

07;11;12

Магнитооптические изображения неоднородных магнитных полей в металлических пленках с плоскостной анизотропией

© В.Е. Иванов, В.Н. Лепаловский

Уральский федеральный университет, НИИФПМ,
620083 Екатеринбург, Россия
e-mail: vladimir.ivanov@usu.ru

(Поступило в Редакцию 31 мая 2011 г.)

Экспериментально изучены магнитооптические (МО) изображения неоднородного поля, создаваемого постоянными магнитами, в магнитных металлических пленках с плоскостной анизотропией. МО-изображения, регистрируемые при помощи меридионального эффекта Керра, являются наложением двух картин — МО-изображения в полярной чувствительности и МО-изображения в меридиональной чувствительности. Анализ этих изображений после разделения показал, что МО-изображение в полярной чувствительности аналогово отображает распределение нормальной к плоскости индикаторной пленки компоненты неоднородного поля. МО-изображение в меридиональной чувствительности аналогово отражает угловое распределение плоскостной компоненты поля рассеяния. Совпадение экспериментальных и соответствующих модельных МО-изображений дает возможность расшифровать особенности первых. В частности, показано, что наблюдаемым экспериментально особым точкам соответствуют особенности топологических характеристик неоднородного поля. Показана возможность визуализации скрытых магнитных изображений (магнитный код) при помощи металлических пленок CoFe. Приведен пример топографирования поля рассеяния магнитной системы, состоящей из цилиндрических магнитов.

Введение

Эпитаксиальные пленки ферритов-гранатов с плоскостной анизотропией успешно применяются для визуализации и топографирования полей рассеяния различных источников магнитного поля [1–3]. Регистрация нормальной к плоскости индикаторной пленки компоненты магнитного поля производится посредством наблюдения координатной зависимости яркости магнитооптического изображения (МО) поля рассеяния, которое возникает благодаря эффекту Фарадея. При некоторых условиях нормальная компонента намагниченности индикаторной пленки линейно зависит от H_z -компоненты поля [4], в результате чего выполняется линейная зависимость H_z -компоненты от интенсивности: $H_z \sim A + kI$. Благодаря этому обстоятельству возможно топографирование поля рассеяния, т.е. построение зависимости $H_z(x, y)$ и определение распределения намагниченности в источнике поля [3].

В работе [5] показано, что в магнитных металлических (Co) и аморфных пленках (Gd–Co) с плоскостной анизотропией, находящимся в сильно неоднородном внешнем магнитном поле, при наблюдении в геометрии меридионального эффекта Керра возникают МО-изображения, характер которых зависит от условий наблюдения и конфигурации внешнего поля. Для „полярного“ эффекта Керра яркость изображения в первом приближении пропорциональна нормальной компоненте намагниченности в индикаторной пленке и величине нормальной компоненты магнитного поля, что открывает возможность топографирования исследуемого поля. При „смешанном“ МО-контрасте изображения имеют сложную структуру. Сравнение экспериментального и

теоретического распределений 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.

В настоящей работе изложены физические принципы визуализации и топографирования неоднородных магнитных полей рассеяния, а также анализируются возможности применения металлических пленок с плоскостной анизотропией для визуализации и топографирования трех пространственных компонент неоднородного магнитного поля в геометрии магнитооптического меридионального эффекта Керра.

Методика эксперимента и образцы

В качестве источников неоднородного магнитного поля использовались магнитные системы (МС) из постоянных магнитов NdFeB в форме параллелепипедов и цилиндров. Конфигурация поля рассеяния менялась ориентацией магнитов в пространстве и расстоянием между ними. Магнитная система 1 (МС1) составлена из двух магнитов, причем их магнитные моменты ориентированы параллельно плоскости наблюдения и навстречу друг другу ($\mathbf{M1} \uparrow \downarrow \mathbf{M2}$; $\mathbf{M1}, \mathbf{M2} \perp \mathbf{n}$) (рис. 1, а). МС2 состояла из магнитов несколько больших размеров, моменты которых ориентированы в разные стороны перпендикулярно плоскости наблюдения ($\mathbf{M1} \uparrow \downarrow \mathbf{M2}$; $\mathbf{M1}, \mathbf{M2} \parallel \mathbf{n}$). Соотношения размеров магнитных систем (a, b, c) и индикаторных пленок выбирались из соображения вы-

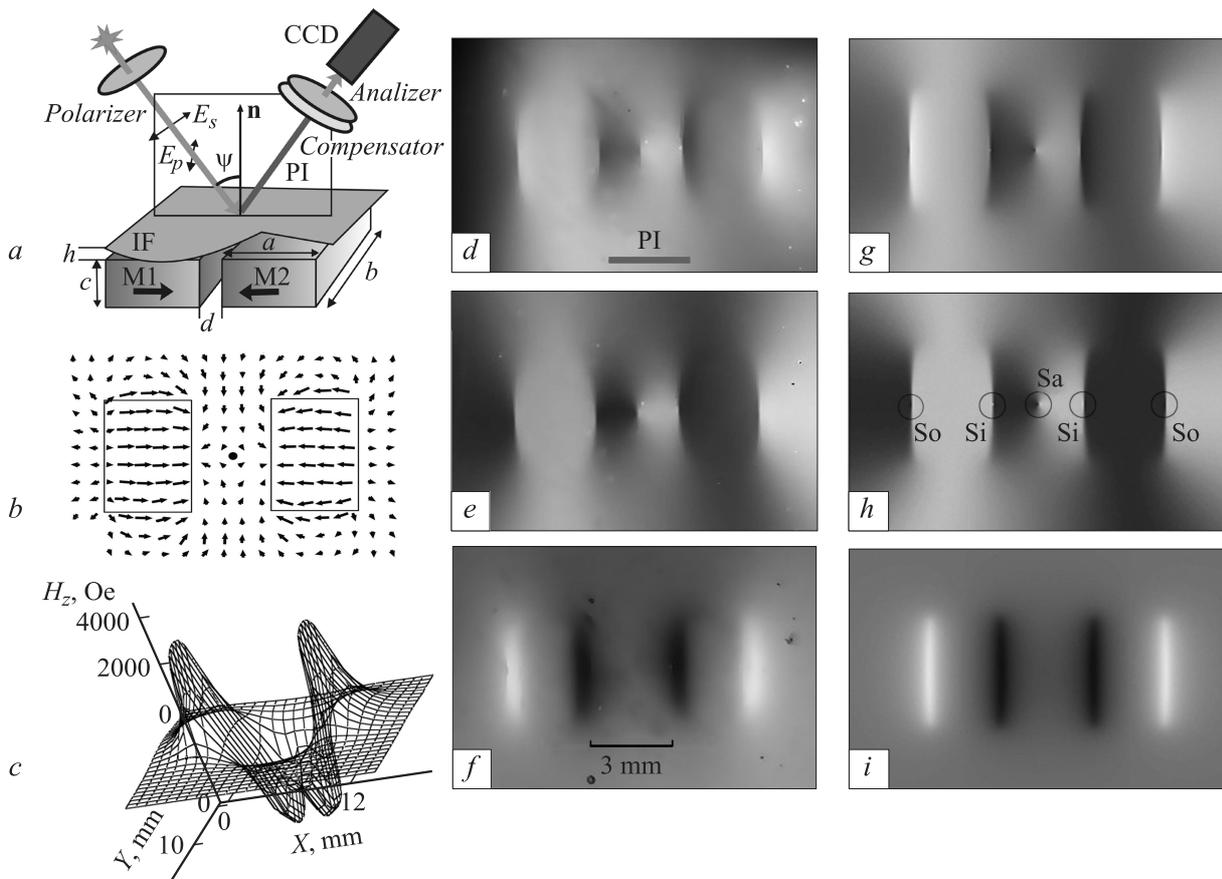


Рис. 1. Оптическая схема наблюдения МО-изображений (a); векторный график H_p -компоненты МС1 (b); распределение H_z -компоненты (c); МО-изображения в смешанной (d), в меридиональной (e) и полярной чувствительностях (f); g, h, i — соответствующие смоделированные МО-изображения.

явления основных характеристик МО-изображений, отражающих конфигурации полей рассеяния.

В качестве регистрирующей среды (индикаторной пленки) использовались пленки FeCo, Fe и Co с плоскостной анизотропией, полученные по методу ВЧ-магнетронного распыления на стеклянные подложки толщиной $h = 0.17$ mm. Считалось, что индикаторная пленка находится на таком расстоянии от источника магнитного поля. Для повышения контраста МО-изображений на поверхность пленок наносились покрытия ZrO_2 толщиной $\lambda/(4n)$, 90 nm. Здесь λ — длина волны применяемого излучения, n — показатель преломления покрытия (1.76).

Наблюдение МО-изображений неоднородного поля проводилось в геометрии меридионального эффекта Керра (смешанный магнитооптический контраст [5]) (рис. 1, a). В качестве источника света использовался красный светодиод. Пучок плоскополяризованного света p - и s -поляризацій получался соответствующей установкой поляризатора. Перед анализатором установлен компенсатор для уменьшения эллиптичности отраженного света. Изображение с аналоговой телекамеры отображалось на экране компьютера с последующим сложением, вычитанием и оцифровкой полученных изображений.

Согласно [6], интенсивность пучка, отраженного от индикаторной пленки, прошедшего через анализатор, определяется соотношением

$$I_s = I_0 - q_{lon}m_{p||} + q_{pol}m_z \text{ при } s\text{-поляризации,} \quad (1)$$

$$I_p = I_0 + q_{lon}m_{p||} - q_{pol}m_z \text{ при } p\text{-поляризации.} \quad (2)$$

Здесь I_0 — интенсивность фоновой засветки, m_z — z -компонента намагниченности индикаторной пленки, $m_{p||}$ — проекция плоскостной компоненты намагниченности на плоскость падения, q_{lon}, q_{pol} — магнитооптические параметры для меридионального и полярного эффектов Керра. Интенсивности и соответственно МО-изображения в „чистом“ виде, отражающие распределение горизонтальной (меридиональная чувствительность) и вертикальной компонент намагниченности (полярная чувствительность) получаем вычитанием и сложением этих интенсивностей (магнитооптических изображений) в прикладном пакете Mathcad:

$$I_{lon} = I_s - I_p = -2q_{lon}m_{p||}, \quad (3)$$

$$I_{pol} = I_s + I_p = 2I_0 + q_{pol}m_z. \quad (4)$$

При обсуждении МО-изображений система координат привязана к индикаторной пленке так, что на фотографиях ось X ориентирована слева направо, ось Y — снизу вверх, ось Z — перпендикулярно плоскости изображениям. Необходимо отметить, что наблюдаемое МО-изображение существенным образом зависит от ориентации плоскости падения относительно системы координат, связанной с магнитной системой. Ориентация плоскости падения указана на фотографиях линией PI .

Результаты эксперимента

На рис. 1 представлены результаты наблюдения МО-изображений неоднородного магнитного поля, которое создается МС1 ($M1 \uparrow \downarrow M2$; $M1, M2 \perp \mathbf{n}$, $a = 3.3$, $b = 3.8$, $c = 5.45$ mm). Характерные для такой магнитной системы пространственные распределения планарной (H_p) и вертикальной (H_z) компонент поля показаны на рис. 1, b, c соответственно. Над ребрами магнитов наблюдаются максимумы и минимумы интенсивности, соответствующие положительному и отрицательному направлениям H_z -компонента над магнитами меняется мало, а над ребрами меняет знак на противоположный. Непосредственная расшифровка изображения в смешанной чувствительности затруднена. Более понятно распределение интенсивности в изображениях, которые получены после разделения картины в смешанной чувствительности на ее составляющие, а именно МО-изображения в меридиональной (рис. 1, e) и полярной (рис. 1, f) чувствительностях. МО-изображение в полярной чувствительности очевидным образом визуализирует распределение H_z -компоненты. При движении слева направо по оси X наблюдаются поочередно светлая, темная, темная размытые полосы над краями магнитов. Это согласуется с поведением нормальной H_z -компоненты над краями магнитов.

Анализ МО-изображений в меридиональной чувствительности показывает хорошую корреляцию поведения плоскостной компоненты поля и распределения интенсивности (рис. 1, e). При движении по оси X можно отчетливо наблюдать резкое изменение яркости в МО-изображении над ребрами магнитов. Это наблюдение согласуется с поведением H_p -компоненты неоднородного поля и, по всей вероятности, намагниченности индикаторной пленки. Кроме того, посередине между магнитами наблюдается область более компактного изменения интенсивности (в точке), что связано с особенностью поведения H_{xp} - и H_{yp} -компонент поля. По осям, параллельным оси Y , интенсивность меняется постепенно, за исключением оси, на которой находится особая точка.

Описанные выше характерные особенности отчетливо проявляются в разделенных изображениях. МО-изображение у смешанной чувствительности (рис. 1, d) в значительной степени напоминает изображение в меридиональной чувствительности (рис. 1, e). Это объясняется более высоким контрастом, рис. 1, e , особенно вблизи особых точек. Вероятно, отмеченная особенность не будет общей закономерностью. По-видимому,

соотношение вкладов в общий рисунок в смешанном контрасте будет зависеть от соотношения вертикальной, горизонтальной компонент неоднородного поля и от величины поля анизотропии формы.

Поворот плоскости падения вокруг вертикальной оси симметрии МС (нормаль \mathbf{n} на рис. 1, a) на угол $\pi/2$ изменяет МО-изображение в меридиональной чувствительности (рис. 2, b). При такой ориентации плоскости падения области над магнитами „пассивны“, поэтому они имеют окраску „серый“ фон. Напротив, области между магнитами выше и ниже горизонтальной оси симметрии (оси X) „активны“, поскольку поле здесь ориентировано по оси Y в положительном и отрицательном направлениях. Кроме того, можно отчетливо наблюдать резкое изменение интенсивности (особые точки) над ребрами магнитов при движении по оси Y , что также связано с особенностями поведения плоскостной компоненты поля в этих точках. Для исследуемой конструкции МС1 имеется 5 особых точек в плоскости наблюдения: по две над ребрами магнитов, которые перпендикулярны магнитным моментам, и одна между магнитами. Наиболее акцентировано описываемое изменение интенсивности наблюдается в меридиональной чувствительности, поскольку оно вызывается поведением $H_p(x, y)$.

Изменение ориентации магнитных моментов от горизонтальной к вертикальной (МС2: $M1 \uparrow \downarrow M2$; $M1, M2 \parallel \mathbf{n}$, $a = 5.3$; $b = 8.8$; $c = 3.3$ mm) меняет распределение $H_z(x, y)$ и $H_p(x, y)$ и соответствующих МО-изображений следующим образом. Вертикальная H_z -компонента мало меняется над поверхностью магнитов, быстро уменьшаясь у краев, меняет знак и, естественно, имеет разные знаки над поверхностью одного и другого магнитов (рис. 3, b). В соответствии с этим в полярной чувствительности на МО-изображении наблюдаются темная и светлая области, границы которых приблизительно очерчивают грани магнитов, находящиеся в контакте с индикаторной пленкой (рис. 3, e).

Горизонтальная компонента неоднородного поля имеет особенности над центрами магнитов (рис. 3, c) — особые точки. Особенность состоит в том, что вблизи центра граней обе компоненты H_x и H_y равны нулю и меняют знак при переходе через эти точки. Поэтому в меридиональной чувствительности наиболее заметный контраст возникает при движении по оси X (рис. 3, f), поскольку на этой оси находятся наиболее активные области, создающие максимальную и минимальную яркости. В целом картина напоминает конверты, что связано с прямоугольной формой магнитов, которая задает ориентацию плоскостной компоненты H_p . После этого анализа становится понятным, что в картине смешанного контраста (рис. 3, d) контуры фигуры, напоминающей конверт, обусловлены распределением плоскостной компоненты H_p , а „средняя“ яркость над поверхностями магнитов определяется знаком $H_z(x)$.

Поворот МС2 на угол $\pi/2$ вокруг нормали к плоскости индикаторной пленки практически не меняет МО-изображение в полярной чувствительности

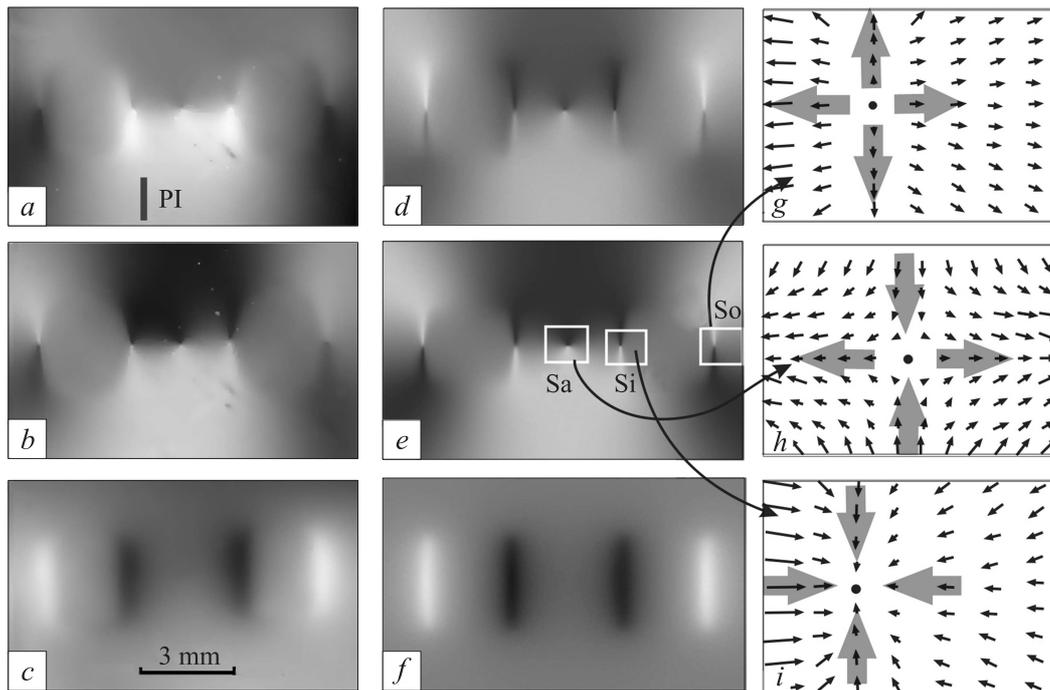


Рис. 2. МО-изображения поля MC1 после поворота плоскости падения света на 90° . МО-изображение в смешанной (a), меридиональной (b) и полярной (c) чувствительностях и соответствующие модельные изображения (d, e, f). Векторные графики распределения компоненты H_p вблизи особых точек (g, h, i). Соответствие векторных графиков особым точкам указано стрелками.

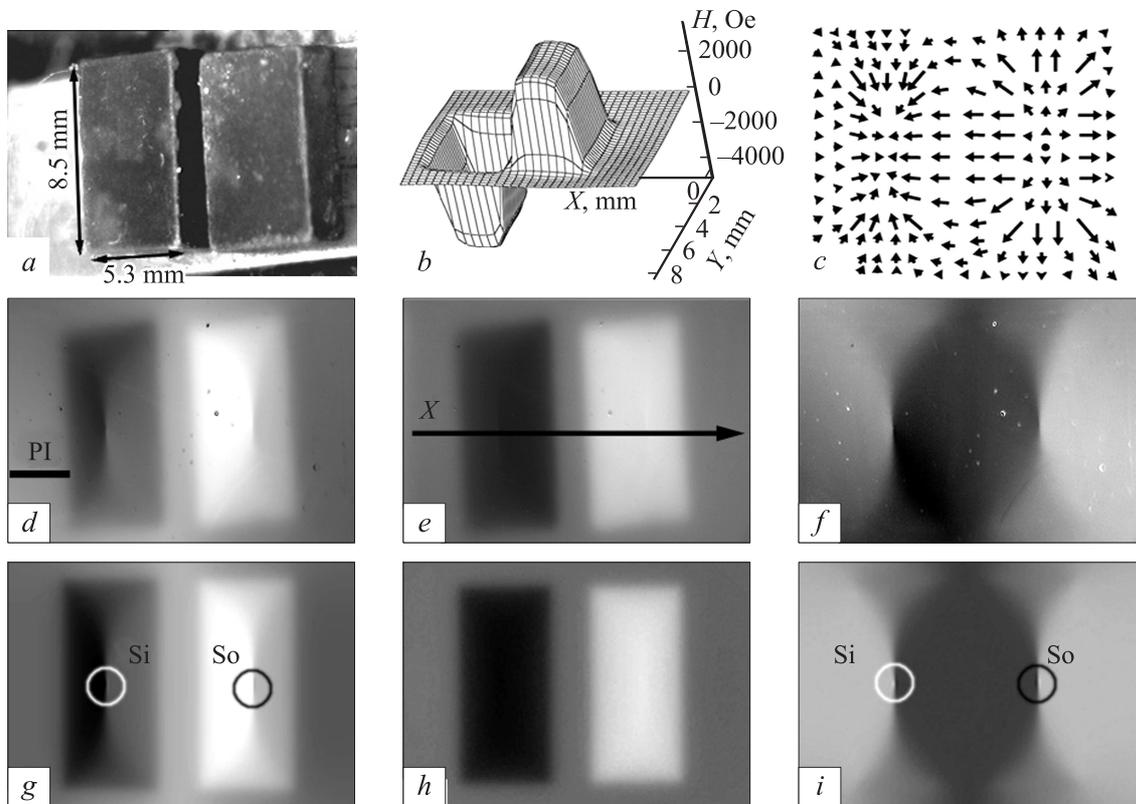


Рис. 3. Вид магнитной системы MC2 (a) и соответствующие пространственные распределения H_z -компоненты (b) и плоскостной компоненты H_p (c). Аналоговая магнитооптическая визуализация поля MC2, соответствующая смешанной (d), полярной (e) и меридиональной (f) чувствительностям, и соответствующие модельные изображения (g, h, i).

(рис. 4, *c*). В меридиональной чувствительности активные и пассивные сегменты „конвертов“ меняются ролями (ср. рис. 4, *b* и 3, *f*). Контраст вблизи особых точек становится более акцентированным. Особые точки заметно смещены от центров магнитов и друг от друга. Это связано с взаимным искажением плоскостной компоненты полей магнитов по сравнению с полем одиночного магнита.

Обращает на себя внимание определяемая визуально корреляция между интенсивностью МО-изображений в полярной чувствительности и величиной (и знаком) H_z -компоненты. Эта корреляция подтверждается количественно сравнением одномерной рассчитанной зависимости $H_z(x)$ (рис. 5, *a*, кривая 1) и результатом оцифровки МО-изображения в полярной чувствительности — одномерной экспериментальной зависимости интенсивности $I(x)$ (рис. 5, *b*). Для наших условий эксперимента можно зафиксировать линейный характер зависимости интенсивности от величины H_z -компоненты: $I(x) = I_0 + kH_z(x)$.

Таким образом, проведенные экспериментальные наблюдения показали, что МО-изображения неоднородного магнитного поля, выявляемые при помощи пленок FeCo с использованием меридионального эффекта Керра (смешанный МО-контраст), имеют общие черты и существенные отличия от МО-изображений, регистрируемых при помощи эффекта Фарадея в пленках ферритов-гранатов с плоскостной анизотропией [3,7]. МО-изображение в смешанной чувствительности несет информацию о распределениях вертикальной и гори-

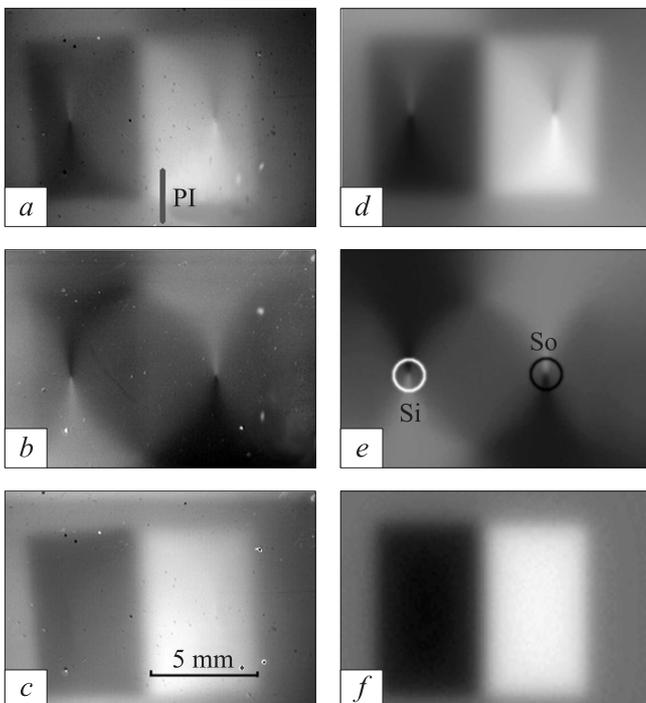


Рис. 4. Аналоговая магнитооптическая визуализация поля МС2, соответствующая смешанной (*a*), меридиональной (*b*) и полярной (*c*) чувствительностям, и соответствующие модельные изображения (*d*, *e*, *f*).

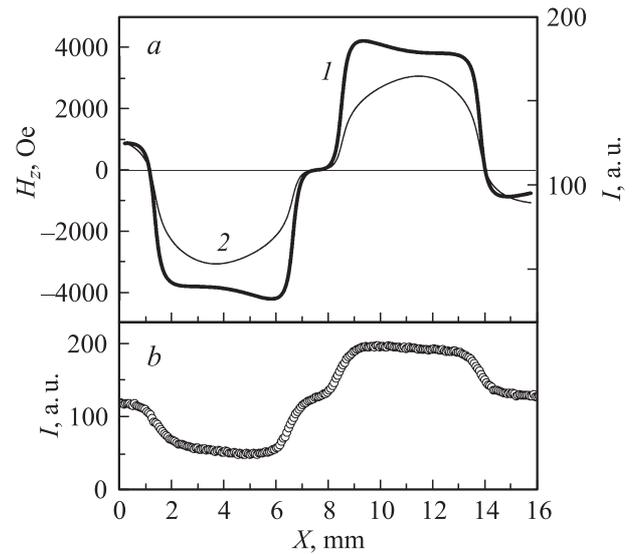


Рис. 5. Одномерная расчетная зависимость H_z -компоненты МС2 (*a*, кривая 1) и расчетная зависимость интенсивности для пленки феррита-граната (*a*, кривая 2); *b* — экспериментальная зависимость интенсивности по оси X (оцифровка МО-изображения рис. 3, *e*).

зонтальных компонент неоднородного поля в плоскости индикаторной пленки. В полярной чувствительности яркость МО-изображений пропорциональна величине H_z -компоненты. Новым результатом является наблюдение изменения интенсивности в МО-изображениях в меридиональной чувствительности, связанное с изменением ориентации плоскостной компоненты намагниченности, которая следует за пространственным изменением плоскостной компоненты поля. Кроме того, впервые наблюдались компактные изменения интенсивности в особых точках. Наличие особых точек на плоскости наблюдения связано с тем, что проекция трехмерного векторного поля на плоскость наблюдения имеет особенности: обе плоскостные компоненты меняют знаки при переходе через эти точки, а в самих точках $H_x, H_y = 0$.

Моделирование магнитооптических изображений неоднородного магнитного поля

Моделирование МО-изображений проводилось по следующей схеме. На первом этапе рассчитывались координатные зависимости трех компонент неоднородного поля. Затем определялись координатные зависимости вертикальной (m_z) и плоскостной (m_p) компонент намагниченности индикаторной пленки, соответствующие рассчитанному полю. Координатное распределение интенсивности в МО-изображении определялось по формулам (3), (4). Затем это распределение визуализировалось в прикладном пакете MathCAD-11. Матрица координатной зависимости интенсивности для визуализации в смешанной чувствительности получалась сложением

матрицы в меридиональной чувствительности с соответствующей матрицей в полярной чувствительности.

Для нахождения m_z и m_p аналогично [4] численно решалось уравнение

$$\frac{H_z}{m_z} - \frac{H_p}{m_p} = H_a, \quad (5)$$

где $H_a = 2K_p/J_s = 4\pi J_s$ — поле анизотропии формы. Это уравнение справедливо для идеального магнитомягкого материала, в котором отсутствует наведенная анизотропия. В этом случае $\mathbf{m}_p \parallel \mathbf{H}_p$.

Видеоряд результатов моделирования МО-изображений неоднородного поля представлен параллельно соответствующим экспериментальным фотографиям (рис. 1–4). Видно хорошее качественное согласие смоделированных и экспериментальных изображений. Количественное согласие подтверждается совпадением особенностей изменения интенсивности вблизи особых точек и их местоположением на координатной плоскости, что указывает на правомерность сделанных приближений. Качественное и количественное согласие результатов моделирования и эксперимента дают возможность классифицировать МО-изображения, соответствующие различным магнитным системам, путем расчетов. В частности, установлено, что количество и местоположение особых точек является характеристикой как отдельных магнитов, так и магнитной системы в целом.

Одиночный магнит с $\mathbf{M} \perp \mathbf{n}$ создает пару особых точек над серединой ребер, перпендикулярных магнитному моменту. Одна из них типа „So (source)“, вторая — „Si (sink)“ (рис. 1, *h* и рис. 2, *e*). На рис. 2, *g* показано распределение поля в окрестности точки типа „So“ — поток вектора \mathbf{H}_p выходит из окрестности особой точки. Если поток вектора \mathbf{B}_p входит в окрестность особой точки „Si“ (рис. 2, *i*), то и соответствующая область МО-изображения превращается в негатив области „So“.

Одиночный магнит с $\mathbf{M} \parallel \mathbf{n}$ создает одну особую точку над центром верхней грани. На рис. 3, *g, i* и рис. 4, *e* точки „So“ — точки истоков, поскольку силовые линии \mathbf{H}_p выходят из окрестности этой точки. Точки „Si“ — точки стоков, поскольку силовые линии \mathbf{H}_p входят в окрестность этих точек. В магнитной системе поле в этих точках искажается полем соседнего магнита, в результате чего особые точки несколько разбегаются, если $\mathbf{M1} \uparrow \downarrow \mathbf{M2}$ (рис. 3, *g*). На рис. 4, *b* расстояние между магнитами меньше, чем на рис. 3, *d*, поэтому особые точки над магнитами еще больше смещены от центров граней. Сонаправленная ориентация магнитных моментов ($\mathbf{M1} \uparrow \uparrow \mathbf{M2}$) приводит к сближению этих особых точек.

Седлообразные „Sa (saddle)“ особые точки (рис. 1, *g* и 2, *e*) создаются двумя источниками поля — магнитом и внешним однородным полем, либо парой магнитов (MC2). Характерная конфигурация векторного поля вблизи Sa-точек показана на рис. 2, *h*. Поведение потоков компоненты H_p в этих точках существенно отличается от их распределения для точек истоков и стоков. Два

встречных входящих и два выходящих потока компенсируют друг друга непосредственно в самой точке. Эти рассуждения справедливы как для распределения компоненты \mathbf{H}_p , так и для \mathbf{J}_p , если $\mathbf{m}_p \parallel \mathbf{H}_p$, что справедливо при небольшой наведенной анизотропии в плоскости.

Анализ возможностей топографирования неоднородных полей рассеяния при помощи металлических пленок с плоскостной анизотропией

Металлические пленки с плоскостной анизотропией могут найти применение в двух вариантах. Наиболее просто реализовать вариант визуализации различных магнитных меток, магнитных штрихкодов по принципу выявления рисунка скрытого магнитного изображения. Для такого применения необходима высокая чувствительность либо к вертикальной (H_z), либо к горизонтальной (H_p) компонентам поля. Высокой чувствительности к H_z -компоненте можно достичь минимизацией наведенной в технологическом процессе анизотропией и снижением анизотропии формы. Пленки переходных металлов, как правило, обладают анизотропией в плоскости. В этом случае максимальная чувствительность к вертикальной компоненте поля требует определенного оптического значения намагниченности. Это значение определяется минимизацией эффективного поля анизотропии при намагничивании перпендикулярно плоскости пленки: $dH_A/dJ_s = 0$. Здесь $H_A = 2K_{\text{eff}}/J_s = 2K_u/J_s + 4\pi J_s$, K_u — константа наведенной в плоскости анизотропии. Получаем $J_s = 0.4\sqrt{K_u}$. Трудность выполнения этого условия связана с требованием высокой магнитооптической добротности пленок (вращения Керра), поскольку оно, как правило, достигается в пленках с большой намагниченностью (Co, Fe, FeCo).

Однако, высокая намагниченность не является препятствием для визуализации плоскостной компоненты поля. На рис. 6 приведены результаты визуализации неоднородного поля, создаваемого штрихкодом банковской карты, двумя индикаторными пленками, а именно аморфной пленкой с перпендикулярной анизотропией (рис. 6, *a*) и поликристаллической пленкой FeCo (рис. 6, *b*). Внешне обе картины практически одинаковы с точностью до количества и ширины полос, несмотря на то, что пленка GdCo реагирует только на H_z -компоненту поля, а пленка FeCo — на плоскостную. Влияние H_z -компоненты на формирование контраста в пленке FeCo исчезающее мало вследствие того, что $H_z \ll H_a$. Различие картин заключается в сдвиге полос приблизительно на половину их ширины, что можно видеть после приведения картин к жестко связанной с сигналограммой системе координат (рис. 6, *c*)

По сравнению с визуализацией задача топографирования поля рассеяния предъявляет более жесткие

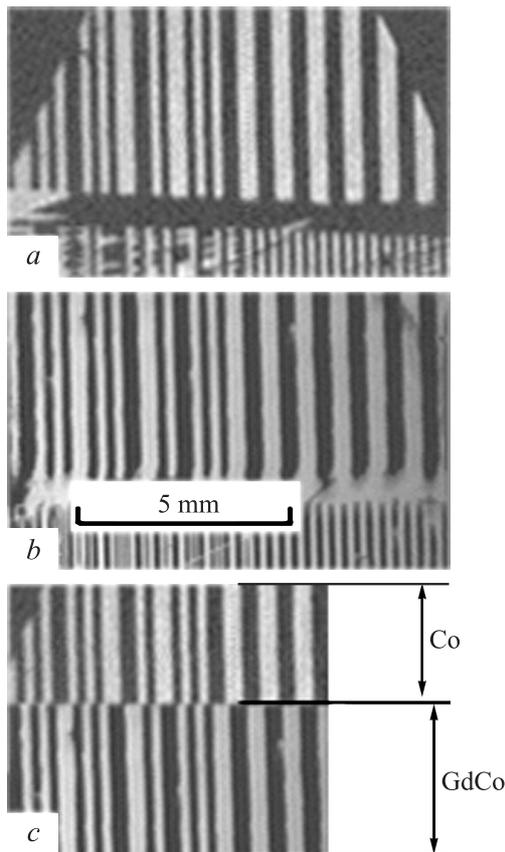


Рис. 6. Визуализация поля сигналограммы (продольной записи) аморфной пленкой Gd-Co с перпендикулярной анизотропией (a) и пленкой Co с плоскостной анизотропией (b); c — то же самое, картины частично совмещены, видно, что картины сдвинуты.

требования как к МО-средам (пленкам), так и к оптической системе наблюдения. Из формул (3), (4) ясно требование к высокой пространственной однородности светового излучения в плоскости XU .

Очевидно, наличие анизотропии в плоскости нежелательно, поскольку это будет приводить к искажению МО-изображений. Слишком большая анизотропия формы снижает чувствительность к вертикальной компоненте поля. Требования высокой МО-добротности и снижение намагниченности для повышения чувствительности пленок к полю являются противоречивыми и требуют дополнительной оптимизации технологии. Частично проблема повышения контраста МО-изображений решается нанесением диэлектрических покрытий [8]. Вероятно, применение многослойных пленок [9] может решить проблему.

Исследуемые в настоящей работе пленки являются подходящими сенсорными средами для топографирования поля, создаваемого постоянными магнитами. В этом случае величина H_z -компоненты достаточна для создания регистрируемого контраста в полярной чувствительности. Большая анизотропия формы обеспечивает выполнение условия $H_z \ll H_a$ ($H_a = 4\pi J_s$).

При этом интенсивность является линейной функцией H_z -компоненты: $I \sim I_0 + cH_z$, что подтверждается экспериментально (рис. 5). Отсюда следует и линейная зависимость $YH_z \sim A + kI$, что предполагает возможность аналогично [3] провести топографирование вертикальной компоненты поля посредством оцифровки МО-изображения в полярной чувствительности. Постоянные A и k могут быть определены в едином технологическом цикле, например в одной точке, в которой известно значение H_z -компоненты. Это значение может быть получено непосредственным измерением при помощи датчика Холла.

Рецепт топографирования проиллюстрирован на примере магнитной системы, составленной из цилиндрических магнитов (рис. 7, a). Три из них M1, M2, M3 (диаметром 3.5 мм) находились на расстоянии 0.2 мм, четвертый (M4 диаметром 6 мм) — на расстоянии 3.2 от индикаторной пленки. Ориентация магнитных моментов на рис. 7, a показана крестиками и точками. В смешанной чувствительности координатное распределение интенсивности, связанное с вертикальной компонентой поля, вуалируется наложением картины в меридиональной

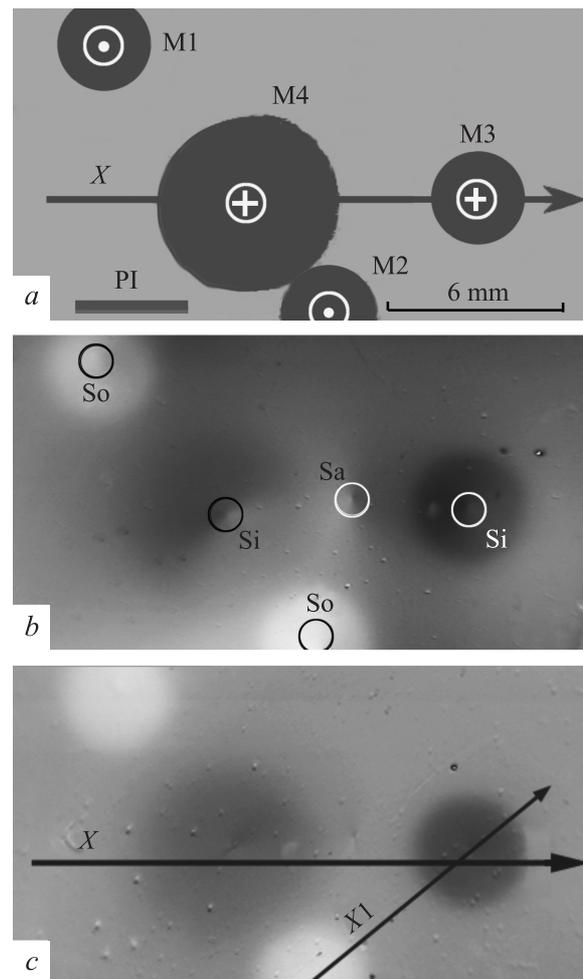


Рис. 7. Проекция МСЗ на плоскость наблюдения (a) и соответствующие МО-изображения поля рассеяния в смешанной (b) и полярной (c) чувствительностях.

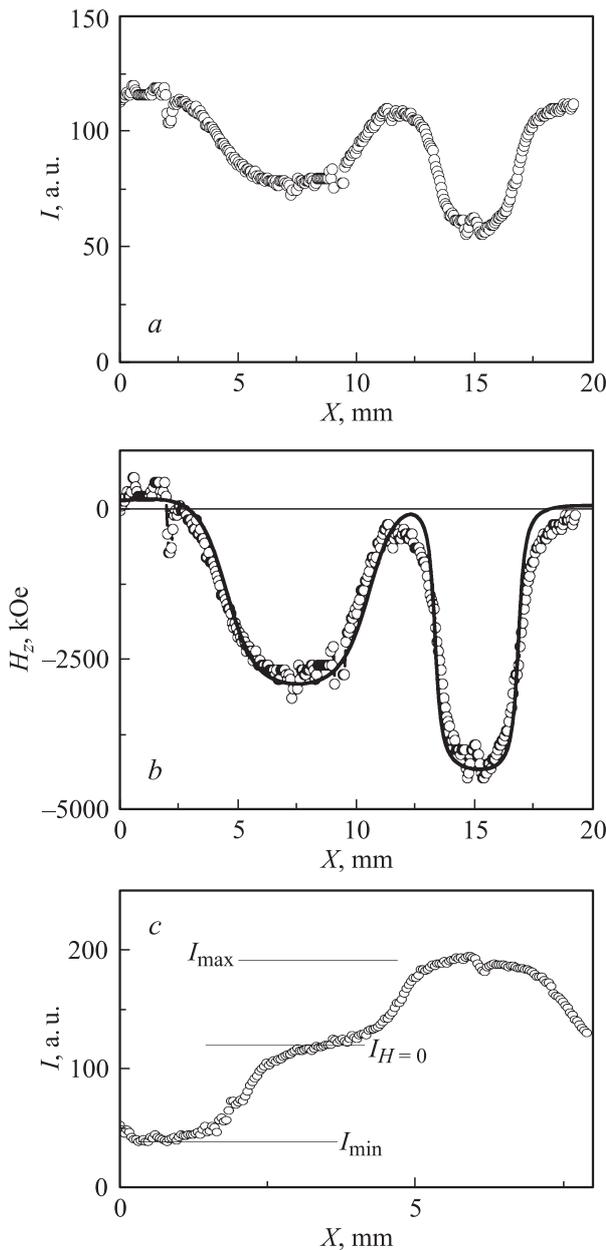


Рис. 8. Одномерное экспериментальное распределение интенсивности МО-изображения на рис. 7, *c* по оси *X* (*a*) и экспериментальная (точки) и рассчитанная (сплошная линия) топограммы нормальной компоненты неоднородного магнитного поля (*b*); *c* — распределение интенсивности по оси *X*1 (градуировочный график), соответствует аттестованным магнитам.

чувствительности (рис. 7, *b*). Изображение в полярной чувствительности (рис. 7, *c*) отображает распределение вертикальной компоненты поля. Для топографирования H_z -компоненты проведена оцифровка этого изображения и построены одномерные зависимости $I(x)$ (рис. 8, *a*) и $I(x)$ (рис. 8, *b*) по осям *X* и *X*1 соответственно. Уровень интенсивности, соответствующей $H_z = 0$, определялся по одномерной зависимости $I(x)$ вдоль оси *X*1 (рис. 8, *c*). На этом графике известны значения

H_z -компоненты в точках положительного и отрицательного максимумов ($H_z = -4300$ и $+4300$ Oe), соответствующие $I_{\min} = 42$ и $I_{\max} = 143$. Нулевому значению H_z -компоненты соответствует $I_{\text{med}} = 119$. Перестройка графика $I(x)$ в одномерную топограмму $H_z(x)$ проведена с использованием формулы $H_x(x) = c(I(x) - I_{\text{med}})$, где $c = (H_{z \max} - H_{z \min}) / (I_{\max} - I_{\min})$.

МО-изображение в меридиональной чувствительности (рис. 7, *b*) дает дополнительную качественную информацию об исследуемой магнитной системе. Над центрами магнитов М1, М2 и М3, М4 наблюдаются особые точки So и Si соответственно, а между магнитами М4 и М3 — седлообразная (Sa). Сравнение этого МО-изображения с рис. 3, *d* и 4, *a* показывает, что картины в меридиональной чувствительности отражают форму поверхности магнитов, соприкасающейся с индикаторной пленкой. В частности, на рис. 7, *b*, области изображения непосредственно над магнитами отображают центральную симметрию цилиндрических магнитов. Количественная информация заключается в формуле (3). Из нее можно восстановить угловую зависимость плоскостной компоненты намагниченности и соответственно плоскостной компоненты поля H_p . Эта зависимость вместе с топограммой $H_z(x)$ может служить для решения обратной задачи магнитостатики — определения распределения намагниченности в источнике поля, как это было сделано в [3].

Если $H_a \rightarrow 0$ (в случае малой намагниченности и малой анизотропии индикаторной пленки), тогда для полярной чувствительности $I = I_0 + q_{\text{pol}}(H_z/H_x)m_x$. В этом случае возникает необходимость изобретать способы определения зависимости $H_z(I(x))$, поскольку нет взаимно-однозначной зависимости между интенсивностью и компонентой H_z . Это рассуждение иллюстрируется сравнением вида рассчитанных кривых $H_z(x)$ (рис. 5, *a*, кривая 2). Такая ситуация характерна для индикаторных пленок ферритов-гранатов.

Заключение

Экспериментально показано, что в магнитных металлических пленках с плоскостной анизотропией в геометрии меридионального эффекта Керра формируются сложные магнитооптические изображения, которые несут информацию о распределении трех компонент неоднородного магнитного поля рассеяния, создаваемого системами постоянных магнитов. После разделения этих изображений на составляющие их картины, соответствующие полярной и меридиональной чувствительностям, проанализированы координатные зависимости интенсивности (яркости) изображений путем сопоставления этих зависимостей с координатными зависимостями нормальной и плоскостной компонент поля рассеяния. Показано, что МО-изображение в полярной чувствительности является аналоговым отображением распределения модуля нормальной компоненты поля

источников. Это открывает новую возможность использования металлических пленок с плоскостной анизотропией для топографирования нормальной к плоскости индикаторной пленки компоненты неоднородного магнитного поля. Линейность передаточной характеристики обеспечивается большой анизотропией формы.

МОП-изображение в меридиональной чувствительности является аналоговым отображением распределения угловой зависимости плоскостной компоненты поля. Чувствительность такого изображения к плоскостной компоненте поля значительно выше, чем МО-изображение в полярной чувствительности, поэтому исследуемые пленки могут применяться для визуализации скрытых изображений, обладающих невысоким магнитным моментом. Показана возможность визуализации магнитного штрихкода при помощи пленок с плоскостной анизотропией.

Взаимно-однозначное соответствие локальной яркости МО-изображений и величины вертикальной и направления горизонтальной компонент поля в пленках с большой анизотропией формы подтверждается моделированием, МО-изображение в полярной чувствительности является аналоговым отображением распределения модуля нормальной компоненты. Модельные МО-изображения, так же как экспериментальные, показывают наличие особых точек, которые соответствуют особенностям координатных зависимостей плоскостной компоненты поля. Количество и топологические свойства особых точек характеризуют форму и симметрию как отдельных магнитов, так и всю магнитную систему в целом.

Список литературы

- [1] *Беляева А.И., Фошан А.Л., Юрьев В.П.* // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. Вып. 16. С. 76–81.
- [2] *Johansen T.H., Baziljevich M., Bratsberg H., Galperin Y., Lindelof P.E., Shen Y., Vase P.* // Phys. Rev. B. 1996. Vol. 54. N 22. P. 16 264–16 269.
- [3] *Dreyer S., Norpoth J., Jooss C., Sievers D., Siegner U., Neu V., Johansen T.H.* // J. Appl. Phys. 2007. Vol. 101. P. 0839 051–0839 057.
- [4] *Helseth L.E.* // J. Magn. Magn. Mater. 2002. Vol. 247. P. 230–236.
- [5] *Иванов В.Е.* // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. Вып. 9. С. 100–110.
- [6] *Rave W., Schafer R., Hebert A.* // J. Magn. Magn. Mater. 1987. Vol. 65. P. 7–14.
- [7] *Ferrari H., Bekeris V., Thibeault M., Johansen T.H.* // J. Magn. Magn. Mater. 2007. Vol. 313. P. 98–106.
- [8] *Соколов А.В.* Оптические свойства металлов. М.: Физматгиз, 1961. С. 329.
- [9] *Bourzami A., Lenoble O., Fery Ch., Bobo J.F., Picuch M.* // Phys. Rev. B. 1999. Vol. 59. N 17. P. 11 489–11 494.