

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ЭКСПЕРТНОЙ КОМИССИИ

по защите диссертации Козлова Ильи Владимировича на тему «Разработка методов формирования и контроля структурно-фазовых состояний аморфных микропроводов для применений в магнитных сенсорах на основе эффекта гигантского магнитоимпеданса», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния и состоявшейся в НИТУ МИСИС 17.06.2025 г.

Диссертация принята к защите Диссертационным советом НИТУ МИСИС 14.04.2025 г., протокол № 28.

Диссертация выполнена на кафедре цветных металлов и золота НИТУ МИСИС.

Научный руководитель Гудошников Сергей Александрович, к.ф.-м.н., доцент кафедры цветных металлов и золота НИТУ МИСИС.

Экспертная комиссия утверждена Диссертационным советом НИТУ МИСИС (протокол № 28 от 14.04.2025 г.) в составе:

- 1) Калошкин Сергей Дмитриевич, доктор физико-математических наук, профессор, директор института новых материалов и нанотехнологий НИТУ МИСИС, директор НИЦ композиционных материалов – председатель комиссии;
- 2) Панина Лариса Владимировна, доктор физико-математических наук, профессор кафедры технологии материалов электроники НИТУ МИСИС;
- 3) Ховайло Владимир Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры функциональных наносистем и высокотемпературных материалов НИТУ МИСИС;
- 4) Рогожкин Сергей Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики экстремальных состояний вещества (№60) Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ);
- 5) Фетисов Леонид Юрьевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры нанoeлектроники Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет» (РТУ МИРЭА), г. Москва.

В качестве ведущей организации утверждено Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук (ИТПЭ РАН), г. Москва.

Экспертная комиссия отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований показано, что прецизионная термическая обработка с одновременным контролем электрического сопротивления в реальном времени позволяет сформировать заданную структуру аморфных сплавов, обеспечивающую достижение оптимальных магнитных свойств. Для микропроводов из сплава $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$ продемонстрирована возможность формирования двух типов термически-индуцированных кластерных структур: низкотемпературного и высокотемпературного. Показано, что легирование сплавов хромом обеспечивает стабилизацию свойств микропроводов при формировании высокотемпературного типа кластерной структуры. Представленные образцы работоспособны для применения в качестве чувствительных элементов ГМИ-сенсора магнитных полей, при этом образцы с оптимизированным структурно-фазовым состоянием, имеющие высокотемпературные кластеры проявляют термическую устойчивость, имеют квазилинейную петлю магнитного гистерезиса в области нулевого поля и демонстрируют ГМИ-эффект от 300 до 375 %.

Ценность научной работы заключается в разработке методов оптимизации структурно-фазового состояния аморфных сплавов системы Co-Fe-Cr-Si-B, за счет этого повышается эксплуатационная стабильность ГМИ-сенсоров с чувствительным элементом на базе аморфного микропровода, такие сенсоры становятся значительно более конкурентоспособными из-за улучшенной чувствительности к слабым магнитным полям.

Теоретическая значимость исследования заключается в физическом обосновании наблюдаемых структурных изменений аморфных сплавов под действием прецизионной термической обработки с одновременным контролем электрического сопротивления. Особая роль в обосновании таких эффектов отводится образованию кластерных и нанокристаллических структур в аморфном сплаве.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что были разработаны: способ термической обработки аморфных сплавов и микропроводов системы Co-Fe-Cr-Si-B (ноу-хау НИТУ МИСИС No 08-366-2024 ОИС); устройство, обеспечивающее подвод к микропроводу электрического тока и включающее функцию преднатяжителя (ноу-хау НИТУ МИСИС No 07-366-2024 ОИС). Метод формирования и контроля оптимизированного структурно-фазового состояния в аморфных сплавах, заключающийся в создании условий для максимальной релаксации и формирования заданной кластерной структуры в сплаве, позволяет стабилизировать магнитные характеристики сенсоров при сохранении высокой чувствительности к слабым внешним магнитным полям. Изготовленные микропровода на базе аморфных микропроводов из сплавов Co-Fe-Cr-Si-B с высокотемпературной кластерной структурой

были использованы при создании прототипов ГМИ-сенсоров, что подтверждается актом о внедрении и сертификатом калибровки № 1/123-1015-24. ГМИ-сенсоры имеют следующие характеристики: низкий уровень шума порядка 35 пТл / $\sqrt{\text{Гц}}$, при измерении на частоте 1 Гц; чувствительность порядка 10 нТл и пространственное разрешение порядка 1,3 мм при определении локальных магнитных полей. Испытания ГМИ-сенсоров при измерениях вариаций D-компоненты магнитного поля планеты Земля продемонстрировали хорошее соответствие данных с полученными данными в магнитной обсерватории от кварцевого вариометра.

Достоверность научных результатов базируется на применении передового аналитического оборудования для исследования структурно-фазового состояния вещества при использовании взаимодополняющих друг друга экспериментальных методов, подтверждается большим объемом полученных экспериментальных данных и согласованностью полученных результатов с расчетными моделями, позволяющими установить механизмы зарождения и роста кристаллических фаз. Имеет место согласованность полученных результатов с результатами других научных групп, опубликованных в литературе по теме работы.

Личный вклад соискателя состоит в планировании и проведении лабораторных экспериментов, разработке методов по формированию кластерной и нанокристаллической структур в аморфных микропроводах, пробоподготовке и проведении микроструктурных исследований, обработке и интерпретации полученных данных, оформлении и подготовке докладов на научных конференциях, а также научных статей в высокорейтинговые научные журналы. При непосредственном участии автора проводилась разработка высокочувствительного магнитного ГМИ-сенсора на базе микропровода с оптимизированным структурно-фазовым состоянием.

Соискатель представил 7 печатных работ в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК РФ и базы Web of Science, Scopus.

Пункт 2.6 Положения присуждения ученой степени кандидата наук НИТУ МИСИС соискателем ученой степени **не нарушен**.

Диссертация Козлова Ильи Владимировича полностью соответствует критериям п.2 Положения о порядке присуждения ученых степеней в НИТУ МИСИС, так как в ней на основании выполненных автором исследований разработан научно-технологический подход к созданию оптимизированного атомного упорядочения в аморфных сплавах, что позволяет стабилизировать аморфную фазу микропровода за счет легирования и структурной релаксации Система при эксплуатационных условиях становится устойчивее, имеет высокие величины ГМИ-эффекта и связанного с ним комплекса электромагнитных

свойств, что является значимым для развития материаловедения и технологий обработки аморфных сплавов.

Экспертная комиссия приняла решение о возможности присуждения Козлову Илье Владимировичу ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния».

Результаты голосования: при проведении тайного голосования экспертная комиссия в количестве 5 человек, участвовавших в заседании, из 5 человек, входящих в состав комиссии, проголосовала: за 5, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель Экспертной комиссии



Калошкин Сергей Дмитриевич

17.06.2025