

УДК 537.624

Оригинальная статья

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

ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»
170100, Россия, Тверская область, Тверь, ул. Желябова, 33
Karpenkov.AY@tversu.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.096

Аннотация: В настоящей работе представлены результаты комплексных исследований, включающих прямой эксперимент и компьютерное моделирование, процессов перемагничивания монокристаллического образца $SmCo_5$ и феррит-гранатовой пленки $(GdBiLu)_3(FeGa)_5O_{12}$. Анализ изображений доменной структуры во внешнем магнитном поле обоих образцов позволил построить полевые зависимости намагниченности. Установлено, что полевая зависимость намагниченности феррит-гранатовой пленки совпадает с данными магнитометрии. Для монокристалла $SmCo_5$ поле насыщения поверхности соответствует полю насыщения, полученному из данных измерений на магнитометре, однако ход полевой зависимости $M(H)$ отличается. Анализ изображений основных доменов монокристалла $SmCo_5$ во внешнем магнитном поле и компьютерное моделирование показали, что значения полей исчезновения доменной структуры на поверхности пленки, расположенной над монокристаллическим образцом, значительно меньше полей насыщения по данным магнитометрии. Приложение внешнего магнитного поля 0,02 Тл приводит к насыщению всего объема феррит-гранатовой пленки в направлении поля, что не позволяет в дальнейшем наблюдать трансформацию основной доменной структуры объемного образца и ограничивает применимость метода индикаторной пленки.

Ключевые слова: феррит-гранатовая пленка, монокристалл, магнитная доменная структура, эффект Керра, процессы перемагничивания.

1. Введение

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 $SmCo_5$, Sm_2Co_{17}), $Nd-Fe-B$ - магниты (соединение $Nd_2Fe_{14}B$).

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 [4-7]. 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. В таких магнитах размагничивание зерен матричной фазы размером 2-20 мкм инициируется внутри примыкающего к поверхности небольшого зародышевого объема, где происходит перемагничивание за счет тепловых флуктуаций или под действием внутреннего магнитного поля противоположного направления. 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.

Помимо магнитотвердых объемных материалов, для дальнейшего развития электроники необходим непрерывный прогресс и углубление научных знаний в области пленочного материаловедения. Электроника сейчас достигла своего предела в области миниатюризации, и в данный момент идёт активный поиск альтернативных технологий и материалов. Особый интерес в последнее десятилетие представляют тонкие магнитные пленки (ТМП), которые обладают сильной перпендикулярной магнитной анизотропией (ПМА) из-за их возможного применения в магнитной записи следующего поколения, магнитооптической записи и структурированных средах [8].

Процессы перемагничивания магнитных материалов во многом зависят от свойств их доменной структуры (ДС) [9]. 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). При этом анализ перестройки во внешнем поле ДС структуры важен для дальнейшего понимания взаимосвязи процессов намагничивания - размагничивания с микроструктурой и магнитной анизотропией в магнитных материалах [9].

В данной работе для оценки эффективности и границ применимости магнитооптических методов исследования процессов перемагничивания магнитоодноосных материалов нами проведены прямые эксперименты по

наблюдению доменной структуры магнетиков во внешнем изменяющемся поле и компьютерное моделирование.

2. Объекты и методы исследования

В качестве объектов исследования были выбраны одноосные материалы - монокристалл соединения $SmCo_5$ и висмут-содержащая феррит-гранатовая (ФГ) пленка $(GdBiLu)_3(FeGa)_5O_{12}$.

Для выращивания монокристаллов $SmCo_5$ стехиометрические слитки массой 50 г были завернуты в танталовую фольгу, запаяны в кварцевую трубку, из которой перед запаиванием был откачан воздух, и отожжены в резистивной печи при температуре 1323 К в течение 15 дней. На завершающем этапе термической обработки образец подвергался закалки в воде. Из отожженных слитков $SmCo_5$ были извлечены монокристаллические зерна размером 2-3 мм.

Исследуемая пленка ФГ с химическим составом $(GdBiLu)_3(FeGa)_5O_{12}$ была получена в Крымском федеральном университете им. В.И. Вернадского. Согласно данным производителей, толщина пленки варьируется от 4 до 6 мкм, намагниченность насыщения $I_s \approx 135 \cdot 10^3$ А/м.

Оба образца характеризуются магнитокристаллической анизотропией типа «легкая ось», поэтому значение полярного эффекта Керра максимально по сравнению с экваториальным или меридиональным типами [9, 10].

Исследования трансформации доменной структуры в магнитном поле проводились с помощью программно-аппаратного комплекса, реализованного на базе оптического металлографического микроскопа Neophot-30, использующего в качестве метода наблюдения ДС полярный эффект Керра. Подробное описание установки представлено в работе [11].

Исследования удельной намагниченности образцов проводились в разомкнутой магнитной цепи с помощью автоматизированного вибрационного магнитометра.

Расчёты магнитостатических полей объектов исследования производились с помощью программы COMSOL Multyphysics с использованием физического интерфейса статического магнитного поля.

3. Экспериментальные результаты и обсуждение

3.1. Исследование процессов перемагничивания магнетиков посредством анализа трансформации доменной структуры

На рис. 1 а - в представлены микрофотографии поверхностной доменной структуры соединения $SmCo_5$ во внешнем изменяющемся магнитном поле. При приложении магнитного поля на первом этапе

разветвленные домены трансформируются в структуру кольцевых доменов с различными значениями внешнего R_{ext} и внутреннего радиуса R_{int} . Последующее увеличение внешнего поля приводит к исчезновению кольцевых доменов, при этом наблюдается три возможных варианта: 1) сужение кольца ($R_{ext} \downarrow$ и $R_{int} \downarrow$); 2) обе стенки кольца достигают друг друга ($(R_{ext} - R_{int}) \downarrow 0$); коллапс кольца (при конечных значениях R_{ext} и R_{int}). Наличие центров задержки смещения доменных границ на поверхности монокристалла приводит в ряде случаев к «разрушению» узких колец. Необходимо отметить, что описанная структура и поведение доменов наблюдалось в магнитных пленках толщиной несколько мкм [9].

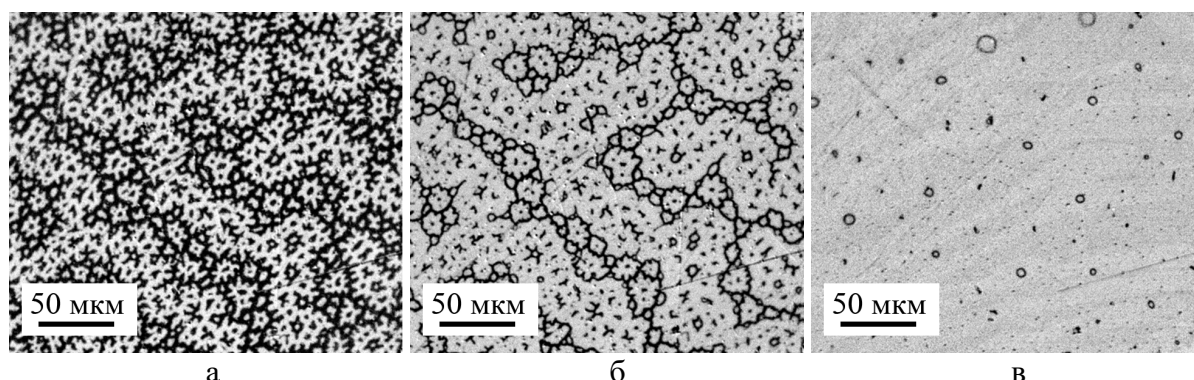


Рис. 1. Секвенция изображений поверхностной доменной структуры на базисной плоскости монокристалла $SmCo_5$ во внешнем магнитном поле: а – 0 мТл, б – 840 мТл, в – 1200 мТл.

Аналогичный эксперимент был проведен и для Bi -содержащей ФГ-пленки $(GdBiLu)_3(FeGa)_5O_{12}$. Микрофотографии доменной структуры при разных значениях внешнего магнитного поля представлены на рис. 2 а - в.

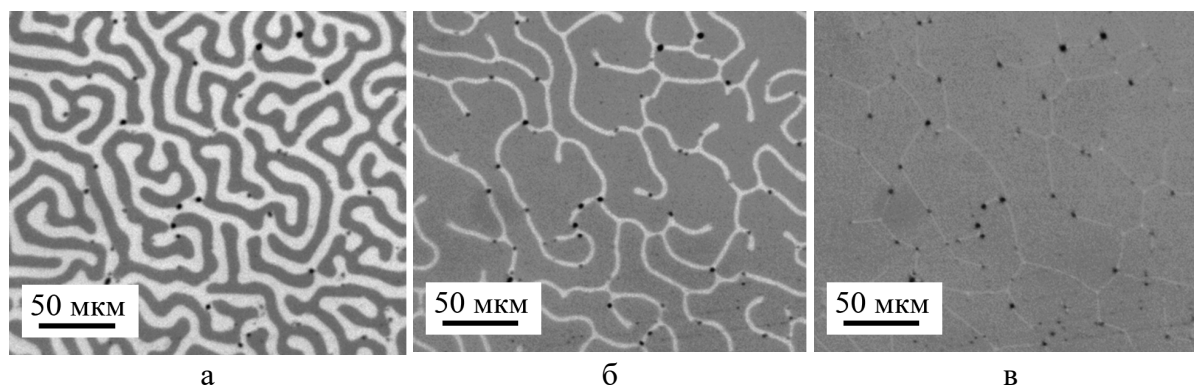


Рис. 2. Секвенция изображений выявленной доменной структуры плёнки $(GdBiLu)_3(FeGa)_5O_{12}$ во внешнем магнитном поле: а – 0 мТл, б – 2,1 мТл, в – 7 мТл.

В дальнейшем по изображениям трансформации ДС обоих образцов

были построены кривые намагничивания (см. рис. 3 а,б). Принцип анализа ДС заключается в определении соотношения площадей картин распределения доменов с противоположной ориентацией результирующего магнитного момента. Поскольку при увеличении внешнего магнитного поля происходит рост доменов с ориентацией вектора намагниченности «вверх» за счет уменьшения доменов с ориентацией «вниз», то будет изменяться и количественное соотношение пикселей, относящихся к каждому из доменов. На кафедре физики конденсированного состояния было написано программное обеспечение [12], которое позволяет по цветовому оттенку пикселей микрофотографии или пороговому значению бинарного изображения (метод Оцу [13]) строить кривую намагничивания и петлю гистерезиса магнитного материала [9].

На рис. 3 а, б представлены кривые намагничивания обоих образцов, рассчитанные на основе изображений (красные кривые), а так же результаты измерений на вибрационном магнитометре. Необходимо отметить, что в обоих экспериментальных методиках использовались одни и те же образцы, чтобы исключить влияние собственных полей рассеивания.

На полученной зависимости намагниченности для пленки $(\text{GdBiLu})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$, представленной на рис. 3 а красной кривой, можно пронаблюдать излом, который свидетельствует о смене определяющего механизма процесса перемагничивания: во внешнем магнитном поле 0-4 мТл намагничивание осуществляется за счет смещения доменных границ, далее – за счет вращения вектора намагниченности. Об этом свидетельствует снижение оптического контраста (см. рис. 2 в).

На рис. 3 а черной пунктирной кривой представлена полевая зависимость намагниченности пленки с подложкой, которая не совпадает с красной, ранее описанной, зависимостью. Результаты магнитометрии показали отсутствие насыщения исходного образца вплоть до полей 1,5 Тл. В дальнейшем были проведены отдельные исследования намагниченности подложки, для этого с образца был предварительно сошлифован верхний слой. Кривая намагниченности подложки (см. рис. 3 а, серая пунктирная зависимость) имеет вид наклонной прямой, соответствующей парамагнитному состоянию, и была в дальнейшем вычтена из первичного сигнала (см. рис. 3 а, черная кривая). Полученная зависимость намагниченности материала пленки методом вибрационного магнитометра (см. рис. 3 а, синяя кривая) в точности соответствует кривой магнитооптических исследований (см. рис. 3 а, красная кривая). Таким образом установлено, что в случае исследований тонкопленочных образцов, имеющих только основные (сквозные) домены,

магнитооптические исследования позволяют дать достоверные данные о процессах перемагничивания всего образца в целом.

В случае монокристалла $SmCo_5$ в форме шарового сегмента, поле насыщения всего образца по данным магнитометрии и по данным трансформации ДС на поверхности составило 0,5 Тл (см. рис. 3 б, синяя и красная кривые соответственно). Хорошо видно, что вид зависимостей $M(H)$ отличается. В случае использования вибрационного магнитометра основное измерение совершается посредством колебания образца вблизи измерительных катушек и синхронному определению индуцированного напряжения. Тем самым намагниченность измеряется интегрально со всего объема образца, пропорционально его массе. При анализе поверхности снимается конфигурация замыкающих доменов, формируемых с учетом размагничивающего поля образца, которое сильно отличается на сошлифованном участке сферического образца. В связи с этим возникает вопрос о применимости данных трансформации поверхностной ДС для анализа процессов перемагничивания в объеме образцов.

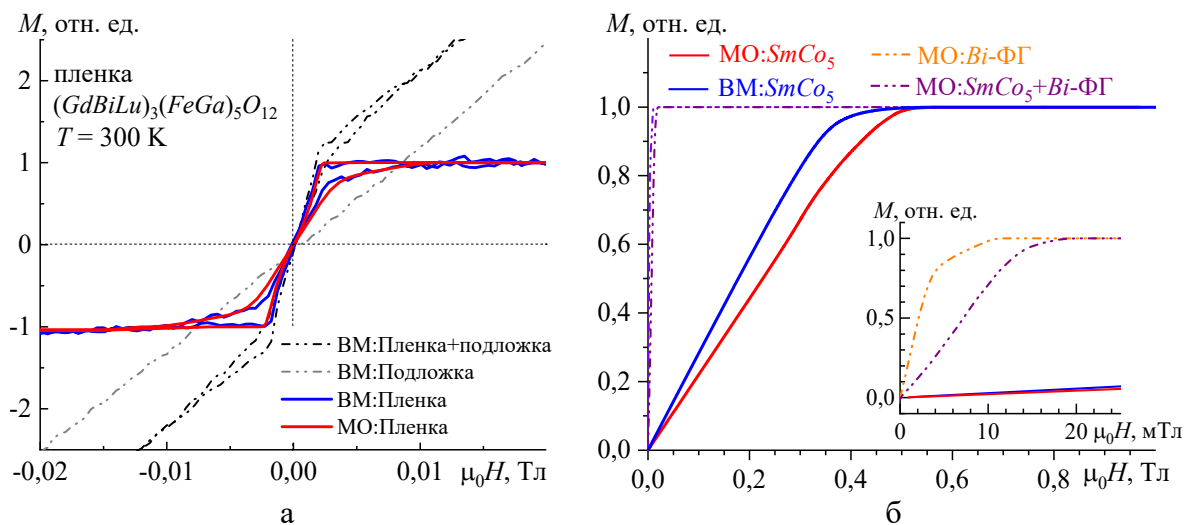


Рис. 3. а – полевые зависимости приведенной намагниченности висмут-содержащей феррит-гранатовой плёнки $(GdBiLu)_3(FeGa)_5O_{12}$, полученные методом вибрационного магнитометра (ВМ) и в ходе магнитооптических исследований трансформации ДС (МО); б – полевые зависимости приведенной намагниченности монокристалла $SmCo_5$, полученные методом вибрационного магнитометра (ВМ) (синяя сплошная кривая) и в ходе магнитооптических (МО) исследований трансформации поверхностной ДС (красная сплошная кривая). Вставка: полевые зависимости приведенной намагниченности, полученные из анализа изображений доменной структуры Bi:ФГ-плёнки $(GdBiLu)_3(FeGa)_5O_{12}$ (оранжевая пунктирная кривая) и системы $SmCo_5 - Bi : \text{ФГ}$ -плёнка (фиолетовая пунктирная кривая).

Нередко известны случаи применения плёнок – ФГ в качестве

средства индикации доменной структуры в объеме 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 плёнки. Чем ближе плёнка приложена к образцу, тем большее влияние на нее оказывают магнитные поля поверхностных доменов (см. рис. 4).

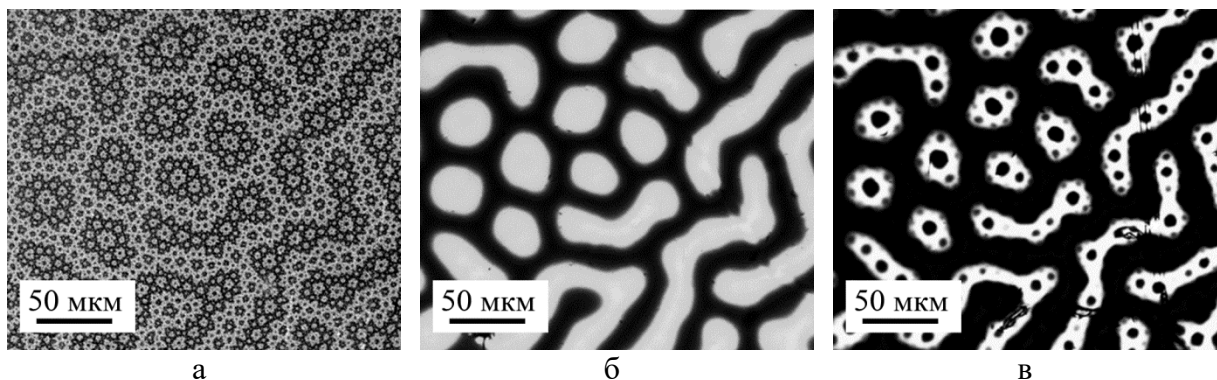


Рис. 4. Изображения поверхностной доменной структуры, выявленной на базисной плоскости монокристалла $Nd_2Fe_{14}B$ методом полярного эффекта Керра: а – без использования плёнки-индикатора ФГ, б – плёнка расположена на расстоянии порядка 30-40 мкм от базисной плоскости, в – плёнка в непосредственной близости к образцу.

В высокоанизотропных материалах, обладающих магнитокристаллической анизотропией типа «легкая ось», глубинная доменная структура считается лабиринтной. Это можно представить как чередование с равным периодом областей противоположного контраста. При приближении к поверхности с энергетических позиций становится выгодным разветвление доменов. Таким образом, с целью минимизации энергии магнитного образца появляются 3-4 уровня вложений доменов, ширина которых, в свою очередь, изменяется. Другими словами, доменная структура при переходе от глубины к поверхности образца измельчается [9]. Поле рассеяния, создаваемое глубинными доменами, по величине превышает аналогичное значение в случае поверхностных доменов.

В дальнейших исследованиях были получены изображения глубинных доменов монокристалла $SmCo_5$. Для этого над поверхностью образца была помещена исследуемая в работе феррит-гранатовая пленка, отделенная от полированной поверхности прозрачной слюдой. В данном случае собственные поля размагничивания поверхностных замыкающих доменов образца $SmCo_5$ не оказывают влияние на перестройку ДС пленки. Для системы пленка-образец были проведены аналогичные исследования по трансформации ДС во внешнем магнитном поле. Полученная кривая намагничивания в таком случае приведена на рис. 3 б фиолетовой кривой.

Соответствующая последовательность микрофотографий, используемая для анализа, приведена на рис. 5 а-в. Согласно приведенным данным, поле исчезновения доменов на пленке составило 20 мТл, что существенно меньше поля насыщения монокристалла $SmCo_5$, полученного из данных магнитометрии, и превосходит поле насыщения свободной пленки (см. рис. 3 б, оранжевая кривая). Данный результат можно объяснить тем, что пленка находится не просто во внешнем магнитном поле, создаваемом электромагнитом, а в суперпозиции противоположных по знаку собственных полей насыщения монокристалла $SmCo_5$.

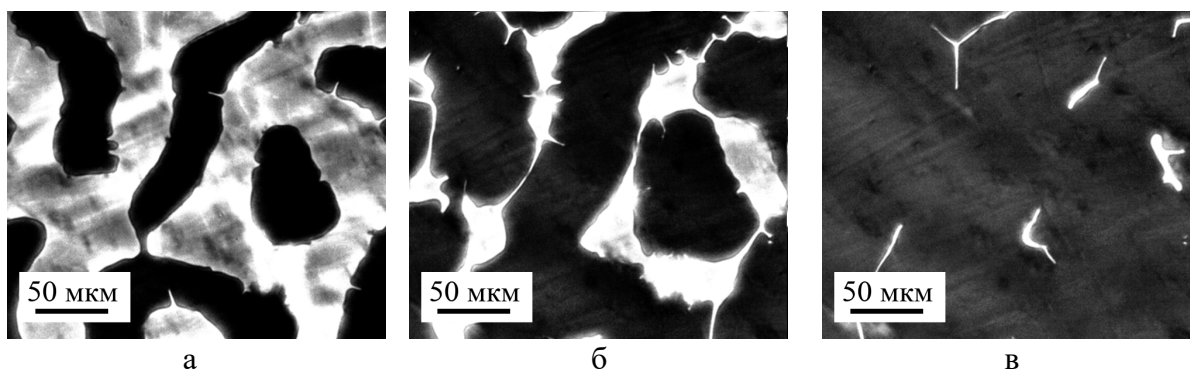


Рис. 5. Секвенция изображений выявленной конфигурации доменной структуры на плёнке $(GdBiLu)_3(FeGa)_5O_{12}$ под действием собственного поля размагничивания монокристалла $SmCo_5$ во внешнем магнитном поле: а – 0 мТл, б – 8,65 мТл, в – 14,33 мТл.

С точки зрения визуализации глубинных доменов в отсутствии внешнего поля данное применение висмут-содержащего ФГ позволяет получать достоверную информацию, однако динамика трансформации такой картины распределения в меняющемся магнитном поле малоинформативна.

3.2. Компьютерное моделирование магнитостатических полей доменной структуры магнетиков

Для объяснения ряда закономерностей, полученных в ходе экспериментальных исследований, были проведены расчеты полей рассеивания от доменной структуры объемных и пленочных образцов. С этой целью создана компьютерная модель, состоящая из двух объектов, соответствующих объемному и пленочному образцу. Первый компонент модели представлял собой структуру полосовых доменов с волнистыми границами (см. рис. 6 а). Размеры объекта составили $100 \times 150 \times 50$ мкм. Значение ширины доменов соответствует 10 мкм в узкой части и 22 мкм в широкой части. Для моделирования поверхностной доменной структуры

объемного образца в компонент были добавлены включения дополнительных конусообразных доменов с радиусом основания и высотой равной 2 мкм. Заданное значение намагниченности областей, соответствующих доменам обратного знака, составило 850 кА/м, что эквивалентно значению намагниченности насыщения соединения $SmCo_5$. Согласно теоретическим представлениям и экспериментальным данным такая структура занимает практически весь объем рассматриваемых магнетиков. На рис. 6 б представлена картина распределения z -компоненты вектора магнитной индукции вблизи поверхности моделируемого объекта.

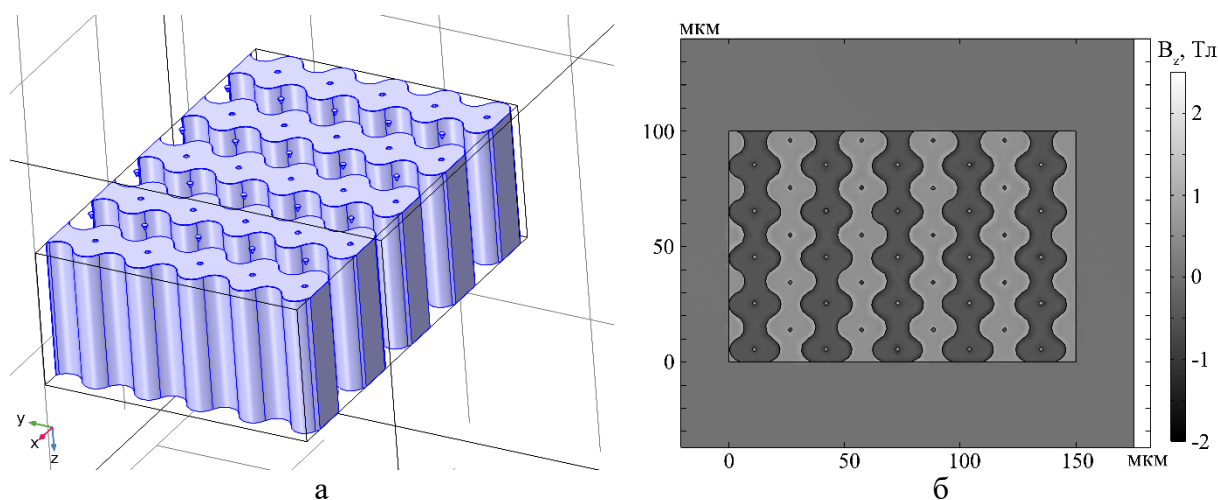


Рис. 6. Физическая модель доменной структуры объемного образца (а) и картина распределения z -компоненты индукции магнитного поля на его поверхности (б).

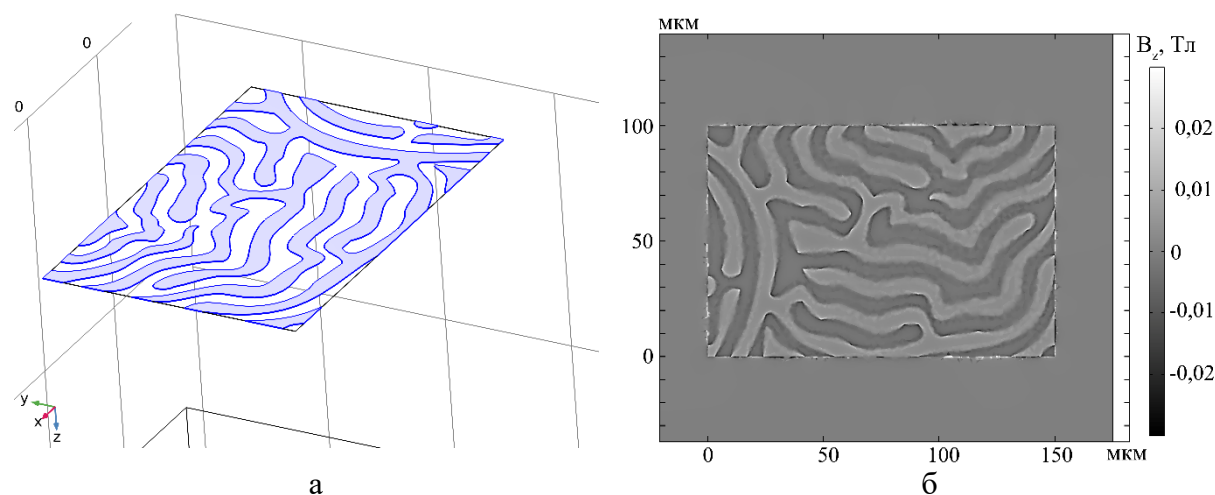


Рис. 7. Физическая модель лабиринтной доменной структуры феррит-гранатовой пленки (а) и картина распределения z -компоненты индукции магнитного поля на ее поверхности (б).

Второй смоделированный объект представлял собой лабиринтную

доменную структуру, наблюдаемую в пленочных образцах (см. рис. 7 а). Размеры объекта составили $100 \times 150 \times 0,1$ мкм. Значение ширины доменов в лабиринтной структуре составили от 6 до 10 мкм. Намагниченность материала была задана 135 кА/м. Картина распределения z -компоненты вектора магнитной индукции вблизи поверхности пленочного объекта представлена на рис. 7 б.

На первом этапе моделирования был проведен расчет полей рассеяния от пленочного образца, расположенного над объемным образцом на различных расстояниях $h = 0-8$ мкм. По результатам расчета полей рассеяния феррит-гранатовой пленки от образца были построены картины распределения z -компоненты вектора магнитной индукции (см. рис. 8 а-в).

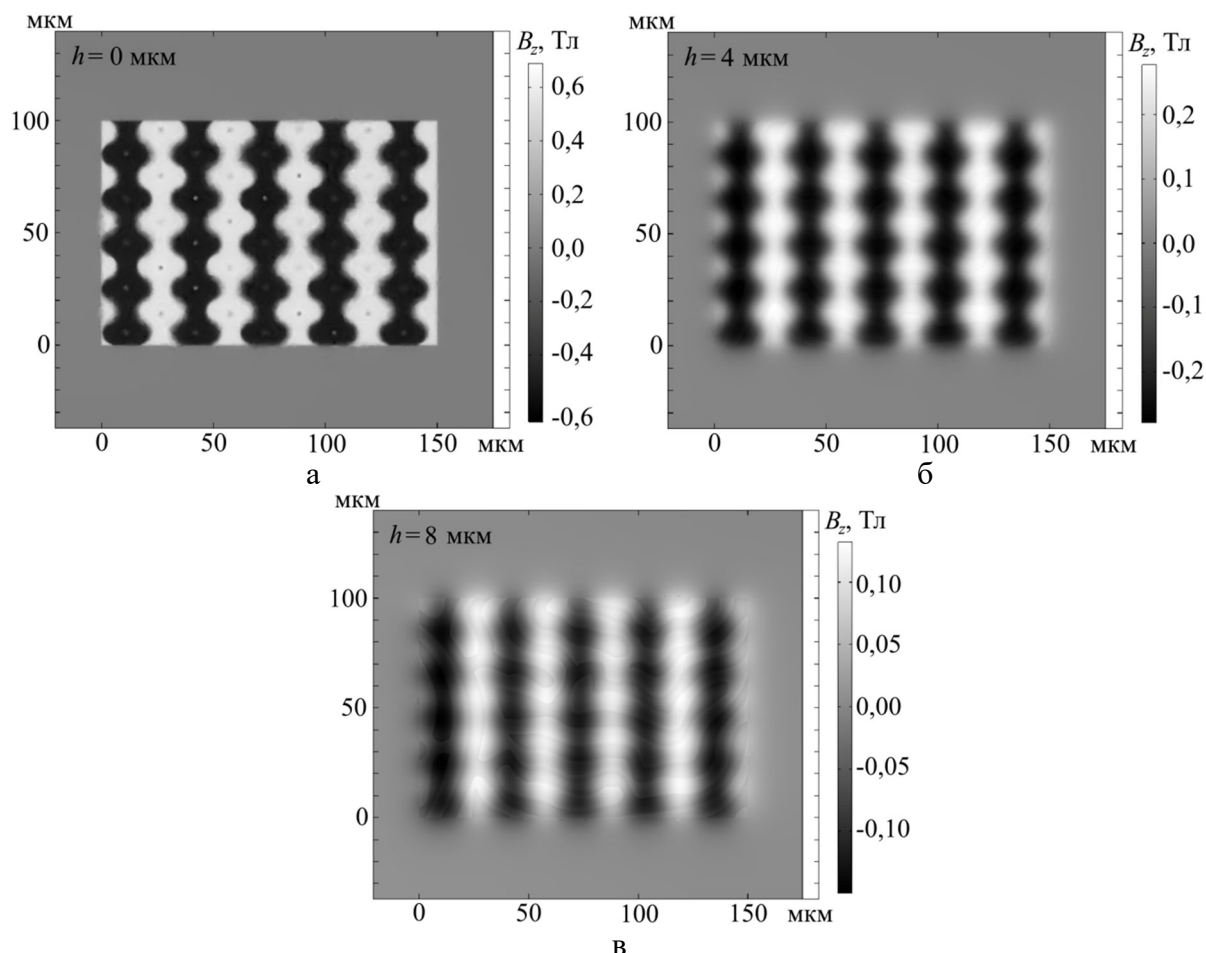


Рис. 8. Распределение z -составляющей магнитной индукции на поверхности феррит-гранатовой пленки, расположенной над объемным образцом на высоте h а – 0 мкм, б – 4 мкм, в – 8 мкм.

Результаты моделирования полей рассеяния показали, что при расположении пленки вплотную к образцу поля от доменной структуры

объемного образца полностью перекрывают поля от пленки, при этом диагностируются как основные сквозные волнообразные домены, так и дополнительные конусообразные поверхностные домены. При перемещении пленки на высоту $h=4$ мкм диагностируются лишь основные волнообразные домены. При $h=8$ мкм наблюдается суперпозиция полей от пленки и основных доменов объемного образца. Таким образом метод феррит-гранатовой пленки имеет свои ограничения, связанные с возможностью четкого диагностирования границ основных и дополнительных доменов объемных образцов.

По картинам полей рассеяния можно сделать вывод о том, что в отсутствии внешнего магнитного поля пленка способна намагничиваться до насыщения в полях рассеяния доменной структуры объемного образца, что подтверждается перекрытием полей рассеяния от доменной структуры пленки полями от объемного образца (см. рис. 8 а, б).

На последующем этапе расчетов в модель было добавлено внешнее магнитное поле, что приближает результаты моделирования к условиям эксперимента, описанного выше. В расчетной модели пленочный образец был расположен на расстоянии 1 мкм от поверхности объемного образца. В отличие от предыдущих результатов моделирования при данных исследованиях пленочный объект представлял собой сплошную среду без собственных доменов, для которой была задана экспериментальная зависимость $B(H)$, при этом регистрировалась z -компонента вектора намагниченности (плоскость наблюдения размещалась в центре пленки).

Из рис. 9 а хорошо видно, что в отсутствии внешнего магнитного поля, пленка намагничивается до насыщения в полях рассеяния основных доменов объемного образца. При этом на картине распределения намагниченности отсутствуют области, соответствующие замыкающим доменам образца. При приложении внешнего магнитного поля области распределения вектора намагниченности изменяются: темные области, намагниченность которых направлена на нас, начинают расти, так как намагниченность доменов темного цвета совпадает с направлением внешнего поля. Одновременно светлые области, соответствующие полям рассеяния доменов с вектором намагниченности, направленных на нас, уменьшаются по всему объёму (см. рис. 9 б). При увеличении поля до 15 мТл остаются видны светлые области, соответствующие наибольшим по ширине волнообразным доменам объемного образца. При значении внешнего поля 20 мТл пленочный образец полностью переходит в состояние насыщения (см. рис. 8 г).

Приложение внешнего магнитного поля 20 мТл приводит к насыщению всего объема феррит-гранатовой пленки в направлении поля, что не позволяет в дальнейшем наблюдать трансформацию основной

доменной структуры объемного образца. Данные моделирования совпадают со значениями, которые получили экспериментально.

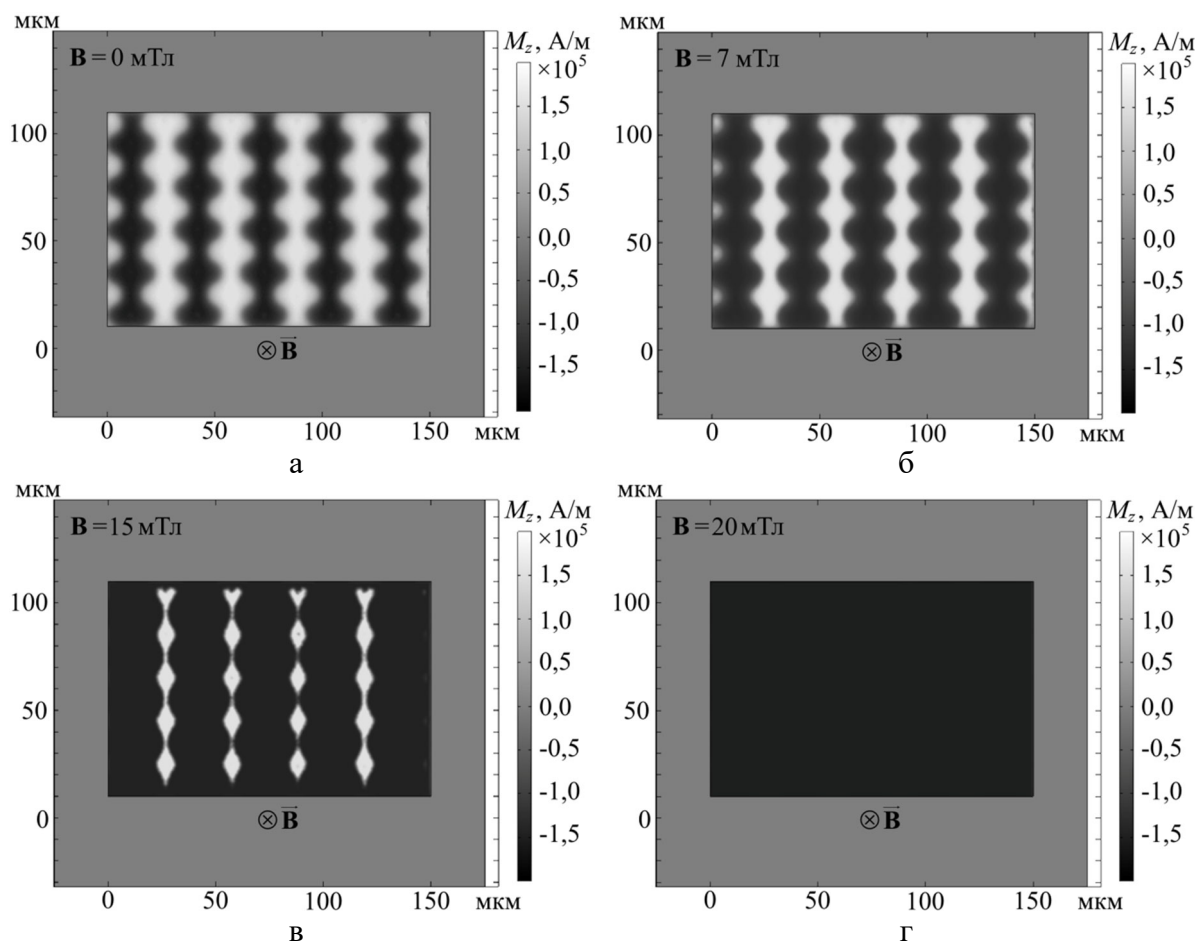


Рис. 9. Распределение z -составляющей намагниченности внутри феррит-гранатовой пленки, расположенной на расстоянии 1 мкм над объемным образцом, в различном внешнем магнитном поле.

4. Заключение

Проведенные в работе прямые исследования и компьютерное моделирование трансформации во внешнем магнитном поле ДС монокристалла $SmCo_5$ и ФГ-пленки позволяют обозначить границы применимости магнитооптических методов для исследования процессов перемагничивания магнитоодноосных магнетиков.

Полученные результаты могут быть полезны для ученых, занимающихся поиском и исследованием новых тонкопленочных и объемных магнитных материалов.

Исследования выполнены при поддержке Минобрнауки РФ в рамках выполнения государственного задания в сфере научной деятельности (проект № 0817-2023-00006). Исследования проведены в Научно-исследовательской лаборатории Магнитных

материалов Центра коллективного пользования Тверского государственного университета. Авторы благодарят доцента кафедры общей физики Тверского государственного университета Сдобнякова Н.Ю. за предоставленный образец феррит-гранатовой пленки.

Библиографический список:

1. Skomski, R. Magnetic materials / R. Skomski, J.M.D. Coey // In book: Permanent Magnetism; ed by. J.M.D. Coey. – New York: Routledge, 2019. – Ch. 5. – P. 247-302. DOI: 10.1201/9780203743829.
2. Coey, J.M.D. Permanent magnet applications / J.M.D. Coey // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2018. – V. 248. – I. 3. – P. 441-456. DOI: 10.1016/s0304-8853(02)00335-9.
3. Buschow, K.H.J. Physics and application of novel magnet materials / K.H.J Buschow // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 1989. – V. 80. – I. 1. – P. 1-8. DOI: 10.1016/0304-8853(89)90313-2.
4. Coey, J.M.D. Magnetism and magnetic materials / J.M.D. Coey. – Cambridge: Cambridge University Press. – 2010. – XII+614 p. DOI: 10.1017/CBO9780511845000.
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. – V. 44. – P. 451-477. DOI: 10.1146/annurev-matsci-070813-113457.
6. Chen, H. Quantifying the nucleation effect of correlated matrix grains in sintered Nd-Fe-B permanent magnets / H. Chen, Y. Yao, F. Yun et al. // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2020. – V. 498. – Art. № 166099. – 25 p. DOI: 10.1016/j.jmmm.2019.166099.
7. Aharoni, A. Theoretical search for domain nucleation / A. Aharoni // Reviews of Modern Physics. – 1962. – V. 34. – I. 2. – P. 227-238. DOI: 10.1103/RevModPhys.34.227.
8. Weller, D. Thermal effect limits in ultrahigh-density magnetic recording / D. Weller, A. Moser // IEEE Transactions on Magnetics. – 1999. – V. 35. – I. 6. – P. 4423-4439. DOI: 10.1109/20.809134.
9. Hubert, A. Magnetic domains. The analysis of magnetic microstructures / A. Hubert, R. Schäfer. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008, XXIII+696 p.
10. 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. – I. 6. – P.063901-1-063901-8. DOI: 10.1063/5.0185341.
11. Karpenkov, A.Yu. Quantitative analyses of surface and bulk magnetization in Nd₂Fe₁₄B and SmCo₅ single crystals: towards understanding the large Neff in nucleation-type magnets / A.Yu. Karpenkov, K.P. Skokov, G.G. Dunaeva et al. // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2022. – V. 55. – № 45. – P. 455002-1-455002-10. DOI: 10.1088/1361-6463/ac90d2.
12. 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. – Вып. 14. – С. 338-344. DOI: 10.26456/pcascnn/2018.10.338.
13. Liu, D. Otsu method and K-means / D. Liu, J. Yu // 2009 Ninth International conference on hybrid intelligent systems, 12-14 August 2009, Shenyang, China. – New York: IEEE Publ., 2009. – P. 344-349. DOI: 10.1109/HIS.2009.74.

References:

1. Skomski R., Coey J.M.D. Magnetic materials, *Permanent Magnetism*, ed. by J.M.D. Coey. New York, Routledge, 2019, chapter 5, pp. 247-302. DOI: 10.1201/9780203743829.
2. Coey J.M.D. Permanent magnet applications, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2018, vol. 248, issue 3, pp. 441-456. DOI: 10.1016/s0304-8853(02)00335-9.
3. Buschow K.H.J. Physics and application of novel magnet materials, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1989, vol. 80, issue 1, pp. 1-8. DOI: 10.1016/0304-8853(89)90313-2.
4. Coey J.M.D. Magnetism and magnetic materials, Cambridge, Cambridge University Press, 2010, XII+614 p. DOI: 10.1017/CBO9780511845000.
5. McCallum R.W., Lewis L.H., Skomski R., Kramer M.J., Anderson I.E. Practical aspects of modern and future permanent magnets, *Annual Review of Materials Research*, 2014, vol. 44, pp. 451-477. DOI: 10.1146/annurev-matsci-070813-113457.
6. Chen H., Yao Y., Yun F. et al. Quantifying the nucleation effect of correlated matrix grains in sintered Nd-Fe-B permanent magnets, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2020, vol. 498, art. no. 166099, 25 p.

DOI: 10.1016/j.jmmm.2019.166099.

7. Aharoni A. Theoretical search for domain nucleation, *Reviews of Modern Physics*, 1962, vol. 34, issue 2, pp. 227-238. DOI: 10.1103/RevModPhys.34.227.

8. Weller D., Moser A. Thermal effect limits in ultrahigh-density magnetic recording, *IEEE Transactions on Magnetism*, 1999, vol. 35, issue 6, pp. 4423-4439. DOI: 10.1109/20.809134.

9. Hubert A., Schäfer R. Magnetic domains. The analysis of magnetic microstructures, Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2008, XXIII+696 p.

10. Suzuki D.H., Beach G.S.D. Measurement of Kerr rotation and ellipticity in magnetic thin films by MOKE magnetometry, *Journal of Applied Physics*, 2024, vol. 135, issue 6, pp. 063901-1-063901-8. DOI: 10.1063/5.0185341.

11. Karpenkov A.Yu., Skokov K.P., Dunaeva G.G. et al. 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, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2022, vol. 55, no. 45, pp. 455002-1-455002-10. DOI: 10.1088/1361-6463/ac90d2.

12. Karpenkov A.Yu., Dunaeva G.G., Rakunov P.A., Semenova E.M. Metod analiza protsessov peremagnichivaniya magnetikov po izobrazheniyam magnitnoj domennoj struktury [Method of analysis of the reversal magnetization processes using magnetic domain structure images], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2018, issue 14, pp. 338-344. DOI: 10.26456/pcascnn/2018.10.338 (In Russian).

13. Liu D., Yu J. Otsu method and K-means, *2009 Ninth International conference on hybrid intelligent systems*, 12-14 August 2009, Shenyang, China. New York, IEEE Publ., 2009, pp. 344-349. DOI: 10.1109/HIS.2009.74.

Original paper

Towards the investigation of the magnetization processes of uniaxial magnetic materials by means of the analysis of transformation of their domain structure: experiment and computer modeling

G.G. Dunaeva, A.Yu. Karpenkov
Tver State University, Tver, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.096

Abstract: This paper presents the results of complex studies, including direct experiment and computer modeling, of the magnetization reversal processes of a SmCo_5 single crystal and a $(\text{GdBiLu})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$ ferrite-garnet film. The analysis of images of the domain structure in the external magnetic field of both samples allowed us to construct the field dependences of magnetization. It was found that the field dependence of the magnetization of the ferrite-garnet film coincides with the magnetometry data. For the SmCo_5 single crystal the saturation field of the surface corresponds to the saturation field obtained from the measurements on a vibrating sample magnetometer, however, the view of the field dependence $M(H)$ differs. Image analysis of the main domains of a single crystal in an external magnetic field and computer modeling have shown that the values of the domain structure disappearance fields on the surface of the film located above the single crystal are significantly less than the saturation fields according to magnetometry data. The application of an external magnetic field of 0,02 T leads to saturation of the entire volume of the ferrite-garnet film in the direction of the field, which does not allow further observation of the transformation of the main domain structure of the bulk sample and limits the applicability of the indicator film method.

Keywords: ferrite-garnet film, single crystal, magnetic domain structure, Kerr effect, magnetization reversal processes.

Дунаева Галина Григорьевна – аспирантка 3 года обучения ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Карпенков Алексей Юрьевич – к.ф.-м.н., доцент, заведующий кафедрой физики конденсированного состояния ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Galina G. Dunaeva – 3rd year post graduate student, Tver State University

Aleksei Yu. Karpenkov – Ph. D., Docent, Head of Condensed Matter Physics Department, Tver State University

Поступила в редакцию/received: 15.09.2024; после рецензирования/revised: 10.10.2024; принята/accepted 12.10.2024.