

ПОВЕДЕНИЕ ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ ДОМЕННЫХ СТРУКТУР В ФЕРРИТ-ГРАНАТОВЫХ ПЛЕНКАХ

А.Д. Зигерт, Г.Г. Дунаева, Н.Б. Кузьмин, Е.М. Семенова, Н.Ю. Сдобняков

ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

170100, Россия, Тверь, Садовый пер., 35

alex-zigert@yandex.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.098

Аннотация: В данной работе с использованием комплекса экспериментальных методик и специализированного программного обеспечения проведено исследование висмутсодержащих феррит-гранатовых плёнок различной толщины и с различным стехиометрическим составом, выращенных на подложках из гадолиний-галлиевого граната. Методом оптической магнитометрии получены предельные петли магнитного гистерезиса для дефектных и бездефектных участков пленок. Также получены полевые зависимости фрактальной размерности магнитооптических изображений. Фрактальная размерность определялась методом подсчета кубов. Для различных составов и толщин висмутсодержащих феррит-гранатовых плёнок были получены диапазоны изменения фрактальной размерности. 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 $dM(H)/dH$ при изменении толщины пленки, а также для дефектных и бездефектных участков пленок.

Ключевые слова: магнитные пленки, феррит-гранат, объемные дефекты, доменная структура, фрактальная размерность, зависимость $dM(H)/dH$.

1. Введение и объекты исследования

Феррит-гранатовые плёнки обладают набором характеристик привлекательных для разработчиков электронных устройств, таких как низкие диэлектрические потери, узкая ширина резонансной линии в микроволновой области, а также высокие значения намагниченности насыщения. На их основе были разработаны линии задержки, настраиваемые фильтры, генераторы, изоляторы, блоки памяти с пузырьковым накопителем и многие другие устройства [1]. С точки зрения практического использования, преимуществом висмутсодержащих феррит-гранатовых ($Bi:ФГ$) плёнок является как наличие у них высоких магнитооптических характеристик, так и их диэлектрические свойства [2, 3]. Интерес к фрактальным структурам магнитных материалов связан с тем, что обнаруживаются корреляции между их фрактальной размерностью и экспериментальными кривыми намагничивания, магнитной доменной структурой, а также характером ферромагнитного резонанса в аморфных и наноструктурированных материалах [4-6]. Корреляции между значением фрактальной размерности и определённой конфигурацией доменной структуры активно исследуются как экспериментально [6], так и с использованием микромагнитного моделирования [7] и теоретических численных подходов [8].

Данная работа продолжает цикл исследований магнитных характеристик $Bi:ФГ$ плёнок с помощью аппарата фрактальной геометрии. Так, в работе [9] исследовалось влияние объёмных дефектов, связанных с локальным механическим повреждением и термическим лазерным воздействием, на доменную структуру и магнитные характеристики эпитаксиальных $Bi:ФГ$ пленок. В [10] 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. В дальнейшем в [11] была высказана и обоснована гипотеза о том, что полевые зависимости фрактальной размерности профиля магнитооптических изображений поверхности магнита (полученные с использованием $Bi:ФГ$ пленок) по форме совпадают с графиками первой производной намагниченности по полю $dM(H)/dH$, т.е. существует взаимосвязь между характером изменения намагниченности в импульсном поле и видом магнитооптического изображения, анализируемого с помощью аппарата фрактальной геометрии. Кроме того, результаты [12] показали, что характер изменения фрактальной размерности доменов $D_L(H)$ в окрестности объёмных дефектов пленки и в бездефектной области отличается. График зависимости $D_L(H)$ для каждой из ветвей петли гистерезиса можно удовлетворительно аппроксимировать квадратичной функцией (a dome-like character [12]).

Таким образом, описание фиксируемых закономерностей между поведением магнитных характеристик $Bi:ФГ$ пленок с различным состоянием поверхности (без дефектов и при наличии дефектов) и морфологическими характеристиками является интересной технологической задачей, в том числе с точки зрения исследования влияния различных факторов на отмеченные закономерности.

Целью данной работы является установление взаимосвязи между магнитными и морфологическими характеристиками $Bi:ФГ$ пленок различной толщины и стехиометрического состава. Кроме того, будет описано влияние объёмных дефектов на магнитные и морфологические характеристики. В качестве основной морфологической характеристики, следуя [13, 14], будем использовать фрактальную размерность 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 мВ/0,21 мА, фиксируется датчиком Холла. Полученные микрофотографии поверхности исследуемого образца анализируются в программном обеспечении, позволяющем на основе алгоритма Оцу [15] 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.

Для определения относительной фрактальной размерности изображения предварительно контрастировались до бинарного (черно-белого, см. рис. 1). Фрактальная размерность определялась методом подсчета кубов. Подробно методика определения фрактальной размерности описана в [10-12]. На полученных черно-белых изображениях области противоположного контраста соответствуют участкам пленки, намагниченным в противоположные стороны. Состоянию насыщения соответствует магнитооптическое изображение, на котором плоскость постоянного магнита окрашена однородно и не содержит областей обратного контраста. При этом размагниченное состояние соответствует изображениям, на которых количество белых и черных пикселей совпадает. Относительная намагниченность оценивалась по разности областей противоположного контраста.

3. Экспериментальные результаты и обсуждение

Нами исследовалось три образца Bi :ФГ пленок: $(GdBiLu)_3(FeGa)_5O_{12}$ толщиной 25 мкм, $(GdBiLuSm)_3(FeGa)_5O_{12}$ толщиной 6 мкм и $(GdBi)_3(FeGa)_5O_{12}$ толщиной 42 мкм. Магнитооптические изображения доменной структуры образцов представлены на рис. 1 а-в. Для плёнки $(GdBiLuSm)_3(FeGa)_5O_{12}$ исследовалась также область вблизи ростового дефекта (см. рис. 1 г). На основе анализа изображений доменных структур, полученных при перемагничивании плёнки во внешнем поле, были построены полевые зависимости намагниченности $M(H)$. Кроме того, с помощью ПО [16] определены полевые зависимости фрактальной размерности (б) и отношения приращения относительной намагниченности к приращению внешнего магнитного поля (см. рис. 2-5).

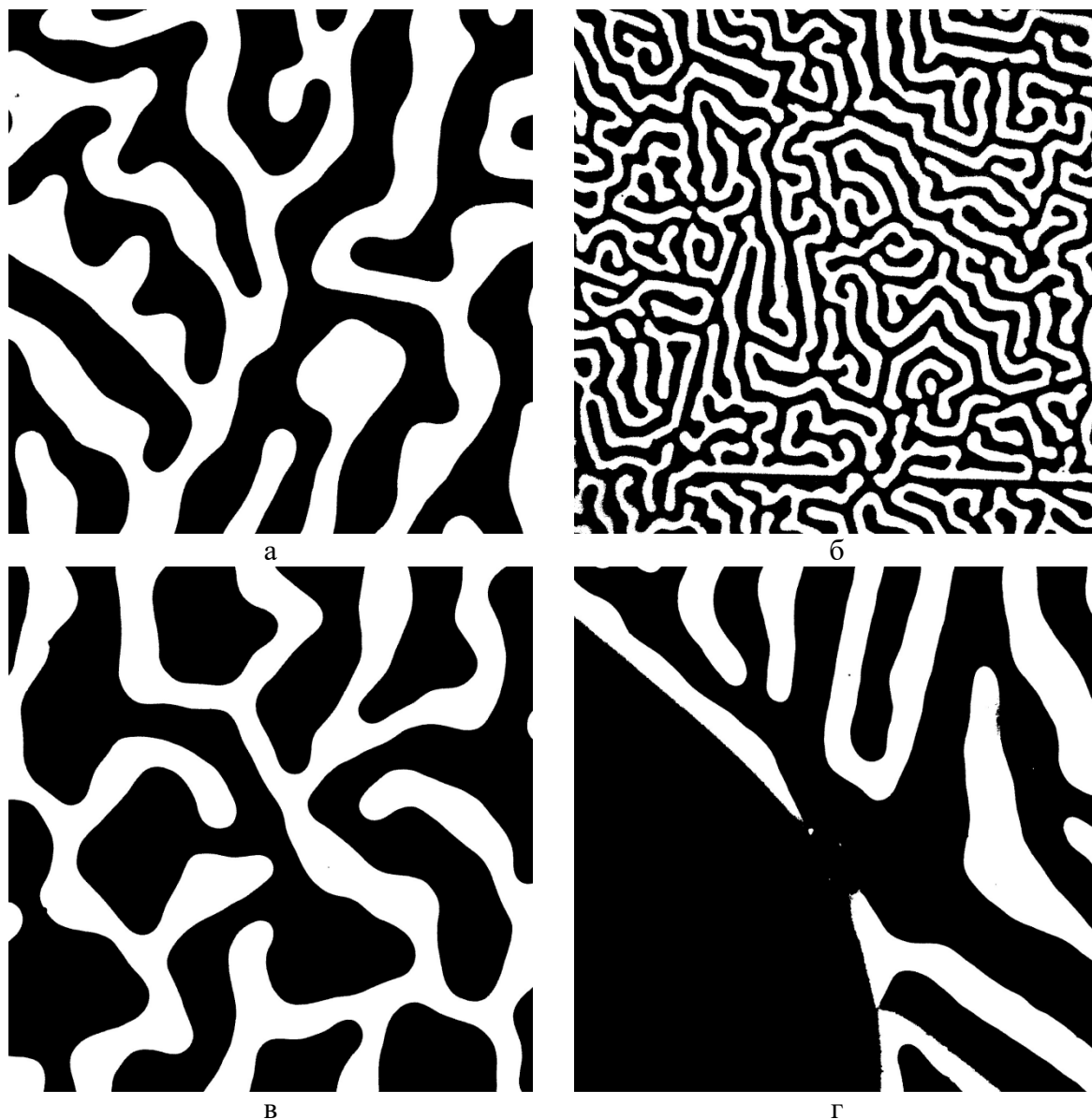


Рис. 1. Микрофотографии плёнок: а – $(GdBiLuSm)_3(FeGa)_5O_{12}$ 6 мкм, б – $(GdBiLu)_3(FeGa)_5O_{12}$ толщиной 25 мкм, в – $(GdBi)_3(FeGa)_5O_{12}$ 42 мкм на произвольном участке; г – $(GdBiLuSm)_3(FeGa)_5O_{12}$ на дефектном участке в отсутствии внешнего магнитного поля. Размер микрофотографий 283x283 мкм.

У плёнки $(GdBiLuSm)_3(FeGa)_5O_{12}$ с наименьшей из исследуемых толщин (6 мкм) зависимость $D_L(H)$ имеет куполообразный вид. На вершине этот график (см. рис. 2) испытывает разрыв так как соответствует интервалу петли гистерезиса, соответствующему состоянию насыщения (синие точки). 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 $D_L(H)$. Для плёнки толщиной $(GdBiLu)_3(FeGa)_5O_{12}$ (25 мкм) форма зависимости $D_L(H)$ заметно отличается – ее ветви могут быть аппроксимированы степенной функцией выше 1 порядка (например, квадратичной, см. рис. 3). Форма зависимости $D_L(H)$ плёнки с самой большой толщиной и составом $(GdBi)_3(FeGa)_5O_{12}$ совпадает с формой для пленки $(GdBiLuSm)_3(FeGa)_5O_{12}$ (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 пленки. 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. 2. Таким образом, изменяя толщину и состав пленки можно управлять формой и диапазоном изменения как величины $D_L(H)$, так и $dM(H)/dH$.

Наличие объемного дефекта существенным образом меняет ход предельной петли магнитного гистерезиса, зависимости фрактальной размерности и отношения приращения относительной намагниченности к приращению внешнего магнитного поля (см. рис. 5). 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, аналогичные полученным в [12], а также фиксируются магнитооптические 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 фрактальной размерности доменов $D_L(H)$ для разных участков пленки. 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 фрактальной размерности $D_L(H)$ варьируется в широких пределах при изменении толщины пленок h или наличия объемного дефекта. Данные,

представленные в Таблице 1, позволяют сравнить эти диапазоны.

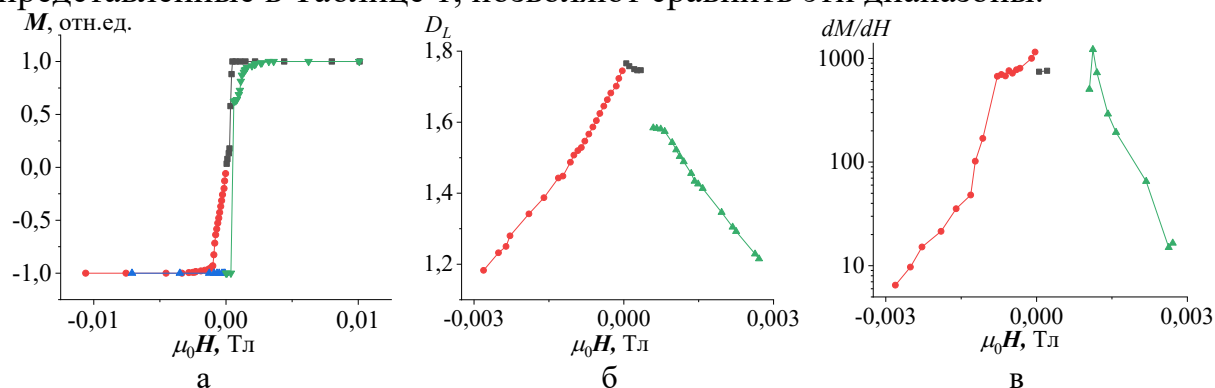


Рис. 2. Предельные петли магнитного гистерезиса (а), полевые зависимости фрактальной размерности (б) и отношения приращения относительной намагниченности к приращению внешнего магнитного поля (в) произвольного участка плёнки $(GdBiLuSm)_3(FeGa)_5O_{12}$ (6 мкм). Здесь и далее цветное обозначение соответствует следующему изменению внешнего магнитного поля: ■ – $H_{max} \rightarrow 0$; ● – $0 \rightarrow H_{min}$; ▲ – $H_{min} \rightarrow 0$; ▼ – $0 \rightarrow H_{max}$.

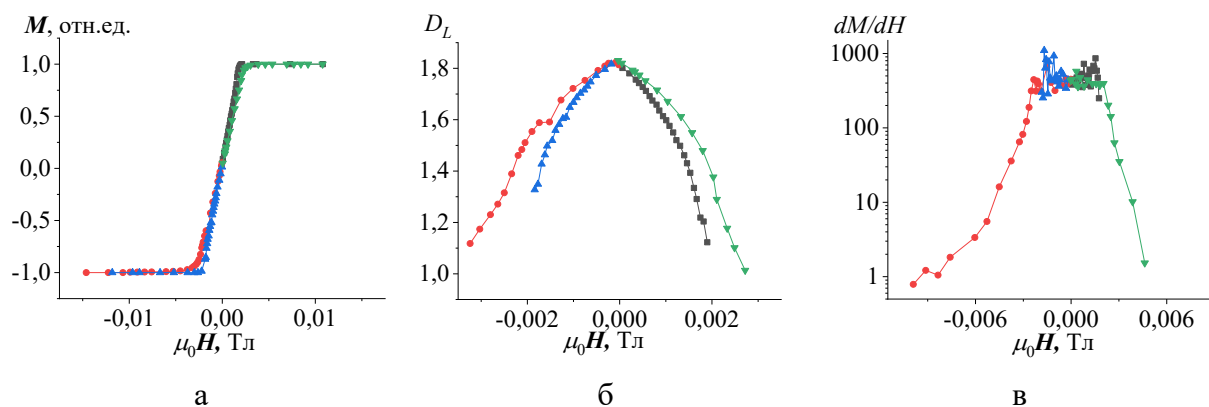


Рис. 3. Предельные петли магнитного гистерезиса (а), полевые зависимости фрактальной размерности (б) и отношения приращения относительной намагниченности к приращению внешнего магнитного поля (в) произвольного участка плёнки $(GdBiLu)_3(FeGa)_5O_{12}$ (25 мкм).

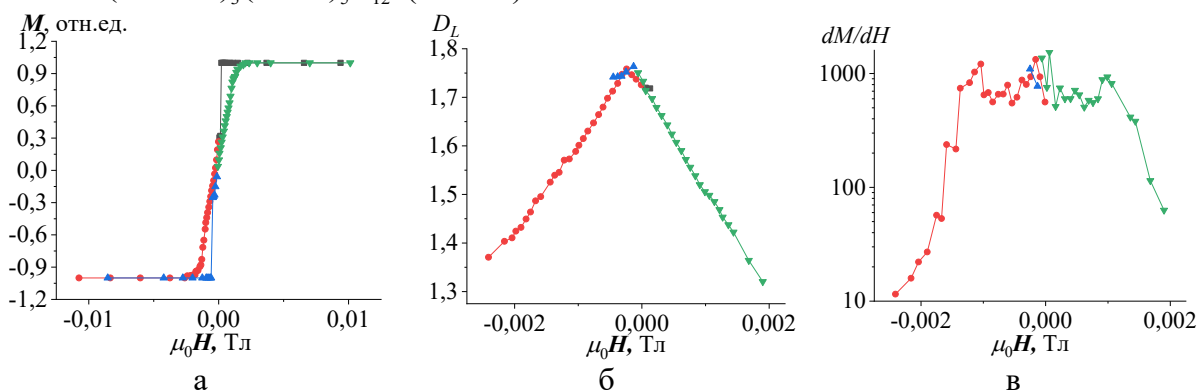


Рис. 4. Предельные петли магнитного гистерезиса (а), полевые зависимости фрактальной размерности (б) и отношения приращения относительной намагниченности к приращению внешнего магнитного поля (в) произвольного участка плёнки $(GdBi)_3(FeGa)_5O_{12}$ (42 мкм).

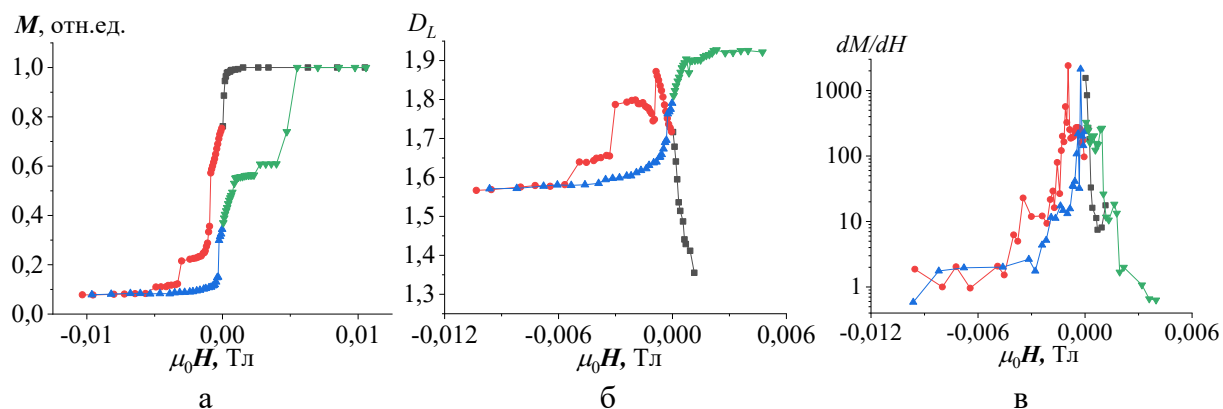


Рис. 5. Предельные петли магнитного гистерезиса (а), зависимости фрактальной размерности (б) и отношения приращения относительной намагниченности к приращению внешнего магнитного поля (в) от величины поля участка плёнки $(GdBiLuSm)_3(FeGa)_5O_{12}$ (6 мкм) в окрестности дефекта.

Если верхняя граница диапазона изменения $D_L(H)$ для бездефектных пленок разной толщины практически не меняется (1,76-1,83; погрешность изменений не превышает 0,01), то нижняя граница меняется в широких пределах от нефрактального (значение 1,01) до умеренного (значение 1,32) профиля магнитооптических изображений.

Таблица 1. Значение фрактальной размерности для различных пленок $Bi : \Phi \Gamma$.

h , мкм	6	25	42	6*
диапазон $D_L(H)$	1,18-1,77	1,01-1,83	1,32-1,76	1,36-1,92

* данные при наличии объемного дефекта.

4. Заключение

В данной работе на основе анализа полевых зависимостей намагниченности пленки $M(H)$, полученных на основе исследования перестройки доменной структуры во внешнем поле для $Bi : \Phi \Gamma$ пленок различной толщины, были описаны закономерности поведения полевых зависимостей фрактальной размерности $D_L(H)$ и первой производной намагниченности по полю $dM(H)/dH$. Были исследованы как произвольные (бездефектные) области, так и область в окрестности объемного дефекта. В области дефекта поведение предельных петель магнитного гистерезиса, полевых зависимостей фрактальной размерности и величины отношения приращения относительной намагниченности к приращению внешнего магнитного поля меняется. Эти особенности связаны с идентификацией на предельных петлях магнитного гистерезиса – областей (ступеней) неизменной величины относительной намагниченности при изменении внешнего поля. Изучение таких областей $Bi : \Phi \Gamma$ позволяет устанавливать специфические закономерности, которые пока еще в полной мере не описаны [17-19].

Авторы выражают искреннюю благодарность профессору В.Н. Бержанскому (Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского) за образцы феррит-гранатовых плёнок. Исследования выполнены при поддержке Минобрнауки РФ в рамках выполнения государственного задания в сфере научной деятельности (проект № 0817-2023-0006). Исследования проведены в лабораториях электронной микроскопии и магнитных материалов Центра коллективного пользования Тверского государственного университета.

Библиографический список:

1. **Mallmann, E.J.J.** Yttrium iron garnet: properties and applications review / E.J.J. Mallmann, A.S.B. Sombra, J.C. Goes, P.B.A. Fechine // *Solid State Phenomena*. – 2013. – V. 202. – P. 65-96. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.202.65.
2. **Zvezdin, A.K.** Modern magneto-optics and magneto-optical materials / A.K. Zvezdin, V.A. Kotov. – New York: Taylor & Francis Group, 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. **Зигерт, А.Д.** Фрактальный анализ лабиринтной доменной структуры феррит-гранатовых пленок в процессе перемагничивания / А.Д. Зигерт, Г.Г. Дунаева, Н.Ю. Сдобняков // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. – 2021. – Вып. 13. – С. 134-145. DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.134.
11. **Зигерт, А.Д.** Фрактальный анализ магнитооптических изображений поверхности магнита после воздействия импульсным полем / А.Д. Зигерт, Е.М. Семенова, Н.Б. Кузьмин, Н.Ю. Сдобняков // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. – 2022. – Вып. 14. – С. 101-107. DOI: 10.26456/pcascnn/2022.14.101.
12. **Zigert, A.D.** Fractal dimension behaviour of maze domain pattern in ferrite-garnet films during magnetisation reversal / A.D. Zigert, G.G. Dunaeva, E.M. Semenova et al. // *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*. – 2022. – V. 35. – I. 8. – P. 2187-2193. DOI: 10.1007/s10948-022-06301-w.
13. **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.
14. **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.
15. **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.
16. Gwyddion – Free SPM (AFM, SNOM/NSOM, STM, MFM, ...) data analysis software. – Режим доступа:

www.url: <http://gwyddion.net>. – 15.08.2023.

17. **Нан, В.-S.** Fractal study of magnetic domain patterns / В.-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.

18. **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.

19. **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. Mallmann E.J.J., Sombra A.S.B., Goes J.C., Fechine P.B.A. Yttrium iron garnet: properties and applications review, *Solid State Phenomena*, 2013, vol. 202, pp. 65-96. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.202.65.

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. Zigert A.D., Dunaeva G.G., Sdobnyakov N.Yu. Fraktal'nyj analiz labirintnoj domennoj struktury ferrit-granatovykh plenok v protsesse peremagnichivaniya [Fractal analysis of the maze-like domain structure of ferrite-garnet films in the process of magnetization], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2021, issue 11, pp. 134-145. DOI: 10.26456/pcascnn/2021.11.134. (In Russian).

11. Zigert A.D., Semenova E.M., Kuz'min N.B., Sdobnyakov N.Yu. Fractal analysis of magneto-optical images of a magnet surface after exposure to a pulsed field, *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2022, issue 14, pp. 101-107. DOI: 10.26456/pcascnn/2022.14.101. (In Russian).

12. Zigert A.D., Dunaeva G.G., Semenova E.M. et al. Fractal dimension behaviour of maze domain pattern in ferrite-garnet films during magnetisation reversal, *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 2022, vol. 35, issue 8, pp. 2187-2193. DOI: 10.1007/s10948-022-06301-w.

13. 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).

14. 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).

15. 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.

16. Gwyddion – Free SPM (AFM, SNOM/NSOM, STM, MFM, ...) data analysis software. Available at: [www.url: http://gwyddion.net](http://gwyddion.net) (accessed 15.08.2023).

17. 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.

18. 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.

19. 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

THE FRACTAL DIMENSION BEHAVIOUR OF THE DOMAIN PATTERNS IN FERRITE-GARNET FILMS

A.D. Zigert, G.G. Dunaeva, N.B. Kuz'min, E.M. Semenova, N.Yu. Sdobnyakov

Tver State University, Tver, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.098

Abstract: In this work, using a set of experimental techniques and specialized software, we studied bismuth-containing ferrite garnet films of various thicknesses and with different stoichiometric compositions grown on gadolinium gallium garnet substrates. The limiting magnetic hysteresis loops for defective and defect-free sections of films were obtained using the optical magnetometry method. The field dependences of the fractal dimension of magneto-optical images were also obtained. For various compositions and thicknesses of bismuth-containing ferrite-garnet films, ranges of changes in the fractal dimension were obtained. The fractal dimension was determined by the counting cube method. The mutual behavior of the field dependences of the fractal dimension and the first derivative of magnetization with respect to the field $dM(H)/dH$ is analyzed. The characteristic features of the behavior of the first derivative of magnetization with respect to the field $dM(H)/dH$ with a change in the film thickness, as well as for defective and defect-free sections of films, have been established.

Keywords: *magnetic films, ferrite garnets, bulk defects, domain structure, fractal dimension, $dM(H)/dH$ dependence.*

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

Дунаева Галина Григорьевна – аспирант 2 года обучения, ассистент кафедры физики конденсированного состояния, ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Кузьмин Николай Борисович – студент 1 курса магистратуры кафедры физической химии ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Семенова Елена Михайловна – к.ф.-м.н., доцент 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 postgraduate student, Assistant, Condensed Matter Physic Department, Tver State University

Nickolay B. Kuz'min – 1st year graduate student, Physical Chemistry Department, Tver State University

Elena M. Semenova – Ph. D., Docent, Condensed Matter Physics Department, Tver State University

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

Поступила в редакцию/received: 01.09.2023; после рецензирования/revised: 05.10.2023; принята/accepted: 10.10.2023.