

Исследование магнитных полей рассеяния малых линейных размеров магнитооптическими методами

© Д.Е. Балабанов*, С.А. Никитов**,**

*Московский физико-технический институт,
141700 Долгопрудный, Московская обл., Россия

**Институт радиотехники и электроники Российской академии наук,
103907 Москва, Россия

(Поступила в Редакцию 22 июля 1999 г.)

Исследованы доменные структуры с плоскостной намагниченностью в магнито жестких пленках. Создана магнитооптическая установка для исследования магнитных полей рассеяния, сочетающая достоинства вибрационного магнитометра и магнитооптического способа регистрации сигнала. При этом чувствительность при измерении нормальной компоненты поля рассеяния составила ~ 0.1 Ое. Установлены критерии выбора оптимальных параметров для магнитооптической среды считывания информации.

Выражаем благодарность РФФИ (грант № 99-02-17660) и Миннауки РФ (грант № 2.9.99, "Поверхностные атомные структуры") за частичное финансирование работы.

Измерение малых магнитных полей рассеяния является весьма актуальной задачей в связи с необходимостью исследования доменной структуры (ДС) магнитных пленок, в которых вектор намагниченности лежит в плоскости пленки. Основная проблема в исследовании таких объектов заключается в невозможности использования стандартных магнитооптических методов наблюдения ДС [1]. Это связано с тем, что в случае намагничивания в плоскости пленки значительно уменьшаются по величине как эффект Фарадея, так и полярный эффект Керра, наличие которых является необходимым для наблюдения ДС [1]. Другие методы либо носят качественный характер (например, метод магнитной жидкости), либо являются очень сложными (например, электронно-оптический) и непригодными для экспресс-анализа [2]. Одним из способов решения данной проблемы является использование промежуточной среды считывания [1,2], которая обладает высокими магнитооптическими характеристиками, с одной стороны, и является магнито статически связанной с исследуемым объектом, с другой стороны.

Наиболее перспективной средой для регистрации пространственнонеоднородных магнитных полей с характерным размером единиц микронов и более являются эпитаксиальные пленки висмутсодержащих ферритов-гранатов (ЭФГП) [1]. Кроме того, эти пленки являются наиболее пригодными в качестве магнитооптических головок считывания информации. Такие головки применяются в случаях, когда магнитооптические характеристики носителя информации не позволяют производить считывание непосредственно с самого носителя (например, из-за малой величины вращения Керра).

Известен способ визуализации и топографирования магнитных полей по конфигурациям доменных структур Вi-содержащих ЭФГП [2]. Однако этот способ имеет ограничения по величине исследуемого магнитного поля и обладает существенной погрешностью в случае, когда характерный пространственный размер измеряемого поля сравним с периодом ДС регистрирующей среды.

В предлагаемой работе описывается не визуальный магнитооптический способ регистрации слабых магнитных полей, а также сформулированы принципы выбора оптимальных параметров ЭФГП для использования в качестве регистрирующей среды. Основной особенностью предлагаемого метода измерений является сочетание вибрационного магнитометра с магнитооптическим способом регистрации полезного сигнала.

1. Эксперимент

Установка для исследования неоднородных магнитных полей создана на базе поляризационного микроскопа, причем в качестве осветителя применен лазер с длиной волны $\lambda = 0.63 \mu\text{m}$ (рис. 1). Принцип измерения заключается в следующем: луч лазера фокусируется на висмутсодержащую ЭФГП, которая является средой считывания, причем на обратную сторону пленки напылен светоотражающий слой алюминия толщиной $0.1 \mu\text{m}$. Под пленку ЭФГП помещается образец-среда записи

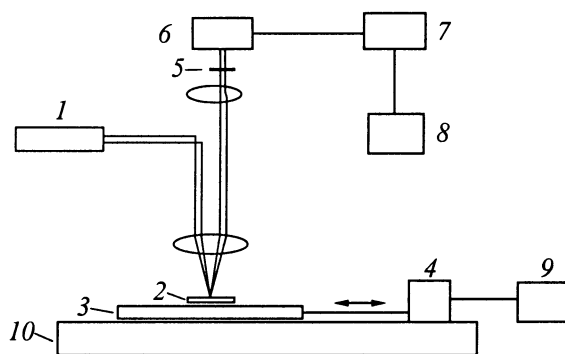


Рис. 1. Блок-схема измерительной установки. 1 — лазер, 2 — ЭФГП, 3 — образец, 4 — устройство смещения образца, 5 — поляризатор, 6 — фотодетектор, 7 — усилитель, 8 — осциллограф, 9 — генератор, 10 — двухкоординатный стол.

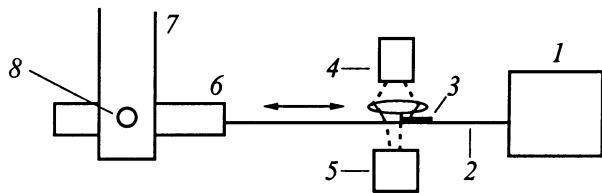


Рис. 2. Схема измерения амплитуды колебаний образца. 1 — устройство перемещения, 2 — шток, 3 — непрозрачная шторка, 4 — осветитель, 5 — фотоприемник, 6 — образец, 7 — держатель образца, 8 — ЭФГП.

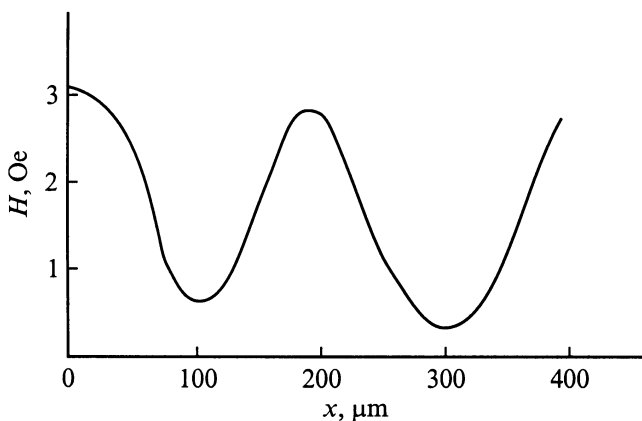


Рис. 3. Зависимость нормальной компоненты поля рассеяния от координаты.

с ДС, магнитные поля рассеяния которой и надлежит измерить. Исследуемый образец механически приводится в движение параллельно ЭФГП. В результате чего ДС ЭФГП находится под воздействием переменных полей рассеяния исследуемого образца, что приводит к появлению фарадеевского вращения при отражении луча лазера от диэлектрического слоя. Регистрирующая система измеряет зависимость амплитуды магнитооптического сигнала, пропорциональной величине нормальной компоненты поля рассеяния образца в области пятна лазера, от координаты образца.

Для определения величины нормальной компоненты поля рассеяния используем метод сравнения, который применяется для измерения абсолютной величины намагниченности насыщения в вибрационных магнитометрах. Для этого располагаем калиброванную катушку так, чтобы пленка ЭФГП находилась в известном переменном магнитном поле такой же частоты, что и частоты колебаний вибратора. Сравнивая амплитуду магнитооптического сигнала от ДС вибрирующего образца с амплитудой магнитооптического сигнала, возникающего при воздействии магнитного поля от калиброванной катушки, можно определить амплитуду нормальной компоненты поля рассеяния от ДС исследуемого образца.

В качестве регистрирующей системы применен фотодиод ФД-7 с усилителем-преобразователем УПИ-2. Для измерения амплитуды колебаний образца используется

оптическая система (рис. 2), суть работы которой заключается в следующем: к штоку вибратора крепится непрозрачная шторка, которая частично перекрывает поверхность фотодиода (1) при освещении последнего плоскопараллельным пучком света от осветителя (2). Амплитуда фотоэда пропорциональна амплитуде колебаний штока при условии, что амплитуда колебаний штока много меньше размера светочувствительной поверхности фотоприемника.

На рис. 3 представлены результаты экспериментальных исследований нормальной компоненты поля рассеяния от координаты для доменной структуры, вектор намагниченности которой лежит в плоскости пленки. Исследуемый образец представляет собой стандартную магнитную ленту для звуковой записи, при этом на нее был записан тестовый сигнал частотой 500 Hz. В качестве регистрирующей среды использована ЭФГП состава $(\text{BiSmTm})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$ с параметрами: толщина $h = 6 \mu\text{m}$ размер домена $P = 100 \mu\text{m}$, поле насыщения $H_s = 6 \text{ Oe}$.

2. Расчет оптимальных параметров регистрирующей среды

Важнейшими параметрами системы измерения слабых магнитных полей являются чувствительность и пространственная разрешенность. Чувствительность данного метода определяется, прежде всего, магнитными параметрами регистрирующей ЭФГП (поле насыщения, коэрцитивная сила, фарадеевское вращение), а также чувствительностью системы регистрации магнитооптического сигнала.

Определим параметры материала, которые обеспечат максимальную чувствительность системы при прочих равных условиях. Это можно сделать из условия максимума амплитуды магнитооптического сигнала при воздействии внешнего магнитного поля H . Для амплитуды магнитооптического сигнала можно записать

$$S = k\Psi_0 h \Delta W / Pn, \quad (1)$$

где Ψ_0 — удельная величина вращения Фарадея, h — толщина пленки, P — период ДС, ΔW — изменения размера

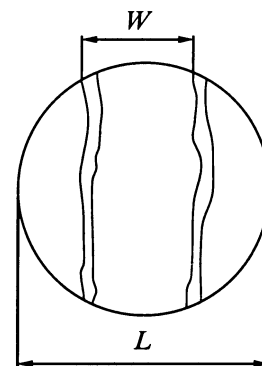


Рис. 4. Схематическое изображение домена при освещении лазера.

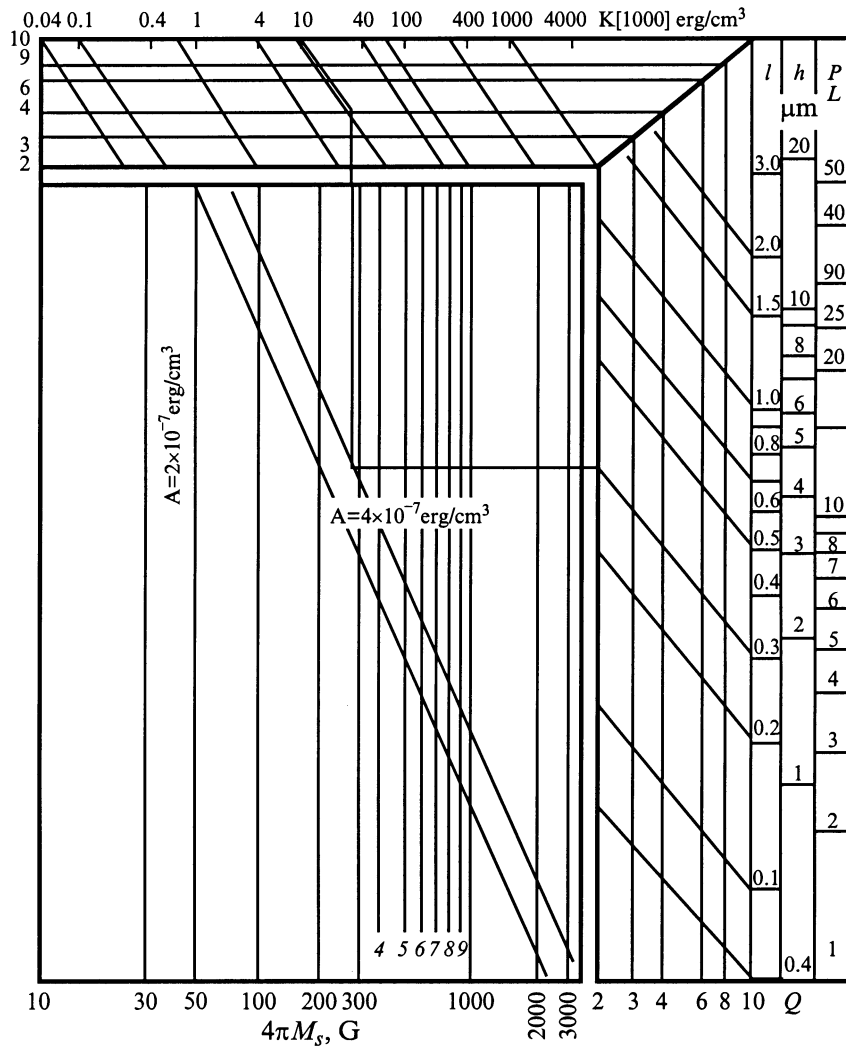


Рис. 5. Номограмма для определения оптимальных параметров одноосных материалов для магнитооптического считывания информации.

домена под действием внешнего магнитного поля H , n — количество доменных стенок в области пятна лазерного излучения диаметром L (рис. 4) (L — характерный размер бита информации), M — намагниченность материала, M_s — намагниченность насыщения материала, k — коэффициент, характеризующий чувствительность системы считывания. Кроме того, можно записать

$$\Delta W/P = M/M_s. \quad (2)$$

Для величины магнитооптической восприимчивости χ_{m0} можно записать

$$\chi_{m0} = dS/dH|_{H=0}. \quad (3)$$

Очевидно, что χ_{m0} должна быть максимальна. Подставляя в формулу (1) выражения (2) и (3), получаем

$$\chi_{m0} = k\Psi_0 h/M_s (dM/dH|_{H=0})(2L/P - 1). \quad (4)$$

Выражение $dM/dH|_{H=0}$ можно найти из теории полосовой ДС [4] при условии $M/M_s \ll 1$ и $Q \gg 1$, где

$Q = K_u/2\pi M_s^2$ — фактор качества материала, K_u — константа одноосной анизотропии.

$$dM/dH|_{H=0} = \left[4\pi \left(1 + P/(\pi h) \right) \times \sum_n (-1)^n (1 - \exp(-2\pi h/P))/n \right]^{-1}. \quad (5)$$

В диапазоне $1 < P/h < 5$ выражение (5) аппроксимируется формулой

$$dM/dH|_{H=0} = 0.053 + 0.047P/h. \quad (6)$$

Кроме того, в том же диапазоне отношения P/h имеет место соотношение [4]

$$1/h = -0.05 + 0.083P/h. \quad (7)$$

Для одноосных магнитных материалов имеют место соотношения [3]

$$M_s = (2QA/\pi)^{1/2}/l; \quad l = 4(AK_u)^{1/2}/(4\pi M_s^2),$$

где A — обменная константа; для ЭФГП она лежит в диапазоне $2 \cdot 10^{-7} - 4 \cdot 10^{-7} \text{ erg/cm}^3$.

Подставляя выражения (6) и (7) в выражение (4), получаем уравнение магнитооптической восприимчивости в следующем виде:

$$\chi = k\Psi_0 h(-0.05h + 0.083P) \times (0.053 + 0.047P/h)(2L/P - 1)(2QA/\pi)^{-1/2}.$$

Необходимо определить, при каких значениях P и h χ_{m0} максимальна, т. е. решить систему уравнений

$$\begin{cases} \partial\chi_{m0}/\partial P = 0 & \partial^2\chi_{m0}/\partial P^2 = 0 \\ \partial\chi_{m0}/\partial h = 0, & \partial^2\chi_{m0}/\partial h^2 = 0. \end{cases}$$

Это условие имеет место при выполнении следующих соотношений: $P/h = 2.585$, $P = L$, $l/h = 0.165$.

Эти соотношения определяют оптимальные параметры материала для измерения слабых магнитных полей с характерным размером L магнитооптическим методом. Таким образом, если необходимо магнитооптическим методом считывать информацию с характерным размером бита записи L , то оптимальными параметрами материала–среды считывания будут следующие. 1) Вi-содержащая ЭФГП с максимально возможным содержанием ионов Вi. 2) Период ДС равен размеру бита информации $P = L$. 3) Диаметр пятна лазера равен размеру бита информации. 5) Характеристическая длина материала $l = 0.0637L$. 6) Толщина пленки $h = 0.387L$ или $h = 6.07l$. 7) $4\pi M_s = 157(QA)^{0.5}/L$. 8) $K_u = 1017Q^2A/L^2$.

Кроме того, следует заметить, что $\chi_{m0} \sim (QA)^{-1}$, следовательно, Q должен быть минимален. Для удобства определения необходимых параметров пленки на рис. 5 приведена номограмма, которая позволяет определить оптимальные магнитные параметры ЭФГП. Принципы работы с подобными номограммами подробно описаны в [3,4]. Последовательность определения параметров состоит в следующем. Предположим, что характерный размер бита считываемой информации L . 1) Задаем величину фактора качества материала Q . (Обычно Q лежит в диапазоне 1.5–10). 2) Выбираем величину обменной константы A , которая лежит в диапазоне $2 \cdot 10^{-7} - 4 \cdot 10^{-7} \text{ erg/cm}^3$. 3) Отмечаем на диаграмме значение L , находим соответствующие ему значения толщины пленки h , размера домена P и характеристической длины материала l . 4) Зная Q и A , проводим горизонтальную линию до пересечения с прямой на номограмме. 5) Далее находим значения величин $4\pi M_s$ и K_u , соответствующие этой точке (как показано на рис. 5).

Следует отметить, что толщина пленки h ограничена величиной оптического поглощения материала. В случае использования лазера с длиной волны $\lambda = 0.63 \mu\text{m}$ максимально возможная толщина ЭФГП $h = 10 \mu\text{m}$. Это означает, что если характерный размер исследуемого магнитного поля $L \geq h/0.346 = 26 \mu\text{m}$, то наиболее оптимальные параметры ЭФГП могут быть найдены из условия: $\partial\chi_{m0}/\partial P = 0$, при $h = 10 \mu\text{m}$, и $P = L$. Кроме того, следует помнить, что величина коэрцитивной силы $H_c \sim 1/h$ и достигает 4Ое при $1/h \sim 1-2 \text{ Ое}$ [5]. Таким образом, при исследовании слабых магнитных полей с характерным периодом более $50 \mu\text{m}$ применение ЭФГП ограничено вследствие роста коэрцитивной силы. Выходом из создавшейся ситуации может быть увеличение толщины ЭФГП до оптимальной с соответствующим переходом в инфракрасную область спектра, где существенно уменьшается коэффициент оптического поглощения (например, можно использовать лазер с длиной волны $\lambda = 0.8 \mu\text{m}$). Если же необходимо работать в видимой области спектра, то следует перейти к использованию в качестве регистрирующей среды других магнитооптических материалов (например, ортоферритов).

Таким образом, созданная установка для измерения амплитуды нормальной компоненты поля рассеяния с использованием промежуточной регистрирующей среды, в качестве которой применяются висмутосодержащие пленки ферритов-гранатов, позволяет определять параметры доменной структуры магнитных материалов с плоскостным расположением вектора намагниченности. Проведенный теоретический анализ позволяет определить оптимальные параметры материала–регистрирующей среды при магнитооптическом считывании информации в зависимости от размера бита (плотности записи).

Список литературы

- [1] А.К. Звездин, В.А. Котов. Магнитооптика тонких пленок. Наука (1988). 190 с.
- [2] В.В. Рандошкин, А.Я. Червоненкис. Прикладная магнитооптика. Энергоатомиздат, М. (1990). 318 с.
- [3] А. Эшенфельдер А. Физика и техника цилиндрических магнитных доменов. Мир, М. (1983). С. 496.
- [4] С. Кооу, U. Enz. Phil. Res. Rept. **15**, 1, 7 (1960).
- [5] Р.А. Айнетдинов, Д.Е. Балабанов, В.А. Котов, В.Г. Редько. Тезисы Всесоюзной школы-семинара "Доменные и магнитооптические запоминающие устройства". Кобулетти (1987). С. 139.