

ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ
«НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЦЕНТР НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ
НАУК БЕЛАРУСИ ПО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЮ»

Объект авторского права

УДК 537.9; 537.621.2; 537.622.6; 544.022.31

АРТЮХ

Евгений Александрович

**ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТНЫЕ И ГАЛЬВАНОМАГНИТНЫЕ
СВОЙСТВА $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Минск 2025

Научная работа выполнена в Государственном научно-производственном объединении «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению».

Научный руководитель	Каланда Николай Александрович , доктор физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории физики магнитных материалов ГНПО «Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению»
Официальные оппоненты:	Гременок Валерий Феликсович , доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией физики полупроводников ГНПО «Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению» Свито Иван Антонович , кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник кафедры физики твердого тела и нанотехнологий Белорусского государственного университета
Оппонирующая организация	Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Защита состоится «11» декабря 2025 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 01.06.01 при Государственном научно-производственном объединении «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению» по адресу: 220072, Беларусь, г. Минск, ул. Петруся Бровки, д. 19, пом. 5. тел. +375 (17) 378-11-68 (ученый секретарь совета), e-mail: iftanb@physics.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению».

Автореферат разослан « 06 » ноября 2025 г.

Ученый секретарь совета по
защите диссертаций Д 01.06.01
доктор физико-математических наук



Д. В. Карпинский

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия материалы с уникальными магнитными и электротранспортными свойствами привлекают всё больше внимания благодаря их перспективности для современных технологий. Один из таких материалов – двойной перовскит $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ (SFMO), который является ферромагнитным полупроводником с практически 100%-ой спиновой поляризацией при гелиевых температурах и обладает высоким значением температуры Кюри (≈ 415 K).

SFMO обладает высоким магнитосопротивлением, высокой намагниченностью насыщения, низкой коэрцитивной силой и многими другими свойствами, которые делают его одним из наиболее перспективных кандидатов для применения в спинтронике – области физики, исследующей также спин электрона и связанный с ним магнитный момент наряду с его электрическим зарядом. Примерами спинтронных устройств служат спиновые транзисторы, спиновые вентили, инжекторы спин-поляризованных электронов, спиновые детекторы и магниторезистивная память (MRAM).

Для широкого применения SFMO необходимо обеспечить высокую воспроизводимость его электротранспортных, магнитных и гальваномагнитных свойств, на которые, однако, влияют микроструктура и дефекты кристаллической решетки. Важнейшими из таких дефектов, наряду с вакансиями кислорода, характеризующимися кислородной нестехиометрией δ , являются антиструктурные дефекты. Пара антиструктурных дефектов образуется, когда в кристаллической решетке атом Fe занимает место атома Mo, и наоборот. Наличие этих дефектов приводит к изменению электротранспортных, магнитных, магниторезистивных свойств, и, кроме того, уменьшает степень спиновой поляризации электронов проводимости материала. Количество антиструктурных дефектов в SFMO определяется, прежде всего, условиями синтеза.

SFMO изучается с 1998 года, и на данный момент в научной литературе хорошо описаны различные методы синтеза поликристаллов, а также влияние кислородной нестехиометрии на магнитные свойства материала. Однако, процессы электропереноса в SFMO изучены недостаточно: на данный момент не наблюдается комплексного подхода к исследованию электротранспортных свойств в зависимости от степени сверхструктурного упорядочения Fe/Mo для поликристаллической керамики SFMO, синтезированной одним методом.

Таким образом, целью данной работы является установление влияния степени сверхструктурного упорядочения Fe/Mo на состав поверхности зерен, электротранспортные и гальваномагнитные свойства поликристаллического SFMO, полученного методом твердофазных реакций.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами

Работа выполнена в ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению» в рамках следующих программ и проектов:

– ГПНИ «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии» подпрограмма «Материаловедение и технологии материалов». Задание 1.02 «Синтез металлоксидных соединений на основе системы Sr-Fe-Mo-O для изделий микроэлектроники» (2016 - 2020 гг.) (№ гос. регистрации 20160305 от 09.03.2016 г.)

– ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии» подпрограмма «Физика конденсированного состояния и создание новых функциональных материалов и технологий их получения» («Физика и техника материалов»). Задание 1.1.1. «Взаимосвязь магниторезистивных, магнитных и термодинамических характеристик со структурой ферромолибдата стронция, допированного барием и лантаном» (ФКС 1.1.1.) (2021 – 2025 гг.) (№ гос. регистрации: 20210542 от 07.04.2021 г.);

– программа ЕС «Горизонт-2020», подпрограмма MSCA-RISE-2016, проект № 778308 «Новые спинтронные материалы на основе многослойных металлоксидных пленок для магнитных сенсоров и базовых элементов МРАМ» (SPINMULTFILM) (2018 – 2023 гг.);

– договор с НИИЯП БГУ № 29 – 2021 «Искажение кристаллической и магнитной структур $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ в условиях высокого давления» (2021 г.) (Номер госрегистрации: 20212947 от 05.08.2021 г.);

– договор с НИИЯП БГУ № 27 – 2022 «Кристаллическая структура ферромолибдата стронция в условиях кислородной нестехиометрии» (2022 г.) (Номер госрегистрации 20221572 от 21.09.2022 г.);

– проект БРФФИ № Ф23МЭ – 025 «Влияние анионных дефектов на магнитные и гальваномагнитные свойства гранулированных плёнок ферромолибдата стронция, как материала для создания резистивных газовых сенсоров и датчиков магнитного поля (2023 – 2025 гг.) (Номер гос. регистрации: № 20230990 от 22.06.2023 г.);

– договор с НИИЯП БГУ № 35 – 2023 «Особенности кислородного обмена, электрические и магнитные свойства сложных оксидных соединений с перовскитоподобной структурой» (2023 г.) (Номер госрегистрации 20231323);

– договор с НИИЯП БГУ № 28 – 2024 «Влияние имплантации ионов легких газов на процессы электропереноса в магнитном поле в

гранулированных структурах на базе ферромолибдата стронция» (2024 г.) (Номер госрегистрации 20241387 от 04.07.2024 г.).

Тема диссертационной работы соответствует приоритетным направлениям научных исследований Республики Беларусь на 2021–2025 г.г. в соответствии с Указом Президента Республики Беларусь от 7 мая 2020 г. № 156 «О приоритетных направлениях научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 г.г.», в частности пункту 4 «Машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы».

Цель, задачи, объект и предмет исследования

Цель диссертационной работы заключается в установлении закономерностей изменения состава поверхности зерен, электротранспортных и гальваномагнитных свойств твердых растворов $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$, полученных методом твердофазных реакций, в зависимости от степени сверхструктурного упорядочения Fe/Mo.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Разработать методику синтеза и получить твердые растворы $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ с заданной степенью сверхструктурного упорядочения Fe/Mo P , и исследовать взаимосвязь между P и составом поверхности зерен полученной керамики.
2. Выявить корреляции между составом поверхности зерен и процессами электропереноса в $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ и установить механизмы рассеяния электронов проводимости в температурном диапазоне 5–300 К.
3. Установить характер влияния магнитного поля до 10 Тл на процессы электропереноса в $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ в зависимости от степени сверхструктурного упорядочения Fe/Mo в диапазоне температур 5–300 К.
4. Установить влияние магнитного поля до 10 Тл на гальваномагнитные свойства $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ в температурном интервале 5–300 К в зависимости от степени сверхструктурного упорядочения Fe/Mo.
5. Разработать математическую модель, описывающую корреляцию между степенью сверхструктурного упорядочения Fe/Mo $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ и степенью спиновой поляризации электронов проводимости в температурном диапазоне 5–300 К.

Объектом исследования являлись твердые растворы $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ с различной степенью сверхструктурного упорядочения Fe/Mo, полученные методом твердофазных реакций.

Предметом исследования являлись закономерности, связывающие состав поверхности зерен, электротранспортные и гальваномагнитные

свойства твердых растворов $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ с различной степенью сверхструктурного упорядочения Fe/Mo.

Научная новизна

- Установлено влияние степени сверхструктурного упорядочения Fe/Mo на состав поверхности зерен, электротранспортные и гальваноманнитные свойства поликристаллической керамики $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$;
- показано, что поверхность зерен $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ обеднена Fe и O, и при увеличении степени сверхструктурного упорядочения Fe/Mo состав поверхности зерен приближается к стехиометрическому соотношению $\text{Sr/Fe/Mo/O} = 2/1/1/6$;
- установлено, что уменьшение удельного электросопротивления при росте степени сверхструктурного упорядочения Fe/Mo в поликристаллической керамике $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ обусловлено снижением высоты и ширины потенциального барьера на поверхности зерен и увеличением эффективной площади туннельного контакта;
- показано, что при увеличении индукции магнитного поля происходит дополнительное уменьшение высоты и ширины потенциального барьера и увеличение эффективной площади туннельного контакта, что влияет на температурные зависимости удельного электросопротивления $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$;
- определены механизмы рассеяния электронов проводимости $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ в диапазоне температур 5–300 K;
- построена математическая модель, описывающая зависимость степени спиновой поляризации электронов проводимости $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ от температуры и степени сверхструктурного упорядочения Fe/Mo.

Положения, выносимые на защиту

1. Поверхность зерен поликристаллической керамики $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ обеднена Fe и O, и по составу более близка к диэлектрическому соединению SrMoO_4 , что является причиной формирования потенциальных барьеров на поверхности зерен, причем состав поверхности приближается к составу объема зерна при увеличении степени сверхструктурного упорядочения Fe/Mo.
2. При высоких температурах (75-300 K) доминирующим механизмом рассеяния свободных носителей заряда в поликристаллической керамике $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ является электрон-фононное взаимодействие, тогда как при низких температурах (5-75 K) основным механизмом рассеяния становится туннелирование через потенциальные барьеры на поверхности зерен, при этом повышение степени сверхструктурного упорядочения Fe/Mo с 57 до 92% приводит к уменьшению высоты потенциального барьера с 12,57 до 6,03 мэВ

и его ширины с 1,19 до 1,06 нм, увеличению эффективной площади туннельных контактов с 215,43 до 399,10 нм², а также ослаблению электрон-фононного рассеяния.

3. Воздействие магнитного поля изменяет температурный коэффициент удельного электросопротивления керамики $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ в области высоких температур (75-300 К), что свидетельствует о наличии электрон-магнитного механизма рассеяния носителей заряда, в то время как при низких температурах (5-75 К) с ростом индукции магнитного поля наблюдается уменьшение высоты и ширины потенциального барьера, а также увеличение эффективной площади туннельных контактов на границах зерен, что обусловлено увеличением спин-зависимого туннельного тока и соответствует теории Иноуэ-Мекавы.

4. Предложенная математическая модель, описывающая линейное убывание степени спиновой поляризации электронов проводимости с ростом температуры и ее линейное возрастание с увеличением степени сверхструктурного упорядочения Fe/Mo в твердых растворах $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$, может быть использована при создании новых магниторезистивных материалов с контролируемым спиновым состоянием для использования в спиновых инжекторах, спиновых транзисторах и иных элементах, используемых в датчиках магнитного поля, угла поворота, магниторезистивной памяти и других устройствах спинтроники.

Личный вклад соискателя ученой степени

Определение целей и постановка задач диссертационного исследования выполнены соискателем совместно с научным руководителем. Анализ литературных данных, идентификация фазового состава, непосредственное проведение экспериментальных исследований магнитных, электротранспортных и магниторезистивных свойств $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ проведены соискателем. Планирование и разработка методики экспериментов, изучение микроструктуры поверхности зерен методами электронной микроскопии и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии выполнены при участии научного руководителя. Анализ и интерпретация полученных данных, подготовка научных публикаций, а также выводы по диссертационной работе сделаны соискателем по итогам обсуждений результатов с научным руководителем и соавторами публикаций.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 7 международных конференциях. Некоторые из них: «4th International

Conference on Nanomaterials Science and Mechanical Engineering» (ICNMSME-2021) (г. Авейру, Португалия, 24 – 26 июля 2021 г.), «International Conference on Oxide Materials for Electronic Engineering – fabrication, properties and application (OMEE-2021) (г. Львов, Украина, 28 сентября – 2 октября 2021 г.), «IWAMO-2021» (г. Авейру, Португалия, 24 – 26 ноября 2021 г.), «Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния» (г. Минск, Беларусь, 18 – 19 мая 2023 г.), «Актуальные проблемы физики твердого тела APSSP-2025» (г. Минск, Беларусь, 19-23 мая 2025).

Исследования, положенные в основу диссертационной работы, были отмечены стипендией Президента Республики Беларусь талантливым молодым ученым за 2025 год.

Опубликованность результатов диссертации

Результаты, изложенные в диссертации, опубликованы в 16 работах (7,12 авторского листа), среди которых 8 статей в рецензируемых международных научных журналах (6,27 авторского листа), соответствующих пункту 19 «Положения о присуждении ученых степеней и присвоения ученых званий в Республике Беларусь», 5 статей в сборниках материалов международных научных конференций и 3 тезиса докладов на международных научных конференциях (0,85 авторского листа), в которых полностью отражены основные положения диссертационной работы.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из перечня условных обозначений, введения, общей характеристики работы, пяти глав основной части с выводами по каждой главе, заключения, списка использованных источников и двух приложений. Диссертация изложена на 124 страницах, включая 67 рисунков на 48 страницах, 20 таблиц на 6 страницах и библиографический список на 15 страницах, включающий 145 наименований использованных источников и 16 наименований публикаций соискателя.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В первой главе представлен обзор литературы по тематике диссертационной работы. Приведены сведения об основных типах дефектов $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ (SFMO), таких как антиструктурные дефекты и кислородная нестехиометрия, и их влияние на электротранспортные и магнитные свойства материала. Рассмотрены основные механизмы рассеяния электронов в SFMO, а также механизмы магнитосопротивления материала.

Во второй главе представлены методы исследования их структурных, магнитных, электротранспортных и магниторезистивных свойств SFMO. Кратко изложена методика получения поликристаллической керамики SFMO методом твердофазных реакций. Приведены сведения об используемом для исследований оборудовании: рентгенофазовый анализ SFMO проводился на дифрактометре ДРОН-3М (Cu $K\alpha$ -излучение) при комнатной температуре; электротранспортные, магнитные и магниторезистивные свойства SFMO изучались с помощью вибрационного магнетометра «Cryogen-Free High-magnetic field Measurement System Vibrating Sample Magnetometer» модели CFM-14T-H3-IVTI-25 фирмы «Cryogenic Ltd.» Для исследования электротранспортных и магниторезистивных свойств стандартным четырехзондовым методом электрические контакты из металлического индия наносились на керамику прибором ультразвуковой пайки УЗП2-0,025.

В третьей главе описываются результаты оптимизации процесса синтеза SFMO с различной степенью сверхструктурного упорядочения. Отжиг исходной смеси реагентов $2\text{SrCO}_3 + 0,5\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MoO}_3$, которая смешивалась в шаровой мельнице РМ 100 (Retsch GmbH, Германия), происходил в три этапа. Порошок отжигался в термоустановке в течение 20 часов в воздушной среде при температуре $T = 1173$ К, после чего полученный порошок размельчался и перемешивался в шаровой мельнице. Второй отжиг порошка проводился в термоустановке при температуре $T = 1373$ К в течение 20 часов в потоке Ar 1720 мл/ч. Полученный порошок SFMO использовался для исследования распределения частиц по размерам методом динамического рассеяния света (ДРС) с помощью прибора Zetasizer Nano-ZS90. После ультразвуковой диспергации при мощности 160 Вт в течении 60 минут при температуре $T = 300$ К результаты ДРС-анализа показали, что полученный порошок обладает одномодальным распределением объемной доли частиц порошка по размерам, что показано на рисунке 1. Средний размер частиц полученного порошка SFMO составил 2,4 мкм.

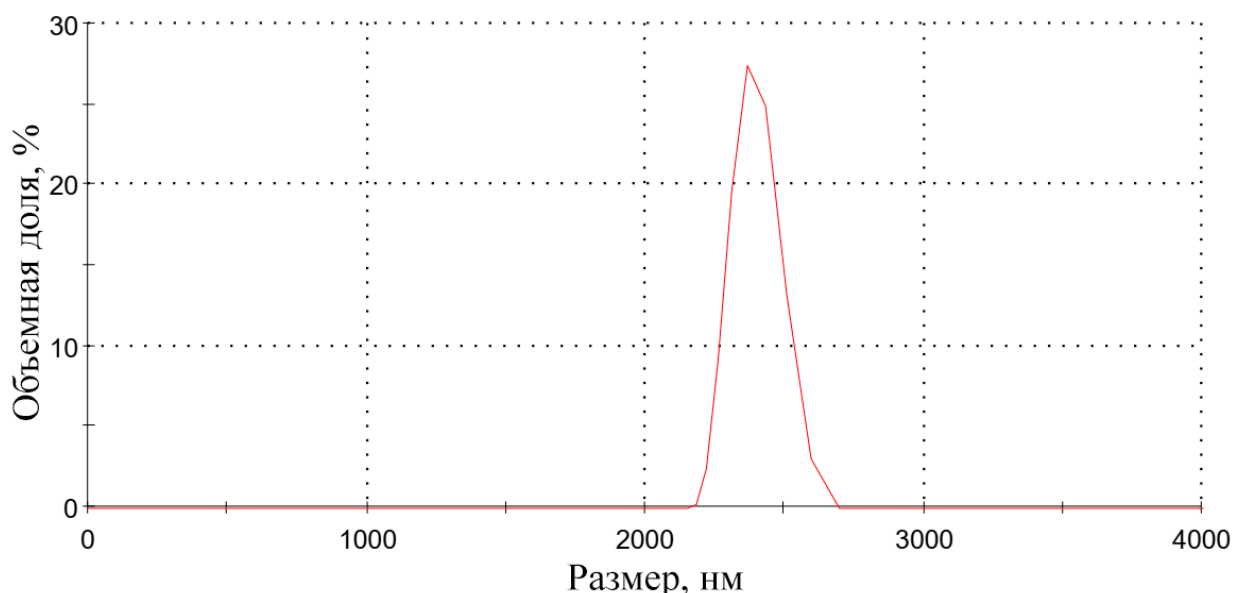


Рисунок 1 – Распределение объемной доли частиц порошка SFMO по размерам после ультразвуковой диспергации в этаноле течение 60 минут при температуре $T = 300$ К при мощности 160 Вт

Полученный порошок SFMO прессовался под давлением 250 МПа в таблетки диаметром 10 мм и толщиной 5-6 мм для проведения дополнительных отжигов и последующих исследований микроструктурных, электротранспортных и магниторезистивных свойств керамики.

Полученная в результате прессования керамика SFMO с нулевой степенью сверхструктурного упорядочения подвергались отжигу в восстанавливающей среде. Для получения SFMO с различной степенью сверхструктурного упорядочения P , отжиг проводился в потоке 10% H_2/Ar 1720 мл/ч при $T=1373$ К в течение различных промежутков времени: 10 ч, 14 ч, 19 ч и 27 ч, так как P зависит как от температуры, так и от времени отжига в восстанавливающей среде.

Результаты рентгенофазового анализа SFMO представлены на рисунке 2, из которого следует, что при увеличении времени отжига растет высота сверхструктурного рефлекса (101).

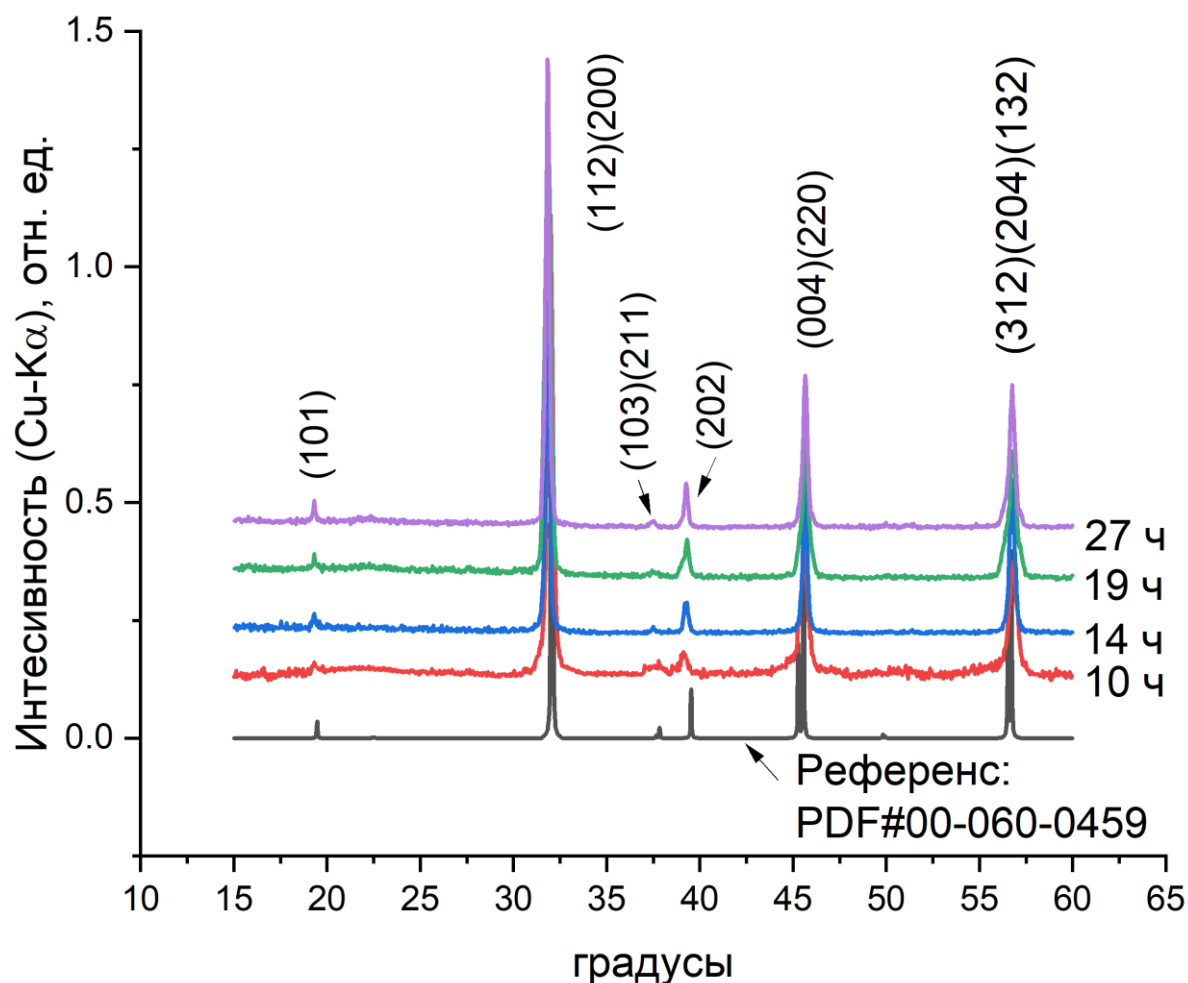


Рисунок 2 – Дифрактограммы синтезированных образцов поликристаллической керамики SFMO

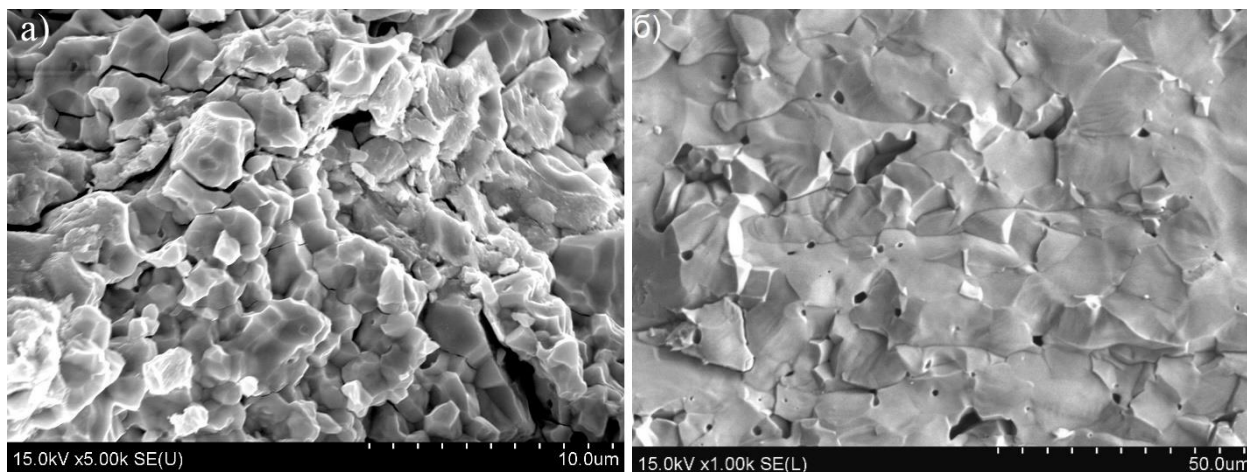
Полученные образцы получили обозначения в зависимости от степени сверхструктурного упорядочения Fe/Mo P , что показано в таблице.

Таблица 1 – Результаты анализа рентгенограмм полученных образцов SFMO

Серия	Обозначение	Параметры отжига	P , %	ASD , %
1	SFMO-57	10% H_2 /Ar, 10 ч	57	21,5
2	SFMO-73	10% H_2 /Ar, 14 ч	73	13,5
3	SFMO-85	10% H_2 /Ar, 19 ч	85	7,5
4	SFMO-92	10% H_2 /Ar, 27 ч	92	4

Далее в главе приводятся результаты микроструктурного и элементного анализа поверхностей зерен образцов SFMO-57, SFMO-73 и SFMO-92. На рисунках 3 а) и б) показаны СЭМ-изображения поверхностей образцов SFMO-57 и SFMO-92, из которых следует, что с увеличением времени отжига в

газовой смеси 10% H_2/Ar при температуре $T = 1373 \text{ K}$ поверхности образцов становятся менее пористыми. На фотографии поверхности образца SFMO-57 можно увидеть отдельные зерна, размер которых составляет около 2 мкм, что подтверждает данные, полученные в результате ДРС-анализа (рисунок 1). В то же время SFMO-92 представляет собой плотную структуру, на поверхности которой выделить отдельные зерна не представляется возможным.



а) SFMO-57; б) SFMO-92

Рисунок 3 – СЭМ-изображения поверхностей полученных образцов SFMO

Для исследования влияния процесса спекания керамики с помощью метода гидростатического взвешивания были исследованы зависимости плотности и пористости полученных образцов от времени отжига в газовой смеси 10% H_2/Ar при температуре $T = 1373 \text{ K}$. Результаты расчетов представлены на рисунке 4.

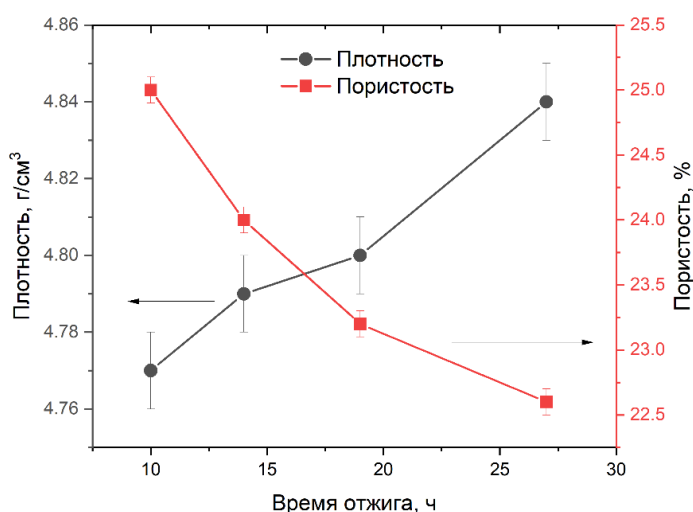
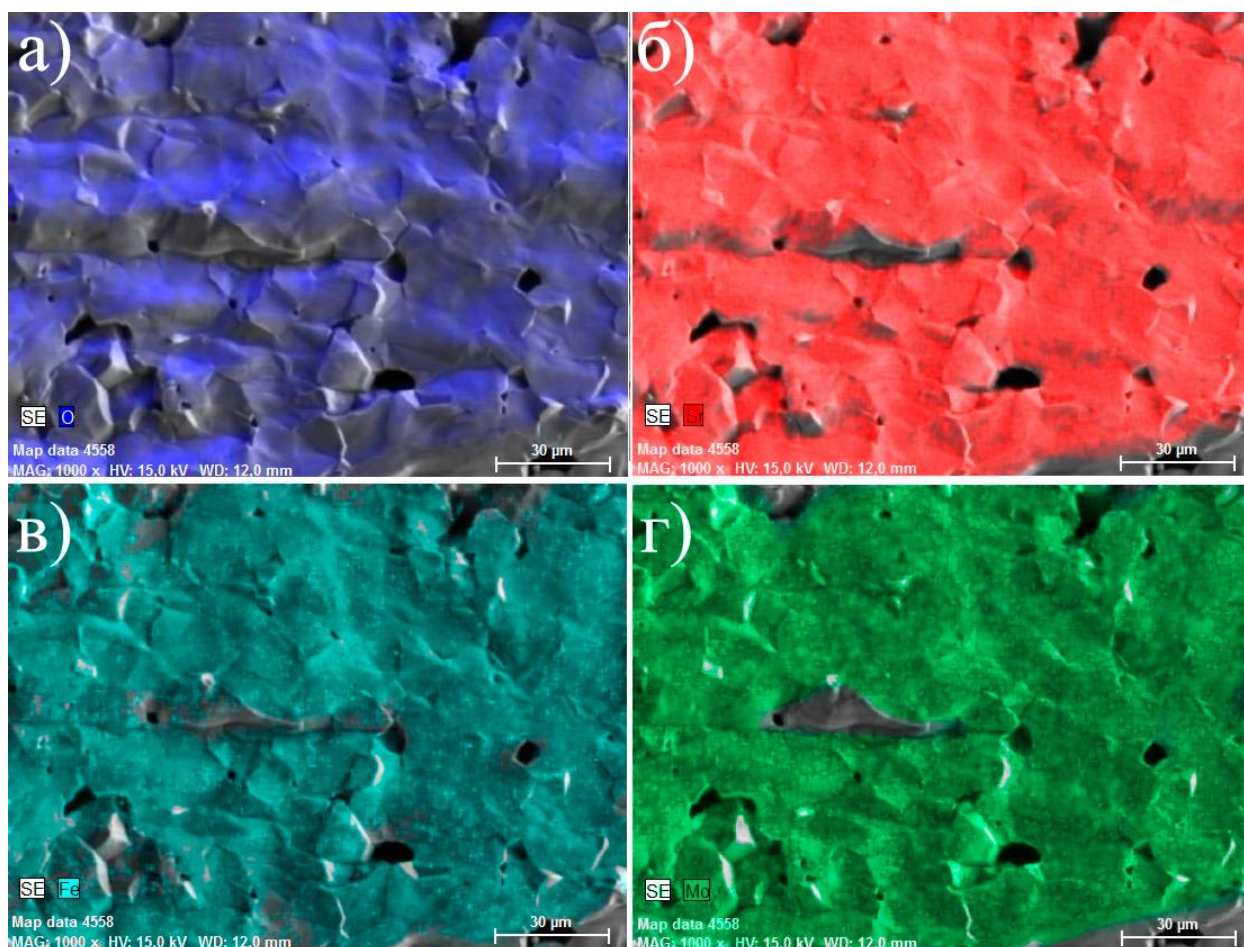


Рисунок 4 – Зависимость плотности и пористости SFMO от времени отжига в газовой смеси 10% H_2/Ar при температуре $T = 1373 \text{ K}$

Из полученных данных следует, что с увеличением времени отжига в газовой смеси 10% H_2/Ar при температуре $T = 1373$ К плотность SFMO слабо растёт, а пористость уменьшается. Однако в связи с небольшим изменением пористости полученных образцов в -2,4% в течение 17 часов отжига можно сделать вывод, что влияние процесса спекания на свойства электротранспорта и магнитосопротивления в полученных образцах будет минимальным

Результаты энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX) показали, что Sr, Fe, Mo и O на поверхностях полученных образцов расположены равномерно, что показано на рисунке 5.



а) O, б) Sr, в) Fe, г) Mo

Рисунок 5 – Карты распределения элементов на поверхности образца SFMO-92

Зависимость атомной концентрации элементов Sr, Fe, Mo и O на поверхности зерна от степени сверхструктурного упорядочения Fe/Mo SFMO с $P = 57\%$, 73% и 92% показана на рисунке 6. Значение при $P = 100\%$ соответствует стехиометрии $Sr/Fe/Mo/O = 20\%/10\%/10\%/60\%$.

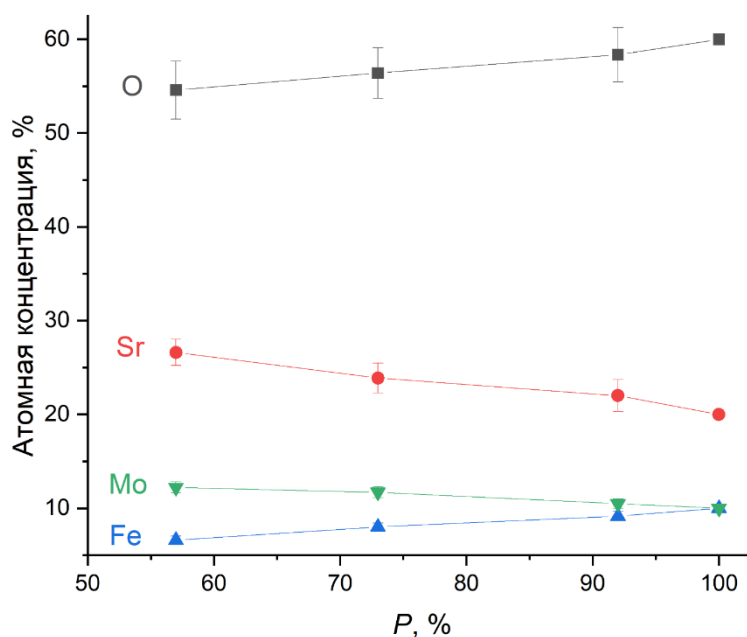


Рисунок 6 – Зависимость стехиометрического состава элементов Sr, Fe, Mo и O на поверхности зерен от степени сверхструктурного упорядочения Fe/Mo SFMO

Из результатов EDX исследований следует, что с повышением P стехиометрический состав химических элементов на поверхности зерен стремится к стехиометрическому соотношению $\text{Sr/Fe/Mo/O} = 2/1/1/6$. Кроме того, полученные данные показывают, что области вблизи поверхности зерен исследованных образцов SFMO обеднены Fe и O, и по составу более близки к диэлектрическому соединению SrMoO_4 , и, таким образом, служат потенциальным барьером для электронов проводимости.

В главе 4 для исследования влияния степени сверхструктурного упорядочения Fe/Mo на процессы электротранспорта в SFMO приводятся результаты измерений и анализ температурных зависимостей удельного электросопротивления SFMO с различной степенью сверхструктурного упорядочения Fe/Mo P . Аппроксимация полученных зависимостей выполнялась с помощью следующего выражения [8-A]:

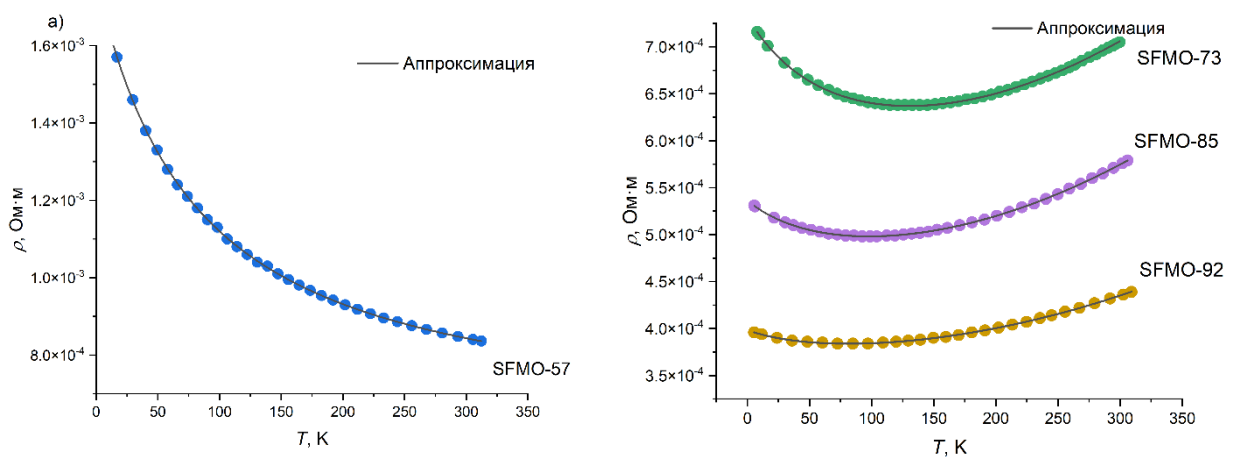
$$\rho(T) = \rho_{FIT} \exp\left(\frac{T_1}{T_0 + T}\right) + \rho_0 + A_n T^n \quad (1)$$

Первое слагаемое в правой части выражения (1) соответствует модели флуктуационно-индуцированного туннелирования (ФИТ), для реализации которого необходимо наличие в материале потенциальных барьеров для электронов проводимости. Модель ФИТ описывается тремя параметрами.

Первый: T_l – температура, которая является аналогом энергии активации $E_a \sim k_B T_l$, определяемая энергией потенциального барьера V_0 . Согласно модели ФИТ, температурные колебания способствуют преодолению потенциального барьера при $T < T_l$, следовательно, величину $k_B T_l$ можно рассматривать как меру энергии, необходимой электрону для прохождения потенциального барьера. Второй параметр модели – температура T_0 , ниже которой эффекты тепловых флуктуаций становятся незначительными и проводимость перестает зависеть от температуры. При $T \gg T_0$, проводимость становится термически активированной. Третий параметр модели – ρ_{FIT} – параметр подгонки.

Второе и третье слагаемое в правой части выражения (1) соответствует степенному закону, описывающему высокотемпературную часть зависимости удельного электросопротивления материала. В этом выражении ρ_0 – остаточное удельное электросопротивление материала при $T \rightarrow 0$, когда в большей степени на удельное электросопротивление материала влияют примеси и дефекты решетки; A_n – коэффициент, характеризующий силу температурной зависимости удельного электросопротивления; n – показатель степени, зависящий от механизма рассеяния.

Аппроксимации полученных температурных зависимостей удельного электросопротивления SFMO с различными значениями P представлены на рисунках 7 а) и б), а результаты аппроксимации занесены в таблицу 2. $T_{\rho-min}$ представляет собой температуру, при которой наблюдается смена знака температурной производной удельного электросопротивления $d\rho/dT < 0 \rightarrow d\rho/dT > 0$.



а) $P = 57\%$; б) $P = 73\%$, $P = 85\%$ и $P = 92\%$

Рисунок 7 – Аппроксимация температурных зависимостей удельного электросопротивления SFMO с различным значением P выражением (1)

Таблица 2 – Результаты аппроксимации температурных зависимостей удельного электросопротивления SFMO выражением (1)

Параметр	SFMO-57	SFMO-73	SFMO-85	SFMO-92
ρ_{FIT} , Ом·м	$6,04 \cdot 10^{-4}$	$1,25 \cdot 10^{-4}$	$7,39 \cdot 10^{-5}$	$3,87 \cdot 10^{-5}$
T_1 , К	145,34(3)	120,19(4)	95,08(2)	70,11(2)
T_0 , К	135,28(2)	130,05(6)	120,01(2)	104,97(6)
ρ_0 , Ом·м	-	$4,17 \cdot 10^{-4}$	$3,73 \cdot 10^{-4}$	$3,23 \cdot 10^{-4}$
A_n , Ом·м·К ⁻ⁿ	-	$1,03 \cdot 10^{-9}$	$8,6 \cdot 10^{-10}$	$5,21 \cdot 10^{-10}$
n	-	2,05	2,06	2,06
R^2	0,9998	0,9987	0,9979	0,9987

Значение степени $n \approx 2$ соответствует электрон-электронному, электрон-фононному и электрон магнотному механизмам рассеяния. В SFMO вклад электрон-магнотного механизма в удельное электросопротивление минимален, так как на одну формульную единицу SFMO приходится около 1 электрона проводимости. Электрон-фононное рассеяние наблюдается во всех материалах, обладающих кристаллической структурой, из чего следует, что оно имеет место в SFMO. Для определения наличия электрон-магнотного механизма необходимо исследование удельного электросопротивления в магнитных полях, что рассматривается в главе 5.

Для определения высоты и ширины потенциальных барьеров, а также площади, через которую осуществляется туннелирование, использовались выражения (2)-(4) [11-А]:

$$eV_0 = k_B T_1, \quad (2)$$

где eV_0 – высота потенциального барьера в эВ;
 k_B – постоянная Больцмана.

$$w = \frac{\hbar}{\pi T_0} \cdot \sqrt{\frac{2T_1}{m_e k_B}}, \quad (3)$$

где w – ширина потенциального барьера;
 $\hbar$ – приведенная постоянная Планка;
 m_e – масса электрона.

$$A = \frac{k_B T_1 e^2 w}{8 \varepsilon_0 V_0^2}, \quad (4)$$

где A – эффективная площадь туннельных контактов;

ε_0 – электрическая постоянная.

Результаты расчетов потенциальных барьеров SFMO в зависимости от P представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Параметры потенциального барьера SFMO в зависимости от степени сверхструктурного упорядочения Fe/Mo: V_0 – высота барьера, w – ширина барьера и A – эффективная площадь туннельных контактов

$P, \%$	$V_0, \text{мэВ}$	$w, \text{нм}$	$A, \text{нм}^2$
57	12,52(8)	1,19(6)	215,43(4)
73	10,34(4)	1,12(5)	246,20(2)
85	8,18(9)	1,08(5)	299,76(6)
92	6,03(4)	1,06(4)	399,10(6)

Из полученных данных следует, что с ростом степени сверхструктурного упорядочения Fe/Mo SFMO высота V_0 и ширина w потенциального барьера падают, вследствие чего снижается электросопротивление SFMO, а эффективная площадь туннельных контактов увеличивается, так как при увеличении степени сверхструктурного упорядочения Fe/Mo в SFMO стехиометрический состав химических элементов поверхности зерен стремится к стехиометрическому соотношению $\text{Sr/Fe/Mo/O} = 2/1/1/6$.

В главе 5 приведены результаты исследования влияния магнитного поля на удельное электросопротивление и магнитосопротивление SFMO с различной степенью сверхструктурного упорядочения Fe/Mo P , а также построена математическая модель, позволяющая определить зависимость степени спиновой поляризации электронов проводимости SFMO от температуры и P .

В магнитных полях 0–10 Тл были измерены температурные зависимости удельного электросопротивления SFMO с $P = 57\%, 73\%, 85\%$ и 92% , которые затем аппроксимировались с использованием выражения (1), а параметры потенциальных барьеров SFMO в магнитных полях определялись с помощью выражений (2)-(4). Полученные в результате расчетов зависимости параметров потенциальных барьеров SFMO от магнитного поля представлены на рисунках 8-10.

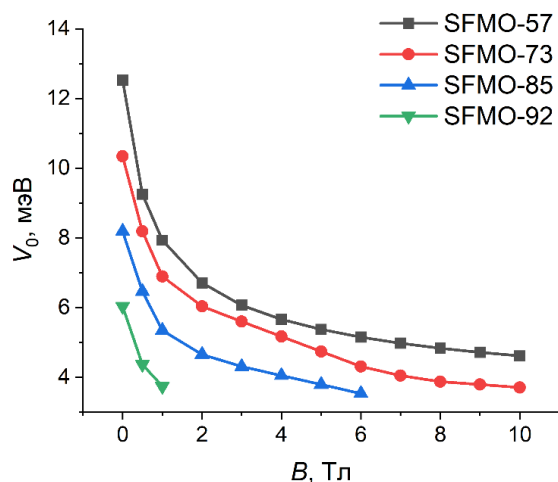


Рисунок 8 – Зависимость высоты потенциального барьера SFMO от магнитного поля

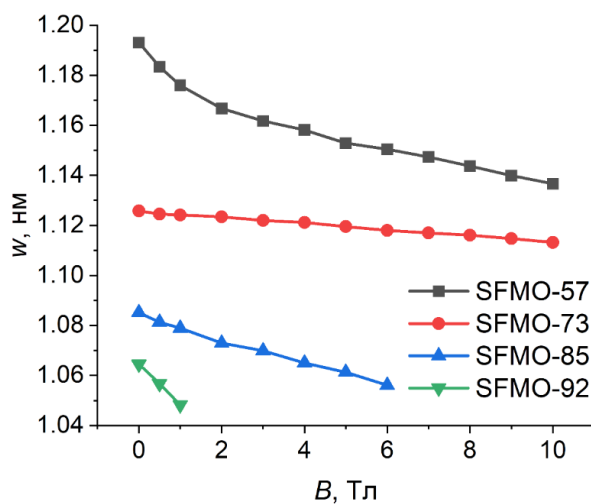


Рисунок 9 – Зависимость ширины потенциального барьера SFMO от магнитного поля

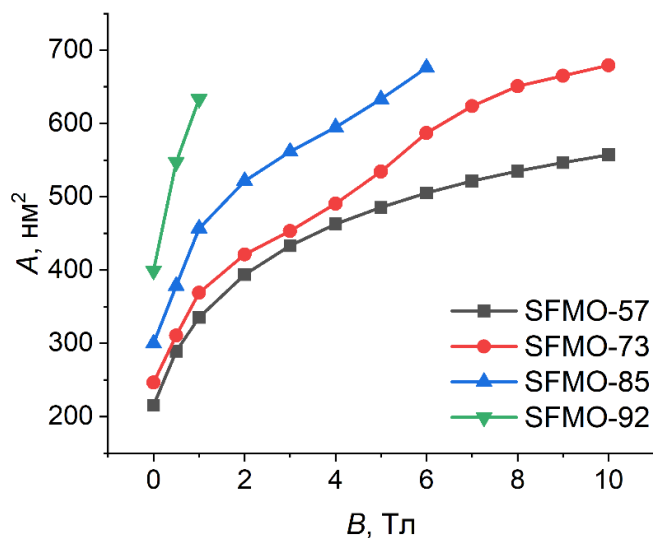


Рисунок 10 – Зависимость эффективной площади туннелирования от индукции внешнего магнитного поля

Для SFMO с $P = 73\%$, 85% и 92% обнаружено влияние магнитного поля на параметр A_n в выражении (1), что свидетельствует о наличии электрон-магнонного рассеяния на границах зерен (рисунок 11), в то время, как показатель степени n практически не изменяется. Следствием того, что множитель A_n зависит от индукции внешнего магнитного поля является наличие электрон-магнонного рассеяния в SFMO. Причем показано, что электрон-магнонное рассеяние локализуется вблизи границ зерен, так как из температурных зависимостей удельного электросопротивления монокристаллического SFMO в магнитных полях следует, что множитель A_n для монокристаллов SFMO не зависит от индукции внешнего магнитного поля.

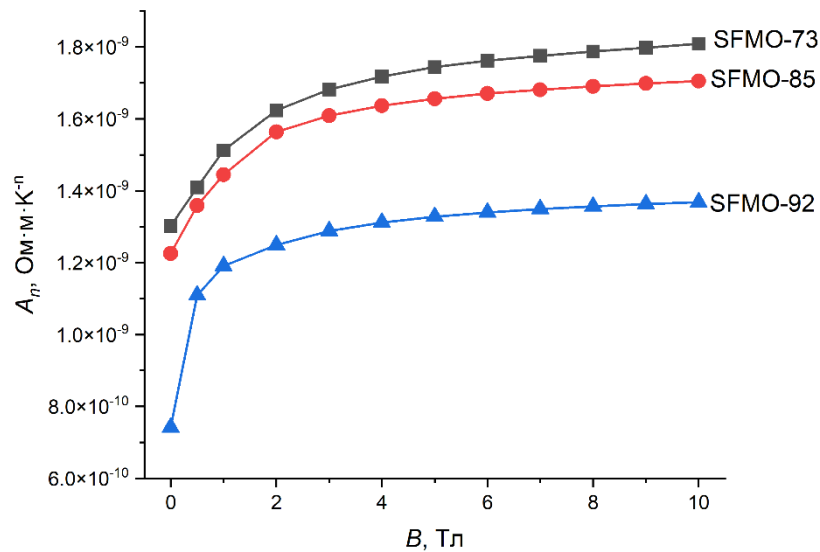


Рисунок 11 – Зависимость множителя A_n в выражении (1) от магнитного поля для SFMO с $P = 73\%$, 85% и 92%

Согласно полученным данным, удельное электросопротивление SFMO в магнитном поле снижается не только за счет снижения высоты потенциального барьера V_0 , но также за счет уменьшения его ширины w и увеличения эффективной площади туннелирования A .

Далее в главе представлены результаты пересчёта температурных зависимостей удельного электросопротивления SFMO с $P = 57\%$, 73% , 85% и 92% в магнитных полях в полевые зависимости магнитосопротивления (МС) при различных температурах. Наибольшим значением МС обладает SFMO с наибольшей степенью сверхструктурного упорядочения Fe/Mo $P = 92\%$: при температуре $T = 5$ К в магнитном поле $B = 10$ Тл величина МС составила около -37% (рисунок 12). Увеличение степени сверхструктурного упорядочения Fe/Mo в SFMO приводит к увеличению степени спиновой поляризации электронов проводимости. В соответствии с моделью Слончевски, выравнивание магнитных моментов соседних зерен при наличии внешнего магнитного поля приводит к увеличению вероятности спин-зависимого

туннелирования электронов проводимости через потенциальные барьеры на границах зерен, что приводит к уменьшению удельного электросопротивления SFMO. SFMO с $P = 92\%$, обладающий самым высоким значением степени сверхструктурного упорядочения Fe/Mo, также обладает самым большим значением степени спиновой поляризации электронов проводимости, и, следовательно, самым большим значением отрицательного МС.

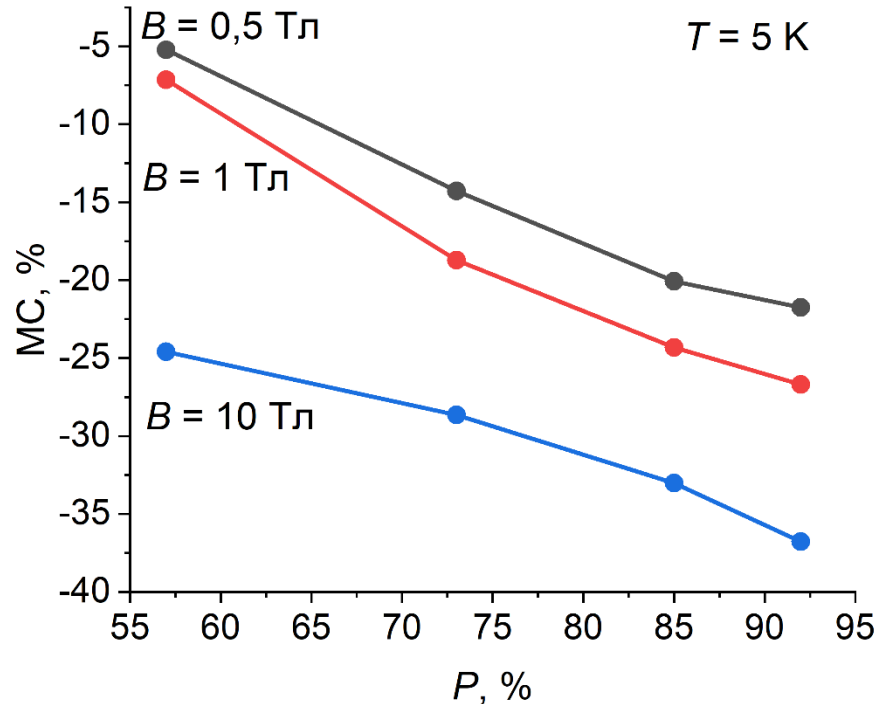


Рисунок 12 –Зависимость величины МС от степени сверхструктурного упорядочения Fe/Mo SFMO в магнитных полях $B = 0,5$ Тл, $B = 1$ Тл и $B = 10$ Тл при температуре $T = 5$ К

Полученные экспериментальные зависимости МС аппроксимировались с помощью выражения, которое связывает значение степени спиновой поляризации электронов проводимости в SFMO с величиной МС:

$$MC(B) = - \frac{S_p^2 \cdot \exp\left(-2\sqrt{\frac{B_{cr}}{B}}\right)}{1 + S_p^2 \cdot \exp\left(-2\sqrt{\frac{B_{cr}}{B}}\right)} - \alpha \cdot B, \quad (5)$$

где $MC(B)$ – величина МС в магнитном поле индукцией B ;

S_p – степень спиновой поляризации электронов проводимости SFMO;

B_{cr} – параметр аппроксимации;

α – отвечает за вклад объема зерна SFMO в величину МС (величина МС в монокристаллах SFMO менее 5%, следовательно, вклада в итоговое значение МС практически не дает).

В результате аппроксимации получены зависимости степени спиновой поляризации электронов проводимости S_P от степени сверхструктурного упорядочения Fe/Mo P и температуры T , показанные на рисунках 13 и 14.

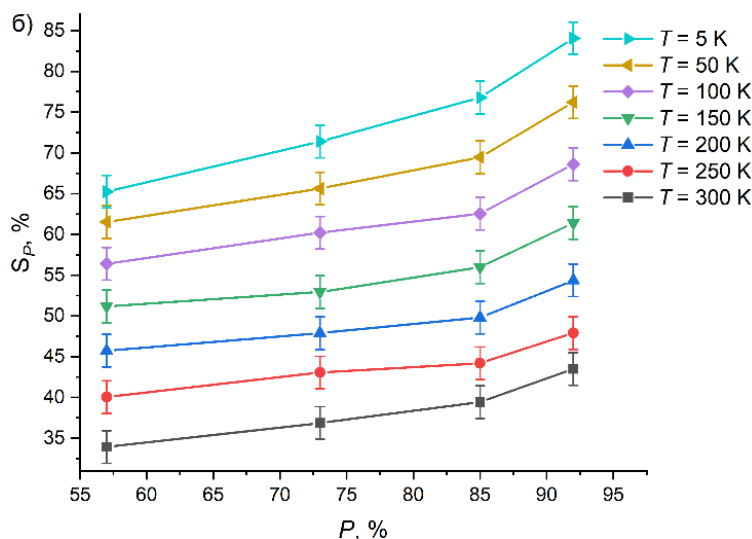


Рисунок 13 – Зависимость степени спиновой поляризации электронов проводимости от степени сверхструктурного упорядочения Fe/Mo SFMO

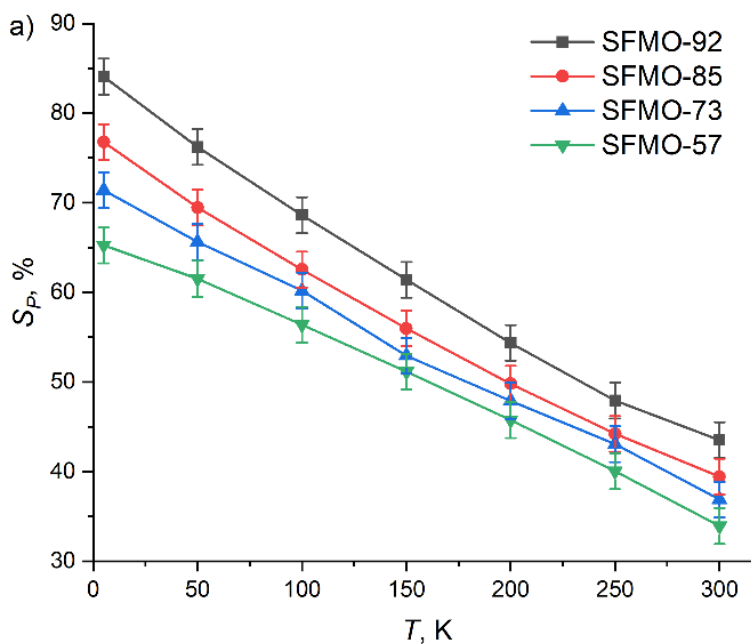


Рисунок 14 – Зависимость степени спиновой поляризации электронов проводимости SFMO от температуры

Из полученных зависимостей следует, что степень спиновой поляризации электронов проводимости SFMO растет при увеличении степени сверхструктурного упорядочения Fe/Mo и падает при увеличении температуры. Полученные зависимости были далее объединены в одну трехмерную зависимость $S_P(P, T)$, показанную на рисунке 15. Полученная зависимость аппроксимировалась уравнением плоскости, которое записывается в следующем виде:

$$S_P(T, P) = S_{P0} + aT + bP, \quad (6)$$

где S_{P0} – параметр подгонки для $57\% \leq P \leq 92\%$;
 a и b – коэффициенты, отражающие вклад температуры и степени сверхструктурного упорядочения Fe/Mo в степень спиновой поляризации электронов соответственно.

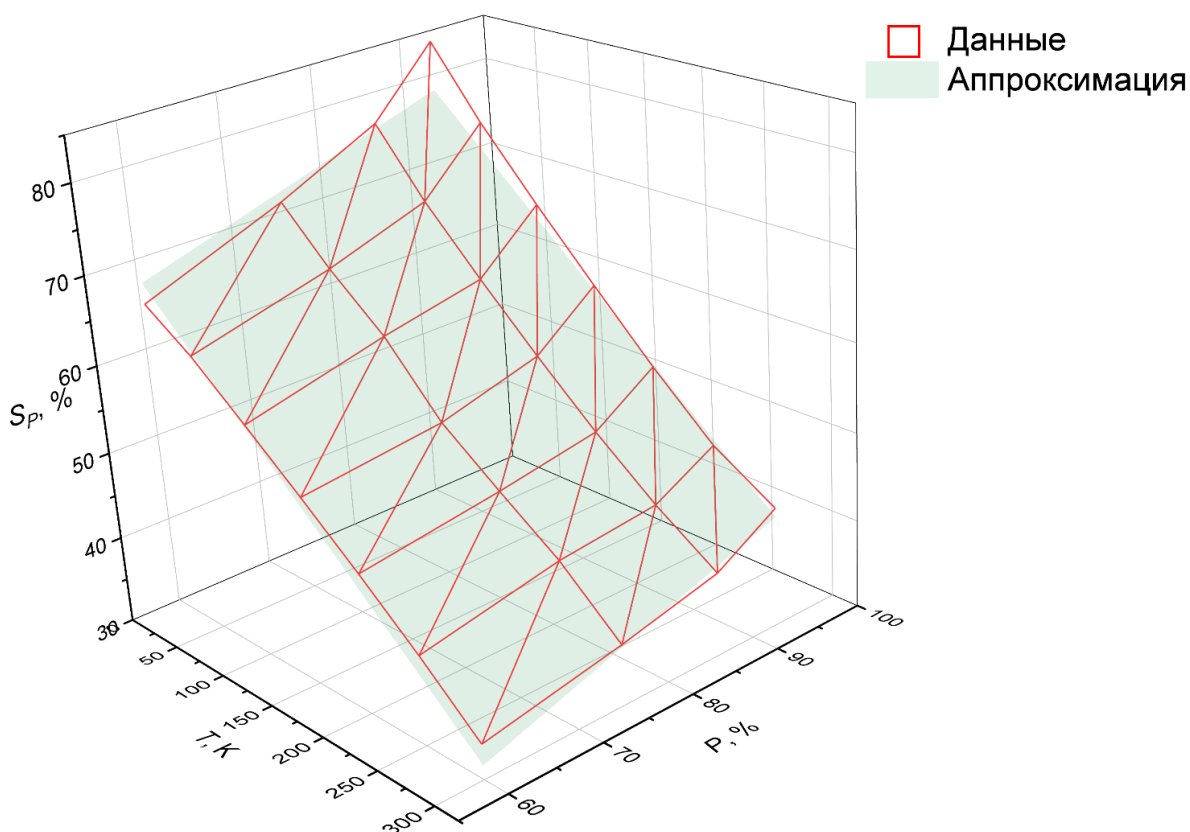


Рисунок 15 – Результат аппроксимации зависимости степени спиновой поляризации электронов проводимости SFMO от степени сверхструктурного упорядочения Fe/Mo и температуры с использованием выражения (6)

В результате аппроксимации получено следующее выражение, позволяющее определить степень спиновой поляризации электронов SFMO:

$$S_p(T, P) = 48,37 - 0,122 \cdot T + 0,33 \cdot P \quad (7)$$

Полученные значения коэффициентов $a = -0,122$ и $b = 0,33$ отражают тот факт, что с ростом температуры S_p падает, а при увеличении степени сверхструктурного упорядочения Fe/Mo S_p растёт, что и наблюдается на рисунках 13 и 14. Выражение (7) позволяет оценить степень спиновой поляризации электронов в SFMO по значению P (при условии $57 \leq P \leq 92\%$) в температурном диапазоне 5 – 300 К.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Предложена функциональная зависимость для оценки степени сверхструктурного упорядочения катионов Fe/Mo в двойном перовските $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ по соотношению интенсивностей рентгеновских рефлексов (101) и (112). Данный метод представляет собой альтернативу трудоёмкому анализу по Ритвельду и применим в условиях, когда время экспозиции при съёмке рентгенограммы ограничено. Его ключевое преимущество — высокая скорость анализа, что делает его особенно полезным для оперативной обработки больших массивов дифракционных данных [1-А; 2-А].

2. Установлено, что поверхность зёрен поликристаллического $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ при значении степени сверхструктурного упорядочения $P \leq 92\%$ обеднена железом и кислородом, а её состав приближается к диэлектрическому соединению SrMoO_4 , что приводит к формированию потенциального барьера на границах зёрен. Этот барьер ограничивает перенос носителей заряда, выполняя функцию, аналогичную искусственным туннельным прослойкам в магниторезистивных структурах. Данное явление имеет важное значение для разработки магнитных туннельных переходов и магниторезистивной памяти. Оно позволяет рассматривать межзёренные границы не как дефект структуры, а как функциональный элемент, обеспечивающий туннельный электротранспорт. Использование этого эффекта открывает путь к упрощению технологии создания спинтронных устройств, поскольку отпадает необходимость в точном синтезе ультратонкой диэлектрической прослойки. Это, в свою очередь, сокращает количество технологических операций, снижает стоимость производства и повышает его общую эффективность [4-А; 6-А; 9-А; 10-А].

3. Показано, что температурная зависимость электросопротивления $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ определяется степенью сверхструктурного упорядочения катионов Fe/Mo. При низком уровне упорядочения в интервале температур 5–300 К наблюдается отрицательный температурный коэффициент сопротивления. С ростом упорядочения на зависимости $\rho(T)$ появляется минимум при температуре $T_{\rho-\min}$, причем положение этого минимума смещается в область низких температур по мере увеличения степени упорядочения. Такое поведение свидетельствует об эволюции доминирующих механизмов переноса. При температурах ниже $T_{\rho-\min}$ преобладает туннельный транспорт через межзеренные барьеры, что и объясняет отрицательный коэффициент сопротивления. При температурах выше $T_{\rho-\min}$ усиливается вклад металлической проводимости, что в совокупности с туннелированием и приводит к формированию минимума на зависимости $\rho(T)$. Таким образом, степень сверхструктурного упорядочения Fe/Mo является ключевым параметром, регулирующим баланс между туннельным и металлическим механизмами проводимости. Это позволяет целенаправленно оптимизировать рабочие температуры и стабильность электротранспортных свойств материала [5-А; 8-А; 11-А; 14-А; 16-А].

4. В рамках модели флуктуационно-индуцированного туннелирования определены параметры потенциального барьера на границах зёрен твёрдых растворов $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$: высота, ширина и эффективная площадь туннельных контактов. Установлено, что снижение удельного электросопротивления с ростом степени сверхструктурного упорядочения Fe/Mo обусловлено уменьшением высоты и ширины барьера, а также увеличением площади туннельных контактов. Показано, что внешнее магнитное поле также снижает высоту и ширину потенциального барьера и увеличивает эффективную площадь контактов, что является причиной наблюдаемого отрицательного магнитосопротивления. Данный механизм удовлетворительно описывается в рамках теории Иноуэ–Мэкавы, учитывающей влияние магнитного поля на туннельный ток через потенциальный барьер [3-А; 7-А; 8-А; 12-А; 15-А; 16-А].

5. При исследовании температурных зависимостей удельного электросопротивления $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ с различной степенью сверхструктурного упорядочения катионов Fe/Mo установлено, что наряду с электрон-фононным рассеянием в материале проявляется также электрон-магнонное рассеяние, локализованное вблизи границ зёрен. Данный механизм тесно связан с особенностями магнитного упорядочения: возбуждение магнонов в межзёренных областях создаёт дополнительный канал рассеяния электронов, что демонстрирует чувствительность транспортных свойств к локальным флуктуациям спиновой структуры. Наличие такого вклада свидетельствует о

том, что межзёренные границы играют активную роль в формировании спин-поляризованного тока и могут определять степень сохранения спиновой поляризации при туннелировании. Следовательно, контроль степени сверхструктурного упорядочения Fe/Mo позволяет целенаправленно влиять на спин-зависимые транспортные свойства материала, что открывает перспективы для управления эффективностью спинтронных устройств на его основе [12-A].

6. На основе анализа температурных зависимостей магнитосопротивления построена математическая модель, количественно описывающая степень спиновой поляризации в $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ в зависимости от температуры и степени сверхструктурного упорядочения Fe/Mo. Модель учитывает вклад межзёренных границ и особенности рассеяния, обеспечивая точное соответствие экспериментальным данным. Установлено, что степень спиновой поляризации линейно возрастает с ростом упорядочения Fe/Mo. Предложенный подход позволяет прогнозировать оптимальные условия синтеза для повышения эффективности материала в спинтронных устройствах [13-A].

Рекомендации по практическому использованию результатов

На основании результатов экспериментальных и теоретических исследований показано, что благодаря высоким значениям степени спиновой поляризации и температуры Кюри, поликристаллический $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ с высокой степенью сверхструктурного упорядочения может найти широкое применение для использования в устройствах спинтроники, таких как спиновые транзисторы, спиновые инжекторы, магнитные туннельные переходы и др., а также в качестве датчиков сильных и слабых магнитных полей. Этому способствуют такие свойства $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$, как наличие существенного магнитосопротивления как в слабых (при $B < 1$ Тл), так и в больших магнитных полях (при $B > 1$ Тл), низкое удельное электросопротивление, а также сохранение спиновой поляризации электронов проводимости в широком температурном диапазоне.

Практическая значимость результатов, полученных в процессе выполнения диссертационной работы, состоит в определении связи между степенью сверхструктурного упорядочения Fe/Mo и электротранспортными и магниторезистивными свойствами $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$, что позволяет разрабатывать новые устройства спинтроники с требуемыми свойствами. Кроме того, представлено выражение, позволяющее оценить степень сверхструктурного упорядочения Fe/Mo $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ по рентгенограммам, не требующий применения метода Ритвельда. Также представлена математическая модель,

которая позволяет оценить значение степени спиновой поляризации $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ в зависимости от температуры и степени сверхструктурного упорядочения Fe/Mo. Результаты исследования обладают фундаментальной значимостью и могут быть использованы в качестве справочных данных для дальнейших работ в области физики конденсированного состояния и спинтроники.

Экономическая значимость результатов заключается в возможности применения выявленных взаимосвязей при разработке современных устройств микро- и нанoeлектроники и спинтроники, включая инновационные датчики магнитного поля и угла поворота, что обеспечивает повышение их эффективности при одновременном снижении энергопотребления.

Социальная значимость заключается в использовании результатов диссертационной работы в образовательном процессе учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» на кафедре микро- и нанoeлектроники в качестве материалов лекционного курса по дисциплине «Современные проблемы физики конденсированных сред» для магистрантов по специальности 7-06-0701-01 «Нанотехнологии и наноматериалы», что подтверждается актом внедрения результатов НИР в учебный процесс. Внедрение результатов диссертации в образовательный процесс способствует повышению качества подготовки специалистов и формированию у магистрантов исследовательских компетенций, а также позволяет познакомить их с актуальными научными направлениями и современными методами исследований, и обеспечить их готовность к решению практических и инновационных задач.

Полученные результаты обладают прикладным потенциалом и могут быть использованы на ряде предприятий Республики Беларусь, в том числе в ОАО «Интеграл» и ОАО «Планар».

Список публикаций соискателя ученой степени

Статьи рецензируемых научных изданиях

1-А. Artsiukh E., Suchaneck G. Evaluation of crystallographic ordering degree of magnetically active ions in $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ by means of the (101) X-ray peak intensity // *Modern Electronic Materials*. – 2019. – Vol. 5, № 4. – P. 151–157.

2-А. Артюх Е., Суханек Г. Оценка степени кристаллографического упорядочения магнитоактивных ионов в $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ с помощью интенсивности рентгеновского пика (101) // *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*. – 2019. – Т. 22, № 2. – С. 135–142.

3-А. Suchaneck G., Kalanda N., Artiukh E., Yarmolich M., Sobolev N.A. Tunneling conduction mechanisms in strontium ferromolybdate ceramics with strontium molybdate dielectric intergrain barriers // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2021. – Vol. 860. – P. 158526.

4-А. Suchaneck G., Artiukh E. Magnetoresistance of Nanosized, Granular $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ – SrMoO_4 Core–Shell Structures // *Physica Status Solidi (b)*. – 2021. – Vol. 258, № 5. – P. 470.

5-А. Artiukh E., Suchaneck G. Intergranular magnetoresistance of strontium ferromolybdate ceramics caused by spin-polarized tunneling // *Open Ceramics*. – 2021. – Vol. 7. – P. 100171.

6-А. Suchaneck G., Artiukh E., Sobolev N.A., Telesh E., Kalanda N., Kiselev D.A., Ilina T.S., Gerlach G. Strontium Ferromolybdate-Based Magnetic Tunnel Junctions // *Applied Sciences*. – 2022. – Vol. 12, № 5. – P. 2717.

7-А. Suchaneck G., Artiukh E., Gerlach G. Resistivity and Tunnel Magnetoresistance in Double-Perovskite Strontium Ferromolybdate Ceramics // *Physica Status Solidi (b)*. – 2022. – Vol. 259, № 8. – P. 1.

8-А. Suchaneck G., Artiukh E., Gerlach G. The Origin of the Low-Temperature Minimum of Electrical Resistivity in Strontium Ferromolybdate Ceramics // *Ceramics*. – 2024. – Vol. 7, № 2. – P. 491–503.

Статьи в сборниках трудов и материалов научных конференций

9-А. Артюх Е.А., Суханек Г., Ермакова Е.А. Магнитные туннельные переходы на основе $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ // *Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния: материалы седьмой Международной научно-практической конференции* / г. Минск, (18 – 19 мая 2023 г.). – Минск, 2023. – С. 256 – 259

10-А. Артюх Е. А., Суханек Г., Нормирзаев А. Р., Тухтабаев М. А., Гулямов Г. Магнитные туннельные переходы на основе ферромолибдата стронция // *Сборник материалов международной научно-практической*

конференции на тему «Оценка безопасности дорожного движения в Ферганской долине: проблемы и пути решения» / г. Намаган, (23-24 февраля 2024 г.). – Т. 2 – Минск, 2024. – С. 39-41.

11-А. Артюх Е. А., Каланда Н. А. Влияние степени катионного упорядочения Fe/Mo на температурную зависимость удельного электросопротивления в $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ // Актуальные проблемы физики твердого тела: сборник докладов XI Международной научной конференции / г. Минск, (19-23 мая 2025 г.). – Минск, 2025. – С. 90-93.

12-А. Каланда Н. А., Артюх Е. А., Suchaneck G., Гулямов Г., Эркабоев У. И., Негматов У. М. Влияние магнитного поля на высоту потенциального барьера поликристаллической керамики $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ с различной степенью сверхструктурного упорядочения Fe/Mo // Сборник материалов международной научно-практической конференции на тему «Фундаментальные и практические проблемы современной физики и энергетики» (посвященная 80-летию со дня рождения Гуломкодира Дадамирзаева, кандидата физико-математических наук, доцента) / г. Намаган, (5-6 июня 2025 г.). – Т. 1 – Намаган, 2025. – С. 32-37.

13-А. Каланда Н. А., Артюх Е. А., Suchaneck G., Гулямов Г., Эркабоев У. И., Негматов У. М. Влияние сверхструктурного упорядочения Fe/Mo на степень спиновой поляризации электронов в $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ // Сборник материалов международной научно-практической конференции на тему «Фундаментальные и практические проблемы современной физики и энергетики» (посвященная 80-летию со дня рождения Гуломкодира Дадамирзаева, кандидата физико-математических наук, доцента) / г. Намаган, (5-6 июня 2025 г.). – Т. 1 – Намаган, 2025. – С. 32-37.

Тезисы докладов конференций, съездов, симпозиумов:

14-А. Suchaneck G., Artiukh E., Gerlach G. Synthesis dependence of the conductivity mechanism and the magnetoresistance of $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ ceramics // 4th International Conference on Nanomaterials Science and Mechanical Engineering (ICNMSME-2021): Book of Abstracts / Aveiro (July 6-9, 2021). – Aveiro, 2021. – P. 40.

15-А. Suchaneck G., Artiukh E., Gerlach G. The different magnetoresistance mechanisms of Spintronic material $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ ceramics // International Conference on Oxide Materials for Electronic Engineering – fabrication, properties and application (OMEE-2021): Book of Abstracts / Lviv (September 28 - October 2, 2021). – Lviv, 2021. – P. 93.

16-А. Suchaneck G., Artiukh E., Gerlach G. Resistivity and tunnel magnetoresistance in double perovskite strontium ferromolybdate ceramics // 2nd International Workshop on Advanced Magnetic Oxides IWAMO 2021 Workshop Book / Aveiro (24–26 November, 2021). – Aveiro, 2021. – P. 21.

РЭЗІЮМЭ

Арцюх Яўгеній Аляксандравіч

Электратранспартныя і гальванамагнітныя ўласцівасці $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$

Ключавыя словы: падвойны пераўскіт, удзельны электрасупраціў, магнітарэзістыўны эффект, спінавая палярызацыя.

Мэта працы: устанаўленне заканамернасцей змянення складу паверхні зерняў, электратранспартных і гальванамагнітных уласцівасцей цвёрдых раствораў $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$, атрыманых метадам цвёрдафазных рэакцый, у залежнасці ад ступені звышструктурнага ўпарадкавання Fe/Mo.

Метады даследавання: рэнтгенафазавы аналіз, метады Рывельда, чатырохкантактны метады вымярэння электратранспартных уласцівасцяў, энергадысперсійная рэнтгенаўская спектраскапія, сканавальная электронная мікраскапія.

Атрыманыя вынікі і іх навізна заключаецца ва ўстанаўленні ўплыву ступені звышструктурнага ўпарадкавання Fe/Mo P на склад паверхні зерняў, электратранспартных і гальванамагнітных уласцівасці полікрышталічнай керамікі $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$, сінтэзаванай цвёрдафазным метадам. Паказана, што паверхня зерняў $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ збеднена Fe і O, і пры павелічэнні P склад на паверхні зерняў набліжаецца да ідэальных суадносін Sr/Fe/Mo/O = 2/1/1/6. Пры даследаванні электратранспартных уласцівасцяў $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ у дыяпазоне тэмператур 5-300 К усталявана, што назірае памяншэнне велічыні ўдзельнага электрасупраціву пры павелічэнні ступені звышструктурнага парадкавання Fe/Mo у полікрышталічнай кераміцы $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ адбываецца шляхам памяншэння вышыні і шырыні бар'ера, якім служыць паверхня зерняў, а таксама эфектыўнага пляча тунэльнага кантакту. Акрамя таго, вызначаны механізмы расейвання носбітаў зарада ва ўказаным тэмпературным дыяпазоне. Пры вывучэнні тэмпературных залежнасцяў магнітасупраціву $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ у дыяпазоне магнітных палёў $0 < B < 10$ Тл пабудавана матэматычная мадэль, якая дазваляе вызначыць ступень спінавай палярызацыі электронаў у залежнасці ад тэмпературы і ступені звышструктурнага ўпарадкавання Fe/Mo.

Рэкамендацыі па выкарыстанні: у якасці элементнай базы ў мікраэлектроніцы і спінтронах, як датчыкі магнітнага поля, кута павароту.

Вобласць прымянення: прыборы мікраэлектронікі і спінтронах, матэрыялы для магнітарэзістыўных датчыкаў.

РЕЗЮМЕ

Артюх Евгений Александрович

Электротранспортные и гальваномагнитные свойства $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$

Ключевые слова: двойной перовскит, удельное электросопротивление, магниторезистивный эффект, спиновая поляризация.

Цель работы: установлении закономерностей изменения состава поверхности зерен, электротранспортных и гальваномагнитных свойств твердых растворов $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$, полученных методом твердофазных реакций, в зависимости от степени сверхструктурного упорядочения Fe/Mo.

Методы исследования: рентгенофазовый анализ, метод Ритвельда, четырехконтактный метод измерения электротранспортных свойств, энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия, сканирующая электронная микроскопия.

Полученные результаты и их новизна заключается в установлении влияния степени сверхструктурного упорядочения Fe/Mo P на состав поверхности зерен, электротранспортные и гальваномагнитные свойства поликристаллической керамики $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$, синтезированной твердофазным методом. Показано, что поверхность зерен $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ обеднена Fe и O, и при увеличении P состав на поверхности зерен приближается к стехиометрическому соотношению $\text{Sr}/\text{Fe}/\text{Mo}/\text{O} = 2/1/1/6$. При исследовании электротранспортных свойств $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ в диапазоне температур 5 – 300 К установлено, что наблюдаемое уменьшение величины удельного электросопротивления при увеличении степени сверхструктурного упорядочения Fe/Mo в поликристаллической керамике $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ происходит путем уменьшения высоты и ширины барьера, которым служит поверхность зерен, а также эффективной площади туннельного контакта. Кроме того, определены механизмы рассеяния носителей заряда в указанном температурном диапазоне. При изучении температурных зависимостей магнитосопротивления $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ в диапазоне магнитных полей $0 < B < 10$ Тл построена математическая модель, позволяющая определить степень спиновой поляризации электронов в зависимости от температуры и степени сверхструктурного упорядочения Fe/Mo.

Рекомендации по использованию: в качестве элементной базы в микроэлектронике и спинтронике, как датчики магнитного поля и угла поворота.

Область применения: приборы микроэлектроники и спинтроники, материал для магниторезистивных датчиков.

SUMMARY

Artsiukh Yauheni Aleksandrovich

Electrical transport and galvanomagnetic properties of $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$

Keywords: double perovskite, specific electrical resistance, magnetoresistive effect, spin polarization.

Objective: establishing patterns of change in the composition of the grain surface, electrical transport and galvanomagnetic properties of solid solutions $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ obtained by the method of solid-phase reactions, depending on the degree of superstructural ordering of Fe/Mo.

Research methods: X-ray diffraction, Rietveld method, four-probe electrotransport properties measurements method, energy-dispersive X-ray spectroscopy, scanning electron microscopy.

The obtained results and their novelty consist in establishing the influence of the degree of Fe/Mo superstructural ordering P on the grain surface composition, electric transport and galvanomagnetic properties of $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ polycrystalline ceramics synthesized by the solid-phase method. It is shown that the surface of $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ grains is depleted in Fe and O, and with an increase in P , the composition on the grain surface approaches the ideal ratio $\text{Sr}/\text{Fe}/\text{Mo}/\text{O} = 2/1/1/6$. In a study of the electric transport properties of $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ in the temperature range of 5-300 K, it was found that the observed decrease in the specific electrical resistance with an increase in the degree of Fe/Mo superstructural ordering in $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ polycrystalline ceramics occurs due to a decrease in the height and width of the barrier, which is the grain surface, as well as the effective area of the tunnel contact. In addition, the mechanisms of charge carrier scattering in the specified temperature range are determined. When studying the temperature dependences of the magnetoresistance of $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ in the range of magnetic fields $0 < B < 10$ T, a mathematical model was constructed that makes it possible to determine the degree of spin polarization of electrons depending on the temperature and the degree of superstructural ordering of Fe/Mo.

Recommendations for use: as an element base in microelectronics and spintronics, as magnetic field and rotation angle sensors.

Application area: microelectronics and spintronics devices, material for magnetoresistive sensors.



Подписано в печать 03.11.2025.
Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 1,80. Тираж 60 экз. Заказ № 360.

ФТИ НАН Беларуси.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 2/12 от 21.11.2013.
220084, ул. Академика Купревича, 10, г. Минск.