

на правах рукописи

Зигерт Александр Дмитриевич

**АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ ФЕРРИТ-
ГРАНАТОВЫХ ПЛЁНОК И ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ С
ПРИМЕНЕНИЕМ ФРАКТАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ
К ИХ МАГНИТООПТИЧЕСКИМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ**

1.3.12 – Физика магнитных явлений

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Тверь, 2025

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

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, доцент,
Сдобняков Николай Юрьевич

Официальные оппоненты: **Ховайло Владимир Васильевич**
доктор физико-математических наук, доцент,
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС», профессор
кафедры функциональных наносистем и
высокотемпературных материалов;

Кабиров Юрий Вагизович
доктор физико-математических наук, ФГАОУ ВО
«Южный федеральный университет», профессор
кафедры общей физики;

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тверской государственный технический
университет»

Защита состоится 26 декабря 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. В природе существует множество примеров фрактальных структур. При этом известно, что различные физико-химические процессы (гигантское комбинационное рассеяние, люминесценция, каталитические и поверхностные явления и др.) связаны со структурой объектов, в том числе фрактальной [1]. Также активно проявляется интерес к исследованию магнитных материалов с помощью методов фрактальной геометрии, которые позволяют анализировать сложные структуры и свойства этих материалов, выявляя закономерности, невидимые при традиционном подходе. Так, например, в [2] исследуется влияние фрактальной размерности наноструктуры на кривую намагничивания обменно-связанного кластера магнитных наночастиц, а в [3] – корреляция между фрактальной размерностью и трансформацией доменной структуры при перемагничивании.

В современных магнитооптических устройствах активно используются эпитаксиальные структуры висмутсодержащих феррит-гранатов, выращенные на подложках из гадолиний-галлиевого граната. Преимуществом висмутсодержащих феррит-гранатовых плёнок является наличие высоких магнитооптических характеристик, их особые диэлектрические свойства. Известно, что взаимосвязь фрактальной размерности и структуры магнитных доменов исследовалась не только экспериментально [4], но и с использованием микромагнитного моделирования [2] и теоретических численных подходов [5]. Таким образом, описание фиксируемых закономерностей между поведением магнитных характеристик висмутсодержащих феррит-гранатовых плёнок с различным состоянием поверхности (отсутствием дефектов или при их наличии) и морфологическими характеристиками является интересной задачей, в том числе с точки зрения исследования влияния различных факторов на отмеченные закономерности.

В магнитных материалах, как правило, присутствуют различного рода дефекты, влияние которых значительно сказывается на структурно-чувствительных характеристиках материала, в частности, на коэрцитивной силе [6]. Очевидно, что исследование влияния таких дефектов на магнитные свойства функциональных магнитных материалов имеет важное значение для их промышленного производства и применения. Кроме того, различные неоднородности и дефекты, имеющиеся на подложке гадолиний-галлиевого граната, наследуются висмутсодержащей феррит-гранатовой плёнкой, вызывая локальные изменения магнитных свойств.

Еще одним классом магнитных материалов, которые имеют важное прикладное значение, являются постоянные магниты. Перемагничивание постоянных магнитов происходит по петле гистерезиса, параметры которой (намагниченность насыщения, остаточная намагниченность и коэрцитивная сила) наряду с максимальным энергетическим произведением $(BH)_{\max}$ являются важнейшими критериями для применения магнитов в устройствах автоматики, электротехники и электроники [7]. Существует ряд аттестованных методик измерения полевых зависимостей намагниченности $M(H)$ образцов,

позволяющих получить их интегральные гистерезисные характеристики [8]. Однако не менее важным является независимый анализ перемагничивания их поверхности, поскольку отдельные процессы, как препятствующие, так и способствующие перемагничиванию, протекают именно на поверхности, а также на границах структурных элементов (зёрен и/или фаз).

При изучении магнитного состояния поверхности магнетика методом оптической металлографии можно задействовать индикаторную висмутсодержащую феррит-гранатовую плёнку, которая позволяет визуализировать магнитные поля рассеяния объекта, помещённого под ней. Этот способ позволяет магнитооптическими методами регистрировать поля рассеяния всего образца или его части в окрестности контакта с плёнкой. Градиенты полей рассеяния доменной структуры и неоднородно намагниченных структурных элементов визуализируются плёнкой как области, различающиеся по контрасту, при этом регистрируется компонента намагниченности, перпендикулярная её плоскости, так как плёнка одноосная.

Степень разработанности. В настоящее время фрактальный анализ широко используется в материаловедении для описания и сравнения структур, имеющих сложную геометрию. Фрактальная размерность применяется для описания структуры поверхности магнитных материалов на нано- и микроуровне с последующим установлением корреляций с их гистерезисными характеристиками. Авторами [9] при изучении эволюции лабиринтной доменной структуры магнетиков был описан морфогенез лабиринтной доменной структуры во внешнем магнитном поле, предполагающий, что каждому его этапу соответствует определённое значение фрактальной размерности.

В работах [10, 11] рассмотрено влияние дефектов и деформаций на поведение доменной структуры в магнитных материалах такого типа. Показано, что значительные локальные деформации планарной висмутсодержащей феррит-гранатовой плёнки приводят к появлению нормальной компоненты вектора намагниченности, вследствие чего в плёнке возникает наведённая анизотропия типа «лёгкая ось».

В работе [12] на примере тонких висмутсодержащих феррит-гранатовых плёнок показано формирование упорядоченных устойчивых динамических доменных структур в результате самоорганизации, и утверждается, что многодоменную магнитную среду можно отнести к новым объектам синергетики. В [13] после облучения лазером получали пространственно самоорганизованные структуры, идентифицированные как фрактальные; установлено, что фрактальная размерность этих структур зависит от параметров внешнего воздействия. Таким образом, целесообразным является как комплексное исследование морфологии рельефа магнитных феррит-гранатовых плёнок, так и исследование взаимосвязи между магнитными и морфологическими характеристиками. При этом существующие неоднородности и дефекты, имеющиеся на подложке гадолиний-галлиевого граната, наследуются плёнкой феррита-граната, вызывая локальные изменения магнитных свойств, а сами эпитаксиальные магнитные плёнки могут формировать развитый рельеф, в том числе фрактальный [14].

Целью настоящей работы являлось установление взаимосвязи магнитных характеристик феррит-гранатовых плёнок и постоянных магнитов с фрактальной размерностью доменной структуры и профилей полей рассеяния на поверхности исследуемых материалов.

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

1. Анализ влияния дефектов, вызванных локальными механическими и термическими воздействиями, на коэрцитивность висмутсодержащих феррит-гранатовых плёнок.

2. Разработка методики применения аппарата фрактальной геометрии к магнитооптическим изображениям доменной структуры феррит-гранатовых плёнок и постоянных магнитов.

3. Разработка программного обеспечения, позволяющего анализировать серию магнитооптических изображений и рассчитывать полевые зависимости относительной намагниченности и фрактальной размерности.

4. Получение и анализ полевых зависимостей относительной намагниченности и фрактальной размерности магнитооптических изображений доменной структуры висмутсодержащих феррит-гранатовых плёнок различной толщины и стехиометрического состава.

5. Разработка методики эксперимента по воздействию внешнего импульсного магнитного поля на постоянные магниты с регистрацией магнитооптических изображений посредством индикаторной среды.

6. Анализ полевых зависимостей фрактальной размерности магнитооптических изображений полей рассеяния образцов постоянных магнитов с различным составом и магнитными характеристиками. Сопоставление данных, полученных магнитооптическим методом, с результатами магнитных измерений.

Научная новизна работы:

1. Рассмотрено влияние объёмных дефектов, связанных с локальным механическим повреждением и термическим лазерным воздействием, на доменную структуру и магнитные характеристики эпитаксиальных магнитных висмутсодержащих феррит-гранатовых плёнок.

2. Впервые был проведён сравнительный анализ поведения фрактальной размерности доменной структуры и петель гистерезиса для дефектных и бездефектных участков висмутсодержащих феррит-гранатовых плёнок при перемагничивании.

3. Впервые были оценены диапазоны изменения фрактальной размерности доменной структуры для различных составов висмутсодержащих феррит-гранатовых плёнок, а также проанализирована корреляция полевых зависимостей фрактальной размерности доменной структуры и первой производной намагниченности по полю $dM(H)/dH$.

4. Представлены оригинальные результаты фрактального анализа топографии полей рассеяния постоянных магнитов (марки КС37 и N35) после перемагничивания импульсным магнитным полем, исследованной с помощью индикаторной висмутсодержащей феррит-гранатовой плёнки.

5. Впервые были использованы две различные методики изменения

внешнего магнитного поля при проведении магнитооптических исследований процессов перемагничивания постоянных магнитов, а именно: (I) однократное насыщение с последующим дискретным изменением величины размагничивающего импульсного поля и (II) намагничивание до насыщения перед каждым воздействием размагничивающего импульсного поля.

Теоретическая и практическая значимость:

1. Методом оптической магнитометрии получены предельные петли магнитного гистерезиса для дефектных и бездефектных участков висмутсодержащих феррит-гранатовых плёнок. Определены типичные морфологические характеристики поверхности висмутсодержащей феррит-гранатовой плёнки.

2. Разработано программное обеспечение [15(B1)] для обработки и анализа средствами фрактальной геометрии магнитооптических изображений различных магнитных структур. Алгоритмы обработки магнитооптических изображений доменной структуры магнетиков адаптированы для изучения корреляции между магнитными и морфологическими характеристиками исследуемых материалов.

3. Определена фрактальная размерность магнитооптических изображений, соответствующих разным участкам предельной петли магнитного гистерезиса висмутсодержащих феррит-гранатовых плёнок, что позволяет установить их текущее магнитное состояние (размагниченное, частично намагниченное, состояние магнитного насыщения). Результаты исследования доменной структуры феррит-гранатовых плёнок и ее трансформации в магнитном поле позволяют распространить представления и методы фрактальной геометрии для описания доменных структур и процессов перемагничивания.

4. В развитие [16], где показано, что фрактальная размерность поверхности скола постоянных магнитов может быть использована в качестве параметра для оценки величины коэрцитивной силы, была установлена корреляция между полевыми зависимостями фрактальной размерности магнитооптических изображений полей рассеяния постоянных магнитов и первой производной намагниченности по полю $dM_{mo}(H)/dH$. Данное обстоятельство позволяет описывать магнитное состояние постоянных магнитов после воздействия импульсного размагничивающего поля на основе магнитооптических изображений, полученных с помощью индикаторной феррит-гранатовой плёнки.

Методология и методы исследования. В данной работе объектами исследования выступали висмутсодержащие феррит-гранатовые плёнки, а также постоянные магниты марок КС37 и N35. В качестве основного экспериментального метода использовался магнитооптический метод визуализации результата воздействия как постоянных, так и импульсных полей на различные магнитные материалы. При исследовании постоянных магнитов в качестве магнитооптического индикатора использовались висмутсодержащие феррит-гранатовые плёнки. Все магнитооптические изображения, полученные в рамках диссертационного исследования, регистрировались цифровой камерой и в дальнейшем подвергались обработке и анализу.

Основным методом анализа магнитооптических изображений доменной структуры феррит-гранатовых плёнок и полей рассеяния постоянных магнитов

была выбрана фрактальная геометрия. В рамках этой методики для каждого магнитооптического изображения объектов исследования производилось вычисление фрактальной размерности методом подсчёта кубов (box-counting method) [17, 18], после чего строились полевые зависимости фрактальной размерности и выявлялись закономерности с магнитными величинами.

Личный вклад автора. Все основные результаты диссертационной работы получены при активном и непосредственном участии автора. Лично автором проведены эксперименты по получению предельных петель гистерезиса различных феррит-гранатовых плёнок. Проведена серия экспериментов по воздействию импульсного магнитного поля на постоянные магниты и проанализированы их результаты. Лично автором разработано и апробировано программное обеспечение [15(B1)] для расчёта фрактальной размерности магнитооптических изображений. Совместно с научным руководителем Н.Ю. Сдобняковым и сотрудниками кафедры прикладной физики и кафедры физики конденсированного состояния Тверского государственного университета были подготовлены и оформлены рукописи статей, список опубликованных работ представлен далее. Автор неоднократно представлял результаты диссертационной работы на международных и всероссийских конференциях.

Положения, выносимые на защиту:

1. Одиночные механические дефекты глубиной до 1,8 мкм, нанесённые методом индентирования, не оказывают заметного воздействия на динамику перемагничивания в одноосных эпитаксиальных висмутсодержащих феррит-гранатовых плёнках $(\text{GdBiLu})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$ толщиной 10 мкм. Однако одиночные термические дефекты, возникающие под действием фемтосекундного лазерного излучения (800 Дж/см²), становятся центрами задержки доменных границ, увеличивая коэрцитивную силу плёнки.

2. Существует корреляция между полевыми зависимостями фрактальной размерности доменной структуры феррит-гранатовых плёнок и первой производной намагниченности по полю $dM(H)/dH$, обусловленная особенностями трансформации доменной структуры в процессе изменения внешнего магнитного поля.

3. Величина фрактальной размерности топографии полей рассеяния на поверхности постоянных магнитов *SmCo* (марка KC37) и *NdFeB* (марка N35) зависит от их остаточной намагниченности. Максимальные значения фрактальной размерности наблюдаются в полностью размагниченном состоянии, тогда как при наличии остаточной намагниченности этот показатель снижается.

4. Величины размагничивающих полей, приводящих намагниченный до насыщения постоянный магнит в полностью размагниченное состояние в отсутствие внешнего магнитного поля, при исследованиях процессов перемагничивания с помощью вибрационного магнитометра и магнитооптического метода, совпадают.

Обоснованность и достоверность. Результаты, представленные в диссертационной работе, получены на основе экспериментов, проведённых на сертифицированном научном оборудовании и с использованием апробированных

расчётных методов. Анализ магнитооптических изображений доменной структуры феррит-гранатовых плёнок и полей рассеяния постоянных магнитов проводился как с использованием собственных зарегистрированных компьютерных программ [15(B1)], так и программного обеспечения [19, 20]. Полученные результаты являются воспроизводимыми. Используемые модели применительно к исследуемым задачам адекватны и тщательно апробированы. Тематика диссертации соответствует тематикам государственного задания в сфере научной деятельности (проекты № 0817-2020-0007 и № 0817-2023-0006).

Апробация работы. Основные результаты были представлены на следующих научных мероприятиях: XXXIX Международная зимняя школа физиков-теоретиков (Гранатовая бухта, п. В. Сысерть, 3–9 апреля 2022 г.), XXIX Российская конференция по электронной микроскопии «Современные методы электронной, зондовой микроскопии и комплементарных методов исследования наноструктур и наноматериалов» (Москва, 29-31 августа 2022 г.), 3-й Международный научный семинар «Дни калорики в Королёве: функциональные материалы и их приложения» (Королев, 16-20 августа 2022 г.), XXIII Всероссийская конференция по физике сегнетоэлектриков ВКС-XXIII (Тверь, 3-6 октября 2023 г.), Объединенная конференция «Электронно-лучевые технологии и рентгеновская оптика в микроэлектронике» КЭЛТ – 2023 (Черноголовка, 13 – 17 ноября 2023 г.), XXV Международная конференция «Новое в магнетизме и магнитных материалах» (НМММ) (Москва, 1-6 июля 2024 г.), Открытая школа-конференция стран СНГ «Ультрамелкозернистые и наноструктурные материалы – 2024» (Уфа, 30 сентября – 4 октября 2024 г.).

Публикации. По теме исследований с участием автора опубликовано 8 статей в журналах, входящих в перечень ВАК и/или индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus, получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы на ЭВМ; перечень публикаций приведён в конце диссертации.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, основных результатов и выводов, списка цитируемой литературы, включающего 163 наименования, а также списка собственных публикаций. Объём работы составляет 141 страницу, включая 41 рисунок и 6 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** показана актуальность темы диссертации, приведён краткий обзор статей, описывающий как современное состояние исследуемой области, так и конкретное место, которое данная работа занимает в ней. Помимо этого, сформулированы цели и задачи диссертации, перечислены полученные результаты, показана их научно-практическая ценность, а также их обоснованность и достоверность. И наконец, во введении приведены положения, выносимые на защиту, и в кратком изложении описано содержание разделов диссертации.

В **первой главе** представлен обзор основных литературных источников, позволяющий оценить современное состояние исследований феррит-гранатовых (ФГ) плёнок в том числе с помощью фрактальных методов. В частности, рассмотрена структура ФГ плёнок, взаимосвязь структуры и магнитных свойств

ФГ плёнок, влияние допирования ФГ плёнок на их магнитные свойства, использование ФГ плёнок в качестве индикаторной магнитооптической (МО) среды и применение фрактального аппарата для изучения доменной структуры (ДС) магнитных материалов.

Во **второй главе** описана методика проведения эксперимента для получения и анализа МО изображений исследуемых объектов. В частности, рассмотрена методика получения МО изображений доменной структуры ФГ плёнок, приводится описание генератора магнитных импульсов оригинальной конструкции и разработанного в рамках данной работы программного обеспечения для автоматической обработки и анализа серии МО изображений, а также описывается программное обеспечение для получения фрактальной размерности (ФР), использовавшееся в качестве контрольного. Кроме того, приведены сведения об используемых в экспериментах образцах.

Третья глава занимает центральное место в диссертации. В ней описывается влияние дефектов на структурно-чувствительные магнитные характеристики ФГ плёнок, фрактальный анализ лабиринтной доменной структуры ФГ плёнок в процессе перемагничивания на дефектных и бездефектных участках, поведение фрактальной размерности ДС в ФГ плёнках с разным стехиометрическим составом. Кроме того, в рамках этой главы представлен фрактальный анализ МО визуализации процесса перемагничивания постоянных магнитов (ПМ) в импульсном поле, а также исследуются закономерности изменения фрактальной размерности МО изображений ПМ после воздействия импульсным магнитным полем (МП).

В *разделе 1* приведены результаты исследования влияния механических дефектов и дефектов, созданных посредством воздействия импульсного лазерного излучения, на магнитные характеристики висмутсодержащих феррит-гранатовых (Bi:ФГ) плёнок. В ходе исследований на поверхности ФГ пленок с помощью микротвердомера были сформированы дефекты. Средствами оптической профилометрии были определены линейные размеры царапины: глубина в диапазоне 1,2 – 1,8 мкм, ширина – 6,5 мкм. Следует отметить, что ширина дефекта не превышает ширину доменов плёнки (9 мкм). Царапина представляет собой разрыв, нарушающий целостность плёнки. Однако, в отсутствие внешних полей лабиринтные домены в области разрыва не меняют свою равновесную конфигурацию.

Полевые зависимости намагниченности $M(H)$ плёнки $(\text{GdBiLu})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$, полученные на основе анализа перестройки доменной структуры во внешнем поле, представлены на рис. 1 а. На графике присутствуют две петли магнитного гистерезиса, соответствующие участкам плёнки в окрестности дефекта и на удалении от него. Анализ зависимостей $M(H)$ показывает, что в области царапины наблюдается увеличение площади петли гистерезиса и незначительное изменение коэрцитивной силы H_{cl} с 26 А/м (в бездефектной области плёнки) до 32 А/м. Несовпадение значений H_{cl} достаточно мало и сопоставимо с погрешностью измерения величины магнитного поля. Таким образом, из приведённого эксперимента следует, что протяжённый дефект, ширина которого не превышает

ширину домена, практически не изменяет коэрцитивную силу ФГ плёнки с одноосной анизотропией. Поскольку H_{cl} отвечает за один из механизмов диссипации (переход части энергии упорядоченных процессов в энергию неупорядоченных процессов, в конечном итоге – в тепло), для практических применений эпитаксиальных ФГ плёнок желательно, чтобы H_{cl} была минимальна.

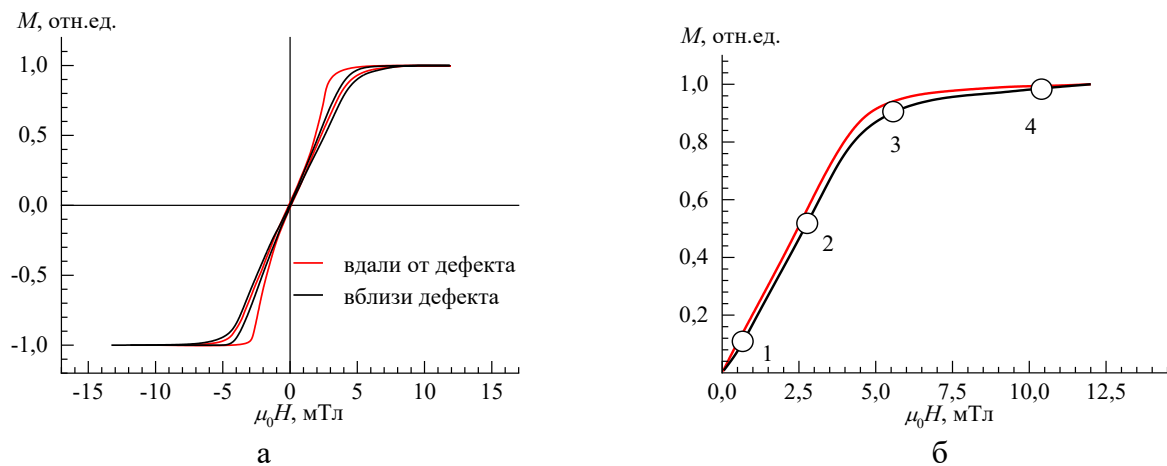


Рис. 1. Предельные петли магнитного гистерезиса плёнки $Bi:FG$ (а), полевые зависимости намагниченности (б), построенные на основе анализа перестройки ДС в постоянном намагничивающем поле.

Регистрируя трансформацию ДС на разных участках плёнки при намагничивании во внешнем магнитном поле, были построены кривые намагничивания, соответствующие полям зрения в окрестности механического дефекта и вдали от него (см. рис. 1 б).

Из этого эксперимента видно, что в области дефекта плёнка намагничивается медленнее в сравнении с бездефектной областью, что обусловлено наличием как поля напряжения вблизи дефекта, так и размагничивающего поля. Дефекты препятствуют смещению доменных границ и тем самым затрудняют перемагничивание. В поле 10 мТл кривая намагничивания выходит в насыщение, что соответствует монодоменному состоянию образца.

На рис. 2 представлены предельные петли гистерезиса для участков плёнки с дефектами, полученными при экспонировании фемтосекундным лазером с плотностью энергии в диапазоне от 200 до 800 Дж/см². Из графиков видно, что воздействие на плёнку лазерным импульсом с плотностью энергии 800 Дж/см² оказывает заметное влияние на магнитные параметры плёнки: увеличивается площадь петли гистерезиса, и численное значение коэрцитивной силы H_{cl} возрастает в 4 раза (с 26 А/м до 114 А/м). Значения остаточной намагниченности очень близки для всех трёх дефектных участков. Необходимо отметить, что после воздействия на плёнку лазерного импульса с плотностью энергии 800 Дж/см² наблюдается прожиг плёнки до подложки.

В разделе 2 описаны результаты исследования процесса перемагничивания ФГ плёнок на дефектных и бездефектных участках посредством фрактального анализа полученных МО изображений.

Полученные экспериментально изображения ДС соответствуют участкам плёнки $Bi:FG$ в окрестности дефекта (рис. 3) и в бездефектной области (рис. 4).

Для каждого снимка лабиринтной ДС был выполнен фрактальный анализ и получено значение ФР D_L , соответствующее конфигурации ДС при перемагничивании по петле гистерезиса в интервале полей $0 \div 0,004$ Тл. На рис. 5 а и 6 а представлены полевые зависимости намагниченности плёнки $M(H)$, полученные на основе анализа перестройки ДС во внешнем поле в окрестности дефекта (см. рис. 5 а) и на произвольном участке (см. рис. 6 а).

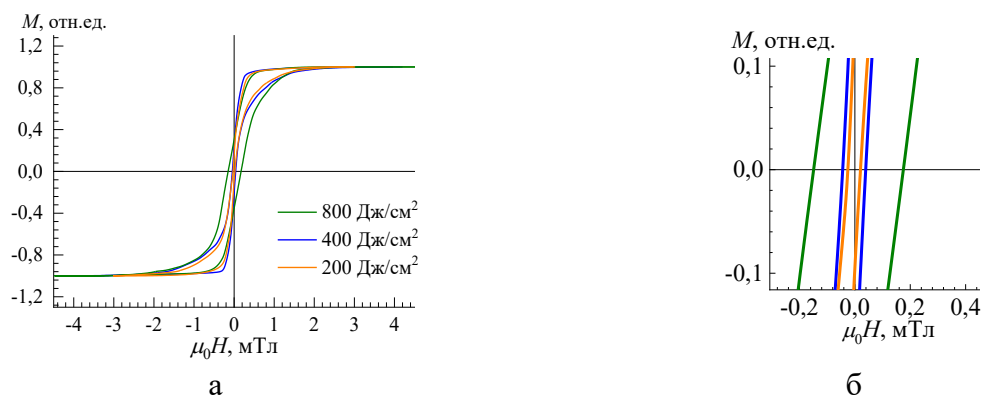


Рис. 2. Предельные петли магнитного гистерезиса дефектных участков плёнки $Bi: \Phi \Gamma$ целиком (а) и увеличенная центральная часть (б).

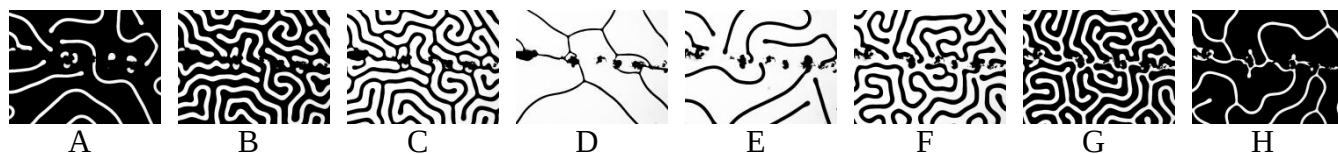


Рис. 3. Трансформация ДС плёнки вблизи механического дефекта плёнки $Bi: \Phi \Gamma$ в полях 0-0.04 Тл. Масштаб микрофотографии 415×310 мкм.



Рис. 4. Трансформация ДС бездефектного участка плёнки $Bi: \Phi \Gamma$ в полях 0-0.04 Тл. Масштаб микрофотографии 415×310 мкм.

Для сопоставления магнитного состояния $Bi: \Phi \Gamma$ плёнки и фрактальных свойств ДС на рис. 5 б и 6 б построены полевые зависимости $D_L(H)$. Графики $D_L(H)$ на рис. 5 б, соответствующие верхней и нижней ветвям петли гистерезиса вблизи дефекта имеют вид куполообразных кривых и могут быть приемлемо аппроксимированы квадратичной функцией.

Поведение полевых зависимостей $D_L(H)$ в окрестности дефекта и на произвольном участке $Bi: \Phi \Gamma$ плёнки различается. Анализ данных, представленных на рис. 6 б, показывает, что зависимости $D_L(H)$ соответствующие верхней и нижней ветвям петли гистерезиса в интервале полей $-0,002$ Тл $\div$ $0,002$ Тл имеют близкие значения D_L , которые варьируются в пределах погрешности. Дальнейшее увеличение поля в любом направлении приводит к быстрому намагничиванию плёнки, уменьшению площади доменов обратного знака и уменьшению значения D_L . Сложный вид полученных на бездефектном участке плёнки зависимостей $D_L(H)$ связан с тем,

что в отсутствие дефектов в выбранном для исследования поле зрения необходимо анализировать не ограниченный участок плёнки, а всю плёнку в целом, так как при перемагничивании домены беспрепятственно смещаются за границы исследуемой области и не попадают в поле зрения микроскопа. Поэтому на бездефектном участке плёнки величина D_L убывает быстрее. Максимальное значение ФР на этом участке плёнки также соответствует размагниченному состоянию.

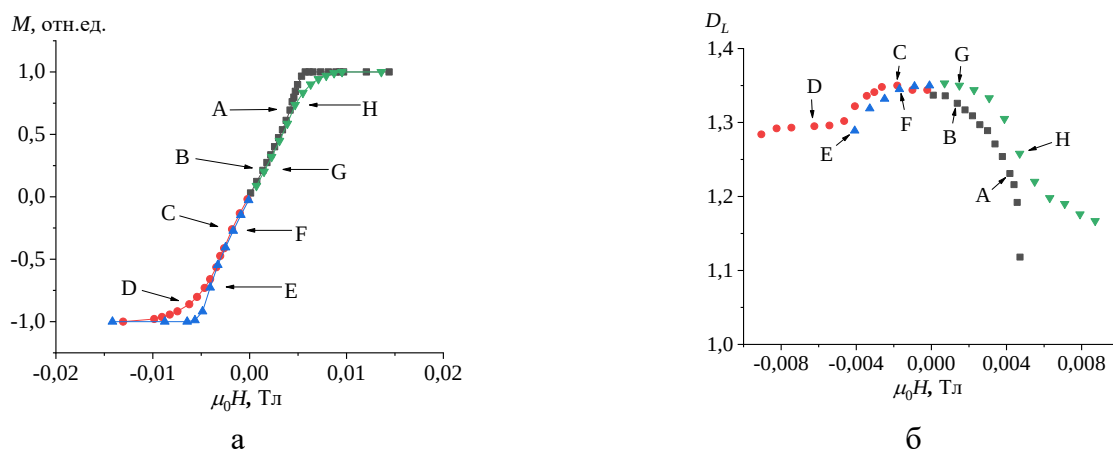


Рис. 5. Предельные петли магнитного гистерезиса плёнки для области с дефектом $Bi:FG$ (а) и полевые зависимости ФР ДС (б). Микрофотографии обозначенных участков на петле гистерезиса представлены на рис. 3. Цветовое обозначение данных и кривых аппроксимации соответствуют следующему изменению внешнего поля: ■ – $H_{max} \rightarrow 0$; ● – $0 \rightarrow H_{min}$; ▲ – $H_{min} \rightarrow 0$; ▼ – $0 \rightarrow H_{max}$.

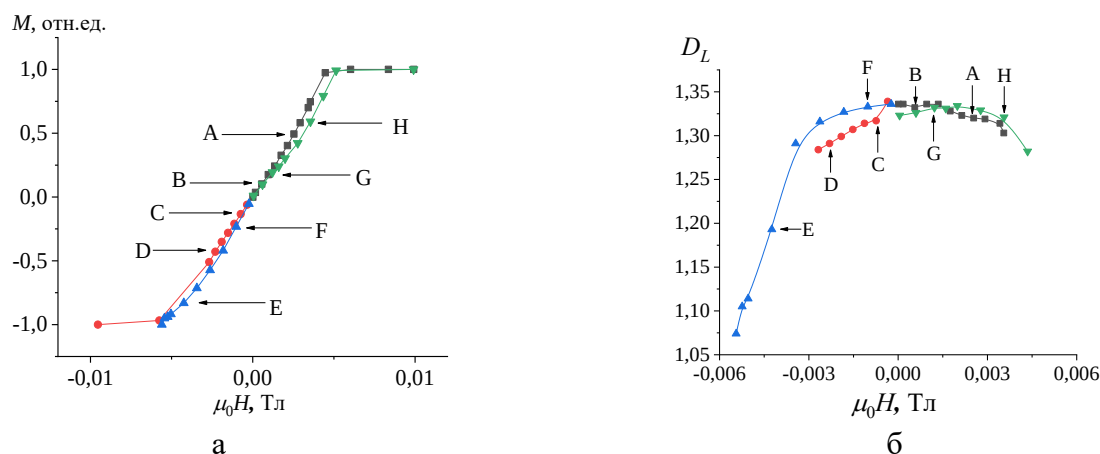


Рис. 6. Предельные петли магнитного гистерезиса плёнки для бездефектной области $Bi:FG$ (а) и полевые зависимости ФР ДС (б). Микрофотографии обозначенных участков на петле гистерезиса представлены на рис. 4. Цветовое обозначение данных и кривых аппроксимации соответствует следующему изменению внешнего поля: ■ – $H_{max} \rightarrow 0$; ● – $0 \rightarrow H_{min}$; ▲ – $H_{min} \rightarrow 0$; ▼ – $0 \rightarrow H_{max}$.

Раздел 3 посвящен описанию результатов исследования поведения ФР ДС на трёх образцах $Bi:FG$ плёнок: $(GdBiLu)_3(FeGa)_5O_{12}$ толщиной 25 мкм, $(GdBiLuSm)_3(FeGa)_5O_{12}$ толщиной 6 мкм и $(GdBi)_3(FeGa)_5O_{12}$ толщиной 42 мкм. Для плёнки $(GdBiLuSm)_3(FeGa)_5O_{12}$ исследовалась также область вблизи ростового дефекта. На основе анализа изображений ДС, полученных при

перемагничивании плёнки во внешнем поле, были построены полевые зависимости намагниченности $M(H)$. Кроме того, с помощью ПО [15(B1)] определены полевые зависимости ФР и отношения приращения относительной намагниченности к приращению внешнего МП.

У плёнки $(GdBiLuSm)_3(FeGa)_5O_{12}$ с наименьшей из исследуемых образцов толщин (6 мкм) зависимость $D_L(H)$ имеет куполообразный вид. На вершине этот график (см. рис. 7 б) испытывает разрыв так как соответствует интервалу петли гистерезиса, соответствующему состоянию насыщения (синие точки, рис. 7 а). Из графика видно, что ветви $D_L(H)$ хорошо аппроксимируются прямыми. На графике $dM(H)/dH$ для удобства представления результатов из-за большого разброса величины по вертикальной шкале используется логарифмическая шкала. Ход зависимости $dM(H)/dH$ в целом коррелирует с формой зависимости $D_L(H)$.

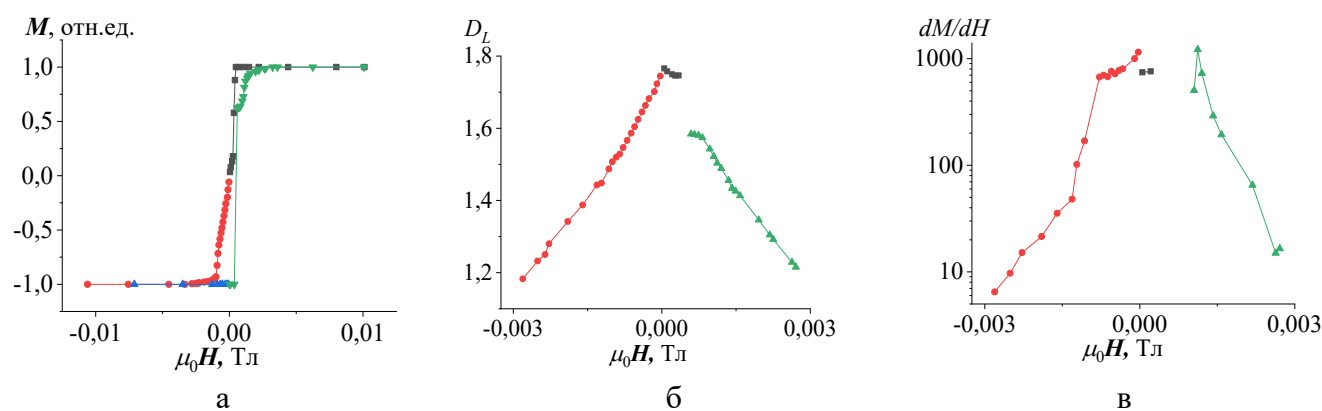


Рис. 7. Предельные петли магнитного гистерезиса (а), полевые зависимости ФР (б) и отношения приращения относительной намагниченности к приращению внешнего МП (в) произвольного участка плёнки $(GdBiLuSm)_3(FeGa)_5O_{12}$ (6 мкм). Здесь и далее цветное обозначение соответствует следующему изменению внешнего МП: ■ – $H_{max} \rightarrow 0$; ● – $0 \rightarrow H_{min}$; ▲ – $-H_{min} \rightarrow 0$; ▼ – $0 \rightarrow H_{max}$. На вкладке (в) на оси ординат используется логарифмический масштаб.

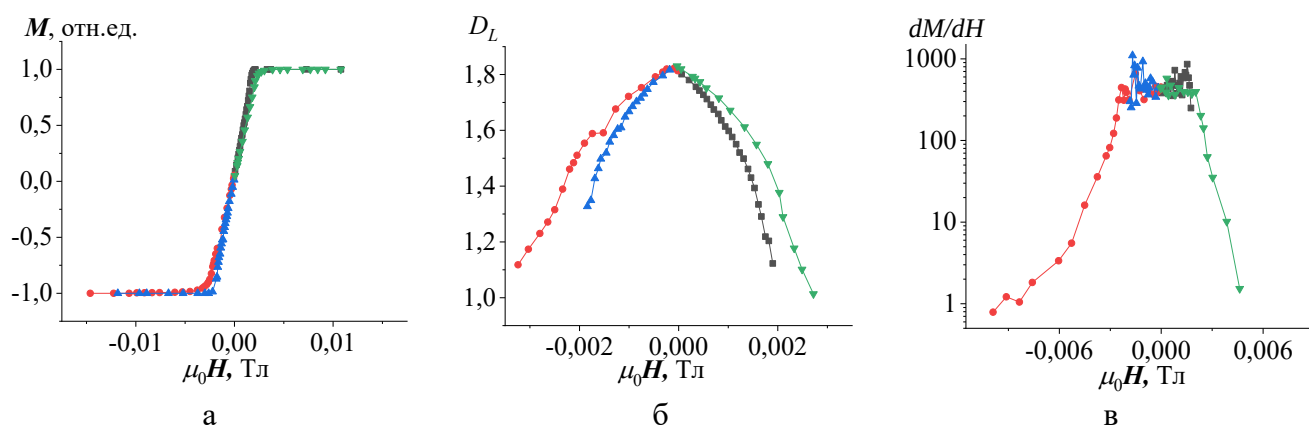


Рис. 8. Предельные петли магнитного гистерезиса (а), полевые зависимости ФР (б) и отношения приращения относительной намагниченности к приращению внешнего МП (в) произвольного участка плёнки $(GdBiLu)_3(FeGa)_5O_{12}$ (25 мкм). На вкладке (в) на оси ординат используется логарифмический масштаб.

Для плёнки $(GdBiLu)_3(FeGa)_5O_{12}$ толщиной 25 мкм форма зависимости $D_L(H)$ заметно отличается – её ветви могут быть аппроксимированы степенной

функцией выше 1 порядка (например, квадратичной, см. рис. 8). Форма зависимости $D_L(H)$ плёнки с самой большой толщиной и составом $(GdBi)_3(FeGa)_5O_{12}$ совпадает с формой для плёнки $(GdBiLuSm)_3(FeGa)_5O_{12}$ (6 мкм). При этом в форме зависимости $dM(H)/dH$ появляется «плато», характерное для небольших значений внешнего поля, при этом его ширина изменяется нелинейным образом с увеличением толщины плёнки. Так, если при толщине 6 мкм плато лежит в диапазоне $\mu_0 H = \pm 0,001$ Тл, то при толщине 25 мкм плато лежит в диапазоне $\mu_0 H = \pm 0,002$ Тл, а при 42 мкм – $\mu_0 H = \pm 0,0015$ Тл. Интересно, что у плёнки $(GdBi)_3(FeGa)_5O_{12}$ (42 мкм) форма зависимости $D_L(H)$ становится похожей на зависимость, представленную на рис. 7. Таким образом, изменяя состав плёнки можно добиваться варьирования диапазона изменения как величины $D_L(H)$, так и $dM(H)/dH$.

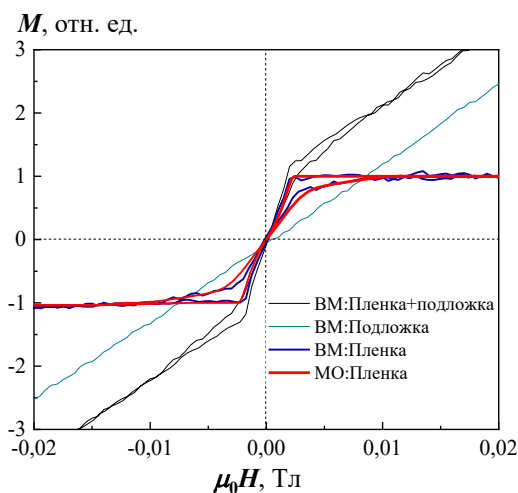


Рис. 9. Предельные петли магнитного гистерезиса для ФГ плёнки $(GdBiLuSm)_3(FeGa)_5O_{12}$, полученные на вибрационном магнитометре и магнитооптическим методом.

На рис. 9 представлены результаты эксперимента по получению предельных петель магнитного гистерезиса ФГ плёнки $(GdBiLuSm)_3(FeGa)_5O_{12}$ двумя независимыми методами. В первом случае измерения были выполнены с помощью вибрационного магнитометра: измерены полевые зависимости намагниченности плёнки на подложке, а также отдельно измерены графики $M(H)$ для плёнки и для подложки. На рис. 9 видно, что зависимость $M(H)$, полученная для плёнки на подложке не достигает насыщения, что объясняется вкладом подложки в процесс перемангничивания. Это подтверждается графиком $M(H)$, измеренным для подложки: видно, что безгистерезисная кривая демонстрирует линейную зависимость намагниченности от внешнего поля, что характерно для парамагнетиков. Вторым методом измерения предельной петли гистерезиса был магнитооптический метод, реализованный на металлографическом микроскопе NEOPHOT 30. Из графика на рис. 9 видно, что петля гистерезиса, полученная магнитооптическим методом (петля гистерезиса, выделенная красным цветом), совпадает с петлёй гистерезиса плёнки без подложки (график синего цвета). Из этого можно сделать вывод, что магнитооптическая магнитометрия позволяет изучать магнитные свойства самой плёнки.

Наличие объёмного дефекта существенным образом меняет ход предельной

петли магнитного гистерезиса, зависимости ФР и отношения приращения относительной намагниченности к приращению внешнего магнитного поля (см. рис. 10). На предельной петле магнитного гистерезиса появляются горизонтальные участки – ступени, которые соответствуют скачкам намагниченности, связанным с наличием центров задержки доменных границ, что приводит к усложнению зависимости $D_L(H)$. Сама зависимость представляет собой пересекающиеся ветви, а также фиксируются МО изображения с высокоразвитым фрактальным «рельефом» (до 1,92). В окрестности дефекта трансформация доменов при перемагничивании существенно отличается от поведения доменов в бездефектной области в одних и тех же намагничивающих или размагничивающих полях. Следствием этого является различный ход полевых зависимостей ФР доменов $D_L(H)$ для разных участков плёнки. Зависимость $dM(H)/dH$ становится немонотонной по причине наличия ступеней у предельной петли магнитного гистерезиса. Наблюдается резкое изменение значений производной намагниченности по полю, которые в отдельных случаях могут коррелировать с изменением величины $D_L(H)$. Диапазон изменения ФР $D_L(H)$ варьируется в широких пределах при изменении толщины плёнок h или наличия объемного дефекта.

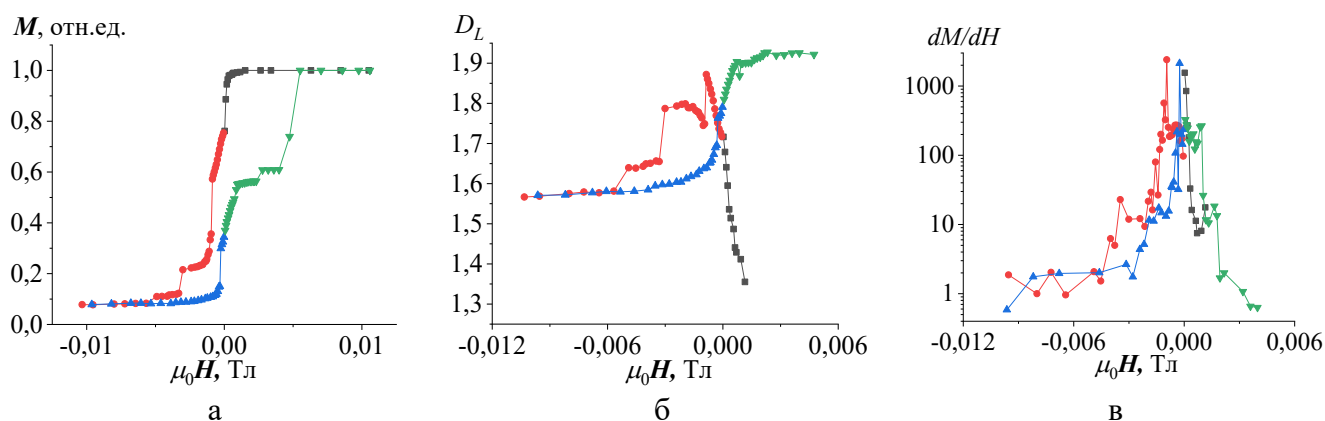


Рис. 10. Предельные петли магнитного гистерезиса (а), зависимости ФР (б) и отношения приращения относительной намагниченности к приращению внешнего МП (в) от величины поля участка плёнки $(GdBiLuSm)_3(FeGa)_5O_{12}$ (6 мкм) в окрестности дефекта. На вкладке (в) на оси ординат используется логарифмический масштаб.

Если верхняя граница диапазона изменения $D_L(H)$ для бездефектных плёнок разной толщины практически не меняется (1,76-1,83), то нижняя граница меняется в широких пределах от нефрактального (значение 1,01) до умеренного (значение 1,32) профиля МО изображений.

Исследования, представленные в разделе 4, посвящены описанию результатов эксперимента по воздействию на постоянные магниты импульсным магнитными полями разной величины и знака с последующей визуализацией полей рассеяния магнита магнитооптической индикаторной плёнкой (МОИП) методом полярного эффекта Керра. В качестве объекта исследования использовался ПМ марки KC37 ($SmCo$). Исследуемый образец имел форму прямоугольного параллелепипеда с размерами сторон $1 \times 1,7 \times 0,5$ мм, его петли гистерезиса $M(H)$ и $B(H)$ приведены на рис. 13. На рис. 11 представлены

изображения полей рассеяния базисной плоскости магнита КС37, полученные средствами МО после воздействия импульсным полем в диапазоне от 0,1 до 1,5 Тл обеих полярностей. Видно, что образец находится в состоянии остаточной намагниченности, так как на изображениях присутствуют области противоположного контраста. На основании МО изображений, полученных после последовательного воздействия импульсного поля, был построен график полевой зависимости $M_{mo}(H)$ (рис. 12 а), который имеет форму петли гистерезиса и график зависимости производной M_{mo} по внешнему полю $dM_{mo}(H)/dH$ (см. рис. 12 б). Анализ полученных МО изображений был выполнен также с применением инструментов фрактальной геометрии. ФР определялась с использованием методики, описанной выше. На рис. 12 в представлена полевая зависимость ФР МО изображений полей рассеяния магнита, зарегистрированных с помощью МОИП после воздействия импульсным полем в диапазоне от 0,1 до 1,5 Тл.

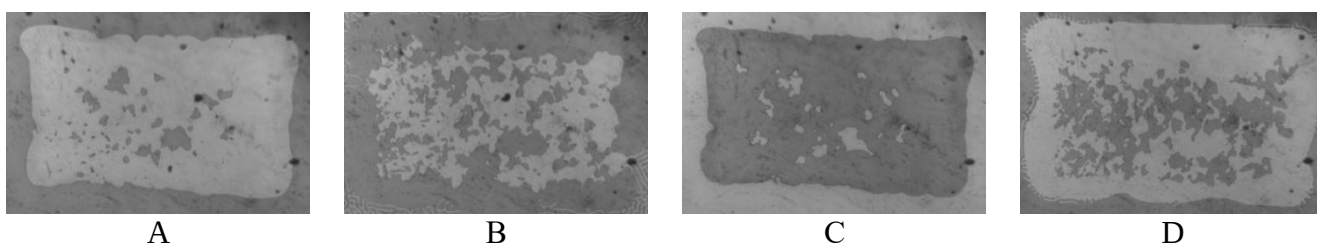


Рис. 11. Микрофотографии постоянного магнита КС37 на $Bi:Fe$ плёнке, полученные после воздействия различных по амплитуде импульсов МП, указанных на рис. 12. Линейные размеры базисной плоскости магнита $1 \times 1,7$ мм.

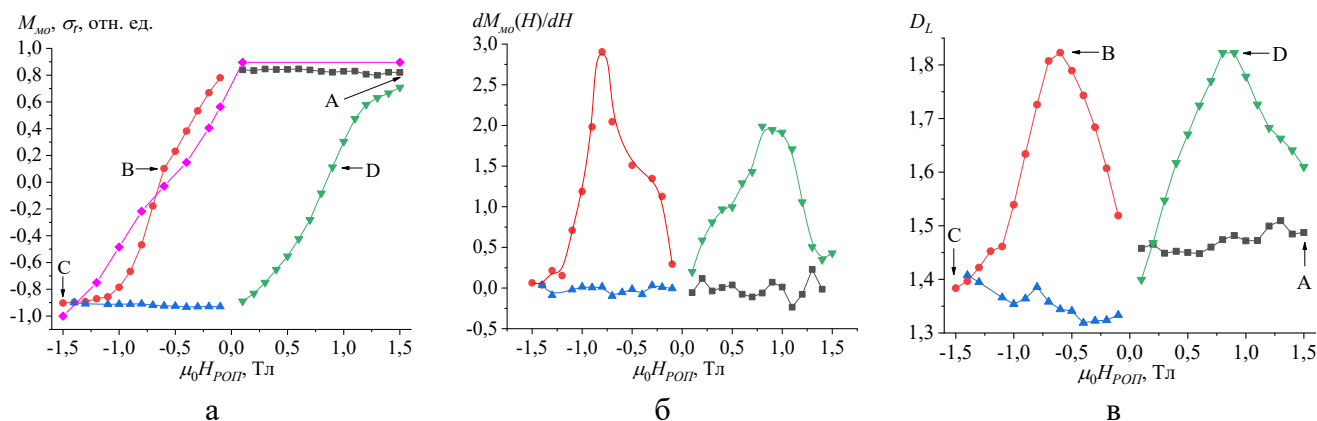


Рис. 12. Зависимость относительной намагниченности, рассчитанной по МО данным $M_{mo}(H)$ (а), производной $dM_{mo}(H)/dH$ (б) и ФР $D_L(H)$ (в) от внешнего импульсного МП. На (а) с помощью $\blacklozenge$ обозначена кривая σ_r , вычисленная по данным, полученным на вибрационном магнитометре. Цветовое обозначение соответствует следующему изменению внешнего импульсного МП: $\blacksquare$ – $H_{max} \rightarrow 0$; $\bullet$ – $0 \rightarrow H_{min}$; $\blacktriangle$ – $H_{min} \rightarrow 0$; $\blacktriangledown$ – $0 \rightarrow H_{max}$.

На рис. 13 представлены данные магнитных измерений, полученные с помощью вибрационного магнитометра в полях до 2,5 Тл. Предельная петля гистерезиса, представляющая собой полевую зависимость удельной намагниченности и построенная по данным вибрационного магнитометра, показана черным цветом (рис. 13 а). Красным цветом выделен график петли гистерезиса, перестроенный с учетом размагничивающего фактора образца N . Здесь же приведена расчетная петля гистерезиса по индукции $B(H)$.

Гистерезисные характеристики соответствуют марке магнита.

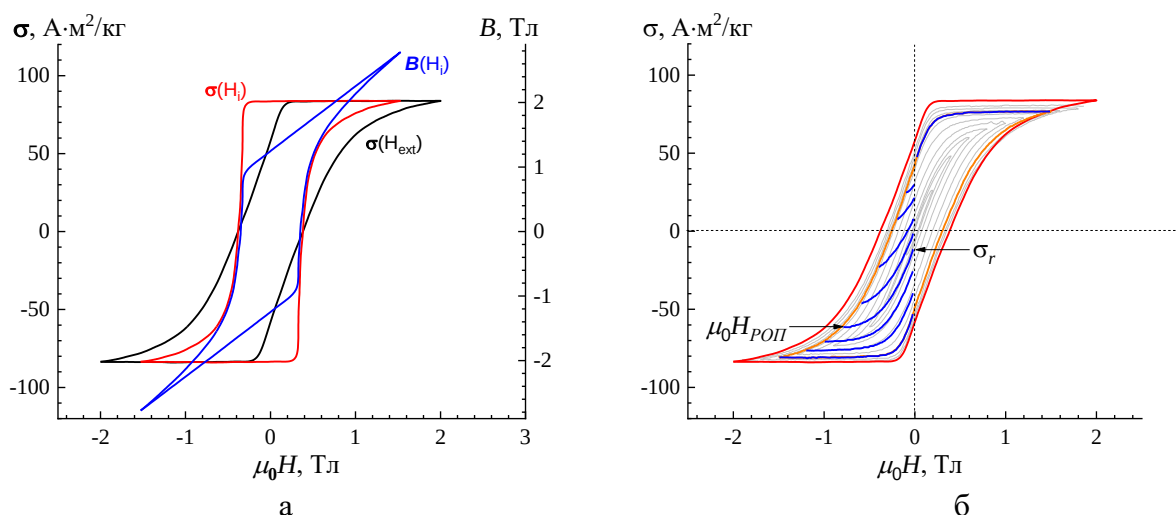


Рис. 13. Предельная петля гистерезиса ПМ КС37 (чёрный цвет), петля гистерезиса, перестроенная с учетом размагничивающего фактора образца (красный цвет), расчетная петля гистерезиса по индукции $B(H)$ (синий цвет) (а); петли гистерезиса и кривые возврата (б), измеренные с помощью вибрационного магнитометра. Для примера стрелками обозначены величина размагничивающего обратного поля (РОП) и остаточная удельная намагниченность, соответствующие значениям на оси абсцисс и ординат на рис. 12 а.

На рис. 13 б показаны петли гистерезиса постоянного магнита КС37, измеренные, в том числе и по частным циклам. Красным цветом выделена предельная петля гистерезиса, измеренная в поле 2,2 Тл. Поскольку МО исследования производились в импульсных полях до 1,5 Тл, то для того, чтобы сопоставить результаты измерений, полученные на вибрационном магнитометре, с данными МО (рис. 12), необходимо было провести измерения на вибрационном магнитометре в тех же условиях. Для этого, образец был предварительно размагничен знакопеременным убывающим по величине магнитным полем с шагом 0,1 Тл.

Из размагниченного состояния ПМ намагничивали в поле 1,5 Тл, после чего измерялась частная петля гистерезиса (на рис. 13 б – график оранжевого цвета). Затем были измерены кривые возврата в размагничивающих полях, величины которых соответствовали значениям импульсных полей в МО эксперименте (графики синего цвета). Из кривых возврата были получены величины остаточной намагниченности σ_r , соответствующие конкретным размагничивающим полям. Для того, чтобы сопоставить значения $M_{мо}$, полученные по результатам МО исследования (рис. 12 а), с результатами измерения остаточной намагниченности по кривым возврата, необходимо нормировать значения σ_r на величину остаточной намагниченности, полученную из частной петли гистерезиса после намагничивания в поле 1,5 Тл. Нормированный график зависимости σ_r от размагничивающего поля показан на рис. 12 а лиловым цветом.

Как видно из рис. 12 а, значения σ_r , измеренные магнитометрическим методом, хорошо коррелируют со значениями $M_{мо}$. Ход графиков зависимости этих величин от размагничивающего поля практически совпадает, что свидетельствует о том, что при анализе процессов перемагничивания магнита

КС37 (1,7×1×0,5 мм) с помощью индикаторной плёнки феррита-граната были получены корректные результаты, описывающие поведение образца в процессе размагничивания.

График зависимости $D_L(H)$ демонстрирует неоднозначную зависимость величины ФР от импульсного поля H при его циклическом изменении. Функция $D_L(H)$ характеризуется экстремумами со значениями ФР равными 1,82, соответствующими размагниченному состоянию образца по обеим ветвям петли гистерезиса (см. рис. 12 а). Минимальное значение ФР составляет 1,32 и соответствует горизонтальным участкам на графике рис. 12 а, т.е. состоянию предельной остаточной намагниченности после воздействия импульсным полем. Следует отметить, что экстремальные участки зависимости $D_L(H)$, соответствующие правой и левой ветвям петли гистерезиса на рис. 12 а, являются симметричными относительно вертикальной оси значений (см. рис. 12 в). Это свидетельствует о том, что несмотря на то, что изображения, полученные МО методом после воздействия положительным или отрицательным импульсным полем на одном и том же участке, различаются, их ФР близки по величине и демонстрируют идентичное поведение при воздействии как возрастающим, так и убывающим импульсным полем.

Таким образом ФР, полученная на основе МО изображений полей рассеяния ПМ после воздействия импульсным полем, отражает процессы его перемагничивания, демонстрируя гистерезис. Следовательно, наблюдается соответствие между магнитным состоянием магнитного материала (остаточной намагниченностью) и ФР МО изображений его полей рассеяния, полученных с помощью индикаторной $Bi:ФГ$ плёнки.

Визуальный анализ показывает, что форма отдельных участков графиков (соответствующих одинаковому изменению внешнего поля) как первой производной остаточной намагниченности по величине внешнего импульсного поля, так и для ФР профиля соответствующих МО изображений совпадает.

Вместе с тем, есть отдельные отличительные особенности в графиках, приведённых на рис. 12. В частности, можно отметить разную величину пиков производных $dM_{MO}(H)/dH$ (участки $\bullet - 0 \rightarrow H_{min}$; $\blacktriangledown - 0 \rightarrow H_{max}$) и наоборот практически одинаковое значение (участки $\blacksquare - H_{max} \rightarrow 0$; $\blacktriangle - H_{min} \rightarrow 0$) по сравнению с аналогичными зависимостями ФР профиля $D_L(H)$.

В разделе 5 представлены результаты экспериментов по перемагничиванию ПМ N35 в импульсном поле, в ходе которого были получены две серии МО изображений. Исследуемый образец имел форму цилиндра ($h = 1$ мм, $r = 1$ мм). При этом ось текстуры ПМ ориентирована вдоль образующей цилиндра, его петли гистерезиса $M(H)$ и $B(H)$ приведены на рис. 15. В первом эксперименте (первая методика размагничивания) на намагниченный до насыщения ПМ последовательно воздействовали нарастающими по величине импульсами МП противоположного направления. После каждого размагничивающего импульса регистрировалось МО изображение образца, формируемое индикаторной плёнкой. Во втором эксперименте (вторая методика размагничивания) магнит

каждый раз намагничивался до насыщения импульсным полем и только после этого подвергался воздействию размагничивающего поля противоположного направления. Таким образом, в этом случае исходным состоянием ПМ перед каждым воздействием было состояние насыщения. После каждого размагничивающего импульса состояние магнита также фиксировалось.

На рис. 14 приведены графики полевых зависимостей M_{mo} и соответствующие им зависимости ФР ПМ N35. В пределах каждой ветви петли гистерезиса $M_{mo}(H)$ ФР D_L имеет экстремум вблизи коэрцитивного поля, что согласуется с описанными выше результатами.

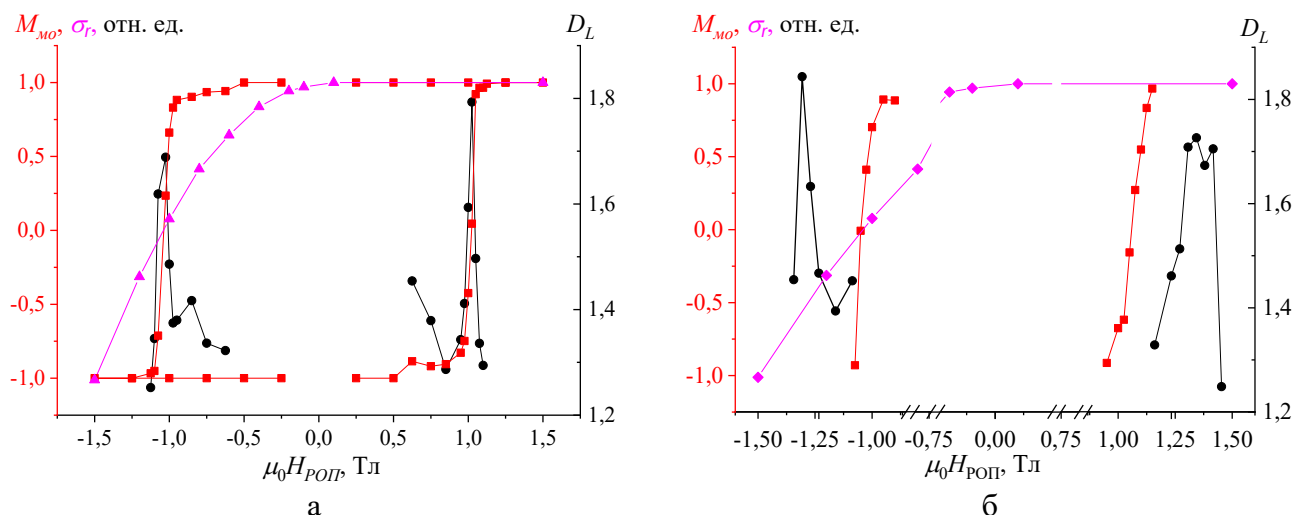


Рис. 14. Зависимости относительной намагниченности ПМ N35, рассчитанной по МО данным $M_{mo}(H)$ (значения отмечены красными ■), и ФР профиля $D_L(H)$ (значения отмечены чёрными ●) от величины импульсного МП при последовательном изменении величины импульса (а) и при воздействии импульсами различной величины из насыщения (б). С помощью ♦ обозначены расчетные значения по данным, полученным на вибрационном магнитометре.

На рис. 15 представлены данные магнитных измерений, полученные с помощью вибрационного магнитометра в полях до 2,5 Тл. Методика сопоставления результатов измерений, представленных на рис. 15 (а) с данными, полученными из МО эксперимента, подробно описана в п. 3.4.

Отличие хода графиков зависимости σ_r и M_{mo} от размагничивающего поля (см. рис. 14 а) связано с тем, что при МО исследовании образца N35, регистрировался вклад в основном от поверхности магнита, в то время как данные, полученные с помощью вибрационного магнитометра, отражают процесс перемагничивания всего образца. Тем не менее, значение обратного поля, после воздействия которого достигается размагниченное состояние ПМ, по данным МО совпадает с величиной, полученной в ходе магнитных измерений с помощью вибрационного магнитометра.

Таким образом, на примере ПМ N35, как и ранее в случае ПМ KC37, получены данные, позволяющие утверждать о наличии корреляции между закономерностями поведения зависимости остаточной намагниченности от величины внешнего импульсного поля и величины ФР, соответствующих им МО изображений. Учитывая, что магниты N35 и KC37 характеризуются разными

механизмами перемагничивания, полученный результат позволяет допустить применение описанного способа фрактального анализа к широкому классу ПМ.

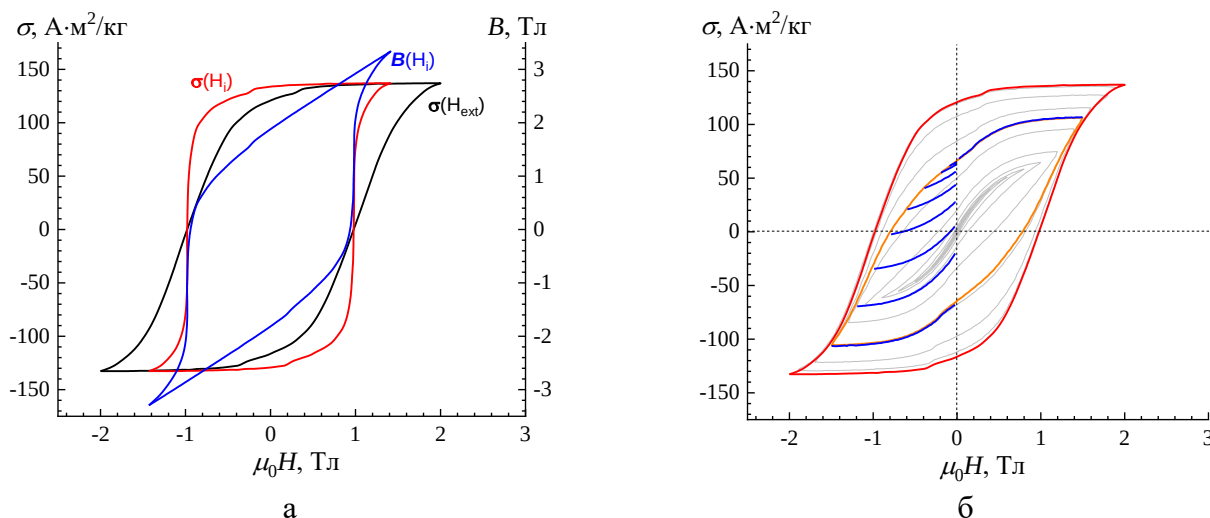


Рис. 15. Предельная петля гистерезиса (чёрный цвет), петля гистерезиса, перестроенная с учетом размагничивающего фактора образца N35 (красный цвет), расчетная петля гистерезиса по индукции $B(H)$ (синий цвет) (а) и петли гистерезиса, измеренные в том числе и по частным циклам (б), ПМ N35, полученные с помощью вибрационного магнитометра.

Методика исследований, описанная в п. 3.4 и 3.5 диссертации, была также применена для магнитотвердого феррита марки Y25 и сплава $AlNiCo$ марки LNG40 [A8]. Таким образом, на примере различных постоянных магнитов (барий/стронциевый феррит, сплав $AlNiCo$, спеченные магниты $NdFeB$ и $SmCo$) установлена взаимосвязь между изменением магнитного состояния магнитного материала (остаточной намагниченностью) и фрактальной размерностью магнитооптических изображений полей рассеяния его базисной поверхности.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Рассмотрено влияние объёмных дефектов, связанных с локальным механическим повреждением и термическим лазерным воздействием, на доменную структуру и магнитные характеристики эпитаксиальных висмутсодержащих феррит-гранатовых плёнок. Установлено, что одноосные висмутсодержащие феррит-гранатовые плёнки при перемагничивании устойчивы к объёмным дефектам, нанесенным пирамидальным индентором, линейный размер которых не превышает ширину доменов плёнки. Воздействие лазерным импульсом с плотностью энергии в диапазоне $200-800 \text{ Дж/см}^2$ приводит к увеличению коэрцитивной силы локального участка плёнки.

2. Определена фрактальная размерность изображений доменной структуры висмутсодержащих феррит-гранатовых плёнок, соответствующих разным участкам предельной петли магнитного гистерезиса. Полученные результаты позволяют говорить о наличии взаимосвязи между значением результирующей намагниченности и значением фрактальной размерности их доменной структуры для эпитаксиальных висмутсодержащих феррит-гранатовых плёнок.

3. Получены диапазоны изменения фрактальной размерности магнитооптических изображений доменной структуры висмутсодержащих

феррит-гранатовых плёнок различных стехиометрических составов и толщин: верхняя граница диапазона изменения фрактальной размерности соответствует значениям 1,76-1,83, а нижняя граница – 1,01-1,32. Проанализировано взаимное поведение полевых зависимостей фрактальной размерности и первой производной намагниченности по полю $dM(H)/dH$. Установлены характерные особенности поведения первой производной намагниченности по полю $dM(H)/dH$ для дефектных и бездефектных участков плёнок.

4. Представлены результаты фрактального анализа изображений полей рассеяния постоянного магнита КС37, полученных методом полярного эффекта Керра с помощью индикаторной висмутсодержащей феррит-гранатовой плёнки после перемагничивания импульсным полем 0,1 - 1,5 Тл. Установлено, что полевые зависимости фрактальной размерности магнитооптических изображений полей рассеяния магнита по форме совпадают с графиками первой производной M_{mo} по полю dM_{mo}/dH , т.е. существует взаимосвязь между характером изменения намагниченности после воздействия импульсного поля и видом магнитооптического изображения, анализируемого с использованием аппарата фрактальной геометрии.

5. Представлены результаты фрактального анализа изображений полей рассеяния постоянного магнита $NdFeB$ (марки N35), полученных методом полярного эффекта Керра, с помощью индикаторной висмутсодержащей феррит-гранатовой плёнки после перемагничивания импульсным полем 0,1 – 2 Тл. Предложено совместно использовать две различные методики изменения магнитного поля: (I) однократное насыщение с последующим дискретным изменением величины размагничивающего импульсного поля и (II) намагничивание до насыщения перед каждым воздействием размагничивающего импульсного поля. Установлена корреляция полевых зависимостей фрактальной размерности магнитооптических изображений полей рассеяния магнита $D_L(H)$ и соответствующих зависимостей $M_{mo}(H)$. Для постоянных магнитов (КС37 и N35) в размагниченном состоянии фрактальная размерность максимальна и составляет 1,82, а в состояниях остаточной намагниченности значение фрактальной размерности варьируется в диапазоне 1,24-1,32.

6. Результаты исследования процессов перемагничивания постоянных магнитов средствами магнитооптики с помощью индикаторной висмутсодержащей феррит-гранатовой плёнки коррелируют с данными магнитных измерений, полученных с помощью вибрационного магнитометра. Значение обратного поля, после воздействия которого достигается размагниченное состояние постоянного магнита, по данным магнитооптики совпадает с величиной, полученной в ходе магнитных измерений на вибрационном магнитометре.

Статьи по теме диссертации из перечня ВАК или индексируемые в МБД Web of Science или Scopus:

А1. Иванова А.И. Семенова Е.М., Дунаева Г.Г., Овчаренко С.В., Третьяков С.А.,

Зигерт А.Д. Влияние дефектов на магнитные характеристики феррит-гранатовых пленок // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2020. – Вып. 12. – С. 103-112.

А2. Зигерт А.Д., Дунаева Г.Г., Сдобняков Н.Ю. Фрактальный анализ лабиринтной доменной структуры феррит-гранатовых пленок в процессе перемангничивания // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2021. – Вып. 13. – С. 134-145.

А3. Зигерт А.Д., Семенова Е.М., Кузьмин Н.Б., Сдобняков Н.Ю. Фрактальный анализ магнитооптических изображений поверхности магнита после воздействия импульсным полем // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2022. – Вып. 14. – С. 101-107.

А4. Zigert A.D., Dunaeva G.G., Semenova E.M., Ivanova A.I., Karpenkov A.Yu., Sdobnyakov N.Yu. Fractal dimension behaviour of maze domain pattern in ferrite-garnet films during magnetisation reversal // Journal of Superconductivity and Novel Magnetism. 2022. – V. 35. – I. 8. – P. 2187-2193.

А5. Зигерт А.Д., Кузьмин Н.Б., Сдобняков Н.Ю., Иванова А.И., Дунаева Г.Г., Семенова Е.М. Фрактальный анализ магнитооптической визуализации перемангничивания постоянного магнита в импульсном поле // Известия РАН. Серия физическая. – 2023. – Т. 87. – № 10. – С. 1385-1388. (**Zigert A.D., Kuz'min N.B., Sdobnyakov N.Yu., Ivanova A.I., Dunaeva G.G., Semenova E.M.** Fractal analysis of magneto-optical visualization of the remagnetization of a permanent magnet in a pulsed field // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2023. – V. 87. – No. 10. – P. 1421-1424).

А6. Зигерт А.Д., Дунаева Г.Г., Кузьмин Н.Б., Семенова Е.М., Сдобняков Н.Ю. Поведение фрактальной размерности доменных структур в феррит-гранатовых пленках // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2023. – Вып. 15. – С. 97-107.

А7. Зигерт А.Д., Кузьмин Н.Б., Семенова Е.М., Иванова А.И., Третьяков С.А., Сдобняков Н.Ю. Закономерности изменения фрактальной размерности магнитооптических изображений магнитов после воздействия импульсным полем // Физика твердого тела. – 2023. – Т. 65. – Вып. 15. – С. 2121-2124. (**Zigert A.D., Kuz'min N.B., Semenova E.M., Ivanova A.I., Tretyakov S.A., Sdobnyakov N.Yu.** Patterns of the fractal dimension evolution of magneto-optical images of magnets after exposure to a pulsed field // Physics of the Solid State. – 2023. – V. 65. – I. 12. – P. 2037-2039).

А8. Зигерт А.Д., Кузьмин Н.Б., Семенова Е.М., Карпенков А.Ю., Иванова А.И., Сдобняков Н.Ю. Корреляция магнитных характеристик и фрактальной размерности магнитооптических изображений постоянных магнитов // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2024. – Вып. 16. – С. 119-127.

Свидетельства о регистрации программ на ЭВМ:

В1. Свидетельство № 2023660111 Российская Федерация. Fractal domains Pro: программа анализа 2D микрофотографий поверхности и определения ее

фрактальной размерности / Н.Ю. Сдобняков, В.А. Анофриев, **А.Д. Зигерт**, Н.Б. Кузьмин; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тверской государственный университет». – № 2023617714; заявл. 26.04.2023; зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 17.05.2023. – [1] с.

Список цитируемой литературы:

1. **Третьяков, Ю.Д.** Процессы самоорганизации в химии материалов / Ю.Д. Третьяков // Успехи химии. – 2003. – Т. 72. – №. 8. – С. 731-763.
2. **Комогорцев, С.В.** Влияние фрактальной размерности на кривую намагничивания обменно-связанного кластера магнитных наночастиц / С.В. Комогорцев, Р.С. Исхаков, В.А. Фельк // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2019. – Т. 155. – №. 5. – С. 886-893.
3. **Lee, K.S.** Fractal dimension of magnetic domain walls in CoFe/Pt multilayers / K.S. Lee, D.H. Kim, S.B. Choe // Journal of Magnetism. – 2010. – V. 15. – I. 3. – P. 99-102.
4. **Kim, D.-H.** Correlation between fractal dimension and reversal behavior of magnetic domain in Co/Pd nanomultilayers / D.-H. Kim, Y.-C. Cho, S.-B. Choe, S.-C. Shin // Applied Physics Letters. – 2003. – V. 82. – I. 21. – P. 3698-3700.
5. **Polyakova, O.P.** Remagnetization of a fractal magnetic structure / O.P. Polyakova, M.L. Akimova, P.A. Polyakova // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2020. – V. 84. – I. 2. – P. 166-168.
6. **Dubinko, S.V.** Features of the coercivity of strained epitaxial garnet ferrite films / S.V. Dubinko, A.S. Nedviga, V.G. Vishnevskii, et al. // Technical Physics Letters. – 2005. – V. 31. – I. 11. – P. 979-981.
7. **Coey, J.M.D.** Perspective and prospects for rare earth permanent magnets / J.M.D. Coey // Engineering. – 2020. – V. 6. – I. 2. – P. 119-131.
8. **Fiorillo, F.** Measurements of magnetic materials / F. Fiorillo // Metrologia. – 2010. – V. 47. – № 2. – P. S114-S142.
9. **Bathany, C.** Morphogenesis of maze-like magnetic domains / C. Bathany, M.L. Romancer, J.N. Armstrong, H.D. Chopra // Physical Review B. – 2010. – V. 82. – I. 18. – P. 184411-1-184411-14.
10. **Ivanova, A.I.** Specific features of magnetic domain structure in epitaxial magneto-optical ferrite-garnet films / A.I. Ivanova, E.M. Semenova, M.K. Virchenko // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Functional Materials and Nanotechnologies (FM&NT 2018), 2-5 October 2018, Riga, Latvia. – 2019. – V. 503. – Art. № 012014. – 4 p.
11. **Gerasimov, M.V.** Time evolution of domain-wall motion induced by nanosecond laser pulses / M.V. Gerasimov, M.V. Logunov, A.V. Spirin, Y.N. Nozdrin, I.D. Tokman // Physical Review B. – 2016. – V. 94. – I. 1. – P. 014434-1-014434-9.
12. **Кандаурова, Г.С.** Новые явления в низкочастотной динамике коллектива магнитных доменов / Г.С. Кандаурова // Успехи физических наук. – 2002. – Т. 172 – № 10. – С. 1165-1187.

13. **Хмелевская, В.С.** Фрактальные структуры в металлических материалах после ионного облучения и лазерного воздействия / В.С. Хмелевская, Н.В. Куликова, В.В. Бондаренко // Письма в Журнал технической физики. – 2005. – Т. 31. – Вып. 14. – С. 77-82.
14. **Лисовский, Ф.В.** Термодинамически устойчивые фракталоподобные доменные структуры в магнитных пленках / Ф.В. Лисовский, Л.И. Лукашевич, Е.Г. Мансветова // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2004. – Т. 79. – Вып. 7. – С. 432-435.
15. **Свидетельство № 2023660111 Российская Федерация.** Fractal domains Pro: программа анализа 2D микрофотографий поверхности и определения ее фрактальной размерности / Н.Ю. Сдобняков, В.А. Анофриев, А.Д. Зигерт, Н.Б. Кузьмин; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тверской государственный университет». – № 2023617714; заявл. 26.04.2023; зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 17.05.2023. – [1] с.
16. **Xing, Y.** Correlation between anisotropic fractal dimension of fracture surface and coercivity for Nd-Fe-B permanent magnets / Y. Xing, Q. Sun, M. Zhu et al. // Journal of Materials Research and Technology. – 2021. – V. 15. – P. 745-753.
17. **Douketis, C.** Fractal character of cold-deposited silver films determined by low-temperature scanning tunneling microscopy / C. Douketis, Z. Wang, T.L. Haslett, M. Moskovits // Physical Review B. – 1995. – V. 51. – I. 16. – P. 11022-11031.
18. **Zahn, W.** The dependence of fractal dimension on measuring conditions of scanning probe microscopy / W. Zahn, A. Zösch // Frequencies Journal of Analytical Chemistry. – 1999. – V. 365. – I. 1-3. – P. 168-172.
19. Gwyddion – Free SPM (AFM, SNOM/NSOM, STM, MFM, ...) data analysis software. – Режим доступа: [www.url: http://gwyddion.net](http://gwyddion.net). – 15.09.2023.
20. Image Analysis P9. Руководство пользователя. – М.: НТ-МДТ СИ, 2019. – 582 с.