

УДК 537.632

## МАГНИТООПТИЧЕСКАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ И КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЕЙ ПЛЁНОЧНЫХ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ ДЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А. Н. Цирулев<sup>1</sup>, С. Е. Ильяшенко<sup>2</sup>, О. О. Михайлова<sup>3</sup>, Т. Е. Гурьева<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Тверской государственной университет,  
*кафедра математических методов современного естествознания*

<sup>2</sup>Тверской государственной технический университет,  
*кафедра технологии металлов и материаловедения*

<sup>3</sup>Тверской государственной университет,  
*кафедра прикладной физики*

Описана методика контроля микрораспределений магнитного поля плёночных магнитных систем для МЭМС с помощью магнитооптических индикаторных плёнок (МОИП). Для повышения точности и расширения динамического диапазона была разработана новая процедура измерений с помощью вспомогательных градуированных полей смещения, накладываемых на образец в процессе испытаний. При этом вследствие принципа суперпозиции происходит контролируемое смещение изолиний нулевого поля объекта в ту или иную сторону. В этом случае МОИП работает в режиме нуль-индикатора, т.е. устраняется зависимость результатов измерений от конкретного вида передаточной характеристики (нелинейности преобразования). Наложение поля смещения позволяет сдвигать значения порогового поля насыщения МОИП в широких пределах как в области положительных, так и отрицательных значений.

**Введение.** Интерес к тонкоплёночным постоянным магнитам в последнее время заметно возрос в связи с разработкой различных микроэлектромеханических систем (МЭМС) – микродатчиков, акселерометров, переключателей, микромощных генераторов, устройств типа «лаборатория на чипе», систем левитации и манипуляции микрочастицами и др. [1-5]. 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 методы изготовления (сборки) магнитных систем из дискретных элементов становятся неприемлемыми и получают развитие новые методы получения интегрированных магнитных систем в виде тонкоплёночных профилированных структур. Магнитные свойства тонких плёнок отличаются от свойств своих массивных прототипов и

сильно зависят от условий получения. Кроме того, перестают работать известные способы намагничивания с помощью соленоидов или электромагнитов, которые трудно или невозможно реализовать для магнитных структур с размерами менее 100 мкм. Усложняется также и задача контроля их магнитных свойств с помощью дискретных преобразователей магнитного поля – во-первых, нужны преобразователи с достаточно малыми (микронными) размерами чувствительной зоны, и, во-вторых, при наличии таковых, требуются дополнительно достаточно сложные устройства их сканирования. Попытки использования для этих целей магнитных силовых микроскопов оказались неэффективными из-за недостаточности их динамического диапазона измерений, длительности процесса испытаний (десятки минут), малых размеров сканируемой зоны, сложности эксплуатации и др.

В настоящей работе для решения задач контроля рабочих полей плёночных магнитных систем для МЭМС предлагается использование метода количественной визуализации распределений магнитного поля с помощью магнитооптических индикаторных плёнок [6-8]. Для повышения точности и расширения динамического диапазона была разработана новая процедура измерений с помощью вспомогательного градуировочного поля, накладываемого на образец в процессе испытаний.

**Расчеты магнитного поля.** Современные материалы для редкоземельных постоянных магнитов характеризуются весьма высокими значениями магнитной анизотропии и коэрцитивной силы. Благодаря этому в большинстве практических случаев можно с достаточной степенью точности считать, что вектор остаточной намагниченности постоянного магнита  $\mu_0 \mathbf{M}_r$  жестко зафиксирован в магните и не меняется даже при воздействии достаточно больших размагничивающих полей. Это обстоятельство значительно упрощает расчеты полей, создаваемых высококоэрцитивными высокоанизотропными магнитами, и оправдывает применение принципа суперпозиции для систем, состоящих из множества элементов.

Однородно намагниченные тела, которым почти идеально соответствуют редкоземельные магниты, могут быть описаны с помощью поверхностных токов Ампера, создаваемых эквивалентным соленоидом [9]. Для расчета полей таких тел применим закон Био-

Савара, 
$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{[d\mathbf{l} \times \mathbf{R}]}{R^3}$$
, где  $\mathbf{R}$  – радиус-вектор точки наблюдения,  $I$  –

ток эквивалентного соленоида. Векторное произведение может быть расписано в виде

$$[d\mathbf{l} \times \mathbf{R}] = \mathbf{i} \begin{vmatrix} dl_y & dl_z \\ R_y & R_z \end{vmatrix} - \mathbf{j} \begin{vmatrix} dl_x & dl_z \\ R_x & R_z \end{vmatrix} + \mathbf{k} \begin{vmatrix} dl_x & dl_y \\ R_x & R_y \end{vmatrix} \quad (1)$$

Призматический прямоугольный магнит, намагниченный вдоль оси  $z$ , может быть представлен эквивалентным соленоидом в форме призмы с размерами  $2a \times 2b \times 2h$  ( $h$  – высота призмы). Тройное интегрирование выражений для  $dB_x$ ,  $dB_y$  и  $dB_z$  по сторонам призмы от  $-a$  до  $a$ ,  $-b$  до  $b$  и  $-h$  до  $h$ , даёт простые аналитические формулы для значений компонент поля  $B_x$ ,  $B_y$  и  $B_z$  в произвольной точке наблюдения  $P(x_0, y_0, z_0)$ , выражаемые через элементарные функции:

$$B_x = -\frac{\mu_0 I}{4\pi 2h} \left\{ \left[ \left( \ln \left( \beta + \sqrt{\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2} \right) \right) \right]_{\alpha_1}^{\alpha_2} \right\}_{\beta_1}^{\beta_2} \Big|_{\gamma_1}^{\gamma_2},$$

$$B_y = -\frac{\mu_0 I}{4\pi 2h} \left\{ \left[ \left( \ln \left( \alpha + \sqrt{\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2} \right) \right) \right]_{\alpha_1}^{\alpha_2} \right\}_{\beta_1}^{\beta_2} \Big|_{\gamma_1}^{\gamma_2},$$

$$B_z = -\frac{\mu_0 I}{4\pi 2h} \left\{ \left[ \left( \frac{\tan^{-1} \frac{\gamma + \sqrt{\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2}}{\alpha\beta}} \right) \right]_{\alpha_1}^{\alpha_2} \right\}_{\beta_1}^{\beta_2} \Big|_{\gamma_1}^{\gamma_2},$$

где  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  – пределы определенных интегралов, т.е.

$$\left\{ \left[ f(\alpha, \beta, \gamma) \right]_{\alpha_1}^{\alpha_2} \right\}_{\beta_1}^{\beta_2} \Big|_{\gamma_1}^{\gamma_2} = f(\alpha_2 \beta_2 \gamma_2) - f(\alpha_1 \beta_2 \gamma_2) - f(\alpha_2 \beta_1 \gamma_2) +$$

$$+ f(\alpha_1 \beta_1 \gamma_2) - f(\alpha_2 \beta_2 \gamma_1) + f(\alpha_1 \beta_2 \gamma_1) + f(\alpha_2 \beta_1 \gamma_1) - f(\alpha_1 \beta_1 \gamma_1),$$

где  $\alpha_{1,2} = x_0 \pm a$ ,  $\beta_{1,2} = y_0 \pm b$ ,  $z_{1,2} = z_0 \pm h$  (знаки  $+$  и  $-$  соответствуют верхним и нижним индексам 1 и 2).

Для перехода от эквивалентного соленоида к расчётам реального магнита коэффициент  $\mu_0 I / 2h$  в уравнениях (1) заменяется на остаточную индукцию  $B_r$  (в Тл), которая является основной характеристикой постоянных магнитов.

Следует подчеркнуть, что в рассматриваемом случае надёжность расчётов определяется не самим процессом вычислений, а погрешностями во вводимых в расчёт параметрах магнитной системы,

которые в реальных условиях могут иметь значительный разброс как по характеристикам самого материала, так и по условиям (результатам) его намагничивания.

**Методика эксперимента.** Текстурированные пленки Nd-Fe-B с высокими магнитными свойствами изготавливались методом магнетронного распыления на кремниевые подложки с последующим вакуумным отжигом [1; 2]. Использованные 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) [6-8] с одноосной и планарной анизотропией, разработанные во ВНИИМВ (г. Зеленоград).

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

Регистрация магнитооптических изображений проводилась дифференциальным поляризационным методом на модифицированном оптическом микроскопе МИМ-8. Дифференциальный режим позволяет существенно улучшить линейность передаточной характеристики и минимизировать погрешности, обусловленные неоднородностями освещения.

Второй важной особенностью явилось проведение измерений в компенсационном режиме, при котором на испытуемый образец с МОИП накладывается внешнее поле смещения, создаваемое градуированными источниками (рис. 1).

Использование дополнительных источников поля смещения позволило решить две важных задачи:

(1) расширить диапазон измерений. Такая необходимость возникла в связи с тем, что рабочие поля образцов могут достигать значений порядка 0,5 Т и более, что превышает поля насыщения типичных МОИП. Наложение поля смещения позволяет сдвигать значения порогового поля насыщения МОИП в широких пределах как в области положительных, так и отрицательных значений.

(2) при наложении внешнего поля вследствие принципа суперпозиции происходит смещение изолиний нулевого поля объекта в ту или иную сторону, причём, поскольку значения поля смещения могут

быть измерены с высокой степенью точности, создаётся возможность автокалибровки системы – 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.

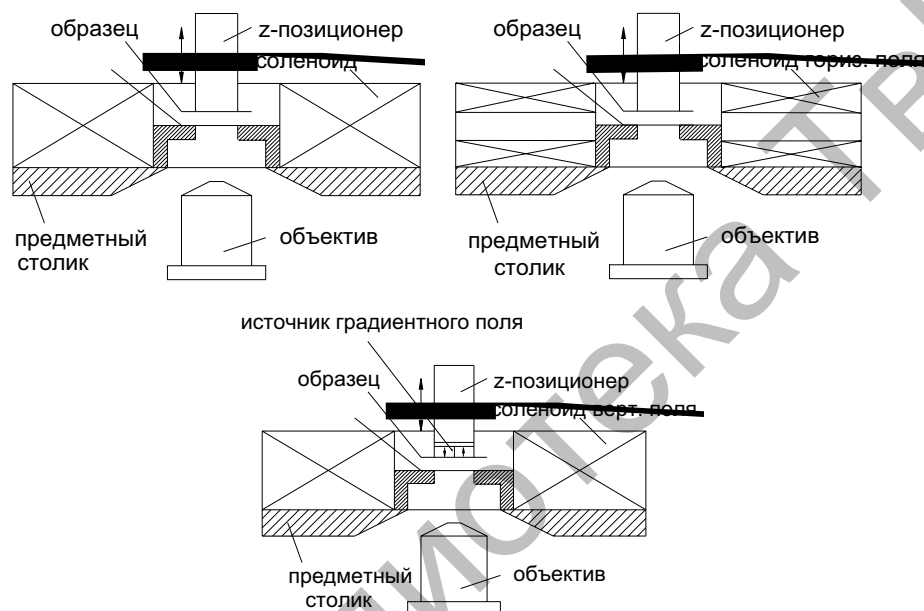


Рис. 1. Схема устройства для визуализации микрораспределений магнитного поля и его количественных оценок с помощью магнитооптических индикаторных плёнок (МОИП). Расстояние между образцом и МОИП регулируется с помощью z-позиционера с погрешностью  $\pm 1$  мкм. Градуированные источники создают вертикальные, горизонтальные или градиентные поля смещения

К недостаткам предложенного способа можно отнести возможное воздействие поля смещения на объект испытаний. Этот фактор не играет роли при исследовании постоянных магнитов, коэрцитивная сила которых намного больше полей смещения, но он должен учитываться при испытаниях низкокоэрцитивных материалов. Исследование последних не входило в цели настоящей работы.

**Результаты исследования.** На рис. 2-4 представлены конфигурация и параметры одного из испытуемых образцов и расчётные распределения нормальной компоненты поля для разных расстояний до поверхности.

Характерной особенностью распределения поля над поверхностью намагниченных в одну сторону "квадратов" плёночного образца

является наличие острых пиков поля над каждым из их четырёх углов. При малых расстояниях от поверхности высота этих пиков ( $\sim 0,45$  Т) намного (в несколько раз) выше среднего уровня. Эти пики сглаживаются по мере удаления от поверхности; седлообразная форма кривой распределения поля спрямляется и при больших расстояниях становится колоколообразной.

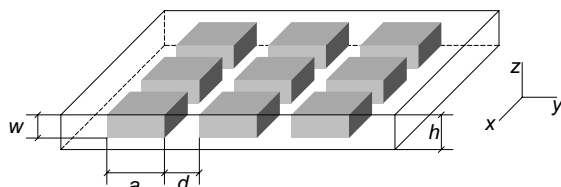


Рис. 2. Схема тонкоплёночного постоянного магнита Nd-Fe-B. Размеры элементов:  $a = 100 \mu\text{m}$ ,  $d = 28 \mu\text{m}$ ,  $h = 5 \mu\text{m}$ ,  $w = 3.84 \mu\text{m}$ , остаточная намагниченность  $B_r = 1.4$  Т.

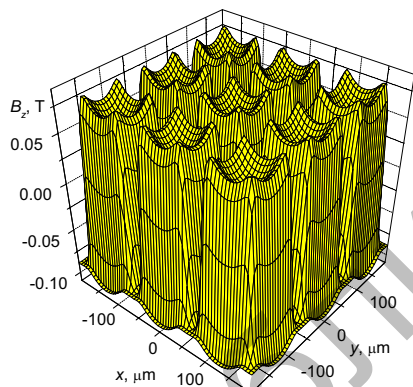


Рис. 3. Расчётное распределение нормальной компоненты поля на расстоянии  $z_0 = 10 \mu\text{m}$  от поверхности образца.

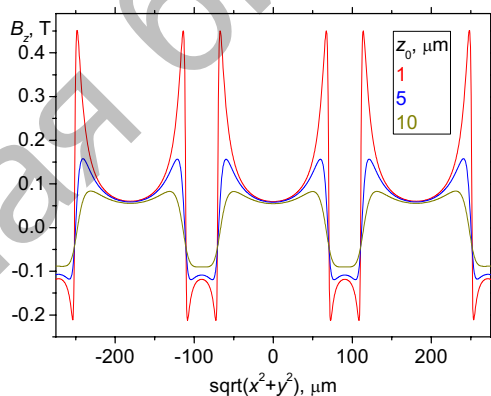


Рис. 4. Распределение нормальной компоненты поля  $B_z$  периодической структуры рис. 2 на расстояниях 1, 5 и 10 мкм от поверхности образца

Эта особенность отчётливо проявляется при изменении значений поля смещения (при неизменном расстоянии до образца). На рис. 5 представлены расчётные и экспериментальные изображения изолиний нулевого поля (границ между антипараллельными доменами), полученные с помощью одноосной МОИП при воздействии различных полей смещения от нуля до 75 мТ. Видно отличное совпадение между расчётными и экспериментальными данными. Это означает, что представленный образец плёнки имеет достаточно высокую однородность свойств по толщине, а импульсная лазерная термомагнитная запись обеспечила сквозное перемагничивание экспонированных участков квадратного сечения (в исходном состоянии вся плёнка была намагничена до насыщения в противоположном направлении).

Изображения, представленные на рис. 4, близки по своему смыслу к металлографическим изображениям структуры, получаемым при так называемом методе серийных сечений (последовательному контролируемому удалению слоёв металлографического шлифа) [10]. Разница лишь в том, что в рассматриваемом случае эти сечения являются виртуальными, а их "положение" определяется значениями поля смещения.

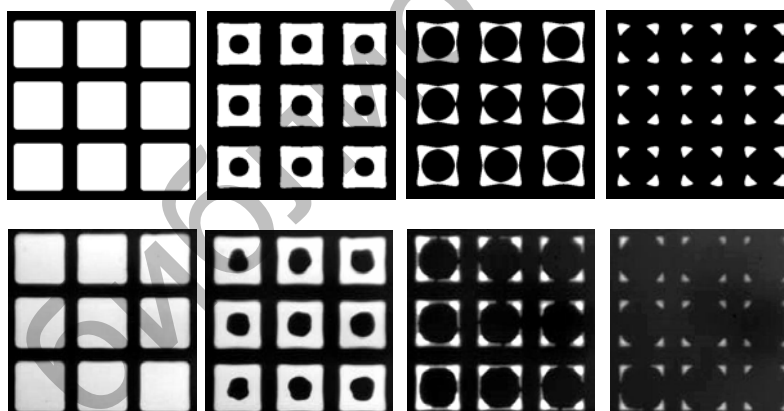


Рис. 4. Серийные сечения распределений компоненты поля  $B_z$  в плоскости  $xy$  плёночного образца Nd-Fe-B после термомагнитной записи квадратных ячеек. Верхний ряд изображений – расчёт, нижний ряд – эксперимент. Значения поля смещения (слева направо) 0, 61, 70 и 75 мТ.

Вариантом методики является её применение к МОИП с планарной анизотропией. Высокая разрешающая способность планарных МОИП позволяет выявлять тонкие детали структуры (неоднородность остаточной намагниченности) материала, которые остаются незамеченными при обычных наблюдениях (рис. 5).

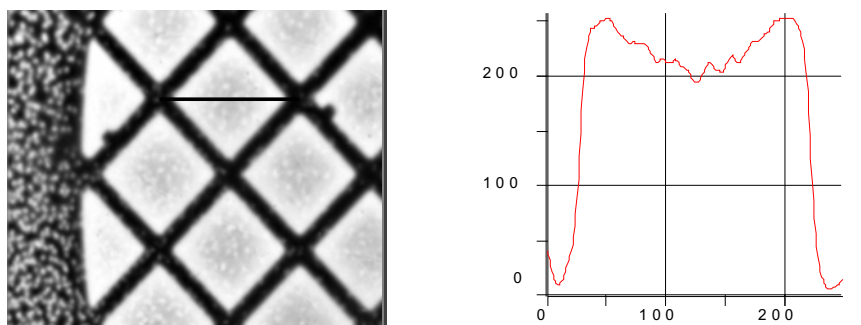


Рис. 5. Полутоновое 12-битовое изображение образца с помощью планарной МОИП. График справа – профиль распределения интенсивности вдоль линии (диагонали квадрата), показанной на левом изображении.

**Заключение.** Основанный на отечественных разработках [6-8] метод магнитооптической визуализации с помощью индикаторных плёнок МОИП отличается простотой, эффективностью, высокой разрешающей способностью и др., и способен заполнить важную нишу исследований пространственных распределений поля магнитных МЭМС в "оптическом" диапазоне с характерными линейными размерами  $10^{-6} \dots 10^{-2}$  м. Предложенный в данной работе вариант измерений с использованием вспомогательного поля смещения расширяет диапазон измерений и повышает их точность. Сфера применений МОИП не ограничена решением задач, необходимых для конструирования магнитных МЭМС, и включает в себя целый ряд разнообразных применений в неразрушающих методах контроля, криминалистике, магнитной записи и др., в которых метод МОИП обладает преимуществами по сравнению с другими техническими решениями.

#### Список литературы

1. Walther A., Marcoux C., Desloges B., Grechishkin R., Givord D., Dempsey N.M. Micro-patterning of NdFeB and SmCo magnet films for integration into micro-electro-mechanical-systems // J. Magn. Magn. Mater. 2009. V. 321 (6). P. 590-594.
2. Dempsey N.M., Walther A., May F., Givord D., Khlopkov K., Gutfleisch O. High performance hard magnetic NdFeB thick films for integration into micro-electro-mechanical systems // Appl. Phys. Lett. 2007. V.90. P. 092509.
3. Profijt H. B., Pigot C., Reyne G., Grechishkin R. M., Cugat O. Stable diamagnetic self-levitation of a micro-magnet by improvement of its magnetic gradients // J. Magn. Magn. Mater. 2009. V. 321 (4). P. 259-262.



4. Chetouani H., Jeanday C., Haquet V., Rostaing H., Dieppedale H., Reyne G. Diamagnetic levitation with permanent magnets for contactless guiding and trapping of microdroplets and particles in air and liquids // *IEEE Trans. Magn.* 2006. V. 42. P. 3557-3559.
5. Cugat O., Reyne G., Delamare J., Rostaing H. Novel magnetic micro-actuators and systems (MAGMAS) using permanent magnets // *Sensors and Actuators.* 2006. V. A129. P. 265-269.
6. Гусев М. Ю. Гречишкин Р. М. Козлов Ю.Ф., Неустроев Н.С. Магнитооптическая визуализация магнитного поля с помощью монокристаллических плёнок ферритов-гранатов // *Известия вузов. Материалы электронной техники.* 2000. №1. С. 27-37.
7. Grechishkin R. M., Goosev M. Yu., Ilyashenko S. E., Neustroev N. S. High-resolution sensitive magneto-optic ferrite-garnet films with planar anisotropy // *J. Magn. Magn. Mater.* 1996. V. 157-158. P. 305-306.
8. Grechishkin R., Chigirinsky S., Gusev M., Cugat O., Dempsey N.. Magnetic Imaging Films, in: B. Azzerboni et al. (eds), *Magnetic Nanostructures in Modern Technology*, Springer, 2008, pp. 195-224.
9. Parcell E. M.. *Electricity and Magnetism*, vol. II, Berkeley Physics Course, McGraw Hill Education, 1986.
10. Салтыков С.А.. *Стереометрическая металлография*. М.: Металлургия, 1976.