ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ ДВУХСЛОЙНЫХ ОБМЕННОСВЯЗАННЫХ ПЛЕНОК

К. А. ЕГИЯН, В. А. МАМЯН

На основе экспериментального исследования дифферсициальной восприимчивости и петель гистеревиса обменносвязанных двухслойных плевок показано, что процесс перемагничивания этих пленок по ОЛН магнитомягкого слоя происходит в тря стадии. На первой стадии перемагничивается магнитомягкая пленка в соответствии с теоретическими расчетами для случая жесткого захрепления спинов на границе раздела фаз. На второй стадии в процесс перемагничивания (вращения) вовлекаются слон магнитожесткой пленки, находящиеся в контакте с магнитомягкой, и спиралеобравная структура намагниченности распространяется в магнитожесткую пленку на ограниченную глубину. На третьей стадии в полях, преязыпающих коврцативную силу магнитожесткого слоя, перемагничивается его оставшаяся часть.

Интерес к физическим процессам перемагничивания обменносвязанных многослойных систем связан с тем, что многослойные цилиндрические пленки находят успешное практическое применение в запоминающих устройствах с неразрушающим считыванием информации [1]. Несмотря на это физика перемагничивания таких пленок мало изучена [2]. Это, в частности, связано с тем, что цилиндрические магнитные пленки (ЦМП) являются неудобным объектом для исследований. Так, в ЦМП трудно создавать перемагничивающие поля в направлении оси легкого намагничивания (ОЛН) из-за малого диаметра проволоки, хотя отдельные слои многослойных ЦМП имеют коэрцитивную силу (H_c) порядка 50-100 э [3].

В настоящей работе методом дифференциальной восприимчивости (χ) исследовались процессы перемагничивания плоских обменносвязанных двухслойных пленок в большом интервале перемагничивающих полей. Пленки состояли из двух слоев: магнитомягкого железо-никелевого слоя с близкой к нулю магнитоупругой постоянной и магнитожесткого слоя из чистого железа. Железные пленки были изотропными и имели H_c порядка 50 э. Намагниченность железной пленки можно устанавливать в желаемом направлении приложением достаточно больших постоянных полей. Пленки осаждались в едином технологическом цикле без нарушения вакуума при температурах 250 и 80°C соответственно для FeNi- и Fe-слоев.

Измерения $\chi_{\alpha, \beta, \gamma}$ проводились на установке типа описанной в работе [4], где α , β — углы между ОЛН магнитомягкой пленки и направлениями соответственно постоянного поля и пробного переменного поля, а γ — угол между ОЛН магнитомягкой пленки и направлением индикации сигнала. Измерялись два вида восприимчивости: $\chi_{\pi/2, 0, 0}$ и $\chi_{0, \pi/2, \pi/2}$. Частота переменного поля составляла 1000 гц, амплитуда — 0,01 э. Считываемый сигнал после предварительного усиления с помощью узкополосного усилителя У2—6 измерялся цифровым вольтметром ВК—10А/1.

Ниже приводятся результаты исследований характерной двухслойной пленки со следующими параметрами: толщина магнитомягкой пленки — 2350 Å, $H_c = 1,8$, $H_k = 3,0$ э, толщина магнитожесткой пленки — 1000 Å, $H_c = 40$ э. На рис. 1a - i приведены петли гистерезиса этой пленки, снятые индукционным методом, в направлении ОЛН при



Рис. 1. Схематические петли гистерезиса обменносвязанных двухслойных пленок при различных значениях амплитуды перемагинчивающего поля: a - H = 20 э; 6 - H = 25 s; s - H = 41 s; i - H = 80 s; a - H = 65 s; e - H = 80 s.

различных амплитудах перемагничивающего поля, а на рис. 1_д, е — петли гистерезиса той же пленки, снятые магнитооптически с поверхности магнитожесткого слоя.

На рис. 2 приводятся кривые зависимости /о. #/2. #/2 от насыщающих полей. Перед каждым измерением пленка насыщалась в направ-



Рис. 2. Кривые восприимчивости χ_0 , $\pi/2$, $\pi/2$ при различных значениях H_0 : $-H_0 = 0$; $\times -H_0 = 15$ э; $\Box -H_0 = 22$ э; $\bigtriangleup -H_0 = 41$ з; $\bigtriangleup -H_0 = 57$ э; $\blacksquare -H_0 = 62$ s; $\bigcirc -H_0 = 71$ э.

лении ОЛН полем в 200 э, чем задавалось направление намагниченности" магнитожесткой пленки. Потом поле уменьшалось и, начиная с 45 э, по ходу уменьшения поля производились измерения у. Измерения проводились до некоторой определенной отрицательной величины поля (H₀). Этот ход кривой / будем называть прямым ходом. Ход кривой, получаемый при увеличении поля от Но, будем называть обратным ходом. Как видно из рисунка, кривые обратного хода сильно зависят от H₀. При H₀>-20э кривые обратного хода у практически совпадают с кривыми прямого хода. При H₀ < - 20 в кривые прямого хода и обратного хода существенно различаются. Так, уже при H₀=-23э резко падает величина пика /, причем сам пик на кривой обратного хода сдвигается в направлении положительных полей. При $H_0 = -41$ э у очень мало, причем кривая уже не имеет резко выраженного пика. При дальнейшем уменьшении Но пики у обратного хода сдвигаются в область положительных полей, причем при $H_0 = -809$ кривые прямого хода и обратного хода имеют одинаковый вид и расположены симметрично относительно оси ординат.

Кривые X_{0, π/2, π/2} резко меняют свой вид при изменении исходного направления намагниченности магнитожесткого слоя. На рис. 3 приводится соответствующая кривая, которая в отличие от кривых рис. 2



Рис. 3. Экспериментальная кривая восприимчивости X0, к/2, к/2.

снята при следующих условиях: пленка сначала намагничивалась в направлении оси трудного намагничивания (ОТН) постоянным полем в 200 э, затем в направлении ОЛН прикладывалось поле в 20 э и по мере уменьшения этого поля до —20 э производились измерения.

На рис. 4 приводятся результаты измерений $\chi_{\pi/2, 0, 0}$ в зависимости от величины насыщающего поля в направлении ОТН магнитомягкой пленки. Для снятия всех кривых пленка насыщалась в направлении ОЛН магнитомягкой пленки полем в 2009 и затем уже в направлении ОТН прикладывались поля, указанные в подписи к рисунку, и производились измерения. Характерным здесь является постепенный сдвиг пика χ в область отрицательных полей с ростом величины напряженности исходного поля, приложенного по ОТН.

Из рис. 1 и 2 видно, что в интервале перемагничивающих полей до 20 э состояние намагниченности магнитожесткой пленки не меняется. Это позволяет сравнить χ и петли гистерезиса в этом интервале полей с теоретическими расчетами, выполненными для анизотропнойпленки, обменносвязанной с магнитожестким слоем с жестко зафиксированным направлением намагниченности [5—7]. Сравнение показывает хорошее совпадение теоретических и экспериментальных данных. Действительно, как было показано теоретически [5], пленка в направлении ОЛН в полях, меньших 20 э, перемагничивается обратимо. Совпадают с теоретическими и экспериментальные кривые восприимчивости. В работах [6,7] было показано, что поперечная восприимчивость ($\chi_{0, \pi/2, \pi/2}$) анизотропной пленки очень сильно зависит от направления закрепле. ния спинов на границе контакта с магнитожесткой пленкой, т. е. от направления намагниченности магнитожесткого слоя. На рис. 5*a*, *б* приведены теоретические кривые $\chi_{0, \pi/2, \pi/2}$ магнитомягкой пленки толщь-



Рис. 4. Кривые восприничивости $\chi_{\pi/2}$, 0, 0 при разных значениях величины насмщающего поля: 1-H=22 s; 2-H=41 s; 3-H=76 s; 4-H=110 s; 5-H=145 s; 6-H=179 s; 7-H=214 s.





ной 0,2 мкм для двух случаев, когда намагниченность магнитожесткого слоя направлена соответственно по ОЛН и ОТН магнитомягкой пленки. Экспериментальные кривые на рис. 2 и 3 действительно качественно совпадают с теоретическими кривыми, что указывает как на правильность предпосылок теории, так и на возможность относительно стабильного установления намагниченности изотропной железной пленки в двухслойной системе в желаемом направлении в интервале перемагничивающих полей до 20 э.

В полях, превышающих 20 э, характер перемагничивания двухслойной пленки меняется. Резко изменяются кривые обратного хода χ , перемагничивание в направлении ОЛН имеет гистерезисный характер, причем в полях, больших 80 э, петли гистерезиса симметричны, так же, как кривые прямого и обратного хода χ . Сравнение размаха петель гистерезиса контрольных пленок (магнитомягкой и магнитоже.

274

сткой) с размахом петель двухслойной пленки показывает, что в полях, больших 20 э, в перемагничивании начинает участвовать магнитожесткая пленка. Однако вплоть до полей в 80 э сигнал, снимаемый магнитооптически со свободной поверхности магнитожесткой пленки, равен нулю; в поле же в 80э сразу появляется петля гистерезиса (рис. 1*д*, *е*).

Таким образом, вплоть до полей в 80 э перемагничивание магнитожесткой пленки происходит со стороны поверхности, находящейся в контакте с магнитомягкой пленкой, причем этот процесс начинается в полях, меньших, чем коэрцитивная сила магнитожесткой пленки. Это обусловлено действием обменных сил со стороны магнитомягкой пленки на магнитожесткую.

В работах [8, 9] теоретически показано, что при взаимодействии двух анизотропных пленок магнитожесткая пленка под действием обменных сил полностью переключается в полях, много меньших, чем ее критические поля перемагничивания. В нашем случае, действительно, процесс перемагничивания начинается в малых полях, однако полностью пленка переключается в полях, намного превышающих ее коэрцитивную силу. Помимо данных рис. 1 и 2 это хорошо иллюстрируется кривыми рис. 4, где наглядно видно, что существенное изменение кривых 7 продолжается в полях, намного превышающих 100 э.

Вышеуказанное объясняется изменением характера перемагничивания магнитожесткой пленки, находящейся в контакте с магнитомягкой, по сравнению с отдельной пленкой. Перемагничивание отдельной магнитожесткой пленки, как показывают магнитооптические исследования, идет через возникновение и смещение доменных границ, так что Нс этой пленки определяется полем смещения доменных границ. Как это следует из совпадения теоретических и экспериментальных кривых перемагничивания в малых полях в направлении ОЛН, магнитомягкая пленка в двухслойной системе перемагничивается вращением, причем на границе раздела фаз вдоль толщины магнитомягкой пленки возникает характерная спиралеобразная структура распределения намагниченности типа структуры границы Блоха [5]. С ростом перемагничивающего поля в процесс вращения вовлекаются слои магнитожесткой пленки, примыкающие к магнитомягкой, так что с ростом поля все новые слои магнитожесткой пленки начинают принимать участие во вращении. При некотором критическом поле такая структура намагниченности становится нестабильной и происходит скачкообразный переброс намагниченности магнитожесткой пленки по всей ее толщине в новое равновесное положение. При дальнейшем росте поля происходит умень" шение локальных разбросов направлений намагниченности в различных областях и доворот общей намагниченности до направления приложенного поля.

Таким образом, перемагничивание исследованных двухслойных обменносвязанных пленок с ферро-ферромагнитным взаимодействием в направлении ОЛН происходит в три стадии. На первой стадии магнитомягкая пленка перемагничивается в соответствии с теоретическими расчетами для случая жесткого закрепления спинов на границе раздела фаз [5]. На второй стадии в процесс перемагничивания (врацения) вовлекаются слои магнитожесткой пленки, находящиеся в контакте с магнитомягкой, и спиралеобразная структура намагниченности распространяется вглубь магнитожесткой пленки. На третьей стадии намагниченность магнитожесткой пленки скачком перебрасывается в новое равновесное положение. Процесс перемагничивания завершается в полях, превышающих H_c магнитожесткой пленки.

Ереванский государственный университет

Поступила 14. V.1976

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Л. А. Гризорян. Запоминающие устройства на цилиндрических магнитных пленках, Изд. Энергия, М., 1975.
- 2. А. Йелон. Взаимодействия в многослойных пленочных магнитных структурах. Физика тонких пленок, том 6, Изд. Мир, М., 1973.
- 3. А. А. Едизарян и др. Физика магнитных пленок, том 6, Улан-Уде, 1974.
- 4. E. I. Torok, H. N. Oredson. J. Appl. Phys., 33, 10 (1962).
- 5. Ю. Г. Саноян, К. А. Егиян. ФММ, 39, 231 (1974).
- 6. К. А. Егиян, Ю. Г. Саноян. Изв. АН АрмССР, Физика, 9, 410 (1974).
- 7. К. А. Езиян, Ю. Г. Саноян. Магнитные пленки, Изд. Высшая школа, Минск, 1974.
- 8. F. B. Hagedorn. J. Appl. Phys., 41, 2491 (1970).
- 9. I. S. Lin, H. Chang. J. Appl. Phys., 40, 604 (1969).

ԾԱՎԱԼԱՓՈԽԱՆԱԿԱՅԻՆ ՈՒԺԵՐՈՎ ԿԱՊՎԱԾ ԵՐԿՇԵՐՏ ԹԱՂԱՆԹՆԵՐԻ ԴԻՖԵՐԵՆՑԻԱԼ ԹԱՓԱՆՑԵԼԻՈՒԹՅԱՆ ՓՈՐՁՆԱԿԱՆ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆԸ

4. U. 613UL, 4. 2. UUUBUL

Ծավալափոխանակային ուժերով կապված երկշերտ ֆերոմագնիսական Բաղանիների դիֆեթենցիալ Բափանցելիության և հիստերեղիսի օղակների հետաղոտման հիման վրա արված է այն եղրակացությունը, որ այդ Բաղանիների վերամագնիսացումը տեղի է ունենում երեք էտապով։ Առաջին էտապում տեսական հաշվումներին համապատասխան մադնիսանում է փոթր կոերցիտիվությամբ Բաղանթը։ Երկրորդ էտապում երկու Բաղանիների արանքում ըստ հաստության առաջացած Բլոխի սահմանը մտնում է մեծ կոերցիտիվությամբ Բաղանիի մեջ, վերամագնիսացնելով նրա որոշ հաստությամբ շերտ։ Երրորդ էտապում վերամագնիսանում է այդ Բաղանթի մեացած մասը, ընդ որում նրա կոերցիտիվ ուժը գերաղանցող դաշտերի դեպքում։

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF DIFFERENTIAL PERMEABILITY OF TWO-LAYER EXCHANGE-COUPLED FILMS

K. A. EGIYAN, V. A. MAMYAN

Based on the experimental investigation of differential permeability and hysteresis loops of exchange-coupled two-layer films, it was shown that the reversal of films magnetism along the easiest magnetization axis of soft layers is a three stage process. At the first stage the magnetization of the soft layer is reversed in accordance with the calculations for the case of rigid fixation of spins on the phase interface. During the second stage the hard layers contiguous to the soft one are involved in the magnetization reversal (rotation) and the helical configuration of the magnetization extends to limited depths of the hard layer. During the third stage, the magnetition of the rest of the hard layer is reversed in the fields exceeding its coercive force.