

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

ИЗМЕРЕНИЕ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ
ПОЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ ИНДИКАТОРОВ НА ОСНОВЕ
ФЕРРИТ-ГРАНАТОВЫХ ПЛЕНОК

© 2005 г. Е. И. Ильяшенко, Л. З. Лубяный*, В. Н. Самофалов*

Московский государственный университет
Россия, 119899, Москва, Воробьевы горы

*Национальный технический университет
“Харьковский политехнический институт”

Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21

E-mail: Samofalov@kpi.kharkov.ua

Поступила в редакцию 22.10.2004 г.

Описан метод, позволяющий с помощью пленочных индикаторов на основе феррит-гранатовых пленок измерять сильные магнитные поля рассеяния напряженностью 5–10 кЭ, которые возникают в системах магнитов с гигантской магнитной анизотропией. В основу метода положен фазовый переход от полосовой доменной структуры в однородно намагниченное состояние, который происходит в феррит-гранатовых пленках в магнитном поле с напряженностью, близкой к значению их поля анизотропии. Показано, что, используя индикаторы с различными значениями поля анизотропии, можно получить достаточно полную картину полей рассеяния, локализованных в узкой области над магнитами. Предел разрешения области локализации сильного поля сравним с шириной полосовых доменов индикатора и составляет 1–4 мкм. Предельная величина напряженности измеряемого поля равна полю анизотропии материала индикатора.

В работах [1–5] было показано, что с помощью различных систем из постоянных магнитов можно генерировать сильные магнитные поля, индукция которых может в несколько раз превышать индукцию материала постоянных магнитов. На рис. 1 представлена одна из таких систем магнитов, а на рис. 2 приведены расчетные зависимости вертикальной и горизонтальной компонент поля рассеяния, которые возникают над этой системой магнитов при $c \gg a$. Как видно из рис. 2б и 2в, поля рассеяния могут достигать значений >20 кЭ и локализованы в узкой области вблизи оси OY размером $-0.1a < x < 0.1a$, $-0.1a < z < 0.1a$. В работе [4] экспериментально доказано наличие сильных полей в таких системах и установлено соответствие рассчитанных зависимостей измеренным значениям поля.

Для существования таких полей необходимо, чтобы материал магнитов имел большое поле одноосной анизотропии, $H_k > 100$ кЭ, и высокое значение коэрцитивной силы, $H_c > 10$ кЭ. Подобные системы магнитов могут быть использованы при создании магнитных головок [6, 7] для записи информации на высококоэрцитивных носителях, в сепараторах различного типа, а также при изучении влияния сильного высокоградиентного магнитного поля на биологические объекты и др. Поскольку в перспективе область применения таких систем магнитов может быть более широкой,

то для практических целей важно найти способы измерения или контроля напряженности таких полей.

Поскольку сильные поля неоднородны и локализованы в узкой области вблизи оси OY (см. рис. 2), то для их измерения требуются специальные датчики микронных размеров либо особые магнитные материалы. В данной работе для измерения сильных магнитных полей над системой магнитов, представленной на рис. 1, мы применяли индикаторы на основе феррит-гранатовых пленок с большим полем одноосной магнитной анизотро-

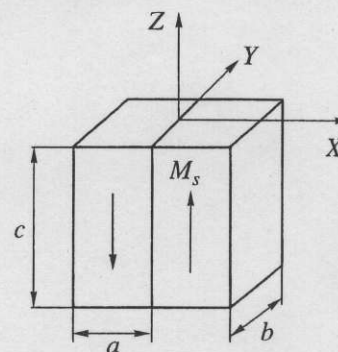


Рис. 1. Система магнитов для горизонтально записывающей головки.

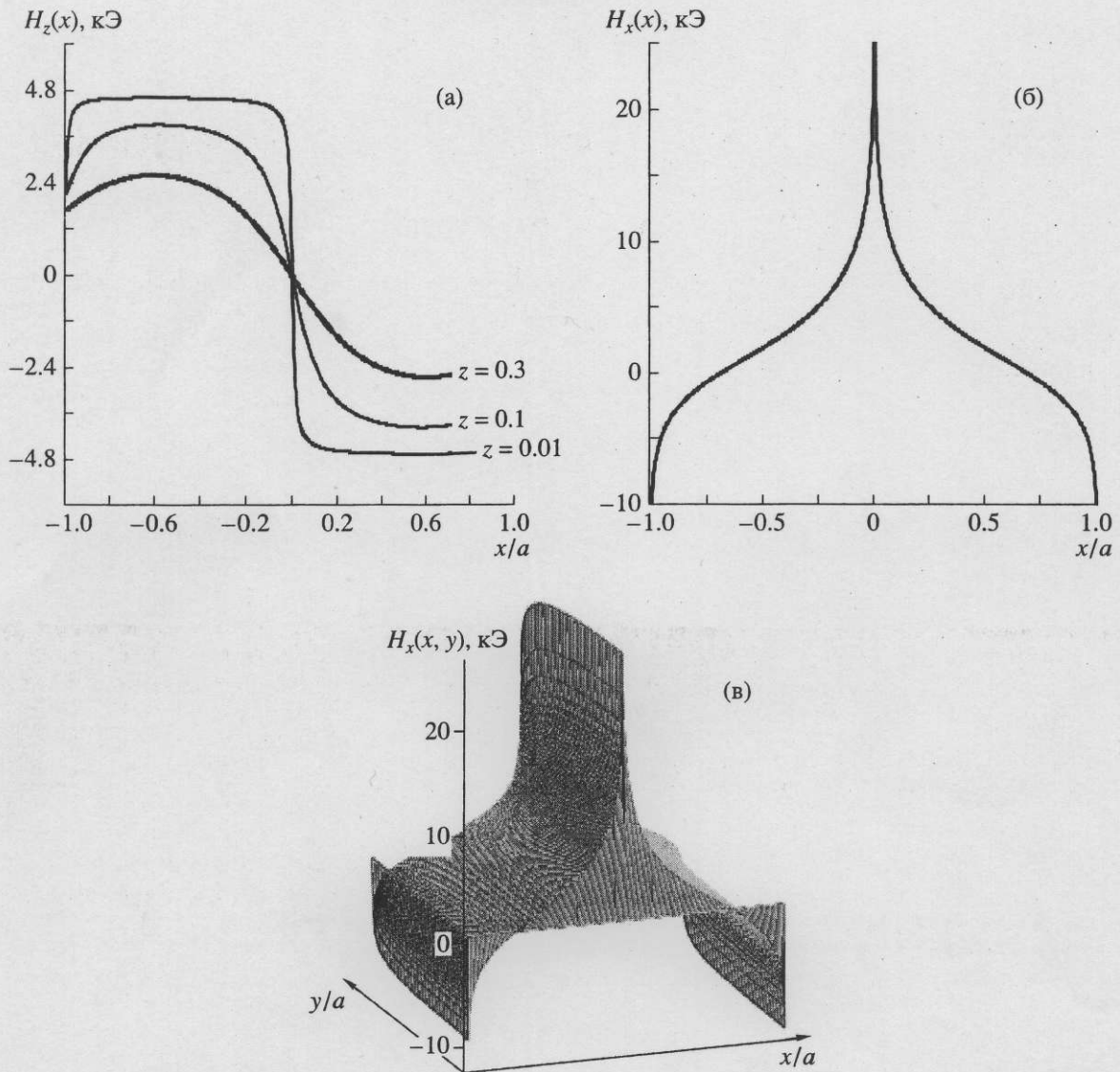


Рис. 2. Расчетные зависимости вертикальной $H_z(x)$ (а) и горизонтальной $H_x(x)$ (б) компонент поля рассеяния при $z = 0$ от отношения x/a , а также горизонтальной компоненты поля рассеяния $H_x(x, y)$ для точек, принадлежащих плоскости $ХОУ$ ($-a < x < a$; $-b/2 < y < 0$) (в), для системы магнитов, показанной на рис. 1.

пии, $H_k \approx 7$ кЭ. Для выращивания пленок использовались монокристаллические галлий-гадолиновые подложки состава $GdGa + CaMgZr$ толщиной $h = 480$ мкм. Плоскость подложки параллельна кристаллографической плоскости (111). Пленки выращивались по жидкофазной технологии. Толщина ферритовой пленки состава $(Y, Bi, Pr, Lu)_{3,0}(Fe, Ga)_{5,0}O_{12,0}$ равнялась 7 мкм.

Ось легкого намагничивания была перпендикулярна плоскости ферромагнитного слоя. Поле насыщения ферритовой пленки при намагничивании в направлении нормали равнялось $H_s = 120$ Э. При отсутствии внешнего магнитного поля доменная структура пленок была лабиринтной с шириной доменов $D \approx 5.0$ мкм. Ферромагнитные слои облада-

ли гигантским фарадеевским вращением, равным при комнатной температуре $2.1^\circ/\text{мкм}$. Пленки имели совершенную кристаллическую структуру и, как следствие, малую (< 0.1 Э) коэрцитивную силу. Равновесная лабиринтная доменная структура в слое с таким значением H_c возникала без включения размагничивающего поля.

На рис. 3 приведена схема измерительной установки, собранной на базе телевизионной установки ПТУ-29 и микроскопа БИОЛАМ, для определения напряженности полей рассеяния системы магнитов на рис. 1. Размеры магнитов, изготовленных в форме параллелепипеда (см. рис. 1), равнялись: $a = 1.8$ мм, $b = 2.0$ мм, $c = 5.0$ мм. Индикатор поля – феррит-гранатовая пленка с зеркаль-

ным серебряным покрытием. Размеры индикатора в плоскости 10×15 мм. Впервые эта схема магнитооптического исследования доменных структур в магнитных материалах была подробно описана в [8]. В наших экспериментах расстояние t между магнитами головки и индикатором в схеме регулировалось с помощью микрометрического винта или пластин различной толщины.

В установке (рис. 3) луч белого света осветителя 1 микроскопа преобразуется системой линз 2 , проходит через поляризатор 3 и отражается поляризационным зеркалом 4 . Затем через стандартный объектив 5 микроскопа БИОЛАМ луч попадает на индикатор 6 , расположенный над поверхностью исследуемой головки 10 . Отраженный пучок, пройдя дважды сквозь подложку и индикаторную пленку, через полупрозрачное зеркало 4 и анализатор 11 попадает на регистрирующее устройство. В качестве регистрирующего устройства в различных экспериментах используются окуляр микроскопа (на рисунке не показан), цифровая камера 12 либо видеокамера 13 с монитором 14 . Переключение режимов работы осуществляется с помощью зеркала 15 .

Индикатор 6 представляет собой эпитаксиальную гранатовую пленку 8 , выращенную на прозрачной монокристаллической подложке 7 . На поверхность пленки конденсацией в вакууме осаждается отражающий слой серебра 9 толщиной 0.2 мкм. В таком индикаторе благодаря двойному прохождению луча через феррит-гранатовую пленку в два раза увеличивается магнитооптический контраст.

Для определения напряженности компоненты поля рассеяния H_x над зазором между магнитами используются картины доменной структуры в индикаторе при различных расстояниях t от головки. Картина доменной структуры представляет собой две области различного контраста, разделенные переходной зоной в виде доменов полосовой (лабиринтной) формы (рис. 4). Назовем эту зону областью полосовой доменной структуры (п.д.с.). Из рис. 4 видно, что при уменьшении расстояния t ширина D этой области над зазором между магнитами монотонно уменьшается от 200 до 4 мкм. Последующее уменьшение расстояния приводит к сужению оставшихся двух доменов, а при $t \approx 270$ мкм – к исчезновению остатков полосовой доменной структуры в центре магнитов. При расстояниях $t < 270$ мкм лабиринтная доменная структура отсутствует, а контраст двух областей, имевших ранее противоположную намагниченность, уменьшается.

Из приведенных на рис. 4 картин следует, что при уменьшении расстояния t между головкой и индикатором ниже некоторого значения t_k ($t < t_k$) исчезает лабиринтная доменная структура в центральной части зазора между магнитами, т.е. в

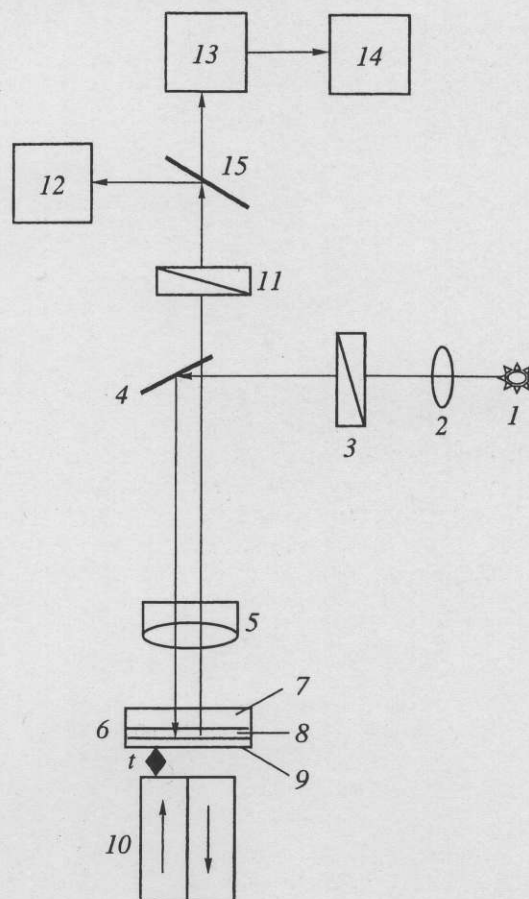


Рис. 3. Схема магнитооптической установки для измерения полей рассеяния над головкой. 1 – осветитель микроскопа; 2 – система линз; 3 – поляризатор; 4 – поляризационное зеркало; 5 – стандартный объектив микроскопа БИОЛАМ; 6 – индикатор; 7 – прозрачная монокристаллическая подложка; 8 – эпитаксиальная гранатовая пленка; 9 – отражающий слой серебра; 10 – исследуемая головка; 11 – анализатор; 12 – цифровая камера; 13 – видеокамера; 14 – монитор; 15 – зеркало.

точках с координатами $M(0, y, t)$. Исчезновение п.д.с. на границе раздела магнитов при $t < 270$ мкм указывает на то, что в этих точках компонента поля рассеяния H_x равняется значению поля анизотропии H_k феррит-гранатового слоя индикатора. Возможное влияние компоненты поля рассеяния H_z на расстояние t_k мало, поскольку поле H_z на границе между магнитами равно нулю, а на расстоянии от этой границы, равном ширине полосовых доменов, т.е. $x = \pm 2$ мкм, составляет (см. рис. 2а) всего несколько эрстед. Это намного меньше, чем поле насыщения $H_s = 120$ Э индикатора при намагничивании его в направлении нормали.

Для точного определения расстояния t_k построена зависимость ширины D области с п.д.с. от расстояния t (рис. 5). При расстоянии t_k на краях зазора между магнитами сохраняется область с п.д.с. клиновидной формы (рис. 6а). При последу-

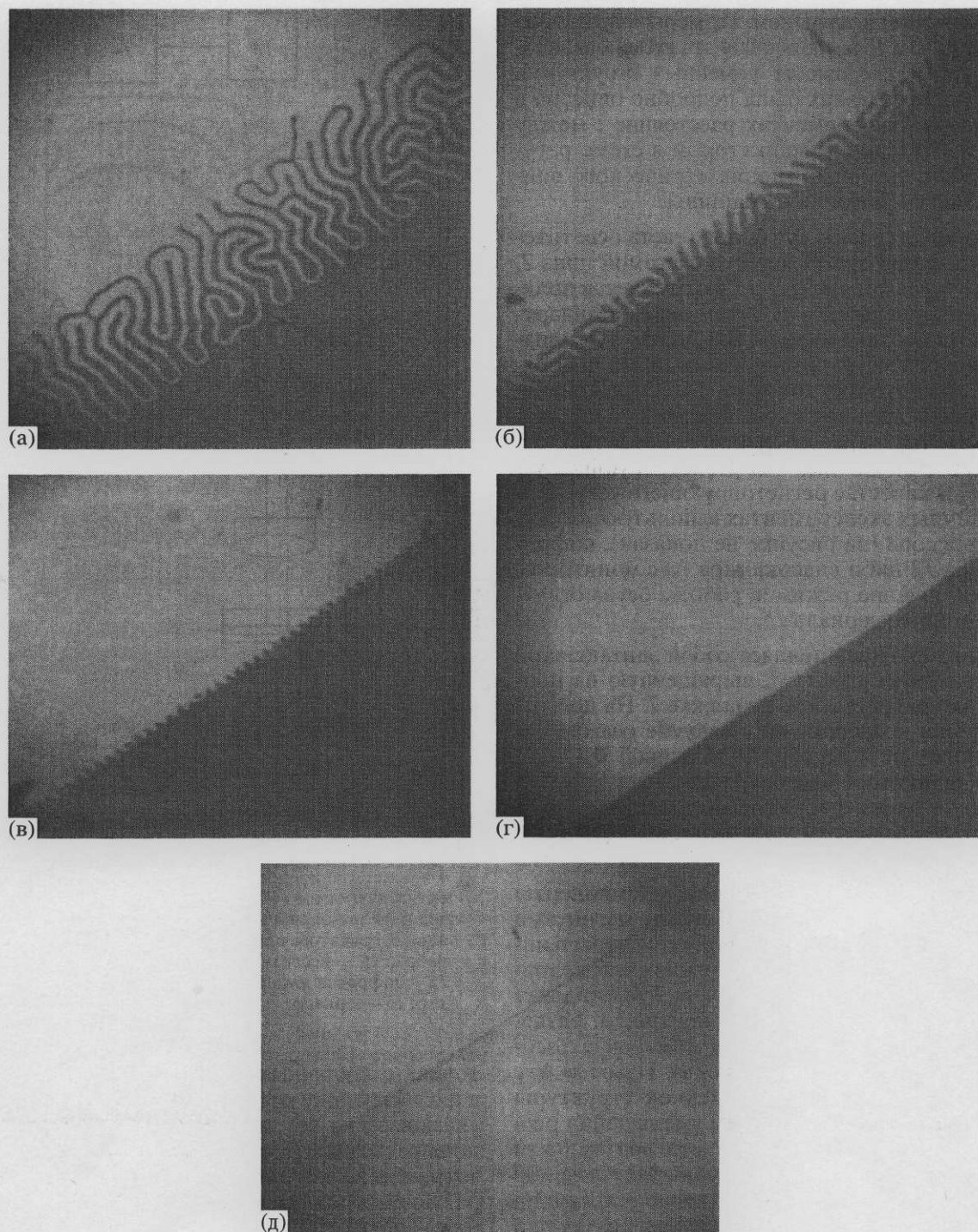


Рис. 4. Доменная структура, возникающая в индикаторе при различных расстояниях t от его плоскости до магнитов: а – 750; б – 400; в – 300; г – 280; д – 200 мкм.

ющем уменьшении t клиновидная область уменьшается (рис. 6б). Согласно [5], это связано с тем, что на краю зазора между магнитами компонента поля H_x меньше, чем в его центре. В расположенной над центром магнита части индикатора из-за большего поля H_z по сравнению с полем насыщения

индикатора в направлении нормали ($H_s = 120$ Э) полосовые домены возникают только при большом расстоянии от магнитов, $z > 2a$. Это также согласуется с зависимостями на рис. 2б.

Заметим, что наличие контраста на рис. 4д связано с особенностями распределения намагничен-

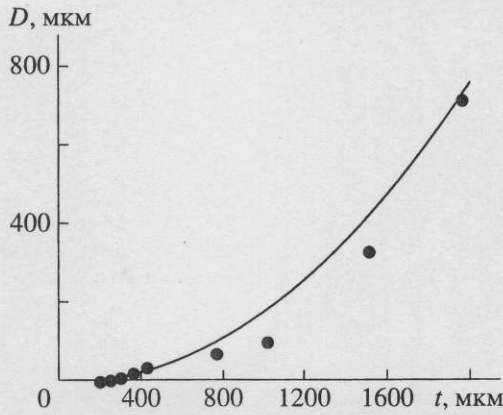


Рис. 5. Изменение ширины D области с лабиринтной доменной структурой при различных расстояниях t между головкой и индикатором (точки).

ности в расположенной над границей раздела магнитов части индикатора. Здесь изменение компонент поля H_x и H_z в соответствии с рис. 2а и 2б указывает на то, что в переходном слое распределение намагниченности подобно распределению намагниченности в стенке Нееля [9]. По разные стороны от границы раздела магнитов компонента намагниченности M_z меняет знак, и поэтому возникает контраст на магнитооптических снимках. Если расстояние от магнитов до индикатора мало, $t < 100$ мкм, то контраст практически исчезает из-за увеличения компоненты поля H_x . Контраст на границе между магнитами также можно ослабить (или усилить) включением внешнего поля $\pm H_x$.

Таким образом, согласно полученным данным, существует критическое расстояние t_k от ин-

дикатора до магнитов, при котором в индикаторе на границе между магнитами возникает переход от полосовой доменной структуры в однородно намагниченное состояние. В используемом нами индикаторе переход в однодоменное состояние происходил при включении однородного магнитного поля, равного полю одноосной магнитной анизотропии материала индикатора, $H_k \approx H_x \approx 7$ кЭ. Из этого следует, что по значению расстояния t_k можно определить напряженность горизонтальной компоненты поля рассеяния H_x на расстоянии от магнитов $z = t_k$. Правильность такой оценки можно проверить, сопоставив измеренное значение $H_k = 7$ кЭ с величиной H_x , рассчитанной по приближенной формуле [4, 5]

$$H_x \approx 4M_s \ln(a/t_k). \quad (1)$$

Учитывая, что в используемых нами магнитах значение намагниченности насыщения $M_s \approx 900$ Гс, $a = 1.8$ мм, получим $H_x = 6.5$ кЭ. Это весьма близко к измеренному нами значению поля $H_k = 7$ кЭ.

Точность измерения поля H_x по значению критической толщины t_k составляет 5–10%. Такая же точность измерения поля в системе магнитов с размером $a = 40$ мм достигнута нами при использовании магниторезистивных датчиков на основе гранулированных пленок Ag-Co [4].

Преимуществом предлагаемого метода также является то, что он позволяет визуализировать поле над магнитами. Это видно из рис. 6, который наглядно отображает неоднородность поля H_x вблизи зазора на краях магнита при различных расстояниях t . Подобным образом можно выявить и другие магнитные неоднородности.

Таким образом, измерения напряженности компоненты поля H_x в точке M с координатами $x \approx 0$,

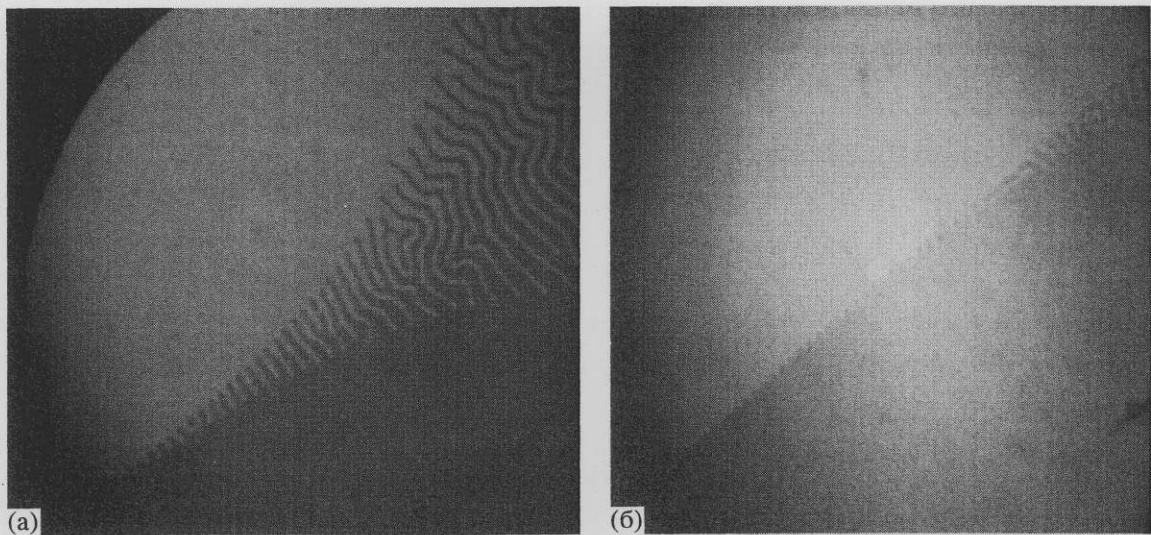


Рис. 6. Клиновидные области с полосовыми доменами на краю магнита (рис. 1) вблизи точек с координатами $M(0, \pm b/2)$ при расстоянии индикатора от подложки: а – 280; б – 250 мкм.

$y = 0$, $z \approx t_k$ доказали наличие сильных полей над системой магнитов, представленной на рис. 1, и локализацию их в узкой области вблизи границы раздела магнитов (оси OY). Для получения других экспериментальных точек зависимости $H_x(z)$ следует использовать набор индикаторов с различными значениями поля одноосной анизотропии. В данное время изготовлены феррит-гранатовые пленки с полями одноосной магнитной анизотропии H_k до 15 кЭ. Последовательно используя индикаторы с различными значениями H_k , можно построить зависимость $H_x(z)$.

Как видно, с помощью одного датчика можно измерить только одно значение поля. Тем не менее, даже используя один датчик, диапазон измеряемых полей можно расширить, если включить дополнительное магнитное поле H_x известной величины. В этом случае, изменяя величину и направление дополнительного поля H_x , можно получить полную картину полей рассеяния над магнитами. Работы в этом направлении нами проводились. Дополнительное поле $H_x \approx \pm 4$ кЭ создавалось с помощью пары постоянных магнитов. Однако, поскольку наши индикаторы легко намагничивались вертикальной компонентой поля $H_z = 120$ Э, трудно было установить магниты так, чтобы поле H_x было строго горизонтальным и компонента $H_z = 0$. Отклонение поля H_x на 1° – 2° приводило к исчезновению полосовых доменов на всей поверхности индикатора. Для реализации подобной схемы измерений нужны специальные источники постоянного поля или индикаторы с высокими полями насыщения H_s , т.е. с большой индукцией B_s .

Заметим, что при оценке напряженности поля H_x по формуле (1) мы не учитывали возможного влияния неоднородного распределения намагниченности в индикаторе, возникающего вследствие воздействия полей рассеяния от магнитов (см. рис. 2). Из-за обменного взаимодействия и анизот-

ропии влияние неоднородного распределения намагниченности должно проявиться в случае, когда размер a магнитов мал (близок к ширине полосовых доменов). Этот случай требует самостоятельного рассмотрения.

Следует отметить, что предлагаемый способ определения напряженности магнитных полей ввиду его простоты может быть использован для оперативного контроля не только магнитных головок, но также и других источников магнитного поля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bloch F. // IEEE Trans. Magn. 1988. V. 34. Part 1. P. 2465.
2. Halbach K. // J. Appl. Phys. 1985. V. 57. P. 3605.
3. Leupold H.A., McLane G. F. // J. Appl. Phys. 1994. V. 76. P. 6253.
4. Самофалов В.Н., Равлик А.Г., Белозоров Д.П., Авраменко Б.А. // Физика металлов и металловедение. 2004. Т. 97. № 3. С. 15.
5. Samofalov V.N., Ravlik A.G., Belozorov D.P., Avramenko B.A. // JMMM. 2004. V. 281/2–3. P. 326.
6. Samofalov V.N., Il'yashenko E.I., Ramstad A. et al. // Proc. 4 Internat. Workshop "Materials for electrotechnics". Bucuresti: Printech, 2004. P. 43; Samofalov V.N., Il'yashenko E.I., Ramstad A. et al. // J. of Optoelectronics and Advanced Materials. 2004. V. 6. № 3. P. 911.
7. Самофалов В.Н., Ильяшенко Е.И., Рамстад А., Лубяный Л.З. // Сб. трудов 19-й Междунар. школы-семинара "Новые магнитные материалы микроэлектроники". М.: МГУ, 2004. С. 147.
8. Il'yashenko E.I., Matveyev S.N. // Physica Status Solidi. 1976. V. 36(a). P. K1–K6.
9. Soohoo R. Magnetic Thin Films. N.Y.: Harper & Row Publishers, 1965. P. 44; Суху Р. Магнитные тонкие пленки. М.: Мир, 1967. С. 45.