

УДК 537.624

Оригинальная статья

Корреляция магнитных характеристик и фрактальной размерности магнитооптических изображений постоянных магнитов

А.Д. Зигерт, Н.Б. Кузьмин, Е.М. Семенова, А.Ю. Карпенков, А.И. Иванова,
Н.Ю. Сдобняков

ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»
170100, Россия, Тверская область, Тверь, Садовый пер., 35
alex-zigert@yandex.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.119

Аннотация: Статья продолжает цикл исследования постоянных магнитов с разными механизмами перемагничивания (механизм зародышеобразования, механизм смещения доменных границ). В данной работе установлена корреляция между магнитными характеристиками постоянных магнитов (Y25 и *AlNiCo*) и фрактальной размерностью магнитооптических изображений их полей рассеяния. В качестве индикатора использовалась висмутсодержащая феррит-гранатовая плёнка. Показано, что предельные значения фрактальной размерности: 1,76 для ферритового магнита и 1,85 для магнита *AlNiCo* согласуются с результатами, полученными для магнитов *NdFeB* (марка N35) и *SmCo* (марка KC37), как и поведение полевой зависимости фрактальной размерности. Поведение полевой зависимости намагниченности $M_{mo}(H_{rev})$ имеет схожие черты с аналогичной зависимостью, зарегистрированной для постоянного магнита *NdFeB* (марка N35), но величины размагничивающих полей у образца Y25 намного меньше. В работе обсуждается взаимосвязь механизмов перемагничивания постоянных магнитов с ходом зависимости $M_{mo}(H_{rev})$.

Ключевые слова: постоянные магниты, фрактальная размерность, магнитооптика, зависимость $dM(H_{rev})/dH_{rev}$.

1. Введение и объекты исследования

В настоящее время экспериментаторы и теоретики все больше внимания обращают на использование аппарата фрактальной геометрии для установления закономерностей при формировании морфологии поверхности пленочных структур [1, 2], для оценки качества покрытия рабочих элементов [3, 4], для описания изменения характера доменной структуры пленок [5-9] и постоянных магнитов, магнитных материалов и наночастиц [10-16], а также в ряде других приложений [17, 18].

В данной работе мы продолжаем цикл исследований, посвященных установлению корреляций между магнитными характеристиками, полученными на основе визуализации магнитооптических изображений полей рассеяния постоянных магнитов, для которых висмутсодержащая феррит-гранатовая пленка выступала в качестве индикаторной среды [10-12]. В качестве объектов исследования выступали постоянные магниты: феррит с содержанием бария или стронция марки Y25 и *AlNiCo*. Примечательно, что для отмеченных выше марок постоянных магнитов практически полностью отсутствуют работы, посвященные описанию их поверхности с использованием аппарата фрактальной геометрии. Нам известны лишь работы [19, 20], в которых поверхности постоянного

магнита марки *AlNiCo* обладает высокой степенью организации $D_L > 1,9$. При этом какие-то конкретные магнитные характеристики образцов в работах [19, 20] не фиксировались и не обсуждались, хотя в [20] отмечена важность скорости охлаждения при формировании рельефа образца.

Изучение процессов перемагничивания постоянных магнитов взаимодополняющими комплементарными методами важно с практической точки зрения, так как способствует пониманию физических механизмов магнитного гистерезиса и может быть использовано при разработке новых магнитных материалов. Так ранее в работах [10-12] нами было предложено совместно использовать две различные методики изменения магнитного поля: однократное насыщение с последующим дискретным изменением величины размагничивающего импульсного поля и намагничивание до насыщения перед каждым воздействием размагничивающего импульсного поля. В частности показано наличие корреляции между полевыми зависимостями фрактальной размерности профиля магнитооптических изображений полей рассеяния магнита $D_L(H_{rev})$ и соответствующими зависимостями намагниченности $M_{mo}(H_{rev})$ (H_{rev} – размагничивающее поле). Для постоянных магнитов (КС37 и N35) в размагниченном состоянии фрактальная размерность максимальна и составляет 1,82, а в состояниях остаточной намагниченности значение фрактальной размерности варьируется в достаточно узком диапазоне 1,24-1,32.

Исследуемые в рамках данной работы образцы магнитов имели форму цилиндра. Основание образца Y25 находилось в базисной плоскости, т.е. ось текстуры постоянного магнита направлена вдоль образующей цилиндра, в то время как ось текстуры образца *AlNiCo* была направлена поперёк образующей цилиндра. Геометрические размеры ферритового магнита составили: высота $h = 2$ мм, радиус $r = 1,5$ мм, а для магнита *AlNiCo*: $h = 1,1$ мм, $r = 2,4$ мм.

Таким образом, целью настоящей работы является установление корреляций между магнитными характеристиками постоянных магнитов (Y25 и *AlNiCo*) и фрактальной размерностью магнитооптических изображений их полей рассеяния.

2. Методы исследования

Методом вибрационного магнитометра были получены основные магнитные характеристики исследуемых образцов. Для образца Y25 определены остаточная магнитная индукция $B_r = 0,36$ Тл и максимальное энергетическое произведение $(BH)_{max} = 53$ кДж/м³, а для образца *AlNiCo* – остаточная магнитная индукция $B_r = 0,06$ Тл и максимальное

энергетическое произведение $(BH)_{\max} = 34$ кДж/м³. Качественный и количественный анализ состава образцов постоянных магнитов (см. Таблицы 1 и 2) был проведен методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии с помощью детектора INCA-energy (аналитической приставки к сканирующему электронному микроскопу JEOL 6610LV на основе полупроводникового кремний-дрейфового детектора с площадью активной зоны детектора 20 мм²).

Методика, реализованная на базе горизонтального металлографического микроскопа МИМ-8, позволяет наблюдать и регистрировать магнитооптические изображения полей рассеяния постоянных магнитов, полученные с помощью магнитооптической индикаторной плёнки методом Керра, после воздействия внешнего импульсного магнитного поля величиной до 3 Тл. Импульсное магнитное поле создаётся с помощью генератора импульсных магнитных полей оригинальной конструкции. Дискретность установки величины импульса составляет 10 мТл. Полученные изображения для последующего анализа предварительно контрастировали до бинарного (черно-белого) на основе алгоритма Оцу [21].

Таблица 1. Концентрация химических элементов в образце ферритового магнита марки Y25.

Химический элемент	<i>O</i>	<i>Fe</i>	<i>Sr</i>
ат. %	65,2	32,1	2,7

Таблица 2. Концентрация химических элементов в образце магнита *AlNiCo*.

Химический элемент	<i>Al</i>	<i>Fe</i>	<i>Co</i>	<i>Ni</i>	<i>Cu</i>	прочие
ат. %	16,9	45,5	21,3	12,8	3,4	0,1

Фрактальная размерность D_L определялась методом подсчета кубов с помощью программного обеспечения [22]. 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 M_{mo} оценивалась по разности областей противоположного контраста.

3. Экспериментальные результаты и обсуждение

На рис. 1. представлены результаты эксперимента по

перемагничиванию образца Y25 в импульсном магнитном поле. На рис. 1 приведены графики полевых зависимостей M_{mo} и соответствующие им зависимости фрактальной размерности.

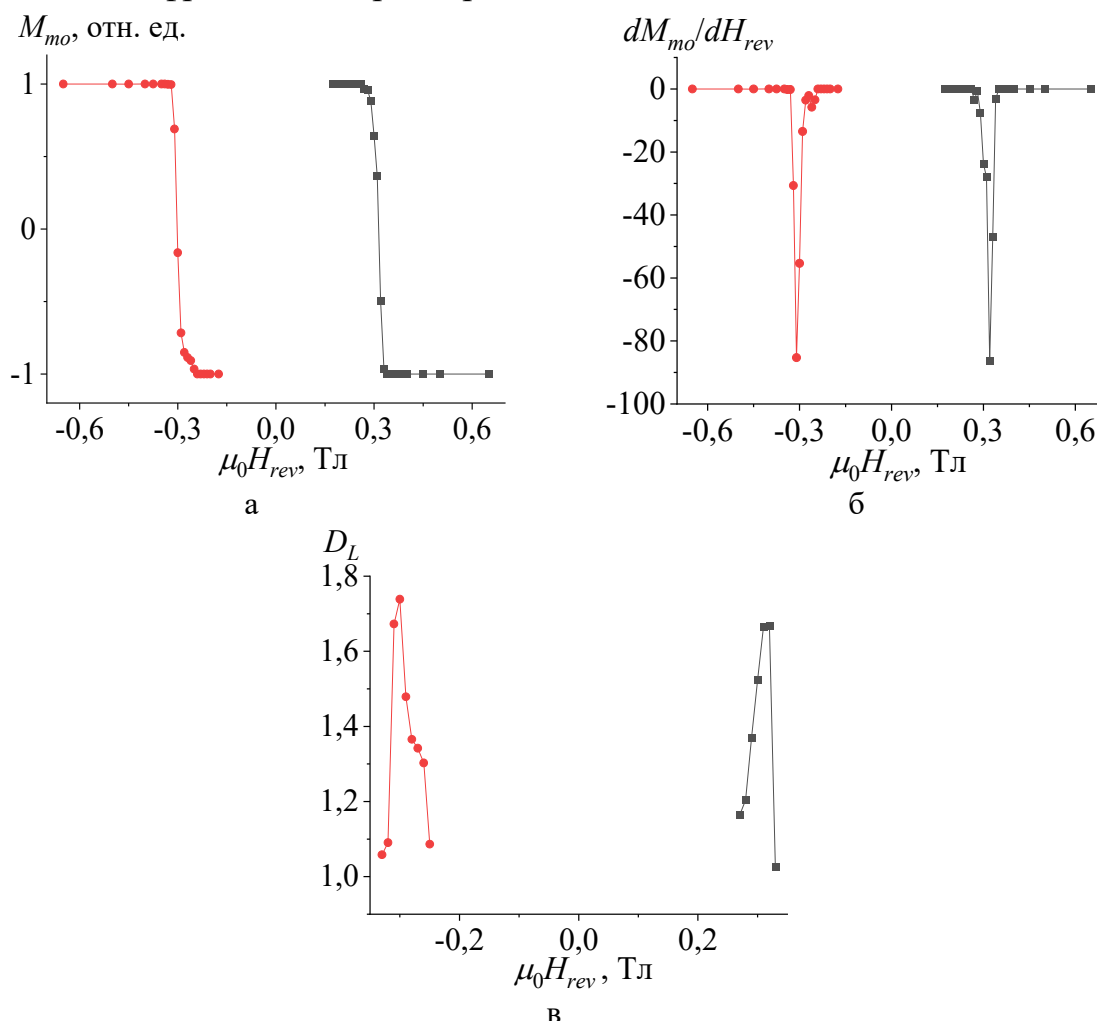


Рис. 1. Зависимость относительной намагниченности, рассчитанной по магнитооптическим данным $M_{mo}(H_{rev})$ (а), производной $dM_{mo}(H_{rev})/dH_{rev}$ (б) и фрактальной размерности $D_L(H_{rev})$ (в) от внешнего импульсного магнитного поля ферритового постоянного магнита марки Y25.

Поведение зависимости $M_{mo}(H_{rev})$ имеет ряд общих черт с аналогичными зависимостями, зарегистрированными нами для постоянного магнита NdFeB марки N35 [11], но величины размагничивающих полей у образца Y25 намного меньше. Это свидетельствует о схожих механизмах перемагничивания у данных магнитов. В то же время, поведение $M_{mo}(H_{rev})$ магнита SmCo марки КС37 [12], имеющего другой механизм перемагничивания, отличается. Из рис. 1 а и б видно, что форма графика полевой зависимости фрактальной размерности $D_L(H_{rev})$ совпадает с формой графика $dM_{mo}(H_{rev})/dH_{rev}$, что согласуется с результатами эксперимента [10].

На рис. 2 представлены результаты эксперимента по перемагничиванию образца $AlNiCo$ в импульсном магнитном поле. Данный эксперимент отличается от представленного выше и экспериментов [11, 12] тем, что ось текстуры магнита ориентирована не вдоль, а поперёк оси лёгкого намагничивания индикаторной висмутсодержащей феррит-гранатовой плёнки и направлению внешнего магнитного поля. Тем не менее как видно из рис. 2, представленная в данной статье методика эксперимента позволяет анализировать процесс перемагничивания и в этом случае.

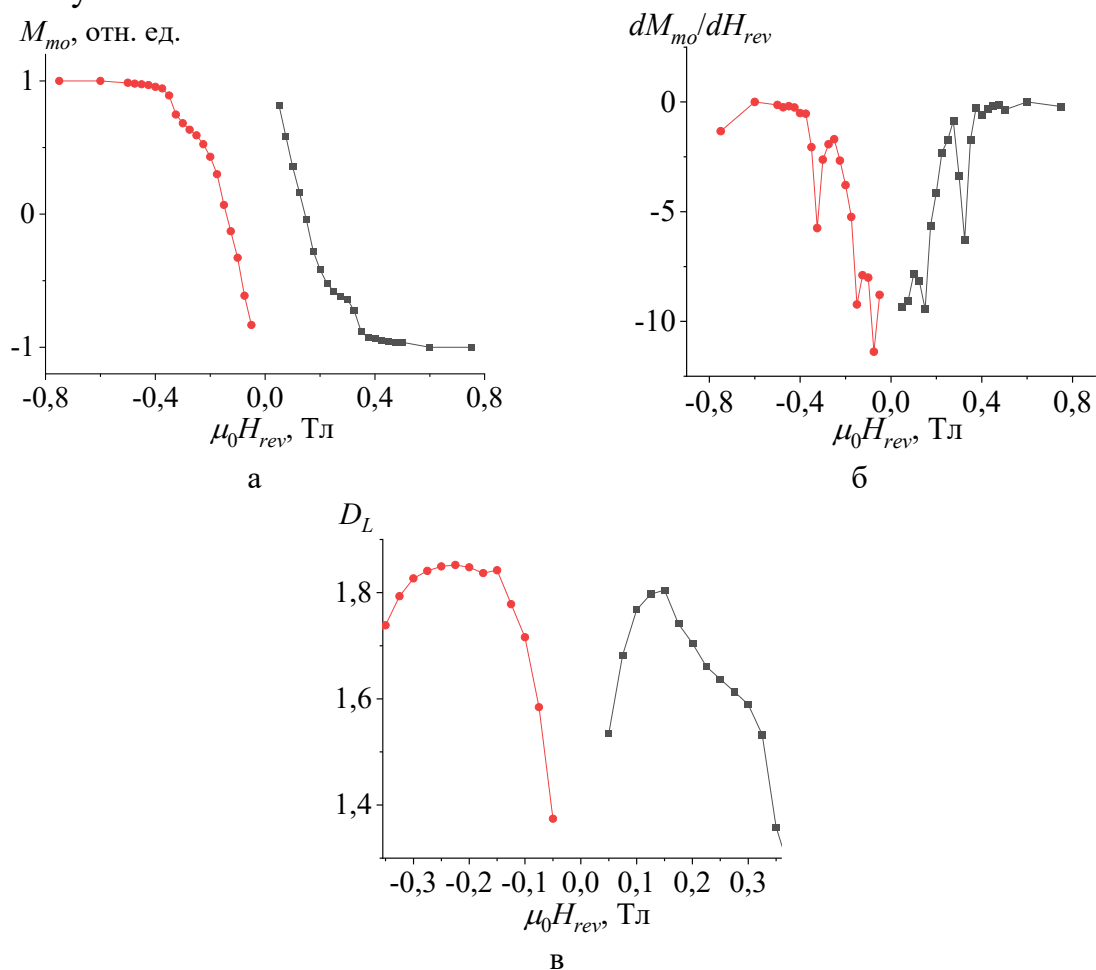


Рис. 2. Зависимость относительной намагниченности, рассчитанной по магнитооптическим данным $M_{mo}(H_{rev})$ (а), производной $dM_{mo}(H_{rev})/dH_{rev}$ (б) и фрактальной размерности $D_L(H_{rev})$ (в) от внешнего импульсного магнитного поля постоянного магнита $AlNiCo$.

Предельные значения фрактальной размерности: 1,76 для ферритового магнита и 1,85 для магнита $AlNiCo$ согласуются с результатами полученными для магнитов $NdFeB$ и $SmCo$ [11, 12], как и поведение полевой зависимости фрактальной размерности в целом. Это свидетельствует об оправданности использования фрактальной размерности магнитооптических изображений как морфологического

параметра при изучении процессов перемангничивания постоянных магнитов различных составов.

4. Заключение

Метод анализа магнитооптических изображений (аппарат фрактальной геометрии), полученных с использованием висмутсодержащей феррит-гранатовой индикаторной плёнки, был применён для исследования процессов перемангничивания постоянных магнитов в импульсном внешнем магнитном поле. Показано, что зависимости первой производной остаточной намагниченности по величине внешнего импульсного поля $dM_{mo}(H_{rev})/dH_{rev}$ коррелируют с поведением фрактальной размерности профиля соответствующих магнитооптических изображений. Полученные зависимости согласуются с аналогичными полученными нами ранее в работах [11, 12] постоянных магнитов *NdFeB* и *SmCo*. Таким образом, на примере постоянных магнитов различных составов (ферритовый магнит Y25, *AlNiCo*, *NdFeB* и *SmCo*) установлена взаимосвязь между изменением магнитного состояния магнитного материала (остаточной намагниченностью) и фрактальной размерностью магнитооптических изображений полей рассеяния его поверхности.

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. **Сдобняков, Н.Ю.** Морфологические характеристики и фрактальный анализ металлических пленок на диэлектрических поверхностях: монография / Н.Ю. Сдобняков, А.С. Антонов, Д.В. Иванов. – Тверь: ТвГУ, 2019. – 168 с.
2. **Zhou, W.** Fractal analysis on surface topography of thin films: a review / W. Zhou, Y. Cao, H. Zhao et al. // Fractal and fractional. – 2022. – V.6. – I. 3. – Art. № 135. – 30 p. DOI: 10.3390/fractalfract6030135.
3. **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.
4. **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.
5. **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.
6. **Зигерт, А.Д.** Фрактальный анализ лабиринтной доменной структуры феррит-гранатовых пленок в процессе перемангничивания / 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.
7. **Довбня, Л.А.** Фрактальная модель перемангничивания 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.
8. **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.
9. **Зигерт, А.Д.** Поведение фрактальной размерности доменных структур в феррит-гранатовых пленках / А.Д. Зигерт, Г.Г. Дунаева, Н.Б. Кузьмин, Е.М. Семенова, Н.Ю. Сдобняков // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2023. – Вып. 15. – С. 97-107. DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.098.
10. **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.
11. **Зигерт, А.Д.** Закономерности изменения фрактальной размерности магнитооптических изображений магнитов после воздействия импульсным полем / А.Д. Зигерт, Н.Б. Кузьмин, Е.М. Семенова и др. // Физика твердого тела. – 2023. – Т. 65. – Вып. 15. – С. 2121-2124. DOI: 10.61011/FTT.2023.12.56738.5091k.
12. **Зигерт, А.Д.** Фрактальный анализ магнитооптической визуализации перемагничивания постоянного магнита в импульсном поле / А.Д. Зигерт, Н.Б. Кузьмин, Н.Ю. Сдобняков и др. / Известия РАН. Серия физическая. – 2023. – Т. 87. – № 10. – С. 1385-1388. DOI: 10.31857/S0367676523702423.
13. **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.
14. **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.
15. **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.
16. **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.
17. **Persson, B.N.J.** On the fractal dimension of rough surfaces / B.N.J. Persson // Tribology Letters. – 2014. – V. 54. – I. 1. – P. 99-106. DOI: 10.1007/s11249-014-0313-4.
18. **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.
19. **Fei, W.D.** Fractal characteristic of the microstructure in Alnico8 / W.D. Fei, W.G. Chu, D.Z. Yang // Journal of Materials Science Letters. – 2000. – V. 19. – I. 14. – P. 1221-1223. DOI: 10.1023/A:1006700908456.
20. **Zhukov, A.S.** Structural studies of additive hard magnetic alloy Alnico24 / A.S. Zhukov, B.K. Barakhtin, V.V. Bobyr, A.D. Titova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – V. 919. – Art. № 022021. – 6 p. DOI: 10.1088/1757-899X/919/2/022021.
21. **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.
22. **Свидетельство № 2023660111 Российская Федерация.** Fractal domains Pro: программа анализа 2D микрофотографий поверхности и определения ее фрактальной размерности / Н.Ю. Сдобняков, В.А. Анофриев, А.Д. Зигерт, Н.Б. Кузьмин; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет». – № 2023617714; заявл. 26.04.2023; зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 17.05.2023. 1 с.

References:

1. 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).
2. Zhou W., Cao Y., Zhao H. et al. Fractal analysis on surface topography of thin films: a review, *Fractal and fractional*, 2022, vol. 6, issue 3, art. no. 135, 30 p. DOI: 10.3390/fractalfract6030135.
3. 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).
4. 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).
5. 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).
6. 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/2021.13.134. (In Russian).
7. 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.
8. 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.
9. Zigert A.D., Dunaeva G.G., Kuz'min N.B., Semenova E.M., Sdobnyakov N.Yu. The fractal dimension behaviour of the domain patterns in ferrite-garnet films, *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2023, issue 15, pp. 98-107. DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.098. (In Russian).
10. 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).
11. Zigert A.D., Kuz'min N.B., Semenova E.M. et al. Patterns of the fractal dimension evolution of magneto-optical images of magnets after exposure to a pulsed field, *Physics of the Solid State*, 2023, vol. 65, issue 12, pp. 2037-2039. DOI: 10.61011/PSS.2023.12.57657.5091k.
12. Zigert A.D., Kuz'min N.B., Sdobnyakov N.Yu. et al. Fractal analysis of magneto-optical visualization of the remagnetization of a permanent magnet in a pulsed field // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics.* – 2023. – V. 87. – I. 10. – P. 1421-1424. DOI: 10.3103/S1062873823703422.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. Persson B.N.J. On the fractal dimension of rough surfaces, *Tribology Letters*, 2014, vol. 54, issue 1, pp. 99-106. DOI: 10.1007/s11249-014-0313-4.
18. 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.
19. Fei W.D., Chu W.G., Yang D.Z. Fractal characteristic of the microstructure in Alnico8, *Journal of Materials Science Letters*, 2000, vol. 19, issue 14, pp. 1221-1223. DOI: 10.1023/A:1006700908456.
20. Zhukov A.S., Barakhtin B.K., Bobyr V.V., Titova A.D. Structural studies of additive hard magnetic alloy Alnico24, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 919, art. № 022021, 6 p. DOI: 10.1088/1757-899X/919/2/022021.
21. 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.

22. Sdobnyakov N.Yu., V.A. Anofriev, A.D. Zigert, N.B. Kuz'min *Fractal domains Pro: programma analiza 2D mikrofotografij poverkhnosti i opredeleniya ee fraktal'noj razmernosti* [Fractal domains Pro: program for analyzing 2D microphotographs of a surface and determining its fractal dimension]. Certificate RF, no. 2023660111, 2023. (In Russian).

Original paper

Correlation of magnetic characteristics and fractal dimension of magneto-optical images of permanent magnets

A.D. Zigert, N.B. Kuz'min, E.M. Semenova, A.Yu. Karpenkov, A.I. Ivanova, N.Yu. Sdobnyakov
Tver State University, Tver, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.119

Abstract: The article continues a series of studies of permanent magnets with different magnetization reversal mechanisms (nucleation, domain boundary displacement). In this work, a correlation is established between magnetic characteristics of permanent magnets (Y25 and *AlNiCo*) and the fractal dimension of magneto-optical images of their stray fields. Bismuth-containing ferrite-garnet films were used as an indicator. It is shown that the limiting values of the fractal dimension: 1,76 for a ferrite magnet and 1,85 for an *AlNiCo* magnet, are consistent with the results obtained for *NdFeB* (grade N35) and *SmCo* (grade KC37) magnets, as is the behavior of the field dependence of the fractal dimension. The behavior of the field dependence of magnetization $M_{mo}(H_{rev})$ has similar features to a similar dependence recorded for a permanent magnet *NdFeB* (grade N35), but the values of the demagnetizing fields for the Y25 sample are much smaller. The paper discusses the relationship between the mechanisms of magnetization reversal of permanent magnets and the behavior of the $M_{mo}(H_{rev})$ dependence.

Keywords: permanent magnets, fractal dimension, magneto-optics, $dM(H_{rev})/dH_{rev}$ dependence.

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

Кузьмин Николай Борисович – студент 2 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»

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

Иванова Александра Ивановна – к.ф.-м.н., доцент кафедры прикладной физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

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

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

Nickolay B. Kuz'min – 2nd year graduate student, Physical Chemistry Department, Tver State University

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

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

Alexandra I. Ivanova – Ph. D., Docent, Applied Physic Department, Tver State University

Nickolay Yu. Sdobnyakov – Dr. Sc., Docent, General Physics Department, Tver State University

Поступила в редакцию/received: 20.08.2024; после рецензирования/revised: 15.09.2024; принята/accepted: 20.09.2024.