

## МАГНИТОРЕЗИСТИВНЫЕ СВОЙСТВА МНОГОСЛОЙНЫХ НАНОРАЗМЕРНЫХ ПЛЕНОЧНЫХ СИСТЕМ

*О.В. Сынашенко, Е.П. Ткач, И.П. Бурык, Л.В. Однодворец,  
С.И. Проценко, Н.И. Шумакова*

*Сумской государственный университет, Сумы, Украина*

*E-mail: protsenko@aph.sumdu.edu.ua*

Проведены исследования магнитосопротивления многослойных наноразмерных пленочных систем на основе Fe и Cu, Cr или Pd в зависимости от величины индукции внешнего магнитного поля и концентрации атомов Fe. Полученные результаты объяснены с точки зрения структурно-фазового состояния: в системе Fe/Cu в большой мере сохраняется индивидуальность отдельных слоев с возможным размытием интерфейсов, а в системе Fe/Cr стабилизируется гранулированное состояние атомов Fe в матрице твердого раствора (Fe, Cr) или образуется твердый раствор (Pd, Fe), в котором происходит образование интерметаллидов FePd с ГЦК- или ГЦТ-решеткой. Исследован магнитодеформационный эффект в одно- и двуслойных пленках, которые выступают компонентами многослойных систем.

### ВВЕДЕНИЕ

Известно, что явление гигантского магнитного сопротивления (ГМС) наблюдается в низкоразмерных магнито неоднородных пленочных материалах (многослойные пленки, мультислой, гранулированные сплавы), в которых происходит спин-зависящее рассеяние электронов на антипараллельно ориентированных магнитных моментах доменов в разделенных немагнитным слоем соседних ферромагнитных слоях или магнитных моментах гранул, образовавшихся в решетке твердого раствора из атомов магнитной и немагнитной компонент. В последние годы большое внимание уделяется исследованию физики магнитных явлений в таких материалах.

Среди многих исследуемых многослойных структур пленочные системы на основе фрагментов Fe/Cu, Fe/Cr и Fe/Pd остаются в поле постоянного интереса благодаря их широкому применению в современной электронике, в магнитных сенсорах, головках считывания в жестких дисках и других устройствах.

Многие авторы считают, что на магнитные свойства мультислойных систем оказывает влияние ряд факторов: состояние интерфейсов (шероховатость), фазообразование вблизи интерфейсов, толщина немагнитных прослоек, структурно-фазовое состояние пленочной системы в целом. Анализ полученных ранее результатов [1, 2] позволяет сделать вывод о том, что структурно-фазовое состояние пленочных систем на основе Fe и Cu или Fe и Cr как в неотожженном, так и в отожженном состояниях соответствует системе  $[\text{Fe}/\text{Cu}]_n/\text{П}$  (П – подложка, n – количество фрагментов), в которой в большей степени сохраняется индивидуальность отдельных слоев, но, возможно, с промежуточным слоем твердого раствора (т.р.) или гранулированным т.р. (Fe, Cr) по всей толщине образца. Таким образом, исследуемые нами пленочные системы являются представителями двух противоположных тенденций с точки зрения диффузионного взаимодействия: крайне ограниченная взаимная растворимость ато-

мов Fe и Cu или неограниченная растворимость в случае атомов Fe и Cr.

Пленочные системы на основе Fe и Pd с разной толщиной парамагнитных и ферромагнитных слоев – это чрезвычайно интересные объекты для изучения магнитооптических свойств и создания носителей информации с высокой плотностью магнитной записи, элементов спиновой электроники и оптоэлектронных систем. Анализ физических свойств сплавов или многослойных пленок указывает на то, что Pd, будучи парамагнитным элементом, в присутствии ферромагнетика (например, атомов Fe) также становится ферромагнитным. Это обуславливается рядом факторов, в частности увеличением параметра ГЦК-решетки Pd на 5...10%; дальнедействующим обменным взаимодействием с ионами Fe, Ni или Co, в результате чего у атомов Pd возникает наведенный магнитный момент, который определяет вклад атомов Pd в магнитооптические свойства [3]. Согласно [4] металлы Fe и Pd имеют неограниченную растворимость в жидком состоянии. При охлаждении сплав кристаллизуется с образованием ГЦК-т.р. (Pd, Fe), в котором в твердом состоянии происходит фазовый переход, связанный с полиморфными переходами  $\beta\text{-Fe} \rightarrow \gamma\text{-Fe}$  с образованием интерметаллидов FePd с решеткой типа AuCu ( $a = 0,3860 \dots 0,3855$  нм и  $c = 0,3730 \dots 0,3720$  нм) и FePd с ГЦК-решеткой типа AuCu<sub>3</sub> ( $a = 0,3853 \dots 0,3848$  нм). Фаза FePd в неупорядоченном состоянии имеет ГЦК-решетку, как и т.р., а при упорядочивании – ГЦТ-решетку ( $L1_0$ ), которая аналогичная интерметаллическим фазам  $L1_0$  FePt, CoPt и MnAl. Отметим, что несмотря на значительную разницу параметров a и c в ГЦТ решетке, фазы ГЦК – FePd и  $L1_0$  имеют различные магнитные характеристики. Исследования последних лет (см., например, [5, 6]) указывают на наличие в тетрагональной фазе FePd перпендикулярной магнитной анизотропии вдоль оси c. Указанное свойство позволит создавать материалы с поперечным к плоскости образца магнитным моментом, а, следовательно, является

перспективным при решении задач увеличения поверхностной плотности магнитной записи.

С точки зрения практического использования магнитных свойств пленочных материалов большой интерес представляет исследование электрофизических свойств, в частности коэффициента тензочувствительности (см., например [7]), в магнитном поле (так называемый магнитодеформационный эффект).

Таким образом, целью нашей работы явилось исследование магниторезистивных свойства двух типов пленочных систем – с продольной (Fe/Cu и Fe/Cr) и поперечной магнитной анизотропией (Pd/Fe). Кроме того, был изучен магнитодеформационный эффект в одно- и двуслойных пленках, которые выступают компонентами многослойных систем.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Пленочные системы были получены методом термического испарения и последовательного осаждения слоев без ориентирующего магнитного поля в высоком вакууме ( $p = 10^{-4}$  Па). В качестве подложки использовался аморфный ситалл. Толщина отдельных слоев контролировалась *in situ*-методом кварцевого резонатора, который обеспечивал точность 10 %. Многослойные пленочные системы формировались чередованием ферромагнитного (Fe) / немагнитного (Cu, Cr) слоев, количество таких фрагментов составляло 3...9. Отжиг образцов проводился в температурном интервале 300...800 К. Измерения магнитосопротивления проводились при комнатной температуре с использованием 2-контактной схемы в изменяемом от 0 до 0,1 Тл внешнем магнитном поле. Использовалась геометрия, когда ток пропускается в плоскости образца, а индукция внешнего магнитного поля ( $B$ ) имеет две ориентации - параллельную и перпендикулярную плоскости образца. Величина магнитосопротивления (МС) определялась как  $\Delta R/R_S = (R(B) - R_S)/R_S$ , где  $R(B)$  и  $R_S$  – сопротивление при заданном поле и поле насыщения.

Для измерения (рис. 1) коэффициента продольной тензочувствительности (КТ)  $\gamma_l$  для однослойных пленок Fe, Co, Ni использовалась подложка из текстолита – материала, который соответствует одним из следующих условий: не разрушается при нагревании в вакууме, не вступает в химическое взаимодействие с пленкой и имеет высокое значение упругости. Один из концов подложки жестко фиксировался, другой – соединялся с подвижным штоком микровинта. Для создания магнитного поля  $B = 0,1$  Тл использовался электромагнит на постоянном токе. Измерение электрического сопротивление осуществлялось в двух геометриях при перпендикулярной к току ориентации магнитного поля (в плоскости или перпендикулярно плоскости пленки).

### МАГНИТОРЕЗИСТИВНЫЕ СВОЙСТВА

Результаты исследования магнитосопротивления и среднего магнитного коэффициента сопротивления ( $\bar{\beta}_B$ ), полученные для многослойных систем на

основе Fe/Cu и Fe/Cr, сведены в табл. 1 и 2 и для отдельных систем представлены на рис. 2 и 3.

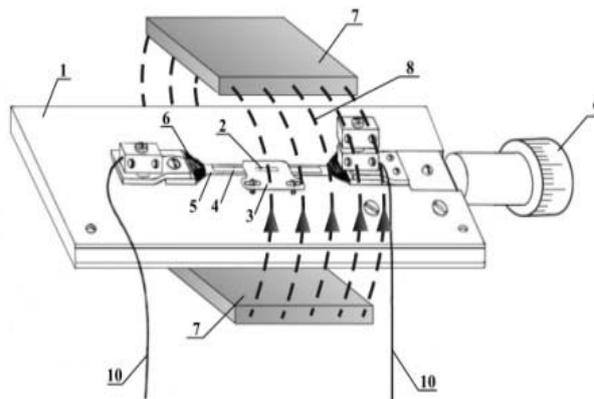


Рис. 1. Схема устройства для измерения КТ в поперечном магнитном поле: 1 – монтажный столик; 2 – исследуемый образец; 3 – маска; 4 – токопроводящие дорожки; 5 – деформируемая подложка; 6 – зажим для подложки; 7 – электромагнит; 8 – линии магнитной индукции; 9 – микровинт; 10 – токоподводящие провода

Отметим, что  $\bar{\beta}_B$  определяется по соотношению  $\bar{\beta}_B = R^{-1} \cdot \Delta R / \Delta B$  по всему интервалу величины индукции в отличие от мгновенного магнитного коэффициента сопротивления  $\beta_{BM} = R_i^{-1} \cdot dR_i / dB_i$ , который определяется на узком интервале  $dB_i$ .

Необходимо отметить, что в случае системы Fe/Cu значения МС в параллельной геометрии больше по сравнению с перпендикулярной, в то время как в системе Fe/Cr наблюдается обратная закономерность. После отжига значения МС уменьшаются в случае Fe/Cu и увеличиваются в случае Fe/Cr для обеих геометрий, что можно объяснить размытием интерфейсов в первом случае и укрупнением гранул Fe в матрице т.р.

Зависимость величины МС от концентрации атомов Fe в случае обеих пленочных систем имеет одинаковый характер (в качестве примера на рис. 4 показана зависимость для системы Fe/Cr). Максимум при  $c_{Fe} = 75$  ат.%, как для свежеконденсированных, так и для отожженных образцов мы объясняем процессом укрупнения гранул Fe в матрице т.р. (Fe, Cr). В случае системы Fe/Cu как в свежеконденсированных, так и в отожженных образцах аналогичный максимум наблюдается при  $c_{Fe} = 65$  ат.%, что соответствует наибольшему количеству фрагментов и толщине немагнитной прослойки  $d_{Cu} = 1,5$  нм, при которой наблюдается максимум на осцилляционной зависимости [8] для системы Fe/Cu.

На рис. 5 приведены зависимости сопротивления и МС от индукции магнитного поля для пленочных систем на основе Fe и Pd, фазовый состав которых соответствует т.р. (Pd, Fe). При переходе к пленочным системам, имеющим ГЦК- или ГЦТ-FePd-фазы, мы получили аналогичные результаты, что можно объяснить частичным упорядочением т.р. (Pd, Fe) в процессе конденсации и магнитных измерений.

Таблица 1

Значения МС и  $\bar{\beta}_B$  для многослойных пленочных систем на основе Fe/Cu

Образец	с <sub>Fe</sub> , ат.%	геометрия				⊥ геометрия			
		без отжига		отжиг до 800 К		без отжига		отжиг до 800 К	
		МС, %	$\bar{\beta}_B$ , Тл <sup>-1</sup>	МС, %	$\bar{\beta}_B$ , Тл <sup>-1</sup>	МС, %	$\bar{\beta}_B$ , Тл <sup>-1</sup>	МС, %	$\bar{\beta}_B$ , Тл <sup>-1</sup>
Fe(2,5)/[Cu(1,5)/Fe(2,5)] <sub>3</sub> /Π	68,9	0,50	-8,3	0,36	-6,0	0,40	-6,7	0,33	-5,5
Fe(2,5)/[Cu(1,5)/Fe(2,5)] <sub>5</sub>	66,7	0,58	-9,7	0,40	-6,7	0,44	-7,3	0,38	-6,3
Fe(2,5)/[Cu(1,5)/Fe(2,5)] <sub>7</sub>	65,6	0,66	-11,0	0,43	-7,2	0,47	-7,8	0,41	-6,8
Fe(2,5)/[Cu(1,5)/Fe(2,5)] <sub>9</sub>	64,9	0,74	-12,3	0,47	-7,8	0,52	-8,7	0,43	-7,2
Fe(2,5)/[Cu(2)/Fe(2,5)] <sub>3</sub>	62,5	0,09	-1,5	0,06	-1,0	0,07	-1,2	0,05	-0,8
Fe(2,5)/[Cu(2)/Fe(2,5)] <sub>7</sub>	58,8	0,12	-2,0	0,10	-1,7	0,11	-1,8	0,07	-1,2
Fe(2,5)/[Cu(2,5)/Fe(2,5)] <sub>3</sub>	57,1	0,24	-4,0	-	-	0,18	-3,0	-	-
Fe(2,5)/[Cu(2,5)/Fe(2,5)] <sub>7</sub>	53,3	0,26	-4,3	0,18	-3,0	0,21	-3,5	0,15	-2,5

Таблица 2

Значения МС и  $\bar{\beta}_B$  для многослойных пленочных систем на основе Fe/Cr

Образец	с <sub>Fe</sub> , ат.%	геометрия				⊥ геометрия			
		без отжига		отжиг до 800 К		без отжига		отжиг до 800 К	
		МС, %	$\bar{\beta}_B$ , Тл <sup>-1</sup>	МС, %	$\bar{\beta}_B$ , Тл <sup>-1</sup>	МС, %	$\bar{\beta}_B$ , Тл <sup>-1</sup>	МС, %	$\bar{\beta}_B$ , Тл <sup>-1</sup>
Fe(2,5)/[Cr(1)/Fe(2,5)] <sub>3</sub> /Π	77,3	0,35	-5,8	0,41	-6,8	0,42	-7,0	0,49	-8,2
Fe(2,5)/[Cr(1)/Fe(2,5)] <sub>7</sub>	74,5	0,40	-6,7	0,47	-7,8	0,46	-7,7	0,53	-8,8
Fe(2,5)/[Cr(1,5)/Fe(2,5)] <sub>3</sub>	69,4	0,12	-2,0	0,48	-8,0	0,04	-0,7	0,10	-1,7
Fe(2,5)/[Cr(1,5)/Fe(2,5)] <sub>7</sub>	66,1	0,13	-2,2	0,15	-2,5	0,08	-1,3	0,11	-1,8
Fe(2,5)/[Cr(2,5)/Fe(2,5)] <sub>3</sub>	57,7	0,16	-2,7	-	-	0,21	-3,5	-	-
Fe(2,5)/[Cr(2,5)/Fe(2,5)] <sub>7</sub>	53,9	0,17	-2,8	-	-	0,25	-4,2	-	-
Fe(2,5)/[Cr(3)/Fe(2,5)] <sub>7</sub>	49,3	0,11	-1,8	0,13	-2,2	0,12	-2,0	0,15	-2,5

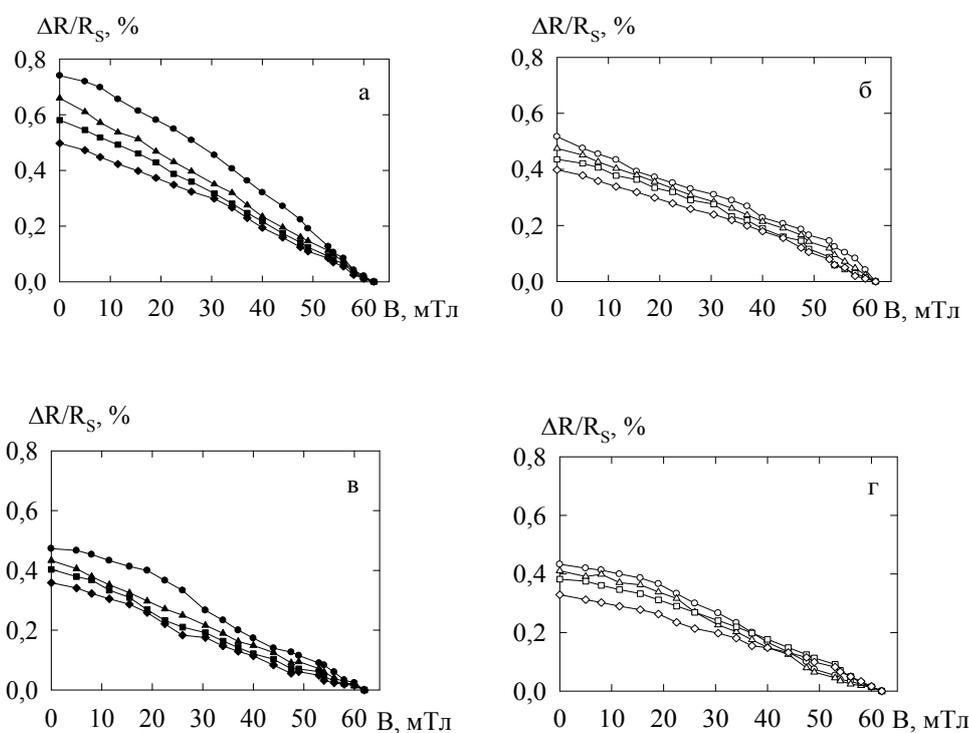


Рис.2. Зависимость магнитосопротивления от индукции магнитного поля для многослойных пленочных систем Fe(2,5)/[Cu(1,5)/Fe(2,5)]<sub>n</sub>/Π, где n=3, 5, 7 и 9; а, б – неотожженные образцы; в, г – отожженные до 800 К; а, в – параллельная, б, г – перпендикулярная геометрия; ●, ○ – n=9; ▲, △ – n=7; ■, □ – n=5; ◆, ◇ – n=3

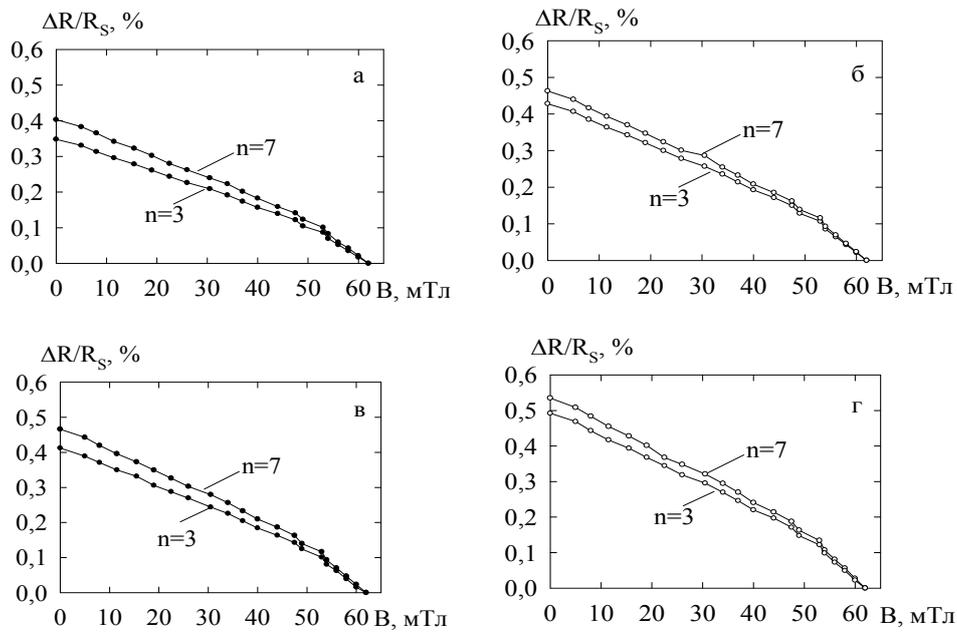


Рис.3. Зависимость магнитосопротивления от индукции магнитного поля для многослойных пленочных систем  $Fe(2,5)/[Cr(1)/Fe(2,5)]_n/Pt$ , где  $n = 3$  и  $7$ ; а, б – неотожженные образцы; в, г – отожженные до  $800\text{ K}$ ; а, в – параллельная; б, г – перпендикулярная геометрия

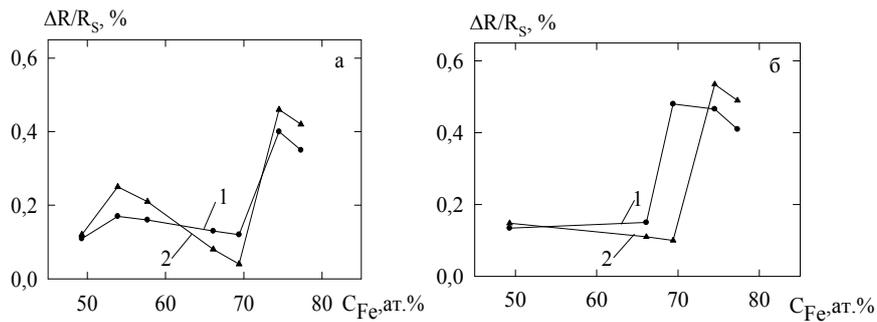


Рис. 4. Зависимость магнитосопротивления от концентрации атомов  $Fe$  в многослойных пленочных системах на основе  $Fe/Cr$  для неотожженных (а) и отожженных (б) образцов; 1 – параллельная геометрия, 2 – перпендикулярная геометрия

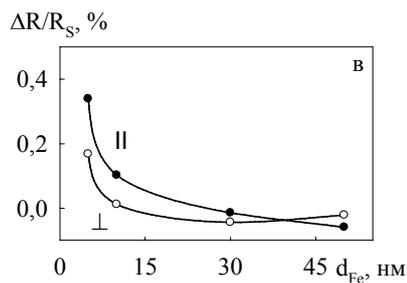
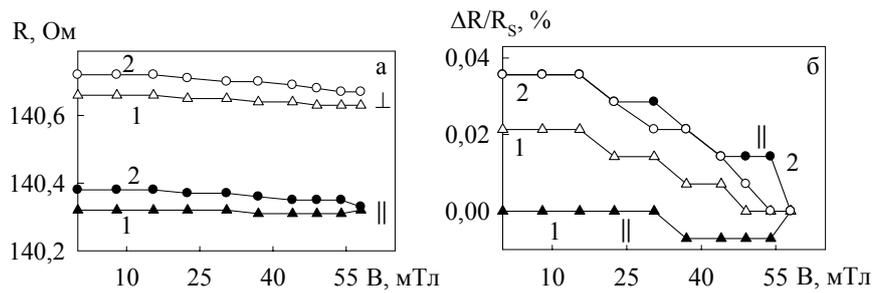


Рис.5. Зависимость сопротивления и МС от  $B$  (а, б) или от толщины слоя  $Fe$  в пленочных системах  $Pd(10)/Fe(x)/Pt$  (в) для двух геометрий

## ТЕНЗОРЕЗИСТИВНЫЕ СВОЙСТВА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Элементы и электронные узлы современной контрольно-измерительной аппаратуры и сенсорной техники в большинстве случаев функционируют в условиях воздействия внешних магнитных полей. Знание и прогнозирование физических закономерностей поведения коэффициента продольной тензочувствительности  $\gamma_l$  и влияние на его величину внешнего магнитного поля [9] позволит создать новые технологические приемы управления электрофизическими характеристиками пленочных материалов и рассмотреть возможность применения пленочных материалов на основе металлов и их оксидов в качестве чувствительных элементов контрольно-измерительных приборов (датчики давления и деформации, гидрофоны, микрофоны и т.п.). В связи с этим исследование тензорезистивного эффекта в присутствии или без наличия внешнего магнитного поля имеет важное практическое значение.

Коэффициент продольной тензочувствительности  $\gamma_l$  рассчитывался на основе деформационных зависимостей сопротивления по формуле

$$\gamma_l = R_n^{-1} \cdot \Delta R / \Delta \varepsilon_l,$$

где  $R_n$  – начальное сопротивление.

Исходя из полученных результатов было определено, что в магнитном поле увеличивается не только удельное сопротивление ( $\rho$ ), но и коэффициент продольной тензочувствительности. При этом размерные зависимости  $\rho$  и  $\gamma_l$  при  $B = 0$  или 0,1 Тл имеют гиперболический характер и при увеличении толщины они постепенно сближаются (рис. 6). В случае двухслойных пленок  $\gamma_l$  имеет большее значение по сравнению с однослойными. В частности, пленочные системы Cr(30)/Fe(70)/П и Cr(70)/Fe(70)/П имеют соответственно величину  $\gamma_l = 11,1$  и 8,6 ( $B = 0$ ) и  $\gamma_l = 11,8$  и 8,9 ( $B = 0,1$  Тл) единиц, т.е. в магнитном поле  $\gamma_l$  изменяется от 3 до 6%.

По аналогии с величиной  $\bar{\beta}_B$ , которая описывает полевую зависимость сопротивления, мы также предлагаем характеризовать полевую зависимость коэффициента  $\gamma_l$  коэффициентом  $\bar{\beta}_{\gamma_B}$ . Его связь с  $\bar{\beta}_B$  получается аналогично соотношению для термического коэффициента тензочувствительности  $\bar{\beta}_{\gamma}$  [10]. Для случая  $\gamma \gg 1$  соотношение имеет следующий вид:

$$\bar{\beta}_{\gamma_B} \cong -\bar{\beta}_B + \frac{1}{\rho \gamma_l} \frac{\partial^2 \rho}{\partial \varepsilon_l \partial B}.$$

Отметим, что, используя полученные экспериментальные данные, можно произвести оценку величины второй производной  $\frac{\partial^2 \rho}{\partial \varepsilon_l \partial B}$ , которая явля-

ется очень важной тензометрической характеристикой и описывает изменение удельного сопротивления при деформации в магнитном поле. Её величина, например, для пленочной системы Cr(30)/Fe(70)/П равна  $-4 \cdot 10^{-5}$  Ом·Тл<sup>-1</sup>.

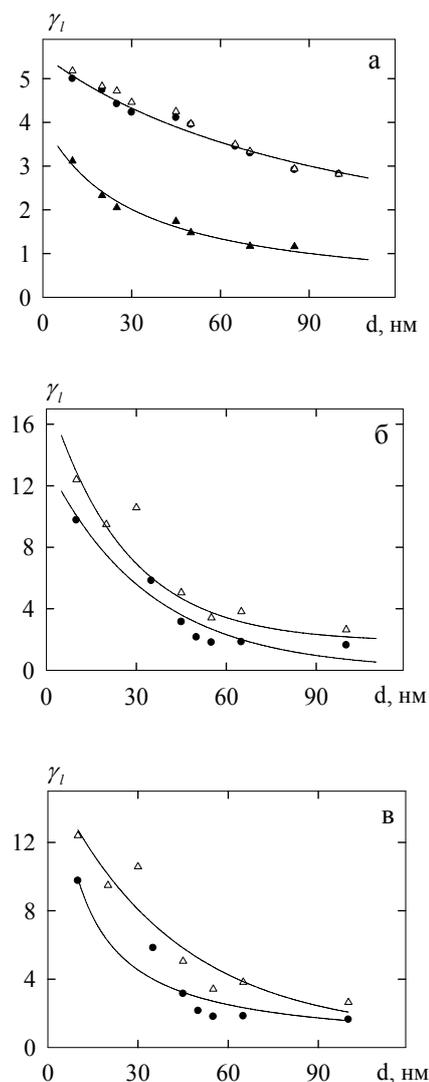


Рис.6. Размерная зависимость коэффициента тензочувствительности для пленок Fe (а), Co (б), Ni (в):  $\blacktriangle$  - в поперечном и  $\triangle$  - перпендикулярном магнитных полях ( $B = 0,1$  Тл),  $\bullet$  - при отсутствии внешнего поля

Авторы выражают благодарность проф. Проценко И.Е. за обсуждение результатов работы.

Работа выполнена в рамках совместных научно-технических договоров между Сумским государственным университетом, Университетом им. Й. Гутенберга (Майнц, Германия) и Университетом Барода (Ваходара, Индия).

## ЛИТЕРАТУРА

1. С.І. Проценко, І.В. Чешко, Д.В. Великодний та ін. Структурно-фазовий стан, стабільність інтерфейсів та електрофізичні властивості двошарових плівкових систем // *Успехи физ. мет.* 2007, т.8, №4, с.247-278.
2. L. Odnodvoret, S. Protsenko, O. Synashenko et al. Electrophysical properties of Ni/V and Cr/Fe multilayer films // *Cryst. Res. Technol.* 2009, v.44, №1, p.74-81.

3. Е.А. Ганьшина, А.А. Богородицкий, Р.Ю. Курмаритова и др. Магнитооптические свойства многослойных пленок Fe/Pd // *ФТТ*. 2001, т.43, в.6, с.1061-1066.

4. *Диаграммы состояния двойных металлических систем* / Под ред. Н.П. Лякишева. М.: «Машиностроение» 1997, т. 2, с.528-531.

5. J.L. Menendez, P. Caro, A. Cebollada, et al. Structure and magnetic anisotropies in sputtered FePd(110) thin films // *J. Magn. Magn. Mater.* 1999, v.192, p.334-342.

6. A. Polit, D. Makarov, C. Brombacher et al. Correlation between magnetism and the structure in Cu-alloyed FePd thin films // *Book of Abstracts of XLIV Zakopane School of Physics*. 2009.

7. W.L. Wang, K.J. Liao, C.G. Hu, et al. Study of piezoresistive effect of diamond films under magnetic field // *Sensors Actuators A*. 2003, v.108, p.55-58.

8. F. Petroff, A. Barthelemy, D.H. Mosca, et al. Oscillatory interlayer exchange and magnetoresistance in Fe/Cu multilayers // *Phys. Rev. B*. 1991, v.44, p.5355-5357.

9. Н.И. Захаренко, М.П. Семенько. Влияние магнитного поля на тензорезистивный эффект в аморфных сплавах на основе железа // *ФММ*. 2007, т.104, №2, с.150-154.

10. С.І. Проценко. Про температурну залежність коефіцієнтів поздовжньої і поперечної тензочутливості металевих плівок // *ФХТТ*. 2002, т.3, №3, с.401-403.

*Статья поступила в редакцию 13.07.2009 г.*

## МАГНІТОРЕЗИСТИВНІ ВЛАСТИВОСТІ БАГАТОШАРОВИХ НАНОРОЗМІРНИХ ПЛІВКОВИХ СИСТЕМ

*О.В. Синашенко, О.П. Ткач, І.П. Бурик, Л.В. Однодворець, С.І. Проценко, Н.І. Шумакова*

Проведені дослідження магнітоопору багатошарових нанорозмірних плівкових систем на основі Fe і Cu, Cr або Pd в залежності від величини індукції зовнішнього магнітного поля і концентрації атомів Fe. Отримані результати пояснені з точки зору структурно-фазового стану: в системі Fe/Cu в більшій мірі зберігається індивідуальність окремих шарів з можливим розмиттям інтерфейсів, а в системі Fe/Cr стабілізується гранульований стан атомів Fe в матриці із твердого розчину (Fe, Cr) або утворюється твердий розчин (Pd, Fe), в якому відбувається утворення інтерметалідів FePd з ГЦК- або ГЦТ-решіткою. Досліджений магніторезистивний ефект в одно- та двошарових плівках, які виступають компонентами багатошарових систем.

## MAGNETORESISTIVE PROPERTIES OF MULTILAYER NANODIMENSIONAL FILM SYSTEMS

*O.V. Synashenko, O.P. Tkach, I.P. Buryk, L.V. Odnodvoretz, S.I. Protsenko, N.I. Shumakova*

The investigations of magnetoresistance of multilayer nanodimensional film systems based on Fe and Cu, Cr or Pd were carried versus induction of external magnetic field and concentration of Fe atoms. Received results were explained with a view to structural-phase state: in Fe/Cu system to a great extent the individuality of separate layers conserves with possibility blurring of interfaces. In Fe/Cr system granular state of Fe atoms in matrix from solid solution (Fe, Cr) stabilizes or solid solution (Pd, Fe) forms, in which formation of intermetallic FePd with FCC- or FCT-lattice occurs. The magnetodeformation effect in one- or two-layer films, which are the components of multilayer systems, was investigated.