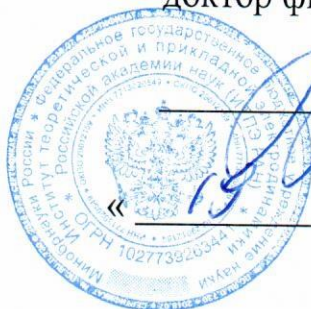


УТВЕРЖДАЮ:

Директор Федерального
государственного бюджетного
учреждения науки
Института теоретической и
прикладной электродинамики
Российской академии наук

доктор физико-математических наук



К.Н. Розанов

« 19 » _____ 2025 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

на диссертационную работу Козлова Ильи Владимировича
«Разработка методов формирования и контроля структурно-фазовых
состояний аморфных микропроводов для применений в магнитных
сенсорах на основе эффекта гигантского магнитоимпеданса»,
представленную на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния

Актуальность темы диссертационной работы

Аморфные ферромагнитные микропровода на основе кобальта, покрытые стеклянной оболочкой, вызывают большой интерес в связи с их необычными физическими свойствами. В частности, в них наблюдается эффект гигантского магнитоимпеданса (ГМИ), который заключается в изменении комплексного сопротивления ферромагнитного проводника во внешнем магнитном поле. Эффект ГМИ привлекает особое внимание в связи с разработкой миниатюрных сенсоров слабых магнитных полей.

Применение аморфных микропроводов в ГМИ-сенсорах имеет ряд ограничений вследствие их температурной нестабильности. Термическая

обработка может существенно улучшить магнитомягкие свойства аморфных микропроводов, что связано со структурными изменениями из-за образования нанокристаллической фазы. Исследования формирования и контроля нанокристаллического состояния микропроводов при термической обработке представляются важными для повышения чувствительности и обеспечения температурной стабильности ГМИ-сенсоров.

В связи с вышеизложенным тема диссертационной работы Козлова И.В., посвящённой исследованию взаимосвязи между структурными, фазовыми, статическими и динамическими магнитными свойствами микропроводов на основе кобальта, несомненно, является весьма актуальной.

Краткое содержание диссертационной работы

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, отмечены научная новизна и практическая значимость результатов. Также обоснована достоверность полученных результатов, содержатся сведения об апробации работы и личном вкладе автора.

В первой главе диссертационной работы представлен обзор литературных данных, посвящённых исследованиям влияния термической обработки на структуру и свойства аморфных сплавов на основе кобальта. Проведён анализ исследований структурно-фазовых превращений при релаксации и кристаллизации аморфных сплавов. Рассмотрены вопросы влияния кристаллизации в результате термической обработки на эффект ГМИ в аморфных микропроводах. Также представлено подробное описание состояния разработки сенсоров магнитных полей в мире. По результатам проведённого анализа сформулированы основные задачи исследования.

Во второй главе описана используемая технология изготовления микропроводов Co-Fe-Cr-Si-B в стеклянной оболочке по методу Улитовского–Тейлора. Приведено описание автоматизированной системы отжига и контроля сопротивления образцов, предназначенной для управления

режимами термической обработки аморфных микропроводов. Подробно описаны использованные методы изучения структурно-фазовых состояний, электромагнитных характеристик микропроводов, а также кинетических закономерностей зарождения и роста в них кристаллических фаз.

Третья глава посвящена результатам исследований процессов структурной релаксации и кристаллизации, протекающих в аморфном сплаве при термической обработке. Изучение релаксации и кристаллизации в микропроводе Co-Fe-Cr-Si-B при пропускании по нему постоянного электрического тока было проведено методами порошковой рентгеновской дифракции и атомно-зондовой томографии. Проведён детальный анализ эволюции структурно-фазового состояния при термической обработке аморфного микропровода.

В четвёртой главе представлены результаты исследования влияния структурно-фазовых изменений микропроводов на отклик магнитоимпеданса, магнитостатические свойства и константу магнитострикции. Продемонстрирована работоспособность ГМИ-сенсоров с использованием микропровода из сплава $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$, имеющего оптимизированное структурно-фазовое состояние.

В заключении приведены основные результаты и выводы диссертационного исследования.

Научная новизна результатов работы

Полученные автором результаты и положения, выносимые на защиту, обладают научной новизной. Из результатов диссертационной работы особый интерес, на наш взгляд, представляют следующие.

1. Впервые исследованы особенности термической обработки аморфного микропровода из сплава $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$ при помощи мониторинга его микроструктуры и электрического сопротивления в режиме реального времени. Показано, что эволюция структурно-фазового состояния при термообработке аморфного микропровода протекает в шесть стадий.

2. Установлено, что на первой стадии кристаллизации существенное влияние на процесс роста кристаллических фаз оказывают атомы хрома, которые вытесняются на границу кристаллитов и ограничивают их рост, что приводит к увеличению температуры кристаллизации.

3. Разработана методика контролируемого формирования кластерных структур при термической обработке постоянным током. Установлено, что кластерная структура сплава приводит к снижению поля анизотропии микропровода и к существенному увеличению значений магнитоимпеданса.

4. Продемонстрировано, что микропровод из сплава $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$ с оптимизированным структурно-фазовым состоянием может быть использован в качестве чувствительного элемента ГМИ-сенсора с низким уровнем шума и высокой температурной стабильностью.

Практическая значимость результатов работы

Практическая значимость результатов диссертационной работы обусловлена тем, что предложенный подход позволяет обеспечить формирование нового структурно-фазового состояния в аморфных сплавах, приводящего к повышению температурной стабильности микропроводов. Полученные микропровода системы Co-Fe-Cr-Si-B могут быть использованы в качестве чувствительного элемента при создании прототипов ГМИ-сенсоров с низким уровнем шума. Измеряемые с помощью таких сенсоров магнитные изображения позволяют определять локальные магнитные поля с чувствительностью порядка 10 нТл и пространственным разрешением порядка 1,3 мм.

Достоверность и обоснованность полученных результатов

Достоверность результатов, представленных в диссертации, основывается на использовании специализированных уникальных установок и передового аналитического оборудования для исследования структурно-фазового состояния вещества с применением взаимодополняющих

экспериментальных методов. Обоснованность полученных результатов подтверждается согласием с аттестованными методами исследования физических свойств материалов и с расчётными моделями, позволяющими установить механизмы зарождения и роста кристаллических фаз.

Рекомендации по использованию результатов диссертационной работы

Результаты работы могут быть использованы в организациях, занимающихся научными и прикладными исследованиями в области физики магнитных явлений и материаловедения, например, в ИОФ РАН, ИКИ РАН, ИЗМИРАН, ЦНИИХМ, НИТУ МИСИС, НИЯУ МИФИ, МИРЭА, ИК РАН, ИРЭ РАН.

Замечания по диссертационной работе

К диссертационной работе Козлова И.В. имеются замечания.

1. В работе утверждается, что изменение электрического сопротивления во время термообработки при температурах от 300 до 400 °С связано с образованием кластеров, состоящих из атомов хрома и металлоидов, но прямое экспериментальное подтверждение не приведено.

2. Сравнение данных, полученных с использованием аналитических методов исследования, с результатами изменения электрического сопротивления при резистивном нагреве микропровода позволило изучить процесс кристаллизации аморфных сплавов Co-Fe-Cr-Si-B. Однако в работе не обсуждается возможность применения данного комплексного подхода для исследования сплавов других систем.

3. Для исследуемой диагональной компоненты тензора импеданса $Z_{\varphi\varphi}$ в работе используется термин «индуктивная компонента магнитоимпеданса», который не является общепринятым и выглядит не очень удачным.

4. Для анализа влияния структурно-фазового состояния микропровода на эффект ГМИ измерялась зависимость компоненты импеданса $Z_{\varphi\varphi}$ от внешнего магнитного поля. В то же время, разработанный прототип ГМИ-

сенсора основан на использовании зависимости от поля недиагональной компоненты импеданса $Z_{\varphi z}$. Было бы целесообразно экспериментально продемонстрировать связь между измеренными зависимостями компоненты $Z_{\varphi\varphi}$ с чувствительностью к полю недиагональной компоненты импеданса $Z_{\varphi z}$.

Сделанные замечания не носят принципиального характера, не затрагивают основного содержания работы и не изменяют общей положительной оценки диссертационной работы.

Заключение по диссертационной работе

По материалам диссертационной работы опубликовано 6 статей в научных журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus. Полученные автором результаты докладывались и обсуждались на международных и всероссийских научных конференциях, и должная апробация результатов диссертации не вызывает сомнений.

Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации.

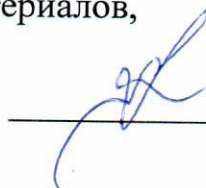
Основные научные результаты, положения, выносимые на защиту, и выводы диссертационной работы соответствуют паспорту специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

Диссертационная работа Козлова И.В. является законченной научно-квалификационной работой, посвящена актуальной теме, выполнена на высоком экспериментальном и теоретическом уровне, содержит ряд новых, важных в научном и практическом плане результатов, достоверность которых не вызывает сомнений. Работа соответствует требованиям Положения о порядке присуждения учёных степеней в Национальном исследовательском технологическом университете «МИСИС», а её автор, Козлов Илья Владимирович, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

Диссертационная работа была представлена автором и обсуждена на семинаре Института теоретической и прикладной электродинамики РАН 17 апреля 2025 г., протокол № 1.

Отзыв составили

Заведующий лабораторией
электрофизики новых функциональных материалов,
кандидат физ.-мат. наук

 С.С. Маклаков

Ведущий научный сотрудник лаборатории
электрофизики новых функциональных материалов,
доктор физ.-мат. наук

 Н.А. Бузников

Сведения о ведущей организации

Полное наименование: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук

Сокращенное наименование: ИТПЭ РАН

Почтовый адрес: 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 6

Телефон: +7 (495) 484-23-83

Электронная почта: itae@itae.ru

Сайт: <http://www.itae.ru>