

# Структура и магнитная анизотропия пленок Co/Cu/Co

© Л.А. Чеботкевич, А.В. Огнев, Б.Н. Грудин

Дальневосточный государственный университет,  
690950 Владивосток, Россия

E-mail: lach@phys.dvgu.ru

(Поступила в Редакцию 16 декабря 2003 г.)

Исследовалось поведение энергии магнитной анизотропии поликристаллических ультрадисперсных пленок Co/Cu/Co с изменением толщины медных и кобальтовых слоев. Установлено влияние структурных изменений (размера и распределения дефектов, периода и амплитуды шероховатостей) на компоненты поверхностной и объемной анизотропии. Параметры структурных неоднородностей и их распределение по поверхности пленок определялись с использованием двумерных Фурье-спектров электронно-микроскопических изображений пленок.

Работа поддержана федеральным бюджетом Российской Федерации „Исследование и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники гражданского назначения“ Минпром России (договор № 3-02.ДВГУ в рамках государственного контракта № 40.012.1.1.1151) и бюджетом Минобразования России (грант „Молодые ученые России“).

## 1. Введение

Наноструктурные объекты в последнее десятилетие являются предметом интенсивных исследований, поскольку на них базируется современная нанотехнология. Успехи в этих областях были достигнуты благодаря стремительному совершенствованию технологии получения и исследования микро- и наноструктур. Кроме практического применения многослойные магнитные структуры представляют интерес и как объекты с совершенно новыми магнитными и магниторезистивными свойствами. В настоящее время актуальными являются исследования, направленные на изучение влияния косвенной обменной связи на магнитные свойства многослойных пленок.

В настоящей работе исследуется влияние распределения структурных дефектов и шероховатостей поверхности на компоненты констант магнитной анизотропии Co/Cu/Co пленок.

## 2. Методика эксперимента

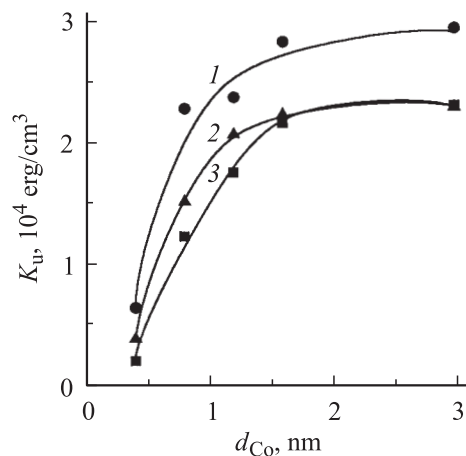
Образцы Co/Cu/Co получали магнетронным распылением на постоянном токе в атмосфере рабочего газа Ar ( $P_{Ar} = 5 \cdot 10^{-3}$  Torr). Пленки осаждали на естественно окисленные монокристаллы (111)Si при комнатной температуре. Толщина слоев контролировалась по времени напыления. Скорость осаждения Co и Cu составляла 0.1 и 0.08 nm/s соответственно. Структура пленок исследовалась методами электронной микроскопии и микродифракции электронов. Все исследуемые пленки — поликристаллические с размером зерна  $\sim 5-6$  nm. Намагниченность измерялась индукционным методом на автоматизированном вибромагнетометре.

Для измерения поля анизотропии использовался метод ферромагнитного резонанса (ФМР). Для определения угловой дисперсии осей анизотропии  $\varphi_a$  ис-

пользовалась методика, предложенная в работе [1], где величина угловой дисперсии осей анизотропии  $\varphi_a$  определялась по углу, в пределах которого не изменяется величина резонансного поля при вращении пленки в ее плоскости.

## 3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Методом ФМР измерялось поле магнитной анизотропии  $H_a = (H_r^{h.a.} - H_r^{e.a.})/2$  пленок. Здесь  $H_r^{h.a.}$  и  $H_r^{e.a.}$  — резонансные поля в направлении оси трудного (ОТН) и легкого намагничивания (ОЛН) соответственно. Зависимость констант магнитной анизотропии ( $K_u = H_a I_{eff}/2$ , где  $I_{eff}$  — намагниченность пленки) осажденных пленок (Co/Cu)<sub>n</sub> от толщины кобальтовых слоев представлена на рис. 1. Значения  $K_u$  рассчитаны



**Рис. 1.** Зависимость константы наведенной магнитной анизотропии  $K_u$  от толщины ферромагнитных слоев Co для пленок Co/Cu( $d_{Cu}$ )/Co: 1 —  $d_{Cu} = 0.7$ , 2 —  $d_{Cu} = 1.0$  и 3 —  $d_{Cu} = 1.6$  nm.

**Таблица 1.** Магнитная анизотропия пленок Co/Cu/Co до и после отжига при  $T_{\text{ann}} = 350^\circ\text{C}$ ,  $t_{\text{ann}} = 30 \text{ min}$ 

$d_{\text{Cu}}$ , nm	$K_v, 10^4 \text{ erg/cm}^3$				$K_s, 10^{-3} \text{ erg/cm}^3$			
	эксперимент		расчет		эксперимент		расчет	
	до отжига	после отжига	до отжига	после отжига	до отжига	после отжига	до отжига	после отжига
0.7	7.1				1.3			
1.0	7.5	2.3	7.3	5.7	5.5	-7.0	5.8	-8.6
1.6	6.9				5.0			

с учетом зависимости намагниченности от толщины ферромагнитных слоев ( $I_{\text{eff}} = f(d_{\text{Co}})$ ) (рис. 2). С увеличением толщины кобальтовых слоев значение константы наведенной магнитной анизотропии возрастает и выходит на насыщение. В образцах с толщиной медной прослойки  $d_{\text{Cu}} = 0.7 \text{ nm}$  величина наведенной магнитной анизотропии максимальна. Вероятно, это связано с наличием большого количества ферромагнитных мостиков в прослойке Cu и, как следствие, локального увеличения толщины слоев Co.

Величину энергии наведенной магнитной анизотропии  $K_{u \text{ eff}}$  можно записать в виде феноменологического выражения [2,3]

$$K_{u \text{ eff}} = K_v + \frac{2K_s}{d_{\text{Co}}},$$

где  $K_v$  и  $K_s$  — объемная и поверхностная компоненты наведенной магнитной анизотропии соответственно.

Компонента  $K_v$  вызвана анизотропным распределением объемных дефектов (границ между зернами, цепочек из межзеренных границ, микропор). Компонента поверхностной магнитной анизотропии  $K_s$  обусловлена морфологией границ раздела (интерфейсов Co/Cu). Коэффициент 2 возникает вследствие того, что каждый ферромагнитный слой имеет две межфазные границы. Если  $K_v$  и  $K_s$  — константы, то согласно феноменологическому закону с увеличением толщины ферромаг-

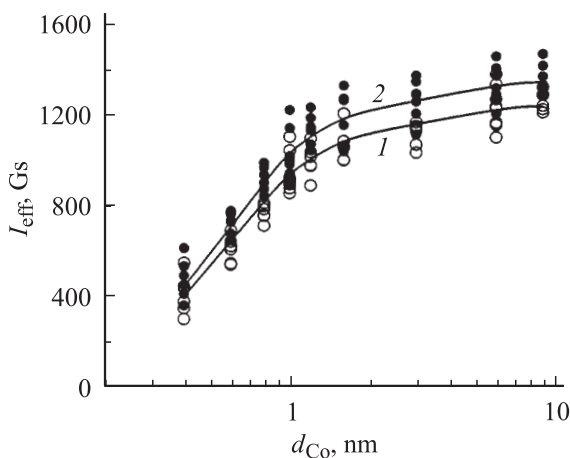
нитных слоев величина  $K_{u \text{ eff}}d_{\text{Co}}$  линейно возрастает. При  $d_{\text{Co}} = -2k_s/K_v$  наблюдается кроссовер ОЛН из плоскости пленки в направлении, перпендикулярное поверхности пленки. Величина поверхностной магнитной анизотропии  $2K_s$  определялась экстраполяцией зависимости  $K_{u \text{ eff}}d_{\text{Co}} = f(d_{\text{Co}})$  к значению  $d_{\text{Co}} = 0$ . На рис. 3, а представлена зависимость  $K_{u \text{ eff}}d_{\text{Co}} = f(d_{\text{Co}})$  для пленок  $(\text{Co/Cu})_n$  с различной толщиной  $d_{\text{Cu}}$ . Значения констант поверхностной анизотропии  $K_s$  приведены в табл. 1.

После отжига при температуре  $350^\circ\text{C}$  в течение 30 min компонента поверхностной анизотропии в пленках Co/Cu/Co меняет знак (рис. 3, б). Это может быть связано с тем, что в отожженных пленках произошла деградация промежуточной прослойки из-за увеличения размера зерен примерно в 6 раз ( $R = 28-30 \text{ nm}$ ) и в немагнитной прослойке образовалось много булавочных отверстий. Между слоями установилась ферромагнитная связь через булавочные отверстия, что позволяет рассматривать такие пленки как однослойные с толщиной, равной суммарной толщине ферромагнитных слоев. Эффективное увеличение толщины Co привело к тому, что вектору намагниченности стало выгодней лежать в плоскости пленки.

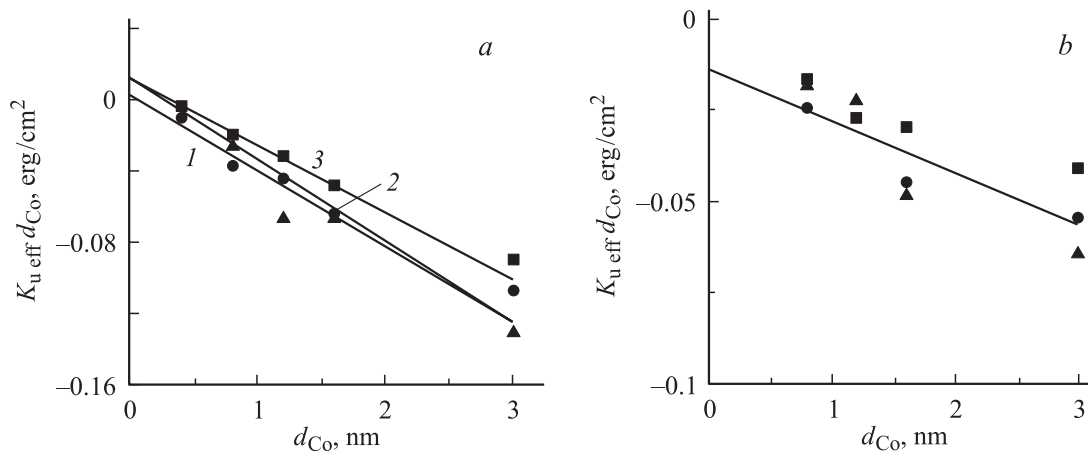
Величина объемной магнитной анизотропии, определенная как тангенс угла наклона кривой  $K_{u \text{ eff}}d_{\text{Co}} = f(d_{\text{Co}})$ , для всех пленок примерно одинакова (табл. 1). В отожженных пленках объемная компонента наведенной магнитной анизотропии уменьшается.

Были проведены оценки поверхностной магнитной анизотропии на основе реальной структуры для исследуемых пленок Co/Cu/Co. Согласно [4,5], поверхностную магнитную анизотропию можно представить в виде  $K_s = K_0 + \Delta K$ , где  $K_0$  — константа поверхностной (граничной) анизотропии для идеальной границы, а  $\Delta K$  — анизотропия, обусловленная шероховатостью границ раздела.

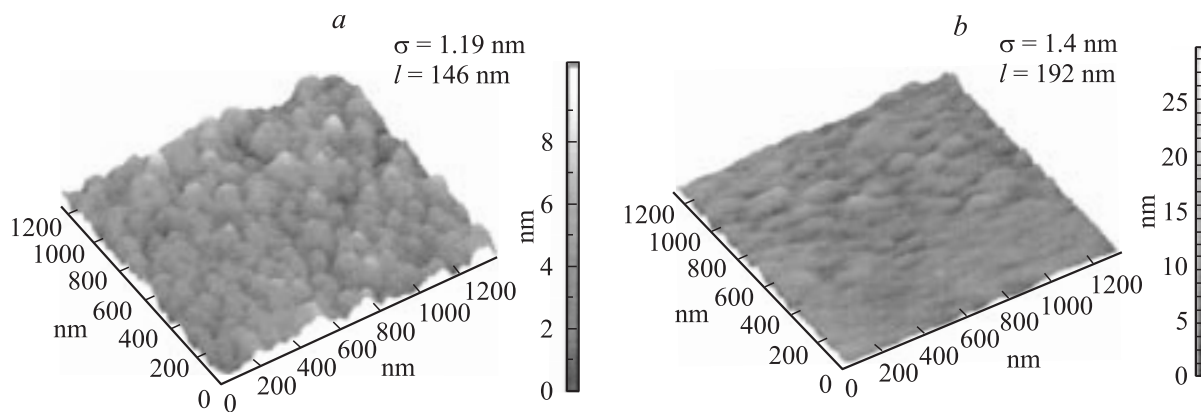
В случае идеальной границы раздела граничная анизотропия в многослойных пленках обусловлена псевдодипольным взаимодействием пар атомов и равна [4]:  $K_0 = 3aNW$ , где  $a$  — постоянная решетки,  $N$  — количество атомов в единице объема,  $W = W_{\text{CoCo}} + W_{\text{CuCu}} - 2W_{\text{CoCu}}$  — энергия псевдодипольного взаимодействия атомов Co-Co, Cu-Cu, Co-Cu соответственно. Константа анизотропии для идеального интерфейса равна  $K_0 = 8.64 \cdot 10^{-2} \text{ erg/cm}^2$ .



**Рис. 2.** Изменение намагниченности пленок Co/Cu/Co при увеличении толщины слоев кобальта. 1 — после осаждения, 2 — после отжига при  $T_{\text{ann}} = 350^\circ\text{C}$  в течение  $t_{\text{ann}} = 30 \text{ min}$ .



**Рис. 3.** Зависимость  $K_u d_{Co}$  от толщины слоев Co. *a* — после осаждения, *b* — после отжига при  $T_{ann} = 350^\circ\text{C}$  в течение  $t_{ann} = 30$  min для пленок Co/Cu( $d_{Cu}$ )/Co. 1 —  $d_{Cu} = 0.7$ , 2 —  $d_{Cu} = 1.0$  и 3 —  $d_{Cu} = 1.6$  nm.



**Рис. 4.** Изображение морфологии поверхности пленки методом АСМ и значения дисперсии амплитуды  $\sigma$  и длины шероховатости  $l$ .

В реальных пленках на величину анизотропии идеального интерфейса оказывают влияние различные причины: шероховатость границ раздела слоев, диффузионное размытие интерфейса, нанокристаллическая структура.

Вклад шероховатостей границ раздела в компоненту поверхностной анизотропии рассчитывался как [4]:  $\Delta K_r = -2K_0(\sigma/\lambda)^2$ , где  $\sigma$  — дисперсия амплитуды шероховатости (отклонение от средней плоскости),  $\lambda$  — период шероховатостей, определяемых из статистически обработанных изображений топографии поверхностей, полученных методом АСМ (рис. 4). Для исследуемых образцов  $\Delta K_r = -1 \cdot 10^{-5}$  erg/cm<sup>2</sup>.

При определении вклада поликристалличности предполагалось, что ориентация кристаллитов равновероятна. Тогда величину поверхностной анизотропии, обусловленную поликристаллической структурой, можно представить в виде [4]:  $\Delta K_p = -0.6K_0 = -5.18 \cdot 10^{-2}$  erg/cm<sup>2</sup>.

В процессе осаждения слоев, а также последующей термической обработки возможно диффузионное размытие границ раздела образца. Величина этой ком-

поненты поверхностной анизотропии имеет вид [4]:  $\Delta K_d = -K_0(1 - a/h_d)$ , где  $a$  — параметр решетки,  $h_d$  — глубина диффузионного размытия межфазной границы. При  $h_d = 1-2$  межатомных расстояния  $\Delta K_d = -2.88 \cdot 10^{-2}$  erg/cm<sup>2</sup>.

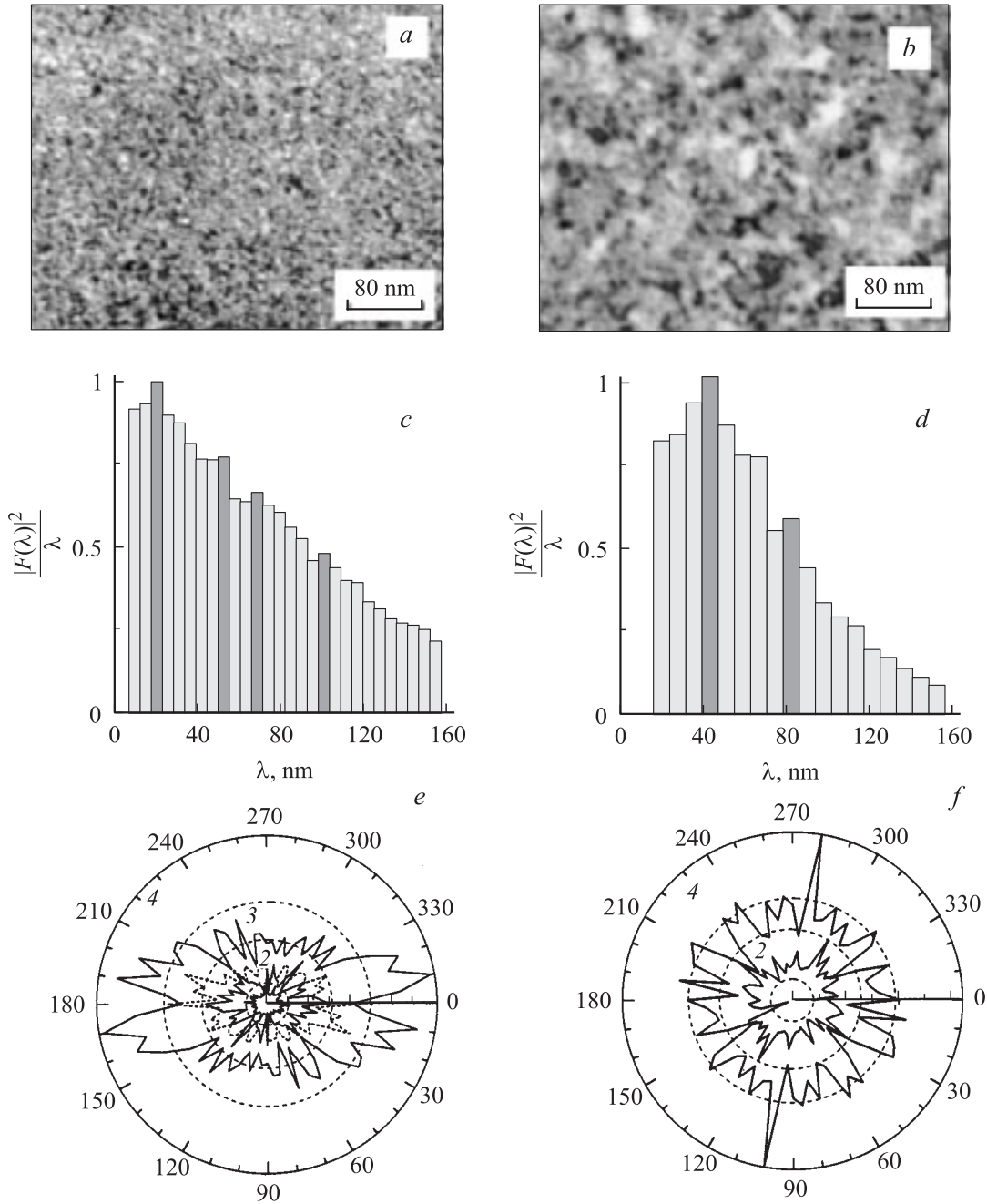
В этом случае компонента поверхностной магнитной анизотропии реальных границ раздела равна  $K_s = 5.8 \cdot 10^{-3}$  erg/cm<sup>2</sup>. Представленный результат согласуется с экспериментально измеренными значениями поверхностной магнитной анизотропии в пленках (Co/Cu)<sub>n</sub> (табл. 1).

После отжига при  $T_{ann} = 350^\circ\text{C}$  в пленках происходит деградация межфазных границ из-за увеличения размера зерен и взаимной диффузии. Если положить, что глубина диффузного размытия межфазной границы  $h_d$  в отожженных пленках соизмерима с шириной межфазной границы, то  $K_s$  меняет знак, что согласуется с экспериментально определенным значением энергии поверхностной анизотропии (табл. 1).

Для оценки объемной компоненты магнитной анизотропии, обусловленной распределением структурных

**Таблица 2.** Параметры распределения структурных неоднородностей по поверхности Co/Cu/Co пленки

Пленки Co/Cu/Co	Частотные диапазоны											
	первый			второй			третий			четвертый		
	$\lambda_1, \text{nm}$	$\gamma_1$	$\theta_1, ^\circ$	$\lambda_2, \text{nm}$	$\gamma_2$	$\theta_2, ^\circ$	$\lambda_3, \text{nm}$	$\gamma_3$	$\theta_3, ^\circ$	$\lambda_4, \text{nm}$	$\gamma_4$	$\theta_4, ^\circ$
До отжига	23.4	1.0	–	54	1.6	0	72	2.6	175	104.5	2.3	170
После отжига				44.0	1.1	120	–	–	–	85.0	1.4	100



**Рис. 5.** *a, b* — электронно-микроскопическое изображение структуры Co/Cu/Co пленки; *c, d* — зависимость интегральной энергии частотных характеристик в кольцевых зонах от длины волны; *e, f* — двумерные Фурье-спектры. *a, c, e* — до отжига, *b, d, f* — после отжига при  $T_{\text{ann}} = 350^\circ\text{C}$  в течение  $t_{\text{ann}} = 30 \text{ min}$ . На частях *e, f* по радиусам отложены периоды неоднородностей  $\lambda$ .

Таблица 3. Размеры структурных неоднородностей

Co/Cu/Co	Частотные диапазоны							
	первый		второй		третий		четвертый	
	$l_1$ , nm	$d_1$ , nm	$l_2$ , nm	$d_2$ , nm	$l_3$ , nm	$d_3$ , nm	$l_4$ , nm	$d_4$ , nm
До отжига	5	1	10	1	20	1	30	1
$T_{\text{ann}} = 350^\circ\text{C}$			74	2			203	2

неоднородностей необходимо знать не только линейные размеры неоднородностей, но и их взаимную ориентацию и распределение по пленке. Электронно-микроскопические изображения пленок визуализируются иерархией структурных неоднородностей. Однако получить количественные оценки распределения дефектов для многослойных структур сложно. Для оценки параметров структурных неоднородностей проводился спектральный Фурье-анализ электронно-микроскопических изображений. Были получены цифровые двумерные спектры Фурье, которые рассчитывались на ЭВМ. Двумерный Фурье-спектр каждого изображения разбивался на 36 кольцевых секторов. В каждом секторе определялась средняя мощность спектральных компонент, характеризующая частотный состав изображения. Затем исследовалась спектральная энергия структурных неоднородностей, входящих в разные частотные диапазоны. Интегральные частотные характеристики для удобства выражены в эквивалентных длинах волн  $\lambda$ . На рис. 5 представлена зависимость интегральной энергии частотных характеристик в кольцевых зонах от длины волны пространственных неоднородностей. Спектральный Фурье-анализ электронно-микроскопических изображений структуры трехслойных пленок показал, что спектр структурных неоднородностей имеет несколько максимумов, т.е. несколько выделенных периодов в распределении неоднородностей. Распределение структурных неоднородностей в пленке оценивалось по энергии спектральных составляющих в радиальных спектрах, в которые входят наблюдаемые локальные максимумы. Полученные двумерные Фурье-спектры позволили определить коэффициент анизотропии распределения  $\gamma$  дефектов по пленке и угол разориентации дефектов  $\theta$ , входящих в разные частотные диапазоны. Параметры структурных неоднородностей приведены в табл. 2. Можно выделить четыре типа неоднородностей (периодов неоднородностей), соответствующих локальным максимумам энергии (табл. 2). После отжига в пленке выявлено всего два локальных максимума (рис. 5).

С учетом параметров структурных неоднородностей пленки до и после отжига были проведены оценки объемной компоненты магнитной анизотропии  $K_v$ , обусловленной структурными дефектами.

Для нахождения результирующей константы магнитной анизотропии определяли поле анизотропии. В осажденных пленках неоднородности, входящие в первый

диапазон, распределены по пленке изотропно ( $\gamma = 1$ ) (рис. 5, e). Изотропно распределенные дефекты (напряжения) не вносят вклада в наведенную магнитную анизотропию. В осажденных пленках присутствует три, а после отжига — две системы анизотропно распределенных дефектов, вносящих вклад в магнитную анизотропию (табл. 2 и рис. 5, e, f). Поле анизотропии, обусловленное объемными дефектами в осажденной пленке, равно

$$H_a^v = \left\{ \begin{aligned} &H_2^2 + H_3^2 + H_4^2 - 2H_2H_3 \cos(\theta_3 - \theta_2) + \\ &+ 2H_4[H_2^2 + H_3^2 - 2H_2H_3 \cos(\theta_3 - \theta_2)]^{1/2} \times \\ &\times \cos(\theta_2 - \theta_4 + \gamma) \end{aligned} \right\}^{1/2},$$

$$\gamma = \arccos \frac{H_3 \cos(\theta_3 - \theta_2) - H_2}{[H_2^2 + H_3^2 - 2H_2H_3 \cos(\theta_3 - \theta_2)]^{1/2}}.$$

Для отожженной пленки

$$H_a^v = [H_2^2 + H_4^2 + 2H_2H_4 \cos(\theta_4 - \theta_2)]^{1/2}.$$

Здесь  $H_i$  — компоненты поля анизотропии, обусловленные неоднородностями  $i$ -го диапазона, которые рассчитывались по формуле

$$H_i = 2(N_b - N_a)(\Delta I)^2 c_i / I_{\text{eff}},$$

где  $N_a, N_b$  — размагничивающие факторы вдоль осей  $a$  и  $b$  дефекта,  $\Delta I$  — скачок намагниченности на границе дефекта,  $c_i$  — концентрация дефектов  $i$ -го типа.  $\Delta I = I_s - I_{\text{def}}$ , так как  $I_{\text{eff}} = I_s V + I_{\text{def}}(1 - V)$ , где  $V$  — объем зерен, то  $\Delta I = (I_s - I_{\text{eff}})/(1 - V)$ , где

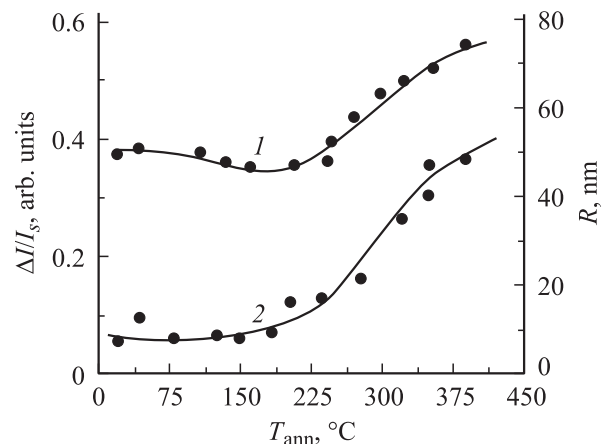


Рис. 6. Зависимость отношения  $\Delta I/I_s$  (1) и размера зерна  $R$  (2) от температуры отжига Co/Cu/Co пленок.

$I_s$  — табличное значение, а  $V$  и  $I_{\text{эф}}$  определены экспериментально (рис. 6). Концентрация дефектов каждого диапазона определялась как  $c_i = S_i/1 \text{ cm}^2$ ,  $S_i = S_0 n_i$ , где  $S_0 = l \cdot d$  — площадь отдельного дефекта  $i$ -го диапазона, а  $n_i = 1/\lambda_i^2$  — плотность дефектов  $i$ -го диапазона. Здесь  $l$  и  $d$  — длина и ширина дефектов  $i$ -го диапазона соответственно (табл. 3). Рассчитанные значения объемных компонент магнитной анизотропии  $K_v = H_a^v I_f / 2$  приведены в табл. 1. Видно хорошее согласие рассчитанных значений с экспериментально измеренными значениями.

#### 4. Заключение

В результате проведенных исследований было установлено следующее.

1) В поликристаллических, мелкодисперсных и многослойных пленках присутствует иерархия структурных неоднородностей, отличающихся размерами, периодами (плотностью) и распределением по поверхности пленок.

2) Термическая обработка сопровождается изменением размеров, периодов и распределения структурных неоднородностей по пленке.

3) Длинноволновые шероховатости поверхности не вносят вклада в поверхностную анизотропию.

4) Деградация немагнитной прослойки сопровождается изменением знака поверхностной магнитной анизотропии в Co/Cu/Co пленках с тонкими ферромагнитными слоями.

5) Оценки компонент энергии поверхностной и объемной анизотропии на основе реальной структуры поликристаллических многослойных пленок согласуются с экспериментально измеренными значениями.

#### Список литературы

- [1] Ю.В. Корнев, Т.В. Бородин. ФММ **55**, 3, 472 (1983).
- [2] M. Kowalewski, C.M. Schneider, B. Heinrich. Phys. Rev. B **47**, 14, 8748 (1993).
- [3] D. Givord, O.F.K. McGrath, C. Meyer, J. Rothman. J. Magn. Mater. **157/158**, 245 (1996).
- [4] Д.Б. Розенштерн, М.Г. Тетельман, А.А. Фраерман. Поверхность **4**, 15 (1993).
- [5] P. Bruno. Phys. Rev. B **39**, 865 (1989).