

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».

Диссертационная работа Артёма Андреевича Фукса посвящена изучению образования нанокристаллов и доменной структуре в аморфных сплавах с различным напряженным состоянием на примере ферромагнитных микропроводов в стеклянной оболочке. Данная тема исследования, несомненно, является **актуальной**. Дело в том, что аморфные ферромагнитные микропровода, помимо серьезного теоретического интереса, обладают важными практическими свойствами, такими как естественный ферромагнитный резонанс (который может использоваться для создания поглощающих экранов в СВЧ диапазоне), прямоугольной петлей гистерезиса, низкой коэрцитивностью (что имеет огромное значение для разработки чувствительных датчиков магнитного поля, в том числе, магнитного поля Земли), и т.д. Весьма интересными являются возможности использования таких микропроводов, в стеклянной оболочке, для биологически совместимых приложений, поскольку часто возникает необходимость безопасного введения электрических зондов в ткани живого организма. Очень важно также использование аморфных микропроводов, например, в измерительной технике в качестве датчиков растяжения-сжатия, встраиваемых в реальные строительные конструкции, где подобные датчики могут иметь определенные преимущества по сравнению известными резистивными датчиками.

Цель работы была поставлена достаточно четко и состояла в определении 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.

Объектами данной диссертационной работы являлись аморфные и нанокристаллические ферромагнитные микропровода четырех составов: $\text{Fe}_{77.5}\text{Si}_{7.5}\text{B}_{15}$, $\text{Fe}_{73.9}\text{B}_{13.2}\text{Si}_{10.9}\text{C}_2$, $\text{Fe}_{70}\text{Si}_{18}\text{B}_9\text{CuNb}_2$, $\text{Fe}_{73.8}\text{Si}_{13}\text{B}_{9.1}\text{CuNb}_{3.1}$ с диаметром сердцевин от 15 до 20 мкм и толщиной стеклянной оболочки от 2.5 до 7 мкм, а также аморфная лента последнего сплава толщиной 16-18 мкм.

Такие сплавы, полученные методом Улитковского-Тейлора, характеризуются положительной магнитострикцией. Для адекватной интерпретации свойств подобных изделий крайне важны систематические структурные исследования в области физики твердого тела.

Для достижения поставленной цели, в ходе выполнения исследований, А.А. Фуксу удалось успешно решить несколько важных задач: (i) Изучить доменную структуру исходных аморфных микропроводов на основе железа методом магнитно-силовой сканирующей микроскопии. (ii) Выполнить расчёты кинетики нанокристаллизации микропровода с учётом неоднородного по объёму распределения внутренних механических напряжений. (iii) Провести эксперименты по получению с использованием термообработки микропровода с градиентной аморфно-нанокристаллической структурой: аморфной структурой в центральной части микропровода и частично кристаллическим приповерхностным слоем. (iv). Изучить магнитные гистерезисные свойства и доменную структуру микропроводов с градиентной наноструктурой, а также влияние подобной наноструктуры на эффект гигантского магнитного импеданса.

Эти задачи и способы их решения достаточно подробно отражены в содержании диссертации.

Структура диссертации

Диссертация А.А. Фукса состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы, состоящего из 228 наименований. Объем диссертации составляет 146 страниц, включая 78 рисунков и три таблицы.

Во введении сформулирована цель и задачи работы, основные положения, выносимые на защиту, обоснована актуальность исследований и представлена научная новизна. Приведены сведения о структуре и объеме работы, о ее научной и практической значимости, о личном вкладе автора, апробации, имеется список основных публикаций автора по теме диссертационной работы.

Первая глава содержит обзор актуальных теоретических и экспериментальных данных, касающихся моделей структуры аморфных металлических сплавов и их свойств, изменений структуры аморфных сплавов, происходящих в результате внешних воздействий. Из литературного обзора логичным образом обосновывается цель и задачи диссертационной работы. **Первая глава** диссертации носит обзорный характер, посвященный способам изготовления аморфных ферромагнитных микропроводов и лент, вопросам ферромагнетизма и магнитных свойств аморфных сплавов в целом, нанокристаллизации аморфных сплавов, в том числе под влиянием механических напряжений, а также наблюдаемым в аморфных микропроводах ферромагнитным резонансом и эффектом гигантского магнитного импеданса. Помимо этого, в первой главе рассмотрены современные варианты технологического применения аморфных микропроводов.

Автор тщательно анализирует имеющиеся литературные источники, посвященные изучению свойств аморфных ферромагнитных микропроводов, их магнитной доменной структуре, напряженному состоянию, методикам изготовления микропроводов и вариантам их применения в электронных устройствах, а также обосновывает необходимость дальнейших исследований в изучаемой области знания.

Во второй главе описываются основные методики подготовки и исследования микропроводов, включая их термическую обработку. Изученные в рамках диссертационной работы микропровода были исследованы в двух видах: в стеклянной оболочке и после её удаления. Использованный подход позволил А.А. Фукусу изучить влияние стеклянной оболочки на изменение напряженного состояния и магнитные свойства таких изделий.

В третьей главе исследуется доменная структура приповерхностного слоя аморфных микропроводов на основе железа методом магнитно-силовой сканирующей микроскопии. Описано возникновение зигзагообразных поверхностных доменов, и рассмотрены возможные причины этого явления.

В четвертой главе представлены результаты исследования влияния внутренних механических напряжений на процесс нанокристаллизации при нагреве аморфных микропроводов на основе железа и приведены результаты расчётов кинетики кристаллизации, учитывающие неоднородное распределение напряжений по сечению микропровода, а также главные экспериментальные результаты по созданию микропроводов с частично кристаллическим приповерхностным слоем.

В пятой главе находятся результаты экспериментов по исследованию эффекта гигантского магнитного импеданса в микропроводах с частично кристаллическим приповерхностным слоем. Приведены экспериментальные результаты по магнитным гистерезисным свойствам и доменной структуре, полученные методами вибрационной магнитометрии и магнитно-силовой сканирующей микроскопии.

По каждой главе имеются убедительные выводы.

В заключении сформулированы основные выводы всей диссертационной работы.

Среди наиболее значимых результатов, полученных в данной диссертационной работе, можно отметить следующее:

1. Впервые методом магнитно-силовой сканирующей микроскопии исследована приповерхностная доменная структура аморфных микропроводов на основе железа с положительной магнитострикцией. В итоге, эта методика оказалась более чувствительной, чем ранее применяемые подходы.

В отсутствие внешнего магнитного поля в приповерхностном слое микропроводов с положительной магнитострикцией впервые наблюдались лабиринтные и зигзагообразные домены, а также домены, в которых превалируют круговая и аксиальная компоненты магнитного момента.

2. Обнаружено, что в слабых магнитных полях доменная структура приповерхностного объёма микропроводов $\text{Fe}_{73,9}\text{B}_{13,2}\text{Si}_{10,9}\text{C}_2$ и $\text{Fe}_{77,5}\text{Si}_{7,5}\text{B}_{15}$ представляет собой совокупность зигзагообразных доменов, в то время как в микропроводах $\text{Fe}_{70}\text{Si}_{18}\text{B}_9\text{CuNb}_2$ домены с радиальным направлением магнитного момента в слабых полях не наблюдаются.

3. Установлены такие условия термообработки проводов, которые обеспечивают возникновение нанокристаллической структуры в приповерхностном слое микропровода при сохранении аморфной структуры в его центральной части.

4. Автором диссертационной работы при экспериментальном изучении процесса нагрева аморфных микропроводов убедительно продемонстрирована возможность формирования градиентной аморфно-нанокристаллической структуры, состоящей из аморфной центральной части и нанокристаллического приповерхностного слоя.

Вышеуказанные результаты обладают существенной новизной и представляют большую научную и практическую значимость. Достоверность этих результатов не вызывает сомнений, поскольку они были воспроизведены в достаточном количестве опытов.

К данной работе имеется небольшой ряд вопросов и замечаний.

Стр. 90. В тексте диссертации написано: "Хотя, данный анализ и не учитывает перераспределение внутренних напряжений в объёме микропровода после химического травления, отсутствие доменов с радиальным направлением магнитного момента в нулевом магнитном поле ... свидетельствует об уменьшении радиальной анизотропии."

Хотелось бы узнать, проводились ли оценки степени перераспределения внутренних напряжений в объёме микропровода после химического травления и какие были получены результаты?

К тексту диссертации также имеется ряд технических замечаний.

Например, частое употребление слэнговых терминов типа "околонулевое", вместо "отличное от нуля" или "циркулярная", вместо "круговая".

Стр. 20. 5 строка снизу "случайно", вместо "случайной".

Стр. 21. 7 строка снизу "случайно", вместо "случайной".

Стр. 27. В предложении: "В одной из работ [50] было подтверждено, что магнитная структура аморфного микропровода $\text{Fe}_{73,9}\text{Si}_{10,9}\text{B}_{13,2}\text{C}_2$ с положительной магнитострикцией из центрального домена и поверхностного доменного слоя с радиальным направлением магнитных моментов. Пропущено слово "состоит".

Поскольку величина внутренних напряжений в ленте существенно ниже, чем в микропроводе [82]., "Поэтому" - лишнее слово после запятой.

Стр. 83. Вместо "...углубление в поверхности..." лучше было бы сказать "...в поверхностном слое".

Стр. 109. Не ясно, что понимает автор под термином "немагнитная глубина скин-слоя".

Стр. 118. Написано "микрон", вместо "мкм".

Литература:

[14] Надо страница 222, вместо 224.

[27] Надо 278 стр. вместо 277.

- [137] Надо год 2000 вместо 200.
[181] Надо 736 страниц вместо 740.
[190] Надо 110 страниц вместо 114
[196] Надо год 1998, вместо 2011.

Заключение

Однако сделанные замечания не умаляют достоинства данной диссертации и не могут повлиять на общую положительную оценку работы А.А. Фукса. Диссертация содержит исчерпывающий набор литературных ссылок на публикации, имеющих прямое отношение к теме исследования, написана достаточно понятным языком и очень хорошо оформлена.

Результаты диссертационной работы были изложены в научных публикациях в зарубежных и отечественных журналах, Основные результаты диссертации опубликованы в 7 печатных работах, входящих в перечень ВАК, а также были представлены на 9 российских и международных конференциях и школах. Автореферат и опубликованные статьи полностью отражают основное содержание диссертационной работы.

В целом, диссертационная работа А.А. Фукса представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, выполненную на высоком научном уровне, содержит новые экспериментальные результаты, обладает единой и цельной тематикой и соответствует всем критериям и требованиям раздела II «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор, Фукс Артём Андреевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «физика конденсированного состояния».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук по специальности 01.04.17 – «Химическая физика, в том числе физика горения и взрыва», старший научный сотрудник,
ведущий научный сотрудник лаборатории № 14
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
«Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения имени А.Г. Мержанова
Российской академии наук»



Морозов Юрий Георгиевич

17__ октября 2025 г.

Согласен на обработку персональных данных

Подпись Морозова Ю.Г. заверяю

Ученый секретарь



Петров Е.В.

Контактная информация:

Почтовый адрес: 142432, Московская область. г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 8
Телефон: (49652) 46368,
Адрес электронной почты: morozov@ism.ac.ru