

09; 12

© 1991

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАМАГНИЧЕННОСТИ НАСЫЩЕНИЯ
АНИЗОТРОПНЫХ МАГНИТНЫХ ПЛЕНОК
ПО ИНТЕНСИВНОСТИ И ШИРИНЕ ЛИНИИ ФМР

А.М. Зюзин, В.Н. Ваньков,
В.В. Радайкин

В работе [1] было показано, что намагниченность насыщения M одноосных магнитных пленок можно определить по интенсивности I и ширине $2\Delta H$ линии ФМР, измеренных при перпендикулярной ориентации внешнего постоянного магнитного поля \vec{H} относительно плоскости пленки. Способ основан на использовании известного соотношения [2]

$$2\Delta H \cdot \chi'' = M, \quad (1)$$

справедливого для ферромагнетика в форме эллипсоида вращения, одним из предельных случаев которого можно рассматривать одноосную пленку.

Однако для пленок с другим типом анизотропии соотношение (1) является несправедливым.

В данной работе изложен подход, позволяющий по интенсивности и ширине линии ФМР определять M однородных магнитных пленок с любым типом анизотропии: одноосной, кубической, орторомбической. Известно, что I пропорциональна мощности P ВЧ-поля, поглощаемой при резонансе. Используя результаты, изложенные в [2], P в случае линейно-поляризованного внешнего ВЧ-поля \vec{h}_0 , перпендикулярного \vec{H} , и отсутствия разориентации между векторами \vec{M} и \vec{H} можно, путем выбора соответствующей системы координат, выразить через антиэрмитовую (мнимую) часть лишь одной из поперечных диагональных компонент внешнего тензора ВЧ-восприимчивости χ''_{ii} и амплитуду поля \vec{h}_0 , ориентированного вдоль i -й оси. Если принять, что ось Z локальной системы координат направлена вдоль вектора намагниченности \vec{M} , а ось x вдоль \vec{h}_0 , то

$$I \sim P = \frac{\omega}{2} \chi''_{xx} h_0^2. \quad (2)$$

В этом соотношении ω — круговая частота ВЧ-поля, а χ''_{xx} выражается формулой:

$$\chi''_{xx} = \frac{\gamma M}{2\alpha\omega} \frac{H_{i0} + N_{yy}^{\text{эф}} M}{H_{i0} + \frac{1}{2}(N_{xx}^{\text{эф}} + N_{yy}^{\text{эф}}) M}, \quad (3)$$

γ - гирамагнитное отношение, α - параметр затухания Гильберта, H_{i0} - сумма значений внешнего магнитного поля и проекции эффективного поля анизотропии (включающего и размагничивающее поле формы) на направление \vec{M} , N_{ij} - компоненты тензора эффективных размагничивающих факторов. Если произвести поворот h_0 а, следовательно, и локальной системы координат на $\pi/2$ вокруг оси $Z \parallel \vec{H}$, то значения $N_{xx}^{3\varphi}$ и $N_{yy}^{3\varphi}$ поменяются местами, т.е. $(N_{xx}^{3\varphi})_0 = (N_{yy}^{3\varphi})_{\pi/2}$, а $(N_{yy}^{3\varphi})_0 = (N_{xx}^{3\varphi})_{\pi/2}$.

Как легко убедиться, полусумма значений (χ''_{xx}) и $(\chi''_{xx})_{\pi/2}$ равна $\gamma M / (2\alpha\omega)$ и, следовательно, является инвариантной относительно выбора двух различающихся на $\pi/2$ ориентаций \vec{h}_0 в плоскости, перпендикулярной \vec{H} . При изотропном α значение $\frac{1}{2}[(\chi''_{xx})_0 + (\chi''_{xx})_{\pi/2}]h_0^2$, пропорциональное полусумме соответствующих интенсивностей $\frac{1}{2}[I_0 + I_{\pi/2}]$, должно быть одинаковым для направлений \vec{H} , при которых отсутствует разориентация векторов \vec{M} и \vec{H} , и $h_x = h_0$. В общем случае анизотропного α одинаковое и равное M значение должно иметь произведение полусуммы $\frac{1}{2}[(\chi''_{xx})_0 + (\chi''_{xx})_{\pi/2}]$ на ширину линии $2\Delta H = 2\alpha\omega/\gamma$ при соответствующей ориентации \vec{H} . В частности, если \vec{H} перпендикулярно плоскости пленки с орторомбической анизотропией

$$(\chi''_{xx})_{\varphi_n} = \frac{\gamma M}{2\alpha\omega} \frac{H + H_{ки} + H_{кр} \cos^2 \varphi_n}{H + H_{ки} + H_{кр}/2}, \quad (4)$$

где $H_{ки} = \frac{2K_u}{M} - 4\pi M$ - эффективное поле одноосной компоненты анизотропии, $H_{кр} = \frac{2K_r}{M}$ - поле ромбической компоненты анизотропии, φ_n - азимутальный угол между \vec{h}_0 и осью ромбической компоненты анизотропии в плоскости пленки. Как с очевидностью следует из формулы (4), полусумма значений $(\chi''_{xx})_{\varphi_n}$ и $(\chi''_{xx})_{\varphi_n + \pi/2}$ равна $\gamma M / (2\alpha\omega)$.

Согласно соотношению (2), интенсивность линии поглощения можно выразить через χ''_{xx} следующим образом: $I = k\chi''_{xx}$, где k - некоторый коэффициент, зависящий от объема образца, амплитуды ВЧ-поля и коэффициента усиления схемы регистрации сигнала ФМР. Поэтому, зная величину k , можно по I определить χ''_{xx} . Для определения k производилась калибровка интенсивности с помощью эталонного образца с известными намагничённостью и толщиной (объемом). В качестве эталонного образца удобнее использовать одноосную пленку. Измерения интенсивности линий ФМР исследуемого и эталонного образцов производились в идентичных (или контролируемых) экспериментальных условиях, что достигалось, например, путем одновременного помещения этих образцов в резонатор радиоспектрометра. В этом случае не должно иметь места наложения линий поглощения. Как легко показать,

Параметры исследованных пленок

№ образца	Толщина пленки h , мкм	$\gamma \cdot 10^{-7}$ $\text{Э}^{-1} \text{с}^{-1}$	$2\Delta H$, Э	$H_{ки}$, Э	$H_{кр}$, Э	$4\pi M^*$, Гс	$4\pi M^{**}$, Гс
1	1.7	1.69	1150	-2140	3200	448	440
2	2.32	1.63	1250	-2137	3613	412	400
3	3.24	1.06	430	2995	2947	446	440
4	3.38	1.08	800	2112	4137	380	420
5	2.23	1.15	382	1451	3007	428	454

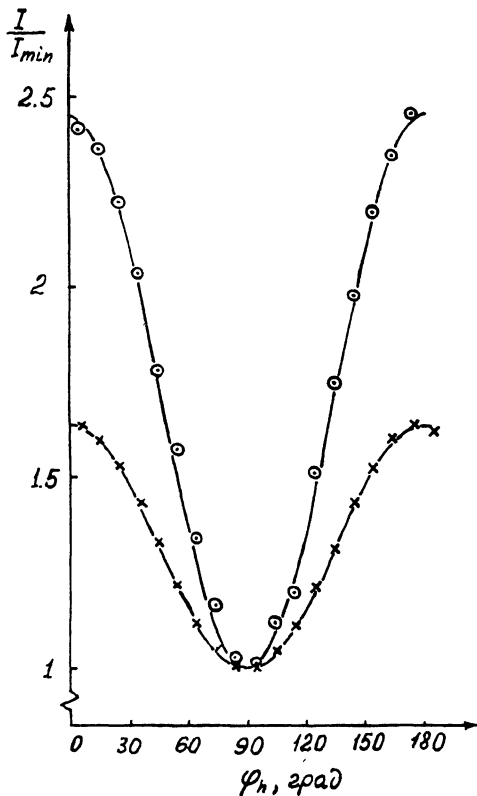
произведение I на $2\Delta H$ пропорционально магнитному моменту всего образца. Поэтому расчетная формула для намагниченности M будет иметь вид:

$$M = M_0 \frac{V_0 (I_1 + I_2) \Delta H}{V (I_{01} + I_{02}) \Delta H_0}, \quad (5)$$

где V – объем пленки, I_1 – интенсивность линии при одной ориентации ВЧ-поля относительно пленки, I_2 – при другой, отличающейся от первой на $\pi/2$, индексом „0” обозначены соответствующие параметры эталонного образца, измеренные в идентичных экспериментальных условиях.

Экспериментальная проверка полученных результатов проводилась на однородных монокристаллических пленках феррит-гранатов с составами: $(BiYDyCa)_3(FeSi)_5O_{12}$ – (образцы 1, 2) и $(BiGdEuCa)_3(FeAlSi)_5O_{12}$ – (3–5), которые были выращены, соответственно, на подложках гадолиний-галлиевого и неодим-галлиевого гранатов, вырезанных в плоскости (110). Пленки обладали орторомбической анизотропией. Их однородность контролировалась послойным стравливанием [3]. Измерения проводились при температуре 293 К на частоте 9,34 ГГц. Параметры исследованных пленок приведены в таблице. Как следует из результатов измерений, значения намагниченности насыщения, определенные по данным ФМР с помощью формулы (5) (M^*) и рассчитанные по полю коллапса доменов, ширине страйп-структуры и толщине пленки [4] (M^{**}), а также измеренные методом Фарадея в тех пленках, в которых отсутствовала доменная структура (пленки 1, 2), различались не более чем на 12%. Это различие не выходит за пределы суммарной погрешности в определении M одним и другим методами.

На рисунке показаны зависимости I от угла φ_h для образцов № 1 и № 3. Соответствие расчетных и экспериментальных результатов $I(\varphi_h)$ подтверждает справедливость формулы (4). Из рисунка также следует, что с целью уменьшения погрешности измерений I , связанной с неточностью установки углов φ_h и $\varphi_h + \pi/2$



Зависимости интенсивности линии ФМР от угла φ_h между \vec{h}_0 и осью $\langle 001 \rangle$ в плоскости пленки (110): линии – расчет; точки и крестики – эксперимент для образцов № 1 и № 3 соответственно.

проводить измерения I_1 , I_2 предпочтительнее при параллельной и перпендикулярной ориентациях \vec{h}_0 относительно легкого или трудного направлений в плоскости, перпендикулярной \vec{H} , т.е. когда наблюдаются экстремумы интенсивности.

Были также измерены и сопоставлены значения $(I_1 + I_2) \Delta H$ для трех ориентаций поля \vec{H} относительно пленки, при которых отсутствует разориентация векторов \vec{M} и \vec{H} : 1) при вышеуказанной, когда $\vec{H} \perp$ плоскости пленки (110); 2) при $\vec{H} \parallel$ оси ромбической компоненты анизотропии в плоскости пленки, которая являлась осью легкого намагничивания; 3) при $\vec{H} \perp$ этой оси. Как следует из полученных результатов, различие значений $(I_1 + I_2) \Delta H$ для этих трех случаев не превышало погрешности измерений данной величины, составляющей 6%.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] З ю з и н А.М., Р а н д о ш к и н В.В., Т е л е с -
н и н Р.В. // ЖТФ. 1982. Т. 52. № 9. С. 1904-
1906.
- [2] Г у р е в и ч А.Г. Магнитный резонанс в ферритах и
антиферромагнетиках. М.: Наука, 1973. 591 с.
- [3] Т е л е с н и н Р.В., З ю з и н А.М., Р а н д о ш -
к и н В.В., С т а р о с т и н Ю.В. // ФТТ. 1982.
Т. 24. № 4. С. 1166-1171.
- [4] J o s e p h s R.M. // AIP Conf. Proc. 1972.
V. 10. P. 286-303.

Поступило в Редакцию
23 мая 1991 г.
В окончательной редакции
15 октября 1991 г.