

на правах рукописи

Дунаева Галина Григорьевна

**ВЗАИМОСВЯЗЬ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ И
ТРАНСФОРМАЦИИ ДОМЕННОЙ СТРУКТУРЫ НА ПОВЕРХНОСТИ И
В ОБЪЁМЕ МАГНИТООДНООСНЫХ МАГНЕТИКОВ**

Специальность 1.3.12 — Физика магнитных явлений

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Тверь — 2025

Работа выполнена на кафедре физики конденсированного состояния федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тверской государственный университет».

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук, доцент
Карпенков Алексей Юрьевич

Официальные оппоненты: **Таскаев Сергей Валерьевич,**
доктор физико-математических наук, доцент,
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Челябинский государственный
университет», ректор;

Каминская Татьяна Петровна,
кандидат технических наук, доцент,
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Московский государственный
университет имени М. В. Ломоносова», научный
сотрудник кафедры общей физики

Ведущая организация: федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Балтийский федеральный
университет имени Иммануила Канта»

Защита состоится 23 мая 2025 г. в 12:30 часов на заседании диссертационного совета 24.2.411.03 при ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет» по адресу: 170002, г. Тверь, Садовый пер., д. 35, ауд. 226.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Тверского государственного университета по адресу: 170100, г. Тверь, ул. Советская, д. 58 и в сети Интернет на сайте ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет» <https://dissertations.tversu.ru>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2025 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета

Е.В. Барабанова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности. В современном приборостроении одними из главных конструктивных элементов в технических средствах являются компоненты, принцип работы которых основан на нелинейном характере процессов намагничивания/перемагничивания магнитных материалов. Широкое распространение в устройствах различных областей промышленности и техники получили постоянные магниты, поскольку они обладают рядом преимуществ: автономность, компактность, экономичность, высокая надежность и долгий эксплуатационный срок [1-3].

В настоящее время существуют два типа перспективных магнитных материалов для постоянных магнитов на основе сплавов редкоземельных (РЗМ) элементов и 3d-переходных металлов: Sm-Co-магниты (соединения SmCo_5 , $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$), Nd-Fe-B-магниты (соединение $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$). К требованиям, предъявляемым к материалам для постоянных магнитов, относятся: высокие значения коэрцитивной силы H_C , остаточной магнитной индукции B_r , максимального энергетического произведения $(BH)_{max}$, оптимальные параметры пластичности и прочности, высокие значения температурной и временной стабильности приведенных параметров.

Физическая природа высококоэрцитивного состояния в различных материалах связана с одним из возможных механизмов: 1) задержкой смещения доменных границ на структурных неоднородностях кристалла; 2) необратимого вращения вектора намагниченности \vec{I}_S домена; 3) задержкой зародышеобразования и роста домена обратного знака [4-5]. Механизм коэрцитивной силы зародышеобразования отвечает за улучшенные магнитотвердые свойства наиболее мощных современных спеченных постоянных магнитов Nd-Fe-B. Кроме того, известно, что «классические» спеченные магниты SmCo_5 и твердые ферриты имеют одинаковый механизм коэрцитивной силы.

Таким образом, коэрцитивная сила этих важных классов функциональных магнитных материалов во многом определяется магнитным состоянием тонкого поверхностного слоя отдельного зерна, и более глубокое понимание процессов, происходящих на наноуровне внутри тонкого поверхностного слоя, могло бы помочь дальнейшему совершенствованию передовых магнитотвердых материалов.

Процессы перемагничивания магнитных материалов во многом зависят от свойств их доменной структуры (ДС). Наиболее распространенный способ измерения кривых намагничивания, петель магнитного гистерезиса и температурных зависимостей намагниченности - метод вибрационного магнитометра. В случае если измеряемый образец обладает сложной микроструктурой, то интерпретация результатов может быть значительно затруднена. Для поликристаллических, гетероструктурных объектов исследования оценка вклада в процессы перемагничивания от зерен с различной ориентацией результирующих магнитных моментов или других структурных составляющих осуществляется на основе анализа магнитной доменной структуры, эффективного инструмента локального микромагнитного анализа магнитных материалов, путем прямых наблюдений трансформации доменной структуры по внешнем магнитном поле [6, А6].

Целью настоящей работы стало установление взаимосвязи между процессами перемагничивания и трансформацией магнитной доменной структуры на поверхности и в объёме магнитоодноосных магнетиков на основе данных магнитных измерений, систематических исследований методами оптической и магнитно-силовой микроскопии, а также компьютерного моделирования.

Основные задачи исследования:

1. Синтезировать и аттестовать монокристаллы интерметаллических соединений SmCo_5 и $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$.
2. Разработать и создать автоматизированные методики исследования трансформаций ДС при перемагничивании в квазистатических и динамических условиях, а также программное обеспечение для анализа изображений ДС с целью исследований процессов перемагничивания поверхности магнитных материалов.
3. Провести исследования процессов перемагничивания магнитоодноосных монокристаллов разной толщины и пленочных образцов методами вибрационного магнитометра и анализа изображений трансформации поверхностной доменной структуры в магнитном поле, выявленной методами оптической (полярный эффект Керра, индикаторной пленки) и магнитно-силовой микроскопий.
4. С помощью численного моделирования методом конечных элементов исследовать процессы перемагничивания объёма и приповерхностных слоев изотропных и высокоанизотропных магнетиков.
5. Провести сравнительный анализ результатов исследований полей рассеяния поверхностной доменной структуры магнитоодноосных монокристаллов, полученных методами магнитно-силовой микроскопии и численного моделирования, с целью определения геометрических размеров элементов поверхностной доменной структуры.

Объектами исследования в настоящей работе были выбраны монокристаллы соединений SmCo_5 и $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ и эпитаксиальная Vi -содержащая монокристаллическая пленка феррит-гранатов (Vc -МПФГ) состава $(\text{Fe,Ga})_5\text{O}_{12}(\text{Gd,Bi,Lu})_3$

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

1. В результате исследования доменной структуры на поверхности монокристаллов SmCo_5 в микросекундном импульсном магнитном поле в широком диапазоне амплитуд впервые обнаружена и выделена как отдельный тип разветвлённая дендритная структура радиально расположенных от центра зарождения доменов.
2. Проведены исследования процессов перемагничивания магнитоодноосных монокристаллов разной толщины и пленочных образцов методами вибрационного магнитометра и анализа трансформации поверхностной доменной структуры в квазистатических и динамических магнитных полях. Экспериментально установлена взаимосвязь трансформации микромагнитной структуры в объёме и на поверхности исследуемых объектов с процессами их перемагничивания.

3. Впервые в ходе численного моделирования методом конечных элементов для изотропных и высокоанизотропных магнетиков с помощью разработанной модели индукционного принципа измерения намагниченности (вибрационный магнитометр) для образцов различной формы построены кривые намагничивания, пространственные распределения намагниченности, индукции и напряженности полей внутри и снаружи моделируемых объектов. На основе рассчитанных закономерностей распределения намагниченности в объёме построены зависимости фактора размагничивания от приведенной к значению при насыщении намагниченности.
4. Впервые в результате сопоставления профилей полей рассеяния поверхностной доменной структуры магнитоодноосных монокристаллов, полученных методами магнитно-силовой микроскопии и численного моделирования, определены линейные размеры минимальных элементов поверхностной ДС.

Теоретическая и практическая значимость результатов диссертации заключается в расширении представлений о влиянии тонкого поверхностного слоя на процессы перемагничивания магнитоодноосных высокоанизотропных материалов для создания постоянных магнитов.

В работе разработан ряд уникальных экспериментальных методик по наблюдению трансформации доменной структуры магнетиков в статических и динамических магнитных полях, усовершенствована установка измерения намагниченности методом вибрационного магнитометра, позволяющая проводить эксперименты в квазистатических и/или переменных полях.

Все представленные результаты были достигнуты в процессе выполнения следующих научно-исследовательских работ: в рамках Государственного задания Минобрнауки РФ в сфере научной деятельности на 2020 - 2022 гг.: "Экспериментально-теоретическое исследование металлических и полупроводниковых наночастиц, процессов их взаимодействия, микро- и наноструктуры кристаллов, поверхностных слоев твердых тел, влияния рельефа поверхности на отражение и пропускание света оптическими элементами" (проект № 0817-2020-0007), Государственного задания Минобрнауки РФ в сфере научной деятельности на 2023 - 2025 гг.: "Разработка научных основ получения стабильных металлических наночастиц и наносистем, управления микро- и наноструктурой объёмных фаз и поверхностных слоев металлических сплавов, диэлектрических и полупроводниковых монокристаллов: эксперимент, атомистическое и термодинамическое моделирование" (проект № 0817-2023-0006). Результаты исследований могут быть востребованы в курсах лекций по магнитным материалам в ТвГУ, МГУ им. В.М. Ломоносова, НИТУ МИСИС, УрФУ и других университетах.

Методология и методы исследования. В работе использовались современные методы исследования и анализа экспериментальных результатов: индукционный метод исследования удельной намагниченности на автоматизированном вибрационном магнитометре, атомно- и магнитно-силовая микроскопия, сканирующая электронная микроскопия, оптическая микроскопия, моделирование при помощи пакета COMSOL Multiphysics. При выполнении

работы были разработаны и усовершенствованы методы наблюдения доменной структуры в широком интервале полей, изменяющихся в квазистационарных и динамических условиях.

Положения, выносимые на защиту:

1. Процесс перемагничивания магнитоодноосных монокристаллов SmCo_5 и $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ начинается с образования зародышей новой магнитной фазы, вид и распределение которых определяется структурным состоянием образца и особенно его поверхности. Изменение конфигурации доменной структуры массивных монокристаллов в процессе намагничивания зависит от геометрических параметров образцов и условий приложения магнитного поля. Для получения равновесной доменной структуры, соответствующей заданному значению постоянного поля, к образцам магнитоодноосных монокристаллов, в которых имеет место задержка смещения доменных границ на структурных неоднородностях, необходимо прикладывать переменное поле постоянной амплитуды в диапазоне 30-60 мТл с частотой 50 Гц, соосное оси легкого намагничивания.
2. Отношение площадей, занимаемых на поверхности образца магнитными доменами с противоположной ориентацией вектора намагниченности, соответствует локальной намагниченности, теоретически рассчитанной для материала с учетом размагничивающих полей вблизи поверхности образца заданной формы. Как следствие, ход кривых намагничивания, полученных из анализа ДС на поверхности магнитоодноосных массивных кристаллов, отличается от результатов измерений методами, регистрирующими интегральные значения намагниченности образца. Для тонкопленочных образцов, в которых наблюдаются только основные домены, магнитооптические исследования позволяют изучать процессы перемагничивания во всём объёме образца.
3. При намагничивании монокристалла SmCo_5 микросекундным импульсным полем (с длительностью спада импульсного сигнала до 15 мкс и амплитудой более 1 Тл), сонаправленным с осью легкого намагничивания образца, на базисной плоскости образуется неравновесная разветвленная дендритная структура доменов - «морозный узор», а в объёме формируется нерегулярная беспорядочная ДС. Это связано с процессами задержки смещения доменных границ на структурных неоднородностях образца.
4. Форма и линейные размеры элементов ДС однозначно определяют профили полей рассеяния поверхностной доменной структуры, полученных методами магнитно-силовой микроскопии и численного моделирования. Минимальными элементами поверхностной доменной структуры на базисной плоскости массивных монокристаллов SmCo_5 и $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ являются дополнительные конусообразные домены с диаметром основания 2,0 мкм и высотой 2,0 мкм, а также 0,6 мкм и высотой 0,6 мкм, соответственно.

Личный вклад автора. В диссертации изложены результаты прямых экспериментов и компьютерного моделирования, полученные и обработанные лично автором или при его непосредственном участии. Автором лично проведены работы, связанные с разработкой и созданием используемых уникальных экспериментальных методик. Синтез монокристаллических образцов

исследования, постановка цели и ключевых задач, обсуждение результатов экспериментов и численного моделирования, формулировка выводов выполнялись автором совместно с научным руководителем. Подготовка публикаций и научных докладов по результатам научных исследований в рамках диссертационной работы осуществлялась совместно с соавторами.

Степень достоверности полученных результатов. Результаты, представленные в диссертации, получены на основе экспериментов, проведенных на современном научном оборудовании, с использованием статистических методов обработки экспериментальных данных. Достоверность полученных результатов обеспечивалась набором взаимодополняющих экспериментальных методик, воспроизводимостью получаемых результатов и согласованием получаемых результатов с имеющимися в литературе данными других научных групп. Также, полученные результаты исследований опубликованы в индексируемых журналах и апробированы на тематических международных конференциях.

Апробация работы. Результаты работы были неоднократно представлены автором в форме устных докладов на научных конференциях и семинарах: XXIII Всероссийская конференция по физике сегнетоэлектриков. Тверь, 03-06 октября 2023, XXIII Международная конференция по постоянным магнитам. Суздаль, 27-30 сентября 2022 года, XXVIII Каргинские чтения: Всероссийская научно-техническая конференция молодых учёных «Физика, химия и новые технологии». Тверь, 31 марта-01 апреля 2022 года, Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2022». Москва, 11-22 апреля 2022 года, XXVII Каргинские чтения: Всероссийская научно-техническая конференция молодых учёных «Физика, химия и новые технологии». Тверь, 01-02 апреля 2021 года, Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2021». Москва, 12-23 апреля 2021 года, Одиннадцатая Международная научная конференция химическая термодинамика и кинетика. Великий Новгород, 17-21 мая 2021 года, XXIV Международная конференция «Новое в магнетизме и магнитных материалах». Москва, 1-8 июля 2021 года., Десятая Международная научная конференция химическая термодинамика и кинетика. Великий Новгород, 25-29 мая 2020 года, XXV Каргинские чтения Всероссийская научно-техническая конференция молодых учёных «Физика, химия и новые технологии». Тверь, 28 марта 2019 года, Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2019». Москва, 8-12 апреля 2019 года, Международная научно-техническая конференция INTERMATIC–2018, Москва, Россия, 19-23 ноября 2018.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 7 печатных работ, из них 6 статей в журналах, индексируемых в международных базах данных, приравниваемых к журналам перечня ВАК, и 1 статья в других рецензируемых изданиях.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, основных выводов и списка использованной литературы, состоящего из 110 источников. Материал изложен на 166 страницах, включает 3 таблицы и 101 рисунок.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы основная цель и задачи исследования, определен объект исследований, продемонстрированы научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов. Представлены основные научные положения, выносимые на защиту. Приведены сведения о степени достоверности результатов, апробации работы, личном вкладе автора, структуре и объёме диссертации.

Первая глава является обзорной. В разделах 1.1, 1.2 описаны кристаллическая структура и магнитные свойства соединений SmCo_5 и $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. Понятие магнитной доменной структуры, причина ее образования в магнитных материалах, а также методы ее наблюдения представлены в разделе 1.3. Далее приведены литературные данные об особенностях процессов перемагничивания высокоанизотропных магнитоодноосных материалов, а также о влиянии состояния поверхностных слоев на коэрцитивную силу данных соединений.

Вторая глава посвящена объектам исследования и методикам проведения эксперимента. Исходные сплавы SmCo_5 и $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ были получены методом индукционной плавки в атмосфере аргона. Монокристаллы выращивались в процессе длительного отжига в резистивной печи с последующей закалкой в воду. Образец эпитаксиальной Vi -содержащей монокристаллической пленки феррит-гранатов (Vc -МПФГ) состава $(\text{Fe,Ga})_5\text{O}_{12}(\text{Gd,Bi,Lu})_3$ был выращен и предоставлен для дальнейших исследований учеными из Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского.

Аттестация полученных образцов осуществлялась методами рентгенофазового анализа и растровой электронной микроскопии. Для микроскопических исследований подготавливались металлографические шлифы на базисной плоскости образцов монокристаллов, поскольку значение сигнала полярного эффекта Керра при исследовании доменной структуры максимально по сравнению с экваториальным и меридиональным типами [7,8]. Шлифование и полировка осуществлялись при помощи шлифовально-полировального станка Metalpol 160E. Микроструктура выявлялась методом электрохимического травления. Регистрация полей рассеяния исследуемых образцов выполнялась методами магнитно-силовой микроскопии в сканирующем зондовом микроскопе Solver Next (NT-MDT).

Исследования процессов перемагничивания, а также измерение магнитных характеристик объектов исследования было проведено в открытой магнитной цепи методом вибрационного магнитометра (ВМ). Для измерения кривых намагничивания образцов в магнитном поле, которое является суперпозицией постоянного и переменного полей, была изготовлена вставка для вибрационного магнитометра, представляющая собой электромагнит с двумя сердечниками, изготовленными из пермендюра, и намагничивающими катушками, по которым пропускался переменный ток до 6А с частотой 50 Гц.

Для получения и автоматического анализа изображений магнитной доменной структуры (ДС) на поверхности образцов во внешних

квазистатических и/или динамических магнитных полях был разработан программно-аппаратный комплекс на базе металлографического микроскопа Neophot 30 – магнитооптический магнитометр (МОМ).

Численное моделирование задач, описывающихся в диссертации, было произведено в САПР COMSOL Multiphysics.

Третья глава посвящена исследованиям процессов перемагничивания монокристаллических одноосных магнитных материалов экспериментальными методами и численным моделированием.

Раздел 1. В ходе магнитных измерений были получены полевые зависимости намагниченности (рисунок 1) исходных сфероидальных образцов (рисунок 1, черные кривые) и подготовленных на их основе металлографических шлифов (рисунок 1, синие кривые), измеренные вдоль оси легкого намагничивания (ОЛН). Значения удельной намагниченности насыщения σ_s для монокристаллов $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{V}$ и SmCo_5 составили $165 \text{ A}\cdot\text{m}^2/\text{кг}$ и $100 \text{ A}\cdot\text{m}^2/\text{кг}$, соответственно.

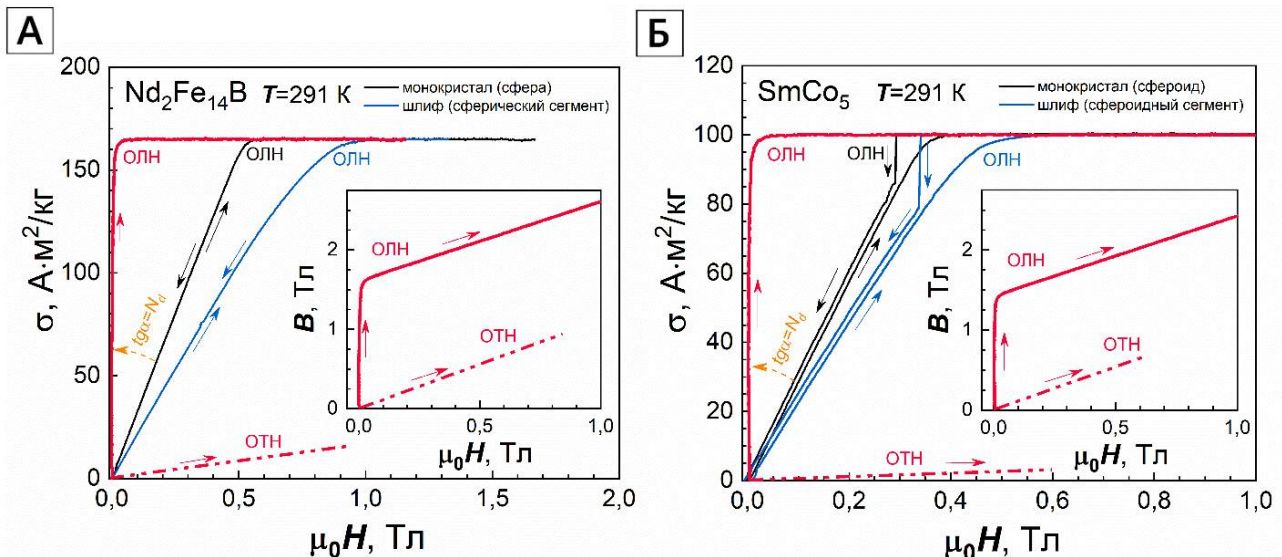


Рисунок 1 - Полевые зависимости удельной намагниченности вдоль ОЛН для сфероидальных образцов монокристаллов $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{V}$ (А) и SmCo_5 (Б) без учёта фактора размагничивания (черные кривые) и с его коррекцией (красные кривые), а также для подготовленных шлифов (синие кривые). Для ОТН представлены кривые для сфероидальных образцов монокристаллов с учетом фактора размагничивания (красные пунктирные кривые). На вставках приведены зависимости индукции вдоль ОЛН и ОТН, построенные из кривых намагничивания каждого образца с учетом их размагничивающих факторов.

Кривые намагничивания для монокристалла $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{V}$ показывают обратимый, безгистерезисный характер, их наклон определяется размагничивающим фактором. Для образца SmCo_5 на кривых размагничивания наблюдается скачок намагниченности, обусловленный зарождением обратной намагниченности. В данной работе были проведены исследования полевых зависимостей удельной намагниченности шлифа монокристалла SmCo_5 , измеренные при разных значениях максимальных полей намагничивания (рисунок 2). Установлено, что при перемагничивании монокристалла в поле,

сонаправленным с ОЛН, величина поля скачка (поля зарождения) H_N сильно зависит от амплитуды намагничивающего поля H_{max} .

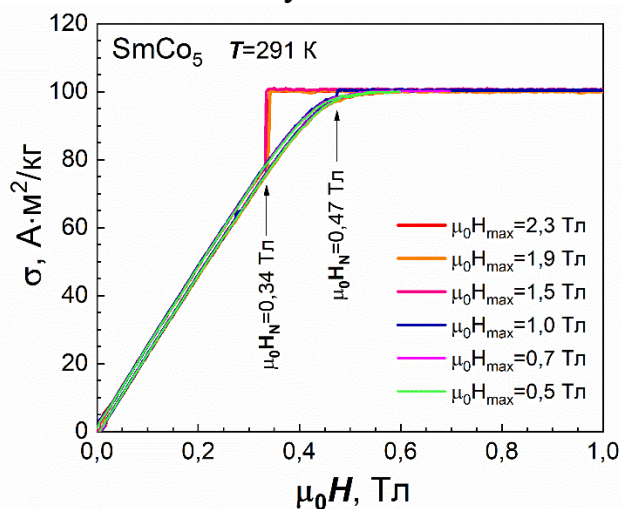


Рисунок 2 - Полевые зависимости удельной намагниченности шлифа монокристалла SmCo₅, измеренные при разных значениях максимальных полей намагничивания.

Результаты данных исследований показали, что в образце имеется несколько областей зарождения доменов обратного знака с различными полями «деактивации». Необходимо отметить, что значения полей H_N могут указать на области расположения центров зарождения доменов при известном распределении полей размагничивания в образце, которое возможно получить в ходе численного моделирования.

В связи с тем, что в работе было необходимо провести сравнение процессов перемагничивания в объёме и на поверхности образцов, что возможно только при подготовке металлографического шлифа, возникла проблема с корректной интерпретацией данных, полученных методом вибрационного магнитометра на подготовленных для оптических измерений образцах. Поэтому в системе автоматизированного проектирования COMSOL Multiphysics 6.2 была создана модель индукционного принципа измерения намагниченности вибрационного магнитометра, позволяющая строить полевые зависимости намагниченности изотропных и высокоанизотропных магнитоодноосных магнетиков. Необходимо отметить, что для получения достоверных результатов в разработанной модели анизотропного магнетика была учтена жесткая связь вектора намагниченности с выделенным кристаллографическим направлением в исследуемых материалах.

На рисунках 3А, 3В представлены результаты экспериментальных исследований (кривые с маркерами) и численного моделирования (безмаркерные кривые) полевых зависимостей (при изменении поля от 0 до поля, при котором достигается насыщение образца) удельной намагниченности сферических монокристаллов SmCo₅ (А) и Nd₂Fe₁₄B (В) и подготовленных на их основе шлифов. Геометрические модели моделируемых объектов показаны на рисунках 3Б, 3Г. Хорошо видно совпадение экспериментальных и расчётных кривых, что свидетельствует о корректности модели.

Наиболее важным результатом моделирования является возможность изучения хода кривых намагничивания образцов сложной формы (шарового сегмента - шлифа) вблизи полей насыщения, поскольку выделение вклада в намагниченность приповерхностных слоёв на реальном магнитометре является

затруднительным в связи с конечной чувствительностью измерительных приборов, регистрирующих сигнал от образца. Помимо этого, модель позволяет строить кривые намагничивания в любой точке или области образца, что дает возможность рассчитать кривые намагничивания, в частности, центральной области поверхности шлифа (красные кривые на рисунках 3А, 3В). В связи со сложным характером распределения размагничивающих полей вблизи поверхностей шлифов монокристаллов ход кривых намагничивания всего образца и участков поверхности отличается. Помимо этого, поля насыщения центральных и прикраевых участков шлифованной поверхности не совпадают и в точности определяются полями рассеивания указанных областей.

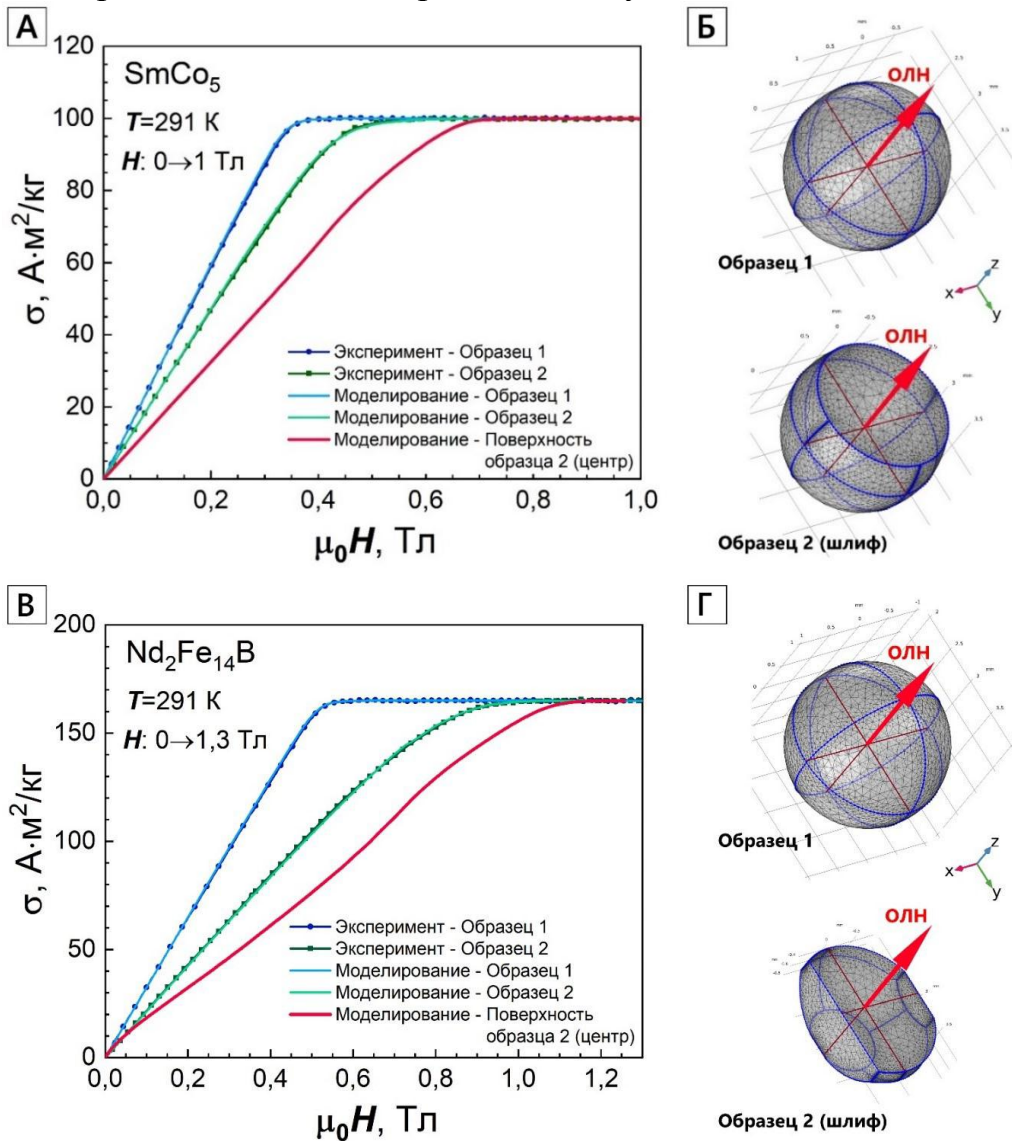


Рисунок 3 - Полевые зависимости удельной намагненности образцов монокристаллов SmCo₅ (А) и Nd₂Fe₁₄B (В) при внешнем поле || ОЛН, полученные в ходе экспериментальных измерений на вибрационном магнитометре (маркеры) и численного моделирования (сплошные кривые); геометрические модели образцов в ходе численного моделирования с указанием оси легкого намагничивания (Б,Г).

Размагничивающий фактор N зависит от формы тела и может быть рассчитан математически точно только для однородно намагненных тел – эллипсоидов. Результаты моделирования изотропных и анизотропных образцов

в форме сферического сегмента (рисунок 4) оказались отличными от случая эллипсоидальных образцов. Из картин распределения вектора намагниченности хорошо видно, что в случае изотропного образца векторы намагниченности вблизи поверхности шлифа следуют по силовым линиям размагничивающего поля, что существенно отличается от высокоанизотропного поведения, при котором намагниченность ориентирована строго по направлению ОЛН.

Форма образца: сферический сегмент

Размеры: радиус $r=1$ мм,
высота $h=1,45$ мм

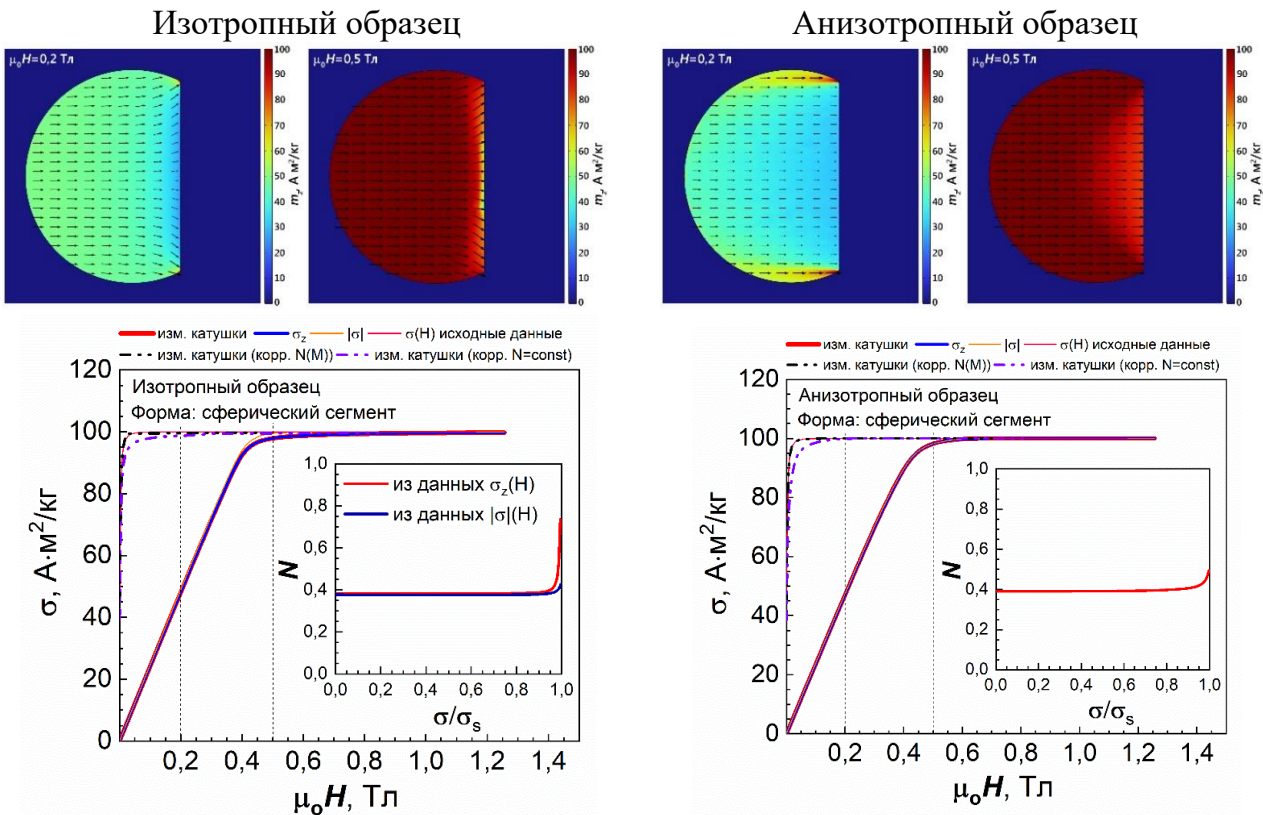
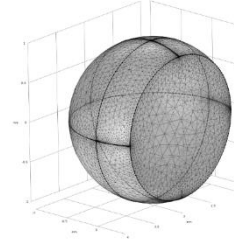


Рисунок 4 - Результаты численного моделирования анизотропного и изотропного образцов соединения SmCo_5 в форме сферического сегмента. Картинки распределения z -компоненты намагниченности в сечении образцов представлены в полях 0,2 и 0,5 Тл. На нижних рисунках представлены результаты полевых зависимостей намагниченностей (вставка: зависимость фактора формы образца от приведенной удельной намагниченности)

Неоднородное распределение намагниченности в объёме изотропных и анизотропных образцов приводит к различию хода кривых намагничивания. Результаты компьютерного моделирования также позволили точно определить зависимость размагничивающего фактора N от приведенной намагниченности, учет которой позволяет в точности повторить кривую намагничивания материала (черная пунктирная линия на рисунке 4), в то время как использование постоянного значения N приводит к ошибочной зависимости $\sigma(H_i)$ (фиолетовые пунктирные кривые на рисунке 4).

Необходимо подчеркнуть, что в связи с неоднородным распределением размагничивающих полей в центре и на краю шлифа при наблюдениях трансформации доменной структуры будет так же иметь место различное поведение ДС в зависимости от области наблюдения. Данное обстоятельство крайне важно учитывать при построении кривых намагничивания по снимкам ДС. На рисунках 5 и 6 представлены микрофотографии трансформации ДС, выявленной методом полярного эффекта Керра, на базисной плоскости монокристаллов SmCo_5 и $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ во внешнем магнитном поле, соосном с ОЛН образцов.

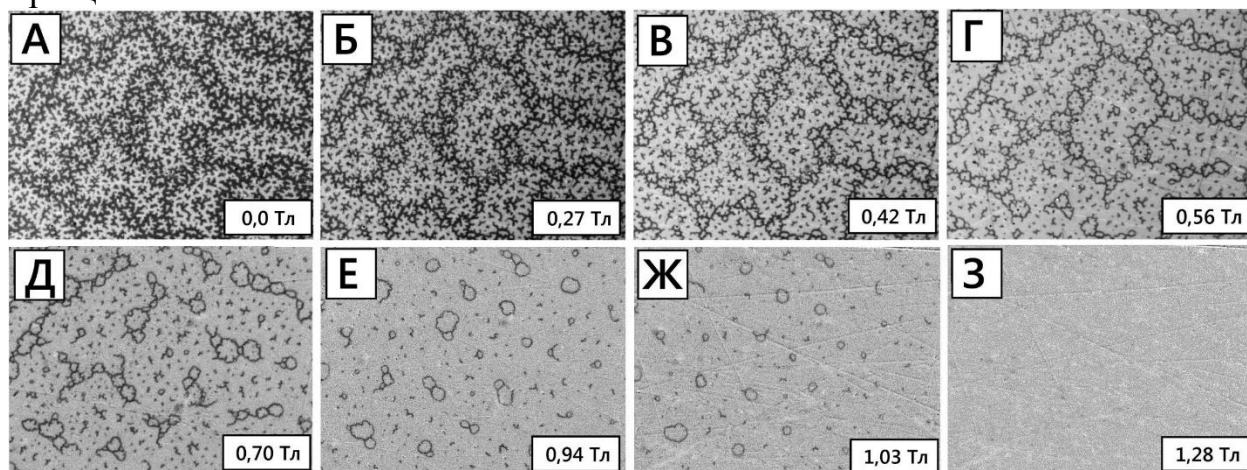


Рисунок 5 - Выборка из микрофотографий трансформации доменной структуры образца SmCo_5 при различных значениях внешнего магнитного поля $\mu_0\text{H}$. Размер каждой фотографии 350×266 мкм.

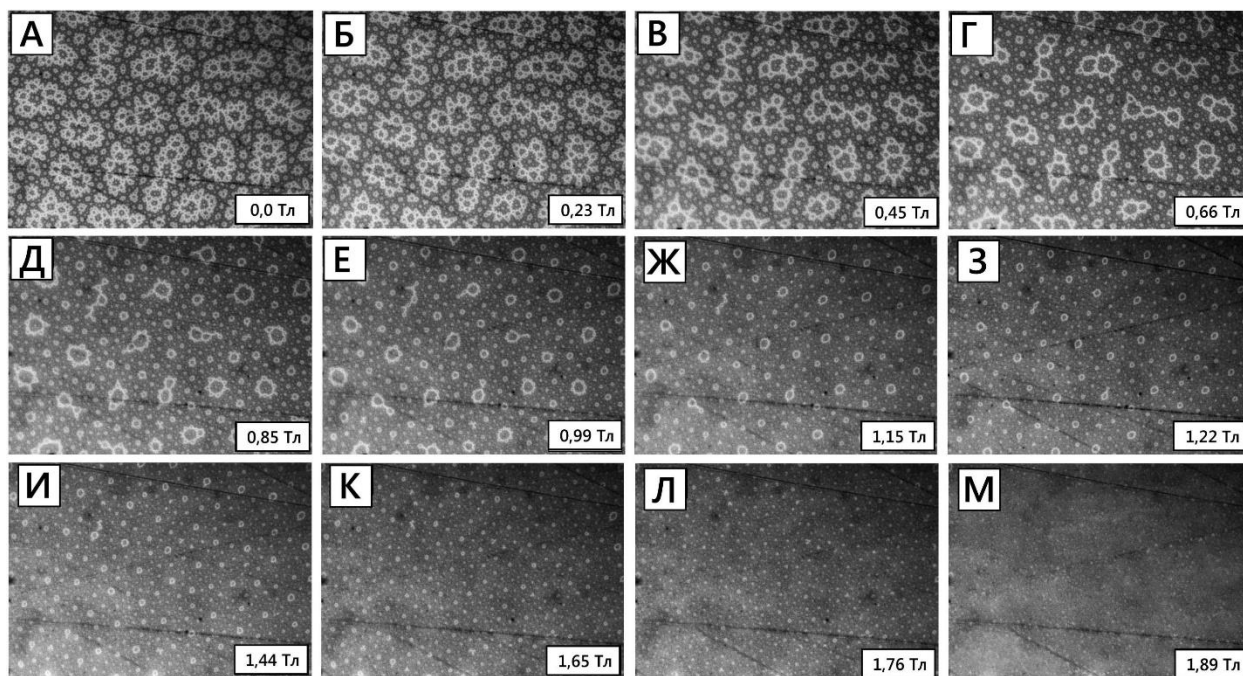


Рисунок 6 - Выборка из микрофотографий поверхностной доменной структуры образца $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ при различных значениях внешнего магнитного поля $\mu_0\text{H}$. Размер каждой фотографии 270×195 мкм.

Проведенные исследования трансформации ДС на поверхности монокристаллов позволили построить полевые зависимости намагниченности центральных областей поверхности шлифов (бежевые круглые маркеры на

рисунках 7 А, Б). Особенностью разработанной методики по наблюдению ДС на базисной плоскости объектов исследования, при которой магнитное поле направленно перпендикулярно поверхности шлифа, является использование электромагнита, в нижнем концентраторе которого имеется отверстие для прохождения света. Данное техническое решение приводит к сильному градиенту магнитного поля в зазоре электромагнита, что не позволяет экспериментально определить величину истинного поля, прикладываемого к образцу. Единственным возможным способом решения этой задачи является проведение численного моделирования магнитной цепи, включающей электромагнит и образец. Для этого была разработана модель магнитной системы методики MOM, которая позволила рассчитать полевые зависимости намагниченности всего объема и центральной области шлифа (сплошные и пунктирные красные кривые на рисунках 7 А, Б, соответственно). Полученные результаты были использованы для коррекции кривых намагничивания центральных областей шлифов исследуемых монокристаллов, полученных в ходе магнитооптических исследований (бежевые треугольные маркеры на рисунках 7 А, Б).

Таким образом, комплексные исследования, включающие экспериментальное наблюдение трансформации доменной структуры на поверхности шлифа и компьютерное моделирование, позволили установить, что картины распределения доменов, по которым из соотношения между областями доменов с различным контрастом Керра удалось построить кривую намагничивания поверхности, должны соответствовать локальной намагниченности материала шлифа с учетом распределения размагничивающих полей вблизи поверхности.

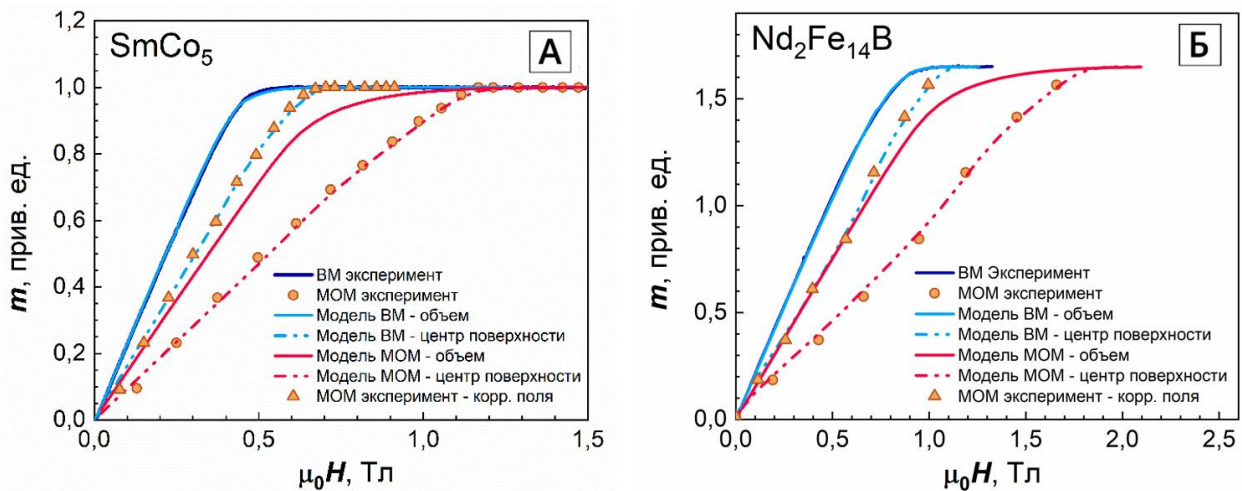


Рисунок 7 - Кривые намагничивания вдоль оси легкого намагничивания для шлифов монокристаллов SmCo_5 (А) и $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ (Б) в форме сферического сегмента, полученные в ходе: измерений на VM (синие сплошные кривые), исследований ДС на MOM (бежевые круглые маркеры), расчетов модели VM объема (голубые сплошные кривые), расчетов модели VM центральной области поверхности шлифов (голубые пунктирные кривые), расчетов модели MOM объема (красные сплошные кривые), расчетов модели MOM для центральной области поверхности шлифов (красные пунктирные кривые), исследований на MOM с коррекцией магнитного поля (бежевые треугольные маркеры).

Отличительной особенностью экспериментально полученных методом ВМ петель гистерезиса для монокристалла SmCo_5 являются скачки намагниченности в процессе размагничивания, связанные с процессами зарождения областей обратного знака (рисунок 2). Поэтому было проведено исследование трансформации ДС на поверхности шлифа монокристалла при намагничивании в полях более 1,5 Тл. В данном эксперименте к постоянному полю, создаваемому электромагнитом, добавлялось импульсное поле плоской катушки, размещенной в зазоре. Приложение дополнительных импульсных полей позволило намагнитить образцы до полей, соответствующих полям в методике ВМ, что в свою очередь сделало возможным пронаблюдать скачкообразное появление доменов на поверхности шлифа (рисунок 8).

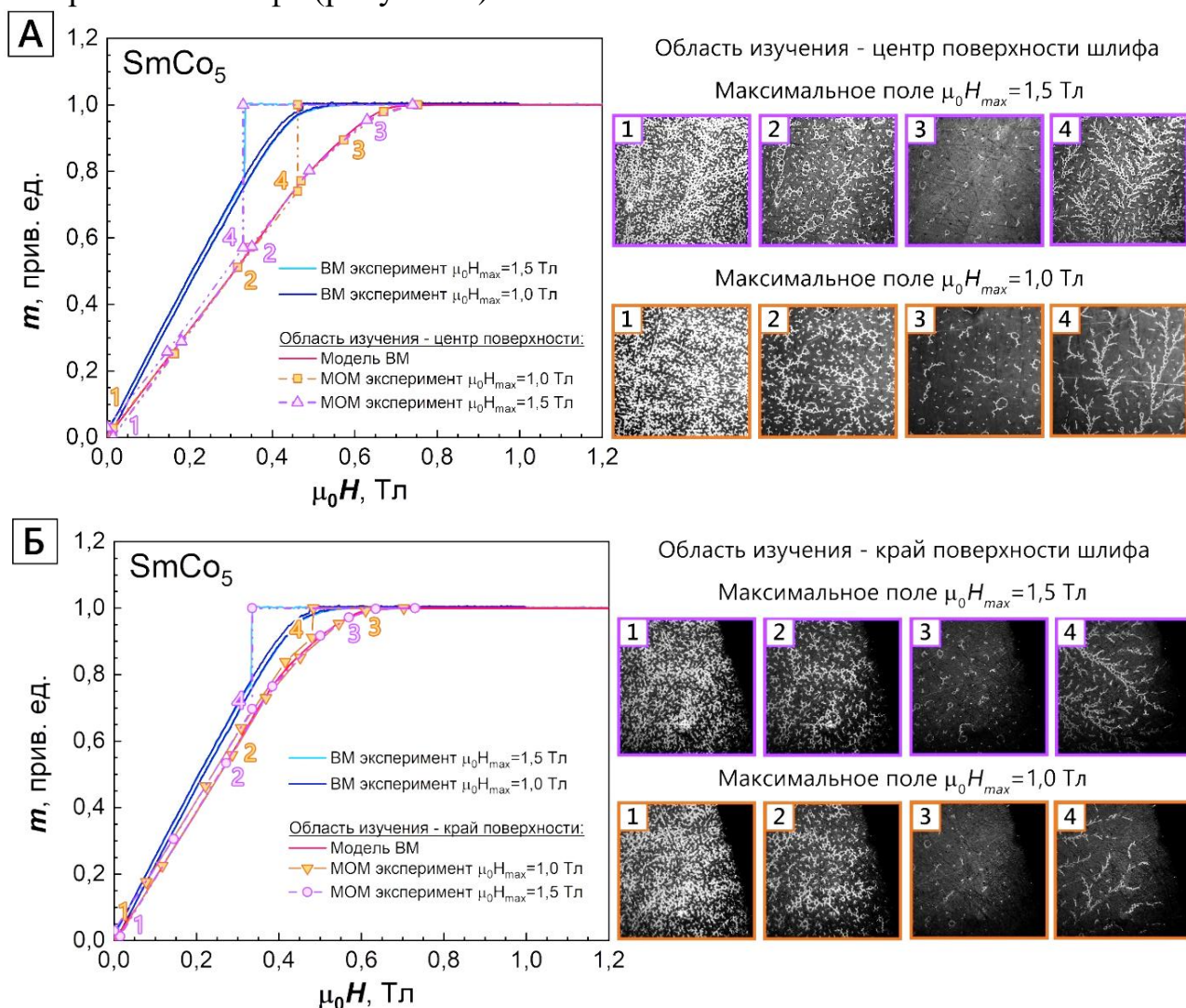


Рисунок 8 - Петли гистерезиса для шлифа монокристалла SmCo_5 , полученные методом ВМ (синие и голубые кривые) при разных значениях намагничивающего поля, результаты компьютерного моделирования кривой намагничивания центральной (А) и прикраевой (Б) области на поверхности шлифа (красная кривая), а также петли гистерезиса, построенные из анализа снимков ДС на исследуемых областях шлифа, полученные при разных значениях намагничивающего поля (маркерные штриховые кривые). Цифрами на графиках обозначены номера микрофотографий ДС (размер снимков 220x220 мкм), соответствующих приложенному полю на петле гистерезиса.

Исследования ДС центральных (рисунок 8А) и прикраевых (рисунок 8Б) областей шлифа монокристалла SmCo_5 в различных намагничивающих полях показали, что в образце имеется несколько центров зарождения доменов обратного знака с различными полями «деактивации». Так, при максимальном намагничивающем поле 1 Тл в процессе размагничивания наблюдается появление доменов в центральной части шлифа в поле $\mu_0 H_N = 0,47$ Тл (рисунок 8А снимок 4 в бежевой рамке), при этом край шлифа остается намагниченным до насыщения (рисунок 8Б снимок 4 в бежевой рамке). Увеличение максимального поля намагничивания до 1,5 Тл привело к «деактивации» центров зарождения доменов вблизи краев образца, что подтверждается исследованиями ДС (рисунок 8Б снимок 4 в фиолетовой рамке) и уменьшением поля зарождения $\mu_0 H_N = 0,34$ Тл, что в точности совпадает с рассчитанным значением размагничивающего поля указанных областей.

Раздел 2. В экспериментах по исследованию трансформации ДС монокристаллов SmCo_5 и $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ при приложении соосного оси легкого намагничивания образцов медленно меняющегося (квазистационарные условия), переменного и импульсного (динамические условия) магнитных полей наблюдался ряд уникальных конфигураций доменных структур.

Сравнительные последовательности изображений процессов динамики ДС на поверхности монокристалла SmCo_5 при добавлении и отсутствии переменной составляющей магнитного поля постоянной амплитуды до 30-60 мТл с частотой 50 Гц представлены на рисунке 9.

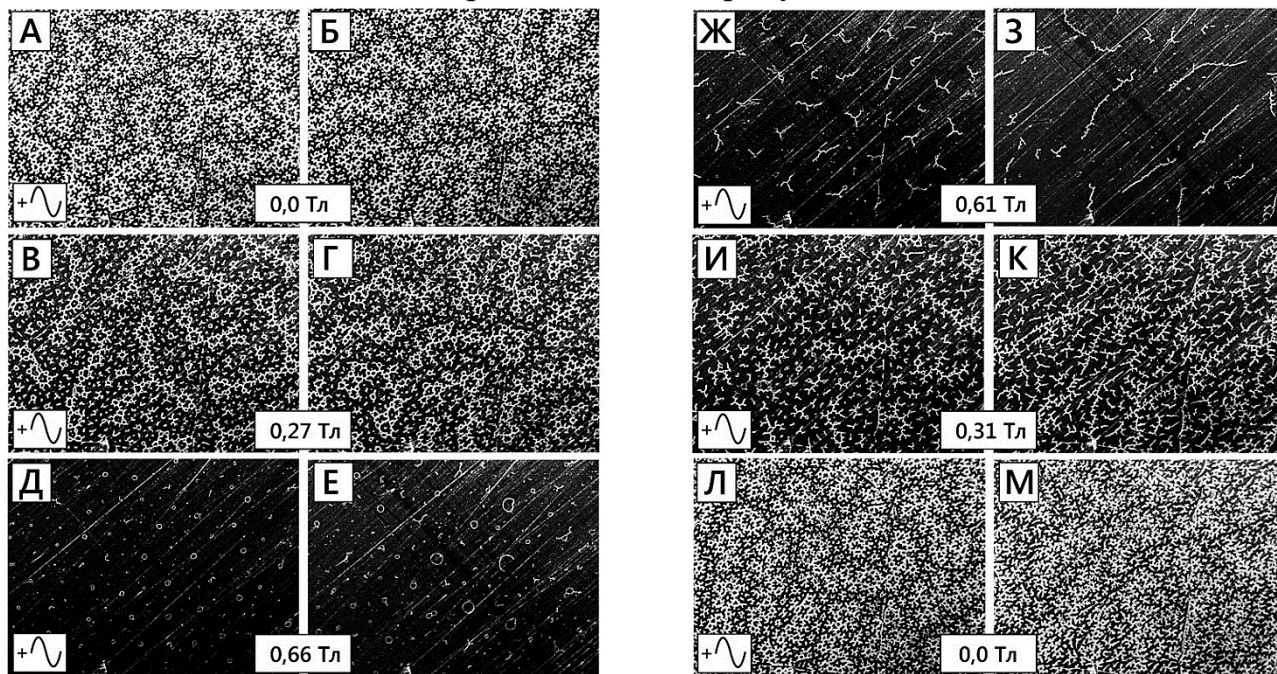


Рисунок 9 - Микрофотографии ДС на базисной поверхности монокристалла SmCo_5 при различных значениях внешнего постоянного поля при добавлении переменного поля (а, в, д, ж, и, л) и его отсутствии (б, г, е, з, к, м). Размер каждой фотографии 350×266 мкм.

На микрофотографиях видно, что конфигурация ДС в случае приложения к образцу дополнительного соосного оси легкого намагничивания монокристалла переменного поля постоянной амплитуды соответствует более равновесному состоянию (рисунки 9 А, В, Д, Ж, И, Л). Это объясняется тем, что

осциллирующее поле приводит к тому, что доменные границы (ДГ) начинают совершать колебания с частотой поля относительно своих положений закрепления и при некотором критическом значении поля начинается движение ДГ. Данное воздействие существенно влияет на процесс задержек смещения доменных границ в поле дефектов реального кристалла, что выражается в уменьшения до нуля гистерезиса на кривых удельной намагниченности образца.

В полях, близких к насыщению (рисунок 9Д, Е), на поверхности монокристалла SmCo_5 , формируется система закономерно распределенных кольцевых доменов, впервые обнаруженная в работе [9] на монокристалле MnAlGe . Аналогичная структура была выявлена и на поверхности монокристалла $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{V}$ (рисунки 6Ж-М), однако в отличие от образца SmCo_5 , формирование данной равновесной структуры не требовало приложения дополнительного переменного поля, что свидетельствует о совершенстве исследуемого монокристалла.

При исследованиях, в которых для увеличения намагничивающего поля к постоянному полю электромагнита добавлялось микросекундное (с длительностью спада импульсного сигнала 15 мкс) импульсное поле, впервые на поверхности монокристалла SmCo_5 была обнаружена и выделена как отдельный тип неравновесная разветвленная дендритная структура доменов - «морозный узор». Домены такого вида образуются в момент скачка намагниченности и являются наиболее оптимальными для быстрого заполнения свободной части образца доменами растущей магнитной фазы (рисунок 10А). Помимо регистрации ДС на поверхности монокристаллов методом индикаторной пленки исследовались поля рассеяния от основных доменов в объеме образцов. Показано, что при воздействии микросекундным полем в объеме образца формируется нерегулярная беспорядочная ДС (рисунок 10А), подтверждающая, что процессы задержки смещения ДГ происходят во всем объеме. Увеличение длительности импульса до 40 мс приводит к формированию схожей структуры доменов «морозный узор» на поверхности и более равновесной ДС в объеме (рисунки 10Б). При приложении переменного поля с частотой 50 Гц и амплитуды 60 мТл ДС на поверхности и в объеме трансформируется в равновесную конфигурацию (рисунки 10Б), соответствующую основному состоянию и наименьшей энергии. На основании аналогичных исследований конфигураций ДС на поверхности и в объеме монокристалла $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{V}$ после воздействия импульсных и переменных полей (рисунки 10 А'-В'), показано, что процессы перемагничивания в образце носят безгистерезисный характер.

Необходимо отметить, что импульсные поля, прикладываемые к образцам монокристаллов в экспериментах, представленных на рисунках 10, превышали поля насыщения данных образцов, и в случае соединения SmCo_5 соответствовали полям, при которых наблюдались скачкообразные изменения намагниченности. В связи с вышесказанным, в дальнейшем были проведены исследования трансформации ДС монокристалла SmCo_5 при намагничивании в разных по величине импульсных полях с длительностью импульса 40 мкс (рисунок 11).

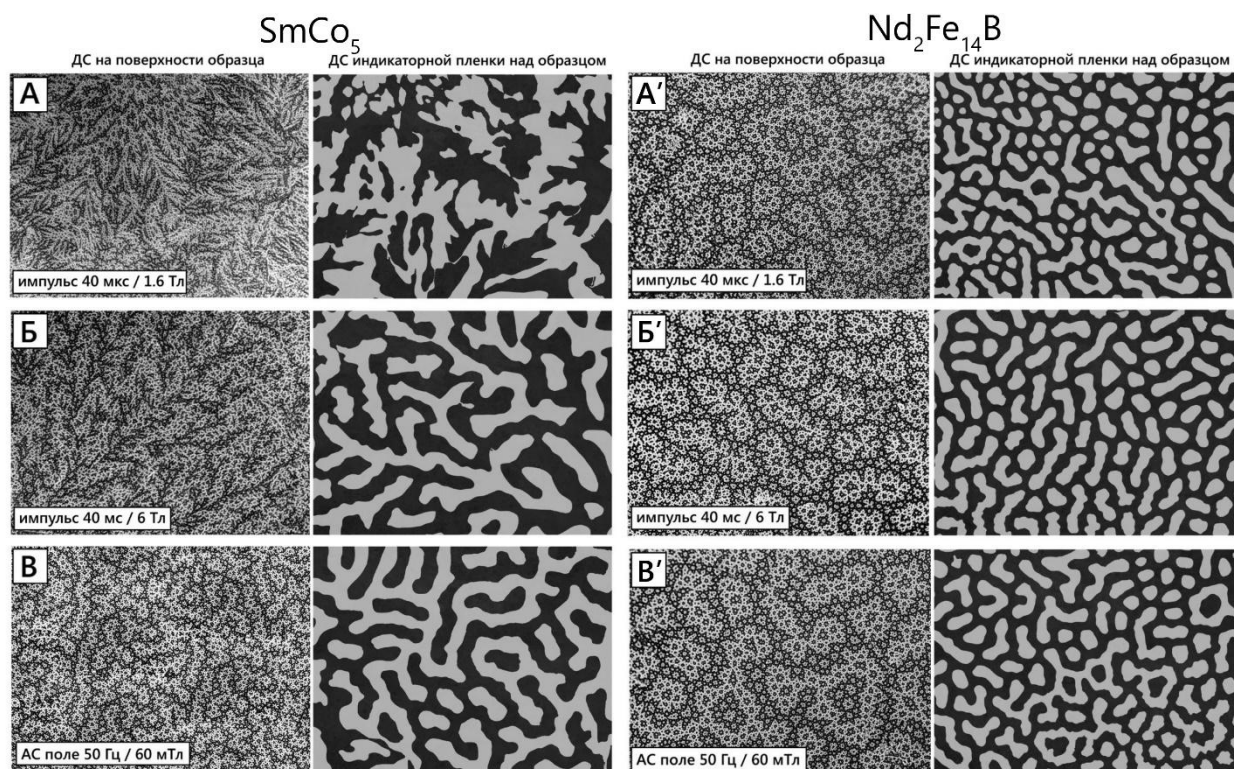


Рисунок 10 - Микрофотографии на базисной поверхности монокристаллов SmCo_5 и $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ после приложения импульсного поля 1,6 Тл (время импульса 40 мкс) (А, А'), приложения импульсного поля 6 Тл (время импульса 40 мс) (Б, Б'), переменного поля 60 мТл (В, В'). Напротив каждого состояния ДС на поверхности представлена фотография ДС индикаторной пленки, расположенной над образцом на расстоянии 30 мкм. Размер фотографий 1000×750 мкм

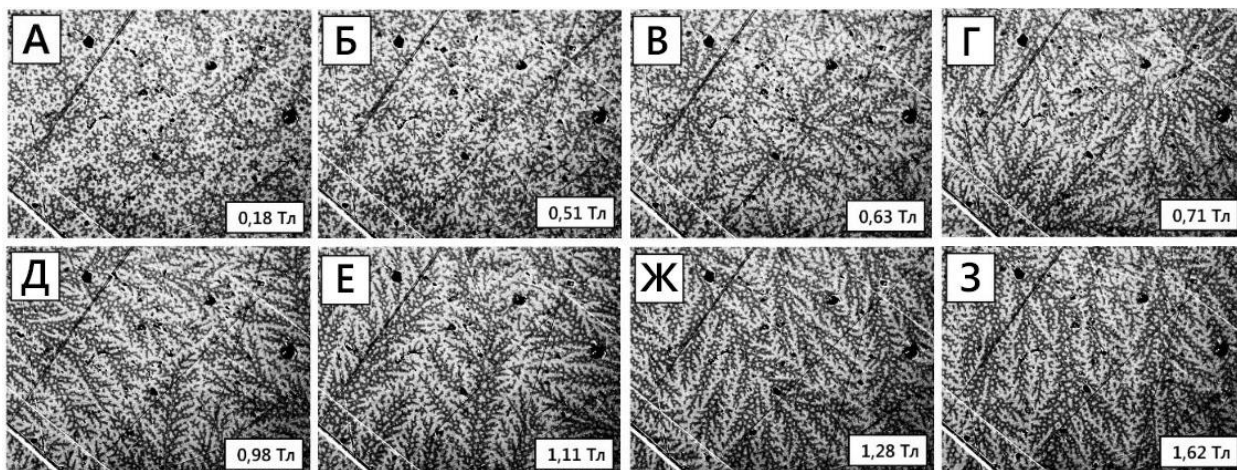


Рисунок 11 - Микрофотографии на базисной поверхности монокристалла SmCo_5 в нулевом магнитном поле после приложения импульсных полей разной амплитуды (время импульса 40 мкс). Размер каждой фотографии 350×266 мкм

Видно, что в интервале полей от 0 до 0,6 Тл при применении импульсного поля не наблюдается обнаруженный разветвленный новый тип ДС. Начиная с поля 0,63 Тл, на поверхности начинает формироваться радиальная выстроенность доменов, указывающая на область, которая служила источником доменов (область зарождения ДС). При увеличении амплитуды импульсного поля имеет место изменение ориентации «ветвей» доменов, что говорит о срабатывании центров

возникновения ДС, находящихся на прикраевых областях образца. Начиная с магнитных полей, превышающих значение 1,11 Тл, ориентация «ветвей» доменов не меняется.

Раздел 3. Информация, полученная в ходе исследования выявленной картины доменной структуры в нулевом внешнем магнитном поле, очень важна для определения локальных магнитных свойств экспериментального образца (ширина поверхностных и глубинных доменов, поверхностная плотность энергии доменных границ). В ходе эксперимента по исследованию доменной структуры образцов монокристалла SmCo_5 с изменяющейся толщиной от 1840 до 5 мкм (выборка микрофотографий ДС приведена на рисунке 12), используя метод Боденбергера-Хуберта, было определено значение ширины поверхностных доменов, равное 3,72 мкм, а также уточнено значение коэффициента β , описывающего зависимость энергии поля рассеяния от конкретной формы доменной структуры, которое составило 0,37.

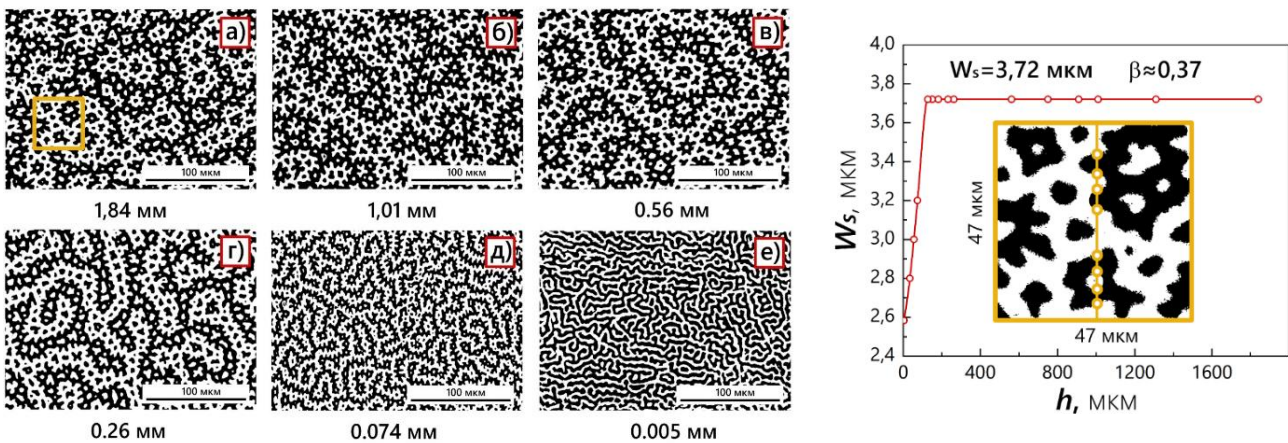


Рисунок 12 – Изображения поверхностной доменной структуры образца SmCo_5 , выявленные методом полярного эффекта Керра, при различной толщине образца ($h = 1,84 \div 0,005$ мм). На графике представлена зависимость ширины поверхностных доменов от толщины образца SmCo_5 , рассчитанная по принципу Боденбергера-Хуберта.

Раздел 4. Для уточнения объёмной конфигурации поверхностной доменной структуры и ее поведения в магнитном поле были проведены исследования монокристаллов $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ и SmCo_5 методом магнитно-силовой микроскопии (МСМ). На рисунке 13 представлены МСМ-изображения образцов $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ и SmCo_5 в нулевом магнитном поле и магнитном поле $\mu_0 H_{\text{внеш}} = 0,48$ Тл.

Для поиска геометрических форм доменов, соответствующих профилям полей рассеяния, получаемых в ходе МСМ исследований, были созданы численные модели доменных структур монокристаллов $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ и SmCo_5 .

В результате сопоставления профилей полей рассеяния поверхностной доменной структуры магнитоодноосных монокристаллов, полученных методами магнитно-силовой микроскопии и численного моделирования (рисунок 13), установлено, что минимальными элементами поверхностной доменной структуры на базисной плоскости массивных монокристаллов $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ и SmCo_5 являются дополнительные конусообразные домены с

диаметром основания 0,6 мкм и высотой 0,6 мкм, а также 2 мкм и высотой 2 мкм, соответственно.

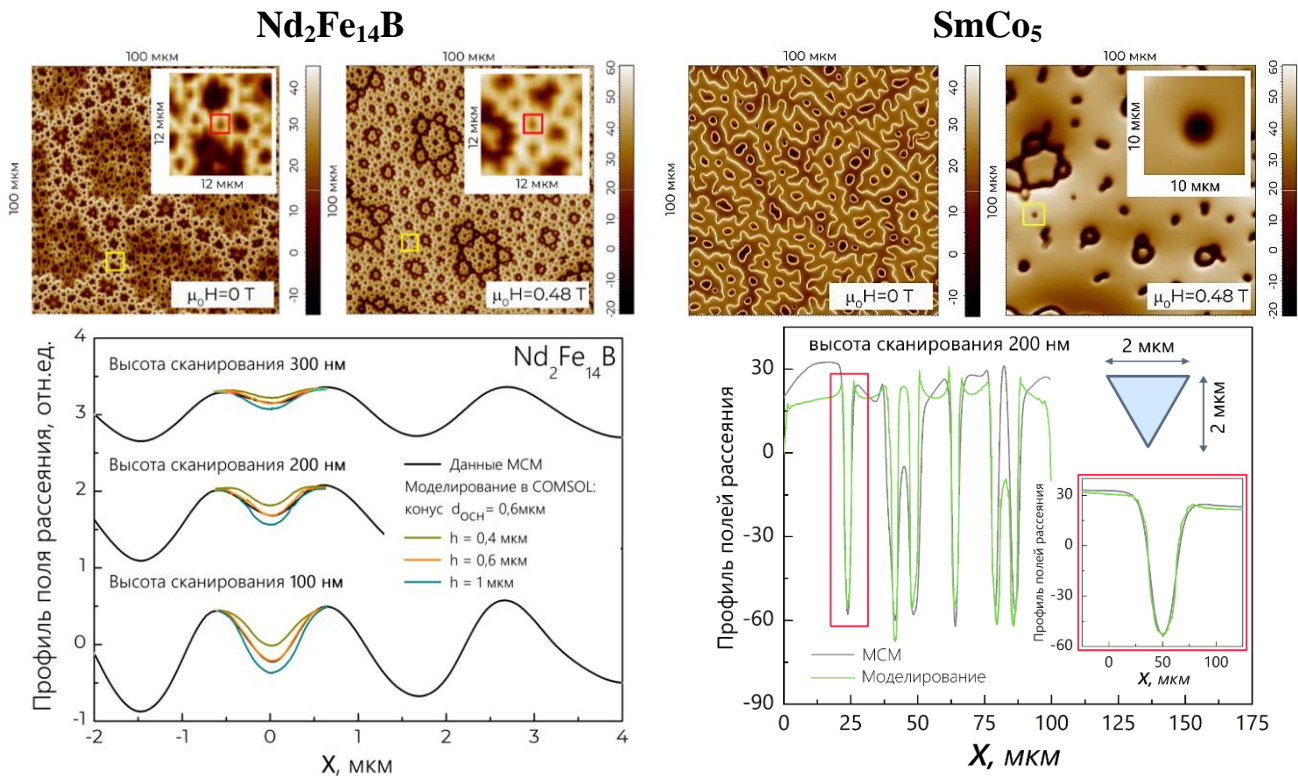


Рисунок 13 - МСМ-изображения поверхности $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ и SmCo_5 в отсутствие и во внешнем магнитном поле. Квадратами отмечены области наименьших элементов картины распределения полей рассеяния ($h_{\text{скан}} = 100\text{нм}$). На рисунке справа приведен сравнительный анализ профилей полей рассеяния над дополнительными магнитными доменами.

Раздел 5. Нередко известны случаи применения плёнок феррит-гранатов в качестве средства индикации доменной структуры в объёме и на поверхности магнитного образца. Доменная структура пленки, находящейся в собственном поле размагничивания исследуемого магнетика, перестраивается. Конечная картина распределения магнитных моментов зависит от расстояния между поверхностью образца и плёнкой. В качестве индикаторной плёнки была выбрана эпитаксиальная Vi -содержащая монокристаллическая пленка феррит-гранатов (Vc -МПФГ) состава $(\text{Fe,Ga})_5\text{O}_{12}(\text{Gd,Bi,Lu})_3$. На рисунке 14А представлены полевые зависимости намагниченности исследуемой пленки, полученные методами ВМ (тёмно-красная кривая) и МОМ (квадратные маркеры). Хорошее согласие экспериментальных кривых подтверждает, что в случае тонкопленочных образцов, в которых наблюдаются только основные домены, магнитооптические исследования позволяют изучать процессы перемагничивания всего объёма образца. В дальнейших исследованиях были получены изображения основных доменов монокристалла SmCo_5 . Для этого над поверхностью образца была помещена исследуемая в работе феррит-гранатовая пленка, отделенная от полированной поверхности прозрачной слюдой. Согласно данным, полученным в ходе магнитооптического (МО) эксперимента (рисунок 14Б), поле исчезновения доменов на пленке, расположенной над

образцом, составило 11 мТл, что существенно меньше поля насыщения монокристалла SmCo_5 , полученного из данных магнитометрии, и близко к значению поля насыщения свободной пленки (красная кривая на рисунке 14Б). С точки зрения изучения глубинных доменов массивных образцов магнитных материалов в отсутствие внешнего поля применение висмут-содержащей ФГ пленки позволяет получать достоверную информацию об их конфигурации, однако динамика трансформации такой картины распределения в меняющемся магнитном поле невозможна в связи с крайне малыми полями насыщения пленки.

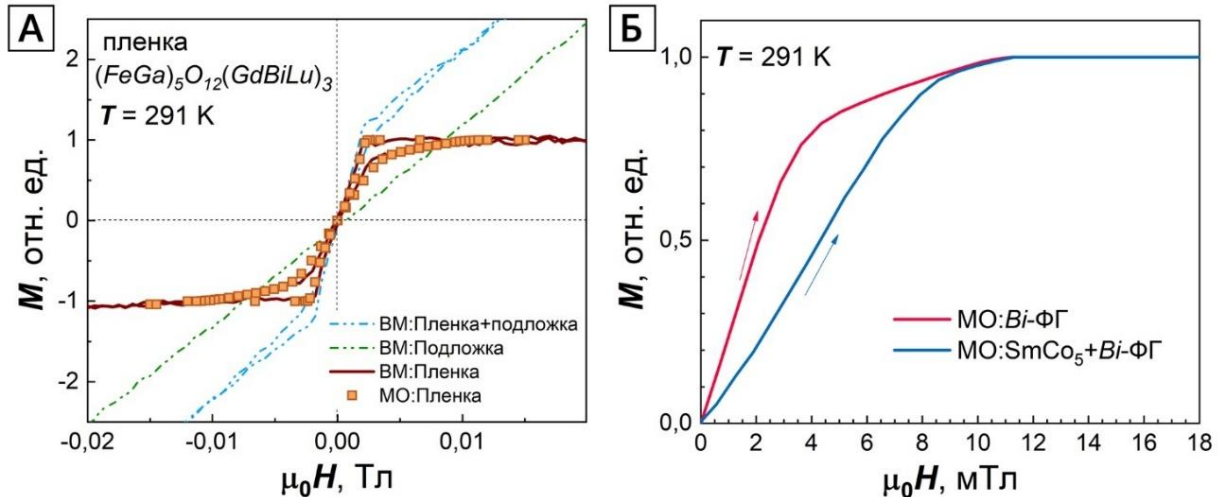


Рисунок 14 - А – полевые зависимости приведенной намагниченности висмут-содержащей феррит-гранатовой плёнки $(\text{Fe,Ga})_5\text{O}_{12}(\text{Gd,Bi,Lu})_3$, полученные методом вибрационного магнитометра (ВМ) и в ходе магнитооптических исследований трансформации ДС (МОМ); Б – полевые зависимости приведенной намагниченности, полученные из анализа изображений доменной структуры Bi:ФГ-плёнки (красная кривая) и системы SmCo_5 -Bi:ФГ-плёнка (синяя кривая).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработан и реализован аппаратно-программный комплекс на базе металлографического микроскопа Neophot 30 для получения и автоматического анализа изображений магнитной доменной структуры (ДС) на поверхности образцов во внешних квазистатических и/или динамических магнитных полях для последующего изучения процессов их перемагничивания.

2. В ходе численного моделирования методом конечных элементов в САПР COMSOL Multiphysics для изотропных и высокоанизотропных магнетиков с помощью разработанной модели индукционного принципа измерения намагниченности вибрационного магнитометра для образцов различной формы построены кривые намагничивания, пространственные распределения намагниченности, индукции и напряженности полей внутри и снаружи моделируемых объектов. Рассчитанные закономерности распределения намагниченности в объеме позволили построить зависимости фактора размагничивания от приведенной к значению при насыщении намагниченности.

3. Различие хода кривых намагничивания образцов магнитоодноосных монокристаллов заданной формы, рассчитанных из анализа ДС на поверхности

и полученных измерительными методами, регистрирующими интегральные значения намагниченности, связано со сложным характером распределения размагничивающих полей вблизи поверхности образцов.

4. Для получения равновесной доменной структуры, соответствующей заданному значению постоянного поля, к образцам SmCo_5 , в которых имеет место задержка смещения доменных границ на структурных неоднородностях, необходимо прикладывать дополнительное соосное оси легкого намагничивания монокристаллов переменное поле постоянной амплитуды в диапазоне 30-60 мТл с частотой 50 Гц. Данное воздействие существенно влияет на процесс задержек смещения доменных границ в поле дефектов, что выражается в уменьшения до нуля гистерезиса на кривых удельной намагниченности.

5. На основании исследований конфигураций ДС на поверхности и в объеме монокристаллов до и после воздействия мили- и микро-импульсных полей, сонаправленных с осью легкого намагничивания образцов, показано, что процессы перемагничивания монокристалла $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ носят безгистерезисный характер. В случае соединения SmCo_5 , обладающего меньшей шириной и большей энергией ДГ, которая может легче закрепляться на структурных неоднородностях реального кристалла, после воздействия микросекундного поля с длительностью спада импульсного сигнала до 15 мкс и амплитудой более 1 Тл на поверхности была обнаружена и выделена как отдельный тип неравновесная разветвленная дендритная структура доменов, названная «морозный узор». При этом в объеме формируется нерегулярная беспорядочная ДС, подтверждающая, что процессы задержки смещения ДГ происходят во всем объеме.

6. В результате сопоставления исследований полей рассеяния поверхностной доменной структуры на базисной плоскости магнитоодноосных монокристаллов SmCo_5 и $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, полученных методами оптической, магнитно-силовой микроскопии и численного моделирования, установлено, что минимальными элементами поверхностной доменной структуры массивных монокристаллов SmCo_5 и $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ являются дополнительные конусообразные домены с диаметром основания 2,0 мкм и высотой 2,0 мкм, а также 0,6 мкм и высотой 0,6 мкм, соответственно.

7. Комплексные изучения свойств и доменной структуры Vi -содержащей монокристаллической пленки феррит-гранатов (ФГ) состава $(\text{Fe,Ga})_5\text{O}_{12}(\text{Gd,Bi,Lu})_3$ показали, что для тонкопленочных образцов, в которых наблюдаются только основные (сквозные) домены, магнитооптические исследования позволяют изучать процессы перемагничивания всего объема образца. Для изучения глубинных доменов массивных образцов магнитных материалов в отсутствие внешнего поля применение висмут-содержащей ФГ пленки позволяет получать достоверную информацию об их конфигурации. Однако наблюдение трансформации основных доменов с использованием индикаторной пленки в меняющемся магнитном поле невозможна в связи с крайне малыми полями ее насыщения.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

в изданиях, входящих в перечень Высшей аттестационной комиссии при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации и приравненных к ним:

А1. Дунаева, Г.Г. К вопросу об исследовании процессов перемагничивания одноосных магнитных материалов из анализа трансформации их доменной структуры: эксперимент и компьютерное моделирование / Г.Г. Дунаева, А.Ю. Карпенков // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2024. – № 16. – С. 96-109. – DOI 10.26456/pcascnn/2024.16.096

А2. Зигерт, А.Д. Поведение фрактальной размерности доменных структур в феррит-гранатовых пленках / А.Д. Зигерт, Г.Г. Дунаева, Н.Б. Кузьмин, Е.М. Семенова, Н.Ю. Сдобняков // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2023. – № 15. – С. 98-107. – DOI 10.26456/pcascnn/2023.15.098.

А3. Karpenkov, A.Yu. Quantitative analyses of surface and bulk magnetization in $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ and SmCo_5 single crystals: towards understanding the large N_{eff} in nucleation-type magnets / A.Yu. Karpenkov, K.P. Skokov, G.G. Dunaeva, E.M. Semenova, M.B. Lyakhova, Yu.G. Pastushenkov // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2022. – Vol. 55, No. 45. – P. 455002. – DOI 10.1088/1361-6463/ac90d2.

А4. Zigert, A.D. Fractal Dimension Behaviour of Maze Domain Pattern in Ferrite-Garnet Films During Magnetisation Reversal / A.D. Zigert, G.G. Dunaeva, E.M. Semenova, A.I. Ivanova, A.Yu. Karpenkov, N.Yu. Sdobnyakov // Journal of Superconductivity and Novel Magnetism. – 2022. – Vol. 35, No. 8. – P. 2187-2193. – DOI 10.1007/s10948-022-06301-w.

А5. Иванова, А.И. Влияние дефектов на магнитные характеристики феррит-гранатовых пленок / А.И. Иванова, Е.М. Семенова, Г.Г. Дунаева, С.В. Овчаренко, С.А. Третьяков, А.Д. Зигерт // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2020. – № 12. – С. 103-112. – DOI 10.26456/pcascnn/2020.12.103.

А6. Карпенков, А.Ю. Метод анализа процессов перемагничивания магнетиков по изображениям магнитной доменной структуры / А.Ю. Карпенков, Г.Г. Дунаева, П.А. Ракунов, Е.М. Семенова // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2018. – № 10. – С. 338-344. – DOI 10.26456/pcascnn/2018.10.338.

в других рецензируемых изданиях:

А7. Дунаева, Г.Г. Анализ характеристик магнитных материалов по изображениям их доменной структуры / Г.Г. Дунаева, П.А. Ракунов, А.Ю. Карпенков, Е.М. Семенова // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2018. – Т. 18, № 2. – С. 246-248.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Skomski, R. Permanent Magnetism / R. Skomski, J.M.D. Coey. – Routledge, 2019. – 416 p.
2. Coey, J.M.D. Permanent magnet applications / J.M.D. Coey // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2018. – Т. 248. – №. 3. – С. 441-456.
3. Buschow, K.H.J. Physics and application of novel magnet materials / K.H.J. Buschow // Journal of magnetism and magnetic materials. – 1989. – Т. 80. – №. 1. – С. 1-8.
4. Розин, П.А. Применение магнитотвердых материалов в электрических машинах на транспортных средствах / П.А. Розин, А.В. Акимов // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. – 2014. – Т. 1. – №. 2 (20). – С. 12-18.
5. McCallum, R.W. Practical aspects of modern and future permanent magnets / R.W. McCallum, L.H. Lewis, R. Skomski, M.J. Kramer, I.E. Anderson // Annual Review of Materials Research. – 2014. – Т. 44. – №. 1. – С. 451-477.
6. Пастушенков, Ю.Г. Магнитная доменная структура. Количественный анализ процессов перемагничивания / Ю.Г. Пастушенков, К.П. Скоков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2007. – Т. 12. – №. 12. – С. 375-385.
7. Hubert, A. Magnetic domains: the analysis of magnetic microstructures / A. Hubert, R. Schäfer. – Springer Science & Business Media, 2008. – 696 с.
8. Suzuki, D.H. Measurement of Kerr rotation and ellipticity in magnetic thin films by MOKE magnetometry / D.H. Suzuki, G.S.D. Beach // Journal of Applied Physics. – 2024. – V. 135. – №. 6. – 063901.
9. Кандаурова, Г.С. Доменная структура и магнитный гистерезис одноосных ферромагнетиков: дис...д-ра физ.-мат. наук: 01.04.11 / Кандаурова Герта Семеновна. – Свердловск, 1973. – 357 с.

Подписано в печать 21.03.2025. Формат 60 × 84^{1/16}.

Усл. печ. л. 1,4. Тираж 100 экз. Заказ № 60.

Издательство Тверского государственного университета.

Адрес: 170100, г. Тверь, Студенческий пер. 12, корпус Б.

Тел.: (4822) 35-60-63.