

УДК 539.2

## КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННЫХ МИКРОРАСПРЕДЕЛЕНИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ С ПОМОЩЬЮ МАГНИТООПТИЧЕСКИХ ИНДИКАТОРНЫХ ПЛЁНОК

С.С. Сошин, С.Е. Ильяшенко, М.Ю. Гусев, Н.С. Неустроев,  
Д.А. Быков, А.Б. Залётов, С.А. Чигиринский  
Кафедра прикладной физики

Изучены особенности количественной оценки пространственных распределений магнитного поля с помощью тонких магнитооптических плёнок. Дан анализ двухканальной дифференциальной магнитооптической измерительной установки с матричными фотоприёмниками. Предложена и реализована новая процедура сквозной поточечной градуировки, позволяющей уменьшить погрешности, обусловленные неоднородностью параметров оптических и электронных компонентов измерительной системы.

**Введение.** Магнитооптические тонкоплёночные индикаторные среды позволяют создавать эффективные средства визуализации неоднородных магнитных полей, локализованных или резко изменяющихся в областях пространства с характерными размерами порядка единиц микрометров [1-7]. В отличие от других методов визуализации (например, с помощью магнитных жидкостей), магнитооптическая визуализация предполагает возможность количественного анализа получаемой информации и распознавания на этой основе изучаемых микроструктур. Проблема анализа микрораспределений магнитного поля приобретает особую актуальность в связи с современными тенденциями непрерывного уменьшения размеров магнитоактивных элементов многочисленных технических устройств вплоть до десятков и единиц микрометров. К таким устройствам относятся магнитные микроэлектромеханические системы (MagMEMS) [8; 9], магнитные головки, тонкоплёночные магниторезисторы и др.

Несмотря на растущую популярность магнитооптических индикаторных плёнок, аспекты количественной оценки и градуировки получаемых с их помощью изображений изучены недостаточно. Данная работа посвящена восполнению этого пробела.

**Методика эксперимента.** В работе использовались магнитооптические индикаторные среды на основе висмутсодержащих магнитных плёнок ферритов-гранатов (ВсМПФГ), в которых за счёт концентрационных спин-переориентационных фазовых переходов минимизированы константы естественной магнитокристаллической, а также ростовой и наведённой анизотропии. В таких плёнках в отсутствие внешних воздействий минимуму энергии отвечает ориентация векторов спонтанной намагниченности, близкая к плоскости плёнки. При наличии компоненты магнитного поля, нормальной к плоскости пленки, появляется нормальная компонента вектора

намагниченности, в результате возникает фарадеевское вращение плоскости поляризации проходящего света.

Монокристаллические ВСПФГ толщиной в единицы микрометров выращивались методом жидкофазной эпитаксии на прозрачной немагнитной подложке. На наружную рабочую сторону вакуумным распылением наносился тонкий слой алюминия, играющий роль зеркала.

В работе использовалась дифференциальная магнитооптическая измерительная установка, схема которой представлена на рис. 1. Освещение осуществляется с помощью полупрозрачного зеркала М, направляющего линейно поляризованный свет в объектив оптической системы. Благодаря отражению от зеркальной стороны индикаторной пленки луч проходит дважды сквозь магнитооптическую среду, претерпевая фарадеевское вращение плоскости поляризации. Отраженный от индикаторной структуры свет попадает на дополнительное полупрозрачное зеркало D, разделяется и направляется в два независимых канала измерительного тракта. Каналы содержат анализаторы А1 и А2 с независимой установкой углового положения осей пропускания и регистрирующие устройства (видеокамеры V1 и V2). Анализаторы ориентируются таким образом, чтобы биссектриса угла между их осями пропускания составляла прямой угол с осью пропускания поляризатора Р. Интенсивность света на фоторегистрирующих матрицах видеокамер зависит от фарадеевского вращения и углового положения анализаторов. С помощью оптической микроскопической системы на регистраторах формируются магнитооптические изображения некоторого участка исследуемой области пространства, локальные яркости которых зависят от фарадеевского вращения и, соответственно, от магнитного поля. Сигналы с каждого из каналов преобразуются в цифровую форму, загружаются в ЭВМ, где производится их вычитание и окончательная обработка. Таким образом, выходным сигналом измерительной системы является цифровой разностный сигнал.

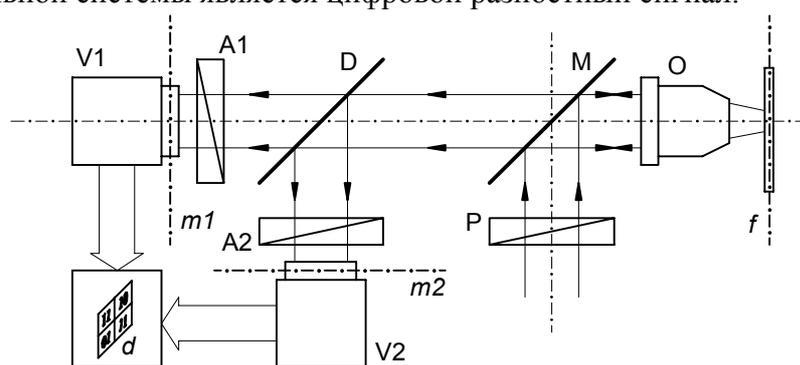


Рис. 1. Схема дифференциальной магнитооптической измерительной установки. О – объектив, М и D – полупрозрачные зеркала Р – поляризатор, А1 и А2 – анализаторы, V1 и V2 – видеокамеры.  $f$  – плоскость магнитооптического преобразователя,  $m1$  и  $m2$  – плоскости фотозлектрических преобразователей,  $d$  – область определения цифрового сигнала

Моделью рассмотренной измерительной магнитооптической установки может служить  $2D$  система, на вход которой подано распределение магнитного поля в плоскости ( $f$ ) магнитооптического преобразователя, а выходом является двумерный цифровой сигнал, определенный на плоскости  $d$ , причем  $f$  и  $d$  связаны проективным преобразованием. Под  $2D$  системой подразумевается преобразование, ставящее в соответствие входной двумерной функции элемент из множества значений выходной двумерной функции. В общем случае это преобразование является интегральным, однако расположение плоскостей преобразователей в стигматических плоскостях оптической системы позволяет пренебречь этим обстоятельством и рассматривать его как функцию, которая есть отображение из множества  $B_k(\mathbf{r}_f)$  во множество  $s(\mathbf{r}_d)$  такое, что точка  $\mathbf{r}_f$  переходит в сопряженную точку  $\mathbf{r}_d$ :

$$s(\mathbf{r}_d) = L(B_k(\mathbf{r}_f), \mathbf{r}_f), \quad (1)$$

где  $\mathbf{r}_f$  - радиус-вектор точки в плоскости магнитооптического преобразователя (плоскость  $f$  на рис. 1),  $\mathbf{r}_d$  - радиус-вектор точки цифрового сигнала, сопряженной с  $\mathbf{r}_f$ ,  $s$  - цифровой сигнал,  $B_k$  - проекция вектора индукции магнитного поля на направление волнового вектора. Прямая зависимость  $L$  от  $\mathbf{r}_f$  в уравнении (1) отражает зависимость выходного сигнала от дополнительных (в общем случае неоднородных) параметров, непосредственно не связанных с измеряемым полем.

**Градуировка.** Процедура градуировки осложняется зависимостью сигнала от нескольких неоднородно распределенных параметров (освещенность, локальные вариации свойств ВcМПФГ, разброс чувствительности элементов матрицы ПЗС и т. п.). При использовании одной выбранной тем или иным способом градуировочной кривой по методу [6] это приводит к дополнительной погрешности, тем большей, чем значительнее разброс параметров компонентов системы.

Для уменьшения погрешностей, вносимых при градуировке по единственной кривой [6], в настоящей работе предлагается сквозная поточечная градуировка. Градуировочная кривая определяется отдельно для каждой пары сопряженных точек входной  $f$  и выходной  $d$  плоскостей (рис. 1). Градуировочная функция представляет собой такое преобразование выходного сигнала, при котором его численные значения становятся равными значениям входного сигнала, то есть:

$$B'(\mathbf{r}_d) = G(s(\mathbf{r}_d)) = B_k(\mathbf{r}_f), \quad (2)$$

где  $B'(\mathbf{r}_d)$  - градуированный сигнал,  $G$  - градуировочная функция,  $\mathbf{r}_f$  и  $\mathbf{r}_d$  - сопряженные точки входной и выходной плоскостей системы. Из сравнения выражений (1) и (2) видно, что  $G$  является функцией, обратной к  $L$ . Таким образом, если прямое преобразование известно и оно является взаимно однозначным, то всегда можно получить градуировочную функцию.

Прямое преобразование реализуется следующим образом. Магнитооптический индикатор помещался в однородное магнитное поле, создаваемое соленоидом. Для ряда значений поля фиксировался выходной цифровой двумерный сигнал  $s(\mathbf{r}_d)$  и определялась зависимость выходного сигнала от приложенного поля для каждой точки  $\mathbf{r}_d$  выходной плоскости. На рис. 2 представлены четыре кривые, характеризующиеся различным наклоном и (в меньшей степени) сдвигом. Асимптотическое поведение функций в больших полях связано с магнитным насыщением плёнки. Тангенс угла наклона кривых определяет чувствительность измерительной системы, а его зависимость от координаты в плоскости выходного сигнала указывает на неоднородность чувствительности по полю зрения. На рис. 3 представлено распределение чувствительности системы при нулевом поле в плоскости выходного сигнала.

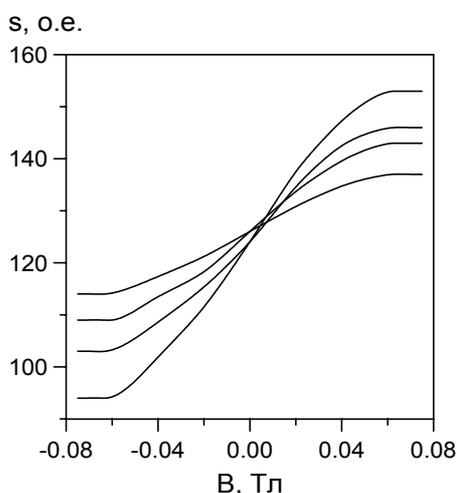


Рис. 2. Зависимость сигнала от приложенного поля для четырех различных точек в плоскости выходного сигнала

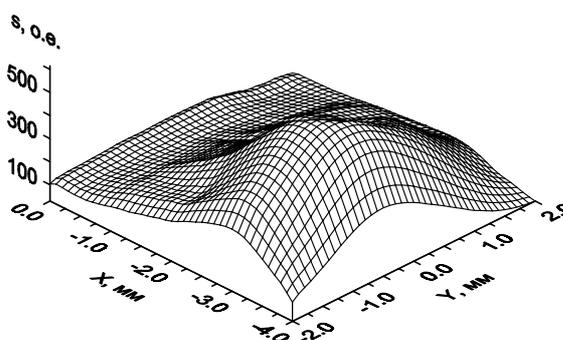


Рис. 3. Экспериментальное распределение чувствительности дифференциальной измерительной системы по области определения выходного сигнала

Представленные на рис. 4 искомые градуировочные кривые определяются как обратные функции к кривым рис. 2. В больших полях градуировка теряет смысл, т.к. из-за насыщения функций прямого преобразования градуировочные кривые становятся неоднозначными<sup>\*)</sup>.

Полученная совокупность кривых применялась для градуировки магнитного поля аксиально намагниченного 30-полюсного ротора экспериментального микродвигателя (образец предоставлен электротехнической лабораторией LEG INP Grenoble, Франция).

На рис. 5 приведены исходные и градуированные данные для индукции поля в рабочем зазоре на расстоянии 0,5 мм от поверхности ротора.

<sup>\*)</sup> Отметим, что неоднозначность возникает также при наличии в системе элементов, осуществляющих адаптивное контрастирование, например, АРУ - автоматической регулировки усиления.

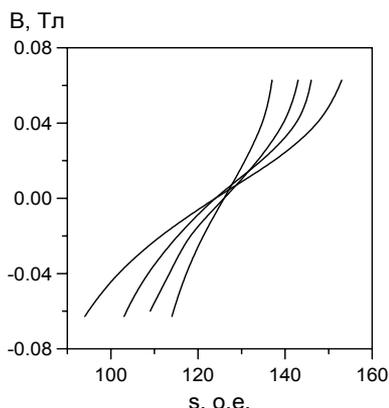


Рис. 4. Градуировочные кривые для четырех точек  $\Gamma_d$  в плоскости выходного сигнала

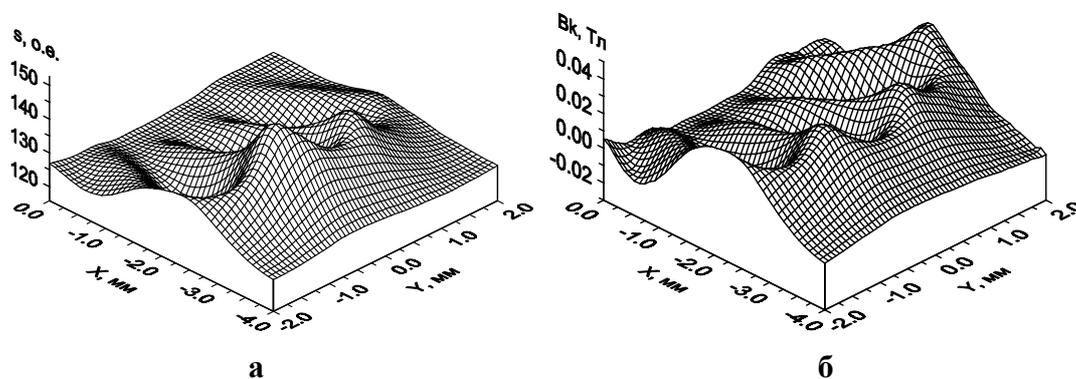


Рис. 5. Нормальная компонента магнитного поле ротора микродвигателя на расстоянии 0.5 мм от его поверхности. *а* – исходные, *б* – градуированные данные

По исходным данным (рис. 5,а) максимумы полей соседних полюсов кажутся существенно различными - для центрального полюса на 15...20 % выше, чем для левых и правых соседей, что обусловлено в основном неоднородностью освещённости поля зрения. При поточечной градуировке эта и другие погрешности измерения компенсируются, в результате чего максимумы выравниваются (рис. 5,б).

**Заключение.** В магнитооптической дифференциальной установке с индикаторными плёнками с планарной анизотропией простым и естественным образом реализуется высокоэффективная система визуализации и количественной оценки магнитного поля, распределенного в заданной плоскости наблюдения. Поточечная сквозная градуировка компенсирует суммарный эффект погрешностей различной природы и позволяет существенно повысить точность измерений. Применение современной вычислительной техники позволяет обойти возникающее при этом затруднение, связанное со значительным количеством вычислений, необходимых для формирования совокупности градуировочных кривых. Число таких кривых в пределе может равняться числу элементов фоторегистрирующей матрицы.

Сравнивая магнитооптические системы с матричными и сканирующими средствами измерений микрораспределений магнитного поля, следует отметить, что первые в техническом плане опираются на хорошо отработанные устройства цифровой регистрации изображений с помощью твердотельных видеокамер. Выпускаемые серийно стандартные видеокамеры характеризуются матрицей ПЗС с числом элементов 640×480 и более, скоростью считывания информации порядка 15 кадров в секунду и разрядностью не менее 8 бит. По числу элементов матрицы ПЗС намного превосходят матрицы элементов Холла [10], при этом оптический принцип измерений позволяет гибко и оперативно менять площади анализируемых участков от 10×10 мкм до 5000×5000 мкм и более. Что касается установок электромеханического сканирования (включая атомный силовой микроскоп), то их быстродействие несравнимо (на многие порядки значений) ниже, чем у магнитооптических схем [3], что практически исключает их использование в системах экспресс-контроля.

Работа выполнена при поддержке гранта Е02-3.4-351 Минобразования РФ по фундаментальным исследованиям в области естественных и точных наук.

#### **Литература**

1. Grechishkin R.M., Goosev M.Yu., Plyashenko S.E., Neustroev N.S. High resolution sensitive magneto-optic ferrite-garnet films with planar anisotropy // *J. Magn. Mater.* 1996. V.157/158. P. 305-306.
2. Гусев М.Ю., Гречишкин Р.М., Козлов Ю.Ф., Неустроев Н.С. Магнитооптическая визуализация магнитного поля с помощью монокристаллических пленок ферритов-гранатов // *Изв. ВУЗов. Материалы электронной техники.* 2000. № 1. С. 27-37.
3. Brezcko T., Grechishkin R.M., Bramowicz M., Szczepanek J., Afanasieva L.E., Guslov M.E. Comparative study of scanning force and polarized light microscopy of magnetic and ferroelectric domains // *Proc. SPAS.* 2002. V. 6. P. B26-B28.
4. Soshin S.S., Grechishkin R.M., Afanasieva L.E., Lempaczek A., Brezcko T. Computer aided differential polarized light microscopy of magnetic and ferroelectric domain structures // *Proc. SPAS.* 2002. V. 6. P. B23-B25.
5. Grechishkin R.M., Malyshkina O.V., Soshin S.S. Digital recording and analysis of optical-polarization images of a domain structure // *Meas. Techn.* 1999. V. 42. P. 1043-1046.
6. Korpusov O.M., Grechishkin R.M., Brezcko T., Goosev M.Yu. and Neustroev N.S. Magneto-optic visualization of magnetic field microdistributions: principles and applications for NDT of smart structures and materials // *Proc. SPIE.* 2003. V. 5127. P.140-142
7. Jooss Ch., Albrecht J., Kuhn H., Leonhardt S., Kronmuller H. Magneto-optical studies of current distributions in high- $T_c$  superconductors // *Rep. Prog. Phys.* 2002. V. 65. P. 651-788.
8. Gibbs M.R., Hill E.W., Wright P.J. Magnetic materials for MEMS applications // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2004. V. 37. P. R237-R244.
9. Cugat O. *Micro-actionneurs electromagnetiques.* Paris, Lavoisier, 2002.
10. Ziese M., Hohne R., Esquinazi P., Busch P. Micromagnetic studies of magnetite films using  $\mu$ -Hall sensor arrays // *Phys. Rev. B.* 2002. V. 66. P. 134408.