

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

УДК 538.681 : 539.21 : 546.7

В. Г. Шадров
(Минск, Беларусь)

МЕЖЗЕРЕННОЕ МАГНИТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ НОСИТЕЛЯХ ЗАПИСИ

На основе исследований кривых остаточной намагниченности, магнитной восприимчивости, угловых зависимостей коэрцитивной силы и потерь на гистерезис, магнитного последствия проводится анализ межзеренного магнитного взаимодействия в тонкопленочных носителях магнитной записи как с плоскостной, так и с вертикальной ориентацией намагниченности. Обсуждается взаимосвязь магнитных параметров с микроструктурой покрытий и характеристиками записи-считывания.

Практическое значение магнитных материалов в современной технике постоянно возрастает, увеличивается их производство, разрабатываются и находят все большее применение новые виды материалов, среди которых в последние годы значительно возрос удельный вес материалов для записи. Так, индустрия, связанная с разработкой и производством сред для магнитной записи, прежде всего тонкопленочных (ТП), будет доминировать, по крайней мере, до начала следующего века [1, 2].

Если технология получения ТП-носителей, общие требования к магнитным параметрам и характеристикам записи-считывания изложены в ряде работ [2—7], то вопросы, касающиеся магнитной структуры, исследования межзеренного магнитного взаимодействия, его влияния на характер перемагничивания и характеристики записи-считывания, изучены недостаточно, хотя и представляют значительный научный и прикладной интерес. Так, имеются работы в области моделирования взаимодействия и прямого наблюдения с помощью электронной микроскопии [8, 9], но исследований, в которых достаточно просто проводится оценка эффекта взаимодействия в реальных пленках, крайне мало. Анализ таких исследований, а именно использование кривых остаточной намагниченности, необратимой восприимчивости, угловых зависимостей гистерезисных параметров, явления магнитной вязкости для оценки магнитного взаимодействия в ТП-средах, и является целью настоящей работы.

В качестве объектов исследования анализируются ТП-носители записи с плоскостной (продольная запись — ПЗ) и перпендикулярной (вертикальная запись — ВЗ) магнитной анизотропией, такие как ионно-плазменные покрытия CoNiCr (ПЗ) [10, 11], CoCr (ВЗ) [12, 13], металл-оксидные гетероструктуры на поверхности алюминия (ВЗ) [14—16], наиболее широко исследованные в качестве сред магнитной записи, а также электрохимические покрытия на основе Co (Co—P , Co—W) [17—19]. Магнитное взаимодействие в данных покрытиях может быть обменным или дипольным в зависимости от степени изолированности зерен, которая изменяется как в процессе получения покрытий, так и при последующей обработке. Причем в зависимости от способа получения пленок формирование микроструктуры связано с процессами сегрегации, адсорбции и т. д. [20]. Так, степень изолированности зерен в покрытиях CoNiCr (вследствие сегрегации Cr) может расти с увеличением толщины подслоя Cr (табл. 1) [11] и изменением условий получения (табл. 2) [12]. В покрытиях Co—Cr для ВЗ таким параметром, определяющим степень

Т а б л и ц а 1
 Параметры покрытий CoNiCr [11]

h_{CoNiCr} , нм	h_{Cr} , нм	H_c , Э	H_r' , Э	H_r , Э	Уровень шума, отн. ед.
26	10	549	428	535	0,074
28	50	829	606	818	0,034
26	100	1406	1260	1423	0,021
30	200	1431	1526	1474	0,021

Т а б л и ц а 2
 Сравнительные характеристики дисков CoNiCr [10]

Предварительный нагрев подложки, °С	Давление Ar при получении подслоя Cr, мТорр	Угол, соответствующий максимуму H_c , $\Omega_{H_{c\max}}$	Максимум $H_c(\Omega)/H_{c\parallel}$	$s = R/R_0$
100	1	75	2,35	2,5
100	7	72	2,0	2,2
0	25	60	1,5	1,7

сегрегации Cr по границам столбчатых зерен, является температура подложки [12]. Магнитные анодированные покрытия представляют собой игольчатые частицы магнитного материала, изолированного немагнитными прослойками (анодным оксидом алюминия) [14].

Среди методов оценки межзеренного магнитного взаимодействия достаточно простым представляется метод анализа кривых остаточной намагниченности, возможность использования которых связана с тем фактом, что данные кривые учитывают только необратимые изменения намагниченности в отличие от петель гистерезиса, содержащих как необратимые, так и обратимые изменения намагниченности. К тому же кривые остаточной намагниченности более тесно связаны с характеристиками записи-считывания [7, 11].

Кривые остаточной намагниченности определяются следующим образом:
 — изотермическая кривая остаточной намагниченности $I_r(H)$ получается после приложения и снятия поля H с первоначально размагниченного образца;
 — кривая остаточного размагничивания на постоянном токе $I_d(H)$ получается последовательным размагничиванием первоначально насыщенного образца. Типичные экспериментальные данные для пленок CoNiCr с плоскостной анизотропией [11] приведены на рис. 1, а (кривые 1, 2), на котором также показано определение двух коэрцитивных параметров H_r и H_r' , соответствующих уравнениям $I_d(H_r) = 0$ и $I_r(H_r') = 1/2I_r(\infty)$. Первая производная остаточной намагниченности дает величину необратимой восприимчивости, которая также может быть использована для анализа магнитного взаимодействия в ТП-средах (рис. 1, б, кривые 3, 4).

В подходе, использующем кривые остаточной намагниченности для изучения магнитного взаимодействия, основным является уравнение Вольфарта [21]:

$$I_d(H) = 1 - 2I_r(H), \quad (1)$$

которое описывает не взаимодействующие однодоменные частицы. Соответственно нелинейность реальной зависимости $I_r(H)$ от $I_d(H)$ выступает как проявление магнитного взаимодействия [22].

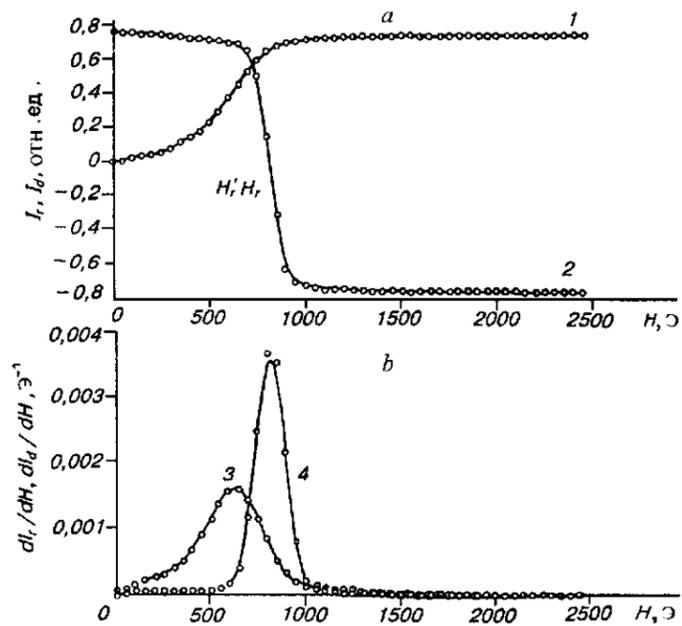


Рис. 1. Кривые: *a* — остаточной намагниченности (1, 2) и *b* — необратимой восприимчивости (3, 4) для пленок CoNiCr:
 1 — $I_r(H)$, 2 — $I_c(H)$, 3 — $dI_r(H)/dH$, 4 — $dI_c(H)/dH$

Более удобной является оценка взаимодействия из модифицированного уравнения (1):

$$\delta I(H) = I_d(H) - (1 - 2I_r(H)).$$

В этом случае положительные значения δI соответствуют взаимодействию, стремящемуся намагнитить образец (обменное взаимодействие), отрицательные — размагнитить (дипольное взаимодействие). Так, приведенные на рис. 2 кривые $\delta I(H)$ для различных толщин подслоя Cr в покрытиях CoNiCr для продольной магнитной записи (см. табл. 1) [11] свидетельствуют о смене обменного взаимодействия дипольным при увеличении степени сегрегации

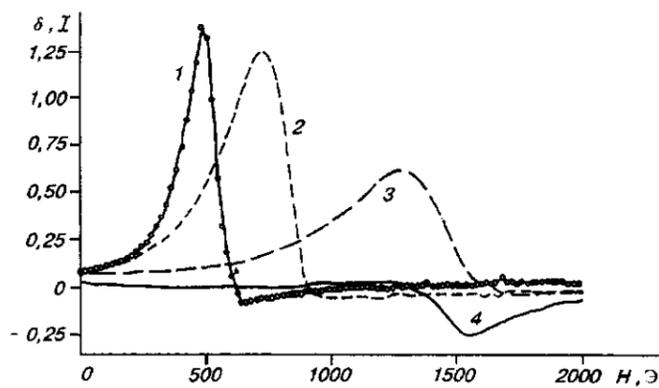


Рис. 2. Кривые δI пленок CoNiCr для подслоев Cr различной толщины:
 1 — 10, 2 — 50, 3 — 100, 4 — 200 нм

зерен, что соответствует увеличению толщины подслоя Сг. В электрохимических пленках СоР с плоскостной анизотропией в зависимости от условий получения взаимодействие также может быть как намагничивающим [17], так и размагничивающим [18], при этом величина последнего мала.

О возможностях метода свидетельствует и изучение многослойных СоРtСг/Сг-структур, обнаружившее тенденцию к смене знака δI с плюса на минус при увеличении числа слоев, что соответствует преобладанию дипольного взаимодействия между слоями над обменным взаимодействием в самих слоях [11]. Однако в данной работе магнитные слои, полученные на подслое Сг и разделительном слое Сг, отличны друг от друга по толщине, т. е. для таких исследований важно иметь сравнимые толщины или увеличивать число слоев для уменьшения эффекта подслоя.

Из уравнения (1) вытекает и возможность использования кривых необратимой магнитной восприимчивости для оценки магнитного взаимодействия — для невзаимодействующей системы зерен обе кривые должны перекрываться и по высоте отличаться в 2 раза. Как видно из рис. 1 (кривые 3, 4), для тонких подслоев Сг (50 нм) преобладает обменное взаимодействие (кривая dI/dH находится левее кривой dI_d/dH). С увеличением толщины подслоя (увеличение степени изолированности зерен) картина меняется на обратную и свидетельствует о дипольной связи зерен, т. е. данные зависимости соответствуют результатам, полученным измерением δI . В силу соответствия пиков зависимостей dI_d/dH и dI/dH величинам H_c и H'_c тип взаимодействия может быть определен из знака фактора взаимодействия $(H_c - H'_c)/H_c$.

Значительная информация о характере магнитного взаимодействия содержится во временной зависимости намагниченности и связанных с явлением магнитной вязкости флуктуационном поле и активационном объеме. Так, временная зависимость $I(t)$ и необратимая восприимчивость связаны с распределением энергетических барьеров. Через связь коэффициента магнитной вязкости $S(H) = dI/dH(H)H_f(H)$ и флуктуационного поля H_f с активационным объемом $H_f(H) = kT/v(H)I_s$ прослеживается связь активационного объема $v(H)$ с магнитным взаимодействием [23, 24]. Это, в частности, отражается в величине и характере изменения $v(H)$ для покрытий СоNiCr [11], которые коррелируют с измерением δI и восприимчивости. При этом покрытия, сформированные на более толстых подслоях Сг, имеют значительно меньший активационный объем, т. е. на них возможна запись с большей плотностью.

Следует отметить работы по моделированию временной зависимости намагниченности в пленках СоСг для вертикальной записи в предположении дипольной связи между столбчатыми зёрнами [23, 25], в которых согласие с экспериментом было получено для диаметров столбиков ~ 7 нм, т. е. много меньших их физического размера (50—100 нм), что может быть объяснено возникновением мод с низкой энергией активации, связанных, в частности, с многодоменной структурой кристаллитов, наличием «хризантемоподобной» микроструктуры [26] и т. д. О существовании кооперативных эффектов свидетельствует изучение переключения отдельных столбиков с помощью аномального эффекта Холла [23], которое показало независимость распределения величины прыжков намагниченности от температуры. Примером такого кооперативного поведения может служить образование магнитных кластеров в толстых пленках СоСг, где центральный столбик с вертикальной ориентацией намагниченности окружен столбиками, в которых намагниченность в плоскости образует вихрь, что приводит к ослаблению взаимодействия [27].

Исследование временной зависимости магнитных металл-оксидных гетероструктур на поверхности алюминия и теоретический расчет по методу среднего поля [23] также показывают, что использование физического объема столбиков плохо согласуется с экспериментом, в то время как величина $0,05v(H)$ дает хорошее соответствие. В данных структурах, которые вследствие своих точно определенных геометрических параметров могут служить модельной системой, следует учитывать возможность появления немагнитной фазы

[28], а также значительное изменение степени магнитного разделения игольчатых частиц в результате термообработки [16].

Касаясь угловых зависимостей гистерезисных параметров (коэрцитивной силы H_c , потерь на гистерезис W_h), выделим работы, непосредственно связанные с анализом магнитного взаимодействия в указанных средах. Это прежде всего исследование тех же ионно-плазменных покрытий CoCr для вертикальной магнитной записи [12, 13], в которых показана связь параметров столбчатой микроструктуры с магнитными характеристиками, в том числе с характером магнитного взаимодействия столбчатых зерен. В частности, в [13] анализируются покрытия с частично сегрегированной столбчатой микроструктурой и полностью сегрегированной и показано, что перемагничивание первых соответствует суперпозиции смещения доменных стенок по нормали и в плоскости покрытий, а вторых — некогерентному вращению намагниченности по нормали, т. е. с увеличением степени сегрегации Cr по границам столбчатых зерен обменное взаимодействие уменьшается. В качестве показателя перемагничивания некогерентным вращением выступает монотонное уменьшение $H_c(\Omega)$ и $w_h(\Omega)$ с увеличением угла отклонения от легкой оси. Изменение степени изолированности столбчатых зерен вследствие увеличения адсорбции продуктов электродных реакций ($\text{Co}(\text{OH})_2$ и т. д.), наблюдаемое в электролитически осажденных пленках Co—W, с увеличением плотности тока осаждения также приводит к аналогичному изменению характера угловых зависимостей коэрцитивной силы и потерь на гистерезис [19, 29].

В работе [10] так же, как и в работе [11], посвященной исследованию покрытий CoNiCr для ПЗ, показано, что с увеличением степени изолированности зерен поведение пленок (по форме кривой $H_c(\Omega)$) все больше приближается к перемагничиванию завихрением (закручиванием) вектора намагниченности. Степень сегрегации хрома менялась условиями напыления (см. табл. 2). Если диск 2 (рис. 3) может перемагничиваться как завихрением, так и смещением доменных границ, то для диска 3 (с большей степенью изолированности (см. табл. 2)) анализ экспериментальной кривой $H_c(\Omega)$ свидетельствует о перемагничивании завихрением с $s = R/R_0 = 1,7$ (более низкое значение s , т. е. больше доля процессов когерентного вращения). Наличие пика на кривой $H_c(\Omega)$ авторы связывают с резким переходом от некогерентного вращения к зарождению доменных границ и их смещению. При больших углах Ω размагничивающие поля растут и образуются домены с обратной намагниченностью. По мере роста количества изолированных зерен увеличивающаяся свободная поверхность способствует повышению плотности таких доменов, что приводит к понижению как ΔH_{max} , так и $H_c(\Omega)/H_{c||}$.

Говоря о магнитном взаимодействии, следует отметить и возможность использования диаграмм Прейзаха [30—32], которые позволяют рассматривать магнитные явления со статистической точки зрения в отличие от феноменологического подхода, основанного на описании остаточной намагниченности, восприимчивости и т. д. Так, диагональ диаграммы Прейзаха является мерой полей переключения, а отклонение от нее — мерой полей взаимодействия [30]. Соответственно узкое распределение в обоих направлениях,

наряду с другими данными, позволило авторам [32] сделать вывод в пользу дискретной магнитной структуры пленок CoCr, т. е. об отсутствии обменного взаимодействия.

Магнитное взаимодействие оказывает значительное влияние на характеристики записи-считывания тонкопленочных носителей, прежде всего, такие, как плот-

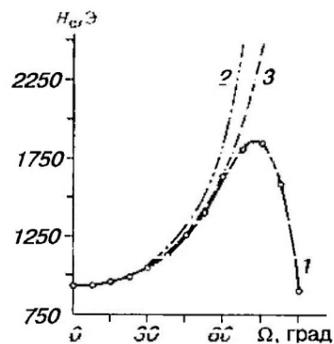


Рис. 3. Угловые зависимости коэрцитивной силы для диска CoNiCr:

1 — экспериментальные результаты, 2, 3 — рассчитанные для смещения доменных границ (2) и закручивания с $s = 2,2$ (3)

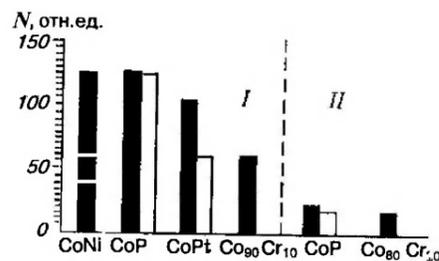


Рис. 4. Схематическое соотношение уровня шумов (N) в двухфазных (II) и однофазных (I) тонкопленочных магнитных средах на основе сплавов Co

ность записи, уровень шумов [7, 33]. Моделирование показывает [8, 17], что межзеренное взаимодействие увеличивает прямоугольность петли гистерезиса, т. е. амплитуду считываемого сигнала, вследствие кооперативного (кластерами) переключения. С другой стороны, сильное обменное взаимодействие между зернами приводит к расширению области перехода намагниченности, сдвигу между битами и т. д., т. е. уменьшает плотность записи и увеличивает уровень шумов (прежде всего, переходного), а именно возникает необходимость компромисса между плотностью записи и уровнем выходного сигнала. Одним из путей достижения этой цели является введение второй немагнитной фазы, изолирующей зерна [2] (рис. 4).

В качестве подтверждения увеличения уровня шумов с ростом обменного взаимодействия выступают взаимосвязь параметров остаточных намагниченности и восприимчивости с уровнем шумов (см. табл. 1) и линейная зависимость градиента δI от уровня шумов [11]. В то же время в работе [34], посвященной исследованию многослойных покрытий Co/Pt для магнитооптической записи, показано, что более сильное обменное взаимодействие между зернами уменьшает уровень шумов вследствие подавления флуктуаций магнитных моментов зерен (поляризационного шума). При этом взаимодействие усиливается за счет совершенства текстуры зерен (уменьшение полуширины кривой качания $\Delta\alpha_{50}$ (табл. 3)) вследствие использования Xe при напылении подслоя SiN. В целом же отметим возможность одновременного анализа магнитного взаимодействия и уровня шумов с помощью кривых остаточной намагниченности, что имеет большое значение для понимания фундаментальных свойств носителей записи.

Таким образом, использование кривых остаточной намагниченности, восприимчивости, угловых зависимостей коэрцитивной силы и потерь на гистерезис позволяет достаточно просто оценить эффект магнитного взаимодействия в реальных тонкопленочных покрытиях для магнитной записи и более тесно увязать магнитные параметры, учитывающие отдельные стороны проте-

Таблица 3
Условия получения и характеристики дисков Co/Pt

Инертный газ		Уровень шумов, дБ	δI_{\max}	$\Delta\alpha_{50}$, град
SiN	Co/Pt			
Ar	Ar	-79,0	0,1	12,6
Xe	Ar	-81,6	0,3	10,5
Ar	Xe	-82,9	1,4	12,4
Xe	Xe	-85,8	1,6	10,3

кающих при записи процессов, с микроструктурой покрытий и параметрами записи-считывания, что играет важную роль в прогнозировании свойств носителей записи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Miura Y. Advances in magnetic disc storage // *J. Magn. Magn. Mater.* 1994. 134. P. 209.
2. Write R. M. The materials aspect of magnetic recording // *J. Magn. Magn. Mater.* 1990. 88. P. 165.
3. Василевский Ю. А. Носители магнитной записи. М.: Искусство, 1989.
4. Карпенков С. X. Тонкопленочные накопители информации. М.: Радио и связь, 1993.
5. *Magnetic Recording* /Ed. C. D. Mee, E. D. Daniel. Vol. 1. Technology. N. Y.: McGraw-Hill Book Company, 1987.
6. Wohlfarth E. P. Magnetic materials for recording // *Phys. Stat. Sol. (a)*. 1985. 91. P. 339.
7. O'Grady K., Chantrell R. W., Sanders I. L. Magnetic characterization of thin film recording media // *IEEE Trans. Magn.* 1993. 29, N 1. P. 286.
8. Hughes G. Status of CoP recording media // *J. Appl. Phys.* 1978. 40. P. 1837.
9. Chen T. The micromagnetic properties of high coercivity metallic thin films and their effects on the limit of packing density in digital recording // *IEEE Trans. Magn.* 1981. 17. P. 1181.
10. Ranjan R., Gau I. S., Amin N. Comparison of angular variation of coercivity in various magnetic media // *J. Magn. Magn. Mater.* 1990. 89. P. 38.
11. Mayo P. I., O'Grady K., Chantrell R. W. et al. Magnetic measurements of interaction effects in CoNiCr and CoPtCr thin film media // *J. Magn. Magn. Mater.* 1991. 95. P. 109.
12. Ouchi K., Iwasaki S. Recent subjects and progresses in research on CoCr perpendicular magnetic recording media // *IEEE Trans. Magn.* 1987. 23, N 5. P. 2443.
13. Lodder J. C., Cheng-Zhang L. I. The influence of the segregated microstructure on the magnetization reversal in CoCr films // *J. Magn. Magn. Mater.* 1988. 74. P. 74.
14. Tsuya N., Tokushima T., Shiraki M. et al. Alumite disk using anodic oxidation // *IEEE Trans. Magn.* 1987. 23, N 5. P. 2245.
15. Daimon H., Kitakami O., Inagoya O., Sakemoto A. Magnetic properties of FeCu and FeP electrodeposited alumite films // *Jap. J. Appl. Phys.* 1991. 30, N 2. P. 282.
16. Shadrov V. G., Boltushkin A. V., Semeshko A. V. et al. Heat-treatment effect on magnetic properties of Co electrodeposited alumite films // *Phys. Stat. Sol. (a)*. 1991. 126. P. k165.
17. Kelly P. E., O'Grady K. O., Mayo P. I., Chantrell R. W. Switching mechanism in cobalt-phosphorus thin films // *IEEE Trans. Magn.* 1989. 25, N 5. P. 3881.
18. McAllon K. T., Platt D., Bissel D. P. et al. High density recording on longitudinal thin film media // *J. Phys. D.* 1991. 24, N 11. P. 2045.
19. Shadrov V. G., Tagirov R. I., Boltushkin A. V., Kozich N. N. On magnetization reversal in hard magnetic Co-W films // *J. Magn. Magn. Mater.* 1993. 118. P. 165.
20. Шадров В. Г., Болтушкин А. В., Тоичицкий Т. А. Электрохимические магнитные покрытия с упорядоченно-неоднородной структурой // *Изв. вузов. Хим. Технол.* 1993. 36, № 9.
21. Wohlfarth E. P. Relations between different modes of acquisition of the remanent magnetization of ferromagnetic particles // *J. Appl. Phys.* 1958. 29, N 3. P. 595.
22. Henkel D. Remsnenzverhalten und wechselwirkungen in hartmagnetischen teilchenkollektinen // *Phys. Stat. Sol.* 1964. 7. P. 919.
23. Chantrell R. W. Magnetic viscosity of recording media // *J. Magn. Magn. Mater.* 1991. 95. P. 365.
24. Chantrell R. W., O'Grady K. Magnetic characterization of recording media // *J. Phys. D.* 1992. 25, N 1. P. 1.
25. Lyberatos A., Chantrell R. W., Hoare A. Calculation of time dependence in thin films // *IEEE Trans. Magn.* 1990. 26, N 1. P. 222.
26. Maedo Y., Asahi M. Segregation in sputtered CoCr films // *IEEE Trans. Magn.* 1987. 23, N 5. P. 2061.
27. Ohkoshi M., Toba H., Honda S., Kusuda T. Electron microscopy of Co-Cr sputtered films // *J. Magn. Magn. Mater.* 1983. 35. P. 266.
28. Ткаченко Т. М., Шадров В. Г., Васильев Э. А. и др. Исследование пленочных металлооксидных гетероструктур на поверхности алюминия с помощью эффекта Мессбауэра // *Автоматрия.* 1993. № 4.

29. Шадров В. Г., Тагиров Р. И., Болтушкин А. В. Угловые зависимости магнитных характеристик и механизм перемангничивания электролитических покрытий с перпендикулярной анизотропией // ФММ. 1992. № 11.
30. Cramer H. A. A moving Preisach vector hysteresis model for magnetic recording media // J. Magn. Mater. 1990. 88. P. 194.
31. Atherton D. L., Szpunar B., Szpunar J. A. A new approach to Preisach diagrams // IEEE Trans. Magn. 1987. 23, N 3. P. 1856.
32. Wuori E. R., Judy J. H. Particle-like magnetic behaviour of rf-sputtered CoCr films // J. Appl. Phys. 1985. 57, N 1. P. 4010.
33. Speliotis D. E. On remanence loops and recording performance // J. Appl. Phys. 1990. 67, N 9. P. 5358.
34. Maesaka A., Bessho K., Hashimoto S. Sources of disk noise on a Co/Pt disk // Jap. J. Appl. Phys. 1993. 32. P. 3160.

Поступила в редакцию 7 февраля 1995 г.

Реклама продукции в нашем журнале — залог Вашего успеха!