

УДК 539.216.2 : 538.248

**НЕОДНОРОДНОЕ ВРАЩЕНИЕ ВЕКТОРА
НАМАГНИЧЕННОСТИ В НАКЛОННО ОСАЖДЕННЫХ
«ЗАКРИТИЧЕСКИХ» ПЛЕНКАХ**

*Л. С. Палатник, Л. И. Лукашенко, С. Т. Рощенко,
Л. З. Лубяный, Л. Р. Рудицер*

Порошковым методом исследована доменная структура наклонно осажденных «закритических» пленок пермаллоя (угол падения молекулярного пучка на подложку $\alpha < 50^\circ$). При перемагничивании пленок в направлении проекции молекулярного пучка на их плоскость обнаружены особенности перестройки доменной структуры, которые коррелируют с многоступенчатыми петлями гистерезиса. На основании экспериментальных данных сделан вывод, что причиной наблюдаемых закономерностей является отклонение оси легкого намагничивания от нормали к слою.

«Закритические» пленки обладают так называемой перпендикулярной анизотропией, то есть одноосной анизотропией, ось легкого намагничивания (о. л. н.) которой составляет с нормалью к слою угол $\varphi \neq \pi/2$. Процессы перемагничивания зависят от φ : если $\varphi < 45^\circ$, то происходит вращение намагниченности в полосовых доменах; при $\varphi > 45^\circ$ пленки перемагничиваются путем зародышеобразования и смещения междоменных стенок [1]. Наклонно осажденные пленки, полученные при сравнительно небольших углах падения молекулярного пучка, так что $\varphi < 45^\circ$, все же отличаются от нормально осажденных ($\varphi = 0$). При перемагничивании их вдоль проекции молекулярного пучка на плоскость слоя (r -направление) появляются многоступенчатые петли гистерезиса (рис. 1). В перпендикулярном направлении петля имеет обычную форму, свойственную «закритическим» пленкам с $\varphi = 0$.

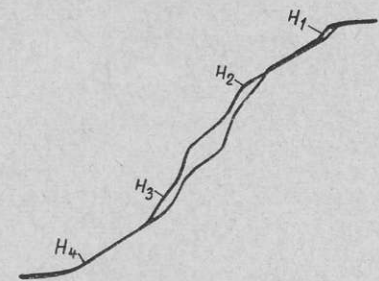


Рис. 1. Петля гистерезиса пленки толщиной 1 мкм, $\varphi \approx 40^\circ$.

Вопрос о природе многоступенчатых петель гистерезиса остается до сих пор открытым. В работе [2] высказано предположение, что указанное явление связано с дополнительной плоскостной анизотропией, о. л. н. которой ориентирована перпендикулярно r -направлению. Нами установлено, однако, что многоступенчатые петли гистерезиса наблюдаются и в том случае, когда о. л. н. параллельна r -оси. Отсюда следует, что ступеньки на кривой перемагничивания могут быть обусловлены и другими причинами, например отклонением о. л. н. от нормали к слою.

Влияние угла φ на доменную структуру (д. с.) представляет интерес с точки зрения теории «закритического» состояния. Известные модели д. с. пленок с перпендикулярной анизотропией предполагают симметричное относительно плоскости слоя распределение намагниченности в соседних доменах. Это оправдано для $\varphi = 0$. Если $\varphi \neq 0$, такая симметрия может нарушиться и привести к изменению процессов перемагничивания.

Целью настоящей работы явилось экспериментальное изучение доменной структуры наклонно осажденных «закритических» пленок пермаллоя ($\varphi < 45^\circ$) при перемагничивании их в r -направлении и установление корреляции между изменениями д.с. и петлями гистерезиса.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Пленки пермаллоя (83% Ni, 17% Fe) получали методом конденсации металла в вакууме 10^{-5} торр на подложки, находящиеся при температуре 300°C . Область толщин пленок составляла $h = 0,35\text{--}2$ мкм, угол падения молекулярного пучка α варьировался в пределах от 25 до 50° . Порошковые фигуры наблюдались на микроскопе МБИ-6. Перемагничивающее поле прикладывалось в r -направлении и изменялось от $+H_s$ до $-H_s$ (H_s — поле насыщения). Для улучшения визуализации порошковых фигур включалось перпендикулярное к пленке поле $\pm H_\perp = 100\text{--}200$ э. Следует напомнить, что суспензия собирается над участками пленки, где направление нормальной компоненты намагниченности совпадает с ориентацией поля \mathbf{H}_\perp . Количество осевших частиц суспензии тем больше, чем выше эта составляющая.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 показаны порошковые фигуры, отражающие различные этапы перемагничивания пленки толщиной 1 мкм, осажденной при $\alpha = 50^\circ$. Предварительно пленка насыщалась полем $+H > H_s$, которое затем принимало последовательный ряд значений: H_1 , H_2 и т. д.

Рис. 2а соответствует $+H_1 = 160$ э. Включено поле $+H_\perp = 200$ э. Значение H_1 совпадает со ступенькой H_1 на петле гистерезиса (см. рис. 1). Как видно, образовались порошковые фигуры в форме отдельных пятен, которые при $+H < 150$ э переходили в систему слабоконтрастных полос.

В поле $+H_2 \approx 30$ э, отвечающем H_2 на кривой перемагничивания, слабоконтрастные полосы на отдельных участках становятся сильноконтрастными, темными (рис. 2б). Существенно, что сильноконтрастные полосы, как и пятна (рис. 2а), выявляются только при определенном направлении перпендикулярного к пленке поля \mathbf{H}_\perp . Оно зависит от ориентации поля предварительного насыщения и положения пленки. В данном случае пленка располагалась таким образом, чтобы сильноконтрастные полосы были видны при $+H_\perp$. В поле $-H_\perp$ сильноконтрастные полосы на порошковых фигурах не обнаруживались (рис. 2в).

Дальнейшее уменьшение перемагничивающего поля приводит к росту числа сильноконтрастных полос и образованию равномерных сильноконтрастных порошковых осадков, которые одинаково хорошо выявляются при $+H_\perp$ или $-H_\perp$.

В отрицательном поле $-H_3 \approx 60$ э (см. H_3 на рис. 1), которое по абсолютной величине больше коэрцитивной силы H_c , на фоне сильноконтрастных осадков возникают светлые, слабоконтрастные полосы, выявляющиеся только в поле $-H_\perp$ (рис. 2г). Постепенно слабоконтрастные полосы заполняют всю пленку, картина порошковых фигур переходит в слабоконтрастную полосовую. Вблизи $-H_s$, когда $H = H_4$ (см. рис. 1), картина порошковых фигур имеет вид пятен, после чего наступает насыщение.

На основании изложенного можно сделать заключение об особенностях доменной структуры наклонно осажденных пленок: 1) на определенных этапах перемагничивания, которые соответствуют ступенькам на петле гистерезиса, образуются магнитные неоднородности (сильноконтрастные или слабоконтрастные полосы на порошковых фигурах); 2) эти неоднородности возникают в полосовых доменах через один,

о чем свидетельствует разный контраст на порошковых фигурах в полях $\pm H_{\perp}$.

На рис. 3 показана схема перемагничивания наклонно осажденной пленки, построенная в согласии с экспериментальными данными, о.л.н. отклонена от нормали к слою на угол φ (штрих-пунктирная линия на рис. 3а).

Предполагается, что при $H \approx H_s$ происходит однородный поворот намагниченности I_s к о.л.н., вектор I_s выходит из плоскости слоя и возникают поверхностные магнитные заряды. Рост магнитостатической

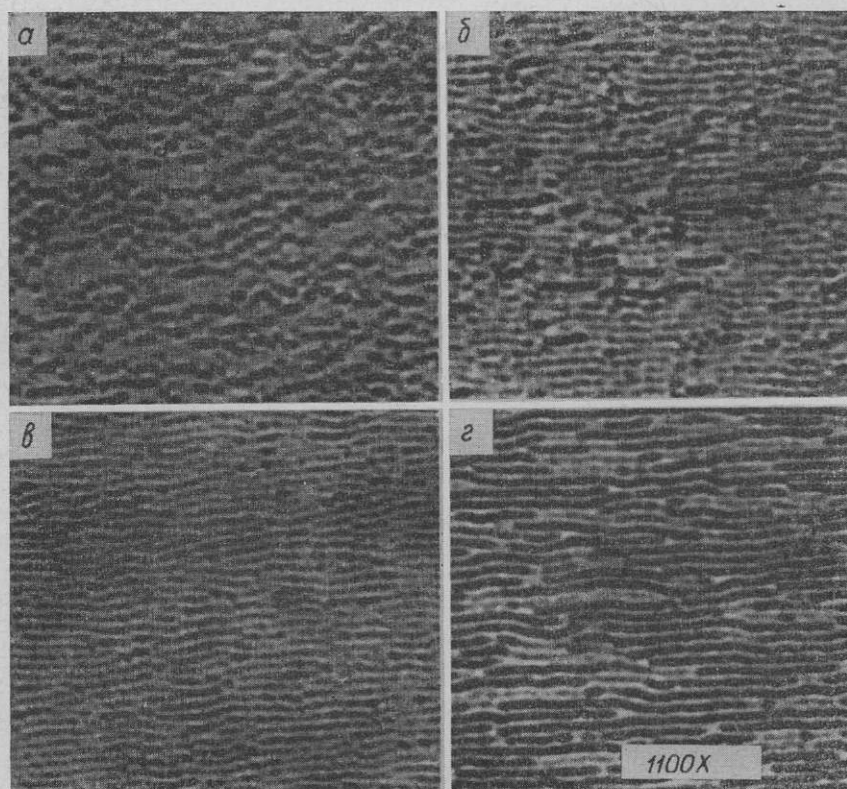


Рис. 2. Порошковые фигуры на пленке толщиной 1 мкм ($\varphi \approx 40^\circ$) при перемагничивании ее вдоль r -направления:

$$\begin{array}{l}
 a - H_1 = +160 \text{ э; } H_{\perp} = +200 \text{ э; } б - H_2 = +30 \text{ э; } H_{\perp} = +200 \text{ э; } в - H_2 = +30 \text{ э; } \\
 H_{\perp} = -200 \text{ э; } г - H_3 = -60 \text{ э; } H_{\perp} = -200 \text{ э.}
 \end{array}$$

энергии полей рассеяния приводит к образованию второй магнитной фазы с противоположным направлением нормальной компоненты намагниченности. По-видимому, эта фаза формируется в виде цилиндрических доменов, несколько вытянутых в направлении поля. На порошковых фигурах выявляются темные пятна (рис. 2а). На рис. 3а стрелками показаны направления намагниченности в обеих фазах: первоначально возникшей фазе А (верхняя часть рисунка) и вновь образованной фазе В (нижняя часть рисунка). Векторы I_s составляют углы θ_1 и θ_2 с нормалью к слою. В общем случае $\theta_1 \neq \theta_2$. Отметим, что поля $\pm H_{\perp}$ выявляют фазы В и А соответственно. В данном случае полем $+H_{\perp}$ выявляется фаза В в виде пятен. Вектор I_s в области В обозна-

чен на рис. За пунктирной стрелкой, поскольку вблизи насыщения методом порошковых фигур нельзя установить $\theta_1 < \theta_2$ или $\theta_1 > \theta_2$.

Неравенство углов θ_1 и θ_2 обусловлено особенностями энергии анизотропии в наклонно осажденных пленках. Мы считаем, что оно в конечном счете является причиной ступенек на петле гистерезиса. Действительно,

$$E_A = K [\sin^2(\theta_1 - \varphi)v_A + \sin^2(\theta_2 + \varphi)v_B], \quad (1)$$

где K — константа анизотропии; v_A и v_B — относительные объемы фаз A и B . Если $\varphi = 0$, то фазы A и B обладают одинаковой энергией анизотропии и $\theta_1 = \theta_2$. При $\varphi \neq 0$ появляется различие в энергиях анизотропии двух фаз. Например, в случае $\theta_2 = \frac{\pi}{2} - \varphi$ для фазы B

она достигает максимального значения; ясно, что такое состояние будет неустойчивым. Расчеты петели гистерезиса при $\theta_1 \neq \theta_2$ и $v_A \neq v_B$ представляют большие трудности. Однако на основании экспериментальных данных можно судить о некоторых закономерностях изменения углов θ_1 и θ_2 в процессе перемангничивания пленки вдоль r -оси.

В промежуточном интервале полей $H_2 < H < H_1$ структура переходит в полосовую, когда контраст порошковых фигур не зависит от направления H_{\perp} . Отсюда можно сделать вывод, что на данном этапе перемангничивания $\theta_1 \cong \theta_2$ (рис. 3б). При H_2 , соответствующем ступеньке H_2 на петле гистерезиса, выявляются сильноконтрастные полосы в поле $+H_{\perp}$. Это означает уменьшение угла θ_2 (рис. 3в), которое осуществляется неоднородно в пределах фазы B и носит зародышевый характер. Фаза же A остается неизменной с одинаковым по всей пленке выходом намагниченности, поэтому в поле $-H_{\perp}$ наблюдается однородная полосовая структура (рис. 2в).

В состоянии остаточной намагниченности ($H = 0$) контраст порошковых фигур одинаковый в полях $\pm H_{\perp}$, следовательно, $\theta_1 \cong \theta_2$ (рис. 3г). Не исключено, что на отдельных участках образца векторы I_s антипараллельны и ориентированы вдоль о.л.н., как это предполагалось в [1].

В отрицательном поле H_3 , большем, чем H_c , на порошковых фигурах появляются отрезки слабоконтрастных полос, которые видны при $-H_{\perp}$, то есть принадлежат фазе A . Этот результат трактуется следу-

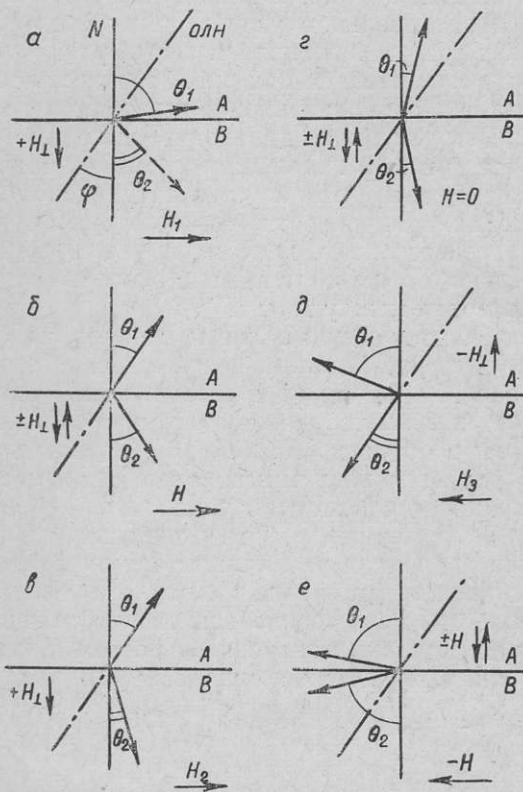


Рис. 3. Схема перемангничивания наклонно осажденной пленки, а—е соответствуют различным полям, обозначенным на рисунке стрелками.

ющим образом (рис. 3д). Векторы I_s на отдельных участках фазы А скачком проходят неустойчивое состояние, соответствующее оси трудного намагничивания, и отклоняются от нормали на угол $\theta_1 > \theta_2$.

В области отрицательных полей, близких к $-H_s$, когда $\theta_1 \gg \varphi$ и $\theta_2 \gg \varphi$, углы θ_1 и θ_2 снова выравниваются (рис. 3е), о чем свидетельствует одинаковый контраст порошковых фигур в полях $\pm H_1$. Из рис. 3а следует, что фаза А оказывается неравновесной: она находится в энергетически невыгодном состоянии по сравнению с насыщением. Поэтому насыщение в пределах фазы А осуществляется в меньших отрицательных полях, чем для фазы В. Это приводит к образованию пятнистых фигур в поле $-H_1$ при $H = H_4$.

Схема перемагничивания на рис. 3 относится к пленке, осажденной при значительном угле падения молекулярного пучка, так что $\varphi \cong 40^\circ$. По мере уменьшения угла φ картина меняется. Сначала исчезает стадия, соответствующая рис. 3а, то есть образованию цилиндрических доменов. Перемагничивание начинается с возникновения полосовой доменной структуры с одинаковым выходом намагниченности из плоскости слоя (рис. 3б). При малых φ в состоянии остаточной намагниченности, по-видимому, реализуется ситуация, близкая к рис. 3б. Распределение же намагниченности, соответствующее рис. 3в, характерно для отрицательного поля. В этом случае ступеньки на петле гистерезиса менее выразительны и смещены в область отрицательных полей (уменьшается интервал между H_2 и H_c).

Из приведенной схемы и формулы (1) следует ожидать, что при $\varphi = 0$ пленка должна перемагничиваться путем однородного разностороннего вращения I_s в соседних полосовых доменах. Однако даже в случае нормально осажденных пленок появляются слабоконтрастные полосы в области $|H| > H_c$ [3]. Это свидетельствует о структурной неоднородности вакуумных конденсатов и обусловленной ею неоднородности процессов перемагничивания.

В настоящей работе исследовались также процессы перемагничивания в пленках различных толщин h от 0,35 до 1 мкм. Угол падения молекулярного пучка на подложку составлял $\alpha \cong 40^\circ$. Обнаружено, что поле H_2 существенно зависит от толщины слоя, сдвигаясь в сторону положительных значений с ростом h , одновременно претерпевает изменения коэрцитивная сила H_c :

h , мкм	0,35	0,40	0,43	0,45	0,55	0,75	0,90
H_2 , э	ступенек	-10,5	-9	-2	0	+2	+2
	нет						
H_c , э	-9	-11	-19	-20	-25	-20	-20

Петли гистерезиса тонких пленок ($h < 0,4$ мкм) не имеют ступенек. По мере увеличения h кривые перемагничивания становятся многоступенчатыми. Аналогичные результаты получаются при электролитическом утонении пленок. В области $h \cong 0,4$ мкм поле $H_2 \cong H_c$, затем появляется разрыв между H_2 и H_c . Для исследованных образцов толщиной ~ 1 мкм $|H_2 - H_c| \cong 20$ э.

Согласно порошковым фигурам, механизм перемагничивания сравнительно толстых пленок ($h \gtrsim 0,5$ мкм) не отличается от описанного выше (см. рис. 2). Тонкие слои ($h \lesssim 0,4$ мкм) перемагничиваются путем зарождения и роста макрообластей обратной намагниченности. Последние состоят из полосовых доменов. По мере роста макрообластей в них формируются магнитные неоднородности (слабоконтрастные полосы). Появление сильноконтрастных полос не обнаружено. По-видимому, отрицательное поле их образования H_2 по абсолютной величине должно

быть больше, чем H_c , поэтому процесс переключения начинается раньше, чем наступает скачкообразное изменение угла θ_2 .

Описанные закономерности не противоречат схеме, изображенной на рис. 3. Действительно, в пленках малых толщин углы θ_1 и θ_2 при данном внешнем поле H больше, чем в толстых слоях. Вследствие этого поле H_2 может соответствовать отрицательному значению, большему, чем коэрцитивная сила смещения границ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, при перемагничивании наклонно осажденных пленок ($\varphi < 45^\circ$) вдоль проекции молекулярного пучка на плоскость слоя наблюдается ряд особенностей по сравнению с нормально осажденными пленками ($\varphi = 0$). Петли гистерезиса имеют многоступенчатый характер независимо от направления оси плоскостной анизотропии. Вращение намагниченности I_s в полосовых доменах через один происходит несинхронно и немонотонно. На определенных этапах перемагничивания, совпадающих со ступеньками на петле гистерезиса, в доменах через один образуются магнитные неоднородности, которые распространяются вдоль полос. На основании полученных экспериментальных данных построена схема перемагничивания пленок. Согласно схеме, многоступенчатые петли гистерезиса объясняются скачкообразными изменениями направления I_s в доменах через один при определенных критических полях, что в свою очередь обусловлено отклонением о.л.н. от нормали к слою.

Харьковский политехнический институт
им. В. И. Ленина

Поступила в редакцию
5 мая 1978 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Палатник Л. С., Лукашенко Л. И., Золотницкий Ю. В. ФММ, 1973, **35**, 78.
2. Natakaуama I., Kato Y. Japan J. Appl. Phys., 1976, **15**, 1389.
3. Палатник Л. С., Лукашенко Л. И., Золотницкий Ю. В., Лубяный Л. З. ФММ, 1977, **44**, 56.