

# Магнитная анизотропия Co/Cu/Co пленок с косвенной обменной связью

© А.В. Огнев, А.С. Самардак, Ю.Д. Воробьев, Л.А. Чеботкевич

Институт физики и информационных технологий Дальневосточного государственного университета, 690600 Владивосток, Россия

E-mail: lchebot@lemoi.phys.dvgu.ru

(Поступила в Редакцию в окончательном виде 4 ноября 2003 г.)

Исследовано поведение магнитной анизотропии, энергии билинейной и биквадратичной обменной связи и доменной структуры при изотермическом отжиге трехслойных пленок Co/Cu/Co с  $d_{\text{Co}} = 6$  nm и  $d_{\text{Cu}} = 1.0$  и 2.1 nm, полученных магнетронным распылением. Показано, что энергия биквадратичной связи в пленках с  $d_{\text{Cu}} = 1.0$  nm при изотермическом отжиге уменьшается больше чем на порядок, а в пленках с  $d_{\text{Cu}} = 2.1$  nm растет. Установлена связь магнитной анизотропии четвертого порядка с наличием биквадратичной обменной энергии.

Работа поддержана федеральной научно-технической программой „Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники гражданского назначения“ Минпрома России (грант № 3-02/ДВГУ в рамках государственного контракта № 40.012.1.1.1151) и Министерством образования (РД 02-1.2-50).

## 1. Введение

Межслоевая обменная связь между ферромагнитными слоями, разделенными немагнитными прослойками, играет ключевую роль в понимании многих свойств, наблюдаемых в многослойных пленках. Так, изменение характера полевой зависимости магнитосопротивления (или кривых намагниченности) при вращении пленки вокруг нормали к плоскости пленки совместно с энергией косвенной обменной связи между ферромагнитными слоями позволяет судить о порядке магнитной анизотропии многослойных пленок [1]. Любая многослойная структура, в которой оси легкого намагничивания неколлинеарны и направление намагниченности изменяется от слоя к слою, обладает анизотропией высокого порядка. В двух обменно-связанных пленках с одинаковой толщиной, намагниченностью и анизотропией оси легкого намагничивания которых взаимно перпендикулярны, в слабых магнитных полях выявляется двухосная анизотропия, равная  $K_u/2E_b$ ,  $E_b$  — энергия связи [2]. В сильных магнитных полях анизотропия уменьшается пропорционально  $1/H$ , и система постепенно становится изотропной. В полях  $H \rightarrow 0$  проявляется двухосная и четырехосная анизотропия, которая мала при большой энергии связи между ферромагнитными слоями и в больших полях она убывает как  $1/H^3$  [3,4].

В настоящей работе исследуется поведение биквадратичной обменной связи, магнитной анизотропии и доменной структуры при изотермическом отжиге и влияние энергии биквадратичной связи на магнитную анизотропию.

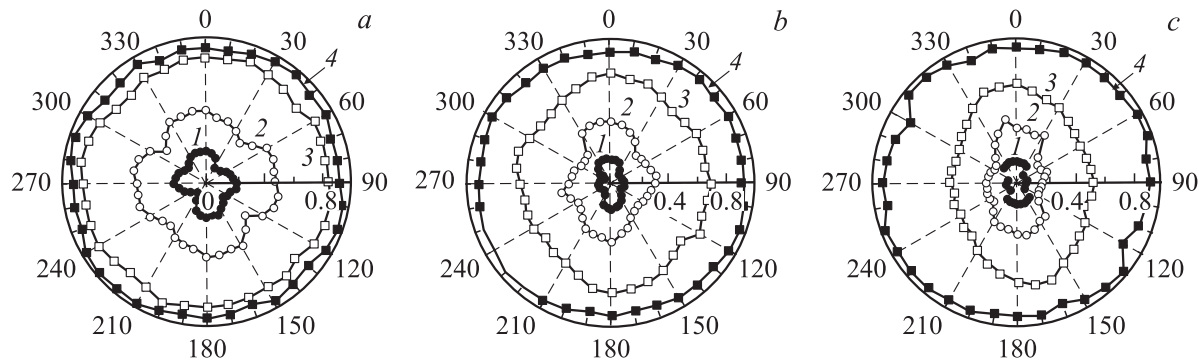
## 2. Методика эксперимента

Образцы Co/Cu/Co получали магнетронным распылением на постоянном токе в атмосфере рабочего газа Ar ( $P_{\text{Ar}} = 5 \times 10^{-3}$  Torr). Пленки осаждали на монокри-

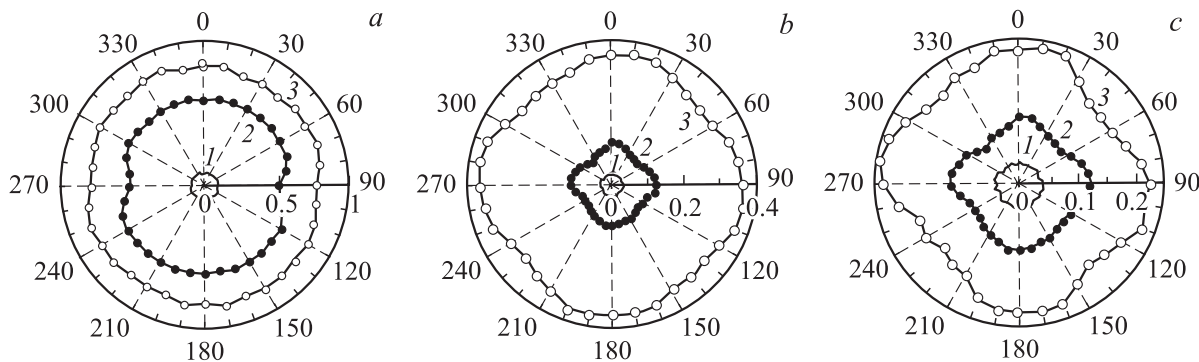
сталлы (111)Si при комнатной температуре. Толщина слоев контролировалась по времени напыления. Скорость осаждения Co и Cu составляла 0.1 и 0.08 nm/s соответственно. Исследовались пленки Co/Cu/Co с толщиной слоев Co,  $d_{\text{Co}} = 6$  nm, а толщина медной прослойки составляла  $d_{\text{Cu}} = 1.0$  и 2.1 nm. Структура пленок исследовалась методами электронной микроскопии и дифракции электронов. Магнитосопротивление измерялось четырехточечным компенсационным методом в диапазоне магнитных полей от 0 до 10 kOe, петли магнитного гистерезиса снимались на автоматизированном вибромагнитометре. Изотермический отжиг пленок проводился при  $T_{\text{ann}} = 250^\circ\text{C}$  в вакууме  $10^{-5}$  Torr.

## 3. Результаты и их обсуждение

Электронно-микроскопические изображения показали, что все исследуемые пленки являются поликристаллическими с размером зерен  $\sim 5$  nm. Магнитная анизотропия трехслойных пленок исследовалась по кривым намагничивания, полученным в едином цикле при вращении пленки вокруг нормали к плоскости пленки с шагом  $10^\circ$ . На рис. 1 представлены полярные диаграммы  $M/M_s = f(H, \varphi)$  трехслойной пленки с  $d_{\text{Cu}} = 1.0$  nm (1-й антиферромагнитный (АФМ) максимум) для некоторых фиксированных значений магнитного поля. Видно, что в магнитных полях  $H = 100$  и 250 Oe в осажденной пленке намагниченность достигает максимального значения во всех направлениях. В полях  $H = 20$  и 60 Oe на кривых  $M(H, \varphi)$  присутствуют четыре максимума, что свидетельствует о наличии в пленке двухосной анизотропии. Вид полярных диаграмм в полях  $H = 100$  и 250 Oe не изменяется при изотермическом отжиге ( $T_{\text{ann}} = 250^\circ\text{C}$ ). Однако диаграммы, полученные в полях  $H = 20$  и 60 Oe, существенно изменяются с отжигом. После 30-минутного отжига два максимума на диаграм-



**Рис. 1.** Полярные диаграммы относительной намагниченности ( $M/M_s$ ) пленки Co/Cu(1 nm)/Co: 1 —  $H = 20$ , 2 — 60, 3 — 100, 4 — 250 Oe; а —  $t_{\text{ann}} = 0$ , б — 30, с — 230 min.



**Рис. 2.** Полярные диаграммы относительной намагниченности ( $M/M_s$ ) пленки Co/Cu(2.1 nm)/Co: 1 —  $H = 50$ , 2 — 100 и 3 — 150 Oe; а —  $t_{\text{ann}} = 0$ , б — 30, с — 230 min.

ме уменьшаются, и полярная диаграмма начинает приобретать вид вытянутого лепестка. Увеличение времени отжига до 230 min приводит к более четко выраженной форме лепестка, что свидетельствует о реализации в плоскости пленки одноосной магнитной анизотропии.

Полярные диаграммы относительной намагниченности пленки Co/(2.1 nm)Cu/Co (2-й АФМ максимум) после осаждения и после отжига приведены на рис. 2. В поле 150 Oe полярная диаграмма осажденной пленки изотропна. Однако диаграмма, снятая в поле 100 Oe (кривая 2), показывает неярко выраженную анизотропию высокого порядка. На кривых  $M/M_s = f(H, \varphi)$ , полученных в полях  $H = 100$  и 150 Oe, после 30 min изотермического отжига четко выявляются четыре максимума, что свидетельствует о формировании в плоскости пленки магнитной анизотропии четвертого порядка, которая усиливается после отжига продолжительностью  $t_{\text{ann}} = 80$  min.

Параметры билинейной  $J_1$  и биквадратичной  $J_2$  обменной связи определялись методом подгонки теоретических кривых намагничивания к экспериментальным кривым. Оказалось, что в исследуемых пленках после осаждения между слоями Co существует и билинейная, и биквадратичная связь (см. таблицу). В пленке с  $d_{\text{Cu}} = 1.0$  nm при увеличении времени отжига энергия билинейной связи возрастает и при  $t_{\text{ann}} = 80$  min выходит на насыщение. Энергия биквадратичной связи с

увеличением времени отжига постепенно уменьшается и после 230 min отжига, когда пленка становится одноосной,  $J_2 = -0.003$  erg/cm<sup>2</sup>.

Энергии билинейной и биквадратичной обменной связи в пленке с  $d_{\text{Cu}} = 2.1$  nm после изотермического

Магниторезистивное отношение и энергии билинейной и биквадратичной связи изотермически отожженных пленок Co/Cu/Co

$d_{\text{Cu}}$ , nm	$t_{\text{ann}}$ , min	$-J_1$ , erg/cm <sup>2</sup>	$-J_2$ , erg/cm <sup>2</sup>	$H_s$ , Oe	$K_u^{(2)}, 10^3$ erg/cm <sup>3</sup>	$K_u^{(1)}, 10^3$ erg/cm <sup>3</sup>	$\Delta\rho/\rho$ , %
1.0	0	0.05	0.017	550	60	10	1.4
	30	0.14	0.005	750	30	60	3.3
	80	0.14	0.04	790	25	110	3.4
	230	0.135	0.03	760	20	105	3.3
2.1	0	0.04	0.018	450	60	30	1.2
	30	0.075	0.043	570	70	25	2.2
	80	0.082	0.042	620	80	24	2.4
	230	0.085	0.04	630	85	22	2.4

Примечание.  $K_u^{(1)}$  и  $K_u^{(2)}$  — константы магнитной анизотропии второго и четвертого порядков соответственно, определенные методом подгонки теоретических кривых относительной намагниченности  $\frac{M}{M_s} = f(H)$  и магниторезистивного отношения  $\frac{\Delta\rho}{\rho} = f(H)$  к экспериментальным.

отжига увеличились в 2.1 и 2.2 раза соответственно (см. таблицу). Рост энергии биквадратичной связи привел к явно выраженной анизотропии четвертого порядка.

Таким образом, пленки, в которых между слоями Co существует биквадратичная связь, являются двухосными, а пленки, в которых  $J_2 \rightarrow 0$  — одноосными. Очевидно, косвенная обменная связь наводит в верхнем слое Co двухосную анизотропию во время конденсации (или последующем изотермическом отжиге), так как условия роста нижнего и верхнего слоев различны. Одноосная анизотропия нижнего слоя Co наводится полем магнетрона. В верхнем слое Co анизотропия наводится магнитостатическим полем нижнего слоя и полем косвенного обменного взаимодействия нижнего слоя с растущим верхним слоем Co через промежуточный слой Cu.

Отжиг приводит к росту эффективной косвенной обменной связи между ферромагнитными слоями  $H_s = 2|J_{\text{эф}}|/M_s d_{\text{Co}}$ ,  $J_{\text{эф}} = J_1 + 2J_2$  [4],  $M_s$  — намагниченность насыщения (см. таблицу) и росту магнитосопротивления в обеих пленках, но соотношение между билинейной и биквадратичной компонентами связи после отжига зависит от толщины прослойки Cu. Как видно из рис. 1 и 2, изотермический отжиг пленки Co/(2.1 nm)Cu/Co приводит к увеличению энергии биквадратичной обменной связи и более ярко выраженной анизотропии четвертого порядка, в то время как в пленке Co/(1.0 nm)Cu/Co энергия биквадратичной обменной связи уменьшается на порядок ( $J_2 \rightarrow 0$ ) и пленка становится одноосной.

В настоящее время предложено несколько источников биквадратичной связи между ферромагнитными слоями в многослойных пленках. Это модель флуктуаций билинейной связи [5], модель „свободного спина“, обусловленная наличием атомов примеси в немагнитной прослойке либо ферромагнитных атомов на межфазной границе [6,7], и магнитно-дипольный механизм, обусловленный шероховатостями поверхности раздела [7]. В случае мелкозернистых поликристаллических трехслойных пленок, по всей видимости, реализуются два последних механизма. Наличие в пленках биквадратичной косвенной обменной связи между ферромагнитными слоями может приводить к неколлинеарному магнитному порядку только при условии  $J_2 < -|J_1|/2$  [8]. Для наших пленок с  $d_{\text{Cu}} = 1$  и 2.1 nm, отожженных при  $T_{\text{анн}} = 250^\circ\text{C}$ , выполняется условие  $J_1 - 2J_2 < 0$ ;  $J_1 < 0$ . Это свидетельствует о том, что равновесному состоянию при  $H = 0$  соответствует антиферромагнитное упорядочение магнитных моментов в смежных слоях Co.

Различное поведение биквадратичной связи при изотермическом отжиге пленок с  $d_{\text{Cu}} = 1$  и 2.1 nm, возможно, связано с „примесным“ механизмом биквадратичной связи. Отжиг пленок при  $T_{\text{анн}} = 250^\circ\text{C}$  сопровождается увеличением размеров зерен (до 10 nm) и диффузией атомов примеси к местам стоков, которыми в поликристаллических пленках являются межзеренные границы. Можно предположить, что в пленках с более тонкой

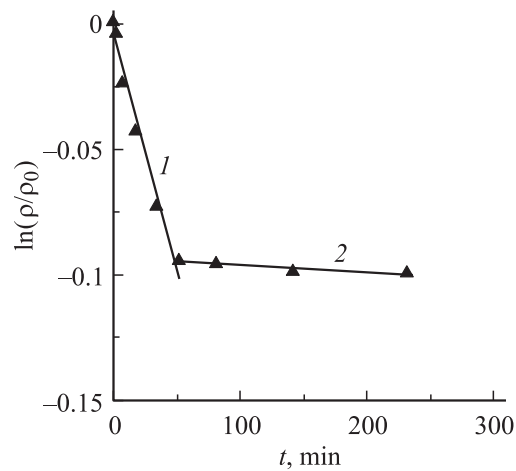
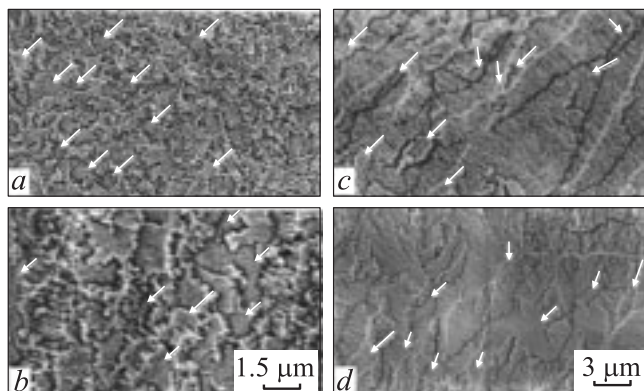


Рис. 3. Зависимость логарифма относительного электросопротивления от времени отжига в многослойной пленке Co/Cu.

прослойкой атомы примеси при данной температуре изотермического отжига быстрее уходят из прослойки, в результате чего в пленке с  $d_{\text{Cu}} = 1$  nm наблюдается быстрое уменьшение отношения  $J_2/J_1$ . Это подтверждают и рассчитанные значения коэффициента диффузии  $D$ . В некотором приближении для многослойных структур [9,10] коэффициент диффузии можно определить из соотношения  $D = -(\Lambda^2/8\pi^2) \cdot d \ln(\rho_t/\rho_0)/dt$ , где  $\rho_0$  — исходное удельное электросопротивление,  $\rho_t$  — удельное сопротивление после изотермического отжига в течение времени  $t$ ,  $\Lambda = d_{\text{Co}} + d_{\text{Cu}}$ . Для этого была найдена зависимость логарифма относительного электросопротивления от времени отжига (рис. 3). Поведение зависимости  $\ln(\rho_t/\rho_0) = f(t)$  свидетельствует о том, что в многослойных пленках Co/Cu в зависимости от времени изотермического отжига наблюдаются две скорости диффузии. На участке 1 скорость диффузии равна  $D_1 = 7 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2/\text{s}$ , а на участке 2  $D_2 = 0.2 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2/\text{s}$ . Процессы релаксации характеризуются энергией активации  $Q = 0.15 \text{ eV}$ , что типично для отжига точечных дефектов и снятия внутренних напряжений.

Доменная структура пленок с  $d_{\text{Cu}} = 1$  и 2.1 nm исследовалась методом лоренцевой микроскопии для возможности одновременно наблюдать домены, доменные стенки и рябь намагниченности. Изображения доменной структуры показали, что в пленках реализуется частично антиферромагнитная, частично ферромагнитная связь (рис. 4). Рис. 4 показывает, что в пленках присутствуют связанные неелевские границы. Стенки Нееля в верхнем и нижнем слоях Co смещены друг относительно друга. На фотографиях АФМ области показаны стрелками. Видно, что изменение магнитной анизотропии в результате отжига сопровождается перестройкой доменной структуры. В осажденной пленке с  $d_{\text{Cu}} = 1$  nm (рис. 4, а), в которой полярная диаграмма выявляет двухосную анизотропию, доменная структура сложная: в расположении доменных стенок отсутствует какая-либо геометрическая регулярность, есть участки, где доменные стенки



**Рис. 4.** Изображение доменной структуры пленок Co/Cu/Co: *a, b* —  $d_{Cu} = 1$ , *c, d* — 2.1 nm; *a, c* — после осаждения, *b, d* — после отжига. Стрелки указывают области, в которых слои Co связаны антиферромагнитно.

замкнуты, размеры доменов малы ( $\sim 0.43 \mu\text{m}$ ). Такая доменная структура характерна для пленок с сильной косвенной обменной связью между ферромагнитными слоями. На изображении доменной структуры отожженной пленки (рис. 4, *b*) сохраняется сложная доменная структура. Однако размеры доменов увеличились почти в 2 раза (средний размер домена  $\sim 0.83 \mu\text{m}$ ), доменные стенки стали более протяженными.

В пленке с  $d_{Cu} = 2.1 \text{ nm}$  (полярная диаграмма показывает анизотропию высокого порядка) доменная структура более крупная (средний размер доменов  $\sim 3 \mu\text{m}$ ), доменные границы более протяженные (рис. 4, *c*). Вид доменной структуры указывает на то, что в пленке имеется слабое преимущественное направление намагниченности. В пленке присутствуют области с АФМ и с ФМ связью между слоями Co. После отжига в пленке наблюдается ярко выраженная двухосная анизотропия (рис. 2, *b*) и доменная структура изменяется: доменные стенки теряют геометрическую ориентацию, становятся более „закрученными“, а средний размер доменов уменьшается до  $1.8 \mu\text{m}$  (рис. 4, *d*).

#### 4. Заключение

Исследования мелкозернистых, поликристаллических трехслойных Co/Cu/Co пленок показали, что магнитная анизотропия четвертого порядка обусловлена наличием биквадратичной обменной связи между ферромагнитными слоями Co; поведение энергий билинейной и биквадратичной обменной связи между слоями Co при изотермическом, низкотемпературном отжиге зависит от толщины немагнитной прослойки. В пленках с магнитной анизотропией четвертого порядка реализуется сложная доменная структура, в которой в расположении доменных стенок отсутствует какая-либо геометрическая регулярность, доменные стенки замкнуты, размеры доменов малы.

#### Список литературы

- [1] V.V. Ustinov, M.A. Milyaev, L.N. Romashev, T.P. Krinitsina, E.A. Kravtsov. *J. Magn. Magn. Mater.* **226-230**, 1811 (2001).
- [2] А. Йелон. В кн.: *Физика тонких пленок* / Под ред. М.Х. Франкомба, Р.У. Гофмана. Мир, М. (1973). С. 392.
- [3] A. Yelon. *J. Appl. Phys.* **35**, 770 (1964).
- [4] C.H. Marrows, B.J. Hickey, M. Herrmann, S. McVitie, J.N. Chapman, M. Ormston, A.K. Petford-Long, N.P.A. Hase, B.K. Tanner. *Phys. Rev. B* **61**, 4131 (2000).
- [5] J.C. Slonczewski. *Phys. Rev. Lett.* **67**, 3172 (1991).
- [6] J.C. Slonczewski. *J. Magn. Magn. Mater.* **150**, 13 (1995).
- [7] S.O. Demokritov, E. Tsybal, P. Grunberg, W. Zinn, I.K. Schuller. *Phys. Rev. B* **49**, 720 (1994).
- [8] V.V. Ustinov, N.G. Bebenin, L.N. Romashev, V.I. Minin, M.A. Milyaev, A.R. Del, A.V. Semerikov. *Phys. Rev. B* **54**, 21, 1 (1996).
- [9] P.M. Levy. *J. Appl. Phys.* **67**, 10, 5914 (1990).
- [10] А.В. Болтушкин, В.М. Федосюк, О.И. Касютин. *ФММ* **75**, 6, 58 (1993).