

*На правах рукописи*



Михалицына Евгения Александровна

**МАГНИТНАЯ АНИЗОТРОПИЯ И ГИСТЕРЕЗИСНЫЕ СВОЙСТВА  
АМОРФНЫХ И НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК Fe-M-Cu-Si-B  
(M: Nb, NbMo, W)**

Специальность 01.04.11 Физика магнитных явлений

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Екатеринбург – 2018

Работа выполнена на кафедре магнетизма и магнитных наноматериалов Института естественных наук и математики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,  
доцент,  
**Катаев Василий Анатольевич**

Официальные оппоненты: **Комогорцев Сергей Викторович**,  
доктор физико-математических наук, доцент, Институт Физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук - обособленное подразделение ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (г. Красноярск), старший научный сотрудник Лаборатории физики магнитных пленок


**Моисеев Алексей Анатольевич**, кандидат физико-математических наук, ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет» (г. Иркутск), доцент кафедры физики Педагогического института

Ведущая организация: ФГБУН Институт металлургии и материаловедения имени А.А. Байкова Российской академии наук (г. Москва)

Защита состоится «21» июня 2018 г. в 11.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.285.24 на базе ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620000, г. Екатеринбург, пр. Ленина, 51, комн. 248 (зал заседаний диссертационного совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <http://lib.urfu.ru/mod/data/view.php?id=51&rid=278173>.

Автореферат разослан «    » \_\_\_\_\_ 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук, доцент  — Овчинников А.С.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

В современной технике и технологиях достаточно давно имеет место тенденция к миниатюризации устройств, одним из способов достижения которой является переход к функциональным средам в виде тонких пленок. Важное значение в этом классе объектов имеют тонкие магнитные пленки, используемые в качестве функциональной среды для сенсорных устройств [1–3]. Внедрение в микроэлектронику тонкопленочных сенсоров, в том числе на основе магнитомягких материалов, коммерчески является более привлекательным из-за уменьшения стоимости и возможности применения в более широком диапазоне устройств.

Среди магнитомягких материалов наибольшую популярность приобрели аморфные и нанокристаллические ленты сплавов на основе системы Fe-M-Cu-Si-B, где M – переходный металл [4, 5]. Данные материалы обладают высокими значениями индукции насыщения и магнитной проницаемости наряду с низкими значениями коэрцитивной силы и удельных магнитных потерь. Магнитные свойства данных сплавов обусловлены их структурой, которая представляет собой зерна ОЦК-Fe(Si), распределенные в остаточной аморфной матрице. Размер зерен является критически важным при формировании магнитных свойств материала, что было объяснено в рамках модели случайной анизотропии [6].

Стремление реализовать магнитомягкие свойства лент сплавов типа Fe-M-Cu-Si-B в тонкопленочных объектах обуславливает новую волну интереса к данному материалу. Однако при изучении тонких пленок возникают технологические задачи, требующие решения для достижения оптимальных магнитных свойств пленок: выбор типа подложки, температура подложки, рабочее давление в вакуумной камере, величина технологического поля. В последнее время большинство работ, посвященных тонким пленкам Fe-M-Cu-Si-B, касались поиска подходящих режимов термомагнитной обработки, установление влияния микроструктуры, механических напряжений и морфологии поверхности на магнитные свойства, установление толщинных зависимостей магнитных свойств. В частности, на примере пленок данного сплава с Nb было показано, что в процессе отжига кристаллизация в тонких пленках начинается при более низких температурах, чем в лентах, а также отлична его кинетика. В тонкопленочном состоянии возрастает роль неровностей поверхности, оказывающих влияние на задержку смещения доменных стенок, что влияет на гистерезисные свойства пленок. Из теоретических положений следует, что при уменьшении толщины пленки меньше, чем корреляционная длина обменной связи, усредне-

ние эффективной константы магнитной анизотропии начинает происходить по меньшему объему, что приводит к росту ее величины и, как следствие, к увеличению коэрцитивной силы.

Несмотря на то, что существующие исследования охватывают множество вопросов (от способов получения тонких пленок до исследования их магнитных свойств), стабильность и воспроизводимость свойств тонких пленок, исследование влияния толщины на процесс кристаллизации, а также установление связи между микроструктурой и магнитными свойствами тонких пленок до сих пор остаются не до конца решенными задачами, представляющими как фундаментальный, так и практический интерес.

Таким образом, актуальность данной работы заключается в установлении закономерностей влияния тонкопленочного состояния на структуру и магнитные свойства сплава Fe-M-Cu-Si-B (M: Nb, NbMo, W). Однозначные зависимости магнитных характеристик от структурного состояния и толщины пленок позволят ожидать конкретных практических приложений этих материалов. Кроме этого, проведенные исследования направлены на решение задач, выполняемых в рамках темы по заданию Министерства образования и науки Российской Федерации.

### **Степень разработанности темы исследования**

Тонкие магнитные пленки на протяжении многих десятилетий привлекают внимание исследователей. Устойчивость этого внимания обусловлена не только научным интересом, но и перспективой миниатюризации магнитных элементов разного рода устройств. Начало исследований тонких пленок сплавов типа Finemet ( $\text{Fe}_{73,5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13,5}\text{B}_9$ ) было положено в работах Г. Пето (G. Petó) и Е. Кижди-Косо (É. Kisdi-Koszó), выполненных в середине 90-х годов. Существенный вклад в изучение пленок семейства Finemet внесли работы М. Койссона (M. Coisson), П. Гупта (P. Gupta) и А. Гупта (A. Gupta). Результаты, полученные этими авторами, содержали первичные данные о влиянии условий получения на структурное состояние пленок и их магнитные свойства. Работы И. Мулена (J. Moulin) были посвящены возможности практического применения пленок типа Finemet.

Однако, в упомянутых выше работах в недостаточной мере исследовано кристаллическое состояние тонких пленок разной толщины, а также кинетика процесса кристаллизации, что затрудняет анализ магнитных свойств, установление закономерных связей между структурой и магнитными свойствами. Отсутствуют также систематические данные о влиянии вариации атома-

ингибитора роста зерен на кристаллическую структуру тонких пленок. В целом магнитные свойства магнитомягких нанокристаллических лент превосходят соответствующие свойства пленок, что определило необходимость дальнейших исследований с целью оптимизации и воспроизводимости свойств пленок.

Коллектив исследователей кафедры магнетизма и магнитных наноматериалов и отдела магнетизма твердых тел НИИ ФПМ Института естественных наук и математики Уральского федерального университета, на базе которых выполнялась данная диссертационная работа, имеет многолетний опыт изучения магнитных свойств быстрозакаленных сплавов (работы О. А. Иванова, Н. А. Скулкиной, В. А. Катаева, Г. В. Курляндской, Е. А. Степановой и др.), а также опыт работы со сплошными однослойными и многослойными тонкопленочными объектами, полученными методами высокочастотного ионно-плазменного и магнетронного распыления (работы В. О. Васьковского, А. В. Свалова, П. А. Савина, В. Е. Иванова, В. Н. Лепаловского и др.), что является прочной основой для всестороннего рассмотрения вопросов тонкопленочного состояния сплавов типа Finemet.

### **Цель и задачи работы**

Целью работы является установление закономерностей, связывающих толщину, микроструктуру и магнитные свойства тонких магнитных пленок Fe-M-Cu-Si-B (M: Nb, W, NbMo).

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1) получение аморфных и нанокристаллических тонких пленок  $Fe_{73,5}Nb_3Cu_1Si_{13,5}B_9$ ,  $Fe_{73,5}W_3Cu_1Si_{13,5}B_9$  и  $Fe_{72,5}Nb_{1,5}Mo_2Cu_{1,1}Si_{14,2}B_{8,7}$  толщиной от 10 до 200 нм; аттестация микроструктуры и химического состава полученных пленок;

2) установление толщинных зависимостей магнитных свойств тонких пленок сплавов с различными атомами-ингибиторами: Nb, W, NbMo;

3) определение влияния условий термообработки аморфных тонких пленок  $Fe_{73,5}Nb_3Cu_1Si_{13,5}B_9$ ,  $Fe_{73,5}W_3Cu_1Si_{13,5}B_9$  и  $Fe_{72,5}Nb_{1,5}Mo_2Cu_{1,1}Si_{14,2}B_{8,7}$  на формирование нанокристаллической структуры и магнитных свойств;

4) исследование магнитной анизотропии тонких пленок  $Fe_{73,5}Nb_3Cu_1Si_{13,5}B_9$ ,  $Fe_{73,5}W_3Cu_1Si_{13,5}B_9$  и  $Fe_{72,5}Nb_{1,5}Mo_2Cu_{1,1}Si_{14,2}B_{8,7}$ .

## Научная новизна

На основе проведенного систематического исследования структуры и магнитных свойств тонких магнитных пленок варьированного состава Fe-M-Cu-Si-B (M: Nb, NbMo, W) в диапазоне толщин 10–200 нм показано следующее.

В процессе получения пленок Fe-M-Cu-Si-B присутствие внешнего магнитного поля приводит к формированию в них наведенной одноосной магнитной анизотропии. Установлен механизм, определяющий возникновение в данных пленках наведенной одноосной магнитной анизотропии, в основе которого лежит закрепление подложкой магнитострикционной деформации пленок.

Исследование кинетики кристаллизации в тонких пленках Fe-M-Cu-Si-B методом рентгеноструктурных исследований в процессе нагрева показало, что кристаллизация пленок начинается при температуре примерно на 100 °C ниже, чем лент сплава аналогичного состава, и происходит за счет резкого роста зерен нанометрового масштаба. Обнаружено, что с уменьшением толщины пленок происходит задержка процесса кристаллизации.

С помощью метода корреляционной магнитометрии проведен анализ локальной магнитной анизотропии тонких пленок Fe-M-Cu-Si-B. Показано, что в пленках Fe-M-Cu-Si-B в аморфном и нанокристаллическом состояниях формируется стохастическая доменная структура. При уменьшении толщины в пленках происходит изменение размерности корреляций намагниченности от трехмерной к двумерной.

## Теоретическая и практическая значимость работы

Комплексное исследование тонких пленок Fe-M-Cu-Si-B (M=Nb, W, NbMo) позволяет определить закономерности влияния толщины и структурного состояния на их магнитные свойства. Полученные результаты дополняют существующие экспериментальные данные о влиянии легирующих элементов в тонких пленках сплава Fe-M-Cu-Si-B. Также результаты будут направлены на развитие модели случайной магнитной анизотропии применительно к пленочным средам.

Тонкие пленки исследуемого состава, где в качестве варьированного атома-ингибитора выступает Nb, демонстрируют наименьшую величину коэрцитивной силы, что позволяет рассматривать их в качестве функциональной среды для сенсорных устройств.

Полученные в рамках данной работы результаты о кинетике кристаллизации пленок в совокупности с анализом гистерезисных свойств могут быть вос-

требованы для прогнозирования и управления магнитными свойствами тонких пленок Fe-M-Cu-Si-B (M: Nb, W, NbMo) с целью их практического применения.

### **Методология и методы исследования**

Методология, положенная в основу выполнения работы, заключалась в реализации последовательности «прекурсор – осаждение на подложку – контролируемый отжиг», и в выяснении взаимосвязей «состав – структура – свойство».

Для достижения поставленных в работе целей и задач использовали современные методы аттестации и контроля структурного состояния образцов тонких пленок, а также исследования их магнитных свойств. Исследование структуры тонких пленок осуществлялось с помощью методов рентгеноструктурного анализа и сканирующей зондовой микроскопии. Уникальной методикой, используемой в данной работе, является проведение рентгеноструктурного анализа пленок в процессе нагрева, что позволяет наблюдать кинетику процесса кристаллизации в тонких пленках. Магнитные измерения тонких пленок в ходе исследования проводились с помощью методов магнитометрии (вибромагнитометр и СКВИД-магнитометр), магнитооптической и магнито-силовой микроскопии.

### **Научные положения, выносимые на защиту**

1. Спонтанная намагниченность пленок Fe-M-Cu-Si-B резко уменьшается при толщинах менее 150 нм. С уменьшением толщины возрастает вклад от неферромагнитного оксидного слоя на поверхности пленки.

2. В процессе получения пленок Fe-M-Cu-Si-B присутствие внешнего магнитного поля приводит к формированию в них наведенной одноосной магнитной анизотропии. Определяющим механизмом наведенной анизотропии является фиксирование подложкой магнитоэластической деформации, возникающей при образовании пленки.

3. При нагреве выше 400 °С происходит кристаллизация пленок Fe-M-Cu-Si-B. Кристаллизация начинается при более низкой температуре, чем температура кристаллизации аморфных лент, и развивается за счет резкого роста зерен размером, превышающим оптимальный размер в быстрозакаленных лентах аналогичного состава. В процессе кристаллизации размер зерен не меняется, а увеличивается их общий объем в кристаллической фазе.

4. В пленках Fe-M-Cu-Si-B формируется стохастическая доменная структура, характеризующаяся радиусом магнитных корреляций и усредненной кон-

стантой анизотропии. При уменьшении толщины пленок происходит изменение размерности корреляций намагниченности от трехмерной к двумерной.

### **Степень достоверности и апробация результатов**

Экспериментальные результаты, обсуждаемые в работе, получены с помощью современных методик исследования тонких пленок и проанализированы с использованием методов, признанных и широко используемых другими исследователями. Достоверность результатов обеспечивается систематическим характером исследований, удовлетворительным согласием с ранее полученными результатами исследований.

Основные результаты работы представлялись и обсуждались на объединенных научных семинарах Отдела магнетизма твердых тел НИИ ФПМ и Кафедры магнетизма и магнитных наноматериалов ИЕНиМ УрФУ. А также на международных и всероссийских симпозиумах, конференциях, школах, форумах и семинарах:

- Moscow International Symposium on Magnetism – 2014, 2017 (г. Москва, Россия);
- Всероссийская научная конференция студентов–физиков и молодых учёных – 2014 (г. Ижевск, Россия), 2017 (г. Екатеринбург, Россия);
- Международная молодежная научная конференция: Физика. Технологии. Инновации – 2015, 2016 (г. Екатеринбург, Россия);
- Всероссийская школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества – 2014, 2015, 2016 (г. Екатеринбург, Россия);
- The Baikal International Conference “Magnetic materials. New technologies” – 2012, 2016 (г. Иркутск, Россия);
- Euro-Asian Symposium «Trends in Magnetism» – 2016 (г. Иркутск, Россия);
- Sino-Russian Ph.D. Students Innovation Forum on Advanced Materials and Processing Technology – 2015, 2016 (г. Екатеринбург, Россия);
- Российская молодежная научная конференция «Проблемы теоретической и экспериментальной химии» – 2016 (г. Екатеринбург, Россия);
- International Baltic conference on magnetism: Focus on biomedical aspects – 2015 (г. Светлогорск, Россия);
- The European Conference PHYSICS OF MAGNETISM – 2014 (г. Познань, Польша).



## **Личный вклад автора**

Выбор тематики исследования, постановка целей и задач исследования, обсуждение, интерпретация результатов исследования и подготовка научных публикаций проводились совместно с научным руководителем Катаевым Василием Анатольевичем.

Автор участвовал в подготовке мишеней и частично в процессе получения образцов пленок и их аттестации. Автором выполнена обработка данных рентгеноструктурного анализа и атомно-силовой микроскопии с помощью существующих программных пакетов, определены структурные параметры образцов, дана интерпретация кинетики структурных превращений в тонких пленках в процессе термообработки.

Проведено исследование гистерезисных свойств тонких пленок методом магнитооптической микроскопии на основе эффекта Керра.

Используя метод корреляционной магнитометрии, автор провел анализ магнитной микроструктуры в тонких пленках Fe-Nb-Cu-Si-B и ее влияния на макроскопические магнитные свойства пленок.

Результаты исследований докладывались автором на всероссийских и международных конференциях.

## **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 26 печатных работ, из них 4 — в изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки Российской Федерации для опубликования основных научных результатов диссертаций.

## **Структура диссертации**

Диссертация включает в себя введение, пять глав, заключение и список цитируемой литературы. Общий объем составляет 160 страниц, 56 рисунков, 10 таблиц, список использованных источников из 230 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность и новизна работы, определены цель и задачи исследования, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** представлен обзор научных результатов, посвященных теме диссертации. Рассмотрено развитие представлений о физике тонкопленочного состояния магнитных материалов, а также о структурном состоянии и формировании магнитных свойств быстрозакаленных лент сплавов типа Fine-met. Проанализированы имеющиеся результаты исследований тонких пленок данных сплавов с точки зрения их структуры и физических свойств.

**Во второй главе** рассмотрены технология получения серий тонкопленочных образцов, методы аттестации и контроля их структурного состояния, методы исследования магнитных свойств.

Серии образцов тонких пленок различной толщины были получены методом высокочастотного ионно-плазменного распыления в атмосфере аргона. В качестве расходного материала использовались мишени сплавов  $\text{Fe}_{72,5}\text{Nb}_{1,5}\text{Mo}_2\text{Cu}_{1,1}\text{Si}_{14,2}\text{B}_{8,7}$  диаметром 50 мм и  $\text{Fe}_{73,5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13,5}\text{B}_9$ ,  $\text{Fe}_{73,5}\text{W}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13,5}\text{B}_9$  диаметром 30 мм. Осаждение частиц элементов сплава происходило в присутствии постоянного магнитного поля напряженностью 100 Э, прикладываемого в плоскости подложки. В качестве подложек использовались боросиликатное стекло фирмы Wilmad LabGlass и монокристаллический кремний с ориентацией (100). Температура подложек при получении пленок составляла не более, чем 40–50 °С.

Модификация структурного состояния тонких пленок осуществлялась путем термообработки. Нагрев и выдержка образцов проходили в камере для напыления с помощью инфракрасной лампы при давлении остаточных газов не более  $10^{-3}$  мм рт. ст., в присутствии технологического поля напряженностью 100 Э, как и при осаждении пленок.

Рентгеноструктурный анализ пленок был выполнен с помощью дифрактометров PHILIPS X'PERT PRO с  $\text{Cu-K}_\alpha$  источником излучения ( $\lambda=1,5418 \text{ \AA}$ ), Bruker D8 Advance Vantec с  $\text{Cu-K}_\alpha$  источником излучения ( $\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$ ), оборудованного детектором Vantec-1 PSD и высокотемпературной печкой Anton Paar НТК2000, Bruker D8 Discover с излучением  $\text{Cu-K}_\alpha$  ( $\lambda = 1,542 \text{ \AA}$ ). Размер кристаллитов определялся из рентгеновских спектров по уширению пика на половине его высоты с помощью формулы Селякова – Шеррера.

Топография поверхности пленок была исследована с помощью атомно-силового микроскопа Bruker Multimode 8 в полуконтактном режиме с использованием кремниевого зонда с радиусом закругления 10 нм и постоянной жесткости 42 Н/м. Изображения магнитного фазового контраста были получены двухпроходным методом с использованием магнитного зонда с CoCr покрытием.

Магнитные измерения тонких пленок в ходе исследования проводились с помощью следующих установок: магнитоизмерительной системы MPMS XL7 ES (Quantum Design) с первичным преобразователем на основе СКВИДа, вибрационного магнитометра LakeShore 7407, магнитооптического микроскопа на основе эффекта Керра (Evico magnetics GmbH).

**В третьей главе** исследовано влияние толщины на магнитные характеристики тонких пленок Fe-M-Cu-Si-B (M: Nb, W, NbMo) в исходном состоянии. Полученные зависимости намагниченности насыщения ( $M_S$ ) и коэрцитивной силы ( $H_C$ ) от толщины ( $L$ ) на примере пленок  $Fe_{72,5}Nb_{1,5}Mo_2Cu_{1,1}Si_{14,2}B_{8,7}$  представлены на Рисунке 1.

Установлено, что при толщинах менее 150 нм происходит резкое снижение намагниченности насыщения (Рисунок 1 (а)). При больших толщинах можно считать, что величина намагниченности достигает насыщения и не зависит от толщины. При этом значение намагниченности насыщения пленок сопоставимо со значение намагниченности насыщения быстрозакаленной аморфной ленты сплава  $Fe_{73,5}Nb_3Cu_1Si_{13,5}B_9$  толщиной 20 мкм.

Наиболее вероятной причиной наблюдаемого характера зависимости  $M_S$  от толщины представляется наличие на поверхности пленок естественного окисленного слоя [7]. Основываясь на этом, полученные значения  $M_S(L)$  были описаны эмпирическим выражением

$$M_S(L) = M_S^{bulk} \frac{L - l_{ox}}{L}, \quad (1)$$

где  $M_S(L)$  – экспериментально полученное значение намагниченности насыщения для пленки толщиной  $L$ ,  $M_S^{bulk}$  – максимальное значение намагниченности насыщения, измеренное на пленке толщиной 1 мкм,  $l_{ox}$  – толщина окисленного слоя, которая является подгоночным параметром в ходе аппроксимации зависимости. Результат описания экспериментальных данных формулой (1) представлен на Рисунке 1 сплошной линией. Полученное при аппроксимации значение толщины окисленного слоя  $l_{ox}$  составило 4,5 нм. Таким образом, для пленки толщиной 10 нм оксидный слой составляет практически половину всей пленки, что объясняет почти вдвое меньшее значение намагниченности насыщения по сравнению со значением для пленки толщиной 1 мкм. Начиная с толщины порядка 100–150 нм, вклад оксидного слоя становится незначительным, и зависимости намагниченности насыщения от толщины пленки не наблюдается.

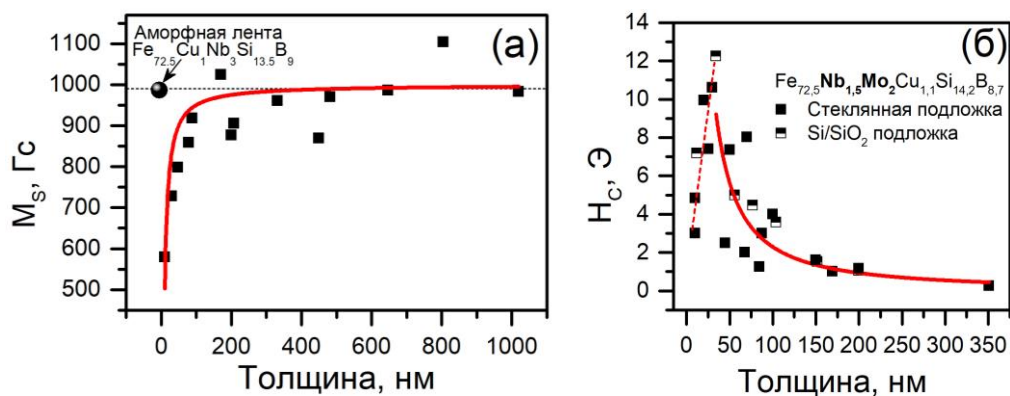


Рисунок 1 – Зависимость намагниченности насыщения  $M_S$  (а) и коэрцитивной силы  $H_C$  (б) от толщины пленок сплава  $Fe_{72,5}Nb_{1,5}Mo_2Cu_{1,1}Si_{14,2}B_{8,7}$

Полученная зависимость коэрцитивной силы от толщины (Рисунок 1 (б)) имеет характерный вид для тонкопленочного состояния и неоднократно наблюдались для однослойных и многослойных тонких пленок достаточно большого ряда магнитных материалов [8-10].

В результате проведенного моделирования показано, что наблюдаемый ход зависимости коэрцитивной силы от толщины может быть связан со сменой типа доменных стенок. С уменьшением толщины пленки поля рассеяния, связанные с доменной стенкой блоховского типа, растут. Это затрудняет образование доменных стенок и в целом увеличивает плотность энергии доменной стенки Блоха, что ведет к росту коэрцитивной силы. При некотором значении толщины значение плотности энергии доменной стенки Блоха становится равным энергии доменной стенки неелевского типа, что приводит к изменению типа доменной структуры образца и иным значениям коэрцитивной силы. Рассчитанное значение критической толщины для пленок сплава с NbMo достаточно хорошо согласуется с экспериментом, где пик коэрцитивной силы приходится на толщины около 25 – 30 нм.

**В четвертой главе** представлены результаты исследования влияния условий термообработки и толщины на структурные превращения в тонких пленках Fe-M-Cu-Si-B (M: Nb, W, NbMo).

Структурное состояние пленок после получения можно характеризовать как рентгеноаморфное. В ходе исследования было показано, что наблюдаемое гало на рентгенограммах в области углов, соответствующих фазе ОЦК-Fe, в основном формируется областями когерентного рассеяния размером около 1–2 нм (Рисунок 2). Несмотря на то, что данные области сложно считать структурно упорядоченными, в работе они рассматриваются как предвыделения кристал-

лической фазы, которые появляются на некотором этапе распада аморфной матрицы.

На Рисунке 2 видно, что термообработка при одной и той же температуре по-разному сказывается на структурном состоянии пленок в зависимости от их толщины. После термообработки при 450 °С для пленки толщиной 100 нм наблюдается рентгеноаморфное гало, тогда как для пленки толщиной 200 нм на рентгенограмме присутствует пик, свидетельствующий о кристаллизации. Таким образом, может иметь место задержка кристаллизации при уменьшении толщины пленки.

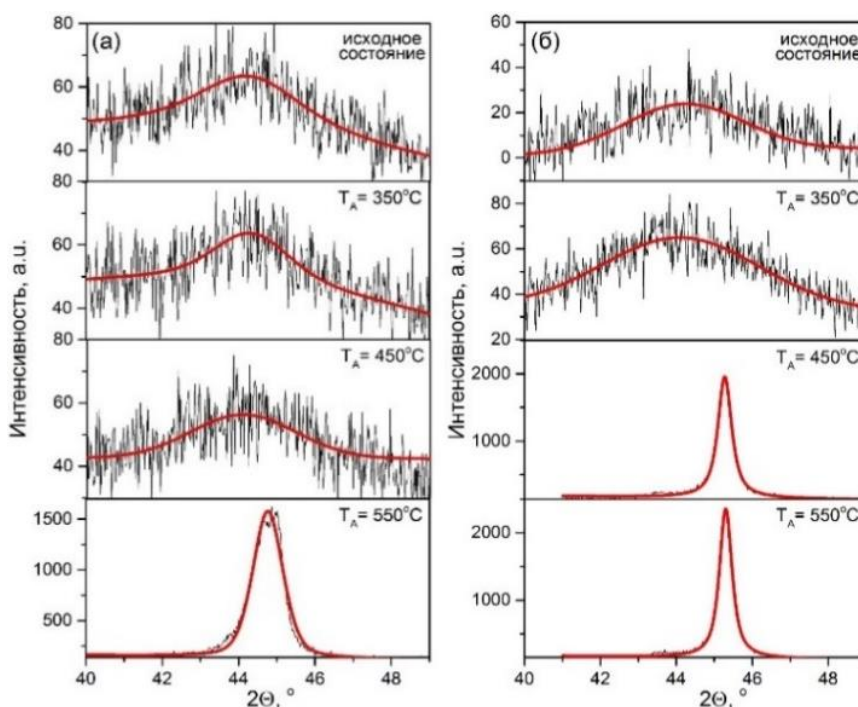


Рисунок 2 – Рентгеновские спектры пленок  $\text{Fe}_{72,5}\text{Nb}_{1,5}\text{Mo}_2\text{Cu}_{1,1}\text{Si}_{14,2}\text{B}_{8,7}$  толщиной 100 (а) и 200 нм (б) в состоянии после получения и после термообработки при 350, 450 и 550 °С

С целью более детального анализа кинетики кристаллизации в пленках было проведено рентгеноструктурное исследование в процессе нагрева. Для пленок обеих толщин с увеличением температуры наблюдается увеличение интенсивности пиков в районе углов 43–46°, что свидетельствует о развитии процесса кристаллизации и увеличении объема кристаллической фазы (Рисунок 3). Как и в случае стандартного рентгеноструктурного анализа, также обращает на себя внимание тот факт, что толщина пленки существенно влияет на протекание кристаллизации. Для пленки меньшей толщины пики, свидетельствующие о появлении кристаллической фазы, сначала слабо разрешаются на уровне шумов, однако видно, что их высота нарастает равномерно с повышением темпе-

ратуры примерно до 630 °С. Для пленки большей толщины уже при 455 °С фиксируется первый пик, и его высота сразу существенно больше, чем для тонкой пленки. Средний размер зерен, образовавшихся в результате кристаллизации, составляет 16 и 22 нм соответственно для пленок толщиной 100 и 200 нм и не меняется с увеличением температуры нагрева.

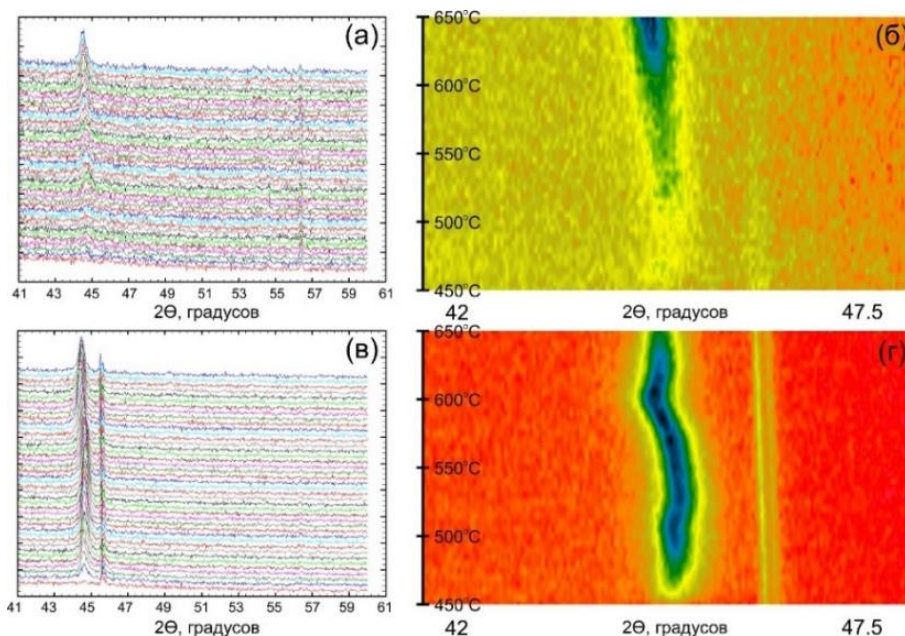


Рисунок 3 – Данные рентгеноструктурного анализа с температурой для пленок сплава  $\text{Fe}_{72.5}\text{Nb}_{1.5}\text{Mo}_2\text{Cu}_{1.1}\text{Si}_{14.2}\text{B}_{8.7}$  толщиной 100 (а, б) и 200 нм (в, г). Слева представлены рентгенограммы, снятые при температурах от 450 до 650 °С с шагом 5 °С, справа – вид сверху на рентгенограммы

Аналогичный рентгеноструктурный анализ был проведен в большем интервале температур от 30 до 700 °С для пленки толщиной 150 нм. Обнаружено, что заметная кристаллизация начинается при температуре около 420 °С, что намного ниже, чем температура кристаллизации в быстрозакаленных лентах аналогичных сплавов. При достижении температуры 420 °С наблюдается резкий рост зерен до размеров порядка 16-20 нм. С увеличением температуры размер зерен меняется слабо, как видно на Рисунке 4. При этом существенные изменения претерпевает параметр решетки, что говорит об изменении химического состава образовавшихся зерен.

Известно, что кремний хорошо растворяется в железе и увеличение его содержания приводит к уменьшению параметра решетки [11], в результате чего формируется твердый раствор замещения ОЦК-Fe(Si). При дальнейшем увеличении температуры выше 525 °С тенденция изменяется, и параметр решетки увеличивается. При этом причина увеличения параметра решетки остается неясной.



Однако, можно предположить, что смена характера температурной зависимости параметра решетки является следствием развития хорошо известного для этих сплавов процесса упорядочения атомов Si. Упорядочение вероятно начинается в приграничной зоне, поэтому необходимая концентрация может достигаться за счет диффузии кремния как извне, так и изнутри зерна, вызывая соответствующий рост параметра решетки.

В итоге, кристаллизация в пленках Fe-M-Cu-Si-B (M: Nb, W, NbMo)

начинается при температурах более низких, чем для лент аналогичных сплавов, и характеризуется резким ростом зерен. При переходе от пленки толщиной 200 нм к пленке 100 нм наблюдается уменьшение размера зерен и более медленное развитие процесса кристаллизации.

**В пятой главе** рассматривается магнитная анизотропия тонких пленок с учетом уже имеющихся знаний о структуре и толщинных зависимостях магнитных свойств, полученных в предыдущих главах.

Магнитная анизотропия тонких пленок была исследована на образцах толщиной от 10 до 200 нм. Как было сказано ранее, данные пленки были получены в присутствии магнитного поля напряженностью 100 Э, ориентированного в плоскости образцов. О наличии макроскопической магнитной анизотропии можно судить по форме петель гистерезиса, измеренных под разными углами между направлением внешнего магнитного поля и осью, наведенной магнитным полем в процессе получения пленок (Рисунок 5).

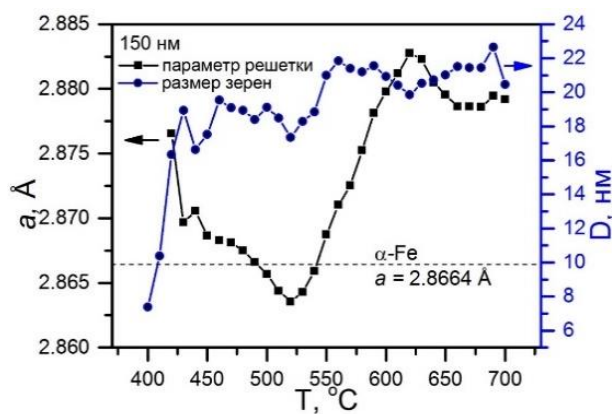


Рисунок 4 – Зависимость параметра решетки и размера зерен ОЦК-Fe(Si) от температуры пленки толщиной 150 нм  $\text{Fe}_{72,5}\text{Nb}_{1,5}\text{Mo}_2\text{Cu}_{1,1}\text{Si}_{14,2}\text{B}_{8,7}$

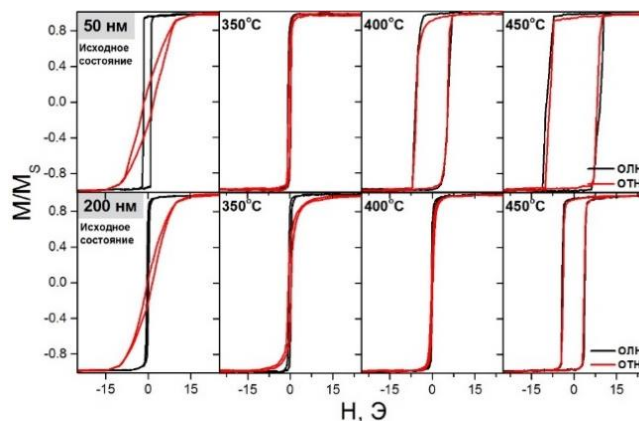


Рисунок 5 – Магнитооптические петли гистерезиса пленок толщиной 50 и 200 нм сплавов  $\text{Fe}_{73,5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13,5}\text{B}_9$  измеренные вдоль и поперек ОЛН

Проведенные исследования пленок разной толщины, полученных в присутствии и отсутствии внешнего магнитного поля, показали, что наличие магнитного поля при напылении пленок приводит к формированию наведенной одноосной анизотропии, ось легкого намагничивания которой совпадает с направлением приложенного поля. Сравнивая исследуемые образцы тонких пленок, следует отметить, что проявление наведенной анизотропии может быть разным в зависимости от локальной структурной неоднородности пленки.

Термообработка приводит к частичному или полному исчезновению одноосной анизотропии. В процессе отжига в температурном диапазоне 350–400 °С никакой из механизмов наведения анизотропии не действует ввиду отсутствия намагниченности пленок исследуемых сплавов при температурах выше  $T_C$  аморфной матрицы и ниже температуры начала кристаллизации. При этом происходит релаксация деформаций, имеющих в пленках после получения.

В образовавшихся в пленках после отжига при 450 °С в присутствии магнитного поля зернах FeSi следовало бы ожидать наведение анизотропии посредством механизма направленного упорядочения атомов. Однако, быстрое насыщение зерен кремнием с приближением их к состоянию изотропного атомного упорядочения не позволяет сформировать выделенное направление за счет диффузии атомов кремния, что на макроскопическом уровне выражается в отсутствии анизотропии пленок.

Таким образом, в процессе получения пленок присутствие внешнего магнитного поля приводит к тому, что магнитные моменты упорядочиваются в его направлении. Поскольку исследуемые сплавы в аморфном состоянии обладают положительной магнитострикцией, пленки будут испытывать растяжение. По мере роста пленок сильная адгезия между ними и подложкой будет фиксировать магнитострикционную деформацию, приводя к выделению преимущественной оси, вдоль которой стремится установиться намагниченность, обуславливая тем самым наличие наведенной одноосной магнитной анизотропии в пленках.

Характерной особенностью аморфных и нанокристаллических магнетиков является наличие в них локальной случайной магнитной анизотропии. Связь структурного состояния и магнитных свойств аморфных и нанокристаллических магнетиков была продемонстрирована с помощью модели случайной анизотропии. В рамках данной модели магнитная микроструктура в неупорядоченных магнетиках формируется в результате конкуренции флуктуирующей локальной анизотропии и обменного взаимодействия, в результате происходит



образование областей ферромагнитного упорядочения, характеризующихся конечной корреляционной длиной (стохастическая магнитная структура).

Случайная магнитная анизотропия была исследована с помощью закона приближения намагниченности к насыщению. С учетом этого закона выше некоторого критического поля  $H_R$  полевая зависимость в области приближения намагниченности к насыщению подчиняется закону Акулова, где  $M \sim H^{-2}$ , а ниже критического поля  $M \sim H^{-n}$ , где  $n < 2$  и зависит от пространственной размерности распределения осей случайной анизотропии.

После обработки кривых приближения намагниченности к насыщению пленок толщиной 200 нм в разном структурном состоянии, были получены следующие степенные режимы зависимости дисперсии намагниченности  $d_m(H)$ : пленка в исходном состоянии –  $H^{-0,6} \rightarrow H^{-1,8}$ , после термообработки при 350 °C –  $H^{-0,7} \rightarrow H^{-2,1}$ , после термообработки при 400 °C –  $H^{-0,7} \rightarrow H^{-1,8}$ , после термообработки при 450 °C –  $H^{-0,6} \rightarrow H^{-1,9}$  (Рисунок 6). Видно, что показатели степени

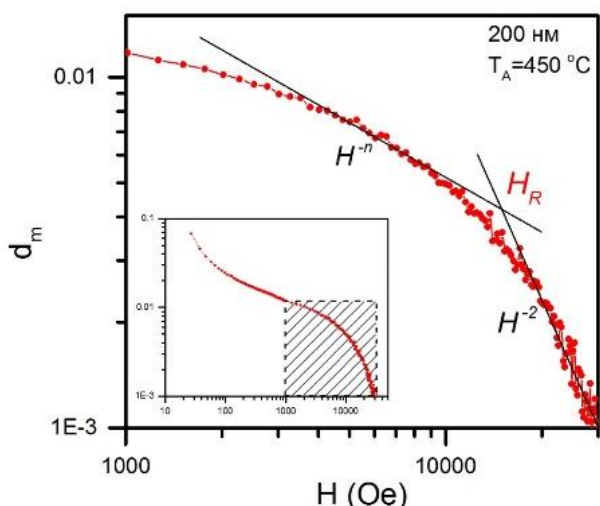


Рисунок 6 – Участок зависимости дисперсии намагниченности от поля, представленный в двойных логарифмических координатах, пленки толщиной 200 нм сплава  $Fe_{73,5}Nb_3Cu_1Si_{13,5}B_9$  после термообработки при 450 °C. На вставке – полная кривая  $d_m(H)$

близки по порядку величины, однако не совпадают. Область магнитных корреляций определяется как величина, при которой корреляционная функция убы-

при  $H \leq H_R$  отличаются от значений, характерных для трехмерной размерности корреляций намагниченности – 0,5, и таким образом для пленки толщиной 200 нм размерность  $d$  составляет 2,6-2,8. Дробная величина  $d$  указывает на фрактальную размерность корреляций намагниченности в этой пленке.

Из анализа закона приближения намагниченности к насыщению пленки

в исходном состоянии области корреляции осей анизотропии составляют  $2R_C = 5,4$  нм. Согласно результатам рентгеноструктурного исследования, пленка толщиной 200 нм после получения находится в рентгеноаморфном состоянии с размером областей когерентного рассеяния порядка 1 нм. Полученные значения хотя и

вайт вдвое, и заведомо будет иметь некоторое завышенное значение по сравнению с размером областей, определенных напрямую структурными методами исследования. В то же время кристаллическая фаза пленки, отожженной при 450 °С в течение 30 минут, состоит из зерен размером 1,3 нм, объем которых составляет 79%, и зерен размером порядка 16 – 20 нм объемом 21%. Если провести грубую оценку среднего размера зерен в пленке после термообработки при 450 °С с учетом процента их содержания в общей кристаллической фазе, то полученное значение 4,4–5,2 нм удовлетворительно согласуется с результатом  $2R_C = 6,1$  нм, полученного из магнитокорреляционного анализа. Таким образом, можно предположить, что использование закона приближения намагниченности к насыщению дает усредненное значение размера корреляций локальной анизотропии.

Результаты магнитокорреляционного анализа кривых дисперсии намагниченности показали, что в полях  $H \leq H_R$  для пленок толщиной 20 нм преимущественно выполняется зависимость  $d_m \sim H^{-1}$ , в то время как для пленки толщиной 200 нм –  $d_m \sim H^{-0.6 \pm 0.7}$ . Это указывает на изменение размерности корреляций намагниченности с уменьшением толщины пленки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В данной работе свойства уникальных сплавов типа Finemet исследованы в тонкопленочном состоянии. Аморфные пленки  $Fe_{73,5}M_3Cu_1Si_{13,5}B_9$  (в дальнейшем – Fe-M-Cu-Si-B) получали методом высокочастотного ионно-плазменного напыления. Состав пленок с целью воздействия на процесс кристаллизации варьировали за счет компонента М – ингибитора роста зерен, в качестве которого выступали Nb, Mo и Nb, W.

В результате проведенного исследования с использованием современных методик получена новая информация о свойствах тонких пленок и протекающих в них процессах. При нагреве кристаллизация в пленках происходит, как и в лентах, с образованием зерен ОЦК-FeSi, однако начинается при температурах более низких. При этом средний размер сформировавшихся зерен в пленках превышает таковой в лентах. Известно, что наилучшие магнитные свойства в лентах сплавов типа Finemet реализуются при достижении нанокристаллического состояния; в пленках, как показано в данной работе, – после термообработок при 350–400 °С, в результате которых происходит релаксация внутренних напряжений и формируется релаксированное рентгеноаморфное состояние или состояние начальной стадии кристаллизации. Толщина пленок оказывает

значительное влияние на их фундаментальные и гистерезисные характеристики, в том числе за счет увеличения роли поверхности и интерфейса.

Результаты, представленные в работе, дополняют существующие экспериментальные данные, необходимые для поиска и создания материалов с заданными свойствами, а также расширяют возможности их практического применения в качестве сред для магнитных датчиков.

### **Основные выводы диссертационной работы**

1. Впервые для пленок Fe-M-Cu-Si-B, составов близких к составу сплава Finemet, установлены зависимости спонтанной намагниченности  $M_s$  от толщины  $L$ . Показано, что основной причиной снижения  $M_s$ , наблюдающегося в области толщин  $L$  меньше 150 нм, может являться не уменьшение обменного параметра, а изменение относительной роли немагнитного оксидного слоя, вероятно, присутствующего на поверхности пленок. Оценки показали, что толщина такого слоя по величине сопоставима с толщиной оксидного слоя, экспериментально обнаруженного в лентах сплава Finemet.

2. Установлено, что для находящихся в различном структурном состоянии пленок Fe-M-Cu-Si-B, как и для пленок пермаллоя, характерно возрастание коэрцитивной силы  $H_c$  с уменьшением толщины  $L$  и наличие максимума. Максимум  $H_c$  пленок достигает в области толщин  $L \sim 30$  нм. Показано, что такой характер зависимости  $H_c$  с уменьшением толщины может быть связан с увеличением вклада от неровностей поверхности, с изменением структуры и плотности энергии доменных границ.

3. Впервые в пленках Fe-M-Cu-Si-B исследована кинетика процесса кристаллизации. Кристаллизация начинается при температурах 400–420 °С – существенно меньших, чем для лент сплавов аналогичного состава. В области данных температур кристаллизация характеризуется резким ростом зерен ОЦК-FeSi до 16–20 нм. По-видимому, это объясняется присутствием образовавшихся в процессе формирования пленок предвыделений кристаллической фазы, размер которых составляет 1–2 нм и зависит от используемого компонента-ингибитора. При увеличении температуры средний размер зерен не изменяется, но увеличивается содержание Si в них. С уменьшением толщины пленок наблюдалась тенденция к задержке кристаллизации.

4. Установлено, что в пленках Fe-M-Cu-Si-B, получаемых в присутствии внешнего магнитного поля, формируется наведенная одноосная магнитная анизотропия. Показано, что механизм формирования анизотропии связан с закреплением магнитоэластической деформации пленок. При последующем нагреве пленок в присутствии магнитного поля до температур как ниже, так и выше

начала кристаллизации, одноосная анизотропия снимается, и не наводится вновь, устанавливается магнитно изотропное состояние пленок.

5. Путем анализа закона приближения намагниченности к насыщению и изображений магнито-силовой микроскопии впервые показано существование в пленках Fe-M-Cu-Si-B стохастической магнитной структуры. Найдены размер стохастического домена и величина константы усредненной магнитной анизотропии. Установлено, что размерность корреляций намагниченности зависит от толщины пленки. В более толстой пленке реализуются корреляции намагниченности с фрактальной размерностью  $d$ , равной 2,6–2,8, в более тонкой –  $d$  равно 2. То есть, наблюдается переход от трехмерных к двумерным корреляциям намагниченности с уменьшением толщины пленок.

## Рекомендации

Полученные в рамках данной работы результаты способствуют оптимизации магнитных свойств тонких пленок Fe-M-Cu-Si-B, а именно улучшению магнитных характеристик до уровня, сопоставимого характеристикам аморфных и нанокристаллических лент.

Имеющиеся в работе данные о синтезе, структурном состоянии и магнитных свойствах пленок  $Fe_{72,5}Nb_{1,5}Mo_2Cu_{1,1}Si_{14,2}B_{8,7}$ ,  $Fe_{73,5}Nb_3Cu_1Si_{13,5}B_9$  и  $Fe_{73,5}W_3Cu_1Si_{13,5}B_9$  в диапазоне толщин 10–200 нм могут быть использованы при разработке практических приложений на их основе и развития представлений о магнитомягких нанокристаллических тонких пленках.

## Перспективы дальнейшей разработки темы

В продолжение данной работы планируется дальнейшее исследование многокомпонентных пленок составов Fe-M-Cu-Si-B с целью выяснения физических причин и механизмов, ответственных за формирование необходимого комплекса магнитных свойств пленок. Для этого, во-первых, необходимо расширение поиска оптимальных составов тонких пленок как за счет вариации атомов-ингибиторов роста зерен, так и за счет атомов-аморфизаторов с целью получения нанокристаллического состояния пленок со средним размером зерна менее 15-20 нм. Влияние легирования атомами переходных металлов на структуру и магнитные свойства исследовалось преимущественно на быстрозакаленных лентах. В тонких пленках легирование количественно может сказываться иначе, что требует экспериментальной проверки.

Во-вторых, на основе обобщения экспериментальных данных, полученных с помощью магнитных измерений на пленках различной толщины, состава и в

разном структурном состоянии, в том числе с помощью анализа закона приближения намагниченности к насыщению, планируется проведение микромагнитного моделирования для уточнения модели случайной анизотропии двух-, трехмерных систем или систем с фрактальной размерностью от двух до трех. Изменение толщины нанокристаллической пленки при неизменном размере зерен в рамках модели должно приводить к плавному изменению коэрцитивной силы и магнитной проницаемости, что согласно выражениям может быть интерпретировано как наличие фрактальной размерности. На данный момент этот эффект изучен недостаточно. Его изучение осложняется также тем, что для описания магнитных свойств тонких пленок требуется учитывать магнитоэлектронное взаимодействие (как размагничивающее поле пленки, так и взаимодействие между зернами), а также наведенную магнитную анизотропию. Перечисленные моменты выходят за рамки традиционной модели случайной анизотропии и требуют привлечения микромагнитного моделирования.

Таким образом, запланированное комплексное исследование даст оригинальные научные результаты, которые позволят развить применение модели случайной анизотропии для тонких нанокристаллических пленок и сделать ряд обобщений для этого случая.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Статьи по теме диссертации в рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ:*

1. **Mikhailitsyna E. A.** Microstructure and magnetic properties of  $\text{Fe}_{72.5}\text{Si}_{14.2}\text{B}_{8.7}\text{Nb}_2\text{Mo}_{1.5}\text{Cu}_{1.1}$  thin films / E. A. Mikhailitsyna, V. A. Kataev, A. Larrañaga, V. N. Lepalovskij and A. P. Turygin // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2016. – Vol. 415. – P. 61-65; 0,58 п.л. / 0,12 п.л. (Scopus, WoS).

2. Zakharchuk I. Magnetic and microstructure study of thin films of Fe-CuNbMoSiB FINEMET alloy / I. Zakharchuk, **E. Mikhailitsyna** and E. Lähderanta // Materials Science Forum. – 2016. – Vol. 870. – P. 322-327; 0,69 п.л. / 0,23 п.л. (Scopus).

3. **Mikhailitsyna E.** Influence of annealing on the surface topography and magnetic properties of thin films of the finemet-type alloy / E. Mikhailitsyna, V. Kataev, P. Geydt, V. Lepalovskij and E. Lähderanta // Solid State Phenomena. – 2015. – Vol. 233-234. – P. 699-704; 0,69 п.л. / 0,14 п.л. (Scopus).

4. **Mikhailitsyna E. A.** Heat treatment effect on magnetic properties of Finemet-type films / E. A. Mikhailitsyna, V. A. Kataev, V. N. Lepalovskij, A. Larrañaga and A. S. Volegov // KnE Materials Science, IV Sino-Russian ASRTU Sympo-

sium on Advanced Materials and Materials and Processing Technology. – 2016. – P. 109-114; 0,69 п.л. / 0,14 п.л. (WoS).

*Другие публикации:*

1. Kataev V. A. Magnetic properties and induced anisotropy of nanocrystalline  $Fe_{72.5-x}Ni_xCu_{1.1}Nb_{1.9}Mo_{1.5}Si_{14.3}B_{8.7}$  alloys / V. A. Kataeva, Yu. N. Starodubtsev, **Е. А. Михалицына**, V. Ya. Belozеров and R. V. Tsyngalov // Physics of Metals and Metallography. – 2017. – Vol. 118, № 6. – P. 558-563; 0,69 п.л. / 0,14 п.л. (Scopus, WoS).

2. Скулкина Н. А. Влияние полимерного покрытия и прессующего давления на магнитные свойства аморфных сплавов на основе кобальта / Н. А. Скулкина, О. А. Иванов, А. К. Мазеева, П. А. Кузнецов, Е. А. Степанова, О. В. Блинова, **Е. А. Михалицына**, Н. Д. Денисов, В. И. Чекис // Физика металлов и металловедение. – 2017. – Т. 118, № 12. – С. 1176-1183; 0,92 п.л. / 0,1 п.л. (Physics of Metals and Metallography (английская версия журнала) - Scopus, WoS).

3. **Mikhalitsyna Е. А.** Magnetic microstructure of Fe-Cu-Nb-Si-B thin films / Е. А. Mikhalitsyna, V. A. Kataev, E. Soboleva, P. Geydt, I. Zakharchuk, E. Lähderanta // Moscow International Symposium on Magnetism : Book of Abstracts. – Moscow, 2017. – P. 773; 0,12 п.л. / 0,02 п.л.

4. **Mikhalitsyna Е. А.** Thickness Dependence of Magnetic Properties of Fe-Cu-M-Si-B (M: Nb, W, NbMo) Thin Films / Е. А. Mikhalitsyna, V. A. Kataev, A. S. Volegov, V. N. Lepalovskij // International Symposium on Metastable, Amorphous and Nanostructured Materials : Book of Abstracts. – San Sebastian, 2017. – P. 365; 0,12 п.л. / 0,03 п.л.

5. **Mikhalitsyna Е. А.** Kerr-microscopy study of magnetic anisotropy of FINEMET-type films / Е. А. Mikhalitsyna, V. A. Kataev, V. N. Lepalovskij // VI Euro-Asian Symposium «Trends in Magnetism» : Book of Abstracts. – Krasnoyarsk, 2016. – P. 494; 0,12 п.л. / 0,04 п.л.

6. Kataev V. Induced anisotropy and magnetic properties of  $Fe_{72.5-x}Ni_xCu_{1.1}Nb_{1.9}Mo_{1.5}Si_{14.3}B_{8.7}$  nanocrystalline alloys / V. Kataev, Y. Starodubtsev, V. Belozеров, R. Tsyngalov, **Е. Михалицына** // VI Euro-Asian Symposium «Trends in Magnetism» : Book of Abstracts. – Krasnoyarsk, 2016. – P. 495; 12 п.л. / 0,02 п.л.

7. **Михалицына Е. А.** Магнитная анизотропия тонких пленок сплавов типа Finemet / Е. А. Михалицына, В. А. Катаев, А. Д. Путинцев, В. Н. Лепалов-

ский // VII-International Baikal Scientific Conference "Magnetic Materials. New technologies" : Book of Abstracts. - Irkutsk, 2016. – P. 75; 0,12 п.л. / 0,03 п.л.

8. **Mikhailitsyna E. A.** Heat treatment effect on magnetic properties of Finemet-type films / E. A. Mikhailitsyna, V. A. Kataev, V. N. Lepalovskij // IV Sino-Russian ASRTU Symposium on Advanced Materials and Processing Technology : Book of Abstracts. – Yekaterinburg, 2016. – P. 134; 0,12 п.л. / 0,04 п.л.

9. **Mikhailitsyna E. A.** Effect of the thickness on  $\text{Fe}_{72.5}\text{Si}_{14.2}\text{B}_{8.7}\text{Nb}_{3.5}\text{Cu}_{1.1}$  thin films magnetic anisotropy / E. A. Mikhailitsyna, A. D. Putinsev, V. A. Kataev // Физика. Технологии. Инновации : тез. докл. III междунар. молодеж. науч. конф. – Екатеринбург, 2016. – С. 59; 0,12 п.л. / 0,04 п.л.

10. **Mikhailitsyna E. A.** Magnetic properties and domain structure of the Finemet-type thin films / E. A. Mikhailitsyna, V. A. Kataev // International Baltic Conference on Magnetism: Focus on Biomedical aspects : Book of Abstracts. – Svetlogorsk, 2015. – P. 70; 0,12 п.л. / 0,06 п.л.

11. Kataev V. A. Influence of isochronic annealing on structure of FeCuNbSiB alloy ribbons / V. A. Kataev, V. I. Safuganov, **E. A. Mikhailitsyna** // VI-International Baikal Scientific Conference "Magnetic Materials. New technologies" : Book of Abstracts. – Irkutsk, 2014. – P. 77; 0,12 п.л. / 0,04 п.л.

12. **Mikhailitsyna E.** Influence of annealing on the surface topography and magnetic properties of the thin film Finemet-type alloy / E. Mikhailitsyna, V. Kataev, P. Geydt, V. Lepalovskij, E. Lähderanta // Moscow International Symposium on Magnetism : Book of Abstracts. – Moscow, 2014. – P. 295; 0,12 п.л. / 0,02 п.л.

13. **Mikhailitsyna E.** Atom force microscopy and magnetic force microscopy investigations of the thin films soft magnetic Finemet-type alloy / E. Mikhailitsyna, V. Kataev, P. Geydt, V. Lepalovskij // The European Conference Physics of Magnetism : Book of Abstracts. – Poznan, 2014. – P. 202; 0,12 п.л. / 0,03 п.л.

14. Geydt P. Magnetic force microscopy investigation of FineMet type alloy  $\text{Fe}_{72.5}\text{Si}_{14.2}\text{B}_{8.7}\text{Nb}_2\text{Mo}_{1.5}\text{Cu}_{1.1}$  / P. Geydt, **E. Mikhailitsyna**, P. Demytyev, I. Zakharchuk, V. Kataev // Physics Days : Book of Abstracts. – Tampere, 2014. – P. 113; 0,12 п.л. / 0,02 п.л.

15. Geydt P. Investigation of surface magnetic properties of FeCuNbMoSiB alloy with MFM / P. Geydt, **E. Mikhailitsyna**, P. Demytyev, E. Lähderanta // Nordic AFM Users Meeting : Book of Abstracts. – Tampere, 2014. – P. 11; 0,12 п.л. / 0,03 п.л.

## СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Xiao S. Giant magnetoimpedance and domain structure in FeCuNbSiB films and sand-wiched films / S. Xiao, Y. Liu, S. Yan, Y. Dai, L. Zhang and L. Mei // *Physical Review B*. – 2000. – Vol. 61, № 8. – P. 5734-5739.
2. Moulin J. Ultrasoft Finemet thin films for magneto-impedance microsensors / J. Mou-lin, I. Shahosseini, F. Alves and F. Mazaleyrat // *Journal of Micromechanics and Microengi-neering*. – 2011. – Vol. 21, № 7. – P. 074010.
3. Peng T. Fabrication and AC characterization of magneto-impedance microsensors for alternating magnetic field measurement / T. Peng, J. Moulin, F. Alves and Y. Le Bihan // *In-ternational Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. – 2014. – Vol. 45, № 1-4. – P. 809-816.
4. Yoshizawa Y. New Fe-based soft magnetic alloys composed of ultrafine grain structure / Y. Yoshizawa, S. Oguma and K. Yamauchi // *Journal of Applied Physics*. – 1988. – Vol. 64, №10. – P. 6044-6046.
5. Yoshizawa Y. Magnetic properties of Fe-Cu-M-Si-B (M = Cr, V, Mo, Nb, Ta, W) alloys / Y. Yoshizawa and K. Yamauchi // *Materials Science and Engi-neering*. – 1991. – Vol. A133. – P. 176-179.
6. Herzer G. Modern soft magnets: Amorphous and nanocrystalline materials / G. Herzer // *Acta Materialia*. – 2013. – Vol. 61, № 3. – P. 718-734.
7. Chenakin S. P. XPS and ToF-SIMS characterization of a Finemet surface: effect of heating / S. P. Chenakin, G. G. Galstyan, a A. B. Tolstogouzov and N. Kruse // *Surface and In-terface Analysis*. – 2009. – Vol. 41. – P. 2311-237.
8. Bruno P. Hysteresis properties of ultrathin ferromagnetic films / P. Bruno, G. Bay-reuther, P. Beauvillain, C. Chappert, G. Lugert, D. Renard, J. P. Renard and J. Seiden // *Jour-nal of Applied Physics*. – 1990. – V. 68, № 11. – P. 5759-5766.
9. Wan H. Thickness dependence of coercivity in CoNi thin films / H. Wan and G. C. Hadjipanayis // *Journal of Applied Physics*. – 1991. – V. 70, № 10. – P. 6059-6061.
10. Chang-Min X. Dependence of the coercivity of La<sub>0.67</sub>Ca<sub>0.33</sub>MnO<sub>3</sub> films on substrate and thickness / X. Chang-Min, S. Ji-Rong, W. Deng-Jing, L. Guan-Juan, Z. Hong-Wei and S. Bao-Gen // *Chinese Physics*. – 2005. – Vol. 14, № 3. – P. 604-609.
11. Coban A. Difference between bulk and thin film densities of metal oxide and fluo-ride films studied by NRA depth profiling techniques / A. Coban, E. E. Khawaja and S. M. A. Durrani // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. – 2002. – Vol. 194. – P. 171-176.