнитных структурах, эволюция пиков сопротивления с магнитным полем необычна. Мы связываем наблюдаемые эффекты с индуцированной током спиновой прецессией в топологических поверхностных состояниях вейлевского полуметалла.

3. В случае монокристалла  $CoSi$ , мы экспериментально исследовали транспорт электронов при высокой плотности тока. Демонстрируемые кривые  $dV/dI$ , качественно, аналогичны кривым для ферромагнитных многослоек с характерными магнетонными пиками и нетривиальной их эволюцией в магнитном поле. Мы интерпретируем эти наблюдения как результат индуцированной током спиновой поляризации из-за сильной спин-орбитальной связи в  $CoSi$ . Рассеяние неравновесных спин-поляризованных носителей в поверхностном ферромагнитном слое ответственно за прецессирующие спин-волновые возбуждения, поэтому, наблюдаемые магнетонные моды являются совместным эффектом поверхностного ферромагнетизма и спин-орбитальной связи в киральном топологическом полуметалле  $CoSi$ .

4. Для трёхмерных монокристаллов  $WTe_2$  и  $Cd_3As_2$ , представляющих из себя полуметаллы Вейля и Дирака соответственно, мы экспериментально исследовали нелинейный эффект Холла. Мы демонстрируем отличный от нуля сигнал Холла на второй гармонике, которое квадратично зависит от продольного тока в нулевом магнитном поле. Если потенциальный контакт симметричен относительно линии тока, наблюдаемый сигнал находится в диапазоне  $\sim nV$ . Он показывает нечётную зависимость от направления магнитного поля, что является

сильным аргументом в пользу эффектов намагничивания током. Если потенциальный контакт несимметричен, градиент температуры дает на порядок больший сигнал термоэдс с четной зависимостью от магнитного поля.

5. Для магнитного полуметалла Вейля  $Co_3Sn_2S_2$ , мы экспериментально исследовали продольный и поперечный сигнал напряжения на второй гармонике. Мы обнаружили, что продольная составляющая  $V_{xx}^{2\omega}$  квадратично зависит от переменного тока в нулевом магнитном поле, что отражает сильный аномальный эффект Нернста, хорошо известный для материала  $Co_3Sn_2S_2$ . В отличие от наблюдаемого ранее нелинейного эффекта Холла, вызванного кривизной Берри, для немагнитных полуметаллов Вейля и Дирака, поперечное напряжение на второй гармонике демонстрирует сложное взаимодействие различных эффектов для  $Co_3Sn_2S_2$ . В сильных магнитных полях это соответствует квадратичному закону Зеебека, в то время как поведение в слабом поле оказывается линейным и чувствительным к направлению намагниченности образца. Последнее можно ожидать как для нелинейного эффекта Холла, так и для вклада поверхностного состояния в эффект Зеебека в полуметаллах Вейля. Таким образом, в  $Co_3Sn_2S_2$  существенны термоэлектрические эффекты, в отличие от немагнитных материалов Вейля и Дирака.

6. Для ферромагнетика Ван-Дер-Ваальса  $Fe_3GeTe_2$ , мы экспериментально исследовали сложное, зависящее от магнитного поля поведение сигнала нелинейного эффекта Холла на второй гармонике: в то время как сигнал на первой гармонике показывает известный

гистерезис сигнала аномального эффекта Холла, сигнал Холла на второй гармонике характеризуется ярко выраженным гистерезисом в сильных полях и плоской (не зависящей от магнитного поля) областью  $V_{xy}^{2\omega}(B)$  с касанием кривых в малых полях. Гистерезис в сильных полях отражает медленный процесс релаксации, поэтому он сильно зависит от скорости развертки магнитного поля. Для самой низкой скорости развёртки, гистерезис сопровождается множественными точками пересечения кривых. Касание кривых в слабых полях и форма гистерезиса на второй гармонике с множественными точками пересечения известны для скирмионных спиновых текстур. Поскольку скирмионы были продемонстрированы для FGT методами прямой визуализации, мы можем связать наблюдаемую релаксацию в сильных полях с деформацией решетки скирмионов. Этот вывод подтверждается чувствительностью сигнала  $V_{xy}^{2\omega}(B)$  к направлению внешнего магнитного поля, как и следует ожидать для поверхностных спиновых текстур. Таким образом, гистерезис холловского отклика второй гармонике можно рассматривать как проявление скирмионных структур  $Fe_3GeTe_2$  в транспортных экспериментах.

**Публикации по теме диссертации.** В основе диссертационной работы лежит 6 статей, опубликованных в зарубежных и российских научных журналах, входящих в перечень ВАК РФ:

1. Multiple magnon modes in the  $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$  Weyl semimetal candidate / O.O. Shvetsov, V.D. Esin, A.V. Timonina et al. // EPL. – 2019. – vol. 127. – pp. 57002.
2. Spin-dependent transport through a Weyl semimetal surface / V.D. Esin, D.N. Borisenko, N.N. Kolesnikov, E.V. Deviatov // Phys. Rev. B. – 2020. – vol. 101. – pp. 155309.
3. Magnon modes as a joint effect of surface ferromagnetism and spin-orbit coupling in CoSi chiral topological semimetal / V.D. Esin, A.V. Timonina, N.N. Kolesnikov, E.V. Deviatov // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2021. – vol. 540. – pp. 168488.
4. Nonlinear Hall Effect in Three-Dimensional Weyl and Dirac Semimetals / O.O. Shvetsov, V.D. Esin, A.V. Timonina et al. // JETP Letters. – 2019. – vol. 109. – pp. 715.
5. Second-Harmonic Voltage Response for the Magnetic Weyl Semimetal  $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$  / V.D. Esin, A.V. Timonina, N.N. Kolesnikov, E.V. Deviatov // JETP Letters. – 2020. – vol. 111. – pp. 685.
6. Second-Harmonic Response in Magnetic Nodal-Line Semimetal  $\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$  / V.D. Esin, A.A. Avakyants, A.V. Timonina et al. // Chin. Phys. Lett. – 2020. – vol. 39. – pp. 097303.

## **Список литературы**

1. Volkov, B.A. Massless two-dimensional electrons in inverse contact / B. A. Volkov, O. A. Pankratov // JETP Lett. – 1985. – vol. 42. – pp. 178.
2. Quantum Charged Particle in a Flat Box under Static Electromagnetic Field with Landau's Gauge and Special Case with Symmetric Gauge /

M. Konig, S. Wiedmann, C. Brune et all. // *Science*. – 2007. – vol. 318. – pp. 766.

3. Kane, C.L. Z<sub>2</sub> Topological Order and the Quantum Spin Hall Effect / C. L. Kane, E. J. Mele // *Phys. Rev. Lett.* – 2005. – vol. 95. – pp. 146802.

4. Armitage, N.P. Weyl and Dirac Semimetals in Three Dimensional Solids / N. P. Armitage, E. J. Mele, A. Vishwanath // *Phys. Rev. Mod.* – 2018. – vol. 90. – pp. 015001.

5. Yan, B. Topological Materials: Weyl Semimetals / B. Yan, C. Fesler // *Annu. Phys. Rev. Condens. Matter.* – 2017. – vol. 8. – pp. 337.

6. Discovery of a Weyl Fermion semimetal and topological Fermi arcs / S. Y. Xu, I. Belopolski, N. Alidoust et all. // *Science*. – 2015. – vol. 349. – pp. 613.

7. Magnetoresistance in quasi-one dimensional Weyl semimetal (TaSe<sub>4</sub>)<sub>2</sub>I / I. A. Cohn, S.G. Zybtev, A. P. Orlov, S. V. Zaitsev-Zotov // *JETP Lett.* – 2020. – vol. 112., № 2. – pp. 88.

8. Sukhachov, P.O. Superconductivity in Weyl semimetals in a strong pseudomagnetic field / P. O. Sukhachov, E. V. Gorbar // *Phys. Rev. B.* – 2020. – vol. 102. – pp. 014513.

9. Optical evidence of the type-II Weyl semimetals MoTe<sub>2</sub> and WTe<sub>2</sub> / S. Kimura, Y. Nakajima et all. // *Phys. Rev. B.* – 2019. – vol. 99. – 195203.

10. Slonczewski, J. Current-Driven Domain Wall Motion: Velocity, Current and Phase Transition / J. Slonczewski // *J. Magn. Magn. Mater.* – 1996. – vol. 159. – L1.

11. Current-Induced Switching of Domains in Magnetic Multilayer Devices / E. B. Myers, D. C. Ralph, J. A. Katine et al. // *Science*. – 1999. – vol. 285, № 5429. – pp. 867.
12. Yasufumi, A. Spin textures and spin-wave excitations in doped Dirac-Weyl semimetals / A. Yasufumi, N. Kentaro // *Phys. Rev. B*. – 2016. – vol. 93. – pp. 094438.
13. Weyl fermions induced magnon electrodynamics in a Weyl semimetal / J. A. Hutasoit, J. Zang, R. Roiban, C. X. Liu // *Phys. Rev. B*. – 2014. – vol. 90. – pp. 134409.
14. Sodemann, I. Quantum Nonlinear Hall Effect Induced by Berry Curvature Dipole in Time-Reversal Invariant Materials / I. Sodemann, L. Fu // *Phys. Rev. Lett.* – 2015. – vol. 115. – pp. 216806.
15. Observation of the nonlinear Hall effect under time-reversal-symmetric conditions / Q. Ma, S. Y. Xu, H. Shen et al. // *Nature*. – 2019. – vol. 565. – pp. 337.
16. Room-temperature nonlinear Hall effect and wireless radiofrequency rectification in Weyl semimetal TaIrTe<sub>4</sub> / D. Kumar, C.H. Hsu, R. Sharma, et al. // *Nat. Nanotechnol.* – 2021. – vol. 16. – pp. 421.