Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный университет»

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ИЗУЧЕНИЯ КЛАСТЕРОВ,
НАНОСТРУКТУР
И НАНОМАТЕРИАЛОВ**

**PHYSICAL AND CHEMICAL ASPECTS
OF THE STUDY OF CLUSTERS,
NANOSTRUCTURES AND
NANOMATERIALS**

**FIZIKO-HIMIČESKIE ASPEKTY
IZUČENIÂ KLASTEROV,
NANOSTRUKTUR I NANOMATERIALOV**

выпуск 13

ТВЕРЬ 2021

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Ф50

Рецензирование статей осуществляется на основании Положения о рецензировании статей и материалов для опубликования в журнале «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов».

Официальный сайт издания в сети Интернет:

<https://www.physchemaspects.ru>

Ф50 Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]. – Тверь: Издательство Тверского государственного университета, 2021. – Вып. 13. – 956 с.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-47789 от 13.12.2011.

Издание составлено из оригинальных статей, кратких сообщений и обзоров теоретического и экспериментального характера, отражающих результаты исследований в области изучения физико-химических процессов с участием кластеров, наноструктур и наноматериалов физики, включая межфазные явления и нанотермодинамику. Журнал предназначен для научных и инженерно-технических работников, преподавателей ВУЗов, студентов и аспирантов. Издание подготовлено на кафедре общей физики Тверского государственного университета.

Переводное название: Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials

Транслитерация названия: Fiziko-himičeskie aspekty izučeniâ klasterov, nanostruktur i nanomaterialov

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Print ISSN 2226-4442

Online ISSN 2658-4360

© Коллектив авторов, 2021

© Тверской государственнй университет, 2021

УДК 537.62

Оригинальная статья

ФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЛАБИРИНТНОЙ ДОМЕННОЙ СТРУКТУРЫ ФЕРРИТ-ГРАНАТОВЫХ ПЛЕНОК В ПРОЦЕССЕ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ

А.Д. Зигерт, Г.Г. Дунаева, Н.Ю. Сдобняков
ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»
170100, Россия, Тверь, Садовый пер., 35
nsdobnyakov@mail.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.134

Аннотация: В данной работе с использованием комплекса экспериментальных методик и специализированного программного обеспечения исследуются магнитные висмутсодержащие феррит-гранатовые пленки, выращенные на подложках из гадолиний-галлиевого граната. Методом оптической магнитометрии получены предельные петли магнитного гистерезиса для дефектных и бездефектных участков висмутсодержащих феррит-гранатовых пленок. Установлено, что вдали от дефектов петля демонстрирует бескоэрцитивное поведение в пределах погрешности. Для случая перемагничивания вблизи дефекта появляется коэрцитивное состояние с $H_{cl} \sim 1$ Э. Для разных участков предельной петли магнитного гистерезиса определена фрактальная размерность. Полученные значения лежат в диапазоне $D_L = 1,35 \div 1,46$ для произвольного участка пленки и $D_L = 1,37 \div 1,54$ для участка с дефектами. Определены типичные морфологические характеристики поверхности висмутсодержащей феррит-гранатовой пленки. Полученные результаты позволяют для эпитаксиальных висмутсодержащих магнитных пленок феррит-граната прогнозировать взаимосвязь между значением намагниченности и значением фрактальной размерности.

Ключевые слова: магнитные пленки, феррит-гранат, объемные дефекты, доменная структура, коэрцитивная сила, фрактальная размерность, нанорельеф.

1. Введение и объекты исследования

Уже не одно десятилетие эпитаксиальные технологии используются для получения пленок обладающих уникальным набором физических характеристик, в том числе при создании фрактального рельефа на ее поверхности [1]. В современных магнитооптических устройствах активно используются эпитаксиальные структуры висмутсодержащих феррит-гранатов ($Bi:ФГ$), выращенные на подложках из гадолиний-галлиевого граната. Преимуществом $Bi:ФГ$ является наличие высоких магнитооптических характеристик, их особые диэлектрические свойства [2, 3]. При этом известно, что наличие фрактальных структур может активировать ряд оптических процессов, таких как люминесценция, фотохимические процессы в адсорбате и др. Кроме того, фрактальные структуры в магнитных корреляционных объемах обнаруживаются по кривым намагничивания и степени влияния на характер ферромагнитного резонанса в аморфных и наноструктурированных материалах [4, 5]. Взаимосвязь фрактальной размерности и структуры магнитных доменов исследуется не только

экспериментально [6], но и с использованием микромагнитного моделирования [7] или теоретических численных подходов [8].

Данную работу можно рассматривать как продолжение исследования магнитных характеристик эпитаксиальных висмутсодержащих магнитных пленок феррит-граната $Bi:ФГ$. Ранее, в работе [9] нами было рассмотрено влияние объемных дефектов, связанных с локальным механическим повреждением и термическим лазерным воздействием, на доменную структуру и магнитные характеристики эпитаксиальных висмутсодержащих магнитных пленок феррит-граната $Bi:ФГ$. Примечательно, что одноосные пленки $Bi:ФГ$ устойчивы к объемным дефектам, размер которых не превышает ширину доменов пленки. Как и ожидалось, объемные дефекты пленки оказывают влияние на процесс намагничивания пленки, ход кривых намагничивания, на величину коэрцитивной силы. В частности, воздействие лазерным импульсом с плотностью мощности 800 Дж/см^2 приводит к увеличению коэрцитивной силы локального участка пленки более чем в 4 раза. Примечательно, что в [10] после облучения лазером получали пространственно самоорганизованные структуры, идентифицированные как фрактальные структуры. Причем фрактальная размерность этих структур зависит от параметров внешнего воздействия. В работе [9] нас интересовала структура дефектов, в частности, их геометрические размеры. Однако, комплексное исследование морфологии рельефа висмутсодержащих магнитных пленок феррит-граната $Bi:ФГ$, как и исследование взаимосвязи между магнитными и морфологическими характеристиками не проводилось. При этом с одной стороны существующие неоднородности и дефекты, имеющиеся на подложке гадолиний-галлиевого граната, наследуются пленкой $Bi:ФГ$, вызывая локальные изменения магнитных свойств, с другой стороны сами эпитаксиальные магнитные пленки могут формировать развитый рельеф, в том числе фрактальный [11]. Целью данной работы является установление взаимосвязи между магнитными и морфологическими характеристиками для пленок $Bi:ФГ$. В качестве основной морфологической характеристики, следуя [12, 13], будем использовать фрактальную размерность поверхности (профиля).

2. Методы исследования

Методика, реализованная на базе металлографического микроскопа НЕОРНОТ-30, позволяет наблюдать и регистрировать изображения доменной структуры во внешнем изменяющемся магнитном поле. Величина поля в зазоре электромагнита регулируется с помощью импульсного программируемого источника питания АКИП-1141 с дискретностью установки $1 \text{ мВ}/0,21 \text{ мА}$, фиксируется датчиком Холла.

Полученные микрофотографии поверхности исследуемого образца анализируются в программном обеспечении, позволяющем на основе алгоритма Оцу [14] оценить относительное процентное содержание областей с направлением вектора намагниченности вверх и вниз. Поскольку при изменении внешнего магнитного поля площади данных областей изменяются, это позволяет строить кривые намагничивания, петли гистерезиса ферромагнитных образцов в относительных единицах.

Особенности рельефа поверхности $Bi:Fe$ исследовались с помощью оптического интерференционного профилометра NanoMap WLI 1000 и сканирующего зондового микроскопа SolverNext (ООО «НТ-МДТ СИ») при комнатной температуре. Анализ морфологии поверхности проводился с использованием как встроенного программного обеспечения (ПО) вышеперечисленных приборов, так и с использованием специализированного ПО [15, 16].

Кластерную фрактальную размерность D_c определяют следующим выражением

$$N = (d/a)^{D_c}, \quad (1)$$

где N – число частиц в кластере (число мономеров), d – линейный размер, т.е. диаметр кластера (агрегата), a – размер частиц, из которых состоит кластер (средний размер мономера).

В отличие от ручного подсчета [17] фрактальную размерность определяли с помощью методики, встроенной в ПО [16]. В частности, при анализе профилей использовались: 1. Метод подсчёта кубов; 2. Метод триангуляции; 3. Вариационный метод; 4. Метод спектра мощности (power spectrum). В качестве базового использовался метод подсчета кубов. Остальные методы позволяли оценить разброс в определяемых значениях фрактальной размерности и исключить возможные артефакты при обработке изображений, полученных на базе металлографического микроскопа NEOPHOT-30.

Ранее нами [18, 19] уже активно использовался аппарат фрактальной геометрии для анализа наноструктуры и магнитной доменной структуры высококоэрцитивных сплавов $Sm-Co-Cu-Fe$. В частности, в [18, 19] определена фрактальная размерность наноструктуры и доменной структуры на разных этапах термической обработки, а также установлена взаимосвязь между коэрцитивной силой и фрактальной размерностью. В данном случае мы будем вести речь о фрактальной размерности контура доменной структуры D_L и использовать следующее уравнение связи (как и ранее [17, 20, 21] мы считаем, что фрактальная размерность поверхности D_f соответствует кластерной размерности трехмерных агрегатов):

$$D_L = D_f - 1. \quad (2)$$

Применение фрактальной геометрии к линейным доменным разветвленным структурам (line structure patterns of the multi-branched domains) позволило определить значения D_L диапазоне $1,33 \div 1,65$ для гранатовых пленок в работе [22].

3. Экспериментальные результаты и обсуждение

На рис. 1 а, 2 а представлены полевые зависимости намагниченности пленки $M(H)$, полученные на основе анализа перестройки доменной структуры (ДС) во внешнем поле. Представлены две петли магнитного гистерезиса, соответствующие участкам пленки в окрестности дефекта (см. рис. 1 а) и на удалении от него (см. рис. 2 а). На бездефектном участке пленки $Bi:ФГ$ петля демонстрирует бескоэрцитивное поведение в пределах погрешности. Для случая перемагничивания вблизи дефекта появляется коэрцитивное состояние с $H_{cl} \sim 1$ Э. В работе [9] для пленок $Bi:ФГ$ анализ зависимостей $M(H)$ показал увеличение площади петли гистерезиса и незначительное изменение коэрцитивной силы H_{cl} с 0,33 Э (в бездефектной области пленки) до 0,40 Э. Однако, отметим, что несовпадение значений H_{cl} в работе [9] достаточно мало и сопоставимо с погрешностью измерения величины магнитного поля. Полученные изображения ДС на рис. 1 б и 2 б позволяют провести фрактальный анализ лабиринтной доменной структуры, в Таблице 1 приведены результаты определения фрактальной размерности в различных точках предельных полевых зависимостей намагниченности пленки $M(H)$. Таким образом, значение фрактальной размерности «закреплено» за определенным состоянием $M(H)$. В дальнейшем, с учетом расширения количества объектов исследования можно будет составить базу данных для зависимостей типа $f = f(M, H, D_L)$, что фактически на ограниченных пространственных и полевых масштабах было проделано в [22, 24] только на других объектах исследования. Диапазон изменения D_L должен зависеть от вида петли гистерезиса в части предельных значений магнитного поля и площади петли, т.к. этими параметрами будет определяться вид лабиринтной доменной структуры.

На рис. 3 представлены 3D изображения поверхности пленки $Bi:ФГ$, полученные с помощью оптического интерференционного профилометра NanoMap WLI 1000 (включая участки дефекта см. рис. 3 а, б) и сканирующего зондового микроскопа SolverNext, также были определены типичные морфологические характеристики поверхности (см. Таблицу 2), позволяющие оценивать качество покрытия и определять тип покрытия (тип «плато», тип «высотно развитого рельефа» и т.д.).

Рис. 1 а. Предельные петли магнитного гистерезиса дефектных участков пленки *Bi:ФГ*. Микрофотографии обозначенных участков на петле гистерезиса представлены на рис. 1 б.

Рис. 1 б. Последовательность микрофотографий для изучения эволюции ДС при наличии дефектов в пленке *Bi:ФГ*. Типичный масштаб каждой микрофотографии 415×310 мкм.

Рис. 2 а. Предельные петли магнитного гистерезиса на произвольном участке пленки $Bi:ФГ$. Микрофотографии обозначенных участков на петле гистерезиса представлены на рис. 2 б.

Рис. 2 б. Последовательность микрофотографий для изучения эволюции ДС произвольного участка пленки $Bi:ФГ$. Типичный масштаб каждой микрофотографии 415×310 мкм.

Таблица 1. Сопоставление значений фрактальной размерности лабиринтной доменной структуры и магнитного состояния пленки $Bi: \Phi \Gamma$.

Участок пленки	Участок предельной петли магнитного гистерезиса					
	B	C	D	F	G	H
с дефектом	1,54	1,41	1,39	1,37	1,41	1,45
без дефекта	1,43	1,40	1,35	1,42	1,45	1,46

Таблица 2. Морфологические характеристики поверхности пленок $Bi: \Phi \Gamma$.

S_a , нм	S_q , нм	S_z , нм	S_{ku}	S_{sk}
0,543	0,705	7,348	4,070	-0,489

Введенные обозначения:

- среднее арифметическая шероховатость $S_a = \frac{1}{MN} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} |z(x_k, y_l)|$;

- среднеквадратичное отклонение $S_q = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} [z(x_k, y_l)]^2}$;

- максимальная высота от пика до впадины на поверхности образца $S_z = z_{\max} - z_{\min}$;

- коэффициент эксцесса – параметр учитывающий форму функции распределения амплитуды (определяет степень изрезанности поверхности)

$S_{ku} = \frac{1}{MNS_q^4} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} [z(x_k, y_l)]^4$;

- коэффициент асимметрии – параметр, который описывает форму функции распределения амплитуды (показывает симметрию изменения поверхности относительно ее средней линии)

$S_{sk} = \frac{1}{MNS_q^3} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} [z(x_k, y_l)]^3$.

Анализ данных, представленных в Таблице 2, показывает, что на наноуровне пленки $Bi: \Phi \Gamma$ демонстрируют «изрезанный рельеф» поверхности (отчетливо видно на рис. 3 в, г), а также умеренную асимметрию поверхности.

Визуальный анализ морфологии поверхности пленки $Bi: \Phi \Gamma$ (см. рис. 3 в, г) свидетельствует о наличии развитого высотного рельефа. Для оценки структурных элементов поверхности магнитной пленки $Bi: \Phi \Gamma$ нами с использованием ПО [15] построены (см. рис. 4) структурное изображение поверхности $Bi: \Phi \Gamma$ и диаграмма плотности распределения зерен (агломератов). Структурное изображение поверхности $Bi: \Phi \Gamma$ позволяет выделить области близкого состава (выделены одинаковым цветом). Крестиками показаны зоны с максимальной высотой нанорельефа, серым цветом показаны области образца которые лежат ниже выделенной на рисунке высотной метки (примерно 51,2 % поверхности). Анализ диаграммы плотности распределения зерен (агломератов) показывает насколько разнообразны по размерам элементы поверхности, образующие нанорельеф. В данном случае наибольшее количество зерен (агломератов) имеет характерный размер в диапазоне 4–6 нм.

Рис. 3. 3D изображение поверхности пленки $Bi:FG$, полученное с помощью оптического интерференционного профилометра NanoMap WLI 1000 (а-в) и сканирующего зондового микроскопа SolverNext при комнатной температуре (г).

Рис. 4. а – структурное изображение поверхности $Bi:FG$, б – плотность распределения зерен (агломератов) на поверхности $Bi:FG$, полученные на ПО [15].

4. Заключение

В данной работе на основе анализа полевых зависимостей намагниченности пленки $M(H)$, полученных на основе исследования перестройки доменной структуры во внешнем поле, показано, что существуют закономерности между магнитными и морфологическими характеристиками эпитаксиальных висмутсодержащих магнитных пленок феррит-граната. Установлено, что определённым точкам зависимостей $M(H)$ соответствуют конкретные значения фрактальной размерности для разного типа рельефа, в частности, при наличии механических дефектов поверхности и без них. Определены отдельные морфологические характеристики поверхности $Bi:ФГ$. Таким образом, в дальнейшем полученные результаты позволят для эпитаксиальных висмутсодержащих магнитных пленок феррит-граната предложить методику создания «паспорта поверхности», т.е. наряду с морфологическими характеристиками, в том числе фрактальной размерности, сопоставить как вид, так и характеристики, определяемые из полевых зависимостей намагниченности пленки $M(H)$. Заметим, что в литературе встречаются фрактальные модели для феррогранатовых пленок. Так в работе [23] на основе анализа экспериментальных данных феррогранатовой пленки предлагается модель процесса перемагничивания как процесса развития фрактальных доменных кластеров ($D_L \sim 1,7$). Вместе с тем, например в работе [24] для изучения эволюция лабиринтной доменной структуры (в нашем случае это рис. 1 б и 2 б) введен даже специальный термин геометрический морфогенез лабиринтной доменной структуры во внешнем магнитном поле, каждому этапу которого соответствует свое значение фрактальной размерности. Причем авторы [24] предсказывают некоторое пороговое значение, ниже которого фрактальная размерность выходит на некоторое асимптотическое значение соответствующее высокоразвитому фрактальному микрорельефу.

Исследования выполнены при поддержке Минобрнауки РФ в рамках выполнения государственного задания в сфере научной деятельности (проект № 0817-2020-0007). Исследования проведены в лабораториях электронной микроскопии и магнитных материалов Центра коллективного пользования Тверского государственного университета. Авторы статьи благодарны к.ф.-м.н. Е.М. Семеновой, А.И. Ивановой С.А. Третьякову и А.С. Антонову за помощь в организации исследований и научную дискуссию.

Библиографический список:

1. **Harp, G.R.** Epitaxial growth of metals by sputter deposition / G.R. Harp, S.S.P. Parkin // Thin Solid Films. – 1996. – V. 288. – I. 1-2. – P. 315-324. DOI: 10.1016/S0040-6090(96)08808-6.
2. **Zvezdin, A.K.** Modern magnetooptics and magnetooptical materials / A.K. Zvezdin, V.A. Kotov. – New

York: Taylor & Fancis Croup, 1997. – 404 p.

3. **Scheunert, G.** A review of high magnetic moment thin films for microscale and nanotechnology applications / G. Scheunert, O. Heinonen, R. Hardeman et al. // *Applied Physics Reviews*. – 2016. – V. 3. – I. 1. – P. 011301-1-011301-44. DOI: 10.1063/1.4941311.
4. **Herzer, G.** Magnetization process in nanocrystalline ferromagnets / G. Herzer // *Materials Science and Engineering: A*. – 1991. – V. 133. – P. 1-5. DOI: 10.1016/0921-5093(91)90003-6.
5. **Iskhakov, R.S.** Magnetic microstructure of amorphous, nanocrystalline, and nanophase ferromagnets / R.S. Iskhakov, S.V. Komogortsev // *The Physics of Metals and Metallography*. – 2011. – V. 112. – I. 7. – P. 666-681. DOI: 10.1134/S0031918X11070064.
6. **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. – № 21. – P. 3698-3700. DOI: 10.1063/1.1578185.
7. **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. – Вып. 5. – С. 886-893. DOI: 10.1134/S0044451019050122.
8. **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. DOI: 10.3103/S106287382002029X.
9. **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. – Вып. 12. – С. 103-112. DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.103.
10. **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.
11. **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.
12. **Иванов, Г.С.** Фрактальная геометрическая модель микроповерхности / Г.С. Иванов, Ю.В. Брылкин // *Геометрия и графика*. – 2016. – Т. 4. – № 1. – С. 4-11. DOI: 10.12737/18053.
13. **Брылкин, Ю.В.** Тестирование алгоритма моделирования рельефа шероховатой поверхности на основе теории фракталов / Ю.В. Брылкин, А.Л. Кусов, А.В. Флоров // *Известия Кабардино-Балкарского государственного университета*. – 2014. – Т. IV. – № 5. – С. 86-89.
14. **Otsu, N.** A threshold selection method from gray-level histograms / N. Otsu // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. – 1979. – V. 9. – I. 1. – P. 62-66. DOI: 10.1109/TSMC.1979.4310076.
15. DigitalSurf. – Режим доступа: [www.url: https://www.digitalsurf.com](http://www.digitalsurf.com). – 15.08.2021.
16. Gwyddion – Free SPM (AFM, SNOM/NSOM, STM, MFM, ...) data analysis software. – Режим доступа: [www.url: http://www.gwyddion.net](http://www.gwyddion.net). – 15.09.2021.
17. **Сдобняков, Н.Ю.** Морфологические характеристики и фрактальный анализ металлических пленок на диэлектрических поверхностях: монография / Н.Ю. Сдобняков, А.С. Антонов, Д.В. Иванов. – Тверь: Тверской государственный университет, 2019. – 168 с.
18. **Semenova, E.M.** A comparative analysis of magnetic properties and microstructure of high coercivity $Sm(CoCuFe)_5$ quasi-binary alloys in the framework of fractal geometry / E.M. Semenova, M.B. Lyakhova, Yu.V. Kuznetsova et al. // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2020. – V. 1658. – Art. № 012050. – 6 p. DOI: 10.1088/1742-6596/1658/1/012050.
19. **Семенова, Е.М.** Фрактальная геометрия нано- и магнитной доменной структуры ферромагнитного сплава $Sm-Co-Cu-Fe$ в высококоэрцитивном состоянии // Е.М. Семенова, Д.В. Иванов, М.Б. Ляхова и др. // *Известия РАН. Серия физическая*. – 2021. – Т. 85. – № 9. – С. 1245-1248. DOI: 10.31857/S0367676521090258.
20. **Ivanov, D.V.** Determination of the fractal size of titanium films at different scales / D.V. Ivanov, A.S. Antonov, E.M. Semenova et al. // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – V. 1758. – Art. № 012013. – 6 p. DOI: 10.1088/1742-6596/1758/1/012013.
21. **Антонов, А.С.** Исследование фрактальных свойств наноразмерных пленок золота, серебра и меди: атомно-силовая и туннельная микроскопия / А.С. Антонов, Н.Ю. Сдобняков, Д.В. Иванов и др. // *Химическая физика и мезоскопия*. – 2017. – Т. 19. – № 3. – С. 473-486.
22. **Han, B.-S.** Fractal study of magnetic domain patterns / B.-S. Han, D. Li, D.-J. Zheng, Y. Zhou // *Physical*

Review B. – 2002. – V. 66. – I. 1. – P. 014433-1-014433-5. DOI: 10.1103/PhysRevB.66.014433.

23. Довбня, Л.А. Фрактальная модель перемагничивания напряженной феррогранатовой пленки / Л.А. Довбня, Д.Е. Наумов, Б.В. Храмов // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2001. – Т. 73. – Вып. 7. – С. 410-413.

24. 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. DOI: 10.1103/PhysRevB.82.184411.

References:

1. Harp G.R., Parkin S.S.P. Epitaxial growth of metals by sputter deposition, *Thin Solid Films*, 1996, vol. 288, issue 1-2, pp. 315-324. DOI: 10.1016/S0040-6090(96)08808-6.
2. Zvezdin A.K., Kotov V.A. *Modern magneto-optics and magneto-optical materials*. New York, Taylor & Francis Group, 1997, 404 p.
3. Scheunert G., Heinonen O., Hardeman R. et al. A review of high magnetic moment thin films for microscale and nanotechnology applications, *Applied Physics Reviews*, 2016, vol. 3, issue 1, pp. 011301-1-011301-44. DOI: 10.1063/1.4941311.
4. Herzer G. Magnetization process in nanocrystalline ferromagnets, *Materials Science and Engineering: A*, 1991, vol. 133, pp. 1-5. DOI: 10.1016/0921-5093(91)90003-6.
5. Iskhakov R.S., Komogortsev S.V. Magnetic microstructure of amorphous, nanocrystalline, and nanophase ferromagnets, *The Physics of Metals and Metallography*, 2011, vol. 112, issue 7, pp. 666-681. DOI: 10.1134/S0031918X11070064.
6. Kim D.-H., Cho Y.-C., Choe S.-B., Shin S.-C. Correlation between fractal dimension and reversal behavior of magnetic domain in *Co/Pd* nanomultilayers, *Applied Physics Letters*, 2003, vol. 82, no. 21, pp. 3698-3700. DOI: 10.1063/1.1578185.
7. Komogortsev S.V., Iskhakov R.S., Fel'k V.A. Fractal dimension effect on the magnetization curves of exchange-coupled clusters of magnetic nanoparticles, *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 2019, vol. 128, issue 5, pp. 754-760. DOI: 10.1134/S1063776119040095.
8. Polyakova O.P., Akimova M.L., Polyakova P.A. Remagnetization of a fractal magnetic structure, *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2020, vol. 84, issue 2, pp. 166-168. DOI: 10.3103/S106287382002029X.
9. Ivanova A.I., Semenova E.M., Dunaeva G.G., Ovcharenko S.V., Tretyakov S.A., Zigert A.D. Vliyanie defektov na magnitnye kharakteristiki ferrit-granatovykh plenok [Influence of defects on magnetic characteristics of ferrite-garnet films], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2020, issue 12, pp. 103-112. DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.103. (In Russian).
10. Khmelevskaya V.S., Kulikova N.V., Bondarenko V.V. Fractal structures formed in metals irradiated by ion and laser beams, *Technical Physics Letters*, 2005, vol. 31, issue 7, pp. 619-621. DOI: 10.1134/1.2001073.
11. Lisovskii F.V., Lukashenko L.I., Mansvetova E.G. Thermodynamically stable fractal-like domain structures in magnetic films, *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*, 2004, vol. 79, issue 7, pp. 352-354. DOI: 10.1134/1.1765181.
12. Ivanov G.S., Brylkin Yu.V. Fraktal'naya geometricheskaya model' mikropoverkhnosti [Fractal geometric microsurface model], *Geometriya i grafika [Geometry & Graphics]*, 2016, vol. 4, no. 1, pp. 4-11. DOI: 10.12737/18053. (In Russian).
13. Brylkin Yu.V., Kusov A.L., Florov A.V. Testirovanie algoritma modelirovaniya rel'efa sherokhovatoj poverkhnosti na osnove teorii fraktalov [Testing a rough surface relief modeling algorithm based on fractal theory, *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo gosudarstvennogo universiteta*, [Proceedings of the Kabardino-Balkarian State University], 2014, vol. IV, no. 5, pp. 86-89. (In Russian).
14. Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1979, vol. 9, issue 1, pp. 62-66. DOI: 10.1109/TSMC.1979.4310076.
15. DigitalSurf. Available at: [www.url: https://www.digitalsurf.com](http://www.digitalsurf.com) (accessed 15.08.2021).
16. Gwyddion – Free SPM (AFM, SNOM/NSOM, STM, MFM, ...) data analysis software. Available at: [www.url: http://gwyddion.net](http://gwyddion.net) (accessed 15.09.2021).
17. Sdobnyakov N.Yu., Antonov A.S., Ivanov D.V. Morfologicheskie kharakteristiki i fraktal'nyj analiz metallicheskih plenok na dielektricheskikh poverkhnostyakh: monografiya [Morphological characteristics and fractal analysis of metal films on dielectric substrates: monography]. Tver, Tver State University Publ., 2019, 168 p. (In Russian).
18. Semenova E.M., Lyakhova M.B., Kuznetsova Yu.V. et al. A comparative analysis of magnetic properties

- and microstructure of high coercivity $Sm(CoCuFe)_5$ quasi-binary alloys in the framework of fractal geometry, *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1658, art. no. 012050, 6 p. DOI: 10.1088/1742-6596/1658/1/012050.
19. Semenova E.M., Ivanov D.V., Lyakhova M.B. et al. Fractal geometry of the nano- and magnetic domain structures of $Sm-Co-Cu-Fe$ ferromagnetic alloy in a high coercive state, *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2021, vol. 85, issue 9, pp. 955-958. DOI: 10.3103/S1062873821090252.
20. Ivanov D.V., Antonov A.S., Semenova E.M. et al. Determination of the fractal size of titanium films at different scales, *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1758, art. no. 012013, 6 p. DOI: 10.1088/1742-6596/1758/1/012013.
21. Antonov A.S., Sdobnyakov N.Yu., Ivanov D.V. et al. Issledovanie fraktal'nykh svoystv nanorazmernykh plenok zolota, serebra i medi: atomno-silovaya i tunnel'naya mikroskopiya [Investigation of fractal properties of nanosized gold, silver and copper films: atomic force and tunnelling microscopy], *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya [Chemical Physics and Mesoscopy]*, 2017, vol. 19, no. 3, pp. 473-486. (In Russian).
22. Han B.-S., Li D., Zheng D.-J., Zhou Y. Fractal study of magnetic domain patterns, *Physical Review B*, 2002, vol. 66, issue 1, pp. 014433-1-014433-5. DOI: 10.1103/PhysRevB.66.014433.
23. Dovbnya L.A., Naumov D.E., Khramov B.V. Fractal model of magnetization reversal in a strained garnet ferrite film, *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*, 2001, vol. 73, issue 7, pp. 366-369. DOI: 10.1134/1.1378121.
24. Bathany C., Romancer M.L., Armstrong J.N., Chopra H.D. Morphogenesis of maze-like magnetic domains, *Physical Review B*, 2010, vol. 82, issue 18, pp. 184411-1-184411-14. DOI: 10.1103/PhysRevB.82.184411. DOI: 10.1103/PhysRevB.82.184411.

Original paper

FRACTAL ANALYSIS OF THE MAZE-LIKE DOMAIN STRUCTURE OF FERRITE-GARNET FILMS IN THE PROCESS OF MAGNETIZATION

A.D. Zigert, G.G. Dunaeva, N.Yu. Sdobnyakov
Tver State University, Tver, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.134

Abstract: In this work, using a set of experimental techniques and specialized software, magnetic bismuth-containing ferrite-garnet films grown on gadolinium-gallium garnet substrates are investigated. The limiting magnetic hysteresis loops are obtained by the method of optical magnetometry for defective and defect-free areas of bismuth-containing ferrite-garnet films. It was found that, far from defects, the loop exhibits a non-coercive behavior within the error limits. For the case of magnetization reversal, a coercive state with $H_{cl} \sim 1$ Oe appears near the defect. For different sections of the limiting magnetic hysteresis loop, the fractal dimension is determined. The obtained values are in the range of $D_L = 1,35 \div 1,46$ for an arbitrary section of the film and $D_L = 1,37 \div 1,54$ for a section with defects. Typical morphological characteristics of the surface of a bismuth-containing ferrite-garnet film have been determined. The results obtained make it possible to predict the relationship between the value of magnetization and the value of fractal dimension for epitaxial bismuth-containing magnetic films of iron garnet.

Keywords: magnetic films, ferrite garnets, bulk defects, domain structure, coercivity, fractal dimension, nanorelief.

Зигерт Александр Дмитриевич – старший преподаватель кафедры прикладной физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Дунаева Галина Григорьевна – студент магистратуры 2 года обучения кафедры физики конденсированного состояния ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Сдобняков Николай Юрьевич – к.ф.-м.н., доцент кафедры общей физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Alexandr D. Zigert – Senior Lecturer, Applied Physics Department, Tver State University

Galina G. Dunaeva – 2nd year master's degree student, Condensed Matter Physics Department, Tver State University

Nickolay Yu. Sdobnyakov – Ph. D., Docent, General Physics Department, Tver State University

Поступила в редакцию/received: 01.10.2021; после рецензирования/revised: 24.10.2021; принята/accepted 01.11.2021.