

Л. В. КИРЕНСКИЙ, В. А. ПГНАТЧЕНКО и О. Г. БАКЛАНОВ

ФЕРРОМАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ

В работах [1—3] и ряде других явление ферромагнитного резонанса (ФМР) было использовано для изучения некоторых магнитных характеристик тонких ферромагнитных пленок. При исследовании тонких пленок метод ФМР обладает значительными преимуществами перед другими методами, позволяя добиться высокой чувствительности и точности довольно простыми средствами.

Мы использовали явление ФМР для измерения намагниченности насыщения и константы анизотропии тонких ферромагнитных пленок. Для

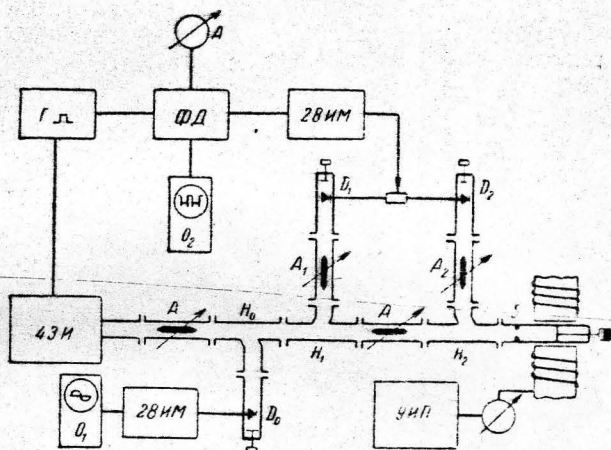


Рис. 1. Блок-схема установки

этой цели собрана установка, блок-схема которой приведена на рис. 1. СВЧ-колебания, генерируемые стандартным генератором 43И, модулируются прямоугольными импульсами, поступающими с генератора Г. Цепочка, состоящая из направленного ответвителя H_0 , детектора D_0 , усилителя и осциллографа, служит для контроля работы генератора. Основная часть мощности СВЧ падает на отверстие S, связывающее резонансную камеру с волноводным трактом. Используется цилиндрическая камера с колебаниями типа TE_{11} . Образцы, имеющие форму дисков, помещаются на задней стенке камеры. Диаметр дисков меньше диаметра камеры настолько, чтобы можно было пренебречь непараллельностью линий вектора H поля СВЧ. Предусмотрена возможность поворота пленки в ее плоскости. Измеряется отраженная волна, попадающая через ответвитель H_2 на детектор D_2 . Для повышения чувствительности установки начальный уровень сигнала, снимаемого с детектора D_2 , компенсируется сигналом, поступающим в противофазе с детектора D_1 . Разность этих сигналов подается на усилитель, а затем — на детектор, синхронизированный импульсами, поступающими с генератора Г. Усиленный и продетектированный сигнал регистрируется гальванометром А. Осциллограф O_2 слу-

жит для контроля работы фазового детектора и компенсатора. Резонансная камера помещается в постоянное магнитное поле, направленное параллельно плоскости пленки и перпендикулярно магнитной составляющей СВЧ-поля. Электромагнит питается от стабилизированного источника УИП-1.

Тонкие пленки получены методом катодного напыления в вакууме $\sim 10^{-5}$ мм рт. ст. Подложкой служат покровные стекла, вырезанные в виде дисков диаметром 18 мм. Температура подложки во время напыления около 300°C . При напылении в плоскости пленки накладывается постоянное поле $\sim 100 \text{ Oe}$ для создания искусственной анизотропии. Изучено несколько пленок пермаллоя (80% Ni, 17% Fe, 3% Mo) и одна кобальтовая пленка. Для пермаллоя приведен состав исходного материала; состав после напыления не контролировался. Толщина пленок определяется на монохроматоре УМ-2 методом, описанным Шкляревским [4].

Как впервые показал Ч. Киттель, положение максимума линии ФМР для эллипсоидального ферромагнетика определяется соотношением

$$\left(\frac{\omega}{\gamma}\right)^2 = (H + H_1^a)(H + H_2^a), \quad (1)$$

где ω — циклическая частота, γ — эффективное гиромагнитное отношение, H — постоянное магнитное поле, H_1^a и H_2^a — эффективные размагничивающие поля, обусловленные анизотропией формы, упругих напряжений и кристаллографической анизотропией ($H^a = H^{a\Phi} + H^{an} + H^{ak}$). Тонкую пленку с высокой степенью точности можно считать сильно сплюснутым эллипсоидом. Тогда

$$H_1^{a\Phi} = 4\pi I_s, \quad H_2^{a\Phi} = 0, \quad (2)$$

где I_s — намагниченность насыщения.

Напыление пленки проводится при высоких температурах. Ввиду неравенства коэффициентов температурного расширения металла и подложки при остывании в пленке возникают радиально симметричные упругие напряжения. Соответствующие им эффективные размагничивающие поля были рассчитаны Макдональдом [5] и Гриффитсом [1]:

$$H_1^{an} = \frac{3\lambda E}{(1-\sigma)I_s} (\alpha_m - \alpha_n) \Delta T, \quad H_2^{an} = 0, \quad (3)$$

где λ — изотропная магнитострикция, E — модуль Юнга, σ — коэффициент Пуассона, α_m и α_n — температурные коэффициенты расширения металла и подложки, ΔT — разность температур. Поскольку входящие в это выражение характеристики металла известны весьма приближенно, можно провести лишь грубую оценку вклада упругих напряжений. Впрочем, ввиду малости H_1^{an} по сравнению с $H_1^{a\Phi}$, это не вносит большой погрешности в результат.

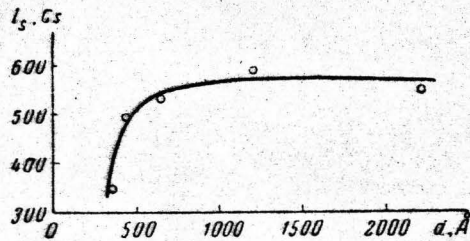


Рис. 2. Зависимость I_s пермалловых пленок от толщины

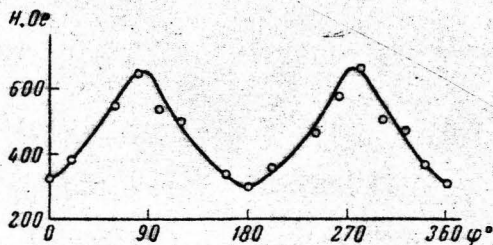


Рис. 3. Зависимость поля резонанса I_s от угла поворота кобальтовой пленки

Общие выражения для эффективных полей кристаллографической анизотропии в монокристалле получены Макдональдом [5]. В частности, для гексагонального кристалла

$$H_1^{\text{ан}} = \frac{2}{J_s} [(K'_1 + 2K'_2)(\gamma_{31}^2 - \gamma_{21}^2) + 2K'_2(3\gamma_{21}^2 - \gamma_{31}^2)\gamma_{31}], \quad (4)$$

$$H_2^{\text{ан}} = \frac{2}{J_s} [(K'_1 + 2K'_2)(\gamma_{31}^2 - \gamma_{11}^2) + 2K'_2(3\gamma_{11}^2 - \gamma_{31}^2)\gamma_{31}].$$

Анизотропия тонких пленок не кристаллографического происхождения. Но формально она может быть описана выражениями типа (4), где K'_1 и K'_2 — эффективные константы анизотропии.

Результаты измерений намагниченности насыщения тонкой пермаллоевой пленки приведены на рис. 2. Ход кривой $I_s(d)$ качественно повторяет данные [3] для пленок 80% Ni, 20% Fe. Однако резкий спад намагниченности наступает в наших пленках при толщинах на порядок больших, чем у авторов [3]. Возможно, что так проявляет себя разница химического состава, но скорее всего — недостаточная однородность наших пленок. Анизотропия на пермаллоевых пленках обнаружена нами не была — следовательно, она не превышает 10^3 эрг см⁻³.

На кобальтовой пленке ($d = 3\ 200$ Å) наблюдается четкая зависимость поля резонанса от угла поворота пленки (рис. 3). Пользуясь выражением (4), легко вычислить величину эффективной константы анизотропии K'_1 , если положить $K'_2 = 0$. Тогда

$$H^a = \frac{2K'_1}{J_s} = 175 \text{ Oe.}$$

Если принять, что $J_s = 1,42 \cdot 10^3$, то $K'_1 = 1,24 \cdot 10^5$ эрг см⁻³.

Авторы выражают благодарность Т. А. Степановой за помощь при выполнении работы.

Институт физики Сибирского отделения
Академии наук СССР

Литература

1. Griffiths J. H. E., Physica, 17, 253 (1951) (пер. в сб.: Ферромагнитный резонанс, ИЛ, М., 1952).
2. Conger R. L., Essig F. C., Phys. Rev., 104, 915 (1956).
3. Tappenwald P. E., Seavey M. N., J. phys. et radium, 20, 323 (1959).
4. Шкляревский И. Н., Оптика и спектроскопия, 5, № 5, 617 (1958).
5. Macdonald J. R., Proc. Phys. Soc., 64, 968 (1951) (пер. в сб.: Ферромагнитный резонанс, ИЛ, М., 1952).