

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Перова Наталья Николаевна

**Магнитооптическое зондирование наноструктурированных магнитных
материалов**

Специальность 1.3.12. Физика магнитных явлений

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2026

Диссертация подготовлена на кафедре магнетизма физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Научный

руководитель:

Ганьшина Елена Александровна

доктор физико-математических наук, профессор

**Официальные
оппоненты:**

Панина Лариса Владимировна, доктор физико-математических наук, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Институт новых материалов, кафедра технологии материалов электроники, профессор.

Барышев Александр Валерьевич, доктор физико-математических наук, профессор, Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики имени Н.Л. Духова, оптическая лаборатория, начальник.

Мурзина Татьяна Владимировна, доктор физико-математических наук, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра квантовой электроники, доцент.

Защита диссертации состоится «14» мая 2026 г. в 17 часов 00 минут на заседании диссертационного совета МГУ.013.5 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 8, криогенный корпус, конференц-зал.

E-mail: perov@magn.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3866>

Автореферат разослан «__» _____ 2026 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета,

кандидат физико-математических наук

Т.Б. Шапаева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертационная работа посвящена исследованию магнитных свойств наноструктурированных магнитных материалов с использованием комплекса магнитооптических методов, основанных на эффекте Керра, в сочетании с магнитометрией. Основное внимание уделено выявлению фазовых переходов, особенностей магнитного упорядочения и анизотропии приповерхностных слоёв, а также влиянию морфологии и интерфейсных эффектов на магнитный и магнитооптический отклик нанокомпозитов, аморфных и многослойных структур.

Актуальность работы обусловлена тем, что магнитные свойства наноматериалов в значительной степени определяются размерными эффектами и состоянием межфазных границ, которые существенно отличаются от объёмных характеристик и во многом задают механизмы перемангничивания и магнитную анизотропию [1–4]. При этом большинство традиционных магнитометрических методов обеспечивает преимущественно усреднённую по объёму информацию и обладает ограниченной чувствительностью к локальным и приповерхностным неоднородностям магнитного состояния [5–7].

Цель работы - экспериментальное исследование магнитных свойств различных классов наноструктурированных магнитных материалов методами объёмной магнитометрии, магнитооптической спектроскопии и микроскопии и установление взаимосвязи между морфологией, структурой и характером магнитного упорядочения в приповерхностном и объёмном слоях под влиянием различных факторов.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Обосновать выбор экспериментальных методов и разработать комплексный подход, объединяющий магнитооптические методы - Керр-спектроскопию, Керр-микроскопию и вибрационную магнитометрию, для исследования магнитной анизотропии, фазовых переходов и анализа доменной структуры в наноструктурированных материалах.
2. Исследовать влияние концентрации и морфологии ферромагнитной фазы в нанокомпозитах $(\text{CoFeB})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$ и $(\text{Co})_x(\text{CoO})_{100-x}$ а также в многослойных структурах $\{[(\text{CoFeB})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}]/\text{ZnO}\}_n$ на магнитооптические и магнитные характеристики.
3. Оценить влияние термообработки и поверхностной модификации на магнитные свойства аморфных и нанокристаллических лент и плёнок $\text{Co}_{75}\text{Si}_{15}\text{Fe}_5\text{Cr}_{4.5}\text{Al}_{0.5}$, $\text{Fe}_{72.4}\text{Ti}_{5.4}\text{V}_{19.2}\text{O}_{3.0}$ и $\text{Ni}_{41.1}\text{Co}_{31.6}\text{Fe}_{7.7}\text{Si}_{13.1}\text{B}_{6.5}$.
4. Проанализировать характер фазовых переходов, критические пороги перколяции и доменную структуру исследованных наноструктурированных

материалов на основе данных Керр-спектроскопии, Керр-микроскопии и магнитометрии, а также сопоставить полученные результаты с данными других исследований для оценки воспроизводимости эффектов и корректности их физической интерпретации.

Выбор материалов обусловлен необходимостью исследования систем с различным типом магнитного взаимодействия — от гранулярных композитов до аморфных и нанокристаллических сплавов, — что позволяет как оценить возможности магнитооптического зондирования, так и уточнить фундаментальные механизмы формирования магнитного порядка и роль интерфейсных эффектов в наноструктурированных магнитных материалах.

Научная новизна результатов, представленных в диссертации, состоит в следующем:

1. Впервые проведено комплексное магнитооптическое зондирование широкого класса наноструктурированных магнитных материалов, включающего нанокompозиты $(\text{CoFeB})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$ и $(\text{Co})_x(\text{CoO})_{100-x}$, многослойные структуры $\{[(\text{CoFeB})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}]/\text{ZnO}\}_n$, аморфные и аморфно-нанокристаллические плёнки и ленты - $\text{Co}_{75}\text{Si}_{15}\text{Fe}_5\text{Cr}_{4.5}\text{Al}_{0.5}$, $\text{Fe}_{72.4}\text{Ti}_{5.4}\text{V}_{19.2}\text{O}_{3.0}$ и $\text{Ni}_{41.1}\text{Co}_{31.6}\text{Fe}_{7.7}\text{Si}_{13.1}\text{B}_{6.5}$, с использованием Керр-спектроскопии, Керр-микроскопии и магнитометрии, что позволило выявить корреляции между магнитооптическим откликом и микромагнитной структурой.

2. Впервые выявлены критические концентрационные пороги переходов между различными состояниями магнитного упорядочения (суперпарамагнитный – суперферромагнитный – ферромагнитный) в тонкоплёночных нанокompозитах $(\text{CoFeB})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$ и $(\text{Co})_x(\text{CoO})_{100-x}$ методами магнитооптической спектроскопии и Керр-микроскопии.

3. Показано, что магнитооптические методы чувствительны к зарождению нанокристаллитов и сопутствующим фазовым неоднородностям в приповерхностной области аморфных плёнок $\text{Fe}_{72.4}\text{Ti}_{5.4}\text{V}_{19.2}\text{O}_{3.0}$.

4. Показано влияние морфологии и наноструктурирования поверхности на магнитооптические, магнитные и коррозионные свойства аморфных сплавов, в том числе при анодной модификации поверхности сплава $\text{Co}_{75}\text{Si}_{15}\text{Fe}_5\text{Cr}_{4.5}\text{Al}_{0.5}$ с формированием двумерных ячеистых структур.

Научная и практическая значимость работы заключается в расширении представлений о механизмах формирования магнитного упорядочения и микромагнитной структуры наноструктурированных магнитных материалов, установленных с использованием комплекса магнитооптических методов. Показана связь между морфологией, фазовым составом и магнитооптическим откликом в нанокompозитах, аморфных и нанокристаллических системах, а также определены концентрационные пороги переходов между различными типами магнитного упорядочения. Полученные результаты и разработанный

подход к магнитооптическому зондированию могут быть использованы для неразрушающего контроля магнитных свойств функциональных композитных и аморфных материалов и анализа влияния морфологии и межфазных взаимодействий на приповерхностные магнитные свойства.

Достоверность и обоснованность результатов исследования

Достоверность результатов обеспечивается применением взаимодополняющих апробированных экспериментальных методов, включающих магнитооптическую Керр-спектроскопию, Керр-микроскопию и вибрационную магнитометрию, а также воспроизводимостью измерений и экспериментальных погрешностей. Измерения проводились с использованием современных измерительных комплексов. Сопоставление данных, полученных различными методами, позволило провести перекрёстную верификацию результатов и подтвердить корректность их физической интерпретации.

Результаты исследования были доложены на профильных научных конференциях, в том числе с международным участием, и опубликованы в рецензируемых научных изданиях, что подтверждает их научную значимость и признание в профессиональном сообществе.

Положения, выносимые на защиту

1. Комплексный подход к магнитооптическому зондированию, объединяющий Керр-магнитометрию, Керр-спектроскопию, Керр-микроскопию в сочетании с вибрационной магнитометрией, позволяет выявить и охарактеризовать структурно-магнитные особенности сложных магнитонеоднородных систем, включая распределение фаз, магнитные переходы и приповерхностную магнитную неоднородность.

2. В нанокompозитах $(\text{CoFeB})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$ при увеличении содержания металлической фазы до $x \approx 36$ ат.% реализуется переход от суперпарамагнитного к ферромагнитному состоянию через суперферромагнитное состояние, характеризующееся частичной корреляцией магнитных моментов наногранул. Визуализация доменных структур в них становится возможной при концентрациях металлической фазы более $x \sim 40\%$.

3. Многослойные нанокompозиты $\{[(\text{CoFeB})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}]/\text{ZnO}\}_n$ сохраняют суперпарамагнитный характер магнитного отклика, однако форма спектра экваториального эффекта Керра существенно зависит от толщин ультратонких слоёв композита и ZnO. Изменения амплитуд и положения спектральных экстремумов обусловлены интерфейсными и интерференционными эффектами.

4. В нанокompозитах $(\text{Co})_x(\text{CoO})_{100-x}$ интерфейсное взаимодействие на границах Co/CoO формирует локальные ферромагнитные кластеры и вызывает появление гистерезиса с $H_c > 500$ Э уже при $x \approx 3.5$ ат.% металлического Co.

5. Вакуумная термообработка в течение часа аморфно-нанокристаллических плёнок $\text{Fe}_{72.4}\text{Ti}_{5.4}\text{V}_{19.2}\text{O}_{3.0}$ в диапазоне 200–400 °C приводит к существенной модификации приповерхностного магнитного слоя. Термообработка вызывает формирование приповерхностной магнитной анизотропии, появление локальных жёстких фаз и переход от неупорядоченной доменной структуры к полосовой, сопровождающийся двухступенчатым перемагничиванием.

6. Анодирование и коррозионное воздействие существенно изменяют приповерхностные магнитные свойства аморфных сплавов $\text{Co}_{75}\text{Si}_{15}\text{Fe}_5\text{Cr}_{4.5}\text{Al}_{0.5}$. При этом анодное окисление приводит к упорядочению и частичной стабилизации доменной структуры, тогда как коррозионная среда вызывает выраженную поверхностную магнитную неоднородность при неизменности объёмных характеристик.

Соответствие паспорту специальности

Диссертация соответствует паспорту специальности 1.3.12 Физика магнитных явлений (физико-математические науки), п.3 и п.4:

3. Экспериментальные исследования магнитных свойств и состояний веществ различными методами, установление взаимосвязи этих свойств и состояний с химическим составом и структурным состоянием, выявление закономерностей их изменения под влиянием различных внешних воздействий.

4. Исследование изменений различных физических свойств вещества, связанных с изменением их магнитных состояний и магнитных свойств.

Апробация результатов

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на российских и международных научных конференциях, включая: The 7th ICAUMS (Япония, 2025); Международная молодежная конференция «Ломоносов» (Москва, 2017, 2019, 2023 гг.); XXV Международная конференция НМММ (Москва, 2024 г.); 5th ISAMMA (Вьетнам, 2024 г.); Международная конференция SISM (Самарканд, 2023 г.); The 6th ICAUMS (Индонезия, 2023 г.); ИВСМ (Калининград, 2017 г.).

Публикации

Основные положения, результаты и выводы диссертации отражены в 9 научных трудах, 7 из которых опубликованы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности и отрасли наук. Полный список публикаций приведён в конце работы.

Личный вклад автора является определяющим. Основные результаты диссертационной работы получены лично либо при непосредственном участии автора. Автором выполнены магнитооптические исследования, включая Керр-

спектроскопию, Керр-магнитометрию и визуализацию доменной структуры, а также измерения методом вибрационной магнитометрии. В работах, выполненных совместно с коллегами, автор участвовал в постановке эксперимента, анализе и интерпретации результатов, подготовке публикаций и представлении полученных данных на российских и международных научных конференциях.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, включая две главы с оригинальными результатами, заключения, списков сокращений и условных обозначений и литературы – 196 наименований. Основная часть работы изложена на 157 страницах текста, включая 59 рисунков, 6 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цель и задачи исследования, а также представлены основные положения, выносимые на защиту. Показаны научная новизна, практическая значимость и достоверность полученных результатов.

В первой главе представлен обзор литературы, посвящённой наноструктурированным магнитным материалам, их классификации и свойствам. Рассмотрены результаты исследования различных нанокompозитных систем, а также аморфных и нанокристаллических магнитных плёнок и лент. Обсуждаются особенности формирования магнитных свойств в наноразмерных системах, включая влияние размеров структурных элементов, морфологии, фазового состава и межфазных интерфейсов [8–12]. Проведен анализ методов получения наноструктурированных материалов и роли технологических параметров в формировании их магнитных и магнитооптических свойств. Показано, что структурная неоднородность и многофазность таких систем приводят к усложнению магнитного отклика и требуют применения чувствительных методов диагностики.

Во второй главе описаны экспериментальные методики и измерительные комплексы, использованные для исследования магнитных свойств наноструктурированных материалов. Приведены основные особенности вибрационной магнитометрии, применяемой для получения интегральных магнитных характеристик, а также описаны магнитооптические методы — Керр-спектроскопия и Керр-микроскопия, позволяющие исследовать приповерхностные магнитные свойства и локальные процессы перемагничивания. Рассмотрены схемы экспериментальных установок, используемые геометрии экспериментов и условия проведения измерений. Описаны основные подходы к обработке и анализу экспериментальных данных,

обеспечивающие сопоставление магнитометрических и магнитооптических результатов и комплексное зондирование магнитных свойств исследуемых систем. Все магнитооптические и магнитометрические измерения выполнены при комнатной температуре ($T \approx 300$ К).

В третьей главе приведены результаты экспериментального исследования магнитных и магнитооптических свойств композитных наноструктурированных систем различного типа. Проанализировано влияние морфологии, распределения металлической фазы и структуры межфазных интерфейсов на характер магнитного упорядочения. Подробное рассмотрение отдельных систем и полученных для них результатов приведено в соответствующих подразделах.

Серия нанокompозитов $(\text{CoFeV})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$

Исследованы нанокompозитные плёнки $(\text{CoFeV})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$, представляющие собой гранулированные системы, в которых наногранулы сплава CoFeV распределены в аморфной диэлектрической матрице ниобата лития. Исследованы две серии образцов с концентрацией металлической фазы от 17 до 48 ат.% CoFeV, различающиеся технологией осаждения: сплошное напыление на неподвижную Si-подложку и послойное напыление на вращающуюся подложку SiO₂/Si.

Магнитооптические исследования методом Керр-спектроскопии в экваториальной геометрии выявили характерную эволюцию полевых зависимостей экваториального эффекта Керра (ЭЭК) при увеличении концентрации CoFeV (Рисунок 1).

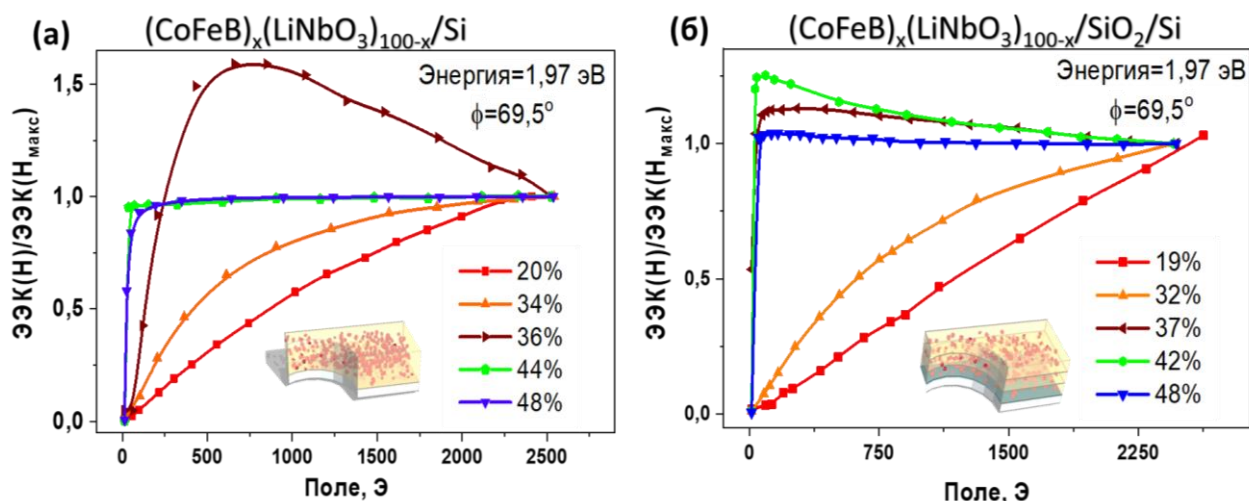


Рисунок 1 - Полевые зависимости ЭЭК нанокompозитных плёнок $(\text{CoFeV})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$, осаждённых одним слоем (а) и послойно (б), при энергии излучения $E = 1.97$ эВ, комнатной температуре и угле падения $\phi = 69.5^\circ$ [A3]. На вставках - модели структуры образцов.

При низких концентрациях ($x \lesssim 25$ %) полевые зависимости имеют квазилинейный характер, соответствующий суперпарамагнитному состоянию.

В интервале промежуточных концентраций (примерно 30–42 %) наблюдается немонотонное поведение ЭЭК с выраженным максимумом в промежуточных магнитных полях, что указывает на формирование магнитно-неоднородного состояния с сосуществованием суперпарамагнитных наногранул и локальных ферромагнитных кластеров. При концентрациях $x \geq 44\%$ полевые зависимости приобретают вид, соответствующий ферромагнитному упорядочению.

Аномальный характер полевых зависимостей ЭЭК в переходной области концентраций обусловлен конкуренцией вкладов от суперпарамагнитной и ферромагнитной подсистем, обладающих различными спектрами и противоположным знаком магнитооптического отклика. Выраженность аномалии зависит от технологии осаждения: в образцах, полученных сплошным напылением, эффект проявляется более отчётливо, что связано с более широким распределением размеров и степеней магнитной корреляции наногранул и, как следствие, с более выраженным сосуществованием суперпарамагнитной и ферромагнитной подсистем. В послойно сформированных структурах переход к коллективному состоянию происходит более упорядоченно, что уменьшает область конкуренции их магнитооптических вкладов.

Соответствующие изменения спектральных зависимостей ЭЭК показаны на Рисунке 2 и коррелируют с морфологическими особенностями структуры по данным ПЭМ. Различие спектров для двух серий отражает влияние морфологии наногранул, определяемой условиями осаждения. Данные результаты подробно представлены и обсуждены в [A3].

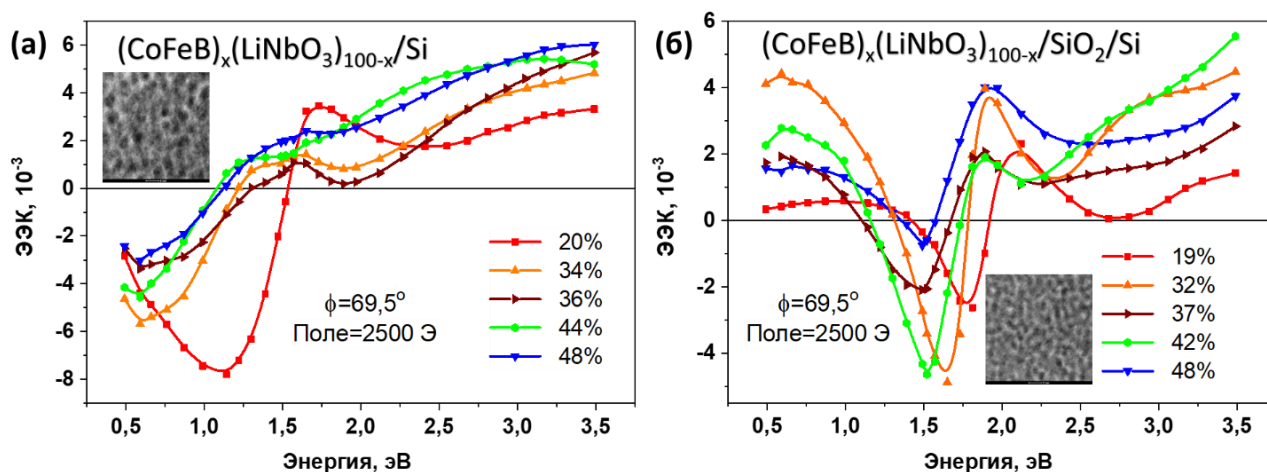


Рисунок 2 - Спектральные зависимости сигнала ЭЭК для разных концентраций (CoFeB) – объемное напыление (а), послойное (б). На вставках – изображения просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) для типичных плёнок: светлые области соответствуют ферромагнитной фазе FeCoB, наблюдаемой на участке порядка 40 нм² [A3].

Результаты Керр-микроскопии подтвердили концентрационно-индуцированную эволюцию магнитного порядка в приповерхностном слое (Рисунок 3). При концентрациях $x \leq 36\text{--}37\%$ устойчивые доменные структуры

не наблюдаются, несмотря на появление нелинейности полевых зависимостей намагниченности, что указывает на частичную корреляцию магнитных моментов без формирования развитой доменной структуры. В области концентраций около 42–44 % регистрируется формирование вытянутых доменных областей, ориентированных вдоль лёгкой оси намагничивания, что соответствует переходу к коллективному магнитному упорядочению. При $x \approx 48$ % наблюдается устойчивая доменная структура, характерная для ферромагнитного состояния.

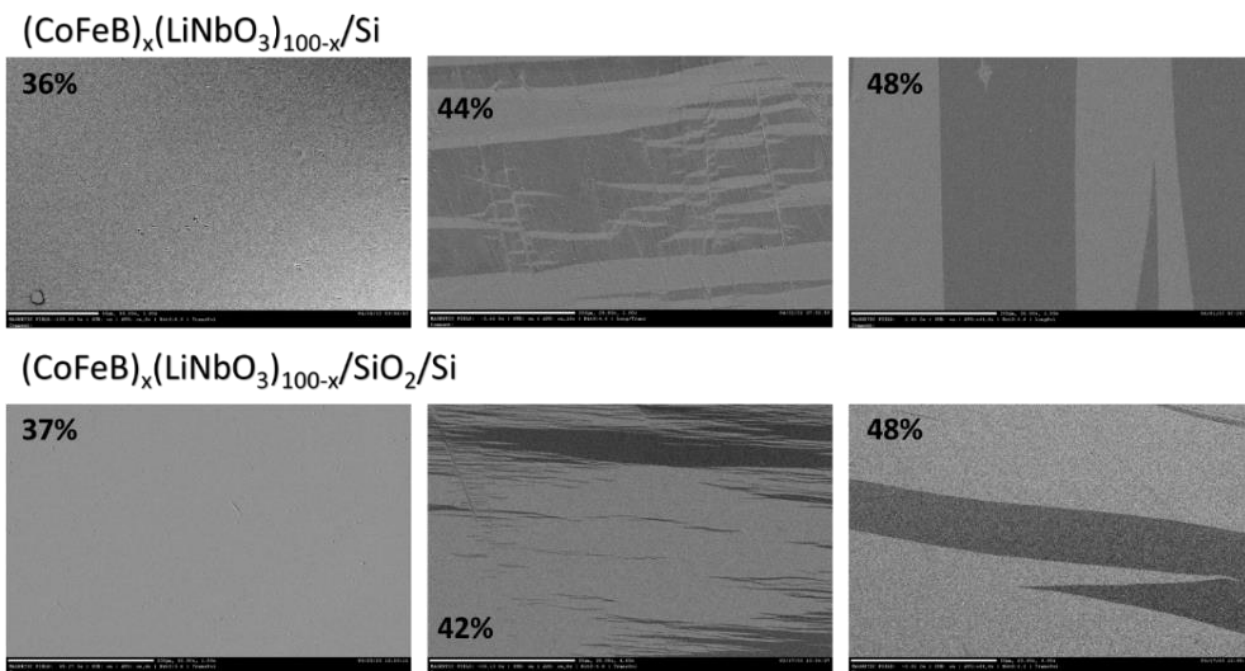


Рисунок 3 - Доменные структуры для разных концентраций металлической фазы CoFeB. Размер области исследования 300×500 мкм.

По данным вибрационной магнитометрии с ростом концентрации CoFeB (36–48 ат.%) в обеих сериях наблюдается увеличение начальной магнитной проницаемости. При этом в области $x < 40$ % объёмные петли $M(H)$ сохраняют суперпарамагнитный характер и описываются функцией Ланжевена. Интегральный характер метода приводит к сниженной чувствительности к начальным стадиям коллективного магнитного упорядочения, которые более отчётливо проявляются в магнитооптических измерениях.

Сопоставление данных Керр-спектроскопии, Керр-микроскопии и вибрационной магнитометрии показывает, что формирование коллективного магнитного порядка в нанокompозитах $(\text{CoFeB})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$ носит неоднородный характер и начинается в приповерхностном слое. Магнитооптические методы демонстрируют более высокую чувствительность к начальному этапу формирования магнитных корреляций между кластерами, тогда как объёмная магнитометрия отражает преимущественно усреднённый магнитный отклик системы [A3].

Многослойные структуры $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}]/\text{ZnO}\}_n$

В разделе обсуждаются результаты исследования многослойных наноструктур $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}]/\text{ZnO}\}_n$, полученных методом ионно-лучевого послойного напыления, при котором толщины отдельных слоёв составляют 1–4 нм и сопоставимы с характерными размерами магнитных наногранул. Были исследованы 2 серии образцов, с нулевой прослойкой ZnO но с различными толщинами НК и вторая система с полупроводниковыми прослойками, при разных соотношениях толщин магнитного и полупроводникового слоев.

Структурные исследования показали, что CoFeB формирует аморфные наногранулы в матрице SiO₂, тогда как ZnO кристаллизуется в гексагональную фазу, ориентированную вдоль направления роста плёнки [A2]. Введение полупроводниковой прослойки ZnO приводит к формированию дополнительных интерфейсов и существенно изменяет условия межгранульного взаимодействия, не изменяя при этом номинальную концентрацию магнитной фазы.

Магнитооптические исследования методом Керр-спектроскопии показали, что для послойно сформированных композитов $(\text{CoFeB})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}$ спектры ЭЭК существенно отличаются от спектров однослойных плёнок аналогичного состава [A2, A5, A7]. Основной спектральный минимум смещается в область 1.5–2.0 эВ, а полевые зависимости сигнала остаются линейными в диапазоне до ± 3 кЭ без признаков насыщения, что указывает на преобладание суперпарамагнитного состояния при малом эффективном объёме магнитных гранул. Эти особенности подробно проанализированы в [A2].

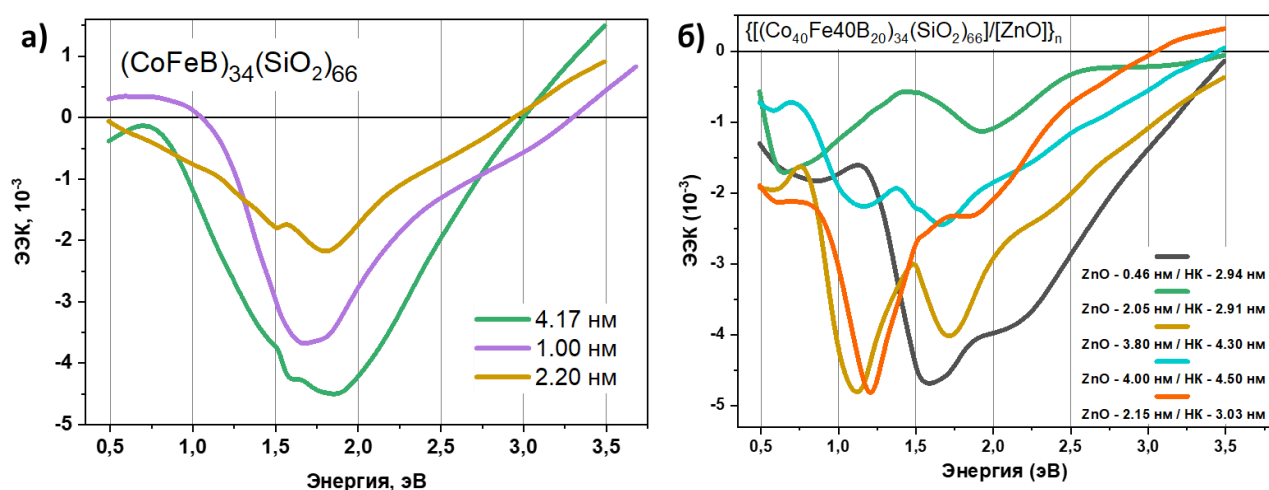


Рисунок 4 - Спектральные зависимости магнитооптического Керр-отклика для тонкоплёночных композитов $(\text{CoFeB})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}$, полученных послойным напылением (а), при варьировании толщины магнитного слоя и прослойки ZnO (б) [A2].

Введение периодических прослоек ZnO не приводит к изменению линейного характера полевых зависимостей ЭЭК, однако существенно влияет на форму

спектрального отклика (Рисунок 4). При увеличении толщины ZnO до ~1.5 нм наблюдается рост амплитуды сигнала и смещение спектральных экстремумов в область ~1.6 эВ, тогда как дальнейшее увеличение толщины сопровождается резким снижением амплитуды и сдвигом максимумов в область более высоких энергий. Во всех структурах с ZnO фиксируется дополнительный инфракрасный минимум (~0.55–0.60 эВ), что указывает на вклад интерфейсных состояний и возможные фазовые модификации на границах раздела.

Методы вибрационной магнитометрии и Керр-микроскопии выявили слабый, но воспроизводимый магнитный отклик без признаков насыщения в исследуемом диапазоне полей (Рисунок 5). Полевые зависимости соответствуют суперпарамагнитному поведению образца; доменные структуры при Керр-микроскопии не визуализируются.

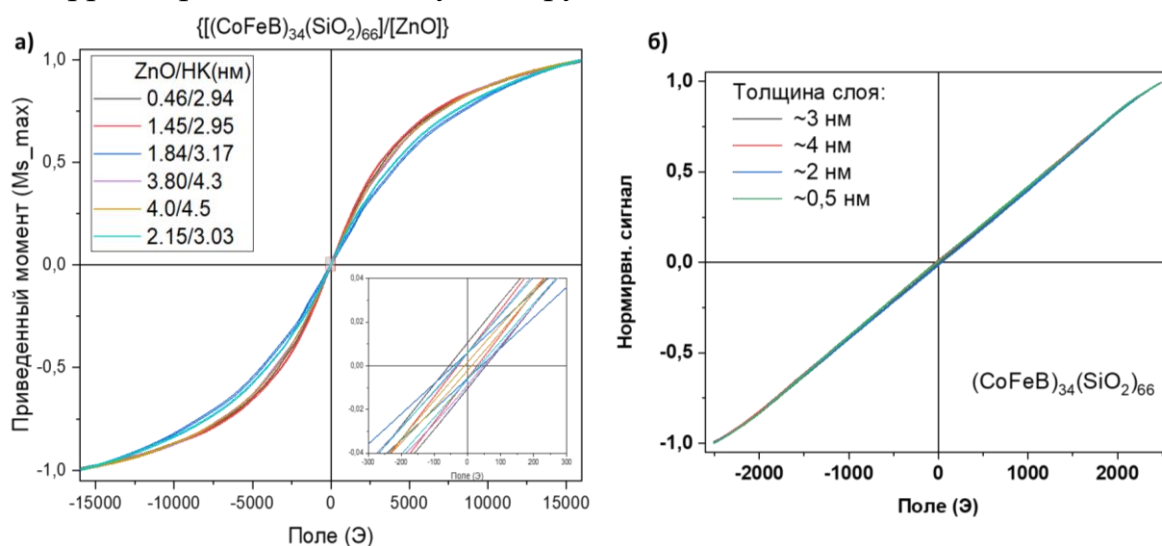


Рисунок 5 - Петли гистерезиса многослойных наноструктур $\{[(CoFeB)_{34}(SiO_2)_{66}]/[ZnO]\}_n$ полученные методами вибрационной магнитометрии, на вставке приведены фрагменты петель в увеличенном масштабе (а) и магнитооптической Керр-микроскопии (б).

Совокупность полученных данных показывает, что при малой толщине магнитных слоёв и ограниченном объёме ферромагнитной фазы магнитное упорядочение в многослойных структурах носит локализованный характер. При этом спектры ЭЭЖ оказываются высокочувствительными к параметрам слоистой системы и интерфейсным эффектам: число слоёв, толщина слоя ZnO и соотношение толщин магнитных и немагнитных слоёв определяют амплитуду и положение спектральных особенностей, тогда как объёмные магнитные методы фиксируют преимущественно усреднённый суперпарамагнитный отклик [A2, A9].

Серия нанокмполитов $(Co)_x(CoO)_{100-x}$

Исследованы нанокмполиты $(Co)_x(CoO)_{100-x}$, в которых металлические гранулы Co распределены в матрице диэлектрического оксида CoO.

Особенностью данной системы является химическое родство фаз, формирующее развитые интерфейсы Co/CoO с выраженным межфазным обменным взаимодействием. Плёнки получены методом ионно-лучевого осаждения в атмосфере Ar и Ar+O₂, что позволило варьировать морфологию фаз без изменения их химической природы.

Согласно данным технологической и структурной характеристики, выполненной при изготовлении образцов, для плёнок (Co)_x(CoO)_{100-x}, полученных в атмосфере Ar размер гранул меньше, чем в атмосфере Ar+O₂. Измерения транспортных свойств выявили перколяционный переход при аномально низких концентрациях металлической фазы (≈ 12 ат.% Co для Ar и ≈ 8 ат.% для Ar+O₂). Эти особенности определяют специфику магнитного отклика системы и служат основой для интерпретации полученных в работе магнитооптических и магнитометрических результатов.

Магнитооптическая Керр-спектроскопия зафиксировала устойчивый ЭЭК-отклик уже при $x \approx 3.5$ ат.% Co — существенно ниже типичных значений для систем металл–диэлектрик (Рисунок 6). Спектры ЭЭК сохраняют общий вид при изменении условий осаждения, а рост концентрации Co приводит к смещению экстремумов в область более высоких энергий и снижению амплитуды сигнала. Полевые зависимости ЭЭК остаются квазилинейными во всём исследованном диапазоне концентраций, при исследовании в полях в диапазоне ± 3 кЭ [A4].

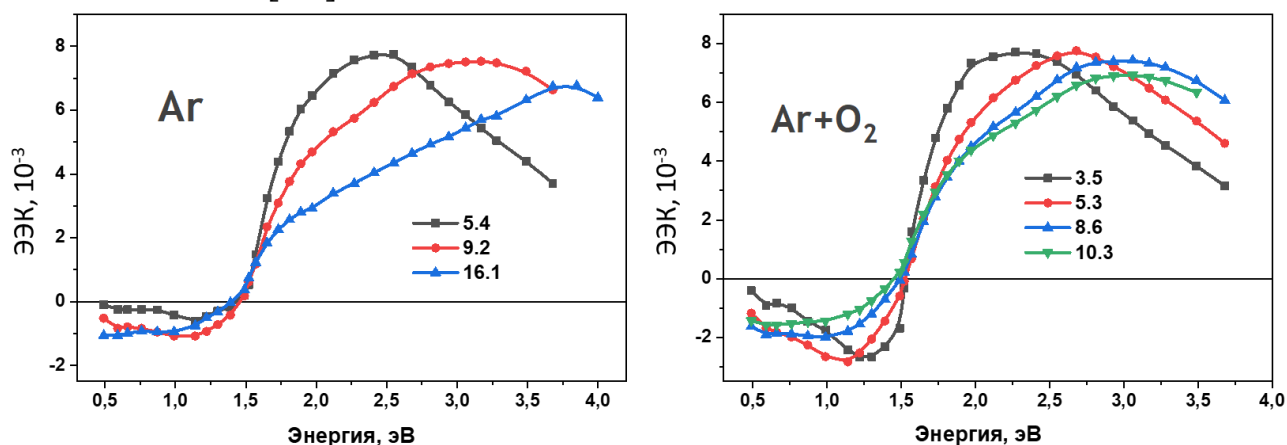


Рисунок 6 - Спектры ЭЭК(E) для нанокмозитов (Co)_x(CoO)_{100-x} при различных концентрациях металлического кобальта. Слева – график для композитов, изготовленных в чистом аргоне, справа – с добавлением кислорода [A4].

Это объясняется высокими значениями поля насыщения для этой системы, выше 5 кЭ, полученными методом вибрационной магнитометрии (Рисунок 7). Таким образом результаты исследования МО методами соответствуют частным петлям гистерезиса и не отражают полного цикла перемагничивания.

Образцы обладают выраженной магнитной анизотропией и коэрцитивной силой до ~ 700 Э уже при $x \approx 3.5-4.5$ ат.%.

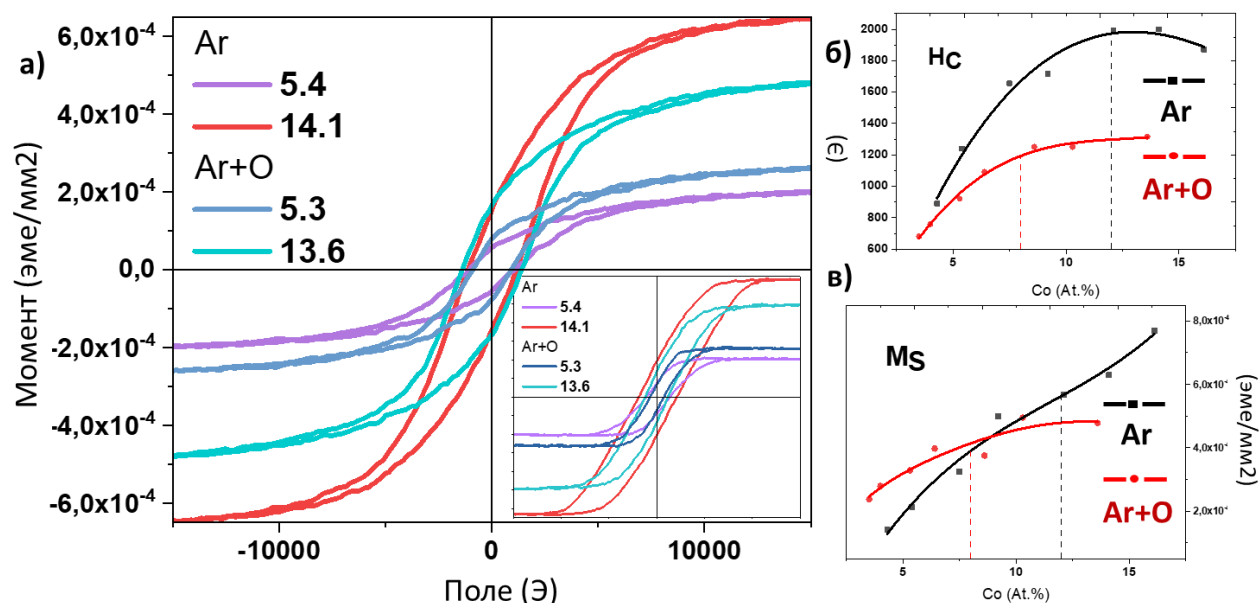


Рисунок 7 - Магнитные свойства наноконкомпозитов $(Co)_x(CoO)_{100-x}$. Петли гистерезиса, измеренные методом вибрационной магнитометрии при приложении магнитного поля в плоскости плёнки, на вставке – при поперечной ориентации (а); концентрационная зависимость коэрцитивной силы H_c (б); концентрационная зависимость намагниченности насыщения M_s (в); для плёнок, осаждённых в атмосфере Ar и Ar+O₂. Пунктирными линиями отмечены пороги перколяции, определённые по данным транспортных измерений.

Такое поведение нетипично для разреженных ансамблей наночастиц и указывает на вклад анизотропных ферромагнитных кластеров и интерфейсного обменного взаимодействия на границах Co/CoO [A4].

Метод Керр-микроскопии не выявил доменных структур и петель гистерезиса в большинстве образцов, что согласуется с квазилинейным характером полевых зависимостей ЭЭК.

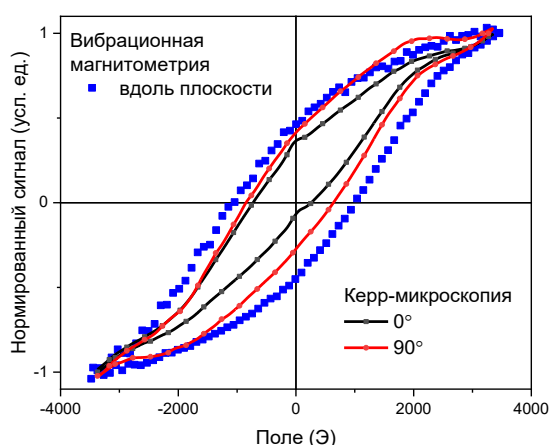


Рисунок 8 - Петли гистерезиса образца $Co_{13.6}CoO_{86.4}$, снятые при приложении поля вдоль плоскости образца методом вибрационной магнитометрии и Керр-микроскопии (при двух ориентациях магнитного поля).

Однако для композита с повышенной концентрацией Co (13.6 % выше $x_{пер}$) в приповерхностной петле гистерезиса наблюдались коэрцитивность, анизотропия и асимметрия по полю, характерная для эффекта обменного смещения (Рисунок 8). Совпадение формы петель, полученных методами Керр-микроскопии и вибрационной магнитометрии, свидетельствует о формировании локальных ферромагнитных кластеров, коррелированных через интерфейсы Co/CoO.

Таким образом, в системе $(\text{Co})_x(\text{CoO})_{100-x}$ магнитооптические методы регистрируют квазилинейный характер перемагничивания для приповерхностного слоя при малой концентрации x , тогда как объёмные магнитометрические измерения выявляют вклад ферромагнитных кластеров и интерфейсного обменного взаимодействия. Различие зависимостей подчёркивает ключевую роль интерфейсов Co/CoO в формировании магнитных свойств композита при концентрациях металлической фазы ниже перколяционного порога проводимости [A4].

В четвертой главе рассматриваются аморфные и нанокристаллические магнитные материалы как особый класс наноструктурированных систем, в которых магнитные свойства определяются структурной релаксацией, локальной анизотропией и состоянием приповерхностного слоя. Экспериментально исследовано влияние термической и химической обработки на структуру, процессы перемагничивания и эволюцию доменной структуры аморфных лент и плёнок. Показана связь между морфологическими изменениями, формой петель гистерезиса и магнитооптическим откликом. Полученные результаты позволяют уточнить роль начальной кристаллизации, внутренних напряжений и распределения локальной анизотропии в формировании магнитных свойств аморфных систем.

Аморфные ленты состава NiCoFeSiB

Исследованы аморфные ленты состава $\text{Ni}_{41.1}\text{Co}_{31.6}\text{Fe}_{7.7}\text{Si}_{13.1}\text{B}_{6.5}$, полученные методом быстрой закалки из расплава, с целью анализа магнитной анизотропии и особенностей приповерхностного перемагничивания. Основное внимание уделено выявлению влияния технологического направления прокатки и остаточных внутренних напряжений на магнитные свойства материала.

По данным вибрационной магнитометрии установлено наличие слабой, но воспроизводимой магнитной анизотропии, связанной с направлением прокатки ленты. При ориентации внешнего магнитного поля вдоль и поперёк направления прокатки наблюдаются различия в форме петель гистерезиса при сохранении малых значений коэрцитивной силы, характерных для магнитномягких аморфных материалов.

Магнитооптические измерения выявили более выраженные анизотропные эффекты в приповерхностном слое. Полевые зависимости Керр-отклика существенно различаются при изменении ориентации внешнего магнитного поля, включая изменение знака сигнала в области малых полей при поле, приложенном вдоль направления прокатки (Рисунок 9 (а)). Спектральные зависимости экваториального эффекта Керра, для всех ориентаций и в разных

полях, имеют сглаженный характер без выраженных резонансных особенностей, что соответствует аморфной структуре материала (Рисунок 9 (б)).

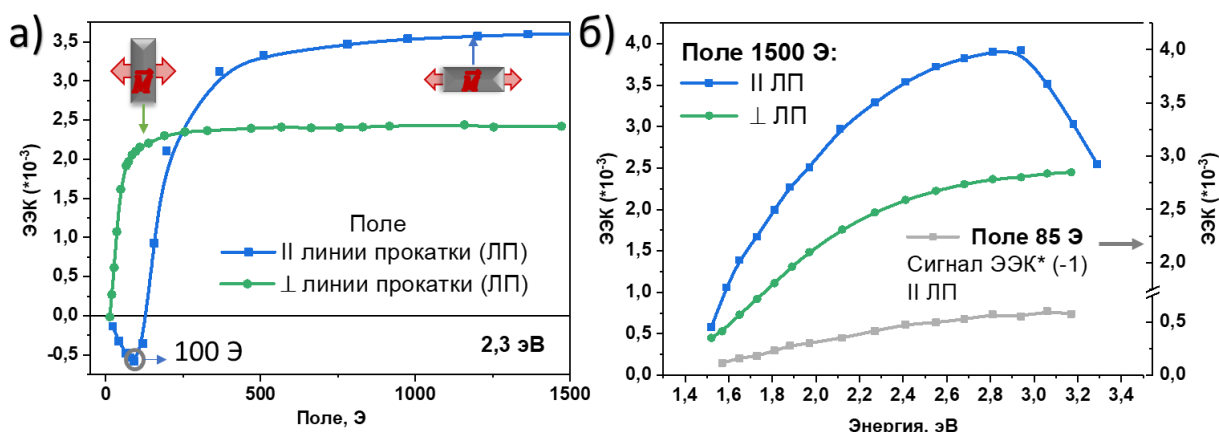


Рисунок 9 - (а) Полевые зависимости Керр-сигнала ленты $Ni_{41.1}Co_{31.6}Fe_{7.7}Si_{13.1}B_{6.5}$ для двух ориентаций поля. (б) Спектральные зависимости вдоль оси легкого (поля 1,5 кЭ и 85 Э) и трудного (1,5 кЭ) намагничивания.

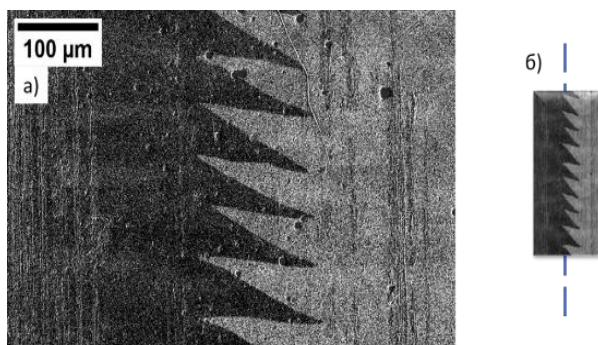


Рисунок 10 - Зигзагообразная граница доменов на поверхности аморфной ленты. Область исследования 500*250 мкм. На вставке (б) схематично изображено положение доменов относительно образца и направления ЛП.

Керр-микроскопия позволила визуализировать устойчивую зигзагообразную доменную структуру приповерхностного слоя, сохраняющуюся при многократных циклах перемагничивания (Рисунок 10). Регулярная форма доменных границ указывает на наличие внутренней анизотропии, индуцированной в процессе формирования ленты, и хорошо согласуется с данными магнитометрии и Керр-спектроскопии [A8].

Совокупность магнитометрических и магнитооптических данных демонстрирует высокую чувствительность приповерхностного магнитного состояния аморфных лент к технологическим факторам формирования и подчеркивает информативность комплекса магнитооптических методов при анализе магнитной текстуры систем без дальнего кристаллического порядка.

Влияние термообработки на магнитные свойства плёнок $FeTiVO$

В этой части работы описаны результаты исследования влияния вакуумного отжига на структуру, объёмные и приповерхностные магнитные свойства плёнок $Fe_{72.4}Ti_{5.4}V_{19.2}O_{3.0}$, полученных магнетронным осаждением. Плёнки подвергались термической обработке при температурах 200, 300 и 400 °С, что

позволяло проследить начальные стадии нанокристаллизации и их отражение в магнитном и магнитооптическом отклике.

Структурный анализ показал, что в исходном состоянии и после низкотемпературного отжига плёнки имеют смешанную аморфно-нанокристаллическую структуру. При повышении температуры отжига происходит рост и кластеризация нанокристаллитов α -Fe, сопровождающиеся перераспределением компонентов и формированием градиента состава по толщине плёнки.

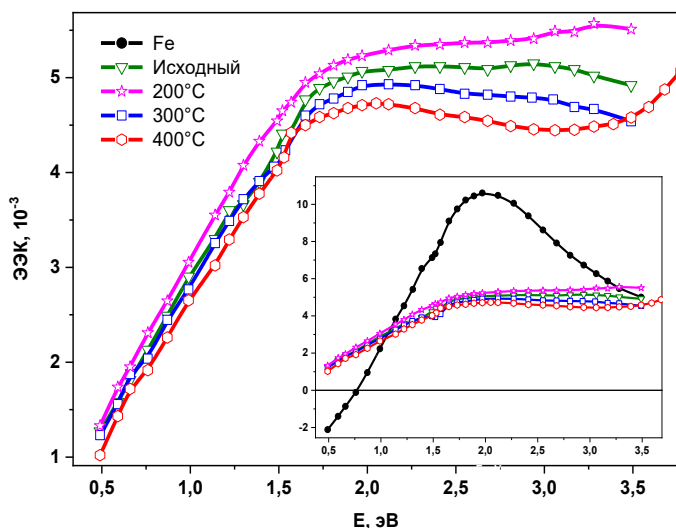


Рисунок 11 - Спектральные зависимости ЭЭК для плёнок $Fe_{72.4}Ti_{5.4}V_{19.2}O_{3.0}$ в исходном состоянии и после отжига при различных температурах. На вставке — сравнение с нанокристаллической плёнкой Fe [A1].

Спектроскопия ЭЭК выявила высокую чувствительность приповерхностного слоя к термообработке. В спектрах отожжённых образцов появляется максимум вблизи 2.0 эВ (Рисунок 11), характерный для ферромагнитной фазы α -Fe, что свидетельствует о начале нанокристаллизации именно в приповерхностной области. При этом сглаженный характер спектров указывает на сохранение существенной доли аморфной матрицы. Наибольшие изменения спектрального

отклика зафиксированы после отжига при 400 °С. Полученные результаты подробно обсуждены в [A1].

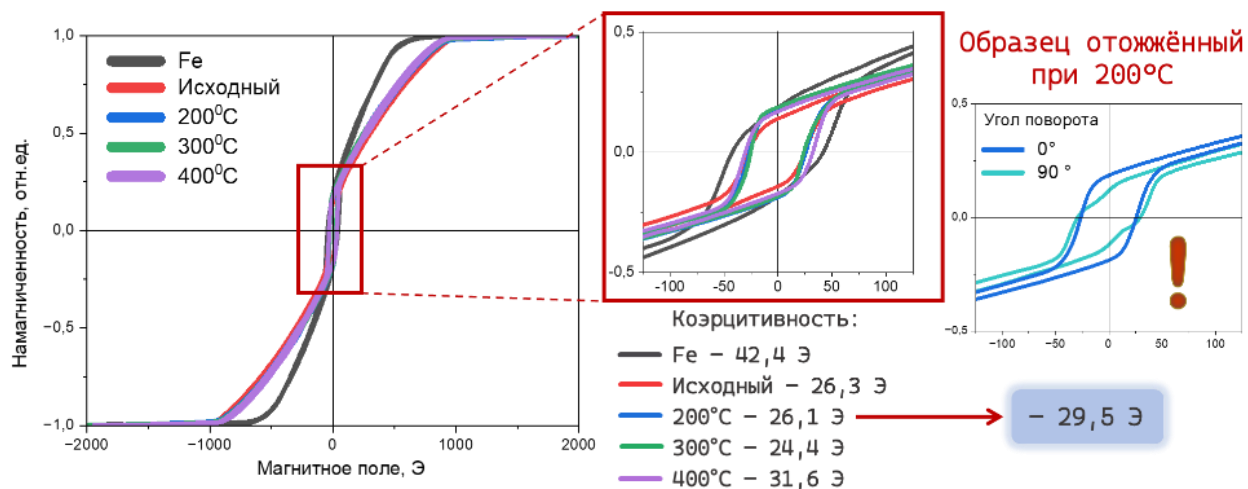


Рисунок 12 - Объёмные петли гистерезиса плёнок $Fe_{72.4}Ti_{5.4}V_{19.2}O_{3.0}$ в исходном состоянии и после отжига при 200, 300 и 400 °С. Вставка в центре — увеличение центральной части петель, справа — сравнение петель при двух ортогональных положениях образца (0° и 90°) после отжига при 200 °С.

Объёмные измерения методом вибрационной магнитометрии показали, что во всём диапазоне температур отжига плёнки сохраняют магнитномягкий характер (Рисунок 12). Коэрцитивная сила изменяется немонотонно, достигая минимума после отжига при 300 °С, что может быть связано с релаксацией внутренних напряжений и формированием мелкодисперсной нанокристаллической фазы. При дальнейшем повышении температуры наблюдается умеренный рост коэрцитивности, обусловленный укрупнением кристаллитов и усилением межзёрненных взаимодействий.

Наиболее выраженные изменения выявлены при анализе приповерхностных петель гистерезиса, полученных методом Керр-микроскопии (Рисунок 13). После отжига фиксируется ступенчатый характер перемагничивания, проявляющийся в виде перетяжки центральной части петли, что указывает на существование нескольких магнитных фаз с различной коэрцитивностью. Эти особенности значительно слабее выражены в объёмных петлях и проявляются прежде всего в приповерхностных петлях.

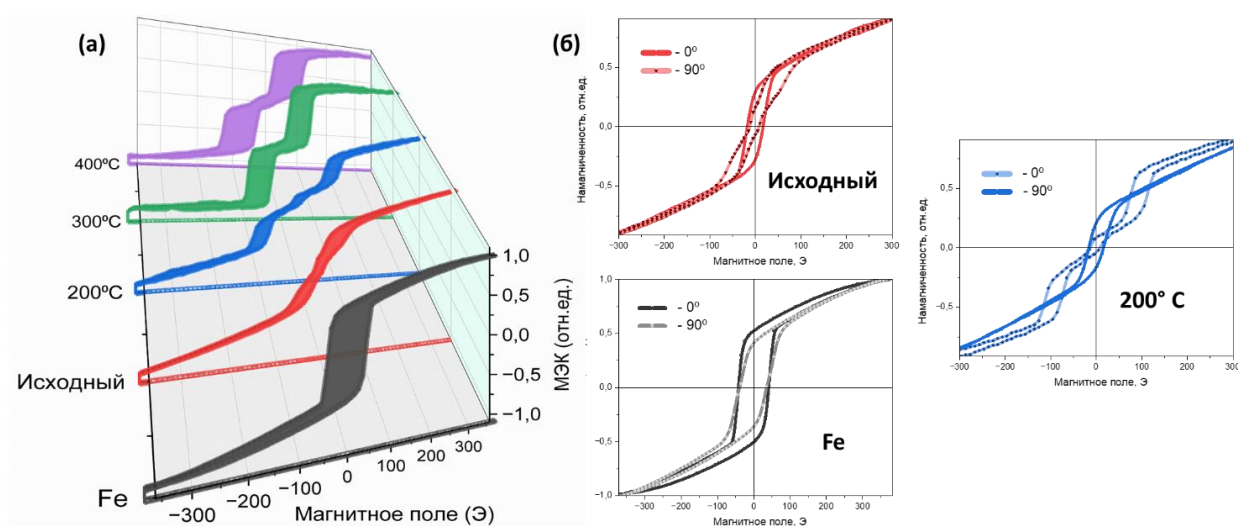


Рисунок 13 - Петли гистерезиса приповерхностной области плёнки Fe и плёнок $Fe_{72.4}Ti_{5.4}V_{19.2}O_{3.0}$ в исходном состоянии и после отжига при различных температурах (а). Форма петель гистерезиса для двух ориентаций магнитного поля для Fe, исходной пленки и отожжённой при 200 °С (б).

Керр-микроскопия позволила визуализировать полосовую доменную структуру, наиболее отчётливо выраженную после отжига при 400 °С (Рисунок 14). При повороте образца в плоскости магнитного поля характер доменной структуры существенно изменяется, что свидетельствует о формировании анизотропной магнитной текстуры. Совокупность спектроскопических, магнитометрических и микроскопических данных указывает на то, что процессы нанокристаллизации начинаются с поверхности плёнки и лишь при более высоких температурах отжига затрагивают объём материала.

Таким образом, показано, что магнитооптические методы обладают повышенной чувствительностью к ранним стадиям структурных превращений

и позволяют выявлять фазовую и магнитную неоднородность, не фиксируемую интегральными магнитометрическими измерениями. Данные результаты опубликованы в [А1].

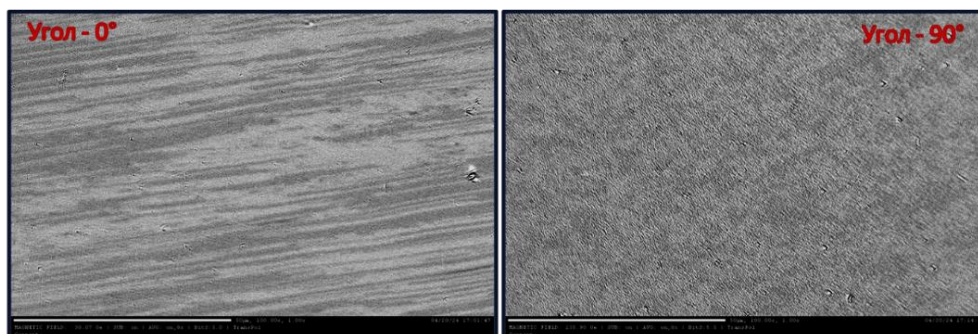


Рисунок 14 - Магнитооптические изображения доменной структуры плёнки $Fe_{72.4}Ti_{5.4}V_{19.2}O_{3.0}$ после отжига при $400\text{ }^{\circ}C$: а — ориентация образца 0° , б — после поворота на 90° . Область наблюдения $110 \times 70\text{ мкм}$.

Влияние поверхностной модификации на магнитные свойства аморфных лент $CoSiFeCrAl$.

В разделе приведены результаты исследования влияния различных типов поверхностной модификации и коррозионного воздействия на магнитные свойства аморфных лент $Co_{75}Si_{15}Fe_5Cr_{4.5}Al_{0.5}$. Были исследованы исходные образцы, образцы после механической обработки поверхности, а также образцы с регулярной наноструктурой, сформированной методом анодирования в электролите, до и после воздействия агрессивной среды.

Структурные исследования (СЭМ) показывают, что анодирование приводит к формированию регулярных наночаеек размером порядка $100\text{--}150\text{ нм}$, тогда как коррозионное воздействие вызывает частичную деградацию поверхностного слоя и появление дефектов (Рисунок 15). Эти данные далее используются как морфологический контекст для интерпретации магнитных свойств.

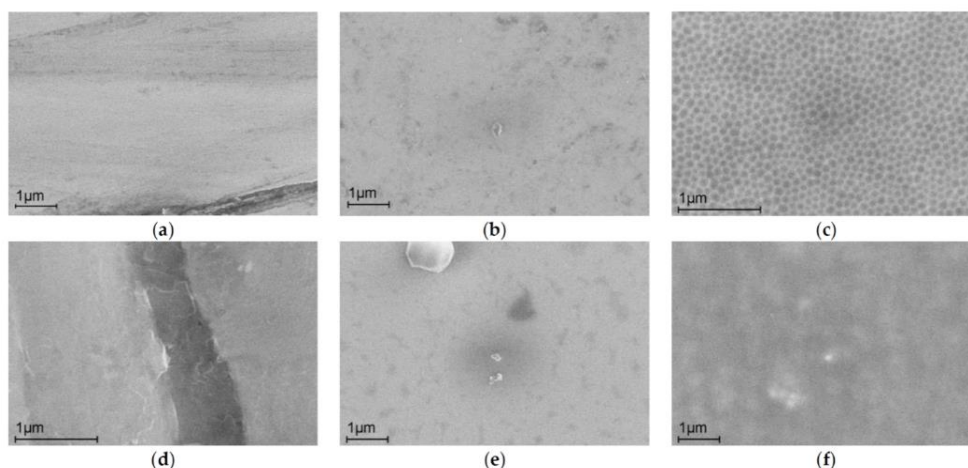


Рисунок 15 - СЭМ-изображения поверхности: (а) после абразивной обработки, (б) исходный сплав, (с) с анодным окислением в ионной жидкости в течение 80 с и (d-f) после коррозионных испытаний [А6].

Объёмные магнитные свойства, измеренные методом вибрационной магнитометрии, показали, что в исходном состоянии все образцы сохраняют магнитномягкий характер с низкой коэрцитивной силой ($H_c \approx 0.35\text{--}0.45$ Э) и симметричными петлями гистерезиса (Рисунок 16). Поверхностная модификация (шлифовка или формирование наноструктуры) практически не влияет на величины H_c и M_s , что указывает на сохранение механизмов объёмного перемангничивания.

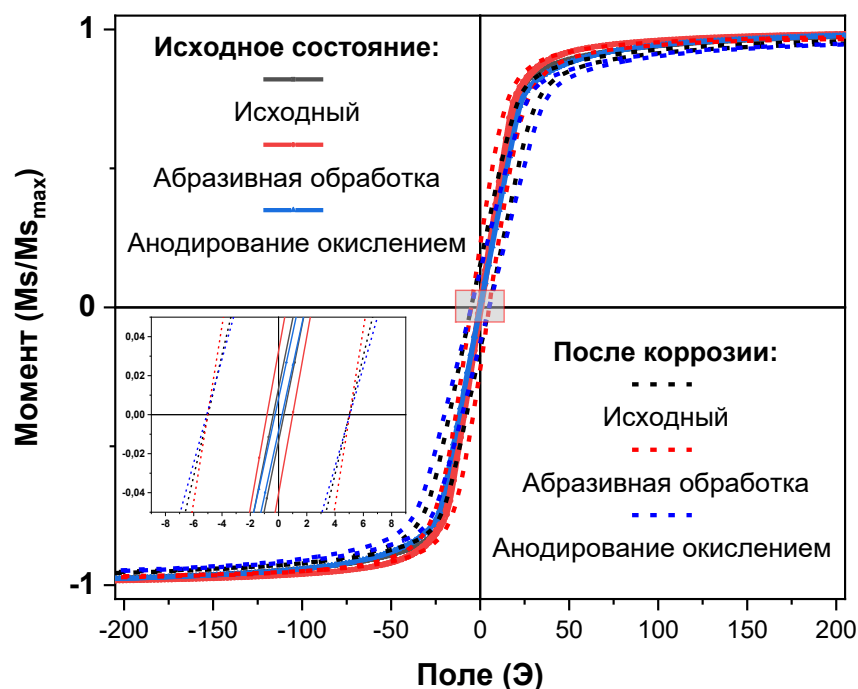


Рисунок 16 - Петли гистерезиса до коррозии – сплошная линия, и после коррозии – пунктирные кривые. Вставка – приближенная часть петель при пересечении нуля [А6].

После коррозионного воздействия во всех образцах наблюдается резкое увеличение коэрцитивной силы до ~ 5 Э, снижение намагниченности насыщения и рост остаточной намагниченности. Эти изменения свидетельствуют о формировании дефектного приповерхностного слоя, усилении локальной магнитной анизотропии и пиннинге доменных стенок [А6].

Приповерхностные магнитные свойства, исследованные методом Керр-микроскопии, демонстрируют существенно более высокую чувствительность к состоянию поверхности (Рис. 17). Для исходных образцов характерна слабо структурированная доменная картина с вытянутыми доменными областями. Механическая обработка приводит к упрощению конфигурации доменных границ, тогда как формирование регулярной наноструктуры способствует более равномерному распределению доменов и повышению их устойчивости.

После коррозионного воздействия доменная структура немодифицированных образцов становится фрагментированной и менее контрастной. В то же время в образцах с наноструктурированной поверхностью сохраняется частичная упорядоченность доменных границ, что указывает на

стабилизирующую роль регулярной морфологии и более устойчивого оксидного слоя.

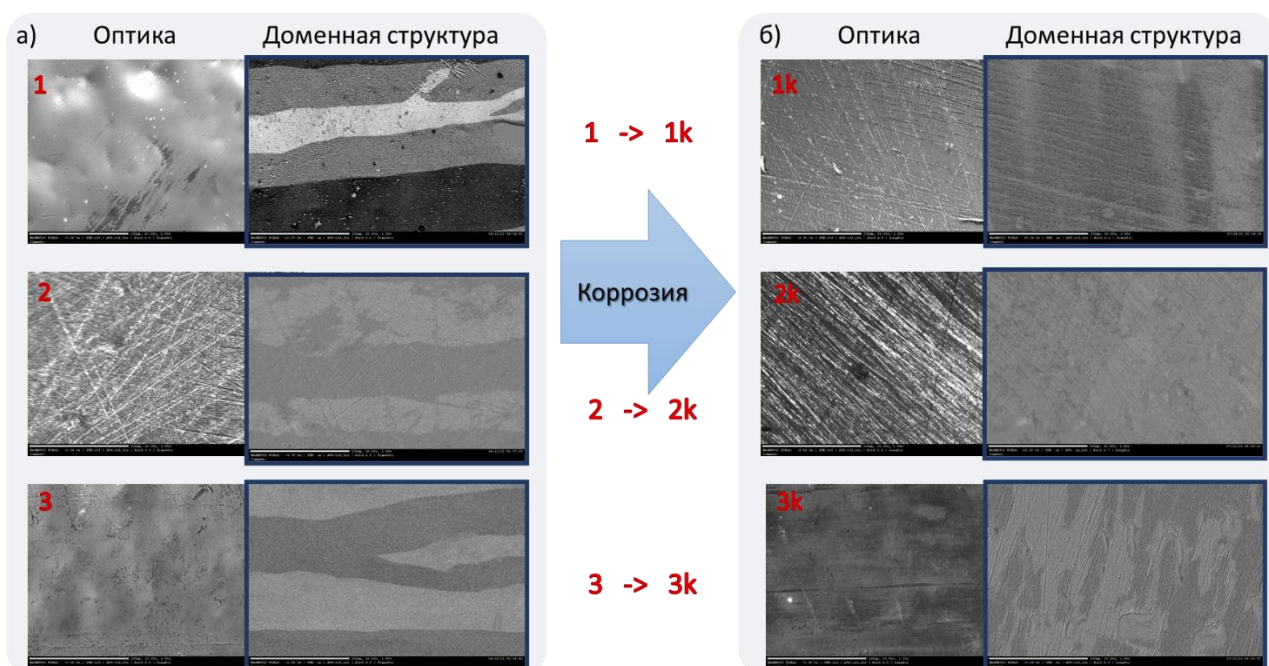


Рисунок 17 - Изображения поверхности и доменной структуры образцов $Co_{75}Si_{15}Fe_5Cr_{4.5}Al_{0.5}$: столбец (а) изображение до коррозии – образцы 1, 2, 3; столбец (б) образцы после коррозионного воздействия. Область изображения – 300×500 мкм.

Сопоставление данных вибрационной магнитометрии и Керр-микроскопии показывает, что поверхностная модификация практически не изменяет объёмные магнитные характеристики в исходном состоянии, но существенно влияет на устойчивость доменной структуры и характер деградации при воздействии агрессивной среды. Рост коэрцитивной силы после коррозии обусловлен формированием пиннинг-центров и нарушением динамики перемагничивания, тогда как регулярная наноструктура частично подавляет разрушение приповерхностного магнитного слоя.

Таким образом, показано, что даже при сохранении аморфного фазового состояния контролируемая поверхностная модификация оказывает существенное влияние на приповерхностную магнитную однородность и устойчивость магнитных свойств аморфных сплавов в агрессивных средах. Результаты подчёркивают информативность магнитооптических методов при анализе поверхностно-индуцированных эффектов и подтверждают перспективность наноструктурирования поверхности для повышения магнитной стабильности функциональных материалов.

В заключении приведены основные результаты и выводы. В настоящей работе проведено комплексное магнитооптическое и магнитометрическое исследование наноструктурированных магнитных материалов различной природы: гранулированных композитов $(CoFeB)_x(LiNbO_3)_{100-x}$, многослойных

структур $\{[(\text{CoFeB})(\text{SiO}_2)]/\text{ZnO}\}_n$, оксидных нанокompозитов $(\text{Co})_x(\text{CoO})_{100-x}$, а также аморфных и нанокристаллических лент и плёнок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Магнитооптические методы (Керр-спектроскопия и Керр-микроскопия), совместно с вибрационной магнитометрией, обеспечивают чувствительное и взаимодополняющее зондирование магнитных свойств в наноструктурированных материалах. Их сочетание позволяет:

- фиксировать формирование магнитных корреляций и коллективного упорядочения на ранних стадиях;
- устанавливать роль морфологии, интерфейсов и межфазного обменного взаимодействия в формировании магнитных свойств;
- анализировать влияние структурных, термически и химически индуцированных изменений приповерхностного слоя на процессы перемагничивания и магнитную анизотропию.

Проведенная работа позволяет сформулировать следующие **выводы**:

1. Для гранулированных композитов $(\text{CoFeB})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$ эволюция магнитного состояния при увеличении концентрации металлической фазы осуществляется через магнитно-неоднородное суперферромагнитное состояние. При $x \lesssim 20$ % система находится в суперпарамагнитном состоянии; при $x \approx 32-36$ % формируется суперферромагнитное состояние, характеризующееся частичной корреляцией магнитных моментов и появлением нелинейных полевых зависимостей ЭЭК; при $x \geq 44$ % устанавливается устойчивый ферромагнитный порядок, сопровождающийся гистерезисом и формированием доменной структуры (для структуры, полученной объемным напылением). Концентрационные границы суперферромагнитного состояния зависят от технологии осаждения, определяющей морфологию металлической фазы.

2. В многослойных структурах $\{[(\text{CoFeB})(\text{SiO}_2)]/\text{ZnO}\}_n$, напыленных ультратонкими слоями с толщиной каждого до 5 нм, при фиксированной концентрации CoFeB магнитное состояние остаётся суперпарамагнитным во всём диапазоне исследованных толщин. Прослойка ZnO действует как оптический и интерфейсный модификатор, влияя на спектры ЭЭК, но не влияя на ферромагнитное упорядочение.

3. В оксидных нанокompозитах $(\text{Co})_x(\text{CoO})_{100-x}$ локальный ферромагнитный порядок формируется уже при $x \approx 3.5$ %, что существенно ниже классических перколяционных порогов для металл–диэлектрических композитов. Это обусловлено сегрегацией Co вдоль границ зёрен поликристаллического CoO и возникновением обменно-связанных ферромагнитных кластеров, не

формирующих непрерывной сети и обладающих повышенной магнитной анизотропией.

4. Термическая обработка аморфных плёнок $\text{Fe}_{72.4}\text{Ti}_{5.4}\text{B}_{19.2}\text{O}_{3.0}$ вызывает переход к нанокристаллическому состоянию, сопровождаемый увеличением намагниченности, выраженной локальной анизотропией, неоднородной доменной структурой. Эти факторы указывают на то, что термообработка приводит к локальной фазовой сегрегации и росту кристаллических участков формирующих направленные агрегации кристаллитов, что согласуется с моделью зарождения кристаллитов в аморфной матрице и усилением обменного взаимодействия между ними.

5. В аморфных лентах сплава $\text{Co}_{75}\text{Si}_{15}\text{Fe}_5\text{Cr}_{4.5}\text{Al}_{0.5}$ поверхностная модификация методом анодного окисления не приводит к существенным изменениям объёмных магнитных характеристик, однако способствует формированию более анизотропной доменной структуры и частичной её стабилизации при воздействии агрессивной коррозионной среды. При отсутствии наноструктурированного слоя коррозия вызывает заметный рост коэрцитивной силы и деградацию магнитной текстуры, тогда как модифицированная поверхность частично сохраняет доменную структуру, демонстрируя защитную функцию сформированного оксидного слоя.

Список публикаций по теме диссертации

Статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности и отрасли наук:

A1 Перова Н.Н., Ганьшина Е.А., Припеченков И.М., Гридин Д.М., Харин Е.В., Теджетов В.А., Шефтель Е.Н., Грановский А.Б. Влияние отжига на магнитооптические свойства нанокристаллических плёнок $\text{Fe}_{72.4}\text{Ti}_{5.4}\text{B}_{19.2}\text{O}_{3.0}$ // Вестник Московского Университета. Серия 3. Физика. Астрономия. – 2024. – № 5. – С. 2450504. (Импакт-фактор 0,52 (РИНЦ). Объем 0,7 п.л. Вклад автора: 0,7. EDN: VKIKUH).

Perova N.N., Ganshina E.A., Pripechenkov I.M., Gridin D.M., Harin E.V., Tejetov V.A., Sheftel E.N., Granovsky A.B. Influence of annealing on magneto-optical properties of $\text{Fe}_{72.4}\text{Ti}_{5.4}\text{B}_{19.2}\text{O}_{3.0}$ nanocrystalline films // Moscow University Physics Bulletin. – 2024. – Vol. 79, № 5. – P. 616 – 620. Объем 0,7 п.л. Вклад автора: 0,7. EDN: EQPHZJ.

A2 Kalinin Y.E., Sitnikov A.V., Makagonov V.A., Foshin V.A., Volochaev M.N., Pripechenkov I.M., Perova N.N., Ganshina E.A., Rylkov V.V., Granovsky A.B. Magnetic properties and magnetoresistance of hybrid multilayer nanostructures $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}]/\text{ZnO}\}_n$ // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2024. – Vol. 604. – P. 172287. (Импакт-фактор 2,9 (JIF). Объем 1,2 п.л. Вклад автора: 0,3. EDN: RGINEG).

A3 Ганьшина Е.А., Припеченков И.М., Перова Н.Н., Каназакова Е.С., Николаев С.Н., Ситников А.С., Грановский А.Б., Рыльков В.В.

Магнитооптическая спектроскопия нанокompозитов $(\text{CoFeB})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$ до порога перколяции: от суперпарамагнетизма и суперферромагнетизма до ферромагнетизма // Физика металлов и металловедение. – 2023. – Т. 124, № 2. – С. 134 – 140. (Импакт-фактор 1,29 (РИНЦ). Объем 0,7 п.л. Вклад автора: 0,4. EDN: HKTUCR).

Gan'shina E.A., Pripechenkov I.M., Perova N.N., Kanazakova E.S., Nikolaev S.N., Sitnikov A.S., Granovskii A.B., Ryl'kov V.V. Magneto-optical spectroscopy of nanocomposites $(\text{CoFeB})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$ with concentrations up to the percolation threshold: from superparamagnetism and superferromagnetism to ferromagnetism // Physics of Metals and Metallography. – 2023. – Vol. 124, № 2. – Pp. 126 – 132. Объем 0,7 п.л. Вклад автора: 0,4. EDN: CBCWNI.

A4 Sitnikov A.V., Makagonov V.A., Kalinin Y.E., Kushchev S.B., Foshin V.A., Perova N.N., Ganshina E.A., Granovsky A.B. Magnetic, magnetoresistive and structural properties of $\text{Co}_x(\text{CoO})_{100-x}$ thin film composites // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2023. – Vol. 587. – P. 171154. (Импакт-фактор 2,9 (JIF). Объем 1,5 п.л. Вклад автора: 0,3. EDN: JLTKZV).

A5 Ганьшина Е.А., Гаршин В.В., Перова Н.Н., Припеченков И.М., Юрасов А.Н., Яшин М.М., Рылков В.В., Грановский А.Б. Магнитооптическая Керр-спектроскопия нанокompозитов // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2023. – Т. 164, № 4. – С. 662–672. (Импакт-фактор 0,75 (РИНЦ). Объем 1,1 п.л. Вклад автора: 0,3. EDN: XLZRSE).

Gan'shina E.A., Garshin V.V., Perova N.N., Pripechenkov I.M., Yurasov A.N., Yashin M.M., Rylkov V.V., Granovskii A.B. Magneto-optical Kerr spectroscopy of nanocomposites // Journal of Experimental and Theoretical Physics. – 2023. – V. 137. – №. 4. – Pp. 572 – 581. Объем 1,1 п.л. Вклад автора: 0,3. EDN: VVQFWL.

A6 Kuznetsova I., Lebedeva O., Kultin D., Perova N., Kalmykov K., Chernavskii P., Perov N., Kustov L. Is a 2D nanostructured surface capable of changing the corrosion and magnetic properties of an amorphous alloy? // International Journal of Molecular Sciences. – 2023. – Vol. 24, № 17. – P. 13373. (Импакт-фактор 4,9 (JIF). Объем 2,5 п.л. Вклад автора: 0,3. EDN: JENIXJ).

A7 Gan'shina E., Garshin V., Perova N., Zykov G., Aleshnikov A., Kalinin Y., Sitnikov A. Magneto-optical properties of nanocomposites ferromagnetic-carbon // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2019. – Vol. 470. – Pp. 135–138. (Импакт-фактор 2,9 (JIF). Объем 0,5 п.л. Вклад автора: 0,3. EDN: RNQHEG).

Прочие публикации:

A8 Самченко С.В., Перова Н.Н., Шапаева Т.Б., Перов Н.С. Измерение подвижности доменных границ в аморфных лентах NiCoFeSiB с помощью Керр-микроскопии // Ученые записки физического факультета Московского университета. – 2024. – № 4. – С. 24417011. (Импакт-фактор 0,54 (РИНЦ). Объем 0,6 п.л. Вклад автора: 0,4. EDN: AUCXOI).

A9 Vyzulin S., Gan'shina E., Garshin V., Perova N., Syr'ev N. Magneto-optical and magnetic resonance properties of nano-scaled granular films $(\text{CoFeB})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ and $(\text{CoFeB})_xC_{100-x}$ // EPJ Web of Conferences. Moscow

International Symposium on Magnetism, MISM 2017. – 2018. – Vol. 185. – P. 04002.
(Импакт-фактор 0,4 (JIF). Объем 0,5 п.л. Вклад автора: 0,3. EDN: VBESBW).

Список цитируемой литературы:

1. Owens F. Physics of magnetic nanostructures. 1st ed.– Wiley, 2015.– 1–192 p.
2. Zhou J., You J., Qiu K. Advances in Fe-based amorphous/nanocrystalline alloys // J. Appl. Phys.– AIP Publishing, 2022. – Vol. 132, № 4. – P. 040702.
3. Yurasov A.N., Yashin M.M., Ganshina E.A., Gladyshev I. V., Garshin V. V., Kanazakova E.S. Effect of Particle Size Distribution on the Optical and Magneto-Optical Properties of Nanocomposites $(\text{CoFeZr})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{1-x}$ // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – Pleiades journals, 2022.– Vol. 86, № 5.– P. 601–605.
4. Alkaç İ.M., Çerçi B., Timuralp C., Şen F. Nanomaterials and their classification // Nanomaterials for Direct Alcohol Fuel Cells: Characterization, Design, and Electrocatalysis. – Elsevier, 2021.– P. 17–33.
5. Feng Z., Geng H., Zhuang Y., Li P. Progress, Applications, and Challenges of Amorphous Alloys: A Critical Review // Inorganics (Basel). – MDPI AG, 2024.– Vol. 12, № 9.– P. 232.
6. Ossinger R.G., Sassik H., Holzer D., Pillmayr N. Magnetic characterization of soft magnetic materials-experiments and analysis // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2003.–Vol. 254, P. 7–13.
7. Daza J., Mbarek W. Ben, Escoda L., Suñol J.J. Characterization and analysis of nanocrystalline soft magnetic alloys: Fe based // Metals (Basel). – MDPI, 2021.– Vol. 11, № 12. P. 1896
8. Yurasov A., Gan'shina E., Sokolov A., Granovsky N., Zazymkina D. The granule size distribution influence in nanocomposites on optical and magneto-optical spectra // EPJ Web Conf.– EDP Sciences, 2018.– Vol. 185.– P. 02009.
9. Shalygina E., Rozhnovskaya A., Kaminskaya T., Shalygin A., Ryjikov I. Influence of Magnetochemical Treatment on Morphology and Magnetic Properties of FeN Films // Journal of Iron and Steel Research. 2012.– Vol. 19, P 633-636.
10. Brundle C.R., Evans C.A., Wilson S., Fitzpatrick L.E. Encyclopedia of materials characterization: surfaces, interfaces, thin films // Published in 1992 in Boston Mass) by Butterworth-Heinemann / ed. Fitzpatrick L.E.– Boston: Gulf Professional Publishing, 1992.– 1–779 p.
11. Sheftel E.N., Tedzhetov V.A., Kiryukhantsev-Korneev P. V., Harin E. V., Usmanova G.S., Zhigalina O.M. Investigation of the Processes of the Formation of a Nonequilibrium Phase-Structural State in FeTiB Films Obtained by Magnetron Sputtering // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – Pleiades journals, 2020.– Vol. 61, № 6.– P. 753–761.
12. Ganshina E.A., Garshin V.V., Pripechenkov I.M., Ivkov S.A., Sitnikov A.V., Domashevskaya E.P. Effect of Phase Transformations of a Metal Component on the Magneto-Optical Properties of Thin-Films Nanocomposites $(\text{CoFeZr})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$ // Nanomaterials 2021, Vol. 11, № 7. P. 1666.