

**ФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МАГНИТООПТИЧЕСКИХ
ИЗОБРАЖЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ МАГНИТА ПОСЛЕ
ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНЫМ ПОЛЕМ**

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

ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

170100, Россия, Тверь, Садовый пер., 35

nsdobnyakov@mail.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2022.14.101

Аннотация: Представлены результаты фрактального анализа изображений поверхности постоянного магнита КС37, полученных методом полярного эффекта Керра с помощью индикаторной висмутосодержащей феррит-гранатовой пленки после перемагничивания импульсным полем 0,1 - 1,5 Тл. Полученные зависимости остаточной намагниченности от величины внешнего импульсного поля сопоставляются с фрактальной размерностью магнитооптических изображений поверхности магнита после воздействия импульсного поля. Высказана гипотеза о том, что полевые зависимости фрактальной размерности профиля магнитооптических изображений поверхности магнита по форме совпадают с графиками первой производной намагниченности по полю $dM_r(H)/dH$, т.е. существует взаимосвязь между характером изменения намагниченности в импульсном поле и видом магнитооптического изображения, анализируемого с использованием аппарата фрактальной геометрии.

Ключевые слова: постоянный магнит, эффект, феррит-гранатовые пленки, доменная структура, фрактальная размерность, производная намагниченности по магнитному полю.

1. Введение и объекты исследования

Перемагничивание постоянных магнитов происходит по петле гистерезиса, параметры которой (намагниченность насыщения, остаточная намагниченность и коэрцитивная сила) являются важнейшими критериями для применения магнитов в устройствах автоматики, электротехники и электроники [1-3]. Существует ряд аттестованных методик измерения полевых зависимостей намагниченности $M(H)$ образцов, позволяющих получить их интегральные гистерезисные характеристики [4, 5]. Однако не менее важным является независимый анализ перемагничивания их поверхности, поскольку отдельные процессы как препятствующие, так и способствующие перемагничиванию протекают именно на поверхности, а также на границах структурных элементов (зерен и/или фаз). Исследование перемагничивания поверхности ферромагнитного монокристалла или отдельного зерна сплава может быть осуществлено на основе наблюдений трансформации их магнитной доменной структуры (ДС) во внешнем магнитном поле [6-8]. В случае же спеченного постоянного магнита, образованного множеством зерен, такой подход требует большой статистики измерений, так как поведение ДС одного или нескольких зерен постоянного магнита может не отражать поведение системы в целом. Для

изучения магнитного состояния поверхности магнетика можно задействовать индикаторную пленку феррита-граната, которая позволяет визуализировать магнитные поля рассеяния объекта, помещенного над ней. Этот способ позволяет магнитооптическими методами регистрировать поля рассеяния всего образца или его части в окрестности контакта с пленкой. Градиенты полей рассеяния ДС и неоднородно намагниченных структурных составляющих визуализируются пленкой как области, различающиеся по контрасту, при этом регистрируется компонента намагниченности, перпендикулярная ее плоскости, так как пленка одноосная.

Применение фрактальной геометрии к линейным доменным разветвленным структурам (line structure patterns of the multi-branched domains) позволило в [9] определить значения D_L диапазоне $1,33 \div 1,65$ для гранатовых пленок. В работе [10] для феррогранатовой пленки в рамках описанной модели процесса перемагничивания получены фрактальные доменные кластеры с $D_L \sim 1,7$. Примечательно, что, например, в [11] для изучения эволюции лабиринтной доменной структуры введен даже специальный термин геометрический морфогенез лабиринтной доменной структуры во внешнем магнитном поле, каждому этапу которого соответствует свое значение фрактальной размерности. Также предсказано некоторое пороговое значение магнитного поля, ниже которого фрактальная размерность выходит на некоторое асимптотическое значение соответствующее высокоразвитому фрактальному микрорельефу.

Данную работу можно рассматривать как продолжение комплексных исследований корреляции фрактальной размерности и магнитных характеристик магнетиков [12-16] при различных условиях эксперимента, включая термическое воздействие и влияние импульсного магнитного поля. Целью данной работы является изучение взаимосвязи между полевыми зависимостями фрактальной размерности профиля магнитооптических изображений поверхности магнита и остаточной намагниченности после воздействия импульсного поля. Установление возможных закономерностей между магнитным состоянием образца и фрактальной размерностью поверхности, в том числе ДС также апробировано нами в ряде работ [17-19].

2. Описание эксперимента

В данной работе приведён анализ результатов эксперимента, представленного в работе [16]. Эксперимент заключался в осуществлении воздействия на постоянный магнит импульсным полем разной величины и знака. Длительность импульса составляла 40 мкс, величина поля варьировалась от 0,1 до 1,5 Тл. Визуализация полей рассеяния магнита

осуществлялась через несколько секунд после импульса с помощью индикаторной $Bi:ФГ$ пленки методом полярного эффекта Керра. Анализ полученных изображений позволяет оценить относительную остаточную намагниченность образца, а также определить фрактальную размерность полей его рассеяния. Отметим, что собственная лабиринтная ДС пленки не вносит существенного вклада в изображения, так как ее поверхность полностью намагничивается в поле магнита.

3. Результаты и обсуждение

На основании магнитооптических изображений, полученных после последовательного воздействия импульсного поля на магнит, размещенный на пленке [16], были построены графики зависимости производной остаточной относительной намагниченности по внешнему полю $dM_r(H)/dH$ (см. рис. 1 а) и фрактальной размерности профиля $D_L(H)$ (см. рис. 1 б) от внешнего импульсного магнитного поля.

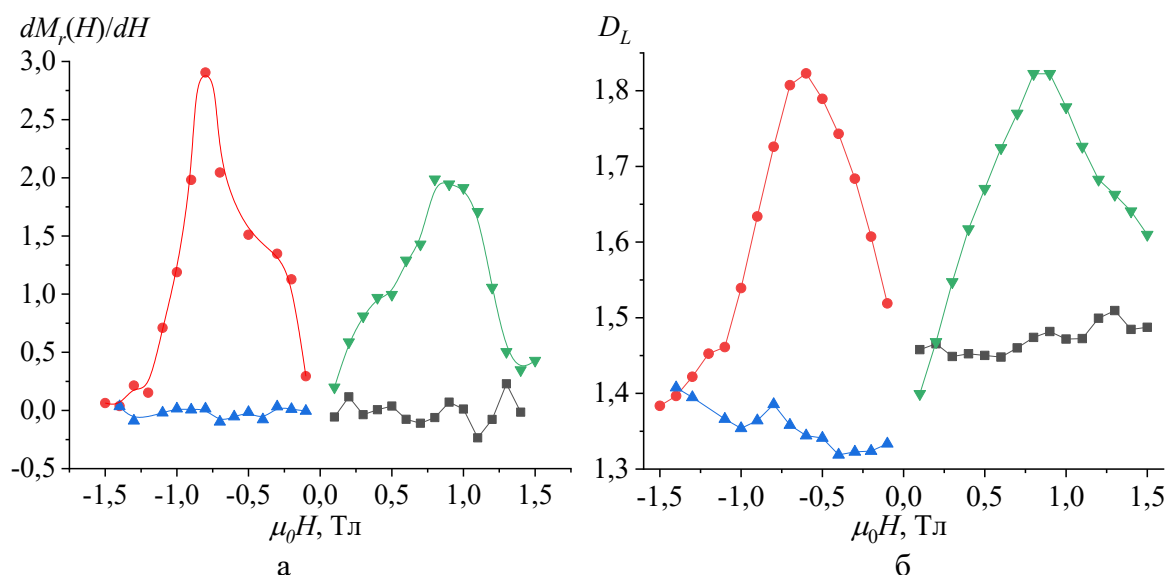


Рис 1. Зависимость производной $dM_r(H)/dH$ (а) и фрактальной размерности профиля $D_L(H)$ (б) от величины импульсного магнитного поля. Цветовое обозначение соответствует следующему изменению внешнего импульсного магнитного поля: \blacksquare – $H_{\max} \rightarrow 0$; \bullet – $0 \rightarrow H_{\min}$; \blacktriangle – $H_{\min} \rightarrow 0$; \blacktriangledown – $0 \rightarrow H_{\max}$.

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

Вместе с тем, есть отдельные отличительные особенности в графиках, приведенных на рис. 1. В частности можно отметить разную

величину пиков производных $dM_r(H)/dH$ (участки $\bullet - 0 \rightarrow H_{\min}$; $\blacktriangledown - 0 \rightarrow H_{\max}$) и наоборот практически одинаковое значение (участки $\blacksquare - H_{\max} \rightarrow 0$; $\blacktriangle - H_{\min} \rightarrow 0$) по сравнению с аналогичными зависимостями фрактально размерности профиля $D_L(H)$. Для более глубокой интерпретации полученных результатов необходимо получение дополнительных результатов на различных образцах. Однако уже сейчас очевидно, что фрактальная размерность для постоянных магнитов может быть одной из характеристик для описания их магнитного состояния.

4. Заключение

Аппарат фрактальной геометрии был применен для анализа изображений базисной поверхности постоянного магнита КС37, полученных с помощью индикаторной пленки $Vi:\Phi\Gamma$ после воздействия импульсным полем 0,1-1,5 Тл. Показано, что зависимости первой производной остаточной намагниченности по величине внешнего импульсного поля $dM_r(H)/dH$ коррелируют с поведением фрактальной размерности профиля $D_L(H)$ соответствующих магнитооптических изображений. Таким образом, на примере постоянного магнита КС37 установлена взаимосвязь между изменением магнитного состояния магнитного материала (остаточной намагниченностью) и фрактальной размерностью магнитооптических изображений его базисной поверхности.

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 благодарят к.ф.-м.н., доцента кафедры физики конденсированного состояния А.Ю. Карпенкова за помощь в калибровке генератора магнитных импульсов.

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 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. **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.
10. **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.
11. **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.
12. **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.
13. **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.
14. **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.
15. **Зигерт, А.Д.** Фрактальный анализ доменной структуры Vi:ФГ пленки до и после термического воздействия / А.Д. Зигерт, А.И. Иванова, Н.Б. Кузьмин, Е.М. Семенова, Н.Ю. Сдобняков // Дни caloriki в Королеве: функциональные материалы и их приложения, 16-20 августа 2022, Королев: сборник тезисов 3-го Международного научного семинара. – Челябинск: Изд-во Челябинского государственного университета, 2022. – С. 122.
16. **Зигерт, А.Д.** Фрактальный анализ магнитооптической визуализации процесса перемагничивания постоянного магнита в импульсном поле / А.Д. Зигерт, Г.Г. Дунаева, Н.Б. Кузьмин и др. // XXIX Российская конференция по электронной микроскопии «Современные методы электронной, зондовой микроскопии и комплементарных методов исследования наноструктур и наноматериалов», 29-31 августа 2022, Москва: тезисы докладов. – М.: ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, 2022. С. 163-165.
17. **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.
18. **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.
19. **Семенова, Е.М.** Влияние низкотемпературной обработки на магнитные свойства соединения Sm(Co, Cu, Fe)₅ / Е.М. Семенова, М.Б. Ляхова, Д.В. Иванов и др. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2020. – Вып. 12. – С. 149-161. DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.149.

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. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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).
13. 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.
14. 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).
15. Zigert A.D., Ivanova A.I., Kuz'min N.B., Semenova E.M., Sdobnyakov N.Yu. Fraktal'nyj analiz domennoj struktury Bi:FG plenki do i posle termicheskogo vozdejstviya [Fractal analysis of the domain structure of the Bi:FG film before and after thermal exposure], *Collection of abstracts of the 3rd International Scientific Seminar «Caloric days in Korolev: functional materials and their applications»*, Korolev, August 16-20, 2022. Chelyabinsk: Chelyabinsk State University Publ., 2022, p. 122. (In Russian).
16. Zigert A.D., Dunaeva G.G., Kuz'min N.B. et al. Fraktal'nyj analiz magnitnoopticheskoy vizualizatsii protsessu peremagnichivaniya postoyannogo magnita v impul'snom pole [Fractal analysis of magneto-optical visualization of the process of magnetization reversal of a permanent magnet in a pulsed field], *Abstracts of XXIX Russian Conference on Electron Microscopy «Modern methods of electron, probe microscopy and complementary methods for the study of nanostructures and nanomaterials»*, Moscow, August 29-31, 2022. Moscow Federal Research Center «Crystallography and Photonics» of RAS, 2022, p. 163-165. (In Russian).
17. Semenova E.M., Lyakhova M.B., Kuznetsova Yu.V. et al. A comparative analysis of magnetic properties and microstructure of high coercivity $\text{Sm}(\text{CoCuFe})_5$ 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.
18. Semenova E.M., Ivanov D.V., Lyakhova M.B. et al. Fractal geometry of the nano- and magnetic domain structures of $\text{Sm} - \text{Co} - \text{Cu} - \text{Fe}$ 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.
19. Semenova E.M., Lyakhova M.B., Ivanov D.V. et al. Effects of low-temperature treatment on magnetic properties of $\text{Sm}(\text{Co,Cu,Fe})_5$ compounds, *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i*

Short Communication

**FRactal ANALYSIS OF MAGNETO-OPTICAL IMAGES OF A MAGNET SURFACE
AFTER EXPOSURE TO A PULSED FIELD**

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

Tver State University, Tver, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2022.14.101

Abstract: The results of fractal analysis of images of the surface of a permanent magnet KS37 obtained by the method of the polar Kerr effect using an indicator bismuth-containing ferrite-garnet film after magnetization reversal by a pulsed field of 0,1 – 1,5 T are presented. The obtained dependences of the remanent magnetization on the magnitude of the external pulsed field are compared with the fractal dimension of the magneto-optical images of the magnet surface after exposure to the pulsed field. It is hypothesized that the field dependences of the fractal dimension of the profile of magneto-optical images of the magnet surface coincide in shape with the graphs of the first derivative $dM_r(H)/dH$ of the magnetization with respect to the field, i.e. there is a relationship between the nature of the magnetization change in a pulsed field and the type of the magneto-optical image analyzed by using the fractal geometry methods.

Keywords: permanent magnet, effect, ferrite-garnet films, domain structure, fractal dimension, derivative of magnetization with respect to magnetic field.

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

Семенова Елена Михайловна – к.ф.-м.н., доцент кафедры физики конденсированного состояния ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Кузьмин Николай Борисович – студент 4 курса кафедры прикладной физики 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

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

Nickolay B. Kuz'min – 4st year student, Applied Physics Department, Tver State University

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

Поступила в редакцию/received: 01.10.2022; после рецензирования/revise: 27.10.2022; принята/accepted 01.11.2022.