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**

МЕЖВУЗОВСКИЙ СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

выпуск 10

ТВЕРЬ 2018

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 Межвузовском сборнике научных трудов «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов».

Официальный сайт издания в сети Интернет:

www.physchemaspects.ru

Ф50 Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]: межвуз. сб. науч. тр. / под общей редакцией В.М. Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2018. – Вып. 10. – 708 с.

ISBN 978-5-7609-1395-1

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 7747789 от 13.12.2011.

Сборник составлен из оригинальных статей 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. Сборник предназначен для научных и инженерно-технических работников, преподавателей ВУЗов, студентов и аспирантов. Издание подготовлено на кафедре общей физики Тверского государственного университета.

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

ББК Ж36:Г5+В379

ISBN 978-5-7609-1395-1

ISSN 2226-4442

© Коллектив авторов, 2018

© Тверской государственной
университет, 2018

УДК 537.624

МЕТОД АНАЛИЗА ПРОЦЕССОВ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ МАГНЕТИКОВ ПО ИЗОБРАЖЕНИЯМ МАГНИТНОЙ ДОМЕННОЙ СТРУКТУРЫ

А.Ю. Карпенков, Г.Г. Дунаева, П.А. Ракунов, Е.М. Семенова
ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»
170100, Тверь, ул. Желябова, 33
karpenkov_alex@mail.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2018.10.338

Аннотация: В работе описан оригинальный программно-аппаратный комплекс для получения и автоматического анализа изображений магнитной доменной структуры поверхности образцов во внешнем магнитном поле для последующего изучения процессов перемагничивания. На примере исследования кривых намагничивания пленки железо-иттриевого граната показана эффективность метода и возможность его применения для исследования перемагничивания локальных участков поверхности магнитных материалов.

Ключевые слова: магнитная доменная структура, перемагничивание, кривые намагничивания, магнитные пленки, железо-иттриевый гранат.

1. Введение

Для получения достоверных данных о параметрах кривой намагничивания и петли гистерезиса ферромагнитного соединения, измерения проводятся на ориентированных монокристаллических образцах. Наличие в образце дополнительных зерен или вторичных магнитных фаз усложняет ход кривых и интерпретацию, не позволяя оценить их вклад в перемагничивание. Учитывая, что постоянные магниты имеют, как правило, неоднородную микроструктуру с несовершенной текстурой зерен, возможность получения информации о локальных магнитных свойствах магнитного материала является практически важной задачей [1-3].

Целью данной работы стала разработка и реализация методики получения и автоматического анализа изображений магнитной доменной структуры (ДС) образцов во внешнем магнитном поле для последующего изучения процессов перемагничивания. Анализ магнитной ДС является эффективным инструментом локального микромагнитного анализа магнитных материалов [4-6]. В случаях, когда объектами исследования являются поликристаллические образцы или образцы, обладающие гетерогенной микроструктурой, вклад в процессы перемагничивания от зерен с разной ориентацией или различных структурных составляющих можно оценить только на основе прямых наблюдений ДС.

Методика, реализованная в настоящей работе, позволяет построить полевые зависимости намагниченности $I(H)$ для локальных участков поверхности магнитного материала. Задачей данного исследования было

показать валидность предлагаемого метода для получения данных о процессах перемагничивания по магнитной доменной структуре.

2. Эксперимент и результаты

Для исследования перестройки доменов во внешнем магнитном поле был разработан оригинальный программно-аппаратный комплекс, позволяющий дистанционным образом регулировать магнитное поле в зазоре электромагнита, регистрировать доменную структуру и обрабатывать полученные изображения. Аппаратная часть комплекса была реализована на базе оптического металлографического микроскопа NEOPHOT-30 (Zeiss), позволяющего выявлять магнитную ДС методом полярного эффекта Керра. Наблюдение и регистрация изображений производились при освещении ксеноновой лампой в режиме поляризованного света. Картины доменной структуры выводились через оптический канал микроскопа на цифровую камеру высокого разрешения Levenhuk M800PLUS. Для крепления электромагнита над объективом микроскопа была изготовлена станина с жестко закрепленным основанием. Фотография установки представлена на рис. 1. Для регулирования магнитного поля электромагнита использовался импульсный программируемый источник питания АКИП-1141 (выходное напряжение/ток 60 В/6 А) с дискретностью установки 1 мВ/0,21 мА, что позволяло с высокой точностью управлять полем.

Рис. 1. Фотография экспериментальной установки: 1 – столик оптического металлографического микроскопа, 2 – электромагнит, 3 – механическая система трехплоскостного позиционирования электромагнита, 4 – станина.

На рис. 2 показана кривая зависимости магнитного поля от выходного напряжения электромагнита. Хорошо видно, что на начальном этапе (до напряжения ~ 25 В) зависимость имеет линейный характер. При

дальнейшем увеличении напряжения наблюдается замедление роста поля, что объясняется процессами насыщения ярма и полюсов электромагнита. Максимальное поле в зазоре при выходном напряжении 60 В составило 1,7 Тл.

Рис. 2. Зависимость индукции магнитного поля в зазоре электромагнита от входного напряжения/тока.

Одним из методов исследования кривой намагничивания объекта в работе являлся метод вибрационного магнитометра. В основу его измерительной схемы положен индукционно-непрерывный метод, который основан на измерении ЭДС индукции, возникающей в системе специальных измерительных катушек при изменении магнитного потока, создаваемого образцом. Изменение магнитного потока достигается путем вибрации образца относительно измерительных катушек. Измерения намагниченности исследуемого образца на вибрационном магнитометре проводятся путем сравнения с намагниченностью эталонного образца отожженного никеля массой 100 ± 1 мг, для которого магнитный момент единицы массы известен с достаточной точностью – $55,3 \text{ А} \cdot \text{м}^2/\text{кг}$ в поле 10 кЭ при комнатной температуре.

Для реализации методики анализа процессов перемангничивания по ДС был разработан программный продукт, позволяющий по цветовому оттенку пикселей фотографий, снятых при различных магнитных полях, строить кривую намагничивания образца. Программа была написана на языке C# в среде Microsoft Visual Studio. В процессе анализа производилась загрузка микрофотографий доменной структуры в формате .bmp, которые в дальнейшем преобразовывались в битовую карту-матрицу, хранящую информацию о цвете пикселя. Поскольку при намагничивании

образца происходит рост доменов одного знака, то соответственно количество пикселей, относящихся к заданному цвету также изменяется. Дальнейшее сравнение средних значений цветности пикселей каждой фотографии позволяет построить кривую намагничивания. Необходимо отметить, что при обработке фотографий возможно задавать область анализа полигональной фигурой, что позволяет исследовать процессы намагничивания в отдельных кристаллических зернах образца.

Рис. 3. Полевые зависимости намагниченности феррит-гранатовой пленки ЖИГ измеренные методом вибрационного магнитометра (серая кривая) и в ходе анализа доменной структуры (черная кривая). Доменная структура, соответствующая последовательным этапам намагничивания: а – 10 Э, б – 27 Э, в – 32 Э, г – 40 Э, д – 50 Э, е – 60 Э.

В качестве объекта экспериментальных исследований была выбрана феррит-гранатовая пленка типа железо-иттриевого граната (ЖИГ) толщиной 1 мкм, выращенная на ориентированной подложке методом жидкофазной эпитаксии из оксидного раствора-расплава [7]. Пленка представляет собой практически двухмерный объект с контрастной ДС, в котором, в отличие от объемных образцов, отсутствуют замыкающие домены, вследствие этого возможно исследовать перестройку ДС во всем объеме образца.

Кривая намагничивания в плоскости пленки, снятая методом вибрационного магнитометра, приведена на рис. 3 (серая кривая). Поскольку пленка была выращена на подложке, то определить точную массу образца для проведения магнитных измерений не представлялось возможным, в связи с этим намагниченность указана в приведенных единицах. Как следует из приведенных данных, поле насыщения $\mu_0 H_s$ для пленки достигает ~ 6 мТл.

При исследовании доменной структуры пленки в магнитном поле исследуемый образец диаметром 6 мм был закреплен на полюсе электромагнита таким образом, чтобы намагничивающее поле было направлено перпендикулярно плоскости пленки. Величина магнитного поля в процессе исследования измерялась датчиком Холла.

Микрофотографии лабиринтной доменной структуры пленки во внешнем магнитном поле представлены на рис. 3 (а-е). Из полученных данных хорошо видно, что намагничивание пленки происходит за счет смещения доменных границ по мере увеличения внешнего поля. Опираясь на эти данные, с помощью разработанного алгоритма анализа, была построена кривая намагничивания, показанная на рис. 3 (черная кривая). Видно, что обе кривые, полученные независимыми методами, показывают хорошее согласие.

3. Заключение

Таким образом, предложенная в работе методика получения и анализа изображений магнитной доменной структуры во внешнем магнитном поле, а так же алгоритм обработки полученных данных, позволяют получать кривые намагничивания и петли гистерезиса с локальных участков поверхности магнитного материала.

Библиографический список:

1. **Goll, D.** Micromagnetism and the microstructure of high-temperature permanent magnets / D. Goll, H. Kronmüller // Journal of Applied Physics. – 2004. – V. 96. – I. 11. – P. 6534-6545.
2. **Ляхова, М.Б.** Анализ кривых намагничивания и магнитокристаллической

- анизотропии одноосных ферромагнетиков / М.Б. Ляхова, О.В. Жданова // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2016. – № 10 (736). – С. 10-16.
3. **Ляхова, М.Б.** Анализ SPD-метода для определения полей анизотропии ферромагнитных поликристаллов / М.Б. Ляхова, О.В. Жданова, Е.М. Семенова и др. // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. – 2017. – Вып. 9. – С. 283-290.
4. **Skokov, K.P.** Micromagnetic analysis of spin-reorientation transitions. The role of magnetic domain structure / K.P. Skokov, Y.G. Pastushenkov, S.V. Taskaev, V.V. Rodionova // *Physica B: Condensed Matter*. – 2015. – V. 478. – P. 12-16.
5. **Пастушенков, Ю.Г.** Магнитная доменная структура. Количественный анализ микромагнитных параметров: Монография. – Тверь: Тверской государственный университет. – 2007. – 151 с.
6. **Hubert, A.** Magnetic Domains. The analysis of magnetic microstructures / A. Hubert, R. Schäfer. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1998. – 696 p.
7. **Николаев, Е.И.** Получение феррит-гранатовых пленок с применением смачивающей пленки раствора-расплава / Е.И. Николаев, И.А. Красин // *Кристаллография*. – 1988. – Т. 33. – Вып. 2. – С. 478-484.

References:

1. **Goll, D.** Micromagnetism and the microstructure of high-temperature permanent magnets / D. Goll, H. Kronmüller // *Journal of Applied Physics*. – 2004. – V. 96. – I. 11. – P. 6534-6545.
2. **Lyakhova, M.B.** Analiz krivyyh namagnichivaniya i magnitokristallicheskoj anizotropii odnoosnyh ferromagnetikov / M.B. Lyakhova, O.V. Zhdanova // *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*. – 2016. – no. 10 (736). – P. 10-16.
3. **Lyakhova, M.B.** Analiz SPD-metoda dlya opredeleniya polej anizotropii ferromagnitnyh polikristallov / M.B. Lyakhova, O.V. Zhdanova, E.M. Semenova i dr. // *Fiziko-himicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov*. – 2017. – I. 9. – P. 283-290.
4. **Skokov, K.P.** Micromagnetic analysis of spin-reorientation transitions. The role of magnetic domain structure / K.P. Skokov, Y.G. Pastushenkov, S.V. Taskaev, V.V. Rodionova // *Physica B: Condensed Matter*. – 2015. – V. 478. – P. 12-16.
5. **Pastushenkov, Yu.G.** Magnitnaya domennaya struktura. Kolichestvennyj analiz mikromagnitnyh parametrov: Monografiya. – Tver: Tverskoj gosudarstvennyj universitet. – 2007. – 151 p.
6. **Hubert, A.** Magnetic Domains. The analysis of magnetic microstructures / A. Hubert, R. Schäfer. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1998. – 696 p.
7. **Nikolaev, E.I.** Poluchenie ferrit-granatovyh plenok s primeneniem smachivayushchej plenki rastvora-rasplava / E.I. Nikolaev, I.A. Krasin // *Kristallografiya*. – 1988. – T. 33. – I. 2. – P. 478-484.

METHOD OF ANALYSIS OF THE REVERSAL MAGNETIZATION PROCESSES USING MAGNETIC DOMAIN STRUCTURE IMAGES

A.Yu. Karpenkov, G.G. Dunaeva, P.A. Rakunov, E.M. Semenova
Tver State University

DOI: 10.26456/pcascnn/2018.10.338

Abstract: A unique software and hardware system for obtaining and automatic analysis of the magnetic domain structure images in an external magnetic field for further study of the magnetization

reversal process was developed. The method efficiency and possibility of its use for studying the magnetization reversal of local surface regions of magnetic materials are shown, using the experimental magnetization curves of an yttrium-iron garnet film.

Keywords: magnetic domains, magnetization reversal, magnetization curves, magnetic films, yttrium-iron garnet.

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

Дунаева Галина Григорьевна – студентка 3 курса, кафедра физики конденсированного состояния ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Ракунов Павел Андреевич – студент 3 курса, кафедры физики конденсированного состояния ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

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

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

Galina G. Dunaeva – 3rd year student, Condensed State Physics Department, Tver State University

Pavel A. Rakunov – 3rd year student, Condensed State Physics Department, Tver State University

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