

МУЛЬТИСЛОЙНЫЕ ПЛЕНКИ CO/PD С НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИМИ И АМОРФНЫМИ СЛОЯМИ:  
КОЭРЦИТИВНАЯ СИЛА, СЛУЧАЙНАЯ АНИЗОТРОПИЯ И ОБМЕННАЯ СВЯЗЬ

С.В. Комогорцев, Л.А. Чеканова\*

Проведены независимые измерения намагниченности насыщения  $M_s$ , константы обменного взаимодействия  $A$ , поля локальной магнитной анизотропии  $H_a$ , корреляционного радиуса случайной анизотропии  $R_c$  и коэрцитивной силы мультислойных пленок Co/Pd с аморфными и нанокристаллическими слоями. Показано, что изменение коэрцитивной силы пленок Co/Pd обусловлено изменениями характеристик магнитной микроструктуры. Основной причиной изменения характеристик магнитной микроструктуры ферромагнитного корреляционного радиуса  $R_c$  и средней анизотропии магнитного блока  $\langle H_a \rangle$  в мультислойных пленках Co/Pd, как оказалось, является изменение константы обменного взаимодействия  $A$ .

Случайная магнитная анизотропия (СМА) определяет магнитную структуру нанокристаллических и аморфных ферромагнетиков. Эта структура - результат конкуренции упорядочивающего действия обменных сил и случайной анизотропии разрушающей дальний ферромагнитный порядок [1]. В этом случае ферромагнитный порядок реализуется на характерных корреляционных длинах  $R_f = R_c (H_{ex}/D^{1/2}H_a)^2$  ( $H_a$  - поле локальной магнитной анизотропии,  $R_c$  - корреляционный радиус случайной анизотропии,  $H_{ex}$  - обменное поле,  $D$  - симметричный числовой коэффициент, равный 1/15 для одноосной анизотропии), так что магнитная структура таких материалов может быть описана ансамблем слабосвязанных магнитных блоков [1, 2]. Размер блока равен  $2R_f$ , средняя анизотропия в блоке  $\langle H_a \rangle = H_a/N^{1/2} = H_a(R_c/R_f)^{3/2}$ , орт этой анизотропии  $\mathbf{n}$  ориентирован случайным образом. В настоящее время исследователи-магнитологи считают, что именно данная магнитная структура и обуславливает наблюдаемые величины магнитомягких характеристик аморфных и нанокристаллических сплавов [2-4]. Отметим, что анализ поведения  $H_c$  в рамках модели СМА в основном направлен на исследование зависимостей  $H_c$  от размера нанозерна  $H_c(R_c)$  [2-4], т.е. в указанных работах неявно предполагается, что  $K(R_c)$ ,  $A(R_c)$ ,  $M(R_c) = \text{const}$  либо этими зависимостями можно пренебречь. Однако, сегодня имеются все предпосылки для проведения комплексных измерений всех параметров, входящих в теоретические выражения для  $H_c(R_c, H_a, A, M)$ , и выявления соответствующих зависимостей. Так, для изучения СМА и магнитных блоков применяют методы малоугловой дифракции нейтронов [6,7], метод измерения кривых намагничивания в области приближения намагниченности к насыщению [8-10]. Для измерений константы обменной связи широко используют такие методики, как спин-волновой резонанс СВР [11], закон Блоха  $T^{3/2}$  [12].

Результаты предварительного исследования кривых намагничивания  $M(H)$  мультислойных пленок Co/Pd [9] показали, что эти пленки характеризуются двумерной неоднородностью магнитной анизотропии. Так, в диапазоне полей 5 – 25кЭ экспериментальная кривая  $M(H)$  в полях  $H < H_{ex}$  описывается выражением:

$$\frac{\Delta M}{M_s} = \frac{D^{1/2} \cdot \langle H_a \rangle}{H}, \quad (1)$$

соответствующим ферромагнетику с размерностью неоднородности анизотропии  $d=2$ . Из экспериментальной кривой  $M(H)$  с помощью выражения (1) были определены величины  $\langle H_a \rangle$  и  $R_f = (A/D^{1/2} \langle K \rangle)^{1/2}$  ( $\langle K \rangle = M \langle H_a \rangle / 2$ , коэффициент  $D$  выбран равным 1/15 [8]). При этом оказалось, что  $H_c$  прямо коррелирует с  $\langle H_a \rangle$  (рис. 1).

Это означает, что  $\langle H_a \rangle$  в исследованных пленках Co/Pd играет роль эффективной анизотропии, а следовательно, для анализа эффективной анизотропии и коэрцитивной силы применимы теоретические выражения, полученные в рамках модели СМА. Описанный выше способ измерения параметров  $\langle H_a \rangle$  и  $R_f$ , однако, не вскрывает

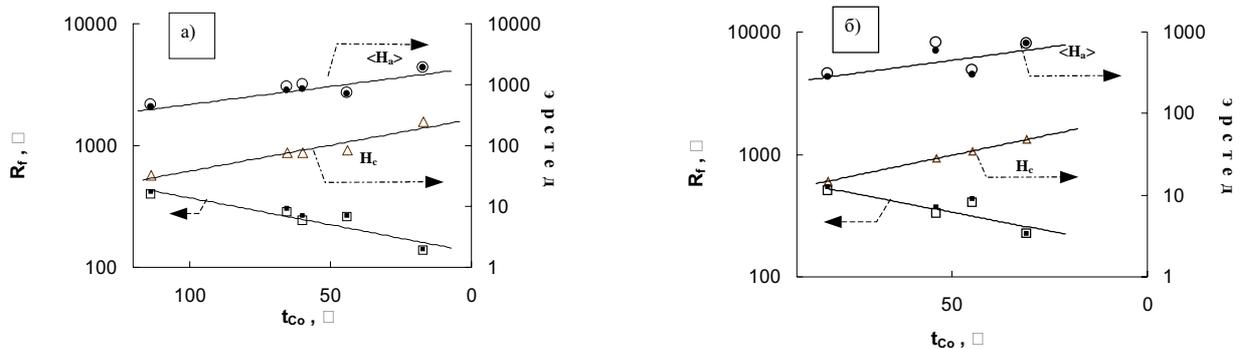


Рис.1. Микромагнитные параметры  $\langle H_a \rangle$ ,  $R_f$  и коэрцитивная сила  $H_c$  мультислойных пленок Co/Pd:  
а)  $[Co_{90}P_{10}(t_{Co})/Pd(14\text{Å})]_{20}$  б)  $[Co_{93}P_7(t_{Co})/Pd(14\text{Å})]_{20}$

взаимосвязи изменений параметров  $\langle H_a \rangle$  и  $R_f$  с изменениями магнитных констант ( $H_a$ ,  $A$ ,  $M$ ) и параметра субмикроструктуры ( $R_c$ ). Теоретические выражения для  $\langle H_a \rangle$  и  $R_f$  аморфного и нанокристаллического ферромагнетика с двумерными неоднородностями таковы [9]:

$$R_f = \frac{2A}{\sqrt{DH_a MR_c}}, \quad (2)$$

$$\langle H_a \rangle = \frac{\sqrt{DH_a^2 MR_c^2}}{2A}. \quad (3)$$

В данной работе мы провели независимые измерения намагниченности насыщения  $M_s$ , константы обменного взаимодействия  $A$ , поля локальной магнитной анизотропии  $H_a$ , корреляционного радиуса анизотропии  $R_c$  и коэрцитивной силы  $H_c$  мультислойных пленок Co/Pd с аморфными и нанокристаллическими слоями. Цель этих измерений – выявить вклад изменения каждого из параметров в изменение величины характеристик магнитной микроструктуры  $R_f$  и  $\langle H_a \rangle$ , а следовательно, и вклад в изменение величины  $H_c$ .

Измерение термомагнитных кривых и кривых намагничивания тонких ферромагнитных пленок проводили с помощью автоматизированного вибрационного магнитометра со сверхпроводящим соленоидом в диапазоне температур 0-200 К и в полях от 0 до 30 кЭ.

Мультислойные пленки Co/Pd получены методом химического осаждения на стеклянные подложки. Исследовали две серии пленок: 1)  $[Co_{93}P_7(t_{Co})/Pd(14\text{\AA})]_{20}$  (где  $t_{Co} = 6\text{\AA}; 30\text{\AA}; 45\text{\AA}; 55\text{\AA}; 80\text{\AA}$ ) ?  $[Co_{90}P_{10}(t_{Co})/Pd(14\text{\AA})]_{20}$  (где  $t_{Co} = 20\text{\AA}; 45\text{\AA}; 60\text{\AA}; 65\text{\AA}; 115\text{\AA}$ ). ?алые добавки фосфора в слоях кобальта мультислойных пленок Co/Pd здесь использовали для получения ферромагнитных слоев в виде метастабильных твердых растворов Co(P) с различной структурой ближнего порядка [13]. Так, в работе [13] установлено, что в слоях Co(P) при концентрациях 5 – 8 ат.% P реализуется гранецентрированная кубическая структура, свыше 9 ат.% P - слои Co находятся в аморфном состоянии.

Зависимость  $M(T)$  мультислойных пленок Co/Pd в интервале температур 50-200 К описывалась уравнением:

$$M_s(T) = M_{s0}(1 - BT^{3/2}). \quad (4)$$

Величины намагниченности  $M_{s0}$  и константы  $A$ , пересчитанной из константы Блоха  $B$  по формуле:

Таблица 1

**Магнитные константы, параметры случайной анизотропии, магнитной микроструктуры и коэрцитивная сила пленок Co/Pd с аморфными и нанокристаллическими слоями**

	$t_{Co}, \text{\AA}$	$A, 10^{-6}$ эрг/см <sup>3</sup>	$M, \text{Гс}$	$H_c, \text{Э}$	$R_c, \text{\AA}$	$D^{1/2}H_a, \text{Э}$	$R_f, \text{\AA}$	$D^{1/2}\langle H_a \rangle,$ Э
$[Co_{93}P_7(t_{Co})/Pd(14\text{\AA})]_{20}$	30	0.37	800	49	21	2	225	182
	45	0.63	870	34	26	1.4	432	77
	55	0.92	885	28	30	2.1	369	153
	80	0.93	914	11	26	1.5	536	71
$[Co_{90}P_{10}(t_{Co})/Pd(14\text{\AA})]_{20}$	20	0.17	483	300	18	3.3	120	480
	45	0.34	720	85	18	2.4	229	180
	60	0.51	916	76	24	2.2	229	214
	65	0.62	913	76	25	2.2	259	202
	115	0.63	888	33	26	1.6	360	110

$$A = \frac{k_B}{8\pi} \left( \frac{g\mu_B}{M_{s0}} \right)^{1/3} \left( \frac{2.612}{B} \right)^{2/3}, \quad (5)$$

приведены в табл. 1.

Для определения параметров  $H_a$  и  $R_c$ , характеризующих ориентационную неоднородность анизотропии, необходимо измерить кривую намагничивания как в полях, меньших обменного поля  $H_{ex}$ , так и в полях, существенно превышающих  $H_{ex}$ , т.е. экспериментально определить две асимптоты  $M(H)$ . Дело в том, что в полях  $H > H_{ex}$  приближение намагниченности к насыщению осуществляется по закону:

$$\frac{\Delta M}{M_S} = \left( \frac{D^{1/2} \cdot H_a}{H} \right)^2, \quad (6)$$

Наблюдая этот асимптотический участок кривой  $M(H)$ , определяют  $D^{1/2}H_a$ . Поле, при котором асимптотический режим, описываемый уравнением (1), переходит к режиму, описываемому уравнением (6) -  $H_{ex} = 2A/MR_c^2$ , используют для определения величины  $R_c$ .

Как было отмечено, для мультислойных пленок Co/Pd величина  $H_{ex} \sim 20-30$ кЭ, что близко к величине максимальных полей, использованных в нашем эксперименте. Таким образом, непосредственное измерение  $H_a$  и  $R_c$  из асимптотических режимов, определяемых выражениями (1) и (6), невозможно. Однако в полях 25-30кЭ наблюдаются некоторые отклонения экспериментальной кривой  $M(H)$  от степенной зависимости ( $M(H) \sim H^{-1}$ ), связанные с началом перехода магнитной системы пленок к режиму, описываемому выражением (6). Это позволило нам применить для определения параметров  $H_a$  и  $R_c$  аппроксимацию участков  $M(H)$  в полях от 5 до 30кЭ теоретической зависимостью, полученной в работе [14] для двумерных неоднородностей. Это аналитическое выражение (закон приближения намагниченности к насыщению) имеет вид:

$$\frac{\Delta M(H)}{M_S} = \frac{DH_a^2}{H \cdot \left( \frac{2A}{MR_c^2} + H \right)}. \quad (7)$$

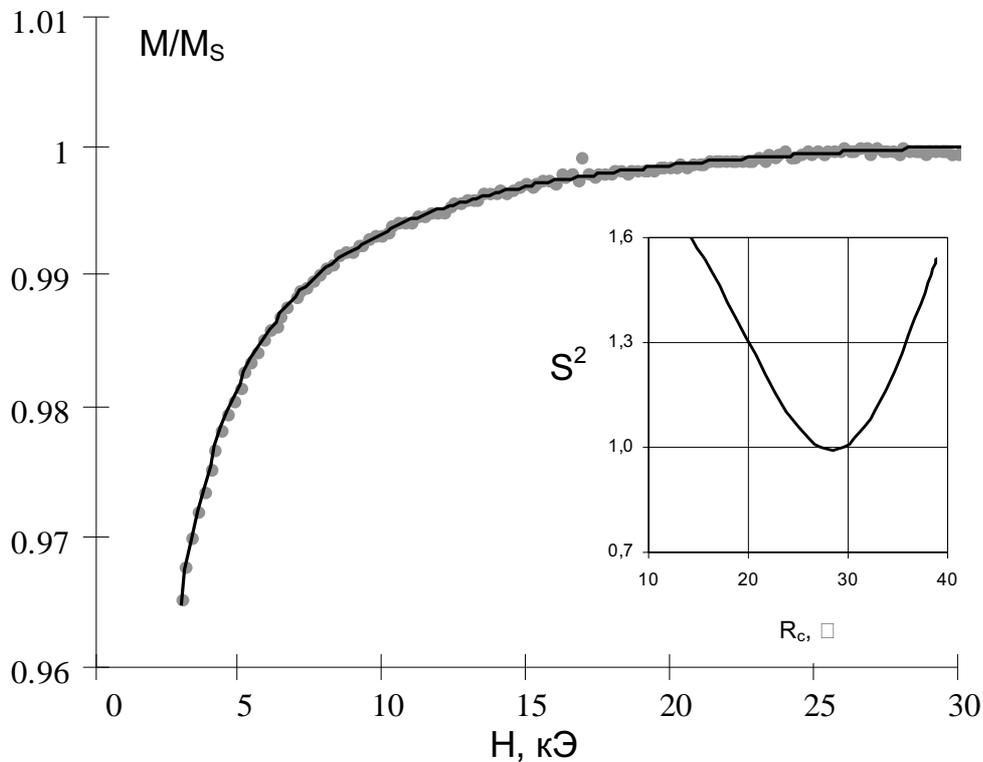


Рис.2. Кривая намагничивания пленки  $[Co_{90}P_{10}(115\text{\AA})/Pd(14\text{\AA})]_{20}$  в области приближения к насыщению аппроксимированная выражением (7) (сплошная линия). На вставке - зависимость  $S^2$  от  $R_c$  для данной кривой  $M(H)$ .

На рис.2 приведена типичная экспериментальная кривая намагничивания, аппроксимированная уравнением (7), на вставке дана зависимость среднего квадрата отклонения  $s^2$  точек экспериментальной кривой  $M(H)$  от выражения (7) в относительных единицах, от величины подгоночного параметра  $R_c$  для пленки  $[Co_{90}P_{10}(115\text{Å})/Pd(14\text{Å})]_{20}$ . Минимум  $s^2$  (в абсолютных единицах) хорошо согласуется со средним квадратом экспериментальной ошибки измерения величины  $M$ . Параметры  $H_a$  и  $R_c$ , соответствующие минимальному  $s^2$  для пленок  $Co/Pd$ , приведены в табл. 1.

Итак, располагая численными величинами  $H_a$ ,  $A$ ,  $M$  и  $R_c$ , мы можем вычислить  $\langle H_a \rangle$  и  $R_f$  из формул (2), (3). Полученные таким образом величины  $\langle H_a \rangle$  и  $R_f$  приведены на рис.1 (малыми темными символами). Очевидно хорошее соответствие величин  $\langle H_a \rangle$  и  $R_f$  полученных непосредственно из уравнения (1) и рассчитанных по формулам (2), (3). Анализ зависимостей  $H_a(t_{Co})$ ,  $R_c(t_{Co})$ ,  $A(t_{Co})$ ,  $M(t_{Co})$  по данным таблицы показывает, что наибольшим значением градиента (изменяется почти в 4 раза) характеризуется обменная константа  $A$ . Таким образом, видно, что причиной изменения характеристик магнитной микроструктуры в мультислойных пленках  $Co/Pd$   $\langle H_a \rangle$  и  $R_f$ , а следовательно и  $H_c$ , является изменение не столько изменение корреляционного радиуса анизотропии  $R_c$  либо размера зерна, сколько изменение основной магнитной константы материала – константы обменного взаимодействия  $A$ , реализующееся при уменьшении толщины индивидуального слоя  $Co$ .

В заключение выражаем глубокую признательность А.Д. Балаеву, Р.С. Исхакову, за совместные исследования и обсуждения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Imry Y., Ma S.-K. Random field Instability of the ordered state of continuous symmetry // Phys. Rev. Lett. – 1975. - V.35, №21, P.1399-1401.
2. Herzer G. Grain size dependence of coercivity and permeability in nanocrystalline ferromagnets // IEEE Trans. On Magn. – 1990. - V.26, №5. - P.1397 - 1402.
3. Muller M., Mattern N. The influence of refractory element additions on the magnetic properties and on the crystallization behavior of nanocrystalline Fe-B-Si-Cu alloys // J.Magn. Magn. Mater. – 1994.-V.136. – P.79-87.
4. Suzuki K., Herzer G., Cadogan J.M. The effect of coherent uniaxial anisotropies on the grain-size dependence of coercivity in nanocrystalline soft magnetic alloys // J.Magn. Magn. Mater. – 1998.-V.177-181. – P.949-950.
5. Murillo N., Gonzalez J. Effect of the annealing conditions and grain size on the soft magnetic character of FeCu(Nb/Ta)SiB nanocrystalline alloys // J.Magn. Magn. Mater. – 2000.-V.218. – P.53-59.
6. Ryne J.J. Effects of random field interactions in amorphous rare earth alloys // IEEE Trans. On Magn. – 1985. - V.MAG-21, P.1990 - 1995.
7. Löffler J.F., Meier J.P., Doudin B., Ansermet J.P., Wagner W. Random and exchange anisotropy in consolidated nanostructured Fe and Ni: Role of grain size and trace oxides on magnetic properties // Phys. Rev. B – 1998. - V.57, №5. - P.2915-2924.
8. Игнатченко В. А., Исхаков Р. С., Попов Г.В. Закон приближения намагниченности к насыщению в аморфных ферромагнетиках // ЖЭТФ.-1982.- Т.82, вып.5. - С.1518-1531.
9. Р.С.Исхаков, С.В. Комогорцев, А.Д. Балаев, Л.А. Чеканова. Размерность системы обменно-связанных зерен и магнитные свойства нанокристаллических и аморфных ферромагнетиков // Письма в ЖЭТФ. -2000.-Т.72, вып.6.- С.440-444.
10. Исхаков Р.С., Комогорцев С.В., Мороз Ж.М., Шалыгина Е.Е. Характеристики магнитной микроструктуры аморфных и нанокристаллических ферромагнетиков со случайной анизотропией: теоретические оценки и эксперимент // Письма в ЖЭТФ. -2000.-Т.72, вып.12.- С.872-878.
11. Исхаков Р.С., Столяр С.В., Чеканова Л.А., Жигалов В.С. // ФТТ. – 2001.-Т.43, вып.6.- С.1071-1075.
12. Исхаков Р.С., Комогорцев С.В., Столяр С.В., Прокофьев Д.Е., Жигалов В.С, Балаев А.Д. // Письма в ЖЭТФ. – 1999. - Т.70, вып.11.- С.727-732.
13. Чеканова Л.А., Исхаков Р.С., Фиш Г.И., Хлебопрос Р.Г., Чистяков Н.С. Фазовый переход аморфное состояние – поликристалл в ферромагнитных  $Co-P$  пленках // Письма в ЖЭТФ. – 1974. - Т.20.- С.73-76.
14. Игнатченко В.А., Исхаков Р.С. Кривая намагничивания ферромагнетиков с анизотропными и низкоммерными неоднородностями // ФММ – 1992.- №6.- С.75-86.