Изв. АН Армянской ССР, Физика, 3, 98—102 (1968)

ВЕЛИЧИНА ЭФФЕКТИВНОЙ АНИЗОТРОПИИ И ПОВОРОТ ОСИ ЛЕГКОГО НАМАГНИЧИВАНИЯ В ОДНООСНЫХ ТОНКИХ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ПЛЕНКАХ ПРИ ОДНОВРЕМЕННОМ ДЕЙСТВИИ ДВУХ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

В. А. ДЖИДАРЯН

Получены формулы для величины эффективной анизотропии и значения угла поворота оси легкого намагничивания при одновременном наложении на магнитную пленку двух механических напряжений.

Предложенный метод позволяет найти эти значения и в случае действия n напряжений под различными углами к оси легкого намагничивания.

Полученные результаты дают возможность определить магнитоупругую постоянную при изгибе пленки.

Внешние механические напряжения σ, приложенные к тонкой ферромагнитной пленке, у которой постоянная магнитострикции отлична от нуля, $\lambda_s \neq 0$, изменяют ее основные магнитные характеристики: поле анизотропии H_k, коэрцитивную силу по смещению границ H_c, дисперсию ψ° [1—5].

В случае, когда одноосное напряжение приложено под некоторым углом α° к оси легкого намагничивания (ОЛН), происходит поворот последней, причем в зависимости от знака K_1 ($K_1 = 3\lambda_s\,\sigma/2$) легкая ось поворачивается или к линии напряжения, или стремится составить с ней угол 90°.

В этом случае величина эффективной анизотропии и угол поворота легкой оси β_1^0 относительно своего первоначального положения даются выражениями:

$$K_{эф}^0 = K\sqrt{1 + A_1^2 + 2A_1\cos 2\alpha} = KD; \tag{1}$$

$$\operatorname{tg} 2\beta_1 = \frac{A_1 \sin 2\alpha}{1 + A_1 \cos 2\alpha}, \tag{2}$$

где $A_1 = K_1/K$, а K_1 и K — постоянные магнитоупругой энергии

$$E_\sigma = K_1 \sin^2(\alpha - \theta) \tag{3}$$

и энергии наведенной анизотропии

$$E_k = K \sin^2 \theta, \tag{4}$$

где K — постоянная анизотропии,

θ — угол между вектором намагниченности J и ОЛН.

Представляет интерес вопрос определения величины эффективной анизотропии $K_{эф}^0$, а также поворота легкой оси β_2^0 в том случае, когда на тонкую ферромагнитную пленку с одноосной анизотропией действуют одновременно два или несколько механических напряжения ($\sigma_1, \sigma_2, \cdots, \sigma_n$) под различными углами к легкой оси ($\alpha_1, \alpha_2, \cdots, \alpha_n$).

Это вызвано, в первую очередь, тем обстоятельством, что при изгибе тонкой подложки, на которую нанесена магнитная пленка, возникают одновременно два ортогональных напряжения σ_1 и σ_2, причем $\sigma_2 = \mu_1\sigma_1$ [6], где μ_1—коэффициент Пуассона, равный 0,3 для пермаллоя.

Если напряжение σ_1 увеличивает поле анизотропии, то σ_2—уменьшает его и наоборот.

Очевидно, вместо взаимодействия магнитоупругой энергии, создаваемой напряжением σ_2, можно рассмотреть энергию анизотропии косого падения [7] или энергию, возникающую при магнитном отжиге [8].

Общую плотность магнитной энергии ТФП под действием двух напряжений можно представить в виде

$$E = E_k + E_{\sigma_1} + E_{\sigma_2} = K \sin^2 \Theta + K_1 \sin^2 (\alpha_1 - \Theta) + K_2 \sin^2 (\alpha_2 - \Theta), \quad (5)$$

где α_1, α_2 — углы между легкой осью и напряжениями σ_1, σ_2;

$$K_2 = 3\lambda_s \sigma_2/2.$$

Покажем, что в этом случае, как и в случае действия одного напряжения [9], выражение (5) можно упростить и привести к виду

$$E = K''_{эф} \sin^2 (\Theta - \beta_2) + K'_0. \quad (6)$$

Действительно, после некоторых преобразований получим систему уравнений

$$\left.\begin{aligned} K + K_1 \cos 2\alpha_1 + K_2 \cos 2\alpha_2 &= K''_{эф} \cos 2\beta_2 \\ K_1 \sin 2\alpha_1 + K_2 \sin 2\alpha_2 &= K''_{эф} \sin 2\beta_2 \\ K_1 \sin^2 \alpha_1 + K_2 \sin^2 \alpha_2 &= K''_{эф} \sin^2 \beta_2 + K'_0, \end{aligned}\right\}, \quad (7)$$

откуда

$$\operatorname{tg} 2\beta_2 = \frac{K_1 \sin 2\alpha_1 + K_2 \sin 2\alpha_2}{K + K_1 \cos 2\alpha_1 + K_2 \cos 2\alpha_2} = \frac{A_1 \sin 2\alpha_1 + A_2 \sin 2\alpha_2}{1 + A_1 \cos 2\alpha_1 + A_2 \cos \alpha_2}; \quad (8)$$

$$K''_{эф} = K\sqrt{1 + A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos 2(\alpha_1 - \alpha_2) + 2(A_1 \cos 2\alpha_1 + A_2 \cos 2\alpha_2)}, \quad (9)$$

где $A_2 = K_2/K$.

Из идентичности уравнений (4) и (6) можно сделать вывод, что упругие напряжения вызывают поворот легкой оси, изменяя константу наведенной анизотропии, и что определение состояния пленки в данный момент времени не дает возможности обнаружить, находится ли она под механическим напряжением или нет.

Выражения (8) и (9) показывают угол поворота легкой оси и эффективную константу анизотропии в случае одновременного действия двух напряжений σ_1 и σ_2 соответственно под углами α_1 и α_2 относительно ОЛН.

Таким же способом, очевидно, можно найти угол поворота легкой оси β_n^0 и эффективную константу анизотропии $K^n_{эф}$ и для случая, когда действует n напряжений под различными углами $\alpha_1, \alpha_2, \cdots, \alpha_n$ относительно легкой оси.

Легко заметить, что уравнения (8) и (9) переходят в выражения (1), (2) при подстановке $K_2=0$.

Как было сказано выше, при изгибе подложки возникают взаимно перпендикулярные напряжения, причем в этом случае $\sigma_2=\mu_1\sigma_1$ или $K_2=\mu_1 K_1$ и $\alpha_2=90+\alpha_1$ (условие перпендикулярности); заменив значения K_2 и α_2 на K_1 и σ_1, из уравнений (8) и (9) получим

$$\operatorname{tg} 2\beta_2' = \frac{(1-\mu_1)\, A_1 \sin 2\alpha_1}{1+(1-\mu_1)\, A_1 \cos 2\alpha_1}; \tag{10}$$

$$K'_{эф} = K\sqrt{1+(1-\mu_1)^2 A_1^2 + 2(1-\mu_1) A_1 \cos 2\alpha_1} = KD' \tag{11}$$

при $\alpha_1 = 0$ $K'_{эф} = K\,[1+(1-\mu_1)\,A_1]$, $\beta_2'=0$;
при $\alpha_1 = \pi/2$ $K'_{эф} = K\,[1-(1-\mu_1)\,A_1]$, $\beta_2'=0$.

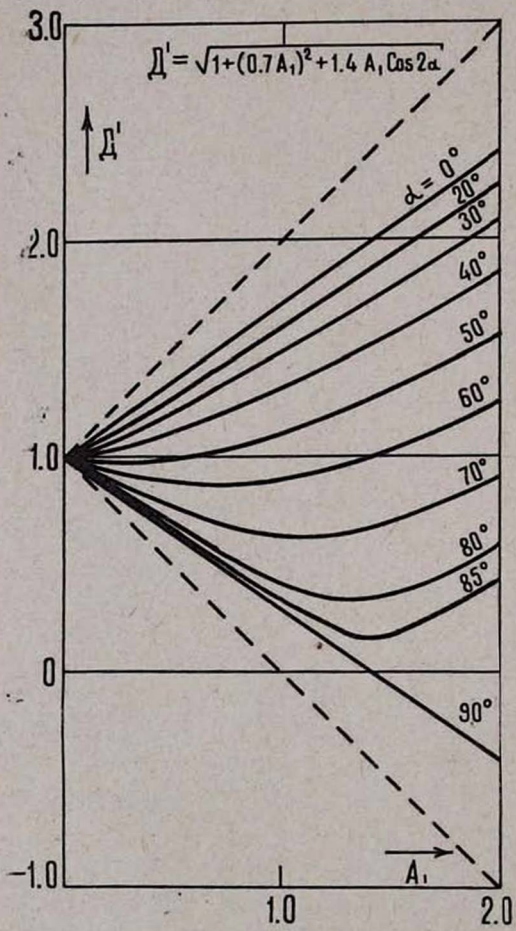

Рис. 1. Величина $Д' = \dfrac{K'_{эф}}{K}$ в зависимости от параметра A_1 для различных углов $\alpha°$.

На рис. 1 и 2 представлены кривые зависимости угла поворота легкой оси и величина $Д'$ в зависимости от параметра A_1 для различных значений углов α_1°.

Таким образом, под действием двух напряжений энергия эффективной анизотропии имеет вид

$$E = K'_{эф} \sin^2 \Theta_2 + K_0', \tag{12}$$

где $\Theta_2 = \Theta - \beta_2$.

K_0' — величина магнитной энергии, не зависящая от угла θ и равная разности между прикладываемой магнитоупругой энергией и энергией, израсходованной на изменение постоянной анизотропии и поворот легкой оси (поэтому при вычислении новых устойчивых состояний намагниченности она не отразится).

В магнитном поле H, приложенном под углом Φ_2 относительно новой легкой оси, общая энергия будет равна

$$E = K'_{эф} \sin^2 \Theta_2 - HJ\cos(\Phi_2 - \Theta_2) + K_0' \tag{13}$$

Идентичность уравнений (4) и (12) показывает, что и в этом случае, как для модели „идеальной пленки“, критическая кривая пред-

ставляет астроиду, повернутую относительно начальной (при $\sigma=0$) на угол β_2', определяемый выражением (10). Размеры новой астроиды зависят от величины A и угла α. При перемагничивании вдоль трудной оси петля гистерезиса линейна и достигает насыщения в поле

$$H_{k_1}' = H_k\,[1 + (1-\mu_1)\,A_1] \quad \text{при} \quad \alpha = 0,\ K_1 > 0$$

$$\text{и}\ H_{k_2}' = H_k\,[1 - (1-\mu_1)\,A_1] \quad \text{при}\ \alpha = \pi/2,\ \ K_1 > 0.$$

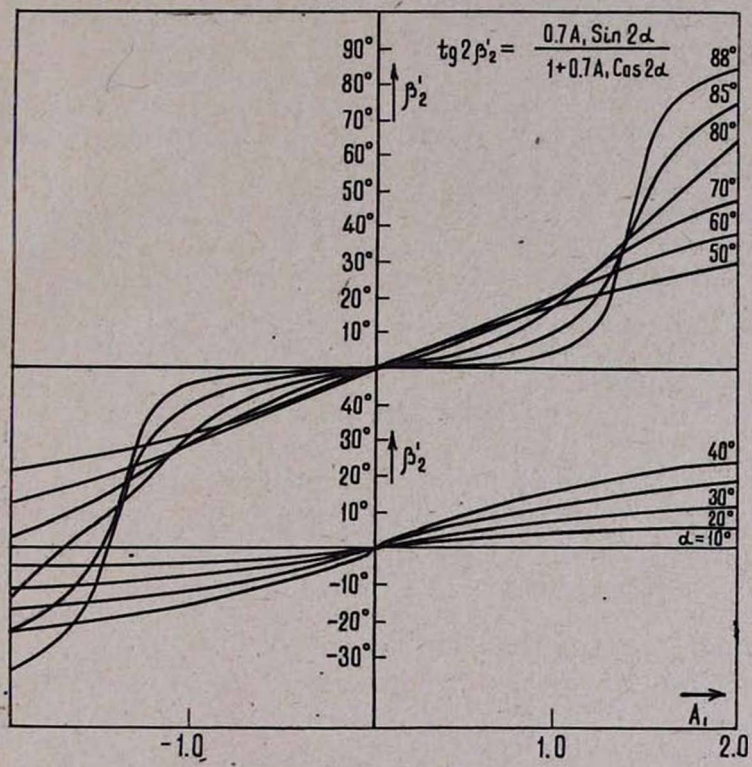

Рис. 2. Кривые зависимости угла поворота оси легкого намагничивания от параметра A_1 для различных углов $\alpha°$.

Очевидно, для $K_1 < 0$ получим обратный случай. Изменение поля анизотропии будет равно

$$\Delta H_k' = H_{k_1} - H_k = (1-\mu_1)\,A_1, \tag{15}$$

откуда следует, что наклон кривой H_k в $(1+\mu_1)$ раз меньше, чем в случае однонаправленного напряжения ($\Delta H_k' = H_k' - H_k = A_1$). Следовательно, величина магнитоупругого параметра $\eta = \Delta H_k/\Delta\varepsilon$, определяемая при деформации изгиба, будет в 1,35 раз меньше истинной величины.

Вольт и Кроутер [11], определяя λ_s по величине η, который измерялся при изгибе стеклянной подложки, нашли, что для тонких пленок он в 1,4—2,0 раза меньше его значения в случае объемного материала того же состава. Если принять во внимание вышерассмотренный

поперечный эффект, то значение постоянной магнитострикции для массивного ферромагнетика и тонкой пленки получится одинаковым.

ЕНИИ математических машин Поступила 26 октября 1967

ЛИТЕРАТУРА

1. *E. N. Mitchell, G. I. Lykken, G. D. Babcock*, J. Appl. Phys. 34, 715 (1963).
2. *H. L. Pinch, A. A. Pinto*, J. Appl. Phys., 35, 828 (1964).
3. *В. А. Буравихин, В. Г. Казаков, В. И. Попов*, Изв. АН СССР, сер. физ. 29, 659 (1965).
4. А. *Г. Лесник, Л. М. Сандлер*, Сб. Физика металлических пленок, Киев, Из-во „Наукова думка". 1965.
5. *В. А. Джидарян, А. А. Трчунян*, Известия АН АрмССР, Физика, 2, 364 (1967).
6. *С. П. Тимошенко*, Сопротивление материалов, Т. 1, 1965.
7. *Р. В. Телеснин, И. М. Сараева, А. Г. Шишков*. Изв. АН СССР, сер. физ. 29, 586 (1965).
8. *Ч. Грехем*, Сб. Магнитные свойства металлов и сплавов, М., ИИЛ, 1961.
9. *В. А. Джидарян*, Доклад, прочитанный на Всесоюзном симпозиуме по аппаратуре и методам исследования тонких магнитных пленок, г. Красноярск, 20—27 июня 1967 г. (будет опубликован в трудах симпозиума).
10. *В. В. Кобелев*, Сб. Магнитные элементы устройств вычислительной техники, М., АН СССР, ИТМ и ВТ, 1961.
11. 2. J. *W. Wolf, T. S. Crowther*, J. Appl. Phys., 34, 1205 (1963).

ԷՖԵԿՏԻՎ ԱՆԻԶՈՏՐՈՊԻԱՅԻ ՄԵԾՈՒԹՅՈՒՆԸ ԵՎ ԹԵԹԵՎ ԱՌԱՆՑՔԻ ՊՏՈՒՅՏԸ ՄԵԿ ԱՌԱՆՑՔԱՆԻ ՖԵՐՈՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ԲԱՐԱԿ ԹԱՂԱՆԹՆԵՐՈՒՄ ԵՐԿՈՒ ՄԵԽԱՆԻԿԱԿԱՆ ԼԱՐՈՒՄՆԵՐԻ ՄԻԱԺԱՄԱՆԱԿ ԱԶԴՄԱՆ ԴԵՊՔՈՒՄ

Վ. Ա. ՋԻԴԱՐՅԱՆ

Հոդվածում ստացված են անիզոտրոպիայի էֆեկտիվ մեծության և հեշտ մագնիսական առանցքի պտույտի չափի անալիտիկ արտահայտություններ, երբ մեկ առանցքանի անիզոտրոպիայով ֆերոմագնիսական թաղանթի վրա միաժամանակ գործում են երկու մեխանիկական լարումներ։

Առաջարկված մեթոդը հնարավորություն է տալիս ստանալ այդ մեծությունները և այն դեպքում, երբ n լարվածություններ գործում են թեթև առանցքի նկատմամբ տարբեր անկյունների տակ։

Ստացված արդյունքները հնարավորություն են տալիս որոշել մագնիսաառաձգական հաստատունը թաղանթի ծռման դեպքում։

MAGNITUDE OF THE EFFECTIVE ANIZOTROPY AND ROTATION AXIS OF THE EASY MAGNETIZATION IN THE UNIAXIAL THIN FERROMAGNETIC FILMS WITH SIMULTANEOUS ACTION OF TWO MECHANICAL TENSIONS

V. A. DJIDARIAN

Formulae for the magnitude of the effective anizotropy and for the rotation angle of the axis of the easy magnetization in the case of simultaneous action of two mechanical tensions on the magnetic film are obtained.

The obtained results allow us to determine the magnetoelastic constant at the film bending.