

04,05

Магнитострикция пленок граната $(\text{YSmLuCa})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$ методом низкочастотной восприимчивости

© В.А. Шаповалов¹, В.В. Кононенко¹, В.Г. Шавров², А.П. Каманцев²

¹ Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина, Донецк, Украина

² Институт радиоэлектроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия

E-mail: vashapovalov1@mail.ru

(Поступила в Редакцию 18 июля 2018 г.)

Аттестация новых магнитных материалов нуждается в высокоточных неразрушающих методах. Предложен метод измерения константы магнитострикции пленок на основе исследования низкочастотной магнитной восприимчивости при упругой деформации пленок. Метод позволяет увеличить на порядок точность измерения константы магнитострикции по сравнению с ранее применяемыми методами.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 14-22-00279 — Фундаментальные поисковые исследования в области магнетизма, фазовых превращений, магнитоэлектроники и микросистемной техники.

DOI: 10.21883/FTT.2019.01.46894.216

1. Введение

Известно несколько методов измерения констант магнитострикции [1]. Достаточно высокую точность измерения λ (около 15%) обеспечивает метод двухкристальной рентгеновской дифракции [2]. Он основан на измерении сдвига дифракционного рентгеновского пика от пленки, возникающего во внешнем магнитном поле. Однако для регистрации этого эффекта требуется очень точная юстировка исследуемой пленки, что затрудняет его применение для метрологического контроля пленок в промышленных условиях.

Менее точными являются методы измерения константы магнитострикции в пленках, основанные на измерении деформации образца во внешнем магнитном поле под действием механических напряжений [3] и на измерении электрической емкости конденсатора, между обкладками которого расположен исследуемый магнитный материал [4]. Практическое использование первого из этих методов [3] ограничено необходимостью приложения к пленке значительных механических напряжений. Недостатком второго [4] является требование независимого измерения диэлектрической проницаемости образца.

Для неразрушающего измерения констант магнитострикции широко используют метод ферромагнитного резонанса (ФМР), который основан на измерении сдвига резонансной линии под действием приложенного к пленке механического напряжения [5]. Этот метод также обладает недостатками. Низкая разрешающая способность, низкая чувствительность к магнитоупругому эффекту и большая погрешность измерений (более 20%) обусловлены большой шириной резонансной линии по сравнению со смещением резонансной линии с прило-

женным к пленке давлением. Ширина линии ФМР в пленках определяется быстрорелаксирующими редкоземельными ионами, входящими в состав пленок, и обычно составляет величину порядка 1–2 кОе [6]. В то же время сдвиг линии при изгибе системы пленка–подложка до половины ее толщины не превышает нескольких десятков эрстед [5].

2. Результаты

Предлагаемый метод измерения констант магнитострикции основан на измерении полевой зависимости низкочастотной магнитной восприимчивости при перемагничивании пленки. Он заключается в одновременном воздействии на магнитную пленку радиочастотного магнитного поля, механических напряжений и постоянного магнитного поля. При определенных значениях напряженности магнитного поля наблюдаются особенности на кривой полевой зависимости дифференциальной низкочастотной магнитной восприимчивости χH_{\parallel} (рис. 1). Где H_{\parallel} — постоянное магнитное поле между накопчиками электромагнита, направленное параллельно плоскости пленки.

Величина H_{\parallel} изменяется с изменением прогиба пленки в результате механического воздействия на пленку. Поле H_{\parallel} соответствуют переходам пленки либо из многодоменного в однодоменное состояние, либо из состояния с одной доменной структурой в состояние со структурой другого типа. Величина H_{\parallel} , соответствующая каждой кривой 1–7 (рис. 1), изменяется в результате механического воздействия на пленку. По величине этих изменений можно судить о константе λ . Механизмы, определяющие ширину особенностей $\chi(H)$, не зависят от скорости релаксации редкоземельных ионов,

а обусловлены в основном размагничивающими полями и перераспределением объемов доменов различных магнитных фаз [7]. Типичные значения ширины таких особенностей $\chi(H)$ составляют величину в 100 Ое [8], что на порядок меньше ширины линии ФМР.

Измерения были проведены на индуктивно-частотной установке с модернизированным измерительным датчиком (рис. 2).

В установке предусматривается возможность равномерной механической нагрузки исследуемой пленки, которое достигалось закреплением подложки в качестве мембраны и откачиванием воздуха с одной стороны от нее. В этом случае для системы пленка-подложка, выполненной в виде диска с радиусом R , много большим толщины h , однородная механическая нагрузка реализуется при прогибе центра диска до величины, не превышающей половины его толщины (рис. 2). Для измерения λ использовалась стандартная пленка граната $(\text{YSmLuCa})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$ с осью легкого намаг-

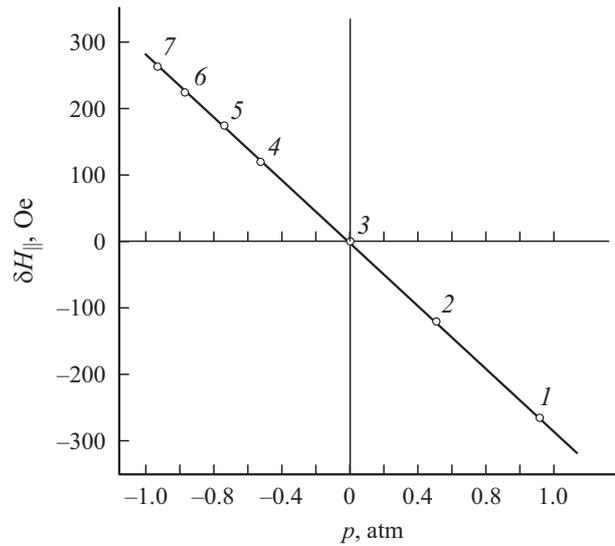


Рис. 3. Зависимость поля магнитной анизотропии $\delta H_{||}$ от приложенного к пленке давления p : 1 — 1 atm, 2 — 0.5 atm, 3 — 0 atm, 4 — -0.5 atm, 5 — -0.7 atm, 6 — -0.9 atm, 7 — -1 atm.

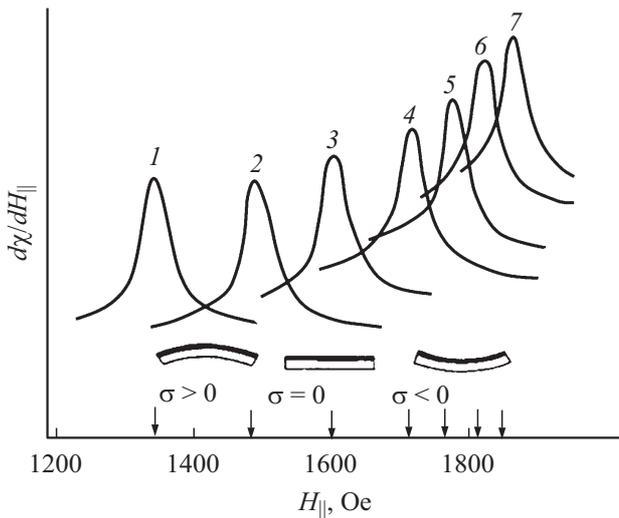


Рис. 1. Восприимчивость $d\chi/dH_{||}$ в функции планарного магнитного поля $H_{||}$ для различных давлений p : 1 — 1 atm, 2 — 0.5 atm, 3 — 0 atm, 4 — -0.5 atm, 5 — -0.7 atm, 6 — -0.9 atm, 7 — -1 atm.

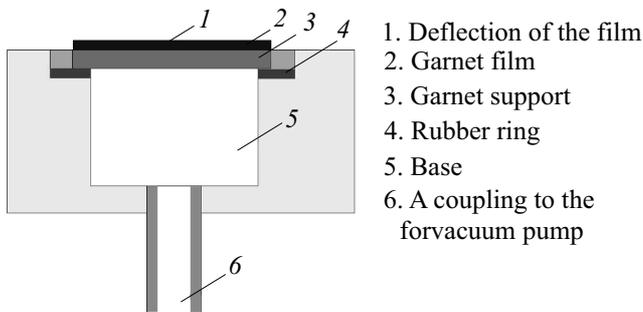


Рис. 2. Индуктивно-частотная установка: 1 — прогиб пленки, 2 и 3 — пленка и подложка граната, 4 — резиновое кольцо, 5 — основание, 6 — фланец к форвакуумному насосу.

ничивания $\langle 111 \rangle$, перпендикулярной плоскости пленки. Намагниченность насыщения пленки $4\pi M_s = 190$ Ое. Пленка была нанесена на галлий-гадолиниевую подложку (коэффициент Пуассона $\nu = 0.29$) толщиной $h = 0.527$ mm, которая свободно опиралась на кольцо радиуса $R = 14$ mm. К системе пленка-подложка прикреплялась многослойная катушка индуктивности диаметром 5 mm. По разные стороны системы пленка-подложка создавалась разность давлений p до 1 атмосферы (рис. 2). Измерения дифференциальной магнитной восприимчивости велись на частоте 1 МГц в планарном магнитном поле до 2 кОе.

На рис. 3 проиллюстрирована зависимость величины смещения поля эффективной магнитной анизотропии $\delta H_{||}$ от давления p . По смещению поля магнитной анизотропии определена константа магнитострикции $\lambda = -2.55 \cdot 10^{-6}$ с точностью $\pm 1.5\%$.

Прогиб контролировался измерением разности давлений p по обе стороны диска. При этом напряжение σ в пленке выражается через p согласно формуле [9]

$$\sigma = \frac{3}{8} (3 + \nu) p \left(\frac{R}{h} \right)^2. \quad (1)$$

Приложенное к пленке механическое напряжение σ в результате эффекта магнитострикции приводит к смещению поля эффективной магнитной анизотропии $H_{||}$ [5] на величину

$$\delta H_{||} = \frac{3}{2} \frac{\lambda_{111}}{M_s} \sigma, \quad (2)$$

где M_s — намагниченность насыщения, σ принимается положительным в случае растяжения пленки.

Расчетная формула для определения константы магнитострикции λ_{111} с учетом соотношений (1), (2) приобретает вид

$$\lambda_{111} = \frac{\delta H_{\parallel} M_s}{p} \left(\frac{h}{R} \right)^2 \frac{16}{((3 + \nu))}. \quad (3)$$

3. Обсуждение результатов

Увеличение точности измерения константы λ в методе низкочастотной восприимчивости (НВ) обеспечивается сужением полосы заметных изменений $\chi(H)$ по сравнению с шириной линии ФМР. При прочих равных условиях ошибка в определении значения резонансного магнитного поля (для ФМР-метода) или в максимуме $d\chi/dH_{\parallel}$ (для НВ-метода) пропорциональна ширинам линий. Так как полоса заметных изменений $\chi(H)$ на порядок уже ширины ФМР-линии, то погрешность измерения константы λ , обусловленная ошибкой при измерении сдвига магнитного поля δH_{\parallel} в НВ-методе, на порядок меньше, чем в ФМР-методе.

4. Заключение

Впервые для увеличения точности измерения константы магнитострикции λ использован метод низкочастотной восприимчивости при упругой деформации образца. Метод неразрушающего контроля. По сравнению с ранее применяемыми методами точность измерения константы магнитострикции λ на порядок выше.

Список литературы

- [1] Е.В. Харин. Влияние структуры и фазового состава на статические магнитные свойства нанокристаллических пленок системы Fe–Zr–N. Канд. дис. Институт металлургии РАН (2016).
- [2] J. Mada, K.I. Yamaquhi. J. Appl. Phys. **53**, 596 (1982).
- [3] I.J. Jida. Phys. Soc. Jpn. **22**, 1201 (1967).
- [4] E.R. Callen, A.E. Clerk, B. Desavage. Phys. Rev. **130**, 1735 (1963).
- [5] Г.П. Вела-Колейро. Приборы для научных исследований **97** (1979).
- [6] Р.В. Телеснин, А.М. Зюзин, А.Ф. Маргынов, В.В. Рандошкин. Физика магнитных материалов. Иркутск (1981). 94 с.
- [7] К.П. Белов, А.К. Звездин, А.М. Кадомцева, Р.З. Левитин. Ориентационные переходы в редкоземельных магнетиках. Наука, М. (1979) 317 с.
- [8] С.П. Тимошенко. Курс теории упругости. Наук. думка, Киев (1972). 501 с.

Редактор К.В. Емцев