



УВЕРЖДАЮ:

НИТУ МИСИС

Проректор по науке и инновациям

М. Р. Филонов

17 " ноября 2025 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу **Фукса Артема Андреевича**
«Образование нанокристаллов и доменная структура в аморфных сплавах с различным напряженным состоянием», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния»

Актуальность темы диссертационного исследования

Аморфные ферромагнитные сплавы - это новый класс магнитных материалов, существенно отличающихся от традиционных кристаллических сплавов аналогичного состава своей структурой и уникальными свойствами. Изготовленные методом Улитовского–Тейлора аморфные ферромагнитные микропровода на основе Co и Fe с диаметром металлической жилы несколько десятков микрон, покрытые тонкой стеклянной оболочкой, характеризуются высокими прочностными характеристиками и особыми магнитомягкими свойствами. В силу своих малых размеров аморфные микропровода весьма перспективны для использования в качестве сенсорных элементов различного рода датчиков и устройств. Так в микропроводах на основе кобальта с небольшой отрицательной константой магнитострикции, может наблюдаться эффект гигантского магнитного импеданса (ГМИ), на основе которого развиваются технологии создания миниатюрных высокочувствительных ГМИ-датчиков для измерения слабых магнитных полей. Микропровода на основе железа с положительной константой магнитострикции, демонстрируют эффект магнитной бистабильности, при котором перемагничивание микропровода происходит гигантским скачком Баркгаузена. Такие микропровода пригодны для создания на их основе магнитных меток, датчиков угла поворота и линейных перемещений. Аморфные материалы могут также служить основой для создания нанокристаллических материалов, магнитные и механические свойства которых существенно отличаются от свойств полностью кристаллического и аморфного состояния.

В диссертационной работе Фукса А.А. проведено исследование влияния внутренних напряжений, исходного магнитного состояния аморфных ферромагнитных микропроводов на основе железа и их термообработки на процесс формирования поверхностной нанокристаллической структуры и связанных с ней магнитной доменной структуры, гистерезисных и магнитоимпедансных свойств. Тема исследования является актуальной, как с точки зрения фундаментальных научных исследований, так и с точки зрения возможных практических приложений.

Научная новизна

Представленные в данной работе результаты количественного исследования зависимости магнитных характеристик аморфных ферромагнитных микропроводов на основе железа, при формировании в них поверхностной нанокристаллической структуры, обладают высокой степенью новизны. Впервые методом магнитно-силовой сканирующей микроскопии в аморфных ферромагнитных микропроводах на основе железа с положительной магнитострикцией подробно изучена эволюция поверхностной магнитной доменной структуры под действием внешнего магнитного поля. Предложена модель доменной структуры, учитывающая неоднородность распределения внутренних напряжений микропровода.

Исследован переход от аморфного состояния вблизи оси микропровода к нанокристаллическому состоянию на его поверхности. Показана возможность существенного увеличения эффекта гигантского магнитного импеданса в микропроводах на основе железа с поверхностной нанокристаллической структурой. Новыми являются результаты касающиеся получения микропроводов с градиентной аморфно-нанокристаллической структурой, которая формируется при нагреве под действием неоднородно распределенных внутренних механических напряжений.

Практическая значимость

Представленные в работе результаты исследования возникновения и устойчивого сосуществования аморфной и нанокристаллических фаз позволяют понять изменение радиального распределения внутренних напряжений в микропроводе. Получение образцов с аморфной сердцевиной, обладающей высокой прочностью, и внешней нанокристаллической оболочкой, обладающей магнитомягкими свойствами, могут расширить область применения микропроводов. Предложенный подход позволяет избежать свойственной нанокристаллическим материалам хрупкости. Полученные данные о величине эффекта ГМИ в микропроводах с приповерхностным нанокристаллическим слоем позволяют проектировать на их основе высокочувствительные датчики магнитного поля, одновременно чувствительные к внешней деформации.

Структура и основное содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и списка собственных публикаций. Полный объем работы составляет 146 страниц, включая 78 рисунков, 3 таблицы, 39 формул и 228 литературных ссылок.

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, выделяются ключевые положения, выносимые на защиту и показано научное и практическое значение полученных результатов.

В первой главе представлен обзор литературы, посвященной вопросам изготовления аморфных ферромагнитных микропроводов и лент и особенностям ферромагнетизма в них. Большое внимание уделено анализу связи механических напряжений и магнитной структуры и, особенно, условиям формирования нанокристаллических слоев в микропроводах и лентах. Уделено внимание исследованиям влияния механических напряжений на эффект гигантского магнитного импеданса и ферромагнитного резонанса, наблюдаемых в аморфных микропроводах, рассмотрены современные варианты технологического применения аморфных микропроводов.

Во второй главе приведено описание изучаемых объектов – аморфных микропроводов на основе железа, изготовленных методом Улитовского-Тейлора. Подробно описаны используемые в работе методы структурно-фазовых исследований: сканирующая и просвечивающая электронная микроскопия, рентгенофазовый анализ. Также с достаточной подробностью изложено описание примененных в работе методов исследования магнитных свойств: МСМ, измерений импеданса во внешнем магнитном поле, а также вибрационной магнитометрии. Для решения поставленных задач использовался целый комплекс современных методов исследования.

В третьей главе подробно описан процесс исследования трансформации поверхностной магнитной доменной структуры микропроводов с положительной магнитострикцией в зависимости от внешнего магнитного поля. Применение МСМ, имеющей более высокое разрешение по сравнению с традиционно применяемыми магнитооптическими методами позволило более детально исследовать доменную структуру приповерхностной области микропроводов. Важным результатом здесь является то, что формирование в приповерхностном объеме кольцевых доменов с радиальным направлением магнитного момента наблюдалось только под действием внешнего магнитного поля. Предложена модель поверхностной доменной структуры микропровода, учитывающая влияние возможных отклонений от цилиндрической формы, возникающих в процессе изготовления. Асимметрия внутренних напряжений указана в качестве причины возникновения лабиринтных и зигзагообразных доменов.

В четвертой главе приведены результаты исследований влияния внутренних механических напряжений на процесс нанокристаллизации аморфных микропроводов и лент на основе железа при их термообработке. Проведенные расчеты доли нанокристаллической фазы по сечению микропровода свидетельствуют об ускорении нанокристаллизации вблизи поверхности микропровода. Данный вывод впоследствии подтверждается экспериментальными результатами, полученными для микропроводов разных химических составов при различных условиях термообработки. Ключевым экспериментальным результатом в этой части работы представляются ПЭМ-изображения микроструктуры микропровода с центральной и приповерхностной частей микропровода. Проведение подобного эксперимента требовало больших методических усилий при изготовлении ламелей из разных областей микропровода с использованием фокусируемого ионного пучка, а также подготовке образцов к изготовлению данных ламелей, включавшей в себя химическое травление стеклянной оболочки микропровода, механическое шлифование и ионную полировку торцевой поверхности микропроводов.

Используя представления об ускорении нанокристаллизации в приповерхностном объеме микропроводов, были экспериментально определены условия термообработки, при которых центральная часть микропровода остаётся аморфной, а в приповерхностном объеме будет сформирована наноструктура.

Пятая глава посвящена изучению эффекта ГМИ и доменной структуры в микропроводах на основе Fe с частично кристаллическим приповерхностным слоем. Важным результатом, полученным в данной части работы, является достижение прироста импеданса на 50-120 % в широком диапазоне частот пропускаемого тока. Наибольшая величина эффекта ГМИ составила 150 % при 200 МГц, что является одним из рекордных значений эффекта, достигнутым в микропроводах данного типа. При этом результаты МСМ-измерений нанокристаллического приповерхностного слоя свидетельствуют о малости радиальной компоненты магнитных моментов доменов. Формирование кольцевых доменов с радиальным магнитным моментом наблюдается только во внешнем поле. Показано, что наибольший ГМИ эффект соответствует условиям термообработки, при которых образуется самый тонкий доменный слой.

Апробация, публикации и рекомендации по использованию результатов

Основные результаты, представленные в диссертационной работе, обсуждались в докладах на ряде российских и международных научных конференций и школ. По теме диссертации опубликовано 7 работ в авторитетных научных журналах, включенных в перечень рецензируемых научных изданий ВАК и индексируемых международными базами научного цитирования.

Результаты работы могут быть полезны для организаций, занимающихся научными и прикладными исследованиями в области физики магнитных явлений и материаловедения, например, в ИРЭ РАН, НИТУ «МИСИС», НИЯУ МИФИ, МИРЭА и ряде других организаций.

Соответствие работы требованиям, предъявляемым к диссертациям

Диссертационная работа Фукса Артёма Андреевича на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук обладает внутренним единством и является законченной научно-исследовательской работой, выполненной на высоком научном уровне. Существенным является и личный вклад автора. Применение комплекса современного экспериментального оборудования обеспечивает высокую достоверность полученных результатов. Представленные в диссертации новые значимые результаты определяют научную ценность работы. Сформулированные положения и выводы позволили выяснить роль исходного напряжённого состояния аморфных ферромагнитных микропроводов на основе железа в процессе формирования нанокристаллов и последующих изменений магнитных гистерезисных и высокочастотных свойств и доменной структуры. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

При рассмотрении диссертации возникли следующие вопросы и замечания:

1. Из текста диссертации осталось неясным где были изготовлены исследуемые образцы аморфных ферромагнитных микропроводов и лент на основе железа.
2. Стоило бы лучше обосновать применимость выбранной модели для расчета распределения внутренних напряжений в металлической жиле микропровода. Такие подходы предпринимались и раньше, стоило бы критически рассмотреть другие модели тоже.
3. Часть исследований образцов микропроводов проведены с удаленной стеклянной оболочкой, а часть исследований с сохранением стеклянной оболочки. На какие свойства микропроводов на основе железа влияет стеклянная оболочка? Какие предлагаются рекомендации по сохранению/удалению стеклянной оболочки при практическом использовании исследуемых микропроводов? Насколько отличается магнитострикция исследованных образцов сплавов, и как это влияет на характеристики доменной структуры микропроводов?
4. Из представленных на Рис.5.4 гистерезисных кривых непонятно, наблюдался ли в исследуемых микропроводах гигантский скачок Баркгаузена, характерный для данного типа микропроводов.

Сделанные замечания не меняют общего положительного впечатления от диссертационной работы. Диссертационная работа Фукса Артёма Андреевича обладает внутренним единством и является законченной научно-исследовательской

работой, выполненной на высоком научном уровне. Применение комплекса современного экспериментального оборудования обеспечивает высокую достоверность полученных результатов. Представленные в диссертации новые значимые результаты определяют научную ценность работы. Автореферат диссертации полностью отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа Фукса А.А. «Образование нанокристаллов и доменная структура в аморфных сплавах с различным напряженным состоянием», полностью удовлетворяет требованиям ВАК, соответствует паспорту специальности 1.3.8 «Физика конденсированного состояния» и отвечает требованиям, п.п. 9-14 «Положения о присуждении учёных степеней» утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Фукс Артём Андреевич, несомненно, заслуживает присуждения искомой степени кандидат физико-математических наук по специальности 1.3.8 «Физика конденсированного состояния».

Доклад по материалам диссертации Фукса А.А. был заслушан 11 ноября 2025 г. и получил положительную оценку на объединенном семинаре кафедры физической химии и НИЦ композиционных материалов с приглашением специалистов других подразделений университета (Протокол заседания кафедры №3-25/26).

Отзыв составил:

Директор Института новых материалов, директор

НИЦ композиционных материалов, д.ф.-м.н. по

специальности 01.04.07 «Физика твердого тела»

Тел.: +7 495 638-44-22

Эл. почта: kaloshkin@misis.ru

С.Д.Калошкин