

05;11;12

О преимуществах безгистерезисных магнитооптических пленок при использовании в неразрушающей дефектоскопии

© В.В. Рандошкин,¹ М.Ю. Гусев,² Ю.Ф. Козлов,² Н.С. Неустров²¹ Совместная хозрасчетная лаборатория "Магнитооптоэлектроника" Института общей физики РАН при Мордовском государственном университете им. Н.П. Огарева, Россия² Закрытое акционерное общество "Научно-исследовательский институт материаловедения", Москва, Россия

(Поступило в Редакцию 3 августа 1999 г.)

Проводится сравнительный анализ возможностей висмутосодержащих пленок феррит-гранатов с одноосной магнитной анизотропией и с магнитной анизотропией типа "легкая плоскость" при их использовании для визуализации пространственно неоднородных магнитных полей в магнитооптической неразрушающей дефектоскопии.

В основу неразрушающей дефектоскопии и ряда близких по физической сущности методов иного назначения [1–26] может быть положена магнитооптическая визуализация пространственно неоднородных магнитных полей [1,8,27,28]. Для этой цели используют два типа висмутосодержащих монокристаллических пленок феррит-гранатов (ВсМПФГ), обладающих гигантским фарадеевским вращением плоскости поляризации проходящего через них света [1,29]: с одноосной магнитной анизотропией (I) или с магнитной анизотропией типа "легкая плоскость" (II). В случае ВсМПФГ типа I о неоднородном магнитном поле судят по конфигурации доменной структуры, а в случае ВсМПФГ типа II — по распределению угла выхода намагниченности из плоскости пленки по ее поверхности.

ВсМПФГ типа I в отсутствие внешнего магнитного поля разбиваются на домены противоположной полярности, причем площади, занимаемые доменами каждой полярности, примерно равны. Различие этих площадей тем больше, чем выше коэрцитивная сила H_c , обычно составляющая для этих пленок 0.1–1 Ое. Из-за наличия коэрцитивной силы ВсМПФГ типа I при перемагничивании магнитным полем, приложенным перпендикулярно плоскости пленки (поле смещения H_b), обладают гистерезисом.

В ВсМПФГ типа I плоскость поляризации света в соседних доменах поворачивается в противоположные стороны на один и тот же угол Θ_F , причем Θ_F не зависит от поля смещения. С ростом H_b площадь, занимаемая доменами, намагниченность внутри которых направлена по полю, увеличивается за счет невыгодно намагниченных доменов вплоть до полного намагничивания пленки. Это обеспечивается движением доменных стенок (ДС). При наблюдении доменов с помощью поляризационного микроскопа, поворачивая анализатор относительно поляризатора, можно полностью погасить монохроматический свет, проходящий через домены той или ионной полярности. При использовании для подсветки белого света между доменами наблюдается цветовой контраст, причем цвет доменов зависит от угла φ между оптическими осями поляризатора и анализатора. Когда

поляризатор и анализатор скрещены ($\varphi = 0$), домены имеют одинаковый цвет, а ДС выглядит темной линией.

В ВсМПФГ типа II в отсутствие внешнего магнитного поля вектора намагниченности лежат в плоскости пленки, даже если пленка разбивается на домены противоположной полярности. В результате угол поворота плоскости поляризации света, проходящего по нормали сквозь пленку, равен нулю. Вращение плоскости поляризации может иметь место только в ДС, если они являются блоховскими. При этом могут быть визуализированы блоховские линии, разделяющие участки ДС, в которых плоскость поляризации вращается в противоположные стороны.

Результат воздействия на ВсМПФГ типа I постоянным во времени, но меняющимся в пространстве магнитным полем зависит от напряженности и градиента этого поля. Если магнитное поле достаточно велико и, являясь знакопеременным, резко меняется в пространстве с периодом, много большим равновесного размера доменов, то пленка разбивается на крупные домены противоположной полярности, разделенные гладкими ДС. Эти пленки визуализируют линии равной напряженности $H = 0$. В частности, в градиентном магнитном поле вида $H_b = \beta x$, которое можно создать с помощью пары постоянных магнитов с С-образным сечением, формируется плоская прямолинейная ДС. Если теперь к ВсМПФГ перпендикулярно ее поверхности приложить постоянное магнитное поле смещения H_b , то ДС переместятся в новое положение равновесия и вновь будут проходить через точки, где суммарное магнитное поле равно нулю. Другими словами, визуализируются линии равной напряженности $H = -H_b$. Варьируя поле смещения, можно визуализировать линии равной напряженности, соответствующие любому значению H .

Визуализация линий равной напряженности возможна, даже если сильное магнитное поле меняется очень плавно (градиент невелик). В этом случае вместо гладкой ДС между противоположно намагниченными областями формируется переходная область, занятая полосовыми доменами. Ширина этой переходной области тем больше, чем меньше градиент. В частности, в градиентном

магнитном поле вида $H_b = \beta x$ формируется "гребенка" полосовых доменов. Важно, что кривые, огибающие с двух сторон переходную область, проходят через точки, где внешнее магнитное поле H равно полю насыщения пленки $\pm H_s$. Если теперь к пленке дополнительно приложить еще и поле смещения, то эти две линии сместятся. При этом монодоменная область одной полярности расширится, а другой — сузится. Одна из новых линий равной напряженности будет соответствовать значению $H = H_b + H_s$, а другая — $H = H_b - H_s$. Заметим, что в обоих случаях, чтобы получить достаточно точные топограммы магнитного поля, нужно сделать тем больше измерений, чем меньше заданный шаг при топографировании магнитного поля.

Если неоднородное магнитное поле недостаточно сильное (меньше H_s), то в ВcМПФГ типа I монодоменные области отсутствуют, а о неоднородности поля судят по локальному соотношению площадей, занимаемых доменами противоположной полярности. При этом, очевидно, пространственное разрешение резко падает. Выходом из этого положения является приложение такого поля смещения, чтобы суммарное магнитное поле превышало поле насыщения. По аналогии для топографирования неоднородного магнитного поля, представляющего собой слабые вариации на фоне сильной постоянной составляющей, целесообразно внешним полем смещения компенсировать эту постоянную составляющую.

Наибольшие проблемы возникают, если напряженность визуализируемого знакопеременного магнитного поля близка к полю насыщения, а его период близок по порядку величины к равновесному периоду доменов в ВcМПФГ типа I. В этом случае можно сделать неправильный вывод о пространственном периоде магнитного поля, допустив ошибку в несколько раз [30].

ВcМПФГ типа II при их намагничивании магнитным полем смещения не обладают гистерезисом (рис. 1), поскольку он не характерен для процесса вращения намагниченности. Приложение даже достаточно малого магнитного поля приводит к выходу векторов намагниченности из плоскости пленки, причем в одну и ту же сторону для доменов противоположной полярности. Как следствие, угол поворота плоскости поляризации света, проходящего сквозь ВcМПФГ типа II, становится отличным от нуля. Значение Θ_F увеличивается с ростом поля смещения практически по линейному закону до тех пор, пока пленка не намагнитится до насыщения, а угол выхода векторов намагниченности станет равным 90° (рис. 1). При дальнейшем увеличении H_s угол поворота плоскости поляризации света остается неизменным.

При воздействии на ВcМПФГ типа II неоднородным магнитным полем и подсветке белым светом цвет пленки изменяется по ее поверхности (при монохроматической подсветке — интенсивность проходящего света). Локальный угол поворота плоскости поляризации, пропорциональный нормальной компоненте вектора намагниченности, определяется соответствующей компонентой внешнего магнитного поля. Важно, что в процессе

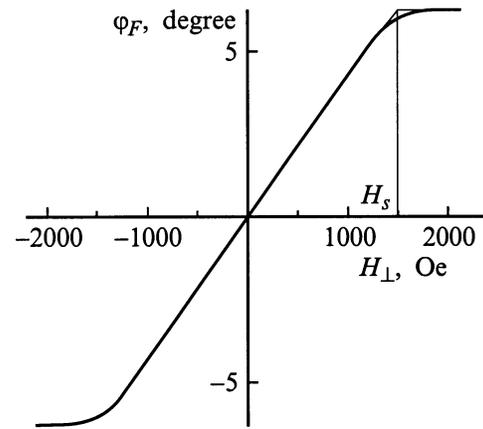


Рис. 1. Типичная "петля гистерезиса", полученная при намагничивании ВcМПФГ типа II вдоль нормали к плоскости пленки.

топографирования неоднородного магнитного поля при использовании ВcМПФГ типа II (в отличие от пленок типа I) нет необходимости дополнительно прикладывать внешнее магнитное поле и варьировать его. Информацию о неоднородности магнитного поля при использовании ВcМПФГ типа II несет распределение угла поворота плоскости поляризации по поверхности пленки.

ВcМПФГ типа I намагничиваются до насыщения, если суммарное магнитное поле достигает значения H_s , меньшего, но сравнимого с намагниченностью насыщения $4\pi M_s$, тогда как в пленках типа II — при суммарном магнитном поле, достигающем поля магнитной анизотропии H_K , которое может быть как много больше, так и много меньше $4\pi M_s$. Поскольку ВcМПФГ типа II реагируют на слабое внешнее магнитное поле небольшим поворотом векторов намагниченности, то чувствительность этих пленок намного выше, чем у пленок типа I. Все это определяет широкий диапазон топографируемых магнитных полей и возможность варьирования этого диапазона под конкретную задачу. Опыт показал, что ВcМПФГ типа II пригодны для магнитооптической неразрушающей дефектоскопии в диапазоне магнитных полей $10^{-8} - 10^5$ Ое.

При фотометрической регистрации магнитооптического сигнала ВcМПФГ типа II с помощью линейного измерительного тракта выходной сигнал определяется законом Малюса

$$U = U_0 \sin^2(\varphi - \Theta_F),$$

где U_0 — входной сигнал.

Линейность передаточной характеристики может быть существенно повышена при использовании двухканального дифференциального режима измерений, когда осуществляется программное вычитание двух изображений одного и того же поля зрения при двух значениях угла между осями поляризатора и анализатора ($+\varphi$ и $-\varphi$). В этом случае выходной сигнал выглядит как

$$U = U_0 \sin 2\varphi \sin 2\Theta_F,$$

что обеспечивает высокую линейность преобразования и упрощает калибровку измерений в абсолютных единицах магнитного поля.

В экспериментах использовалась установка на базе поляризационного микроскопа, сопряженная с помощью видеокамеры на базе ПЗС матрицы с персональным компьютером. На поверхность визуализирующей ВсМПФГ наносились зеркальное покрытие и защитный слой. Этот элемент и катушка, формирующая поле смещения, устанавливались на предметном столике микроскопа. Источник исследуемого магнитного поля располагался вблизи поверхности визуализирующего элемента.

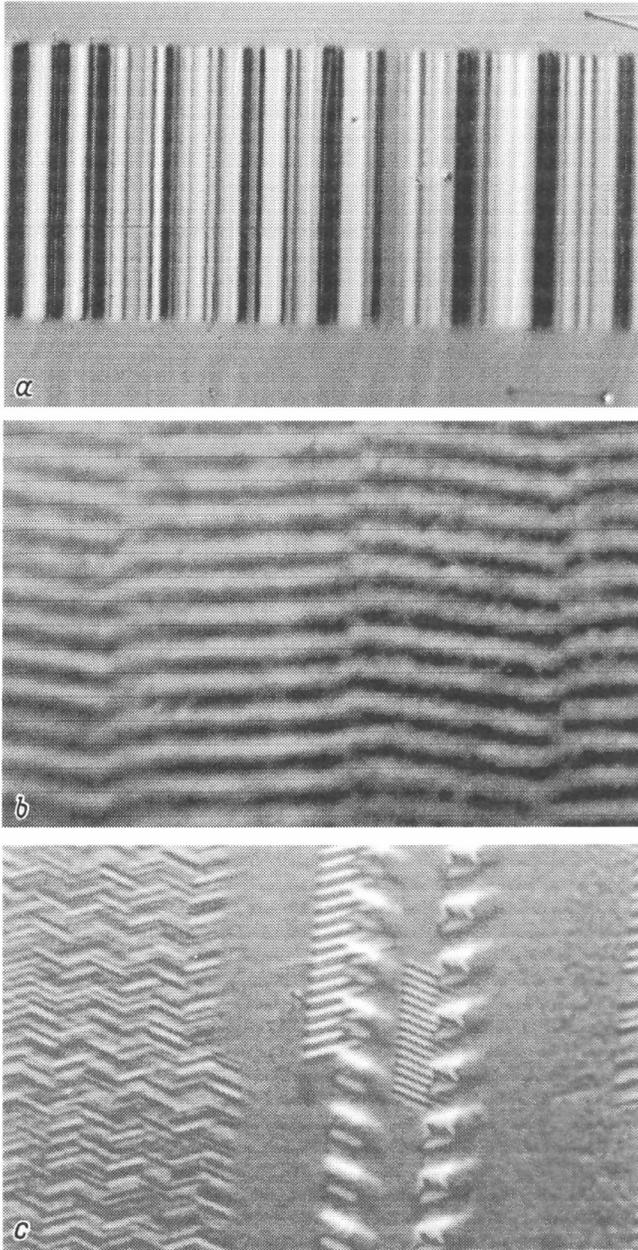


Рис. 2. Визуализируемые с помощью ВсМПФГ типа II магнитооптические изображения аудиозаписи с магнитофонной ленты (a), видеозаписи с VHS-ленты (b) и цифровой аудиозаписи в R-DAT стандарте (c).

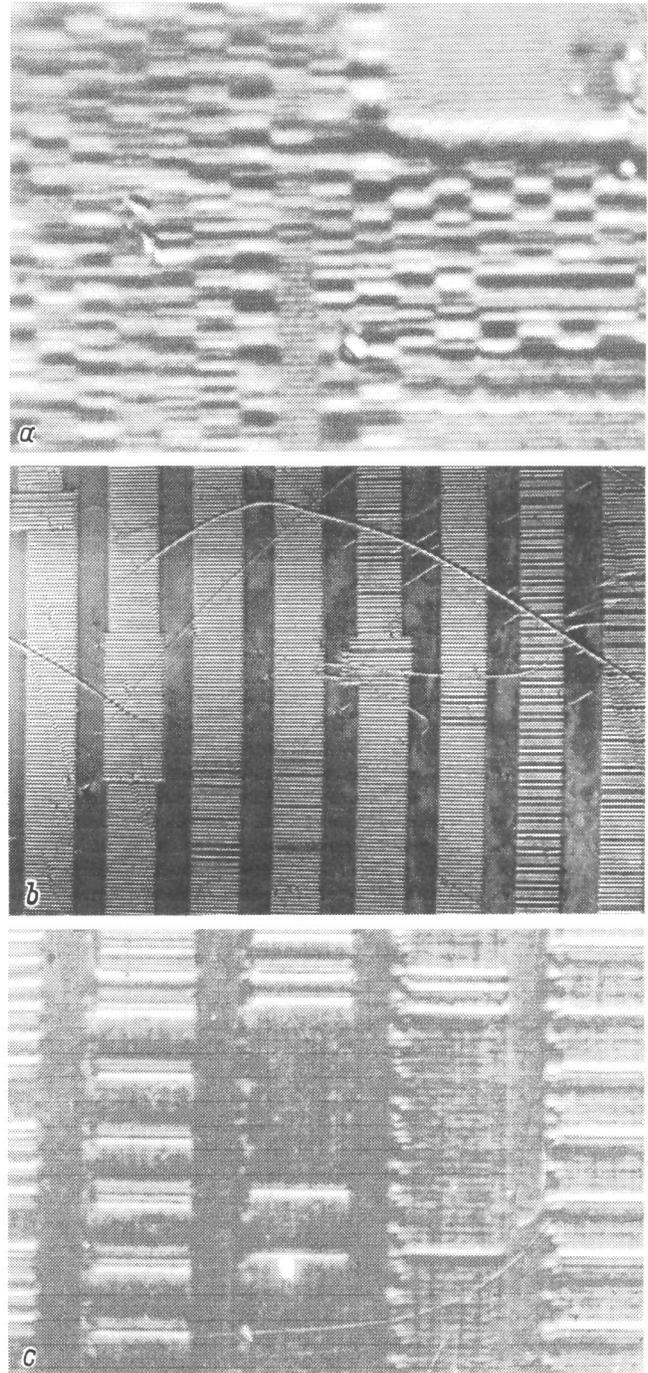


Рис. 3. Визуализируемые в помощью ВсМПФГ типа II магнитооптические изображения магнитной записи информации на жестком магнитном диске (a), гибком магнитном диске (b) и металлической ленте "черного ящика" (c).

Наиболее очевидным и естественным практическим применением метода магнитооптической визуализации пространственно неоднородных магнитных полей является неразрушающий контроль изделий из магнито жестких материалов, например магнитных носителей информации того или иного типа или постоянных магнитов.

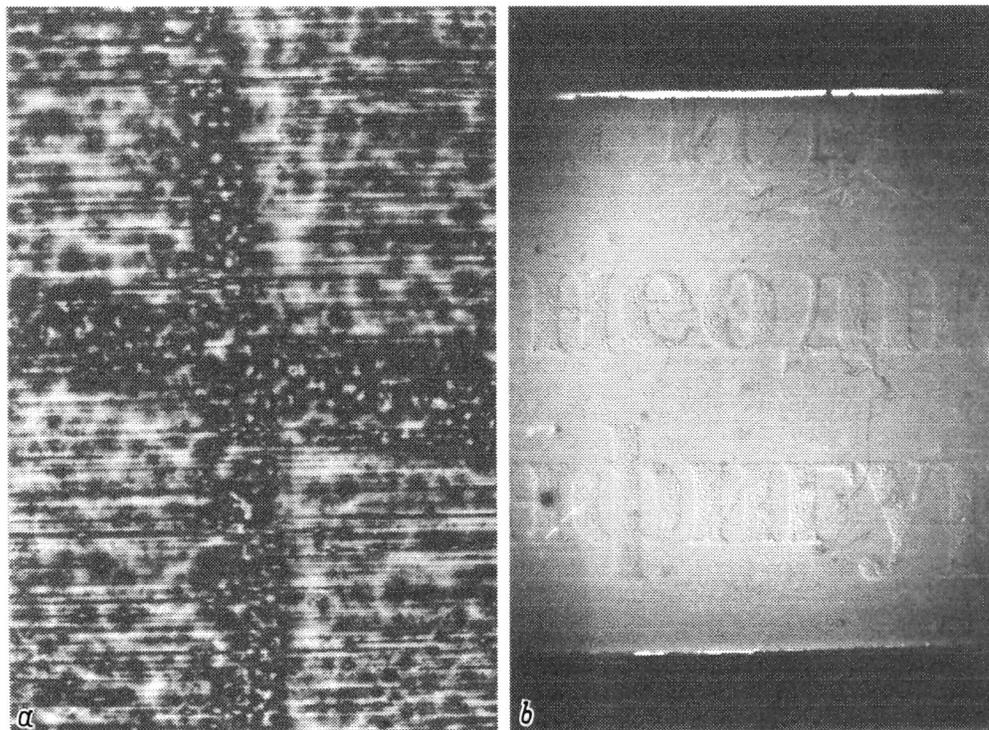


Рис. 4. Визуализируемые с помощью ВсМПФГ типа II магнитооптические изображения поверхности постоянного магнита (*a*) и фрагмента текста, напечатанного на лазерном принтере (*b*).

На рис. 2, *a* показано черно-белое магнитооптическое изображение фрагмента аудиозаписи с обычной магнитофонной лентой. Цветное изображение, которое позволяет регистрировать экспериментальная установка, содержит последовательность цветных линий (коричневых, желтых и зеленых с различными оттенками) разной ширины с размытыми границами на желто-зеленом фоне (к сожалению, на черно-белом изображении значительная часть информации о контролируемом образце, содержащаяся в цветовом контрасте, теряется). Это свидетельствует о том, что визуализирована аналоговая запись. Эксперименты показали, что динамический диапазон составляет не менее 56 dB (это значение определяется только возможностями используемой метрологической установки). Заметим, что ширина каждой из двух дорожек на магнитофонной ленте составляет около 450 μm .

На рис. 2, *b* показано магнитооптическое изображение фрагмента видеозаписи с VHS-ленты (на цветном изображении это — узкие коричневые линии разного оттенка). Ширина дорожки с видеозаписью составляет около 30 μm , а период этой записи — около 5 μm .

На рис. 2, *c* приведено магнитооптическое изображение цифровой аудиозаписи в R-DAT стандарте, включающее фрагмент записи (узкие чередующиеся желто-коричневые линии разного оттенка и разной ширины) и синхронизирующих дорожек (широкие и менее широкие желтые и зеленые линии, имеющие одинаковую ширину в каждой из полос). Периоды различных синхроимпульсов составляют около 170, 40 и 30 μm .

На рис. 3, *a* показано магнитооптическое изображение фрагмента записи и вспомогательных меток на жестком магнитном диске. Минимальная ширина визуализированных линий составляет менее 0.7 μm , что недостижимо при использовании для визуализации ВсМПФГ типа I.

На рис. 3, *b* показано магнитооптическое изображение записи на дефектном гибком магнитном диске. Длинные изогнутые линии соответствуют дефектам поверхности диска, а горизонтальные линии, образующие вертикальные дорожки, — записываемой информации. Обращает на себя внимание скачкообразное локальное изменение ширины и положения дорожек, обусловленные стартовыми сбоями записывающей головки. В частности, ширина дорожек скачком изменяется примерно на 50 μm . Другими словами, визуализация магнитной записи позволяет судить о дефектах записывающей магнитной головки.

ВсМПФГ типа II незаменимы при восстановлении частично разрушенной или утраченной информации, записанной на металлической ленте "черного ящика". На рис. 3, *c* видно, что между яркими темными и светлыми линиями на информационных дорожках наблюдаются слабоконтрастные линии, обусловленные неполным стиранием предыдущей записи (цветовой контраст дает дополнительную информацию). Более того, из-за несовпадения дорожек предыдущей и последующей записей ранее записанная информация сохраняется в виде ярких точек на краю дорожек.

На рис. 4, *a* показано черно-белое магнитооптическое изображение поверхности постоянного бариевого магни-

та, применяемого для создания магнитного поля смещения в ЦМД микросборках [31,32] (ЦМД — цилиндрический магнитный домен). Палитра цветов изображения, которое позволяет регистрировать экспериментальная установка, содержит диапазон от коричневого до зеленого. В частности, узкие вертикальные темные полосы на светлом фоне (рис. 4, *a*) соответствуют на цветном оригинале темно-коричневым линиям на оранжевом фоне. Эти линии, по-видимому, связаны с дефектами полировки пластины постоянного магнита. Темные пересекающиеся полосы со светлыми точками представляют собой скопление частиц с другой структурой или другой намагниченностью насыщения. На цветном оригинале эти частицы выглядят как желтые точки в зеленом обрамлении (к сожалению, на черно-белом изображении информация о цветовом контрасте между зелеными и темно-коричневыми деталями изображения теряется). Рис. 4, *a* свидетельствует о том, что метод магнитооптической визуализации пространственно неоднородных магнитных полей может быть полезен при проведении фазового структурного анализа различных материалов.

На рис. 4, *b* показано магнитооптическое изображение фрагмента текста, напечатанного на лазерном принтере (из-за зеркального покрытия сам текст не виден). Необходимость такого прочтения аналогичного текста возникает, если он представляет собой скрытую маркировку [33], например текст, выполненный "магнитной краской" на немагнитном фоне того же цвета. Текст и изображение могут содержать фрагменты, выполненные магнитной и немагнитной красками одного и того же цвета и плавно переходящие друг в друга (как, например, на банкноте в 100 долларов США). В этом случае использование метода магнитооптической визуализации неоднородных магнитных полей оправдано как стадиях отработки и контроля технологии печати, так и для выявления фальшивых банкнот.

Основным отличием магнитомягких материалов от магнито жестких является то, что в обычном состоянии в первых отсутствуют магнитные поля рассеяния, поскольку в них магнитный поток замкнут внутри магнетика. Однако поля рассеяния возникают, если магнитомягкий образец намагнитить надлежащим образом (другими словами, если использовать "магнитную подсветку"). Если требующееся для этого магнитное поле намного меньше поля одноосной магнитной анизотропии для ВсМПФГ типа I, то в отсутствие дефектов в магнитомягком материале доменная структура в пленке не меняется, тогда как ее перестройка свидетельствует о наличии дефектов в контролируемом образце. При использовании ВсМПФГ типа II о наличии дефектов судят по локальному изменению угла поворота плоскости поляризации проходят через пленку света.

На рис. 5, *a* показано магнитооптическое изображение края элемента из магнитомягкого материала, который в отсутствие внешнего магнитного поля не создает магнитных полей рассеяния (к элементу прикладывалось постоянное магнитное поле около 150 Oe). В результате

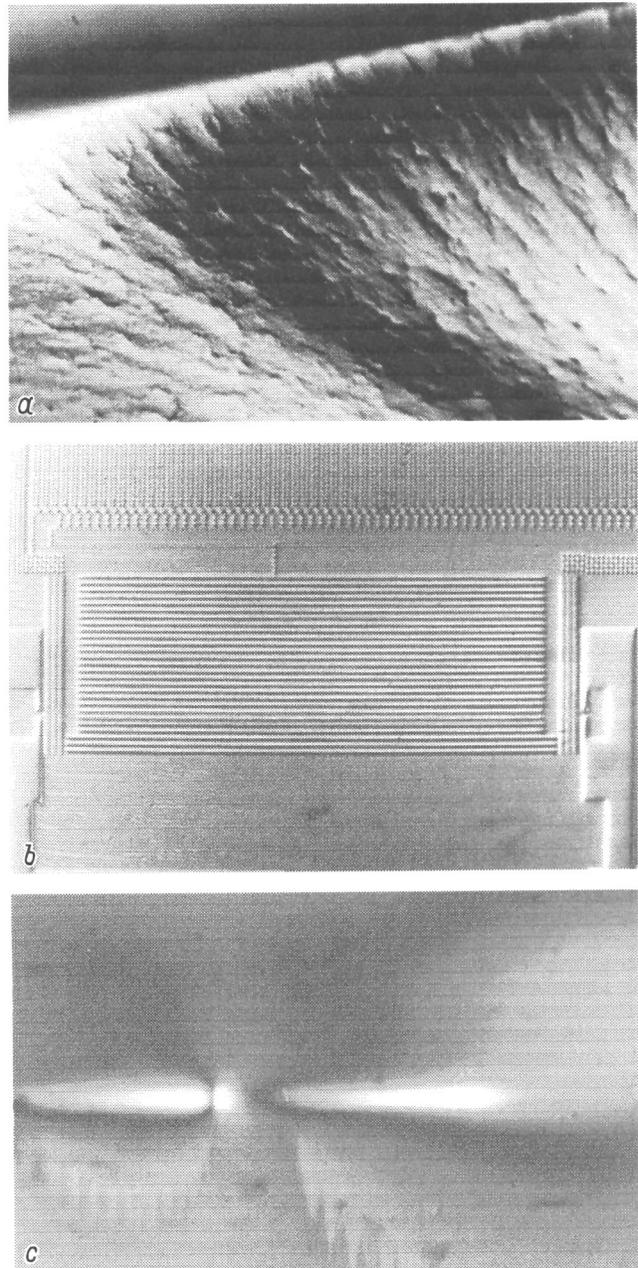


Рис. 5. Визуализируемые при "магнитной подсветке" с помощью ВсМПФГ типа II магнитооптические изображения края магнитомягкой пластины (*a*), магнитопровода и зазора магнитной головки для записи на жестком магнитном диске (*b*) и расширителя ЦМД микросхемы (*c*).

на краях элемента и в окрестности дефектов создаются поля рассеяния, которые и визуализируются с помощью ВсМПФГ. В частности, изменение контраста на рис. 5, *a* соответствует на цветном магнитооптическом изображении последовательности цветов: желтый, зеленый, темно-коричневый и желтый. Оно несет информацию о неоднородности магнитных свойств элемента.

Использование "магнитной подсветки" и ВсМПФГ может быть полезно при контроле технологии изготовления

и юстировке магнитных головок различного типа. В качестве примера на рис. 5, *b* показано магнитооптическое изображение магнитопровода и зазора магнитной головки для записи на жестком магнитном диске. Информацию о дефектах головки и неточности ее установки несет неоднородность и несимметричность этого изображения, в частности, домены в виде "бороды", связанной с магнитопроводом.

На рис. 5, *c* приведено магнитооптическое изображение расширителя ЦМД микросхемы емкостью 256 kBit. Управляющие элементы ЦМД микросхемы выполнены из магнитомягкого материала — пермаллоя. При использовании "магнитной подсветки" на краях пермалловых элементов создаются поля рассеяния, которые и визуализируются с помощью ВсМПФГ типа II. Как следствие, эти элементы становятся "видимыми".

О чувствительности ВсМПФГ свидетельствует наличие на цветной визуализируемой картине слабоконтрастного изображения доменов шириной около $3 \mu\text{m}$ в ЦМД пленке, несмотря на то что эта ЦМД пленка (намагниченность насыщения $4\pi M_s = 320 \text{ G}$) и ВсМПФГ разделены несколькими защитными слоями и зеркальным слоем (к сожалению, на черно-белом изображении этот контраст теряется). Другими словами, ВсМПФГ типа II могут быть использованы при контроле процессов намагничивания различных магнитных материалов, не обладающих магнитооптическими эффектами.

Примеры магнитооптических изображений, приведенные на рис. 2–5, далеко не исчерпывают области возможного применения ВсМПФГ типа II при магнитооптической визуализации неоднородных магнитных полей. Тем не менее они дают представление о диапазонах изменения напряженности и характерного пространственного размера неоднородных магнитных полей, которые позволяют визуализировать ВсМПФГ. Очевидно, что решение всех возникающих задач с помощью одной и той же ВсМПФГ, если и возможно, не является оправданным. Целесообразно для каждой задачи использовать свою ВсМПФГ с оптимальным набором физических свойств. Это возможно, поскольку ВсМПФГ обладают уникальной возможностью варьирования химического состава: наличие трех катионных междоузлий с разными размерами позволяет вводить в состав этих пленок более половины химических элементов, что предопределяет многообразие их физических свойств [34–37].

Список литературы

- [1] Рандошкин В.В., Червоненкис А.Я. Прикладная магнитооптика. М.: Энергоатомиздат, 1990. 320 с.
- [2] Кубраков Н.Ф., Червоненкис А.Я., Меркулова Г.Я. и др. // ЖТФ. 1984. Т. 54. Вып. 6. С. 1163–1167.
- [3] Червоненкис А.Я., Кубраков Н.Ф., Свенский Н.Г., Кисилева Т.П. Авторское свидетельство СССР № 1072095. Бюл. изобр. 1984. № 5.
- [4] Кубраков Н.Ф., Червоненкис А.Я., Кащеев М.В. // ЖТФ. 1986. Т. 56. Вып. 6. С. 1215–1218.
- [5] Kubrakov N.F. // Proc. SPIE. 1989. Vol. 1126. P. 85–92.
- [6] Antonov A.V., Gusev M.V., Pyashenko E.I., Vomov L.S. // Intern. Symposium Magneto-Optics. Program and Abstract. Kharkov, 1991. P. 70.
- [7] Gribkov V.L., Kirukhin N.N., Liskov V.A. et al. // Advances in Magneto-Optics II. Proc. 2nd Intern. Symposium on Magneto-Optics. Fiz. Nizk. Temp. 1992. Vol. 18. Suppl. N S1. P. 429–432.
- [8] Кубраков Н.Ф. Монокристаллические пленки ферритгранатов и их применение. М.: Наука, 1992. С. 136–164 (Труды ИОФАН. Т. 35).
- [9] Рандошкин В.В., Логунов М.В. // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. Вып. 6. С. 62–65.
- [10] Рандошкин В.В., Дудоров В.Н. // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. Вып. 22. С. 79–82.
- [11] Рандошкин В.В., Логунов М.В. // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. Вып. 5. С. 17–21.
- [12] Айрапетов А.А., Грибков В.Л., Губарев А.П. et al. Международная заявка PCT/RU92/00210. 1993. Bull. PCT. N WO 93/11427.
- [13] Логунов М.В., Рандошкин В.В. Патент СССР. № 1813217. БИ. 1993. № 16.
- [14] Логунов М.В., Рандошкин В.В. А.С. СССР. № 1824619. БИ. 1993. № 24.
- [15] Логунов М.В., Рандошкин В.В. Патент РФ. № 2017182. БИ. 1994. № 14.
- [16] Айрапетов А.А., Грибков В.Л., Лысков В.А. и др. Патент РФ. № 2002247. БИ. 1993. № 39–40.
- [17] Айрапетов А.А., Грибков В.Л., Лысков В.А. и др. Патент РФ. № 2011187. БИ. 1994. № 7.
- [18] Грибков В.Л., Рандошкин В.В., Червоненкис А.Я. Патент РФ. № 2022365. БИ. 1994. № 20.
- [19] Рандошкин В.В. // Дефектоскопия. 1994. Вып. 11. С. 34–42.
- [20] Логунов М.В., Рандошкин В.В. Патент РФ. № 2047170. БИ. 1995. № 30.
- [21] Grechishkin R.M., Goosev V.Yu., Pyashenko S.E., Neustroev N.S. // J. Magn. Magn. Mater. 1996. Vol. 157/158. P. 305–306.
- [22] Червоненкис А.Я., Губарев А.П., Кирюхин Н.Н. и др. // Новые магнитные материалы микроэлектроники. Тез. докл. XV Всерос. школы-семинара. М., 1996. С. 182–183.
- [23] Айрапетов А.А., Грибков В.Л., Губарев А.П. и др. Патент РФ. № 2060491. 1997. БИ. № 14.
- [24] Рандошкин В.В. Патент РФ. № 2047170. БИ. 1997. № 23.
- [25] Рандошкин В.В. Патент РФ. № 2092832. БИ. 1997. № 28.
- [26] Гречишкин Р.М., Гусев М.Ю., Неустроев Н.С. и др. // Новые магнитные материалы микроэлектроники. Тез. докл. XVI Междунар. школы-семинара. М., 1998. Ч. II. С. 445–446.
- [27] Введенский Б.С., Лисовский Ф.В., Червоненкис А.Я. // Техника кино и телевидения. 1978. Вып. 6. С. 11–16.
- [28] Червоненкис А.Я., Кубраков Н.Ф. // Письма в ЖТФ. 1982. Т. 8. Вып. 11. С. 696–699.
- [29] Звездин А.К., Котов В.А. Магнитооптика тонких пленок. М.: Наука, 1988. 190 с.
- [30] Герус С.В., Лисовский С.В., Мансветова Е.Г. // Микроэлектроника. 1981. Т. 10. Вып. 6. С. 506–515.
- [31] Эшенфельдер А. Физика и техника цилиндрических магнитных доменов. Пер. с англ. М.: Мир, 1983. 486 с.
- [32] Элементы и устройства на цилиндрических магнитных доменах: Справочник / Под ред. Н.Н. Евтихиева, Б.Н. Наумова. М.: Радио и связь, 1987. 488 с.

- [33] Червоненкис А.Я., Губарев А.П., Кирюхин Н.Н. и др. // Новые магнитные материалы микроэлектроники. Тез. докл. XV Всероссийской школы-семинара. М., 1996. С. 182–183.
- [34] Рандошкин В.В. Монокристаллические пленки феррит-гранатов и их применение. М.: Наука, 1992. С. 49–107 (Труды ИОФАН. Т. 35).
- [35] Балбашов А.М., Червоненкис А.Я. Магнитные материалы для микроэлектроники. М.: Энергия, 1979. 217 с.
- [36] Рандошкин В.В., Червоненкис А.Я. // Радиоэлектроника (состояние и тенденции развития). 1985. Тетр. II. С. 71–78.
- [37] Рандошкин В.В. // Дефектоскопия. 1997. Вып. 6. С. 58–97.