

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу АРТЮХА Евгения Александровича
**«ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТНЫЕ И ГАЛЬВАНОМАГНИТНЫЕ
СВОЙСТВА $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ »**,

представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук по специальности
01.04.07 – физика конденсированного состояния

1. Соответствие диссертации специальности и отрасли науки, по которой она представлена к защите.

Объектом исследования диссертационной работы Артюха Евгения Александровича «Электротранспортные и гальваномагнитные свойства $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ », являлись поликристаллические твердые растворы ферромолибдата стронция ($\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$), полученные методом твердофазных реакций; предметом исследования – влияние степени сверхструктурного упорядочения Fe/Mo на микроструктурные, магнитные, электротранспортные и магниторезистивные свойства. В совокупности с полученными результатами, отраженными в выводах и выносимых на защиту положениях, это позволяет утверждать, что диссертационная работа соответствует отрасли физико-математических наук, специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния, поскольку посвящена актуальному направлению физики конденсированного состояния.

2. Актуальность темы диссертации.

Интенсивное развитие электроники и ее многочисленных направлений стимулирует поиск и детальное исследование новых перспективных материалов, обладающих совокупностью свойств, позволяющих, с одной стороны, значительно улучшить параметры существующих устройств, а с другой – создать элементы принципиально нового типа. В этой связи весьма привлекательными являются многокомпонентные материалы, в состав которых входит три и более химических элемента, характеризующиеся большим разнообразием диапазона изменений микроструктуры, электрофизических и магнитных свойств по сравнению с элементарными и бинарными материалами. Среди них заметное место занимает $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ со структурой двойного перовскита, который выше температуры Кюри (T_C) находится в парамагнитном состоянии с кубической структурой, а при $T < T_C$ обладает тетрагональной структурой с магнитным упорядочением. Он привлекает внимание исследователей ввиду того, что имеет высокое значение температуры Кюри (~ 415 K) и практически 100 %-ю

спиновую поляризацию электронов проводимости, что позволяет использовать его в качестве сенсоров и функциональных элементов наноэлектроники.

В связи с изложенным выше, актуальность диссертационной работы Артюха Евгения Александровича, посвященной установлению закономерностей влияния степени сверхструктурного упорядочения Fe/Mo микроструктурные, магнитные, электротранспортные и магниторезистивные свойства поликристаллов твердых растворов $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$, сомнений не вызывает как с научной, так и практической точки зрения. Кроме того, тематика проведенных исследований соответствует приоритетным научным направлениям Республики Беларусь на 2021 – 2025 гг, в частности пункту 4 «Машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы».

3. Степень новизны результатов, полученных в диссертации, и научных положений, выносимых на защиту.

Диссертационная работа Артюха Евгения Александровича представляет собой комплексное исследование, выполненное на высоком научном уровне. Новизна работы определяется развитием такого направления физики конденсированного состояния, как получение новых научных знаний на основании результатов экспериментальных и теоретических исследований физических свойств твердых растворов ферромолибдата стронция. Это позволяет разработать новые концепции, а также модели структурного упорядочения, с учетом которых возможно получение новых функциональных материалов с заданными физическими свойствами.

Полученные научные результаты диссертационной работы являются новыми и вносят вклад в расширение представлений о процессах формирования и физических свойствах магнитных полуметаллов с упорядоченной структурой двойного перовскита с общей формулой $\text{A}_2\text{BB}'\text{O}_6$, где А – двухвалентный щелочноземельный катион (Sr^{2+} , Ba^{2+} , Ca^{2+} и др.), В и В' - катионы переходных металлов (Fe, Mo, Mn, Ru, Cr, Ni и др.). К новым научным результатам можно отнести следующее:

- методом твердофазных реакций получены поликристаллические твердые растворы $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ с различной степенью сверхструктурного упорядочения Fe/Mo и выполнено комплексное исследование их микроструктурных и физических свойств;
- показано, что функциональная зависимость соотношения интенсивностей рентгеновских рефлексов (101) и (112) обеспечивает высокую скорость анализа сверхструктурного упорядочения катионов Fe/Mo в двойном перовските $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ по сравнению с анализом по методу Ритвельда;

- установлено, что на границах зёрен поликристаллического $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ при значении степени сверхструктурного упорядочения Fe/Mo $P \leq 92\%$ происходит формирование потенциального барьера, ограничивающего перенос носителей заряда и выполняющего функцию, аналогичную искусственным туннельным прослойкам в магниторезистивных структурах;

- исследована температурная зависимость электросопротивления поликристаллов твердых растворов $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ от степени сверхструктурного упорядочения катионов Fe/Mo . Это является ключевым параметром, регулирующим баланс между туннельным и металлическим механизмами проводимости и позволяет целенаправленно оптимизировать рабочие температуры и стабильность электротранспортных свойств материала;

- установлено, что наряду с электрон-фононным рассеянием в материале проявляется также электрон-магнонное рассеяние, локализованное вблизи границ зёрен. Это свидетельствует о том, что контроль степени сверхструктурного упорядочения Fe/Mo позволяет целенаправленно влиять на спин-зависимые транспортные свойства материала для управления эффективностью спинтронных устройств на основе $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$;

- температурные зависимости магнитосопротивления позволили предложить математическую модель, количественно описывающую степень спиновой поляризации в $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ в зависимости от температуры и степени сверхструктурного упорядочения Fe/Mo . Установлено, что степень спиновой поляризации линейно возрастает с ростом упорядочения Fe/Mo и позволяет прогнозировать оптимальные условия синтеза материала.

Следует также отметить, что научная новизна представленных в работе результатов определяется комплексным подходом автора к установлению физико-химических закономерностей синтеза твердых растворов $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$, исследованию закономерностей изменения их микроструктуры и физических свойств в зависимости от режимов получения и разработкой научных основ создания новых материалов.

Степень новизны полученных результатов и научных положений, выносимых на защиту, подтверждается публикациями в рецензируемых научных изданиях и сборниках материалов научных конференций.

4. Обоснованность и достоверность выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Обоснованность положений, результатов и выводов диссертационной работы сомнений не вызывает, так как она подтверждается всесторонней проверкой и сопоставлением результатов расчетов с экспериментальными

данными. Результаты выполненных исследований имеют законченный характер, сформулированы достаточно корректно, проверены и подтверждены экспериментально, апробированы на научно-технических конференциях различного ранга, отражены в зарубежных реферируемых журналах. Достоверность результатов, представленных в диссертационной работе, обеспечивается использованием методов исследования, хорошо апробированных в физике конденсированного состояния, их грамотной реализацией в экспериментальных методиках, отсутствием противоречий между результатами, полученными разными методами.

5. Научная, практическая, экономическая и социальная значимость результатов диссертации с указанием рекомендаций по их использованию.

Научная значимость результатов заключается в получении новых знаний и установлении закономерностей синтеза твердых растворов системы $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ и их взаимосвязи с условиями получения и физическими свойствами объектов исследования. Полученные результаты имеют фундаментальный характер и могут использоваться как справочная информация для технологов и разработчиков элементной базы спинтроники на основе многокомпонентных магнитных полуметаллов.

Практическая значимость заключается в разработке и оптимизации методики формирования твердых растворов ферромолибдата стронция с физическими характеристиками, удовлетворяющими требованиям для применения в устройствах спинтроники и нанoeлектроники. 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. Диссертационная работа представляет практический интерес для использования как одного из технологического этапа производства приборов на предприятиях соответствующего профиля (НПО «Интеграл», ООО «Планар» и др.).

Экономическая значимость работы заключается в возможности перехода к новым технологиям получения твердых растворов системы $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$, отличающихся сниженными энергозатратами и себестоимостью, так как методы не требуют сложного технологического оборудования. Значимость также заключается в возможности использования полученных твердых растворов для инъекции поляризованных электронов в устройствах спинтроники, инновационных датчиков магнитного поля и угла поворота, отвечающих требованиям экологической безопасности и низко затратной промышленности.

Социальная значимость результатов заключается в возможности их использования для подготовки специалистов в области физики твердого тела

многокомпонентных материалов в высших учебных заведениях Республики Беларусь. Это подтверждается актом внедрения в учебный процесс учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» на кафедре микро- и наноэлектроники в качестве материалов лекционного курса по дисциплине «Современные проблемы физики конденсированных сред» для магистрантов по специальности 7-06-0701-01 «Нанотехнологии и наноматериалы».

6. Опубликованность результатов диссертации в научной печати.

По результатам исследований, представленных в диссертации, опубликовано 16 работ, в том числе 8 статей в рецензируемых научных журналах в соответствии с п. 19 «Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь», 5 статей в сборниках материалов научных конференций и 3 тезиса докладов на международных конференциях. Объем опубликованных печатных работ составляет 7,12 авторских листа.

7. Соответствие оформления диссертации требованиям ВАК.

Оформление диссертационной работы соответствует требованиям, предъявляемым ВАК Республики Беларусь к кандидатским диссертациям. Содержание работы изложено логически последовательно, грамотным научным языком. При изложении материала в работе использованы общепринятые в физике конденсированного состояния термины. Выводы и положения, выносимые на защиту, сформулированы корректно. Диссертация состоит из перечня условных обозначений и сокращений, введения, общей характеристики работы, пяти глав основной части с выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и двух приложений. Общий объем диссертационной работы составляет 147 страниц, включая 67 рисунков на 48 страницах текста, 20 таблиц на 6 страницах, библиографический список на 17 страницах, содержащий 145 наименований использованных источников и 16 наименований публикаций соискателя, 2 приложения на 5 страницах.

Автореферат диссертационной работы достаточно полно отражает основное содержание работы.

8. Соответствие научной квалификации соискателя ученой степени, на которую он претендует.

Анализ диссертации и автореферата Артюха Евгения Александровича позволяет сделать вывод об умении соискателя решать поставленные научные

задачи с использованием современных методик исследований, грамотно и последовательно излагать полученные результаты. Уровень научных результатов, представленных в диссертации, указывает на то, что соискатель является сформировавшимся специалистом высокой квалификации в области физики конденсированного состояния и заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

9. Замечания по диссертационной работе.

1. Литературный обзор проведен в основном по зарубежным источникам. Недостаточно внимания уделено анализу библиографических источников авторов, представляющих страны СНГ и публикаций за последние 5 лет.

2. В главе 1 следовало бы более расширено описать существующие методы получения твердых растворов системы $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$.

3. В автореферате отсутствуют результаты по расчету параметров элементарной ячейки и характеру их зависимостей от степени сверхструктурного упорядочения Fe/Mo.

4. В подразделе «Основные научные результаты диссертации» заключения по работе не отражены результаты исследования химического состава твердых растворов ферромолибдата стронция, используемые для разработки рекомендаций по практическому применению результатов.

5. Имеются некоторые замечания по тексту и оформлению иллюстративного материала, затрудняющие восприятие результатов диссертационной работы, такие, например, как:

- желательно было бы при описании результатов рентгенофазового анализа твердых растворов $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ писать «интенсивность сверхструктурного рефлекса (101)», а не «высота сверхструктурного рефлекса (101)»;

- не совсем корректное название рисунка 3.23 в диссертации и рисунка 6 в автореферате, следует писать «Зависимость элементного состава Sr, Fe, Mo и O на поверхности зерен...», а не «Зависимость стехиометрического состава элементов Sr, Fe, Mo и O на поверхности зерен...»;

- по тексту диссертации имеются незначительные опечатки и не всегда правильно расставлены знаки препинания.

Необходимо, однако, отметить, что приведенные выше замечания не затрагивают основных положений и выводов, содержащихся в диссертационной работе, и не снижают ценности полученных результатов.

10. Заключение.

Диссертационная работа Артюха Евгения Александровича «Электротранспортные и гальваномагнитные свойства $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ », представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, соответствует специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния, является завершенной самостоятельно выполненной квалификационной работой, соответствующей требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в соответствии с требованиями Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, а ее автор заслуживает присуждения искомой степени за новые научно-обоснованные результаты, включающие:

- выявление обеднения поверхности зерен поликристаллического $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ по Fe и O, а также приближение её состава к стехиометрическому соотношению $\text{Sr/Fe/Mo/O} = 2/1/1/6$ при росте степени сверхструктурного упорядочения Fe/Mo, и демонстрации влияния данных изменений на электротранспортные и магниторезистивные свойства материала;

- определение электрических характеристик твердых растворов поликристаллов $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ (электросопротивление, магнитосопротивление) и установление закономерностей их изменения в зависимости от степени сверхструктурного упорядочения катионов Fe/Mo и температуры, что может быть использовано в качестве справочной информации при разработке и проектировании электронных устройств;

- определение параметров потенциальных барьеров на границах зерен в поликристаллическом $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$, а также установление того, что уменьшение удельного электросопротивления данного материала при росте степени сверхструктурного упорядочения Fe/Mo на поверхности зерен связано с туннелированием электронов через указанные барьеры и определяется снижением их высоты и ширины, а также увеличением площади контакта между зернами;

- определение характера воздействия внешнего магнитного поля на высоту и ширину потенциальных барьеров между кристаллическими зернами в $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$, а также на эффективную площадь их контакта, что позволяет объяснить воздействие данных факторов на температурные зависимости

- разработку модели, позволяющей описать зависимость степени спиновой поляризации электронов проводимости в соединении $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ от температуры и уровня сверхструктурного упорядочения ионов Fe/Mo.

В совокупности, полученные результаты вносят существенный вклад в развитие физики конденсированного состояния в области синтеза многокомпонентных магнитных полуметаллов с упорядоченной структурой двойного перовскита для устройств спинтроники и наноэлектроники.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий лабораторией физики
полупроводников Государственного
научно-производственного
объединения «Научно-практический центр
Национальной академии наук Беларуси
по материаловедению»



В.Ф. Гременок

02.12.2025

