

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Фукса Артёма 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 диссертации

Современные технологии, такие как интернет вещей, системы беспроводной связи (включая 5G/6G), датчики магнитного поля, биомедицинские сенсоры и элементы энергоэффективной силовой электроники, предъявляют высокие требования к магнитным материалам. Они должны сочетать высокие магнитные свойства (низкие потери на перемагничивание, высокая магнитная проницаемость, управляемая коэрцитивная сила) с миниатюрными размерами, возможностью работы в высокочастотном диапазоне и стабильностью в различных условиях эксплуатации. Аморфные и нанокристаллические микропровода на основе железа являются одними из наиболее перспективных кандидатов для удовлетворения этого спроса благодаря своим уникальным магнитным свойствам и геометрии. Исходное аморфное состояние микропроводов, полученных методом Улитовского-Тейлора, часто обладает высокими внутренними механическими напряжениями, что ограничивает достижение оптимальных магнитно-мягких свойств. Контролируемый процесс нанокристаллизации, приводящий к формированию нанокристаллов α -Fe(Si) в аморфной матрице, позволяет кардинально улучшить магнитные характеристики материала. Однако результат этого процесса критически зависит от исходного напряженного состояния материала, что и составляет центральную проблему данной диссертации. В связи с выше сказанным, диссертация Фукса А.А. «Определение влияния исходного напряжённого состояния аморфных ферромагнитных микропроводов на основе железа на процесс формирования нанокристаллов и последующие изменения магнитных гистерезисных и высокочастотных свойств и доменной структуры» является **актуальной** и соответствует приоритетным направлениям развития современного физического материаловедения.

Структура диссертации

Структура диссертации включает введение, пять глав, заключение с изложением ключевых результатов и библиографический список. Общий объём работы — 146 страниц, она содержит 78 иллюстраций и 3 таблицы. Список использованной литературы включает 228 источников.

Введение включает в себя обоснование темы исследования, цель, основные задачи и положения, выносимые на защиту, научную новизну и практическую значимость, сведения об апробации результатов, личном вкладе, структуре и объёме диссертации.

В **первой главе** представлен литературный обзор, посвящённый методам производства, магнитным свойствам, нанокристаллизации и механическим напряжениям в аморфных ферромагнитных сплавах. Проанализировано влияние напряжений на формирование наноструктуры, а также явления гигантского магнитного импеданса и ферромагнитного резонанса в аморфных микропроводах. В конце главы обсуждаются современные возможности технологического применения аморфных сплавов.

Во **второй главе** рассмотрены особенности получения исследуемых аморфных микропроводов. Подробно описаны используемые в работе методы структурно-фазовых исследований: просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) и сканирующая электронная микроскопия (СЭМ), рентгенофазовый анализ. Измерения импеданса микропроводов в данной работе проводились с использованием векторного анализатора цепей. Магнитные характеристики микропроводов измеряли с помощью построения петель магнитного гистерезиса и определения соотношения между остаточной намагниченностью и

намагниченностью насыщения. Исследования доменной структуры боковой поверхности микропроводов проводили методом магнитно-силовой сканирующей микроскопии (МСМ).

В **третьей главе** содержатся результаты исследования доменной структуры аморфных микропроводов $\text{Fe}_{73,9}\text{B}_{13,2}\text{Si}_{10,9}\text{C}_2$, $\text{Fe}_{77,5}\text{Si}_{7,5}\text{B}_{15}$ и $\text{Fe}_{70}\text{Si}_{18}\text{B}_9\text{Cu}_1\text{Nb}_2$ с положительной магнитострикцией, полученных методом Улитовского-Тейлора. Исследуемые образцы имели аморфную структуру. Установлено, что отклонения от цилиндрической формы, наблюдаемые у проводов с соотношением $d/D > 0.6$, напрямую влияют на доменную структуру. В слабых магнитных полях в приповерхностном слое микропроводов $\text{Fe}_{73,9}\text{B}_{13,2}\text{Si}_{10,9}\text{C}_2$ и $\text{Fe}_{77,5}\text{Si}_{7,5}\text{B}_{15}$ обнаружена зигзагообразная доменная структура. На основании исследований установлено, что в микропроводах $\text{Fe}_{70}\text{Si}_{18}\text{B}_9\text{Cu}_1\text{Nb}_2$ диаметром 15 мкм доменная структура характеризуется касательной ориентацией магнитных моментов к поверхности микропроводов. Об этом свидетельствует отсутствие радиальных доменов, а также низкоинтенсивный фазовый контраст и незначительная разница в интенсивности на МСМ-изображениях. В результате воздействия магнитного поля вдоль оси микропровода в нем образуются кольцевые домены с радиальной ориентацией магнитных моментов. Были зафиксированы следующие диапазоны ширин кольцевых доменов для разных материалов: для сплава $\text{Fe}_{73,9}\text{B}_{13,2}\text{Si}_{10,9}\text{C}_2$ ширина составила 1-5 мкм, $\text{Fe}_{77,5}\text{Si}_{7,5}\text{B}_{15}$ – 2,5-5 мкм, $\text{Fe}_{70}\text{Si}_{18}\text{B}_9\text{Cu}_1\text{Nb}_2$ – 1-4,5 мкм. Исследование микропроводов $\text{Fe}_{77,5}\text{Si}_{7,5}\text{B}_{15}$ с соотношением $d/D = 0.80$ выявило неоднородность приповерхностной доменной структуры. Обнаруженные вариации объясняются взаимосвязью между доменной структурой и распределением внутренних напряжений, которое, в свою очередь, зависит от геометрии образца. Для описания представленных результатов предложена модель, учитывающая влияние отклонения от идеальной цилиндрической формы образца на формирование доменной структуры в приповерхностном слое микропровода с положительной магнитострикцией.

В **четвертой главе** представлены результаты исследования влияния внутренних механических напряжений на особенности нанокристаллизации аморфных микропроводов на основе железа ($\text{Fe}_{73,9}\text{B}_{13,2}\text{Si}_{10,9}\text{C}_2$, $\text{Fe}_{77,5}\text{Si}_{7,5}\text{B}_{15}$ и $\text{Fe}_{70}\text{Si}_{18}\text{B}_9\text{Cu}_1\text{Nb}_2$) при термической обработке. На основе распределения компонент тензора внутренних напряжений по сечению микропроводов было определено пространственное распределение доли нанокристаллической фазы. Результаты показывают, что сжимающие напряжения в приповерхностной области микропроводов способствуют ускорению процесса нанокристаллизации. При этом в центральной части микропровода процессы нанокристаллизации затруднены из-за действия, главным образом, растягивающих напряжений.

Пятая глава посвящена изучению влияния приповерхностной нанокристаллизации на величину эффекта гигантского магнитного импеданса (ГМИ), магнитные гистерезисные свойства и доменную структуру микропроводов состава $\text{Fe}_{70}\text{Si}_{18}\text{B}_9\text{Cu}_1\text{Nb}_2$. Показано, что нанокристаллизация поверхностного слоя микропровода приводит к значительному (на 50–120%) росту ГМИ в широком частотном диапазоне, с пиковым приростом импеданса $\Delta Z/Z = 150\%$ на частоте тока 200 МГц. В связи с процессом нанокристаллизации в приповерхностной области микропровода фиксируется уменьшение объема поверхностного доменного слоя. При этом магнитные моменты приповерхностных доменов направлены касательно к боковой поверхности. Формирование радиальных кольцевых доменов происходит исключительно под действием внешнего магнитного поля.

В конце диссертации представлено **заключение**, благодарности и **список литературы**.

Научная новизна полученных результатов.

К наиболее интересным и важным научным результатам, а также практически значимым достижениям диссертационной работы следует отнести следующие:

1. Методом магнитно-силовой сканирующей микроскопии исследована приповерхностная доменная структура аморфных микропроводов на основе железа с положительной магнитострикцией. В развитие ранее проведенных магнитооптических исследований показано, что формирование в приповерхностном объеме кольцевых доменов с

радиальным направлением магнитного момента происходит только под действием внешнего магнитного поля. В отсутствие внешнего магнитного поля в приповерхностном слое микропроводов с положительной магнитострикцией впервые наблюдались лабиринтные и зигзагообразные домены, а также домены, в которых преобладают циркулярная и аксиальная компоненты магнитного момента.

2. Предложена модель доменной структуры поверхностного слоя микропровода, учитывающая асимметрию в распределении внутренних напряжений, возникающую в результате неоднородного охлаждения микропровода в процессе изготовления.

3. Проведены расчёты кинетики нанокристаллизации с учётом неоднородного распределения внутренних механических напряжений по сечению микропровода и экспериментально продемонстрировано, что при нагреве аморфных микропроводов возможно формирование градиентной аморфно нанокристаллической структуры, состоящей из аморфной центральной части и нанокристаллизованного приповерхностного слоя.

4. В микропроводах состава $\text{Fe}_{70}\text{Si}_{18}\text{B}_9\text{Cu}_1\text{Nb}_2$ с градиентной наноструктурой был достигнут прирост импеданса $\Delta Z/Z = 150\%$ на частоте тока 200 МГц, что является одним из рекордных значений эффекта ГМИ, полученных в микропроводах на основе железа.

Достоверность полученных результатов

Достоверность представленных в диссертационной работе результатов и сделанных выводов обеспечивается использованием современного комплекса экспериментальных методик, таких как методы прецизионного локального анализа микроструктуры с помощью просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии. В диссертации продемонстрировано квалифицированное применение рентгеновского дифракционного метода, а также методов измерения частотных зависимостей импеданса и определения гистерезисных свойств микропроводов. В диссертации наблюдается согласие между результатами, полученными различными экспериментальными методиками, а также между данными эксперимента и теоретическими оценками. Результаты исследования прошли корректную статистическую обработку и получили обоснование в рамках современных теоретических подходов физики конденсированного состояния. Полученные данные представляют **научный и практический интерес** для специалистов в области физики твёрдого тела и исследования магнитных материалов. Результаты работы могут быть применены в научно-исследовательской работе академических и отраслевых предприятий, а также в образовательной деятельности высших учебных заведений (ИМЕТ РАН, ИФТТ РАН, ФГУП «ЦНИИЧермет им. И.П. Бардина», ИФМ УрО РАН, РТУ МИРЭА, НИТУ «МИСиС», МГУ, НИЯУ МИФИ и др.).

Замечания по диссертационной работе

1. Автор диссертации исследует доменную структуру микропроводов методом магнитно-силовой сканирующей микроскопии. В главе 2 автор утверждает, что перепад высот, вызванный цилиндрической формой образца, не будет приводить к существенным различиям в получаемых изображениях доменной структуры у края и в центре исследуемой области микропровода. Данное предположение требует дополнительного подтверждения и аргументации.

2. В главе 4 автор диссертации проводит теоретические расчеты термодинамических особенностей формирования нанокристаллов в микропроводе (например, энергии Гиббса образования зародыша критического размера и др.) из предположения, что нанокристаллы образуются по гомогенному механизму и имеют сферическую форму. Возникает вопрос, насколько точны данные расчеты, если в условиях наличия макронапряжений в микропроводе, как правило, наблюдается анизотропный рост нанокристаллов, а также для аморфных сплавов типа Файнмет характерно наличие кластеров Си.

3. В диссертации проведены расчеты распределения объёмной доли нанокристаллической фазы по радиусу микропровода (рисунок 4.7). Из текста диссертации

не до конца понятно, наблюдалась ли количественная корреляция между теоретическими расчетами объемной доли кристаллической фазы и экспериментальными результатами?

4. В работе встречаются опечатки и стилистические ошибки (например, у ссылки [137] неверно указан год публикации др.), а также не проведена расшифровка микродифракционных ПЭМ изображений (например, рис 4.12).

Данные замечания не влияют на положительную оценку диссертационной работы. Диссертация оформлена надлежащим образом, результаты последовательно изложены.

Заключение.

Диссертация представляет законченную научно-исследовательскую работу, она выполнена на высоком научном уровне. Научная ценность работы определяется целым рядом полученных в ней новых и значимых результатов, а также чётко сформулированными и доказанными научными положениями и выводами, которые позволяют прояснить сложную природу влияния исходного напряжённого состояния аморфных ферромагнитных микропроводов на основе железа на процесс формирования нанокристаллов и последующие изменения магнитных гистерезисных и высокочастотных свойств и доменной структуры. Автореферат диссертации и публикации диссертанта правильно и полно отражают 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»

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния», доцент, профессор кафедры наноэлектроники Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет»

07 июля 2025 г.



Сундеев Роман Вячеславович

Согласен на обработку персональных данных

Подпись Сундеева Р.В. заверяю

Ученый секретарь РТУ МИРЭА



Н.В. Милованова

Контактная информация:

Почтовый адрес: 119454 г. Москва, проспект Вернадского, д. 78

Адрес электронной почты: sundeev55@yandex.ru