Министерство образования и науки
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 9

ТВЕРЬ 2017

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 об 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, 2017. – Вып. 9. – 592 с.

ISBN 978-5-7609-1275-6

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 978-5-7609-1275-6

ISSN 2226-4442

© Коллектив авторов, 2017

© Тверской государственной
университет, 2017

УДК 537.811

**МАГНИТООПТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ
РАСПРЕДЕЛЕНИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ
МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

М.К. Вирченко, Р.М. Егужокова, А.Б. Залетов, А.И. Иванова
*ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»
170002, Россия, Тверь, Садовый переулок, 35
alex.ivanova33@yandex.ru*

DOI: 10.26456/pcascnn/2017.9.128

Аннотация: Проведено исследование пространственных распределений магнитного поля в широких пределах микроэлектромеханических систем (МЭМС) с помощью магнитооптических индикаторных плёнок феррит-гранатов (МОИП). Для повышения точности и расширения динамического диапазона была разработана процедура измерений с помощью вспомогательных внешних полей, накладываемых на образец в процессе испытаний, что приводит к контролируемому смещению изолиний нулевого поля объекта в ту или иную сторону.

Ключевые слова: магнитные измерения, магнитооптические эффекты, индикаторные плёнки, феррит-гранаты, микроэлектромеханические системы (МЭМС), динамический диапазон измерений.

1. Введение

В последние годы интерес к миниатюрным магнитным элементам значительно возрос в связи с многочисленными разработками различных микроэлектромеханических систем (МЭМС) – акселерометров, переключателей, микромощных генераторов, микродатчиков, устройств «лаборатория на чипе». В этом случае систем левитации и манипуляции микрочастицами и др. [1-7]. Для работы этих устройств необходимы магнитные поля разнообразной конфигурации, локализованные или резко изменяющиеся в областях пространства с характерными размерами порядка 1...100 мкм. Ввиду малости размеров традиционные средства контроля магнитных свойств перестают удовлетворять требованиям разработчиков и получают развитие новые подходы к методологии магнитных исследований. В частности, предложены методы визуализации и количественной оценки пространственных микрораспределений магнитного поля с помощью индикаторных плёнок феррит-гранатов [1-6]. Разрешающая способность МОИП достигает значений порядка одного микрометра при чувствительности порядка 0,01 мТ, что позволяет проводить исследования широкого класса МЭМС.

Вместе с тем следует отметить, что поле насыщения МОИП сравнительно невелико (порядка 30...50 мТ), что ограничивает возможности применения метода для исследований элементов МЭМС, изготовленных из современных материалов для постоянных магнитов с высокой остаточной намагниченностью.

В связи с изложенным данная работа посвящена экспериментальному исследованию возможностей увеличения верхнего предела измерений методом МОИП на примере опытных образцов, изготовленных из редкоземельных постоянных магнитов $NdFeB$.

2. Исследуемые образцы и экспериментальная установка

Текстурированные и профилированные пленки $Nd-Fe-B$ с магнитными свойствами изготавливались в Институте Нееля методом магнетронного распыления на кремниевые подложки с последующим вакуумным отжигом [3, 6]. Используемые в данной работе образцы были изготовлены в Институте Нееля (Гренобль, Франция). Магнитопрофилированные пленки изготавливались методом термомагнитной записи с помощью локального нагрева отдельных участков лучом эксимерного лазера в магнитном поле.

Для качественного и количественного анализа распределений полей на разных расстояниях от поверхности образцов использовались магнитооптические индикаторные пленки (МОИП) [9] с одноосной и планарной анизотропией, разработанные во Научно-Исследовательский Институт Материаловедения (г. Зеленоград).

Использовались как планарные, так и одноосные МОИП со средней шириной 180° доменов 8...12 мкм. Параметры последних (намагниченность насыщения, толщина h и характеристическая длина l) выбирались из условия удовлетворения соотношению $\beta > \beta_c$, где β_c – критический градиент поля, при котором отсутствуют синусоидальные искажения доменных границ; в этом случае границы доменов находятся на изолиниях нулевых значений измеряемого поля [10, 11].

Рис. 1. Схема устройства для визуализации микрораспределений магнитного поля и его количественных оценок с помощью МОИП. Расстояние между образцом и МОИП регулируется с помощью z -позиционера с погрешностью ± 1 мкм.

Регистрация магнитооптических изображений проводилась дифференциальным поляризационным методом на модифицированном

оптическом микроскопе МИМ-8. Дифференциальный режим обеспечивал существенное улучшение линейности передаточной характеристики и минимизацию погрешностей, обусловленных неоднородностями освещения. Схема оптических наблюдений при воздействии внешних полей представлена на рис. 1.

3. Полученные результаты

На рис. 2 представлено оцифрованное изображение нормальной компоненты полей рассеяния на поверхности намагниченной профилированной плёнки $NdFeB$, полученное в общепринятых стандартных условиях нулевого внешнего поля (см. рис. 2 а) и при наложении внешнего однородного поля 50 мТ (см. рис. 2 б).

Рис. 2. Магнитограммы намагниченной профилированной плёнки $NdFeB$, полученные при нулевом внешнем поле (а) и при наложении внешнего однородного поля смещения 50 мТ (б).

Из представленных данных очевидно, что в случае (а) вследствие насыщения имеет место превышение верхнего предела динамического диапазона МОИП, что делает невозможным получение корректной информации о распределении поля рассеяния испытуемого образца.

Проблема находит своё разрешение при проведении измерений в условиях подмагничивания образца при наложении надлежащим образом подобранного внешнего поля смещения. Корректировка измерительных данных не представляет трудностей, т.к. источник поля смещения однороден и может быть прокалиброван с любой желаемой степенью точности.

Важным последствием методологии измерений в описанных условиях является создание возможности автокалибровки измерительной системы, т.к. регистрируемому изменению конфигурации изолиний нулевого поля соответствуют градуированные значения поля смещения. При этом индикаторная плёнка (МОИП) работает в режиме

нуль-индикатора, т.е. устраняется зависимость результатов измерений от конкретного вида передаточной характеристики (нелинейности преобразования) МОИП.

На рис. 3 представлены магнитограммы миниатюрной дипольной пары, измеренные на разных (от 10 до 100 мкм) расстояниях до поверхности образца. Из представленных изображений видно, что при малых расстояниях образец характеризуется значительной неоднородностью остаточного магнитного потока (см. рис. 3 а, б). Эта неоднородность сглаживается по мере удаления от поверхности (см. рис. 3 в).

Рис. 3. Распределение поля рассеяния дипольной пары постоянных магнитов $NdFeB$ (диски диаметром 1 мм, толщиной 0,25 мм) на разных расстояниях от поверхности образца: 10 (а), 50 (б) и 100 мкм (в), соответственно.

Следует отметить, что эта особенность (неоднородность) магнитного потока вблизи поверхности постоянных магнитов ранее оставалась незамеченной, т.к. существующие методы контроля проводятся с помощью интегральных преобразователей (индукционных, гальваномагнитных и др.), не приспособленных для исследования микрооднородности материала. Фактор микрооднородности может быть мало существенным для крупногабаритных элементов, но им невозможно пренебрегать для миниатюрных элементов МЭМС, размер которых может быть много меньше размеров измерительных преобразователей.

К недостаткам метода МОИП можно отнести возможное воздействие поля смещения на объект испытаний. Этот фактор не играет роли при

исследовании постоянных магнитов, коэрцитивная сила которых намного больше требуемых реальных полей смещения, но он должен учитываться при испытаниях низкокоэрцитивных материалов.

Библиографический список:

1. **Hutchings, D.C.** Prospects for the implementation of magneto-optic elements in optoelectronic integrated circuits: a personal perspective / D.C. Hutchings // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2003. – V. 36. – № 18. – P. 2222-2229.
2. **Stadler, B.J.** Integrated magneto-optical materials and isolators: a review / B.J. Stadler, T. Mizumoto // *IEEE Photonics Journal*. – 2014. – V. 6. – I. 1. – P. 0600215-1-0600215-15.
3. **Dempsey, N.M.** High performance hard magnetic *NdFeB* thick films for integration into micro-electro-mechanical systems / N.M. Dempsey, A. Walther, F. May et al. // *Applied Physics Letters*. – 2007. – V. 90. – I. 9. – P. 092509-1-092509-3.
4. **Profijt, H.B.** Stable diamagnetic self-levitation of a micro-magnet by improvement of its magnetic gradients / H.B. Profijt, C. Pigot, G. Reyne, R.M. Grechishkin, O. Cugat // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2009. – V. 321. – I. 4. – P. 259-262.
5. **Chetouani, H.** Diamagnetic levitation with permanent magnets for contactless guiding and trapping of microdroplets and particles in air and liquids / H. Chetouani, C. Jeanday, V. Haquet et al. // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2006. – V. 42. – I. 10. – P. 3557-3559.
6. **Cugat, O.** Novel magnetic micro-actuators and systems (MAGMAS) using permanent magnets / O. Cugat, G. Reyne, J. Delamare, H. Rostaing // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2006. – V. 129. – I. 1-2. – P. 265-269.
7. **Zvezdin, A.K.** Modern magneto-optics and magneto-optical materials / A.K. Zvezdin, V.A. Kotov. – New York: Taylor & Francis Group, 1997. – 404 p.
8. **Grechishkin, R.** Magneto-optical imaging and analysis of magnetic field micro-distributions with the aid of biased indicator films / R. Grechishkin, M. Kustov, S. Ilyashenko et al. // *Journal of Applied Physics*. – 2016. – V. 120. – I. 17. – P. 174502-1-174502-10.
10. **Гусев, М.Ю.** Магнитооптическая визуализация магнитного поля с помощью монокристаллических плёнок ферритов-гранатов / М.Ю. Гусев, Р.М. Гречишкин, Ю.Ф. Козлов, Н.С. Неустроев // *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*. – 2000. – № 1. – С. 27-37.
11. **Grechishkin, R.M.** High-resolution sensitive magneto-optic ferrite-garnet films with planar anisotropy / R.M. Grechishkin, M.Yu. Goosev, S.E. Ilyashenko, N.S. Neustroev // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 1996. – V. 157-158. – P. 305-306.
12. **Grechishkin, R.** Magnetic imaging films / S. Chigirinsky, M. Gusev, O. Cugat, N. Dempsey. In book: *Magnetic Nanostructures in Modern Technology*. – Dordrecht: Springer, 2008. – P. 195-224.