

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет»
«МИСИС»

ГУДОШНИКОВ Сергей Александрович

**УПРАВЛЕНИЕ СВОЙСТВАМИ АМОΡФНЫХ ФЕРРОМАГНИТНЫХ
МИКРОПРОВОДОВ НА ОСНОВЕ Co И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ
В СЕНСОРНЫХ СИСТЕМАХ**

СПЕЦИАЛЬНОСТЬ

1.3.8 Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ

на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

НАУЧНЫЙ КОНСУЛЬТАНТ

доктор физико-математических наук
Калошкин Сергей Дмитриевич

Москва – 2026

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационной работы

Аморфные ферромагнитные микропровода в стеклянной оболочке с полным диаметром до 40 мкм и диаметром металлического кора 10-30 мкм, полученные методом закалки из расплава Тейлора-Улитовского, представляют собой новый материал, перспективный для множества технических приложений. Уникальные электродинамические и магнитные свойства аморфных ферромагнитных микропроводов определяются их совершенной цилиндрической формой, предельно малым значением коэрцитивной силы, высокой намагниченностью насыщения и низкой плотностью различного рода дефектов структуры. Повышенный интерес к аморфным микропроводам связан с рядом наблюдаемых в них новых эффектов, таких как магнитная бистабильность (гигантский скачок Баркгаузена), гигантский магнитоимпеданс (ГМИ-эффект) и возможностью их использования в миниатюрных чувствительных элементах различных сенсоров.

На современном этапе в большинстве применений используются микропровода из сплавов на основе железа. Такие микропровода применяются при изготовлении поглощающих электромагнитных материалов, магнитных меток, миниатюрных импульсных трансформаторов и др. Одновременно с этим, для решения задач радиоэлектронной промышленности и приборостроения, появился запрос на микропровода из сплавов на основе кобальта с низкой магнитострикцией насыщения, $\lambda_s < 10^{-6}$. В настоящее время их применение в современной технике ограничивается рядом внутренних недостатков. Основные из них это сильная зависимость магнитных свойств от условий аморфизации, низкая повторяемость характеристик при изготовлении и температурно-временная нестабильность. Поэтому принципиально важными, требующими специальных исследований, являются вопросы получения аморфных ферромагнитных микропроводов из сплавов на основе кобальта с определенными свойствами, разработка новых экспериментальных методов изучения их физических свойств с учетом крайне малых (микронных) размеров, а также создание прототипов сенсоров различного назначения. Решение указанных проблемных вопросов во многом связано с выбором прецизионного состава кобальтовых сплавов, оптимизацией технологических режимов изготовления и управлением структурной релаксацией аморфных ферромагнитных микропроводов.

В данной работе, с учетом современных требований к миниатюризации, повышению чувствительности и увеличению надежности электронных устройств,

предложена новая концепция, направленная на получение аморфных ферромагнитных микропроводов системы Co-Fe-Cr-Si-B с определенными электрическими, магнитными и температурными характеристиками и создания на их основе прототипов температурных, стресс-чувствительных и магнитных сенсоров для новых технических приложений. Диссертационная работа обобщает результаты исследований аморфных ферромагнитных микропроводов в стеклянной оболочке, изготовленных методом Улитовского–Тейлора, выполненные автором за период с 2001 по 2026 г., в том числе в рамках следующих проектов:

– Соглашение № 14.587.21.0010, проект: «Разработка метода малоуглового вращения вектора намагниченности для исследования свойств ферромагнитных микропроводов». Руководитель (2014 г).

– СЧ НИР контракта № 1/2015 шифр «Номинал-ИМ» «Исследование и оптимизация характеристик аморфных ферромагнитных микропроводов и тонких пленок». Руководитель (2015 г).

– Государственный контракт №209/1022-018 «Разработка мобильного диагностического комплекса определения и прогнозирования состояния исследуемых объектов и сооружений». Ответственный исполнитель (2015г).

– Грант К2-2015-018. «Разработка и применение аморфных ферромагнитных микропроводов для создания новых сенсоров, композиционных материалов и устройств на их основе». Ответственный исполнитель (2015-2018 гг).

– Проект №3.7477.2017/ВУ «Организация проведения научных исследований» в рамках Государственного задания в сфере научной деятельности, тема: «Разработка интеллектуальных композитных материалов и высокочувствительных устройств на основе аморфных ферромагнитных микропроводов и лент». Руководитель (2017–2019 гг).

– Грант РФФИ 20-19-00607 «Инжиниринг структурных и электромагнитных свойств аморфных ферромагнитных микропроводников на основе кобальта» Руководитель (2020-2022 гг).

– Программа стратегического академического лидерства «Приоритет-2030», НИР № 1192, проект № -СП1-ПО1 «Высокочувствительная сканирующая ГМИ магнитометрия для неразрушающего контроля структурных и коррозионных дефектов на примере изделий из нержавеющей сталей объектов атомной энергетики». Руководитель (2023-2025 гг).

Целью диссертационной работы является разработка концепции управления функциональными свойствами кобальтовых аморфных ферромагнитных микропроводов с

околонулевой магнитострикцией и принципов построения на их основе температурных, стресс-чувствительных и магнитных сенсоров научного и технического назначения.

Для достижения цели поставлены следующие задачи

1. Оптимизация технологических режимов литья микропроводов методом Тейлора-Улитовского и получение опытных серий покрытых стеклянной оболочкой аморфных ферромагнитных микропроводов системы $\text{Co}_{73-x}\text{Fe}_4\text{Cr}_x\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$ с различным содержанием Cr ($x=0, 2, 4, 6, 8$).
2. Разработка метода управления функциональными свойствами аморфных ферромагнитных микропроводов за счет контролируемой термообработки с помощью Джоулева нагрева.
3. Исследование терморезистивных свойств микропроводов системы $\text{Co}_{73-x}\text{Fe}_4\text{Cr}_x\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$, находящихся в аморфном и кристаллизованном состоянии.
4. Разработка новых экспериментальных методов изучения магнитных свойств микропроводов, включающих измерение квазистатических и динамических петель гистерезиса, константы магнитострикции, внутренних закалочных напряжений, магнитоимпедансных характеристик, распределения магнитных полей рассеяния.
5. Комплексные исследования свойств изготовленных микропроводов в исходном состоянии и после управляемого Джоулева нагрева.
6. Исследование возможности создания температурных, стресс-чувствительных и магнитоимпедансных датчиков на основе микропроводов с определенными свойствами.
7. Изготовление миниатюрного магнитоимпедансного датчика и разработка экспериментального метода сканирующей ГМИ магнитометрии для изучения локальных магнитных полей слабомагнитных объектов при комнатной температуре.

Научная новизна

1. Установлено, что микролегирование хромом вносит определяющий вклад в терморезистивные свойства микропроводов системы $\text{Co}_{73-x}\text{Fe}_4\text{Cr}_x\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$ ($x = 0, 2, 4, 6$ ат.%) и проявляется в аномальном характере температурной зависимости электрического сопротивления микропроводов в аморфном состоянии и в значительном изменении температурного коэффициента сопротивления микропроводов после их кристаллизации.
2. Предложена и запатентована новая методика управляемого Джоулева нагрева с непрерывным контролем электрического сопротивления, позволяющая получать аморфные ферромагнитные микропровода с определенными электрическими, структурными и магнитными свойствами.

3. Разработаны и запатентованы новые экспериментальные методы изучения основных магнитных характеристик аморфных ферромагнитных микропроводов, включающие метод малоуглового вращения вектора намагниченности, определения недиагональной и циркулярной диагональной компоненты магнитоимпедансного отклика, экспериментального нахождения распределения намагниченности микропровода при воздействии продольных и циркулярных магнитных полей.

4. Впервые получен набор комплексных характеристик образцов аморфных микропроводов состава $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$, критически важных при их использовании в качестве чувствительных элементов стресс-чувствительных и магнитных сенсоров.

5. Определены терморезистивные и магнитные свойства аморфных и кристаллизованных микропроводов состава $\text{Co}_{73}\text{Fe}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$, используемых в качестве миниатюрных нагревательных элементов и температурных малобазных датчиков сопротивлений.

6. Разработаны новые методы сканирующей СКВИД магнитометрии и ГМИ магнитометрии для изучения локальных магнитных полей рассеяния слабомагнитных объектов; впервые получены изображения замыкающих магнитных доменов в микропроводах различных составов и диаметров.

Научная и практическая значимость работы

Исследованные в работе аморфные ферромагнитные микропровода на основе Co являются перспективным новым материалом для создания миниатюрных сенсоров. Реализованный в диссертационной работе комплексный подход к получению аморфных ферромагнитных микропроводов с определенными свойствами и изучению их физических свойств расширяет представления о взаимосвязи электрических и магнитных свойств аморфных ферромагнитных материалов с их составом, фазовым состоянием, технологией изготовления и термообработки. Предложенный и защищенный патентами способ термической обработки с непрерывным мониторингом электрического сопротивления позволяет управлять режимами отжига микропроводов в аморфном и кристаллизованном состояниях.

Результаты проведенных исследований позволили сформулировать ряд физико-технических принципов построения и функционирования миниатюрных высокочувствительных датчиков. На основе полученных в ходе исследования микропроводов предложены и защищены патентами конструктивные особенности и способы изготовления температурных датчиков сопротивления, стресс-чувствительных и магнито-чувствительных (ГМИ) датчиков. Показана возможность их применений для

контроля тепловых свойств композитных материалов, в задачах магнитной дефектоскопии и системах контроля механических деформаций.

Практическая значимость подтверждена патентами и актами о технологическом опробовании и внедрении полученных результатов.

Положения, выносимые на защиту

1. Закономерности влияния микролегирования хромом (Cr) и технологических режимов изготовления на физические свойства покрытых стеклянной оболочкой аморфных ферромагнитных микропроводов на основе Co, полученных методом Тейлора–Улитовского.

2. Способ контролируемого Джоулева нагрева с непрерывной регистрацией электрического сопротивления, позволяющий управлять структурной релаксацией аморфных ферромагнитных микропроводов и целенаправленно модифицировать их функциональные свойства.

3. Основные закономерности поведения терморезистивных свойств микропроводов составов $\text{Co}_{73-x}\text{Fe}_4\text{Cr}_x\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$ в аморфном и кристаллизованном состояниях. Экспериментальное подтверждение наличия аномального температурного минимума электрического сопротивления в диапазоне температур от 200 °С до 300 °С в микропроводах содержащих Cr и максимальных значений температурного коэффициента сопротивления в кристаллизованных микропроводах без добавки Cr.

4. Специализированный комплекс экспериментальных установок и методов контроля магнитных свойств микропроводов для измерения набора характеристик, используемых при проектировании сенсорных систем различного назначения.

5. Методика определения циркулярной диагональной и недиагональной компонент тензора магнитоимпеданса и экспериментальные магнитоимпедансные характеристики кобальтовых микропроводов с циркулярной и геликоидальной анизотропией в зависимости от условий термообработки, возбуждения высокочастотным током, воздействия постоянного тока, механических напряжений и температуры.

6. Экспериментальное подтверждение возможности создания прототипов температурных, стресс-чувствительных и магнитоимпедансных датчиков, в которых, в качестве чувствительных элементов, используются разработанные микропровода с определенными свойствами.

7. Экспериментальные методы сканирующей СКВИД магнитометрии и ГМИ магнитометрии для изучения локальных магнитных полей рассеяния слабомагнитных объектов. Основные закономерности поведения замыкающих магнитных доменов на

концах отрезков аморфных ферромагнитных микропроводов в зависимости от состава, диаметров и приложенных внешних магнитных полей.

Достоверность научных результатов

Обеспечена комплексным подходом и использованием большого количества различных и взаимодополняющих экспериментальных методов, включая порошковую рентгеновскую дифрактометрию, дифференциальную сканирующую калориметрию; просвечивающую и сканирующую электронную и оптическую микроскопии, магнитные измерения методами индукционной и вибрационной магнитометрии, сканирующими методами СКВИД и ГМИ магнитометрии, обработкой полученных результатов с использованием специализированного программного обеспечения; хорошей повторяемостью и воспроизводимостью экспериментальных и расчётных результатов, а также сопоставимостью полученных результатов с экспериментальными и теоретическими данными других авторов по тематике, близкой к теме диссертационного исследования, известными из научных публикаций и материалов международных и российских конференций.

Личный вклад автора

Представленная работа является обобщением проведенных исследований, основная часть которых выполнена либо лично автором, либо при его руководстве студентами и аспирантами. Вклад автора состоит в постановке цели и задач исследования, выборе путей их решения, обработке данных, анализе результатов, обобщении полученных закономерностей, формулировании выводов, подготовке статей в высокорейтинговых изданиях, документов по защите результатов интеллектуальной деятельности, технической документации. Все экспериментальные результаты, приведенные в диссертации, получены самим автором или при его непосредственном участии. В коллективных публикациях автору принадлежат защищаемые в диссертации положения и выводы.

Апробация работы.

Основные результаты работы были представлены и обсуждены более чем на 70 регулярных международных и российских научных конференциях и симпозиумах, таких как: International Conference on Superconductivity and Magnetism- (ICSM), International Advances in Applied Physics & Materials Science Congress & Exhibition (APMAS), Euro-Asian Symposium “ Trends in Magnetism“ (EASTMAG), Joint European Magnetic Symposia (JEMS), International Conference on Sensor Device Technologies and Applications, International Workshop on Magnetic Wires (IWMW), International Symposium on Metastable, Amorphous and Nanostructured Materials (ISMANAM), Moscow International Symposium on Magnetism (MISM), Международная конференция «Новое в магнетизме и магнитных

материалах» (НМММ), Международная конференция «Новые материалы: перспективные технологии получения материалов и методы их исследования» (НМ), Российский симпозиум «Современная химическая физика» (СХФ), Российская конференция «Магнетизм на Земле и в Космосе» (Пушковские чтения).

Реализация результатов работы.

Работа носит фундаментально-прикладной характер. Ее особенностью является комплексный подход, включающий изготовление методом Тейлора–Улитовского аморфных ферромагнитных микропроводов состава Co-Fe-Cr-Si-B, изучение их физических свойств и создание на основе микропроводов миниатюрных сенсорных устройств. Большинство разработанных методов контроля характеристик аморфных ферромагнитных микропроводов конструкции разработанных сенсоров защищены РИД. Разработанные измерительные системы были изготовлены в виде лабораторных макетов в ООО «Магнитные и криоэлектронные системы» (г. Москва) и использовались в ходе разработки и изготовлении чувствительных элементов и сенсоров на основе кобальтовых микропроводов. Результаты, полученные в работе, служат подтверждением практических выводов о возможности создания на основе изготовленных микропроводов новых температурных, стресс-чувствительных и магнитных сенсоров для научных и технических приложений.

Публикации.

Основные результаты диссертации опубликованы в 2 главах в книгах, 41 статье, 14 патентах РФ, 2 международных патентах, 3 НОУ ХАУ и 1 программы для ЭВМ.

Содержание диссертации

Соответствует направлениям исследований Паспорта научной специальности 1.3.8.«Физика конденсированного состояния» по пп:

1. Теоретическое и экспериментальное изучение физической природы и свойств неорганических и органических соединений как в кристаллическом (моно- и поликристаллы), так и в аморфном состоянии, в том числе композитов и гетероструктур, в зависимости от их химического, изотопного состава, температуры и давления.
6. Разработка экспериментальных методов изучения физических свойств и создание физических основ промышленной технологии получения материалов с определенными свойствами.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, общего заключения и выводов, приложения, список использованных источников из 172 наименований. Работа изложена на 267 страницах, содержит 103 рисунка, 17 таблиц, 3 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обосновывается актуальность работы, формулируются цели и задачи, отмечаются ее новизна и практическая значимость, приводятся положения, выносимые на защиту, даются сведения об апробации работы, кратко излагается структура и содержание работы.

В первой главе дается общее описание покрытых стеклянной оболочкой аморфных ферромагнитных микропроводов и технологии их изготовления методом Тейлора- Улитовского. Здесь же представлены результаты первоначальных исследований микропроводов разного состава и с различным отношением диаметра металлической жилы к стеклянной оболочке, изготовленных в разных технологических лабораториях. Рассмотрены особенности магнитных свойств кобальтовых микропроводов при воздействии растягивающих механических напряжений. Приведены результаты измерений магнитных полей рассеяния микропроводов с помощью сканирующего СКВИД магнитометра. Продемонстрирована возможность использования микропроводов в качестве магнитных меток и концентраторов магнитного потока.

В параграфе 1.1 приведено общее описание объекта исследований – покрытых стеклянной оболочкой аморфных ферромагнитных микропроводов на основе Со. Такие микропровода интересны как с точки зрения общей теории магнетизма [1], поскольку они дают важный пример квазиодномерных магнетиков, так и для ряда важных технических приложений [2]. Здесь также кратко рассмотрены особенности технологии изготовления покрытых стеклянной оболочкой аморфных ферромагнитных микропроводов методом Тейлора – Улитовского [3]. Главная особенность получения литых остеклованных микропроводов состоит в том, что металл плавят во взвешенном состоянии в вакуумной камере. Плавильный индуктор создает магнитное поле и обеспечивает устойчивое положение навески металла, которая под действием высокочастотного магнитного поля расплавляется и превращается в шаровидную каплю диаметром 8-10 мм. Жидкая капля металла удерживается во взвешенном состоянии тоже благодаря наличию магнитного поля индуктора. Расплавленный металл размягчает стекло трубки, капля обволакивается стеклом со всех сторон и предохраняет себя от излишнего окисления кислородом воздуха. При вытяжении стеклянной трубки из нее образуется стеклянный микрокапилляр, заполненный металлом капли. После выхода из зоны нагрева микрокапилляр с металлом проходит через струю воды, в которой он охлаждается от ~ 1000 °С до комнатной температуры менее чем за одну сотую долю секунды, после чего сформировавшийся микропровод наматывается на приемную катушку.

Благодаря такой большой скорости охлаждения (более 10^6 °С/сек) упрочняется

поверхностный слой микропровода и в нем создается полезный градиент механических напряжений. Внутренняя металлическая жила находится под напряжением растяжения, а внешняя стеклянная оболочка — под действием напряжения сжатия. Эта особенность производства микропровода в стеклянной изоляции способствует повышению его прочности и формированию особых магнитомягких свойств. Основными параметрами изготовленного микропровода являются его внешний и внутренний диаметры, которые регулируются температурой капли расплава, скоростью подачи стеклянной трубки, скоростью вращения приемной катушки. При этом важно подчеркнуть, что высокая скорость охлаждения позволяет получать микропровода с металлической жилой находящейся в аморфном состоянии.

В параграфе 1.2 обсуждаются магнитные свойства аморфных ферромагнитных микропроводов с диаметрами ферромагнитной жилы $D = 5 - 30$ мкм и стеклянной оболочкой толщиной $5 - 10$ мкм, в составе ферромагнитной жилы которых преобладает железо. Такие микропровода характеризуются положительной магнитострикцией и обладают бистабильной (прямоугольной) петлей гистерезиса. Явление магнитной бистабильности интерпретируется как перемагничивание в одном большом домене и перспективно для применений в ряде технических приложений. Процесс перемагничивания начинается вблизи одного из концов микропровода [4]. Под действием приложенного магнитного поля на концах микропровода формируются обратные магнитные домены. При некотором критическом значении магнитного поля один из обратных доменов отрывается и распространяется по всей длине микропровода. Движение доменной стенки может регистрироваться с помощью высокочувствительных миниатюрных приемных катушек, навитых на микропровод. На рисунке 1 показан сигнал

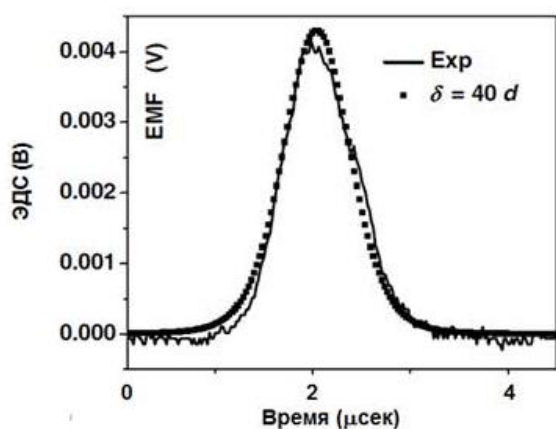


Рисунок 1. Сигнал ЭДС наводимый в приемной катушке при движении доменной стенки (сплошная линия) и его модельная аппроксимация.

ЭДС регистрируемый с помощью приемных катушек и его модельная аппроксимация, которые позволили получить оценку продольной компоненты намагниченности микропровода ($\langle M_z \rangle \sim 1180$ Гс) и характерный размер движущейся доменной стенки ((от 0.5 мм до 1.0 мм в зависимости от величины приложенного магнитного поля).

Для набора исследованных микропроводов состава $\text{Fe}_{74}\text{Si}_{11}\text{B}_{13}\text{C}_2$ было установлено, что продольная компонента

намагниченности оказалась близкой к намагниченности насыщения. Это означает, что в средней части микропровода в основном намагничены однородно вдоль оси, а существование внешней поперечно намагниченной магнитной оболочки, маловероятно. Найденные характерные размеры движущихся доменных стенок позволили определить, что критическая длина микропровода ниже которой эффект бистабильности не проявляется, составляет ~ 3 мм.

При перемагничивании микропровода на основе железа, движущаяся доменная стенка излучает короткий по времени импульс, который можно обнаружить и на некотором расстоянии от микропровода. Данный подход применяется в системах электромагнитного обнаружения, в которых бистабильные микропровода используются в качестве магнитных меток. Исследование динамики переключений намагниченности отрезков железных микропроводов длиной 30 мм показали возможность регистрации их сигналов перемагничивания на расстояниях до 20 см с отношением сигнал/шум более 2.

В параграфе 1.3 приведены результаты экспериментальных исследований магнитных свойств кобальтовых микропроводов в стеклянной оболочке изготовленных в разных

технологических лабораториях (ф. ТАМАГ, Испания, ИМЕТ РАН, Россия).

Измерения динамических петель гистерезиса микропроводов с диаметрами металлической жилы от 8 мкм до 14 мкм (ф. ТАМАГ, Испания) показали, что по магнитным свойствам эти микропровода можно разделить на три различные группы. Микропровода первой группы характеризуются петлями гистерезиса с очень малой остаточной намагниченностью и почти линейной зависимостью намагниченности от приложенного магнитного поля (рисунок 2.а). У микропроводов второй группы петли гистерезиса имели гистерезисный участок с конечной остаточной намагниченностью (см. рисунок 2.б).

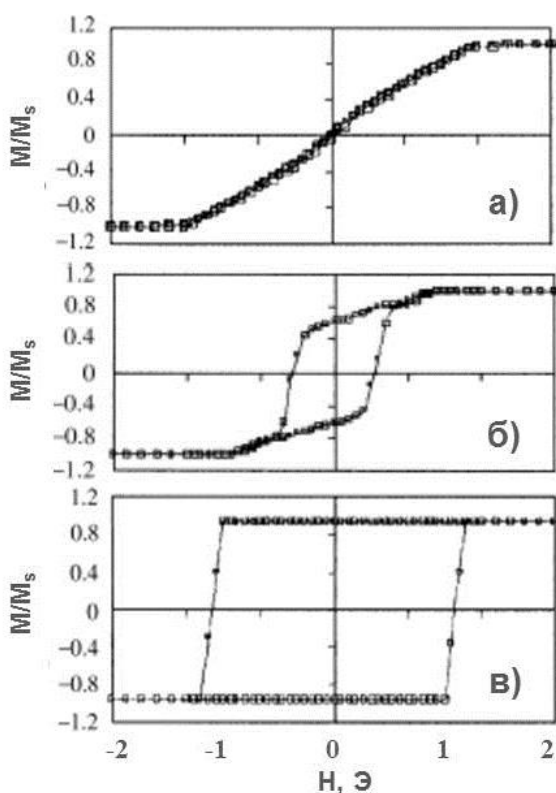


Рисунок 2. Характерные гистерезисные петли микропроводов на основе Со:
а) микропровода первой группы;
б) микропровода второй группы;
в) микропровода третьей группы

Микропровода третьей группы (рисунок 3.в) демонстрировали бистабильное поведение, при котором петли гистерезиса имели прямоугольную форму.

Указанные гистерезисные свойства были качественно объяснены исходя из предположения, что микропровода первой группы характеризуются отрицательной константой магнитострикции, $\lambda_s < 0$, а их ось легкой анизотропии везде имеет циркулярное направление. Для объяснения гистерезисных свойств микропроводов второй группы было высказано предположение, что их коэффициент магнитострикции может зависеть от радиального направления и может изменить знак с отрицательного на положительный в некоторой внутренней точке $r = r_c$ на радиусе микропровода. В этом случае микропровода второй группы будут иметь продольно намагниченный внутренний кор радиусом r_c , формирующий гистерезисную область петли и циркулярно намагниченную внешнюю оболочку. Для микропроводов третьей группы константа магнитострикции положительна, $\lambda_s > 0$, а легкая ось параллельна оси микропровода.

В отличие от микропроводов рассмотренных выше, микропровода изготовленные в ИМЕТ РАН, имели существенно больший радиус металлической жилы ($r_m = 27.5$ мкм). Они демонстрировали гистерезисные петли (характерные для микропроводов второй группы), свидетельствующие о наличии центрального продольно намагниченного кора и циркулярной магнитной оболочки микропровода. Особенности такого магнитного поведения были увязаны со значительным увеличением радиуса металлической жилы и сложным распределением внутренних закалочных напряжений вдоль радиуса микропровода.

Таким образом, представленные выше данные, а также результаты других исследовательских групп, указывают на сложную зависимость магнитных характеристик микропроводов от технологических параметров изготовления, состава металлической жилы и ее соотношения с диаметром стеклянной оболочки. Наиболее перспективными с точки зрения их применений в сенсорных приложениях являются микропровода с квазилинейной петлей гистерезиса и малой остаточной намагниченностью (первая группа микропроводов). К основным магнитным параметрам таких микропроводов следует отнести намагниченность насыщения M_s , константу магнитострикции λ_s и величину остаточных закалочных напряжений $\Delta\sigma$.

В параграфе 1.4 приведены результаты исследований доменной структуры отрезков аморфных ферромагнитных микропроводов, которая может быть важным критерием при использовании микропроводов в качестве чувствительных элементов в различных сенсорах. Внутренние магнитные заряды доменных стенок могут создавать магнитные поля рассеяния значительной величины, поэтому положение доменных стенок может быть

определено по распределению магнитных полей рассеяния над отрезком микропровода. Такие исследования впервые были проведены с помощью сканирующего СКВИД магнитометра, при температуре кипения жидкого азота, 77 К. На рисунке 3.а. схематически показано взаимное расположение малоразмерного высокотемпературного СКВИДа (эффективная площадь 3000 мкм^2) и образца микропровода в сканирующем СКВИД магнитометре. В ходе измерений происходит регистрация величины нормальной компоненты магнитного поля B_z в зависимости от координаты точки над образцом, когда образец перемещается относительно СКВИДа на расстоянии $h \sim 100 \text{ мкм}$.

На рисунке 3.б. приведено типичное магнитное изображение нормальной компоненты магнитных полей рассеяния над отрезком микропровода состава Co-Fe-Cr-Si-B диаметром 50 мкм и длиной $\sim 3 \text{ мм}$ при приложении внешнего продольного магнитного поля величиной 0,01 Э, параллельно оси микропровода (вдоль оси X). Видно, что вблизи его концов наблюдаются два экстремума магнитной индукции с максимальными значениями $\pm 25 \text{ мГс}$. При смене знака внешнего поля экстремумы менялись местами сохраняя свою амплитуду. После снятия внешнего магнитного поля, магнитное изображение соответствовало некоторой случайной остаточной магнитной структуре с максимальной амплитудой пиков менее $\pm 2 \text{ мГс}$. Полученные магнитные изображения позволили получить косвенную информацию о наличии магнитных доменов в микропроводе в исходном состоянии в нулевых магнитных полях и появлении замыкающих магнитных доменов при его намагничивании.

Способность отрезка микропровода легко переманичиваться в слабых магнитных полях была использована в ходе разработки концентратора магнитного потока для высокотемпературного СКВИДа.

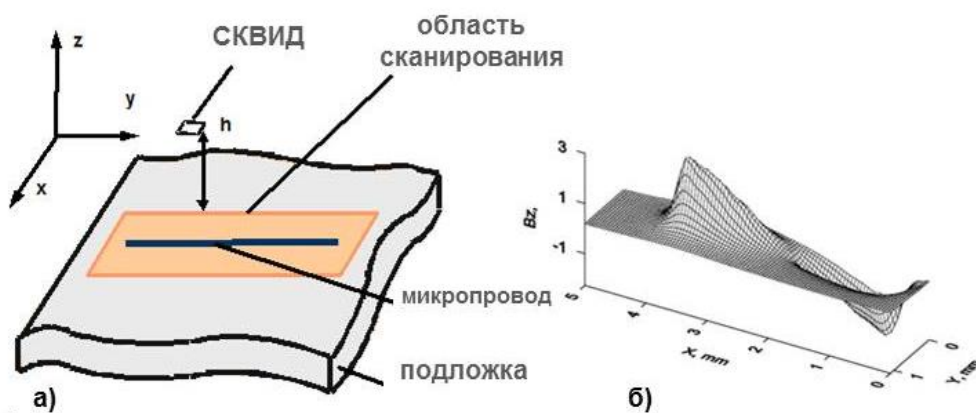


Рисунок 3. Метод сканирующей СКВИД магнитометрии для измерения магнитных полей рассеяния вблизи отрезка микропровода: а) схематическое изображение способа измерения; б) магнитное изображение образца микропровода диаметром 50 мкм и длиной 3 мм, измеренное на расстоянии $\sim 100 \text{ мкм}$: во внешнем слабом магнитном поле 0.01 Э вдоль оси X.

Сканирующие СКВИД магнитометры являются наиболее чувствительными приборами, позволяющими получать изображения магнитных полей вблизи поверхности образца. Недавно была предложена конструкция датчика, в которой высокотемпературный СКВИД объединен с магнитопроводом из мягнитомягкого материала. Датчик СКВИД-магнитопровод весьма привлекателен в случае измерения образцов при комнатной температуре. Предварительные результаты с использованием отрезка аморфного ферромагнитного микропровода состава CoFeCrSiB длиной 3 мм, продемонстрировали работоспособность такого комбинированного датчика. Однако, более важным обстоятельством явилось понимание того факта, что отрезок микропровода используемый в качестве магнитопровода, за счет магнитоимпедансного эффекта, сам может являться магниточувствительным элементом и измерять слабые локальные магнитные поля объектов при комнатной температуре.

Во второй главе приведены свойства микропроводов, которые исследовались в данной работе. Дано описание технологии изготовления аморфных ферромагнитных микропроводов в стеклянной оболочке на основе метода Тейлора – Улитовского в НИТУ МИСИС, особенности нового метода термообработки, применяемого для получения микропроводов с определенными свойствами. Представлены новые экспериментальные методы изучения свойств микропроводов, предложенные и развитые в данной работе, позволяющие наиболее полно характеризовать исследуемые образцы микропроводов до и после их термообработки.

В параграфе 2.1. отмечается, что объектом исследования являются покрытые стеклянной оболочкой аморфные ферромагнитные микропровода на основе прецизионных кобальтовых сплавов, изготовленные методом Тейлора-Улитовского. На первом этапе работы изучались аморфные ферромагнитные микропровода любезно предоставленные профессором Жуковым А.П. (Университет страны Басков, Испания). Затем изучались микропровода изготовленные в лаборатории Молоканова В.В. (ИМЕТ РАН). После отладки технологии и получения опытных серий микропроводов в НИТУ МИСИС, исследования проводились уже на образцах кобальтовых микропроводов собственного производства.

В параграфе 2.2. приведено описание технологических особенностей литья микропроводов методом Тейлора – Улитовского на установке ITMF-3 «капельным методом». В процессе литья микропроводов основными регулируемыми технологическими параметрами являются: мощность индуктора, температура капли расплава, скорость подачи стеклянной трубки, скорость смотки и погонное сопротивление микропровода. Основными «выходными» параметрами изготовленных микропроводов

являются состав металлической жилы, ее диаметр d и диаметр стеклянной оболочки D . Изучение физических свойств микропроводов является самостоятельной научно-технической задачей.

К особенностям данного метода следует отнести нестационарность процесса получения микропровода, которая связана с непрерывным уменьшением количества металла в капле, изменением температуры и положения капли в индукторе в процессе литья. Вследствие этого может наблюдаться некоторый уход геометрических параметров и свойств получаемого микропровода.

В параграфе 2.3. рассмотрены новые методы исследования свойств микропроводов, разработанные и примененные в рамках данной работы. Из-за малости диаметров микропроводов, и, как следствие, малости исследуемого количества магнитного вещества, изучение их геометрических, тепловых, электрических и магнитных свойств требует использования специализированного или адаптированного под измерения микропроводов оборудования. Ниже приведены особенности экспериментальных установок и методов, которые были специально созданы для измерений свойств микропроводов в данной работе.

Для проведения магнитных измерений при комнатной температуре применялись индукционный и вибрационный методы регистрации петель гистерезиса микропровода, взаимно дополняющие друг друга.

Дополнительная термообработка образцов микропроводов проводилась с использованием специализированной автоматизированной системы отжига и контроля сопротивления, разработанной в ходе данного исследования. В основе метода – прецизионная термическая обработка постоянным током (Джоулев нагрев) с программным управлением режимов нагрева и измерительная система на основе моста Уитстона с контролем в реальном времени электрических параметров микропровода. Для обработки задавались значения приложенной мощности постоянного тока, так мощность при нагреве порядка 2,3 Вт соответствует точке начала объемной кристаллизации образца, а мощность порядка 4,5 Вт соответствует полностью кристаллическому состоянию.

Таким образом, на технологическом этапе работы, получение микропроводов с определенными свойствами достигалось за счет состава металлической жилы, выбора технологических режимов изготовления и дополнительной термообработки, позволяющей контролируемо управлять структурной релаксацией микропровода.

Для установления закономерностей изменения структурно-фазового состояния микропровода при температурных воздействиях и дальнейшего выбора оптимальных режимов термической обработки, использовался метод порошковой рентгеновской

дифракции на источнике синхротронного излучения «КИСИ-Курчатов». Особенность предложенного метода заключалась в том, что проведение качественных рентгеноструктурных измерений выполнялось на одиночном, длиной несколько миллиметров отрезке, микропровода во время его *in situ* нагрева. Измерения проводились в геометрии Дебая – Шеррера, на просвет. Для измерения дифракционных картин использовалось монохроматическое излучение с длиной волны $\lambda = 0,74 \text{ \AA}$ и $0,79 \text{ \AA}$.

Для экспериментального определения константы магнитострикции и остаточных закалочных напряжений использовался модернизированный метод малоуглового вращения вектора намагниченности. В отличие от обычного, в предлагаемом методе используется модельное выражение для сигнала ЭДС удвоенной частоты, наводимого в измерительной катушке при осцилляции вектора намагниченности M_s относительно оси микропровода на малый угол θ под действием переменного тока I частотой f и амплитудой I_0 . При этом, в ходе измерений, сигнал ЭДС может регистрироваться для произвольных значений приложенного продольного магнитного поля и внешних растягивающих напряжений $\sigma_{вн}$.

Измерения магнитоимпедансных характеристик микропроводов проводились на фиксированной частоте возбуждения 4.0 МГц. В ходе исследований измерялись циркулярная диагональная и недиагональная компоненты магнитоимпедансного отклика микропровода. При этом, измерение циркулярной диагональной компоненты тензора импеданса, благодаря бесконтактному способу ее регистрации, позволяло оценить степень неоднородности данной компоненты по длине образца микропровода (длина $\sim 10 - 12 \text{ см}$) и контролировать изменения состояния микропровода после проведения его термообработки. При измерении недиагональной компоненты из длинных образцов микропровода вырезались образцы длиной 8-10 мм, которые для регистрации сигнала распаивались на специальных платах с приемной катушкой.

Методы сканирующей магнитометрии были использованы для регистрации магнитных полей рассеяния вблизи отрезков аморфных ферромагнитных и кристаллизованных микропроводов. Первые исследования микропроводов проводились на сканирующем СКВИД магнитометре при температуре кипения жидкого азота. Затем, после разработки и изготовления миниатюрных магнитоимпедансных датчиков, данные исследования были продолжены на сканирующем ГМИ магнитометре при комнатной температуре, что позволило провести детальные исследования распределения намагниченности микропровода при воздействии продольных и циркулярных магнитных полей.

В третьей главе приводятся результаты исследований изготовленных в НИТУ МИСИС серий аморфных микропроводов состава Fe-Co-Cr-Si-B в стеклянной оболочке. Варьируя состав, режимы изготовления и дополнительную термообработку методом контролируемого Джоулева нагрева были получены микропровода с определенными электрическими и магнитными свойствами. Проведение комплексных исследований изготовленных микропроводов, включающих вибрационную магнитометрию, индукционный метод, метод малоуглового вращения вектора намагниченности, измерения ГМИ характеристик и метод сканирующей ГМИ магнитометрии, позволило наиболее полно охарактеризовать свойства микропроводов, что важно при их дальнейшем практическом использовании.

В параграфе 3.1. рассмотрены особенности изготовления аморфных ферромагнитных микропроводов состава Fe-Co-Cr-Si-B на установке ITMF-3 в НИТУ МИСИС, приведены их магнитные, тепловые и электрические свойства.

Составы сплавов для изготовления микропроводов выбирались на основе формулы $\text{Co}_{73-x}\text{Fe}_4\text{Cr}_x\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$ путем замещения части Co на Cr ($x = 0 - 8$ % ат.), при постоянной доле содержания аморфизаторов Si и B. В процессе литья были проведены серии экспериментов по получению микропроводов при различных технологических режимах, отличающихся мощностью индуктора, температурой капли расплава, скоростью подачи стеклянной трубки и скоростью смотки микропровода. Контрольным параметром при литье микропровода являлось погонное сопротивление. После отработки режимов были отлиты наборы серий микропроводов указанных выше составов. В каждой серии изготовленных микропроводов содержалось от 500 до 1000 отрезков длиной ~ 13 см.

Контроль характеристик микропроводов с различным содержанием Cr после их изготовления (в исходном состоянии) проводился по геометрическим размерам, электрическому сопротивлению и электромагнитным свойствам. Рентгеноструктурный анализ показал наличие аморфной структуры во всех образцах. Сокращенные названия и основные параметры серий микропроводов различным содержанием Cr приведены в Таблице 1.

На рисунке 4 приведены динамические петли образцов микропроводов разных составов. Из представленных данных следует, что одни серии микропроводов характеризуются квазилинейными петлями гистерезиса (Cr0, Cr2, Cr4), тогда как для других серий (Cr6, Cr8) характерны бистабильные петли. Магнитоимпедансные исследования показали, что в исходном состоянии максимальный магнитоимпедансный отклик, выше 100 %, наблюдался только у микропроводов Cr4 с содержанием хрома 4%.

Таблица 1. Параметры серий микропроводов с различным содержанием Cr.

Образец	Состав	Диаметр жилы d, μm	Диаметр полный D, μm	Погонное сопротивление, Ом/м	Поле анизотропии, Э	Амплитуда ГМИ отклика, $Z_{\text{ГМИ}}$, %
Cr0	$\text{Co}_{73}\text{Fe}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$	16,8	31,6	5860	22	10
Cr2	$\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{Cr}_2\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$	18,9	30,7	4280	8	70
Cr4	$\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$	18,2	34,4	4340	5,5	120
Cr6	$\text{Co}_{67}\text{Fe}_4\text{Cr}_6\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$	19,5	28,4	4230	(-)1,8	-
Cr8	$\text{Co}_{65}\text{Fe}_4\text{Cr}_8\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$	17,2	29,7	5480	(-)2,4	-

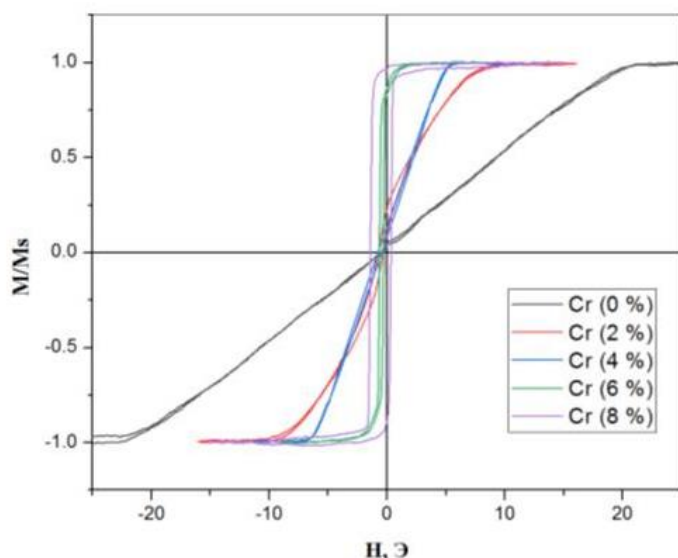


Рисунок 4. Динамические петли гистерезиса микропроводов на основе Co с содержанием Cr (0%, 2%, 4%, 6%, 8% ат).

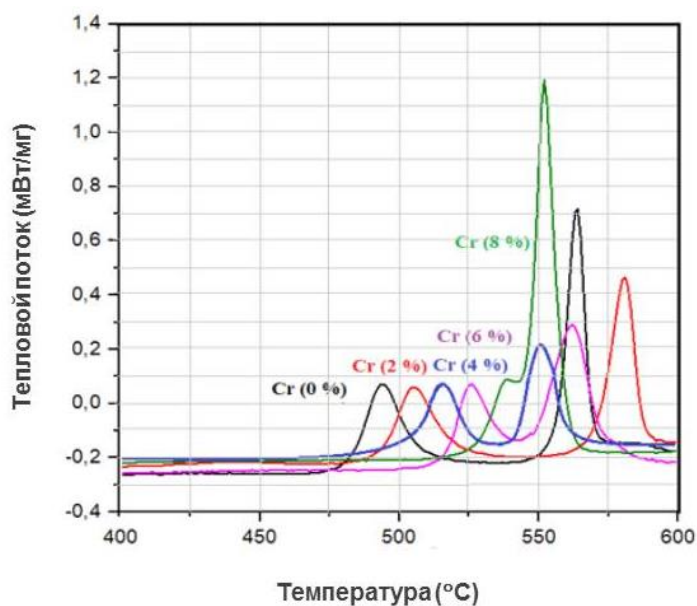


Рисунок 5. ДСК кривые микропроводов на основе Co с содержанием Cr (0%, 2%, 4%, 6%, 8% ат). Увеличение количества Cr повышает температуру начала кристаллизации T_c сплава на 48°C .

Исследование процессов кристаллизации изготовленных серий микропроводов проводилось методами ДСК анализа. Все образцы кристаллизовались в две стадии с двумя четко выраженными экзотермическими пиками в интервале температур $480\text{--}600^\circ\text{C}$. При этом, увеличение количества хрома (с 0% до 8 ат.%) повышало температуру начала первой стадии кристаллизации T_c сплава на 48°C (рисунок 5).

Изучение температурных зависимостей сопротивления R микропроводов в интервале температур $25^\circ\text{C} - 650^\circ\text{C}$ при непрерывном Джоулевым нагреве показало хорошую корреляцию ДСК кривых и температурных зависимостей сопротивлений. При этом, в области температур ниже начала кристаллизации, в сериях микропроводов с разным содержанием Cr температурные зависимости электросопротивления имели ряд существенных отличий.

При анализе изменения электросопротивления в процессе термоциклирования (рисунок 6), длительности нагрева, выдержки и охлаждения образцов микропроводов составляли по 20 мин. Нагрев осуществлялся прямым пропусканием электрического тока через микропровод с помощью автоматизированной системы отжига и контроля сопротивления, рассмотренной в разделе 2.3. В процессе выдержки подводимая к образцу микропровода мощность, а значит, и температура поддерживалась постоянной. Оказалось, что в аморфном сплаве без хрома (образец Cr0) заметного изменения r после отжигов до 410 °С практически не происходит (сначала незначительно понижается, затем повышается в пределах 0,1 %). В аморфных сплавах содержащих 2 ат.% хрома и более (образцы Cr2 – Cr6) электросопротивление заметно увеличивается после нагрева свыше 160 °С. В условиях эксперимента это увеличение носит необратимый характер. Гистерезис кривой зависимости $r(T)$ появляется из-за протекания релаксационных процессов, которые приводят к увеличению остаточного электросопротивления при комнатной температуре по сравнению с исходным состоянием литого микропровода. Таким образом, данные об изменении относительного электросопротивления в процессе термоциклирования, приведенные на рисунке 6 показывают, что увеличение содержания хрома в сплавах $\text{Co}_{73-x}\text{Fe}_4\text{Cr}_x\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$, когда часть атомов основного металла кобальта замещается атомами хрома, сопровождается увеличением относительного сопротивления и снижением значения температурного коэффициента сопротивления (ТКС) в интервале температур 20°С– 200°С.

В параграфе 3.2 представлены результаты исследований свойств аморфных ферромагнитных микропроводов с составом металлической жилы $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$, (содержание Cr 4%) которые характеризовались небольшим полем анизотропии и максимальным, выше 100 %, магнитоимпедансным откликом.

Были исследованы шесть типов микропроводов с составом металлической жилы $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$, изготовленных при разных режимах на установке ITMF-3 методом Улитовского – Тейлора в НИТУ МИСИС. При их вытяжке контролировались следующие параметры: мощность индуктора (характеризует температуру капли расплава), скорость подачи стеклянной трубки и скорость смотки микропровода. Основные отличия технологических параметров и диаметров изготовленных микропроводов серии «М» приведены в Таблице 2.

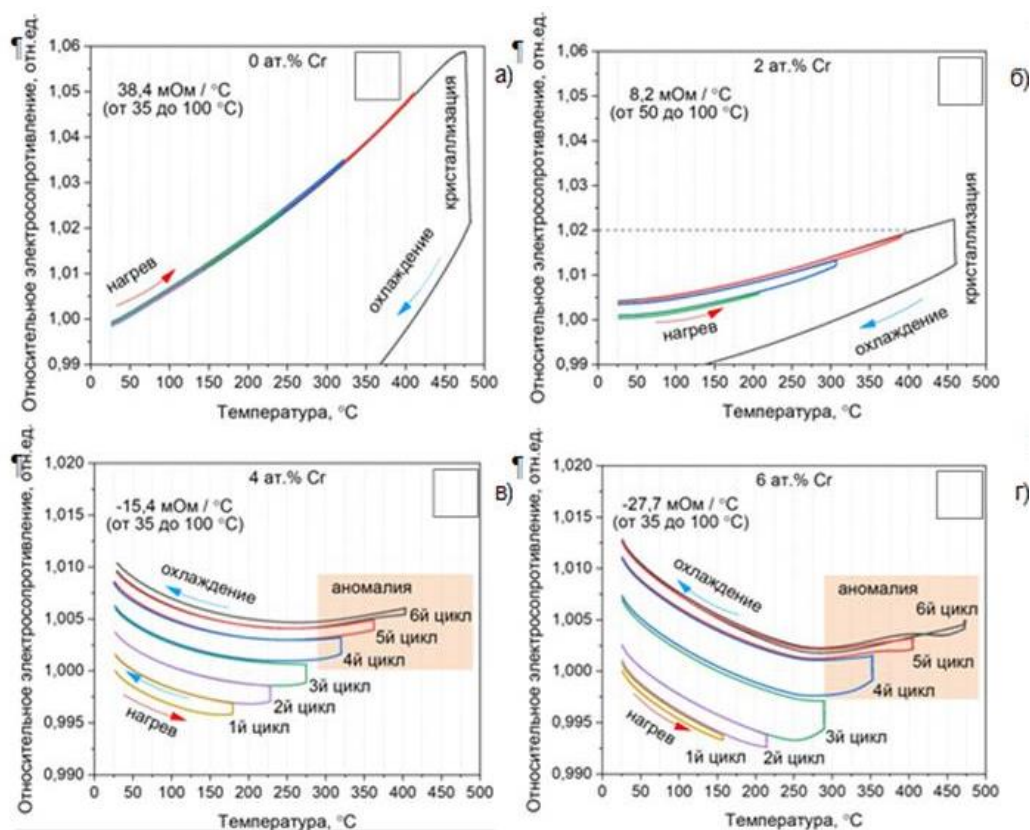


Рисунок 6. Изменение относительного электросопротивления $r = R_T / R_{300}$ микропроводов с различным содержанием хрома в процессе термоциклирования с увеличивающимся диапазоном изменения температуры: $\text{Co}_{73}\text{Fe}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$ (а); $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{Cr}_2\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$ (б); $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$ (в); $\text{Co}_{67}\text{Fe}_4\text{Cr}_6\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$ (г). Стрелками отмечены направления изменения температуры.

Как следует из представленных данных, скорость подачи стеклянной трубки позволяет управлять диаметром стеклянной оболочки микропровода. Например, микропровода типа М7, М8 имели самую тонкую стеклянную оболочку при наименьшей скорости подачи стеклянной трубки, 1,8 мм/мин. Микропровода М2, М6 наоборот, имели максимальный диаметр стеклянной оболочки, когда скорость подачи стеклянной трубки была максимальна (2,7 мм/мин и 2,6 мм/мин, соответственно).

Таблица 2. Технологические параметры и диаметры микропроводов серии «М».

Образец	Мощность, W	Скорость смотки, м/мин	Скорость подачи стекла, мм/мин	Диаметр жилы, d μm	Отношения диаметров, d/D
М-2	1178	177	2,7	18,0	0,53
М-4	860	162	2,2	12,5	0,42
М-5	860	162	2,0	13,6	0,46
М-6	860	162	2,6	23,5	0,68
М-7	1030	162	1,8	16,1	0,59
М-8	1178	162	1,8	17,9	0,67

Измерения петель гистерезиса и константы магнитострикции микропроводов проводились с помощью индукционного метода и метода малоуглового вращения вектора намагниченности, соответственно. Типичные петли гистерезиса микропроводов серии «М», приведены на рисунке 7. Видно, что петли гистерезиса различались по характерному значению поля анизотропии H_a . При этом, на величину поля анизотропии влияет мощность индуктора. В частности, микропровода М4 – М6 имели близкие значения $H_a \sim 2.3$ Э при одинаковой мощности индуктора, 860 Вт, а увеличение мощности приводило к

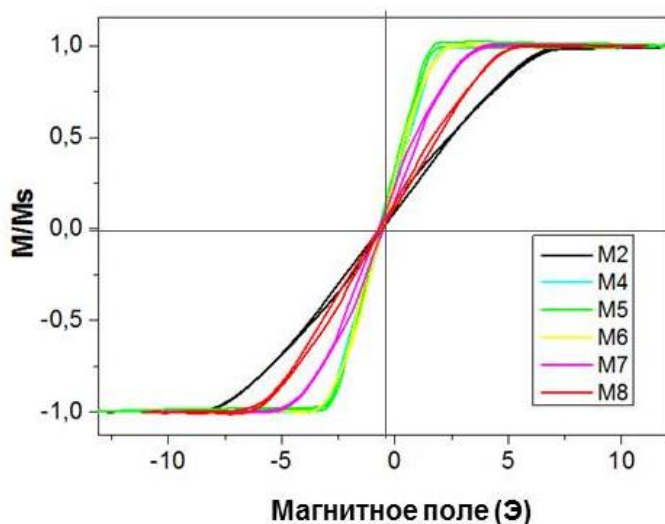


Рисунок 7. Динамические петли гистерезиса микропроводов серии «М», изготовленных при различных технологических режимах

росту значения поля анизотропии (образцы М7, М8, М2).

Значения константы магнитострикции оказались близкими для всех типов микропроводов ($(-2.1 \pm 0.3) \times 10^{-7}$) за исключением М2 ($\lambda_s = -3.1 \times 10^{-7}$). Особенность изготовления этого микропровода заключалась в увеличении скорости смотки микропровода и большем значении мощности, потребляемой нагревателем, т.е. более высокой скорости охлаждения микропровода в процессе его изготовления.

С помощью метода малоуглового вращения вектора намагниченности также были определены внутренние закалочные напряжения микропроводов. Оказалось, что величины внутренних закалочных напряжений микропроводов варьируются в пределах $140 \div 370$ МПа. При этом, значения закалочных напряжений слабо коррелировали с толщиной стеклянной оболочки и соответствующими величинами отношений диаметров d/D каждого типа микропровода.

В параграфе 3.3 рассмотрены способы управления свойствами аморфных ферромагнитных микропроводов за счет контролируемого травления стеклянной оболочки и с помощью термообработки.

Частичное или полное удаление стеклянного покрытия микропровода с помощью травления или других методов признано перспективным методом контроля распределения остаточных закалочных напряжений в аморфных микропроводах. Необходимым условием такого подхода является точный контроль конечной толщины стеклянной оболочки, а также малой шероховатости поверхности стекла, полученной в процессе травления.

Была предложена методика прецизионного травления стеклянного покрытия для уменьшения внешнего диаметра микропровода с помощью специального геля. Использование геля обеспечивает возможность травления стеклянной оболочки со скоростью – 0,2-2,0 мкм/час и с шероховатостью от 40 до 100 нм в зависимости от глубины травления стеклянной оболочки, а также полное снятие стеклянной оболочки без образования язв и неравномерного травления аморфной магнитной жилы микропровода.

В ходе экспериментов проводилось полное погружение образцов микропроводов в травильный гель на несколько часов. Так для образца микропровода с начальным соотношением внутреннего и внешнего диаметров $d/D = 0,66$ и начальной толщиной стеклянного покрытия $t_{sh} = 4,66$ мкм, была определена константа магнитострикции, равная $\lambda_s = -3,5 \times 10^{-7}$, приведенная величина остаточных закалочных напряжений микропроводе до травления составила $\Delta\sigma/\sigma_0 = 1,5$, где $\sigma_0 = 100$ МПа. После травления образца микропровода в геле в течение 80 мин толщина стеклянного покрытия уменьшилась до $t_{sh} = 2,61$ мкм. В результате величина остаточных закалочных напряжений снизилась до $\Delta\sigma/\sigma_0 = 0,45$. Контрольные измерения циркулярной диагональной компоненты магнитоимпеданса показали, что в исходном состоянии микропровода, амплитуда ГМИ отклика составляла $\sim 120\%$, а после травления стеклянной оболочки величина ГМИ отклика увеличилась до значения 230 %. Измерения недиагональной компоненты магнитоимпеданса, подтвердили увеличение крутизны преобразования почти в два раза.

Таким образом, полученные результаты явно показывают влияние остаточных закалочных напряжений на магнитоимпедансные характеристики микропроводов и возможность управления свойствами микропроводов. Однако, основной существенный недостаток предложенного метода травления стеклянной оболочки для достижения заметного повышения чувствительности ГМИ датчиков, связан с низкой технологичностью и необходимостью индивидуального подхода к каждому образцу микропровода.

Поэтому для получения микропроводов с определенными свойствами был предложен и разработан метод контролируемой термообработки (раздел 2.3), при котором нагрев происходит за счет протекания по микропроводу постоянного тока известной величины (Джоулев нагрев), а контроль за процессом протекания отжига осуществляется за счет непрерывного измерения электрического сопротивления микропровода.

Проверка возможностей предложенного метода термообработки проводилась с использованием микропроводов образцов типа М2 и М5, одного состава ($\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$) но с разными геометрическими и магнитными характеристиками, приведенными в Таблице 3.

Таблица 3. Параметры микропроводов, используемых в ходе термообработки.

Образец	Диаметр жилы, $d, \mu\text{m}$	Диаметр оболочки, $D, \mu\text{m}$	Отношение, d/D	Поле анизотропии, H_a, Oe	ГМИ отклик, %	Магнитострикция, $\lambda_s, \times 10^7$
M2	18.0	34.	0.53	6.2	120	-1.8
M5	13.6	29.5	0.46	2.3	150	-3.2

Поведение относительного сопротивления исследуемых серий микропроводов было изучено при воздействии токов разной амплитуды (максимальный ток отжига 63 мА). При измерениях, для каждой новой амплитуды тока использовался новый образец микропровода. На рисунке 8. а.б показаны кривые изменения относительного сопротивления в зависимости от амплитуды тока отжига для серий микропроводов M2 и M5. Анализируя графики, можно проследить динамику термообработки. При нагреве небольшими токами от нуля до $\sim 30 - 37$ мА (черные кривые) относительное сопротивление всех микропроводов при нагреве снижалось примерно на 0,5%, а при остывании возрастало по отношению к исходному значению.

При дальнейшем увеличении тока отжига относительное сопротивление сначала снижалось до минимума, а затем возрастало до тех пор, пока ток не достигал заданного значения I_{max} . При постепенном уменьшении амплитуды тока и соответствующем охлаждении микропровода относительное сопротивление микропроводов возрастало и приобретало соответствующее новое значение при комнатной температуре. Максимальное увеличение нормированного удельного сопротивления обеих серий микропроводов после отжига могло достигать примерно 1% по сравнению с исходным значением. При повторных отжигах при одном и том же максимальном значении тока, изменение относительного сопротивления соответствовало участкам охлаждения на кривых на рисунке 8.а,б.

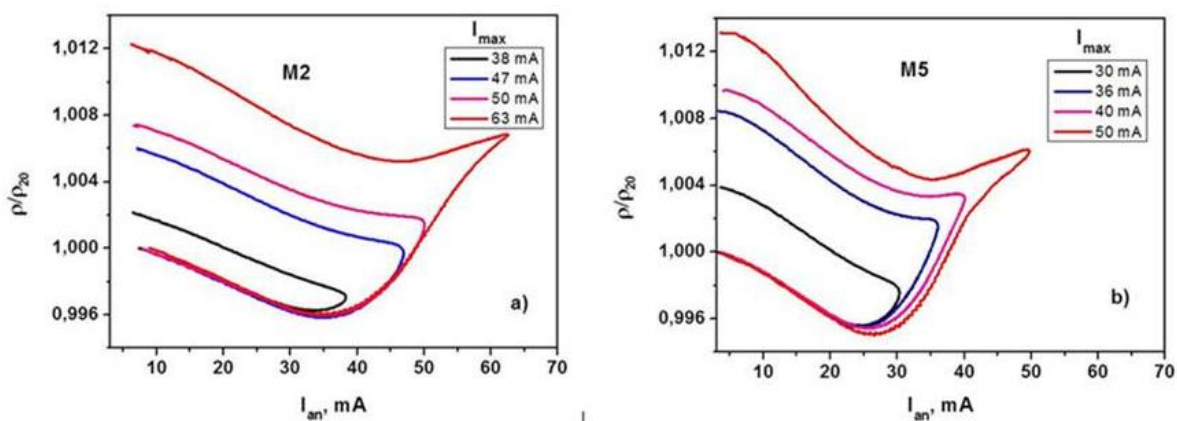


Рисунок 8. Зависимости нормированных изменений относительного сопротивления от амплитуды тока Джоулевого нагрева: а) для микропроводов M2; б) для микропроводов M5.

Для оценки изменений магнитных свойств микропроводов при термообработке были проведены измерения индукционных петель гистерезиса.

Результаты измерений петель гистерезиса микропроводов серий М2 и М5 до и после Джоулева нагрева, приведены на рисунке 9. а,б. Исходные петли (черные кривые) характеризовались коэрцитивной силой менее 0.05 Э, квазилинейным участком в области нулевых полей и достигали насыщения при значениях поля анизотропии не более 6 Э. После проведения Джоулева нагрева общую динамику поведения петель гистерезиса можно охарактеризовать следующим образом. При воздействиях небольших токов отжига, менее 25 мА, петля гистерезиса практически не изменялась. После приложения большего тока, петли гистерезиса увеличивали наклон (величина эффективного поля анизотропии соответственно уменьшалась) и могли трансформироваться в бистабильные петли гистерезиса (серия М5). Приложение еще большего тока в процессе нагрева приводило к обратному эффекту, при котором петли вновь становились квазилинейными, причем поле анизотропии могло увеличиваться до своего исходного значения и превышать его.

Особенности поведения петель гистерезиса исследованных микропроводов можно проследить по изменению зависимости поля анизотропии от максимального значения тока отжига, приведенных на вставках рисунка 9.а,б.

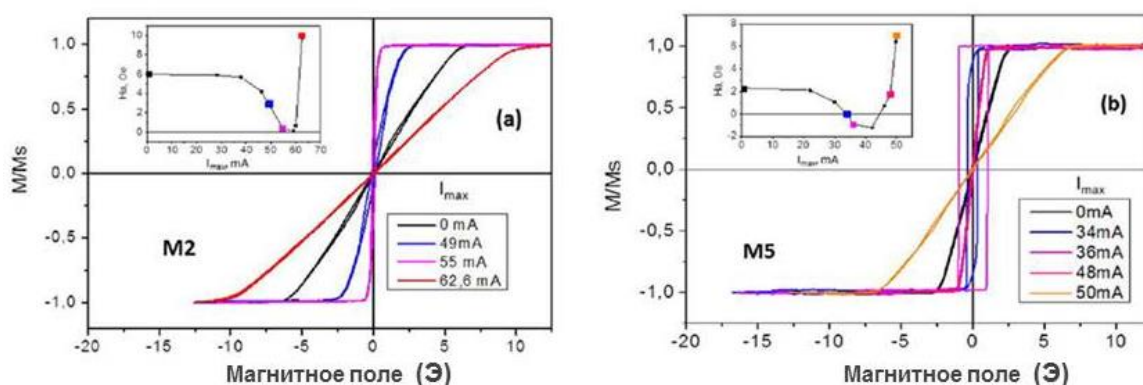


Рисунок 9. Петли гистерезиса микропроводов после Джоулева нагрева при различных значениях тока отжига: а) для микропроводов М2; б) для микропроводов М5. На вставках приведены зависимости значения поля анизотропии от максимального тока отжига:

При ГМИ измерениях использовались те же самые образцы, что и при измерениях динамических петель гистерезиса. Чтобы избежать воздействия на образец микропровода при подключении контактов, измерялась циркулярная диагональная, $Z_{\phi\phi}$, компонента тензора импеданса микропровода. Особенности поведения ГМИ характеристик микропроводов серий М2 и М5, в зависимости от токовой термообработки, приведены на рисунке 10 а.б.

В исходном состоянии амплитуда ГМИ отклика микропроводов серии M2 составляла 120% (черная кривая, рисунок 10.а.). После нагрева током выше 40 мА величина ГМИ отклика увеличивалась до значения 200 % (синяя кривая, ток 46 мА) и достигала максимального значения порядка 280 % при токе отжига 50 мА. Величина максимума удерживалась примерно на одном уровне при нагреве токами до 60 мА (ток 59 мА, пурпурная кривая). Дальнейшее увеличение тока нагрева приводило к уменьшению амплитуды отклика и его уширению (63 мА, красная кривая). Общий ход изменения амплитуды циркулярной диагональной компоненты ГМИ отклика микропроводов серии M2, приведен на вставке рисунка 10.а.

В отличие от M2, индукционная ГМИ компонента микропроводов серии M5, изначально характеризовалась большими значениями, составившими примерно 150% (черная кривая, рисунок 10.б). При увеличении тока нагрева величина ГМИ отклика увеличивалась (синяя кривая, ток 22 мА) и достигала максимальных значений порядка 220 % при токе 32 мА. При дальнейшем увеличении тока нагрева амплитуда ГМИ отклика резко падала (пурпурная кривая, ток 36 мА). Дальнейшее увеличение тока отжига приводило к повторному увеличению ГМИ отклика до второго максимума в 220% (красная кривая, 46 мА), а затем к его уменьшению с увеличением тока нагрева (оранжевая кривая, 50 мА). Общий ход изменения амплитуды ГМИ отклика образцов микропроводов серии M5, приведен на вставке рисунка 10.б.

Представленные экспериментальные данные показывают, что в процессе Джоулева нагрева в микропроводах с металлической жилой состава $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$, покрытых стеклянной оболочкой, происходят значительные изменения электрических и магнитных свойств. Эти свойства отражают структурно-фазовые изменения микропровода в процессе его структурной релаксации. При этом, происходящие в процессе термообработки относительные изменения сопротивления микропроводов позволяют определить режимы отжигов, при которых достигается существенное увеличение ГМИ-отношения.

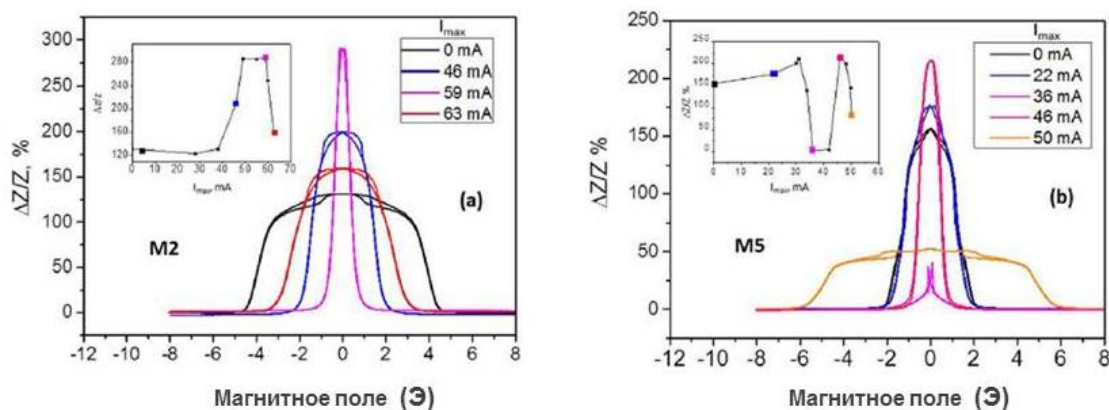


Рисунок 10. Значение коэффициента ГМИ микропроводов после Джоулева нагрева при различных значениях тока; на вставках показана зависимость максимального уровня коэффициента ГМИ от максимального тока отжига: а) для серии микропроводов M2; б) для серии микропроводов M5.

В параграфе 3.4 представлены результаты исследований особенности поведения замыкающих доменов в отрезках кобальтовых микропроводов во внешних продольных магнитных полях, поскольку краевые эффекты могут оказывать влияние на распределение намагниченности микропровода и должны учитываться при разработке миниатюрных датчиков.

В ходе исследований использовались отрезки микропроводов серии М2, после их термообработки с максимальным током 40 мА. Измерения проводились методом сканирующей ГМИ магнитометрии и индукционным методом.

При измерениях образцов методом сканирующей ГМИ-магнитометрии были получены изображения их собственной магнитной индукции $B_z(x,y)$ в различных внешних продольных магнитных полях, H_x . В качестве примера, на рисунке 11 приведены результаты измерений над образцом микропровода длиной 10,1 мм на минимальном (~ 1 мм) расстоянии между образцом и ГМИ-датчиком. На рисунке 11. а. показано распределение перпендикулярной компоненты магнитной индукции $B_z(x,y)$ над микропроводом (черный отрезок в центре) при воздействии магнитного поля H_x величиной + 4.2 Э, направленного вдоль оси микропровода (слева - направо), в котором микропровод намагничивался до состояния близкого к насыщению. На рисунке 11. б. приведены отдельные профили нормальной компоненты магнитной индукции над осью отрезка микропровода при разных значениях приложенных магнитных полей H_x указанных на рисунке. Видно, что при уменьшении подмагничивающего поля с + 4.8 Э до 0, амплитуда экстремумов уменьшалась почти до нуля. Смена знака и увеличение подмагничивающего поля до минус 4.2 Э приводит к смене знака магнитных экстремумов на противоположный и увеличению их амплитуды до максимального значения.

Экспериментальные профили рисунка 11.б. использовались для расчета распределения намагниченности микропровода в разных продольных магнитных полях. Предложенный способ расчета заключался в построении подходящей вариационной модели магнитной структуры микропровода, для которой рассчитанные теоретические профили были близки к экспериментальным. В рамках модели предполагалось, что основной вклад в собственную индукцию микропровода дают его концевые области, где намагниченность быстро спадает до нуля образуя магнитные заряды с продольной плотностью $\rho_m = -\pi r_0^2 (dJ / dx)$. Заряды такой области вносят вклад в распределение $B_z(x,y,z)$, описываемый выражением:

$$B_z(x, y, z) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_U \rho_m(x_1) \frac{z dx_1}{\left[z^2 + y^2 + (x - x_1)^2 \right]^{3/2}} . \quad (1)$$

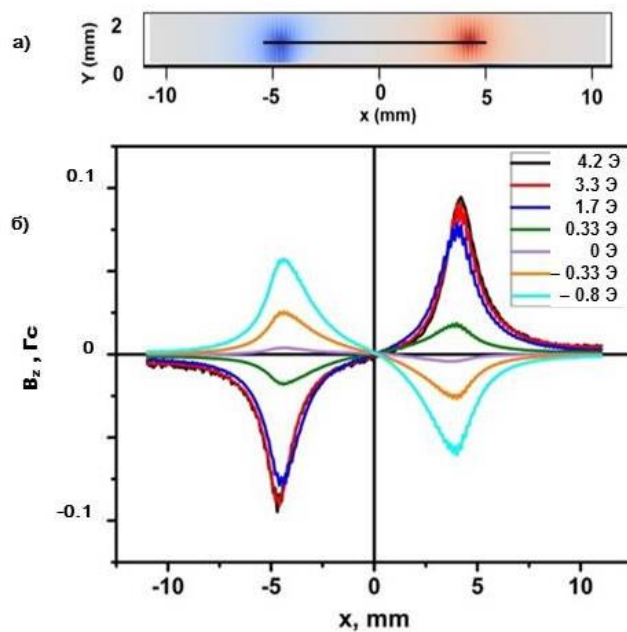


Рисунок 11. Распределение нормальной компоненты магнитной индукции $B_z(x, y)$ над отрезком микропровода длиной 10.1 мм: (а) магнитное изображение микропровода (черный отрезок в центре) во внешнем магнитном поле $H_x = +4.8$ Э; (б) профили компоненты магнитной индукции $B_z(x)$ вдоль оси микропровода, измеренные при значениях подмагничивающих полей H_x указанных на вставке.

Подбирая в (1) параметры распределения магнитных зарядов $\rho_m(x)$, обеспечивающих приемлемое совпадение расчетного и измеренного профилей, может быть найдено распределение средней по радиусу продольной намагниченности микропровода. Для рассматриваемого образца Со микропровода было установлено, что в сильном продольном магнитном поле ($H_x > H_a$) в центральной части микропровода, намагниченность направлена вдоль приложенного поля и близка к намагниченности насыщения, $J(x) = J_s$, а вблизи концов микропровода, расположены замыкающие магнитные домены

шириной $u \sim 1,2$ мм, в которых продольная компонента намагниченности спадает до нуля. При значениях внешнего поля ниже эффективного поля анизотропии ($-H_a < H_x < H_a$), величина продольной намагниченности в центральной части микропровода монотонно убывает с уменьшением поля, а замыкающие магнитные домены немного расширяются до $u \sim 1,5$ мм и сохраняют эту ширину.

Для объяснения полученных результатов была предложена модель, описывающая поведение концевой доменной стенки в отрезках кобальтовых аморфных микропроводов диаметром $d_0 < 30$ мкм. В рамках модели получено трансцендентное уравнение:

$$\frac{2H_x}{\xi J_0} \pm \frac{4H_a}{3\xi J_s} = \frac{1}{t^2} \ln(t) - \frac{1,5 - \ln(2)}{t^2} \quad (2)$$

При условии $r_0/u \ll 1$ и $t = u/r_0$, данное выражение связывает ширину концевой доменной стенки u с радиусом микропровода r_0 , величиной внешнего магнитного поля H_x , поля анизотропии микропровода H_a и его намагниченности насыщения J_s ($\xi = 0,8$ является подгоночным множителем). Найденные формулы позволили получить оценку ширины концевой доменной стенки и объяснить такие экспериментальные факты, как:

сужение концевой доменной стенки при уменьшении диаметра микропровода; неизменность ширины концевой доменной стенки во внешних магнитных полях меньше поля анизотропии ($-H_a < H_x < +H_a$); монотонное уменьшение ширины концевой доменной стенки в области магнитных полей $H_x > H_a$. Найденные закономерности поведения намагниченности в отрезках кобальтовых микропроводов необходимо учитывать при их использовании в сенсорных устройствах.

В четвертой главе приведены результаты исследований структурно-фазовых превращений и электросопротивления микропроводов из сплавов $\text{Co}_{73-x}\text{Fe}_4\text{Cr}_x\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$ (содержание Cr 0%, 2%, 4%, ат.) в процессе их кристаллизации и в полностью закристаллизованном состоянии. Рассмотрено применение кристаллизованного микропровода состава $\text{Co}_{73}\text{Fe}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$ в качестве чувствительного элемента температурного датчика сопротивления (ТДС), электрическое сопротивление которого пропорционально изменению температуры окружающей среды.

В параграфе 4.1. показано, что у всех исследованных микропроводов кристаллизация проходит в две стадии, причем содержание Cr заметно влияет на этот процесс. На рисунке 12 представлено изменение относительного электрического сопротивления ($r(T) = R(T)/R_{25^\circ\text{C}}$, где $R_{25^\circ\text{C}}$ – сопротивление при комнатной температуре 25°C) ферромагнитных микропроводов Cr_0 , Cr_2 и Cr_4 в процессе Джоулева нагрева до полной кристаллизации и последующего охлаждения. Сначала, пока материал остается аморфным, сопротивление плавно увеличивается с температурой. Когда начинается первая стадия кристаллизации (около $480\text{--}510^\circ\text{C}$), сопротивление резко падает – это связано с образованием первых кристаллических фаз. После прохождения минимума, зависимость $r(T)$ снова растет, проходя через вторую стадию превращений при $550\text{--}600^\circ\text{C}$. Выше 600°C материал полностью закристаллизован, а зависимость $r(T)$ становится почти линейной.

Содержание Cr заметно влияет на процесс: чем больше хрома в сплаве, тем при более высокой температуре начинается кристаллизация. После завершения кристаллизации температурный коэффициент сопротивления микропроводов становится существенно выше, чем в аморфном состоянии, а для образца без хрома (Cr_0) он достигает значения $\sim 1350 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ в диапазоне температур от 20°C до 200°C , рисунок 12.

В параграфе 4.2. рассматривается применение кристаллизованных микропроводов состава $\text{Co}_{73}\text{Fe}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$ в качестве чувствительных элементов ТДС. Выбор указанных микропроводов обусловлен наибольшим температурным коэффициентом сопротивления, при достаточно высоком удельном сопротивлении.

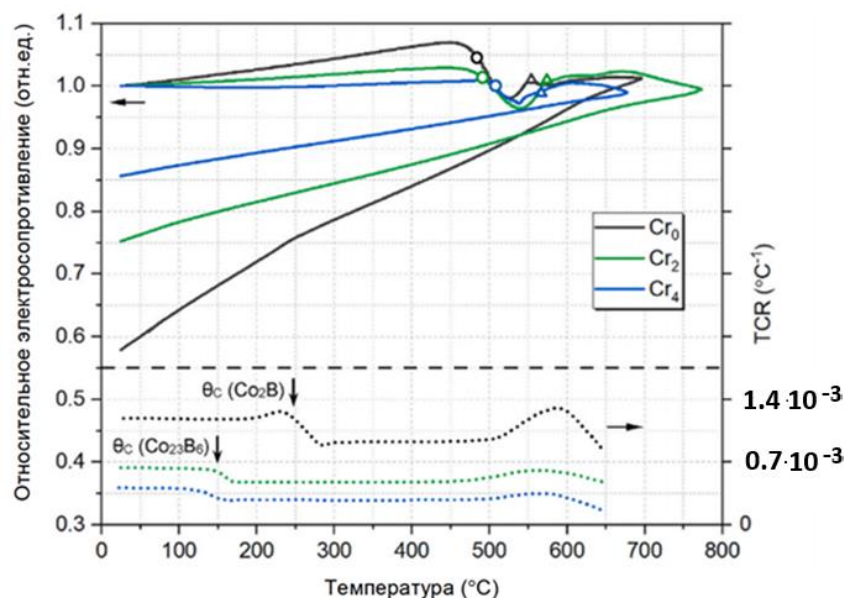


Рисунок 12 – Изменение относительного электрического сопротивления ρ микропроводов с различным содержанием Cr в процессе джоулевого нагрева со скоростью $10 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{мин}$ до полной кристаллизации и последующего охлаждения (верхние кривые); температурная зависимость ТКС сплавов в кристаллическом состоянии (нижние кривые)

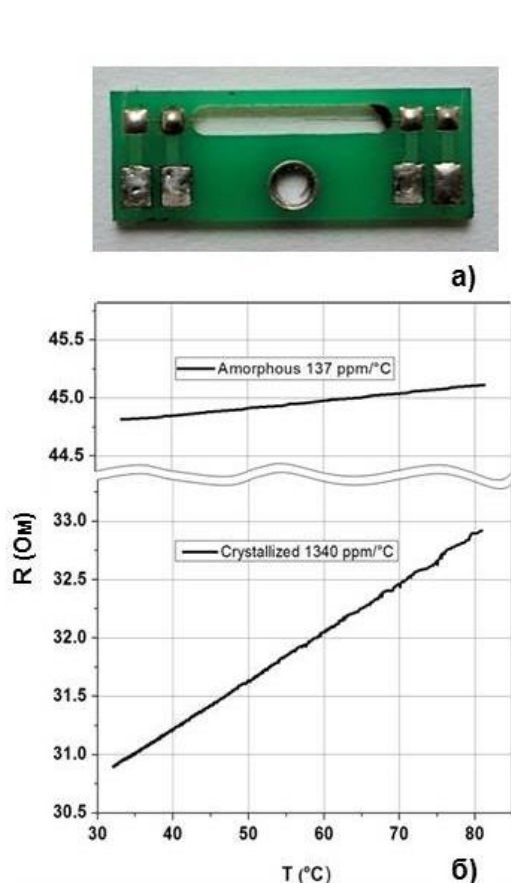


Рисунок 13. ТДС на основе микропровода:
а) общий вид (размер платы $7 \times 12 \times 1 \text{ мм}^3$);
б) характерные температурные зависимости сопротивления в аморфном и кристаллизованном состояниях.

Из-за высокой хрупкости кристаллизованных микропроводов, разработанная технология изготовления ТДС состояла из двух этапов: предварительной пайки отрезка аморфного микропровода на специальной текстолитовой подложке и отжиге до кристаллизованного состояния методом Джоулевого нагрева. Общий вид готового ТДС приведен на рисунке 13.а, а его характерные температурные зависимости сопротивления в аморфном и кристаллизованном состояниях приведены на рисунке 13.б.

Калибровка изготовленных ТДС проводилась путем измерения их сопротивления при различной заданной температуре в печи. Для контроля температуры использовался дополнительный температурный датчик LM235. При калибровке использовалась четырехзондовая схема измерения. Через микропровод пропусклся стабилизированный

ток 1,5 мА, напряжение микропровода усиливалось дополнительным усилителем. В результате были определены итоговые параметры разработанных ТДС:

- длина чувствительного элемента	11 мм;
- номинальное сопротивление	30 ± 2 Ом;
- ТКС	1350 ppm/°C;
- рабочий диапазон	$+20 \div +100$ °C;
- погрешность измерения	± 0.2 °C;
- ток возбуждения	1.5 ± 0.5 мА.

В пятой главе рассматривается эффект малоуглового вращения намагниченности в аморфных ферромагнитных микропроводах на основе кобальта. Представлена методика измерения кривых малоуглового вращения намагниченности таких микропроводов и продемонстрировано хорошее согласие между теоретическими и экспериментальными данными. На основе микропроводов с низкой отрицательной магнитострикцией предложен и реализован новый тип датчиков механических деформаций.

В параграфе 5.1. рассматривается модифицированный метод малоуглового вращения намагниченности в аморфных ферромагнитных микропроводах (метод МВН). Метод МВН в стандартном виде широко используется [5] для оценки константы магнитострикции аморфных материалов. В предложенном модифицированном виде в методе МВН учитывается магнитная анизотропия микропроводов, связанная с распределением остаточных закалочных напряжений в металлической жиле микропровода, что позволяет найти взаимосвязь между намагничивающим продольным полем H_{0z} , приложенными растягивающими напряжениями $\sigma_{zz}^{(a)}$ и регистрируемым сигналом ЭДС в измерительной катушке.

Если кобальтовый микропровод намагничен во внешнем магнитном поле $H_{0z} > H_a$ параллельном его оси и по микропроводу протекает переменный ток частотой f и амплитудой I_0 , $I(t) = I_0 \sin(\omega t)$, где $\omega = 2\pi f$ — угловая частота. Тогда под воздействием магнитного поля переменного тока циркулярная компонента единичного вектора намагниченности микропровода будет совершать малые колебания с частотой ω . Колебания циркулярной компоненты единичного вектора намагниченности приводят к возникновению сигнала ЭДС на удвоенной частоте 2ω в измерительной катушке, навитой вокруг микропровода:

$$E = \frac{\pi^2 M_s N \omega (0.2 I_0)^2}{c} \left[\frac{1}{\left(H_a [\tilde{\sigma}_{zz} - \tilde{\sigma}_{\varphi\varphi} + \tilde{\sigma}_{zz}^{(a)}] - H_{0z} \right)} \right]^2 \sin(2\omega t), \quad (3)$$

где N — число витков измерительной катушки, c — скорость света, $\tilde{\sigma}_{ij} = \sigma_{ij} / \sigma_0$ ($i, j = \rho, \varphi, z$) — приведенные компоненты тензора остаточного закалочного напряжения, $\tilde{\sigma}_{zz}^{(a)} = \sigma_{zz}^{(a)} / \sigma_0$ — приведенное приложенное растягивающее напряжение, $\sigma_0 = 100$ МПа — характерная амплитуда остаточного напряжения, $H_a = 2K_e / M_s$ — эффективное поле анизотропии микропровода, и K_e — константа анизотропии микропровода $K_e = \frac{3}{2} \lambda_s \sigma_0$.

Из выражения (2) следует, что при некотором фиксированном значении магнитного поля приложение внешних растягивающих напряжений будет приводить к изменению амплитуды ЭДС на частоте $2f$. Данный эффект используется при исследованиях свойств микропроводов, а также при разработке нового типа датчика механических деформаций.

В параграфе 5.2. приведены результаты экспериментальных исследований константы магнитострикции и кривых МВН в различных микропроводах. В качестве примера, на рисунке 14, для микропровода с составом металлической жилы $\text{Co}_{65}\text{Fe}_4\text{Ni}_2\text{B}_{13.5}\text{Si}_{14}\text{Mo}_1\text{C}_{0.5}$, диаметром $d = 11.8 \mu\text{m}$ и внешним диаметром $D = 15.8 \mu\text{m}$ приведены экспериментальные кривые (знаки) и теоретические кривые (сплошные линии) амплитуды ЭДС второй гармоники на измерительной катушке для разных значений растягивающих напряжений. Экспериментальные кривые были измерены с помощью модифицированного метода МВН, рассмотренного в разделе 2.3, а теоретические кривые построены в соответствии с выражением (13). Из сравнения этих данных был определен

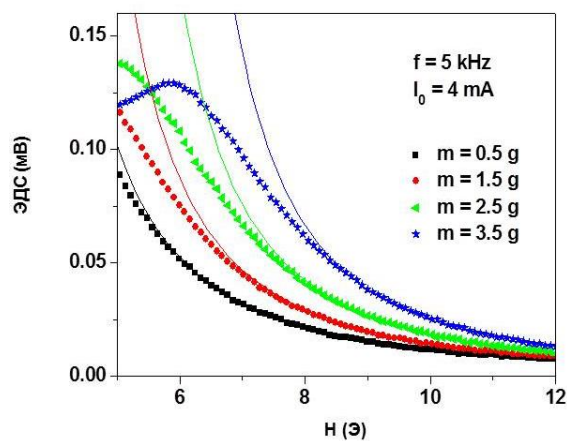


Рисунок 14. Экспериментальные (точки) и теоретические (сплошные линии) значения амплитуды ЭДС второй гармоники для микропровода состава $\text{Co}_{65}\text{Fe}_4\text{Ni}_2\text{B}_{13.5}\text{Si}_{14}\text{Mo}_1\text{C}_{0.5}$, при различных растягивающих напряжениях

набор основных материальных параметров данного микропровода: $H_a = 2.45$ Э, $\lambda_s = -2.01 \times 10^{-7}$, $\Delta\tilde{\sigma} = 1.82$ и $M_s = 530$ эму/см³. Кроме этого с помощью разработанного модифицированного метода МВН, также была продемонстрирована возможность определения приложенных к микропроводу внешних растягивающих напряжений.

В параграфе 5.3. приведены результаты исследования возможности создания датчиков механических напряжений на основе аморфных ферромагнитных

микропроводов. Для выбранного микропровода с металлической жилой состава $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$, диаметром 22.6 μm и стеклянной оболочкой диаметром 33.2 μm , были проведены испытания на растяжение на разрывной машине «Инстрон». График зависимости относительного удлинения микропровода с начальной длиной 100 мм от приложенной нагрузки приведен на рисунке 15.а. Для аналогичного образца микропровода было измерено семейство кривых МВН в области магнитных полей от 3 Э до 20 Э и при воздействии приложенных растягивающих напряжений, создаваемых подвешиваемыми грузами известной массы, рисунок 15.б.

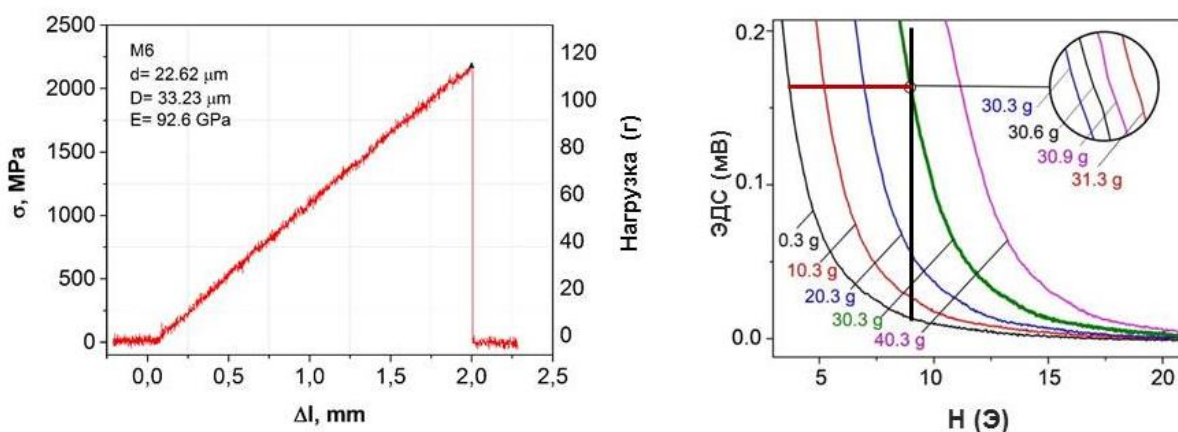


Рисунок 15. Результаты испытаний микропровода длиной $l_0 = 100$ мм на растяжение: а) зависимость относительного удлинения микропровода от приложенной нагрузки; б) семейство кривых МВН микропровода, измеренных под действием растягивающих напряжений грузов известной массы.

Конструкция разработанного датчика МВН приведена на рисунке 16.а. Специально разработанная схема регистрации выходного сигнала со стабилизирующей цепью обратной связи по магнитному полю обеспечивает линейное соотношение между выходным напряжением измерительной катушки и изменением приложенной деформации. В качестве примера на рисунке 16.б. приведена зависимость выходного напряжения МВН - датчика ($U_0 - U$) от величины приложенных микродеформаций Δl . Было установлено, что минимальные регистрируемые данным методом деформации составляют менее 5 мкм с отношением сигнал/шум более 3. Для МВН-датчика с микропроводом длиной $l_0 = 100$ мм микродеформации могут измеряться в диапазоне $\Delta l > 1$ мм.

Шестая глава посвящена исследованиям недиагонального гигантского магнитоимпедансного эффекта в аморфных ферромагнитных микропроводах на основе Co с малой отрицательной константой магнитострикции, разработке недиагональных магнитоимпедансных датчиков и созданию на их основе высокочувствительных магнитоизмерительных систем.

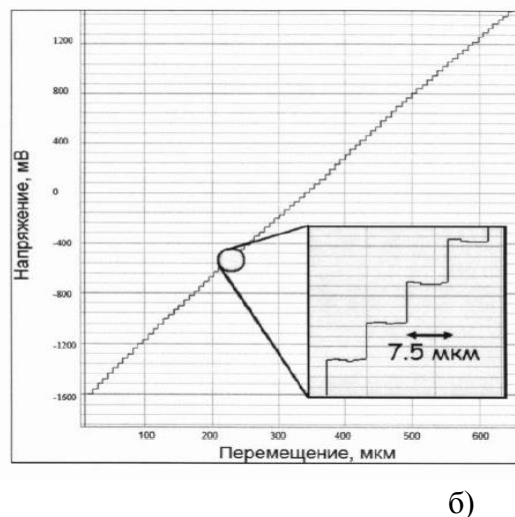
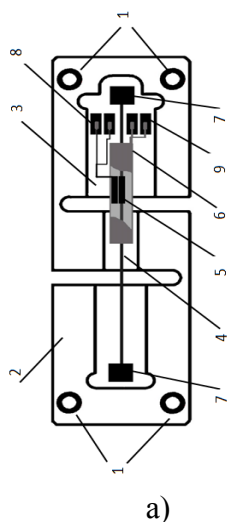


Рисунок 16. Датчик механических напряжений на основе метода МВН: а) схематическое изображение: 1 - крепежные отверстия, 2 - прямоугольная пластина, 3 – посадочное место, 4 - микропровод, 5 - дифференциальная измерительная катушка, 6 - миниатюрный соленоид, 7 - первая пара контактных площадок соединения микропровода, 8 - вторая пара контактных площадок соединения дифференциальной измерительной катушки, 9 - третья пара контактных площадок миниатюрного соленоида; б) зависимость выходного напряжения датчика (U_o-U) от величины приложенных деформаций Δl .

В параграфе 6.1. рассмотрен эффект недиагонального магнитного импеданса в аморфном ферромагнитном микропроводе с геликоидальной анизотропией. Согласно общепринятой точке зрения, возникающие в микропроводах в процессе литья внутренние закалочные напряжения, при наличии отрицательной магнитострикции, создают циркулярную магнитную анизотропию. Поэтому в отсутствие внешнего магнитного поля аморфный микропровод на основе кобальта намагничен циркулярно. Циркулярная намагниченность определяет высокую чувствительность ГМИ характеристик микропровода к продольному магнитному полю. В то же время, в большинстве реальных микропроводов может присутствовать также геликоидальный тип магнитной анизотропии [6]. Для таких микропроводов уже малая геликоидальная поправка в энергии магнитной анизотропии микропровода приводит к связи продольной и циркулярной компонент намагниченности микропровода при его перемагничивании. Вследствие этой магнитомеханической связи, циркулярная компонента намагниченности микропровода меняет знак при его перемагничивании внешним магнитным полем, параллельном оси микропровода.

Поведение продольной и циркулярной компонент единичного вектора намагниченности S_0 микропровода при его перемагничивании, должно определенным образом отражаться и на магнитоимпедансных характеристиках. Микромагнитное

моделирование и экспериментальные данные показали, что в результате скачка циркулярной компоненты, недиагональная компонента тензора гигантского магнитоимпеданса также меняет знак при перемагничивании микропровода, а для стабилизации поведения циркулярной составляющей намагниченности через микропровод необходимо пропустить небольшой постоянный ток смещения. На рисунке 17.а.б. приведены результаты численных расчетов (сплошные кривые) и экспериментальные данные (точки) недиагональных компонент тензора магнитного импеданса для двух Со микропроводов (№1 и №2), измеренные как функции приложенного магнитного поля, которое уменьшается от положительных к отрицательным значениям. Микропровод №1 (черные кривые), имел диаметр металлической жилы $d = 21,4$ мкм и диаметр стеклянной оболочки $D = 26,2$ мкм, а микропровод №2 (красные кривые) - $d = 22,4$ мкм и $D = 22,8$ мкм, соответственно. Экспериментальные данные были получены при возбуждении микропроводов переменным током $I_{ac} = 0,36$ мА, $f = 4$ МГц в отсутствии постоянного тока смещения, $I_{dc} = 0$, рисунок 17.а. и при дополнительном постоянном токе смещения $I_{dc} = 0,6$ мА, рисунок 17.б. Численное моделирование было выполнено в предположении существования малой недиагональной компоненты тензора напряжений $\sigma_{\varphi z} \ll 1$. Амплитуда этой компоненты рассматривалась как регулируемый параметр, который определялся путем сравнения с экспериментальными данными. Из представленных на рисунке 17.а. данных следует, что в каждом микропроводе недиагональная компонента меняет знак при определенных отрицательных значениях приложенного магнитного поля. Этот эффект особенно выражен для микропровода №2 (красные кривые), в котором скачок недиагональной компоненты начинается при $H_{0z} = -0,36$ Э.

Скачок циркулярной компоненты намагниченности микропровода устраняет магнитное поле постоянного тока смещения достаточной амплитуды. Представленные на рисунке.17.б. кривые недиагональной компоненты тензора магнитного импеданса микропроводов, измеренные при пропускании дополнительного постоянного тока смещения $I_{dc} = 0,6$ мА, уже не имеют скачков. В линейном режиме циркулярная компонента электрического поля определяется амплитудой переменного тока I_z и недиагональной компонентой импеданса микропровода с радиусом R : $e_{\varphi}(R) = I_z Z_{\varphi z}(f, H)$, а наводимая в приемной катушке ЭДС определяется выражением :

$$E = 2\pi R N_c I_z Z_{\varphi z}(f, H). \quad (4)$$

Полученные результаты использовались в дальнейшем при разработке недиагональных магнитоимпедансных датчиков на основе аморфных микропроводов.

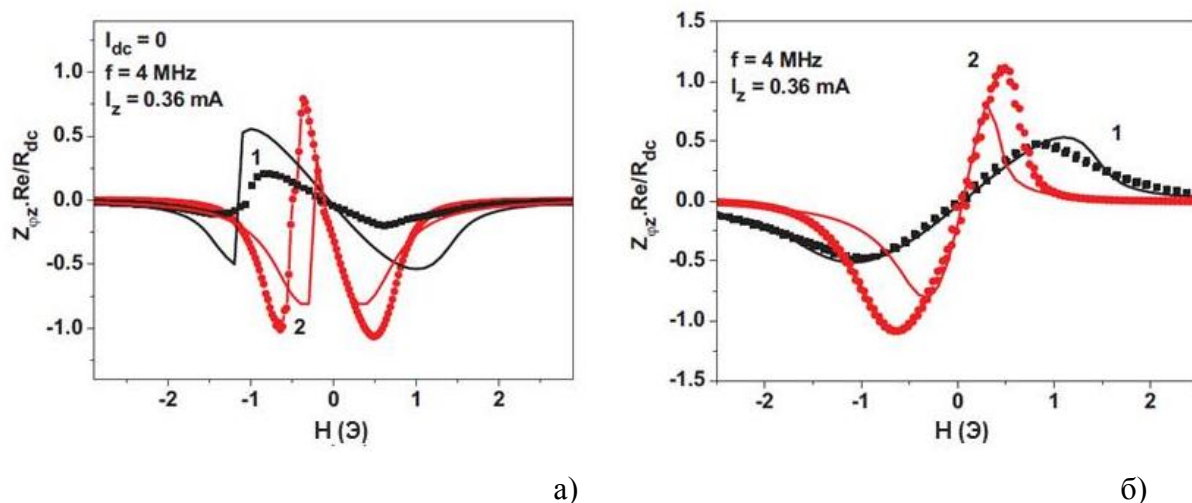


Рисунок 17. Кривые недиагональной компоненты тензора магнитного импеданса Со микропроводов №1 и №2, измеренные как функции приложенного магнитного поля, которое уменьшается от положительных к отрицательным значениям. Точки представляют экспериментальные данные, сплошные линии показывают результаты численного моделирования: а) нет постоянного тока смещения $I_{dc} = 0$; б) при постоянном токе смещения $I_{dc} = 0,6$ мА.

В параграфе 6.2. описаны результаты исследований характеристик Со микропроводов, конструкция недиагональных магнитоимпедансных датчиков и работа в магнитоизмерительной схеме. На первоначальном этапе исследовались их магнитные характеристики. Отбирались микропровода с небольшой отрицательной константой магнестрикции $(-0.5 \div -5) \times 10^{-7}$, низким полем анизотропии (< 1.2 Э) и малой, менее 0.03 Э, коэрцитивной силой

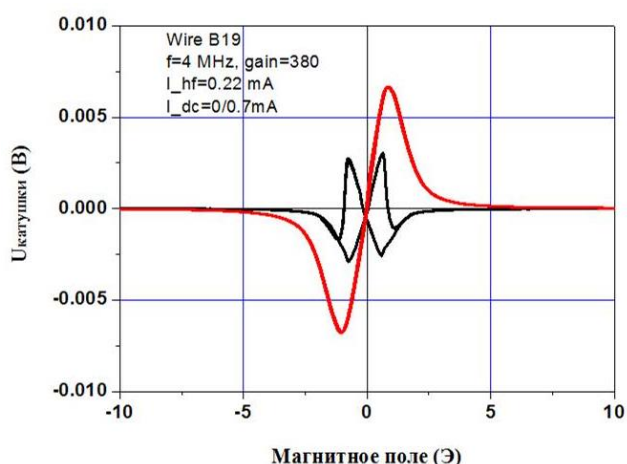


Рисунок 18. Недиагональная компонента тензора магнитоимпеданса микропровода в отсутствие постоянного тока смещения $I_{dc} = 0$ (черные кривые) и при $I_{dc} = 0,7$ мА (красные кривые) в зависимости от приложенного магнитного поля.

Измерения недиагональных магнитоимпедансных характеристик микропроводов проводились с использованием небольшой специально разработанной печатной платы (ГМИ-датчик) с приемной катушкой диаметром 0.5 мм и длиной 7 мм и содержала 85 витков из 50 мкм медного провода. В ходе измерений отрезок микропровода длиной 10 мм располагался внутри приемной катушки и при помощи пайки своими концами подсоединялся к измерительным контактным площадкам.

В процессе измерений плата ГМИ-датчика соединялась с измерительной системой и располагалась в центре небольшого соленоида, закрепленного внутри пермаллового магнитного экрана. В соленоиде создавалось линейно нарастающее магнитное поле амплитудой ± 15 Э. Через микропровод пропусклся синусоидальный ток частотой 4 МГц и амплитудой 0.35 мА. Дополнительно через микропровод мог пропускаться постоянный ток смещения с регулируемой амплитудой в диапазоне от 0 мА до 1.5 мА. При измерении недиагональной компоненты сигнал ЭДС на частоте 4 МГц регистрировался на концах приемной катушки. После усиления сигнал детектировался и соответствующие низкочастотные огибающие записывались устройством сбора данных в зависимости от воздействующего линейного магнитного поля. На рисунке 18 приведены экспериментальные зависимости недиагональной компоненты тензора магнитоимпеданса микропровода в отсутствии постоянного тока смещения и при протекании через микропровод постоянного тока I_{dc} амплитудой 0.7 мА. Видно, что при добавлении небольшого тока смещения $I_{dc} = 0,7$ мА, сигнал микропровода линеаризуется (красная кривая на рисунке 18). Кроме того, характеристики идентичны как в случае линейно нарастающего магнитного поля так и в случае убывающего поля. Это показывает, что наличие небольшого постоянного тока смещения очень важно для стабилизации поведения недиагональной магнитоимпедансной компоненты микропровода.

Разработанный недиагональный ГМИ-датчик был использован в схеме ГМИ-магнитометра для регистрации слабых магнитных полей. В данной схеме ГМИ-датчик возбуждался переменным током на частоте 4 МГц, амплитудой 2 мА и постоянным током величиной 0.7 мА. Сигнал приемной катушки усиливается с помощью малошумящего предусилителя, детектируется и через цепь обратной связи в виде токового сигнала поступает в противофазе в приемную катушку, ослабляя воздействующее магнитное поле. Таким образом ГМИ-датчик работает в данной схеме в режиме нуль-детектора, а выходной сигнал магнитометра $U_{вых}$ линейно связан с компонентой внешнего магнитного поля B , направленного вдоль ГМИ-датчика: $U_{вых} = k B + U_0$, где k – коэффициент передачи, а U_0 – нулевое смещение, являются параметры магнитометра, которые находятся при калибровке. Изготовленный опытный образец ГМИ-магнитометра характеризуется малыми размерами, чувствительностью на уровне $10 \text{ пТ/Гц}^{1/2}$, на частотах выше 300 Гц, полосой пропускания от постоянной составляющей до частоты 1000 Гц и высоким динамическим диапазоном, превышающим 120 дБ. Эксперименты подтвердили надежность работы магнитометра в лабораторных условиях, его высокую чувствительность и широкий динамический диапазон.

В параграфе 6.3. описан разработанный в рамках данной работы сканирующий ГМИ магнитометр, в котором, в качестве магнитного датчика используется миниатюрный ГМИ сенсор. Также приведены примеры использования сканирующего ГМИ магнитометра в задачах исследования ансамблей магнитных нанночастиц, изучения коррозионных токов и магнитного неразрушающего контроля образцов нержавеющей стали.

В заключении сформулированы основные результаты работы:

1. Отработаны технологические режимы литья микропроводов методом Улитовского-Тейлора и получены опытные серии покрытых стеклянной оболочкой аморфных ферромагнитных микропроводов системы $\text{Co}_{73-x}\text{Fe}_4\text{Cr}_x\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$ с различным содержанием Cr ($x = 0, 2, 4, 6, 8$). Изготовленные серии характеризовались диаметрами металлической жилы 20 ± 5 мкм, стеклянной оболочки 25 ± 5 мкм. После литья все полученные серии находились в аморфном состоянии.

2. Установлены основные закономерности влияния легирования хромом на электрические свойства аморфных ферромагнитных микропроводов системы $\text{Co}_{73-x}\text{Fe}_4\text{Cr}_x\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$ в аморфном и кристаллизованном состояниях.

3. Предложен метод термообработки микропроводов с помощью Джоулева нагрева с непрерывным контролем электрического сопротивления, позволяющий управлять структурной релаксацией и кристаллизовать аморфные ферромагнитные микропровода на основе Co.

4. . Установлен определяющий вклад микролегирования хромом в терморезистивные свойства микропроводов системы $\text{Co}_{73-x}\text{Fe}_4\text{Cr}_x\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$ ($x = 0, 2, 4, 6$ ат.%), проявляющийся в аномальном характере температурной зависимости электрического сопротивления микропроводов в аморфном состоянии и в значительном изменении температурного коэффициента сопротивления микропроводов после их кристаллизации.

5. Разработана конструкция и создан прототип температурного датчика сопротивления, в котором в качестве чувствительного элемента используется кристаллизованный микропровод состава $\text{Co}_{73}\text{Fe}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$.

6. Разработаны экспериментальные методы определения свойств аморфных ферромагнитных микропроводов, включающие:

- измерение индукционных и квазистатических петель гистерезиса,
- регистрацию кривых малоуглового вращения вектора намагниченности,
- измерение кривых циркулярной диагональной и недиагональной компонент тензора магнитоимпеданса,

- регистрацию распределения собственных магнитных полей рассеяния во внешних магнитных полях.

7. Получены комплексные результаты экспериментальных исследований поля анизотропии, константы магнитострикции, остаточных закалочных напряжений, концевых магнитных доменов и магнитоимпедансного отклика образцов микропроводов состава $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$.

8. Показано, что необходимые характеристики чувствительных элементов датчиков механических напряжений и магнитоимпедансных датчиков определяются близким к нулю значением константы магнитострикции, малой величиной поля анизотропии и условиями возбуждения чувствительного элемента.

9. Показано, что в микропроводах с геликоидальной анизотропией должен наблюдаться скачок ГМИ отклика при их переманчивании в продольных магнитных полях. Скачок исчезает при задании через микропровод дополнительного постоянного тока смещения ~ 1 мА.

10. Разработана конструкция и созданы прототипы стресс - чувствительных датчиков в которых, в качестве чувствительного элемента, используются микропровода состава $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$ с низкой, менее -5×10^{-7} константой магнитострикции.

11. Разработана конструкция и созданы прототипы недиагональных ГМИ-датчиков, в которых в качестве чувствительного элемента, используются микропровода состава $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$ с полем анизотропии $H_a < 1$ Э, коэрцитивной силой $H_c < 0.05$ Э, циркулярным диагональным ГМИ откликом > 300 % и крутизной преобразования 0.1 В/Э.

12. Разработан метод сканирующей ГМИ магнитометрии для изучения локальных магнитных полей рассеяния слабомагнитных объектов; продемонстрирована возможность измерений магнитных полей порождаемых коррозионными токами, образцами ансамблей магнитных наочастиц и дефектами в образцах аустенитных сталей.

Основные научные труды автора по теме диссертации:

Главы в книгах

1. Usov N.A. and Gudoshnikov S.A., Giant Magneto-Impedance Effect in Amorphous Ferromagnetic Microwire with a Weak Helical Anisotropy / Chapter 4 in Springer Ser. Materials, v. 252, "High performance soft magnetic materials", Ed.A.P. Zhukov, 2017, ISBN 978-3-319-49705-1
2. S. A. Gudoshnikov, L. V. Matveets. «HTS Applications: Progress in SQUID Microscopy and High Resolution Non-Destructive Evaluation» // In: A. V. Narlikar (ed.). High Temperature Superconductivity 2. Springer, Berlin, Heidelberg, 2004. Pp. 337–361.

Статьи в журналах

1. Odintsov V.I. Kozlov I.V., Elmanov G.N., A.E. Sarakueva, V.P. Tarasov, S. A. Gudoshnikov, Temperature compensation method of magnetoimpedance sensor based on polynomial fitting / Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2026, 655, 174341
2. Yu.B. Grebenshchikov, S. A. Gudoshnikov, Closure domain wall behavior in amorphous ferromagnetic microwires of external magnetic field / Journal of Alloys and Compounds, 2026, 1071, 188813
3. A.E. Sarakueva, G.E. Danilov, Yu.B. Grebenshchikov, V.I. Odintsov, A.V. Popova and S. A. Gudoshnikov, Magnetic Properties of Co₇₃Fe₄Si₁₂B₁₁ Ferromagnetic Microwires in Amorphous and Crystalline State / Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics V. 2025, 88 (1), S64–S69
4. Elmanov G.N., Kozlov I.V., Kutuzov L.V., Mashera V.S., Sarakueva A.E., Churyukanova M.N., Odintsov V.I., Gudoshnikov S.A., Nature of anomalous electrical resistance in Co₇₃-xFe₄CrxSi₁₂B₁₁ amorphous microwires / Intermetallics, 2024, 165, 108151, 1–13
5. Churyukanova, M.; Stepashkin, A.; Sarakueva, A.; Mashera, V.; Grebenshchikov, Y.; Odintsov, V.; Petrov, V.; Gudoshnikov, S., Application of Ferromagnetic Microwires as Temperature Sensors in Measurements of Thermal Conductivity / Metals 2023, 13(1), 109
6. Danilov, G.; Grebenshchikov, Y.; Odintsov, V.; Churyukanova, M.; Gudoshnikov, S. Measurements of Stray Magnetic Fields of Fe-Rich Amorphous Microwires Using a Scanning GMI Magnetometer / Metals, 2023, 13(4), 800
7. Gudoshnikov S, Danilov G.; Gorelikov E.; Grebenshchikov, Yu.; Odintsov V.; Venediktov S., Scanning magnetometer based on magnetoimpedance sensor for measuring a remnant magnetization of printed toners / Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, 2022, 204, 112045
8. Kozlov I., Elmanov G., Irmagambetova S., Prikhodko K., Svetogorov R., Odintsov V., Petrov V., Popova A., Gudoshnikov S., Advanced structure research methods of amorphous Co₆₉Fe₄Cr₄Si₁₂B₁₁ microwires with giant magnetoimpedance effect: Part 2 – Microstructural evolution and electrical resistivity change during DC Joule heating / Journal of Alloys and Compounds, 2022, 918, 165707
9. G.N. Elmanov, I.V. Kozlov, S.M. Irmagambetova, K.E. Prikhodko, R.D. Svetogorov, P.A. Chernavskii, A.A. Lukyanchuk, A.M. Shutov, O.A. Raznitsyn, V.P. Tarasov, S.A. Gudoshnikov, Advanced structure research methods of amorphous Co₆₉Fe₄Cr₄Si₁₂B₁₁ microwires with giant magnetoimpedance effect: Part 1 – Crystallization kinetics and crystal growth / Journal of Alloys and Compounds, 2021, 872, 159710

10. S.A. Gudoshnikov, V.I. Odintsov, B.Ya. Liubimov, S.A. Menshov, M.N. Churukanova, S.D. Kaloshkin, G.N. Elmanov, Method for evaluating the temperature of amorphous ferromagnetic microwires under Joule heating / *Measurement*, 2021, 182, 109783.2021
11. S.A. Gudoshnikov, V.I. Odintsov, A.V. Popova, Yu. B. Grebenshchikov, S.A. Menshov, B.Ya. Liubimov, V.S. Mashera and V.P. Tarasov, Influence of Joule heating on electrical resistivity in Co-rich amorphous microwires / *Materials Science & Engineering B*, 2021, 271, 115310
12. S. Gudoshnikov, Yu. Grebenshchikov, A. Popova, V. Tarasov, E. Gorelikov, B. Liubimov, Angle Magnetization Rotation Method for Characterizing Co-Rich Amorphous Ferromagnetic Microwires / *Actuators*, 2021, 10 (5), 93
13. S.A. Gudoshnikov, V.I. Odintsov, B. Ya Liubimov, S.A. Menshov, A.V. Popova, Correlation of electrical and magnetic properties of Co-rich amorphous ferromagnetic microwires after DC Joule heating treatment / *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 845, 156220
14. S. Gudoshnikov, V. Tarasov, B. Liubimov, V. Odintsov, S. Venediktov, A. Nozdrin, Scanning magnetic microscope based on magnetoimpedance sensor for measuring of local magnetic fields / *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2020, 510, 166938
15. I.V.Kozlov, G.N.Elmanov, K.E.Prihodko, L.V.Kutuzov, B.A.Tarasov, V.V.Mikhalchik, R.D.Svetogorov, V.S.Mashera, E.S.Gorelikov, S.A.Gudoshnikov, The evolution of structure and magnetoimpedance characteristics of amorphous $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$ microwires under heat treatment / *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2020, 493, 165681
16. V.A. Bautin, N.S. Kholodkov, A.V. Popova, S.A. Gudoshnikov, and N.A.Usov, Co-rich amorphous microwires with improved giant magnetoimpedance characteristics due to glass coating etching, *JOM*, Vol. 71, No. 9, 2019.
17. Popova A.V., Odintsov V.I., Menshov S.A., Kostitsyna E.V. , Tarasov V.P. , Zhukova V., Zhukov A., Gudoshnikov S.A., Continuous control of a resistance in Co-rich amorphous ferromagnetic microwires during DC Joule heating / *Intermetallics*, 2018, 99, 39-43
18. G.N.Elmanov, P.A.Chernavskii, I.V.Kozlov, P.S.Dzhumaev, E.V.Kostitsyna, V.P.Tarasov, A.S.Ignatov, S.A.Gudoshnikov, Effect of heat treatment on phase transformations and magnetization of amorphous $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$ microwires / *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 741, 648-655
19. V.A.Bautin, E.V.Kostitsyna, A.V.Popova, S.A.Gudoshnikov, A.S.Ignatov, N.A.Usov, Glass shell etching to control residual quenching stress in Co-rich amorphous ferromagnetic microwires / *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 731, 18-23
20. Kostitsyna E.V., Gudoshnikov S.A., Popova A.V., Petrzhik M.I., Tarasov V.P., Usov N.A., Ignatov A.S., Mechanical properties and internal quenching stresses in Co-rich

- amorphous ferromagnetic microwires / *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, v.707, 199-204
21. Usov N.A., Gudoshnikov S.A., Circular magnetization process in amorphous microwire with negative magnetostriction / *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2016, v.49, issue: 16, p.165001
 22. Gudoshnikov S., Ignatov A., Tarasov V., Gorbunov S. , Molokanov V., Chueva T., Usov N., Magnetoelastic properties of Co-based amorphous ferromagnetic microwires / *Physica Status Solidi (A) Applications and Materials Science*, 2016, v.213, issue: 2, 368-371
 23. Churyukanova M., Semenkova V., Kaloshkin S., Shuvaeva E.a, Gudoshnikov, S., Zhukova V., Shchetinin I., Zhukov A., Magnetostriction investigation of soft magnetic microwires / *Physica Status Solidi (A) Applications and Materials Science*, 2016, v.213, issue: 2, p.363-367
 24. Гудошников С.А., Бардин И.В., Баутин В.А., Ноздрин А.Г., Попова А.В., Прохорова Ю.В., Скомаровский В.С., Любимов Б.Я., Сеферян А.Г., Усов Н.А., Высокочувствительный сканирующий магнитометр на основе эффекта гигантского магнитного импеданса для измерений локальных магнитных полей коррозионных токов / *Письма в журнал технической физики*, 2016, том 42, выпуск 10, стр.47-53
 25. Zhukov A., Churyukanova M., Kaloshkin S., Semenkova V., Gudoshnikov S., Ipatov M., Talaat A., Blanco J.M., Zhukova V., Effect of annealing on magnetic properties and magnetostriction coefficient of Fe-Ni-based amorphous microwires / *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, v. 651, p.718-723
 26. Gudoshnikov S., Churyukanova M., Kaloshkin S., Zhukov A., Zhukova V., Usov N., Investigation of the properties of Co-rich amorphous ferromagnetic microwires by means of small angle magnetization rotation method / *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2015, v.387, p.53-57
 27. Churyukanova M., Kaloshkin S., Kostitsyna E., Shuvaeva E., Sudarchikova V., Zhukova V., Talaat A., Zhukov A., Gudoshnikov S., Correlation between thermal and magnetic properties of glass coated microwires / *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, T. 615, (S1), S242-S246
 28. Usov N.A., Gudoshnikov S.A., Magnetization reversal process and peculiarities of giant magneto-impedance effect in amorphous ferromagnetic microwire with helical anisotropy / *Physica Status Solidi (A) Applications and Materials Science*, 2014, v.211, issue:5, p.1055-1061
 29. Gudoshnikov S., Usov N., Nozdrin A., Ipatov M., Zhukov A., Zhukova V., Highly sensitive magnetometer based on the off-diagonal GMI effect in Co-rich glass-coated microwire /

Physica Status Solidi (A) Applications and Materials Science, 2014, v.211, issue:5, p.980-985

30. Usov N. A. and Gudoshnikov S. A., Giant magneto-impedance effect in amorphous ferromagnetic wire with a weak helical anisotropy: Theory and experiment / Journal of Applied Physics, 2013, 113, pp.243902 (1-10).
31. **Gudoshnikov S.**, Usov N., Zhukov A., Zhukova V., Palvanov P., Ljubimov B., Serebryakova O., Gorbunov S., Evaluation of use of magnetically bistable microwires for magnetic labels / Phys. status solidi A, 2011, 208 (3), pp.526-529
32. **Гудошников С.А.**, Венедиктов С.Н., Горбунов С.А., Козлов А.Н., Прохорова Ю.В., Серебрякова О.Н., Ситнов Ю.С., Скомаровский В.С., Автоматизированный вибромагнитометр / Приборы и техника эксперимента, 2010, №1, с.178-179
33. Гудошников С.А., Венедиктов С.Н., Горбунов С.А., Козлов А.Н., Прохорова Ю.В., Серебрякова О.Н., Ситнов Ю.С., Скомаровский В.С., Автоматизированный малогабаритный вибромагнитометр для исследований магнитомягких материалов, Измерительная техника, 2010 г. №1 с.57-60.
34. Gudoshnikov S.A., Grebenshchikov Yu.B., Ljubimov B.Ya., Palvanov P.S., Usov N.A., Zhukov A., Ipatov M., Gonzalez J., Ground state magnetization distribution and characteristic width of head to head domain wall in fe-rich amorphous microwire / Physica Status Solidi. A: Applications and Materials Science, 2009, T. 206 (4), 613-617
35. Gudoshnikov S.A., Ljubimov B.Ya., Palvanov P.S., Prokhorova Yu.V., Skomarovski V.S., Usov N.A., Torcunov A.V., Influence of applied tensile stress on the magnetic behaviour of co-rich amorphous microwires / Physica Status Solidi. A: Applications and Materials Science, 2009, T. 206 (4), 625-629
36. Gudoshnikov S., Usov N., Zhukov A., Gonzalez J., Palvanov P., Measurements of stray magnetic fields of amorphous microwires using scanning microscope based on superconducting quantum interference device / J. Magn. Magn. Mater. 2007, 316, pp. 188-191
37. Gudoshnikov S.A., Liubimov B.Ya., Matveets L.V., Mikhailenko A.P., Deryuzhkina Yu.V., Sitnov Yu.S., Snigirev O.V., Flux guide for high-*t_c* SQUID microscope with high spatial resolution / Physica C: Superconductivity and its Applications, 2002, V. 368, № 1-4, 66-69
38. Gudoshnikov S.A., Liubimov B.Ya., Matveets L.V., Snigirev O.V., Maresov A.G., Prokoshin A.F., Borisov V.T., Usov N.A., Study of amorphous ferromagnetic microwires using a scanning SQUID microscope / Physica C: Superconductivity and its Applications, 2002, V. 372-376, № 1, 271-273

39. Gudoshnikov S.A., Liubimov B.Ya., Deryuzhkina Yu.V., Matveets L.V., Snigirev O.V., Kalabukhov A.S., Ranchinski M.L., Schmidl F., Seidel P., HTS scanning SQUID microscope with high spatial resolution for room temperature samples / Physica C: Superconductivity and its Applications, 2002, V. 372-376, № 1. С. 166-169
40. Gudoshnikov S.A., Deryuzhkina Y.V., Rudenchik P.E., Sitnov Y.S., Bondarenko S.I., Shablo A.A., Pavlov P.P., Kalabukhov A.S., Snigirev O.V., Seidel P., Magnetic flux guide for high-resolution SQUID microscope / IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2001. V. 11, № 1 I, 219-222
41. Гудошников С.А., Матвеец Л.В., Магулин В.А., Снигирев О.В., Тишин А.М. , Сканирующая магнитометрия высокого разрешения на основе сверхпроводящего квантового интерферометра / Радиотехника и электроника, 2001, Т. 46, № 7, 793-805

Список РИД по теме исследования

1. Патент № 2863304 РФ В.И. Одинцов, С.А. Гудошников, А.Э. Саракуева, С.Н. Венедиктов, Способ компенсации температурной погрешности ГМИ-датчиков магнитного поля, дата приоритета 17.02.2026, опубликовано 01.06.2026, бюл. №16
2. Патент № 2860858 РФ В.И. Одинцов, С.А. Гудошников, А.Э. Саракуева, С.Н. Венедиктов, Температурный датчик сопротивления, дата приоритета 05.08.2025, опубликовано 23.04.2026, бюл. №12
3. Патент № № 2860726 РФ. В.И. Одинцов, А.Э. Саракуева, А.С. Амиантов, В.Г. Петров, С.А. Гудошников, Установка для отжига аморфных ферромагнитных микропроводов, дата приоритета 13.08.2024, опубликовано: 13.02.2026, бюл. № 5
4. Патент № 2840821 РФ. В.И. Одинцов, А.Э. Саракуева, С.А. Гудошников, Электронный терморегулятор на основе ферромагнитных микропроводов, дата приоритета 17.05.2024, опубликовано 28.05.2025, бюл. № 16
5. Патент № 2814644 РФ. Гудошников С. А., Данилов Г.Е., Одинцов В.И., Гребенщиков Ю.Б., Способ определения петель гистерезиса аморфных ферромагнитных микропроводов на основе железа, дата приоритета 18.10.2023, опубликовано 04.03.2024, бюл. № 7
6. Патент № 2696826 РФ. Одинцов В.И., Гудошников С.А., Любимов Б.Я., Меньшов С.А., Способ определения температуры аморфных ферромагнитных микропроводов при токовом нагреве, дата приоритета 25.12.2018, опубликовано 06.08.2019, бюл. № 22
7. Патент ЕР № 030754. Гудошников С.А.. Любимов Б.Я., Усов Н.А. Игнатов А.С..Тарасов В.П., Криволапова О.Н., Датчик измерения механических напряжений, дата выдачи 28.09.2018, бюл. №9.

8. Gudoshnikov, S.A. ,Llubimov, B.Y. ,Usov N.F., Ignatov, A.S. , Tarasov V.P.,Krivolapova, O.N.Golyshko N.T. International Application Published Under Patent Cooperation Treaty (PCT) WO 2015088372 A1 Mechanical Stress Sensor, 18.06.2015
9. Патент № 2654827 РФ, Гудошников С.А., Попова А.В., Фатеев В.М., Игнатов А.С., Тарасов В.П., Гореликов Е.С.. Криволапова О.Н., Датчик измерения механических деформаций, дата приоритета 23.11.2016, опубликовано 22.05.2018, бюл. №15
10. Патент № 2653563 РФ, Тарасов В.П., Гореликов Е.С., Криволапова О.Н., Хохлова О.В., Игнатов А.С.. Гудошников С.А.. Попова А.В.. Фатеев В.М., Датчик измерения механических деформаций, дата приоритета 14.06.2017, опубликовано 11.05.2018, бюл. №14.
11. Патент № 2632996 РФ, Гудошников С.А., Игнатов А.С., Попова А.В., Тарасов В.П., Усов Н.А., Способ измерения характеристик аморфных ферромагнитных микропроводов, дата приоритета 23.05.2016, опубликовано 11.10.2017, бюл. №22
12. Патент № 2552124 РФ, Гудошников С.А., Любимов Б.Я., Усов Н.А., Игнатов А.С., Тарасов В.П., Криволапова О.Н., Датчик измерения механических напряжений, дата приоритета 13.12.2013, опубликовано 10.06.2015, бюл. №16.
13. Патент № 130409 ПМ РФ, Гудошников С.А., Козлов А.Н., Усов Н.А., Магнитометр на эффекте гигантского магнитного импеданса, дата приоритета 12.02.2013, опубликовано 20.07.2013, бюл. №20.
14. Патент № 84587 ПМ РФ, Гудошников С.А., Любимов Б.Я.,Пальванов П.С., Усов Н.А., Устройство для измерения характеристик аморфных ферромагнитных проводов, дата приоритета 10.12.2008, опубликовано 10.07.2009, Бюл.№19.
15. Патент № 68713 ПМ РФ, Гудошников С.А., Любимов Б.Я., Усов Н.А., Жуков А.П., Ипатов М.П, Гонзалес Х.М.Э., Устройство для измерения характеристик АФМ, дата приоритета 06.07.2007, опубликовано 27.11.2007, бюл. №33
16. Патент № 2279689 РФ, Гудошников С.А., Козлов А.Н., Скомаровский В.С., Вибрационный магнитометр, дата приоритета 28.07.2004, опубликовано 10.07. 2006, бюл. №19
17. НОУ-ХАУ, № 07-366-2024, Козлов И.В., Гудошников С.А., Устройство, обеспечивающее подвод к микропроводу электрического тока и включающее функцию преднапряжителя, дата приоритета 27.08.2024, зарегистрировано в Депозитарии ноу-хау НИТУ МИСИС ОИС от 5 сентября 2024 г
18. НОУ-ХАУ, № 08-366-202, Козлов И.В., Гудошников С.А., Елманов Г.Н., Способ термической обработки аморфных сплавов и микропроводов системы Co-Fe-Cr-Si-B,

дата приоритета 27.08.2024, зарегистрировано в Депозитарии ноу-хау НИТУ МИСИС ОИС от 5 сентября 2024 г

19. НОУ-ХАУ, № 01-341-2026, С.А. Гудошников, И.В. Козлов, Г.Н. Елманов, Ю.Б. Гребенщиков, В.И. Одинцов, А.Э. Саракуева, Способ взаимного размещения температурного и магнитоимпедансного датчиков для компенсации температурной погрешности, зарегистрировано в Депозитарии ноу-хау НИТУ МИСИС ОИС от 03.03.2026.
20. Программа для ЭВМ № 2023682992, Гудошников С. А., Данилов Г.Е., Одинцов В.И., Гребенщиков Ю.Б., Программный комплекс для анализа магнитных полей рассеяния слабомagnetных объектов «H2omega», дата приоритета 18.10.2023, опубликовано 01.11.2023.

Цитируемая литература

1. D. C. Jiles, Recent advances and future directions in magnetic materials, Acta Mater. 51, 5907 (2003).
2. K. Mohri, F. B. Humphrey, L. V. Panina, Y. Honkura, J. Yamasaki, T. M. Hiram, Advances of amorphous wire magnetism over 27 years, Physica Status Solidi A, 206, № 4, 601–607 (2009)
3. 1.5. V. S. Larin, A. V. Torcunov, A. P. Zhukov, J. Gonzalez, M. Vazquez, and L. V. Panina, Preparation and properties of glass-coated microwires, J. Magn. Magn. Mater. 249, 39 (2002).
4. Chiriac H., Yamasaki J., Ovari T.A., Takajo M. —Magnetic domain structure in amorphous glass-covered wires with positive magnetostriction. IEEE Trans. Magn., 35 (1999) 3901-3903.
5. A. Zhukov, V. Zhukova, J.M. Blanco, A.F. Cobeno, M. Vazquez, J. Gonzalez. J. Magnetostriction in glass-coated magnetic microwires, Magn. Magn. Mater. 258-259 (2003) 151.
6. D. P. Makhnovskiy, L. V. Panina, and D. J. Mapps, Field-dependent surface impedance tensor in amorphous wires with two types of magnetic anisotropy: Helical and circumferential Phys. Rev. B 63, 144424 (2001).