

05;07

Смешанный магнитооптический контраст, вызванный неоднородным магнитным полем в пленках с плоскостной анизотропией

© В.Е. Иванов

Уральский государственный университет им. А.М. Горького, Екатеринбург
E-mail: vladimir.ivanov@usu.ru

Поступило в Редакцию 13 октября 2008 г.

В магнитных металлических пленках с плоскостной анизотропией изучались магнитооптические (МО) изображения, вызванные внешним сильно неоднородным магнитным полем. В геометрии полярного эффекта Керра наблюдались МО-изображения, создаваемые распределением нормальной компоненты намагниченности. В геометрии меридионального эффекта Керра наблюдалось наложение МО-изображений (смешанный магнитооптический контраст), обусловленное распределением нормальной и горизонтальной компонент намагниченности.

Проведен расчет распределения намагниченности в пленке, соответствующего координатной зависимости поля магнитной системы, и смоделированы соответствующие МО-изображения. Показано удовлетворительное согласие теории и эксперимента.

PACS: 78.20.Ls, 75.70.Ak

Визуализация неоднородных магнитных полей при помощи эпитаксиальных феррит-гранатовых пленок становится действенным способом контроля пространственного распределения поля, в особенности имеющего сложную пространственную конфигурацию в виде рисунков (на банкнотах), магнитных меток, несплошностей в магнитных материалах и т.д. Для этого используются пленки с перпендикулярной и плоскостной анизотропией. Визуализация неоднородного поля осуществляется путем наблюдения характерных картин доменной структуры в пленках с перпендикулярной анизотропией. Эти картины используются и для топографирования поля путем пространственной регистрации

так называемых линий равной напряженности при действии внешнего поля.

В пленках с плоскостной анизотропией наблюдают аналоговое магнитооптическое (МО) изображение. Яркость этих изображений пропорциональна нормальной компоненте намагниченности индикаторной пленки. Величина нормальной компоненты намагниченности определяется соотношением нормальной (H_z) и тангенциальной (H_x) по отношению к плоскости индикаторной пленки компонентами неоднородного магнитного поля [1]. Это явление позволяет использовать пленки ферритов-гранатов для аналогового визуализации и топографирования неоднородных магнитных полей.

В [2] количественно анализировались МО-изображения, возникающие в индикаторной пленке феррита-граната с плоскостной анизотропией под действием поля рассеяния магнитной ленты (сигналограммы). Показано, что яркость изображения пропорциональна нормальной компоненте поля рассеяния и в конечном итоге градиенту планарной намагниченности ленты. Кроме того, на фоне аналогового контраста в индикаторной пленке наблюдались доменные границы, разделяющие „домены“ с противоположным направлением намагниченности. Существование этих границ связано со сменой знака горизонтальной компоненты поля рассеяния, что является дополнительной информацией о распределении поля источника.

В аналогичной ситуации можно ожидать возникновения подобных МО-картин и в металлических магнитных пленках с плоскостной анизотропией. При этом в геометрии полярного эффекта Керра (нормальное падение света) интенсивность света, прошедшего через анализатор должна быть пропорциональна величине нормальной компоненты намагниченности в индикаторной пленке. В геометрии меридионального эффекта Керра вероятно наблюдение смешанного МО-контраста, обусловленного вкладами от вертикальной и горизонтальной компонент намагниченности.

В нашей работе анализируются МО-изображения, возникающие в магнитных металлических и аморфных пленках с плоскостной анизотропией под действием сильно неоднородного магнитного поля. Постановка такого эксперимента вызывает интерес с точки зрения характеристик возникающей в индикаторной пленке магнитной структуры и соответствующих этой структуре МО-картин. С другой стороны, выявление связи этих картин с магнитной структурой и в конечном

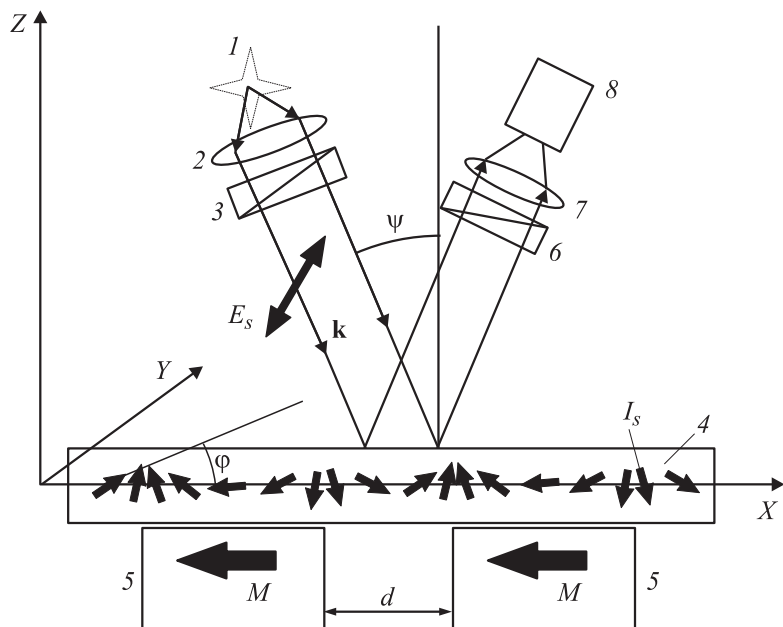


Рис. 1. Схема регистрации магнитооптического изображения: 1 — источник света (светодиод), 2 — конденсатор, 3 — поляризатор, 4 — магнитная индикаторная пленка, 5 — постоянные магниты, 6 — анализатор, 7 — объектив, 8 — телекамера.

итоге с координатной зависимостью неоднородного внешнего поля будет способствовать созданию новых магнитооптических сред для аналоговой визуализации магнитного поля.

Сильно неоднородное поле создавалось системой из двух прямоугольных постоянных магнитов SmCo_5 , магнитные моменты которых ориентированы параллельно плоскости индикаторной пленки (рис. 1). Расчеты и эксперимент показали [3], что при такой геометрии наибольшая неоднородность поля реализуется над краями магнитов — горизонтальная H_x -компонента меняет знак, а вертикальная H_z -компонента имеет острые пики (рис. 2, а). Эта особенность обуславливает соответствующее значительное изменение по оси X обеих компонент намагни-

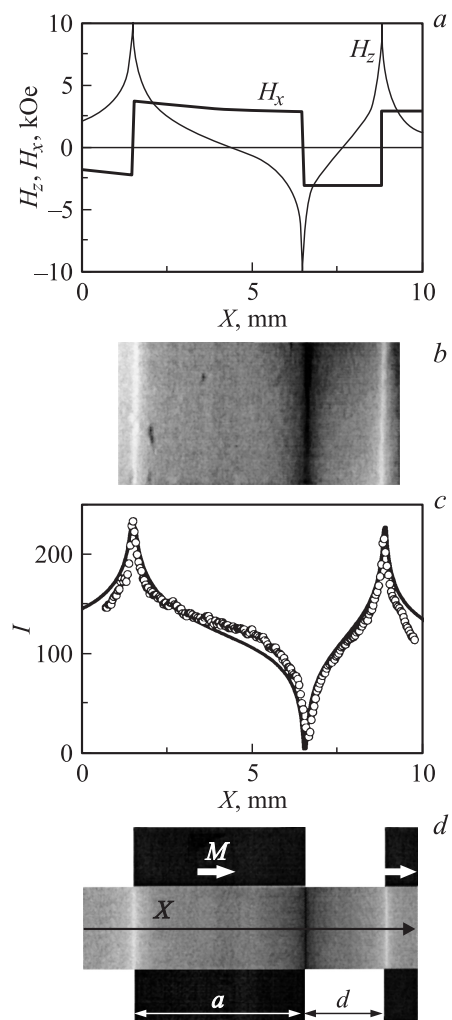


Рис. 2. Координатная зависимость вертикальной (H_z) и горизонтальной (H_x) компонент поля рассеяния, формирующего МО-изображение (a); МО-изображение при нормальном падении света (b); экспериментальная и рассчитанная кривые яркости изображения (c); смоделированное МО-изображение (d), черными прямоугольниками показаны фрагменты магнитов шириной a , d — расстояние между ними. Масштаб графиков и МО-картин совпадает.

Характеристики источника неоднородного магнитного поля и индикаторных пленок

Образцы	Материалы	Размеры	J_s ,	H_A ,
		$a \times b \times c, \text{mm}$	Gs	Oe
Магнитная система 2 магнита, намагничены по оси X	SmCo ₅	5 × 20 × 10	960	200000
Индикаторные пленки с осью легкого намагничивания в плоскости	Gd–Co аморфные	4 × 10 × 0.0005	60	8000
	Co поликри- сталлические	4 × 10 × 0.00012	1270	16000

ченности J_s в индикаторной пленке, чем облегчается наблюдение и интерпретация возникающего МО-изображения. Кроме того, применение такой системы давало возможность варьировать характер координатной зависимости поля рассеяния магнитной системы в промежутке между магнитами путем изменения ориентации магнитного момента (M) в одном из магнитов и расстояния между магнитами (d). В качестве индикаторных пленок использовались поликристаллические пленки Co и аморфные Gd–Co с одноосной наведенной в процессе осаждения анизотропией в плоскости пленок. Энергия анизотропии таких пленок складывается из энергии наведенной и энергии анизотропии формы:

$$E_A = K_u \sin^2 \theta + 2\pi J_s^2 \sin^2 \varphi, \quad (1)$$

где θ — угол между наведенной осью и J_s ; K_u — константа одноосной анизотропии, наведенной в плоскости пленки; φ — угол между J_s и плоскостью пленки. Намагниченность и поля анизотропии измерялись при помощи вибромагнитометра. Параметры этих пленок приведены в таблице.

МО-изображения наблюдались в геометрии полярного эффекта Керра ($\psi = 0$, ψ — угол между падающим лучом и нормалью к поверхности индикаторной пленки, рис. 1) и в геометрии меридионального эффекта Керра ($\psi \sim 30^\circ$). Известно, что при наклонном падении света на отражающую поверхность магнитного металла в общем случае

возникает магнитооптический контраст, обусловленный полярным, меридиональным и экваториальным эффектом Керра. Магнитооптические измерения магнитных характеристик и наблюдения доменной структуры проводятся преимущественно при помощи одного из этих эффектов при подавлении других различными способами. В нашем случае возникающая в индикаторной пленке под действием неоднородного магнитного поля магнитная структура создавала смешанный магнитооптический контраст, обусловленный полярным и меридиональным эффектами Керра, причем наилучшие условия наблюдения выполнялись, когда компонента электрического вектора \mathbf{E}_s была перпендикулярна плоскости падения и магнитному моменту магнитной системы и соответственно намагниченности индикаторной пленки. С целью анализа вкладов от этих двух эффектов применялся метод вычитания и сложения изображений, позволяющий получать МО-картины, обусловленные только горизонтальной компонентой намагниченности. Для этого картины, соответствующие $\psi = 0^\circ$ и $\psi \sim 30^\circ$ масштабировались в прикладном пакете Potoshop и вычитались одна из другой. Наблюдаемые изображения дают информацию для качественного анализа эксперимента. Для количественного анализа эти картины проходили процедуру фотометрирования в единицах относительной яркости черно-белого изображения (коэффициент альбедо) $\alpha = \Phi/\Phi_0$ в прикладном пакете MathCAD. Здесь Φ_0 — интенсивность падающего потока, Φ — интенсивность отраженного потока. В MathCAD различаются 255 градаций яркости. Поэтому соотношение между относительной яркостью в MathCAD и коэффициентом альбедо $I = 255\alpha$. Для белой поверхности $\alpha = 1$, $I = 255$, для черной $\alpha = 0$, $I = 0$. Такая оцифровка позволяла количественно сравнивать экспериментальную яркость изображения с рассчитанной.

Ниже все результаты приведены для индикаторной аморфной пленки Gd—Co, поскольку в этом случае получался максимальный контраст МО-изображения благодаря небольшому значению поля анизотропии этой пленки. Кроме того, оси легкого намагничивания индикаторных пленок ориентировались параллельно плоскости падения и горизонтальной компоненте поля рассеяния, при этом в формуле (1) $\theta = \varphi$.

Проанализируем МО-изображения, возникающие в индикаторной пленке под действием пространственно-неоднородного магнитного поля, распределение которого показано на рис. 2, а. Как видно из этого рисунка, положительные и отрицательные пики H_z -компоненты череду-

ются, а зависимость H_x -компоненты похожа на меандр. В геометрии полярного МО-эффекта Керра ($\psi = 0$) наблюдается картина в виде темной размытой полосы, пространственно соответствующей отрицательному пику H_z -компоненты, и двух светлых полос, соответствующих положительным пикам H_z -компоненты (рис. 2, *b*). Количественно это изменение яркости $I(x)$ характеризует график на рис. 2, *c* (экспериментальные точки). Из этого графика видно, что зависимость $I(x)$, так же как и $H_z(x)$, имеет пики точно над краями магнитов и монотонное изменение между ними, что позволяет в первом приближении записать $I(x) \sim H_z(x)$.

При наклонном падении света ($\psi \sim 30^\circ$) получалась картина (рис. 3, *a*), в значительной степени „похожая“ на изображение в геометрии полярного эффекта Керра. Внимательное рассмотрение обнаруживает наложение дополнительного изменения яркости — область, соответствующая положительному направлению H_x -компоненты (над магнитом) в целом светлее области, где H_x -компонента отрицательна. Соответствующий график зависимости $I(x)$ приведен на рис. 3, *b*. Очевидно, наблюдаемое изображение является результатом наложения картин, соответствующих пространственному распределению как вертикальной, так и горизонтальной компонент намагниченности, и поэтому может быть названным смешанным магнитооптическим изображением. При данных условиях наблюдения вкладом, связанным с экваториальным эффектом Керра, можно пренебречь. Картина на рис. 4, *a* получена вычитанием картины на рис. 3, *a* из картины на рис. 2, *b* и характеризует контраст, создаваемый J_x -компонентой намагниченности.

Расшифровка наблюдаемых картин проведена при учете координатного распределения намагниченности $\mathbf{J}_s(x)$ (магнитной структуры) в индикаторной пленке и соответствующей этому распределению яркости, смоделированной в предположении аддитивности вкладов обоих МО-эффектов. Распределение $\mathbf{J}_s(x)$ находилось из уравнения

$$H_z/m_z - H_x/m_x = H_A, \quad (2)$$

соответствующего минимуму энергии: $E = -\mathbf{J}_s(x)H(x) + K_{eff} \sin^2 \varphi$, где $H(x)$ — поле, создаваемое магнитной системой в точке x , φ — угол между вектором J_s и плоскостью пленки, $m_x = \cos \varphi = J_{sx}/J_s$, $m_z = \sin \varphi = J_{sz}/J_s$, K_{eff} — эффективная константа анизотропии, определяется величиной одноосной анизотропии в плоскости и анизотропией формы: $K_{eff} = K_u + 2\pi J_s^2$, $H_A = 2K_{eff}/K_s$ — поле анизотропии.

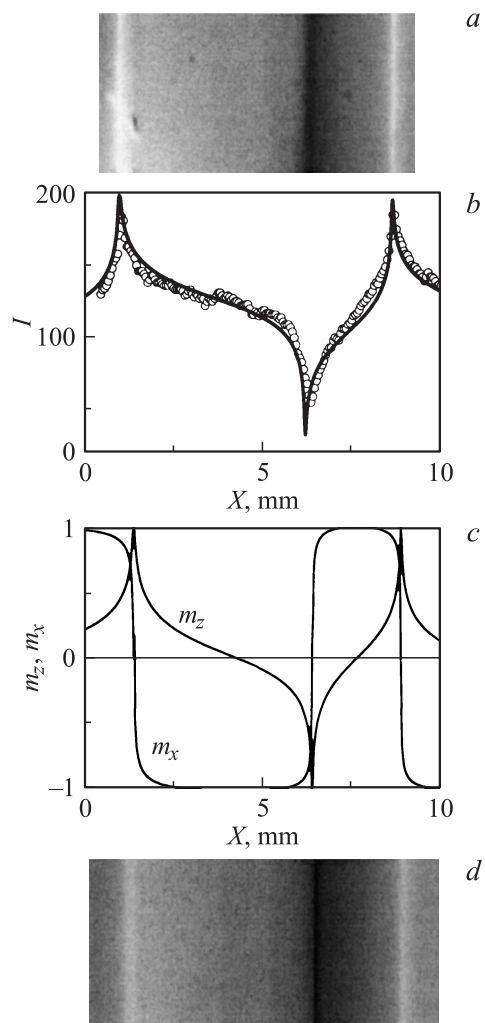


Рис. 3. Смешанное МО-изображение в индикаторной пленке при наклонном падении (*a*); соответствующая экспериментальная и рассчитанная кривые яркости изображения (*b*); рассчитанное распределение m_x , m_z компонент в индикаторной пленке (*c*); соответствующее смоделированное МО-изображение (*d*).

Расчет показывает, что координатные зависимости $m_x(x)$ и $m_z(x)$ имеют ярко выраженные особенности (рис. 3, *c*), соответствующие изменению знака H_x и резкому возрастанию H_z -компонент.

При моделировании МО-изображения считалось, что яркость изображения линейно зависит от компонента намагниченности и магнитооптических параметров материала [4]:

$$I = I_0 + A_{mer}m_x - B_{pol}m_z. \quad (3)$$

Магнитооптические параметры A_{mer} и B_{pol} считались подгоночными, однако учитывалось, что $B_{pol} = 3A_{mer}$ [5]. Результаты моделирования яркости $I(x)$ для полярного эффекта Керра находятся в удовлетворительном согласии с экспериментальной кривой фотометрирования (рис. 2, *c*, сплошная кривая). На этом же рисунке ниже приведена картина смоделированного МО-изображения для нормального падения света ($A_{mer} = 0$). Удовлетворительное количественное согласие для наклонного падения (смешанный контраст) в поведении рассчитанной (рис. 3, *b*, сплошная кривая) и экспериментальной зависимостей $I(x)$ и практически идентичные экспериментальная и рассчитанная картины МО-изображения (сравните рис. 3, *a* и рис. 3, *d*) также подтверждают достаточность условий моделирования.

На рис. 4, *c* для сравнения приведено смоделированное МО-изображение, вызванное только m_x -компонентой (меридиональный эффект Керра в „чистом“ виде). Интенсивность рассчитывалась по формуле (3) в предположении $m_z = 0$. Небольшое плавное изменение интенсивности на этом рисунке вблизи краев магнита связано со сглаживанием углов на зависимости $m_x(x)$ согласно графику на рис. 3, *c*. Сравнение картин на рис. 4, *a* и *c*, а также экспериментальной и теоретической зависимостей $I(x)$ (рис. 4, *b*) для „меридионального“ эффекта Керра показывает невысокое отношение сигнал/шум, вероятно из-за небольшого значения A_{mer} .

Таким образом, экспериментально показано, что в магнитных металлических и аморфных пленках с плоскостной анизотропией, находящихся в сильно неоднородном внешнем магнитном поле, возникают магнитооптические изображения, характер которых зависит от геометрии наблюдения и конфигурации внешнего поля. При нормальном падении света яркость изображения пропорциональна нормальной компоненте намагниченности в индикаторной пленке и величине нормальной компоненты магнитного поля. При наклонном падении МО-изображения

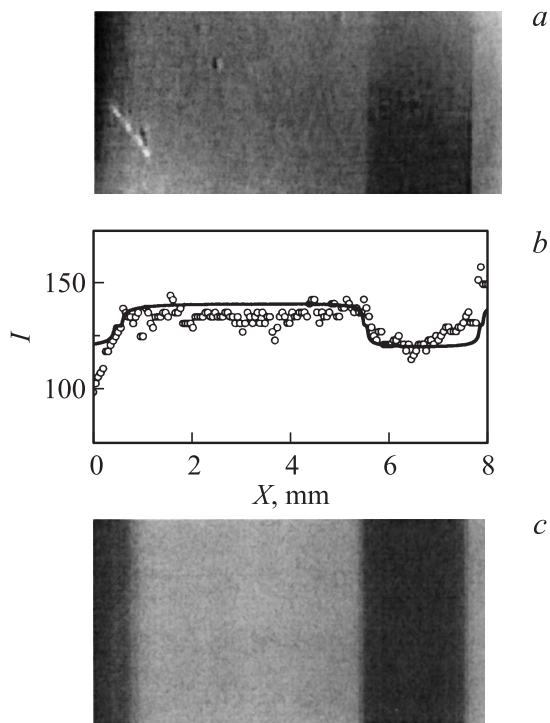


Рис. 4. МО-изображение, соответствующее „меридиональному“ эффекту Керра (*a*); экспериментальная и рассчитанные кривые яркости изображения (*b*); смоделированное МО-изображение (*c*).

имеют сложную структуру. Сравнение экспериментального и теоретического распределения яркости показывает, что наблюдаемые изображения являются результатом сложения интенсивностей, являющихся линейными функциями соответственно вертикальной и горизонтальной компонент намагниченности индикаторной пленки и в целом эти картины отображают пространственное распределение обеих компонент неоднородного поля.

Работа выполнена при поддержке гранта 08-02-99081-р_офи.

Список литературы

- [1] *Grechishkin R.M., Goosev M.Yu., Ilyashenko S.E., Neustroev N.S.* // J. Magn. and Magn. Mater. 1996. V. 157/158. P. 305–306.
- [2] *Ferrari H., Bekeris V., Thibeault M., Johansen N.H.* // J. Magn. and Magn. Mater. 2007. V. 313. P. 98–106.
- [3] *Самофалов В.Н., Равлик А.Г., Белозоров Д.П., Авраменко Б.А.* // Физика металлов и металловедение. 2004. Т. 97. № 3. С. 15–23.
- [4] *Червинский М.М., Глаголев С.Ф., Горбунов И.П.* Магнитооптические методы и средства определения магнитных характеристик материалов. Л.: Энергия, 1980. 124 с.
- [5] *Хант.* Магнитооптика, лазеры и устройства памяти // Зарубежная радиоэлектроника. 1971. № 2.