

## Тензорезистивні властивості тонкоплівкових систем на основі Ag і Co

І.М. Пазуха, З.М. Макуха, Ю.М. Шабельник, І.Ю. Проценко\*

Сумський державний університет, вул. Римського-Корсакова, 2, 40007 Суми, Україна

(Одержано 29.09.2012; у відредагованій формі – 14.10.2012; опубліковано online 30.10.2012)

Представлені експериментальні результати дослідження тензорезистивних властивостей плівок Ag і Co та двошарових плівкових систем на їх основі в інтервалі деформації  $\Delta\varepsilon = 0-1\%$ . Показано, що пластична деформація у шарі Co спричиняє аналогічну деформацію у всій системі, незважаючи на те, що для шару Ag діапазон деформації ще не досягнув межі переходу пружна/пластична деформація. При переході від одно- до двошарової системи відбувається збільшення коефіцієнта тензочутливості внаслідок виникнення додаткового механізму розсіювання електронів на межі поділу окремих шарів.

**Ключові слова:** Двошарові плівкові системи, Тензоефект, Коефіцієнт тензочутливості, Пружна та пластична деформація, Інтерфейсне розсіювання.

PACS numbers: 60.68.Bs, 72.10.Fk, 73.63.Bd

### 1. ВСТУП

Багатошарові багатокомпонентні плівкові системи у вигляді сплавів, мультишарів чи гранульованих сплавів знайшли широке прикладне застосування в електронному мікроприладобудуванні [1-4], оскільки саме ці матеріали мають широкі функціональні можливості. Увага до плівкових систем на основі Ag і Co, пов'язана у першу чергу із відкриттям в них явища гігантського магнітоопору [5]. Однак, як показали автори робіт [6, 7], багатошарові плівкові структури, в яких реалізується спін-залежне розсіювання електронів, представляють також інтерес з точки зору їх застосування як надчутливих датчиків деформації. Тому вивчення явища тензоефекту в системах Ag/Co представляє самостійний інтерес.

### 2. МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Тонкі плівки Ag і Co, а також двошарові плівкові системи на їх основі, отримувалися методами терморезистивного (Ag) та електронно-променевого (Co) випарування у робочому об'ємі вакуумної установки ВУП-5М (тиск газів залишкової атмосфери  $p \sim 10^{-4}$  Па). Товщину зразків вимірювали в процесі конденсації методом кварцового резонатора, згідно рекомендацій роботи [8] (точність вимірювання товщини  $\pm 10\%$ ). Дослідження тензорезистивних властивостей протягом восьми деформаційних циклів «навантаження – зняття навантаження» проводили з використанням сучасних засобів автоматизації фізичного експерименту. Це дозволило здійснити автоматичне управління ходом експерименту та провести комп'ютеризований збір та обробку результатів. Детально розроблена автоматизована система описана в роботі [9].

Середній коефіцієнт поздовжньої тензочутливості (КТ) і миттєвий КТ визначалися, як і в роботі [10], за співвідношеннями  $\gamma_l = R_n^{-1} \Delta R / \Delta \varepsilon_l$  та  $\gamma_{lm} = R_i^{-1} \Delta R_i / \Delta \varepsilon_i$  відповідно, де  $R_n$  і  $R_i$  – початковий електричний опір при поздовжній деформації  $\varepsilon_l = 0$  і  $\varepsilon_i = \varepsilon_i$  відповідно. Величина  $\gamma_{lm}$  розраховувалася як кутовий коефіцієнт залежності  $\Delta R / R_n$  від  $\varepsilon_i$ , а  $\gamma_{lm}$  – шляхом графічного диференціювання цієї ж залежності.

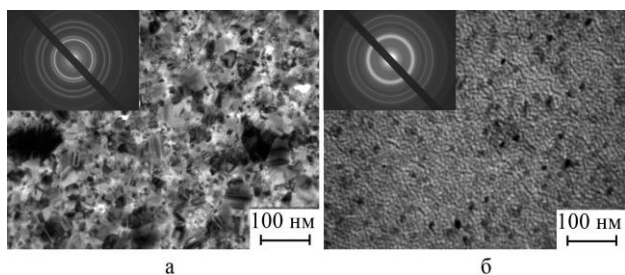
\* protsenko@aph.sumdu.edu.ua

Дослідження фазового складу та структури плівкових зразків проводилося при використанні електроннографічного та електронно-мікроскопічного методів (прилад з високою розрізняювальною здатністю ПЕМ-125) з метою отримання інформації про кристалічну ґратку (міжплощинні відстані, тип та параметр ґратки), середній розмір кристалітів та їх концентрацію, характер меж зерен та про дефекти кристалічної будови.

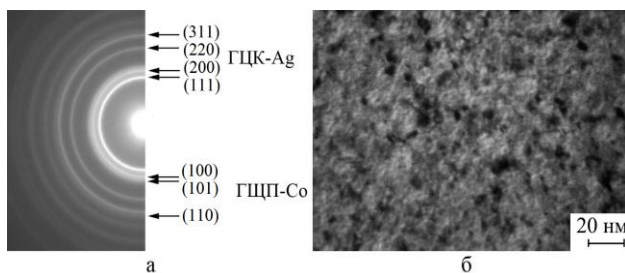
### 3. РЕЗУЛЬТАТИ І ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Аналіз структурно-фазового стану одношарових плівок Ag і Co та двошарових плівкових систем Ag/Co проводився з метою підтвердження коректності аналізу подальших досліджень тензорезистивних властивостей. Типові дифракційні картини та мікрознімки кристалічної структури у свіжосконденсованому стані зразків Ag(20)/П, Co(20)/П та Ag(20)/Co(20)/П (П – підкладка, в дужках вказана товщина в нм) наведені на рис. 1 та 2. Результати розрахунку електроннограм зведені у таблиці 1. Як видно із рис. 1а, плівка Ag має ГЦК-ґратку із середнім параметром  $\bar{a}$  (Ag) = 0,407  $\pm$  0,001 нм, що відповідає табличним значенням для масивних разків  $a_0$ (Ag) = 0,408 нм [11]. На відміну від плівок Ag, плівки Co мають двофазний склад. На електроннограмах поряд з лініями ГЦП-Co фіксуються лінії ГЦК-Co, які можуть відповідати як відбиттям від дефектів пакування в ГЦП-Co, так і незавершеним фазовим ГЦК  $\rightarrow$  ГЦП переходом при конденсації плівки Co(20)/П. Середній параметр ґратки для ГЦК-Co становить  $\bar{a}$  (ГЦК) = 0,354  $\pm$  0,001 нм, що відповідає табличним значенням для масивних зразків  $a_0$ (ГЦК-Co) = 0,355 нм [11].

Аналіз електроннографічних даних для плівкової системи Ag(20)/Co(20)/П (рис. 2, табл. 1) показав, що даний зразок у свіжесконденсованому стані має двофазний склад. Як видно з рис. 2б на дифракційних картинах спостерігається система кілець як від шару Ag, так і від шару Co. Це дає можливість зробити висновок, що в системах на основі Ag та Co після конденсації зберігається індивідуальність окремих



**Рис. 1** – Дифракційні картини та кристалічна структура від одношарових плівок Ag(20)/П (а) та Co(20)/П (б) у свіжосконденсованому стані



**Рис. 2** – Дифракційна картина (а) та кристалічна структура (б) від двошарової плівкової структури Ag(20)/Co(20)/П у свіжосконденсованому стані

шарів без утворення твердих розчинів чи гранульованих сплавів. Такий висновок підтверджують результати дослідження дифузійних процесів методом ВІМС, проведені у роботі [12].

Типові деформаційні залежності  $R$  і  $\Delta R/R$  від  $\epsilon_l$  для одношарових плівок Ag, Co та двошарових систем Ag/Co, на основі яких проводився розрахунок залежностей  $\gamma$  від  $\epsilon_l$  в інтервалі деформації  $\Delta\epsilon_l = 0-1\%$  представлені на рис. 3-5 відповідно. Вкажемо характерні особливості деформаційних залежностей для одношарових зразків. По-перше, I-й деформаційний цикл «навантаження – зняття навантаження» відрізняється від подальших внаслідок протіканням різних релаксаційних процесів (частковий поворот зерен, перерозподіл дефектів кристалічної будови, мікропластична деформація). При подальших циклах спостерігається певна стабілізація тензорезистивних властивостей. По-друге, зміна характеру на залежностях  $R(\epsilon_l)$  і  $\Delta R/R(\epsilon_l)$  при  $\epsilon_l = 0,3\%$  для плівки Co(70)/П (рис. 4а) свідчить про перехід від пружної (квазіпружної) до пластичної деформації. Зазначимо, що для плівок Ag пружна деформація має місце до величини  $\epsilon_l \cong 1\%$  (рис. 3а).

Для двошарових систем Ag/Co також характерна відмінність I деформаційного циклу від наступних та вузький діапазон пружної деформації.

**Таблиця 1** – Фазовий склад свіжесконденсованих плівок Ag(20)/П, Co(20)/П та двошарової плівкової системи Ag(20)/Co(20)/П

Плівка	№	I, в.о.	$d_{hkl}$ , нм	$hkl$	фаза	$a_{hkl}$ , нм	$d_{hkl}^0$ , нм [11]
Ag	1	ДС	0,235	111	ГЦК-Ag	0,408	0,236
	2	сер	0,204	200	ГЦК-Ag	0,407	0,204
	3	сер	0,143	220	ГЦК-Ag	0,408	0,144
	4	сер	0,122	311	ГЦК-Ag	0,406	0,123
	5	сл	0,117	222	ГЦК-Ag	0,406	0,117
	6	сл	0,102	400	ГЦК-Ag	0,407	0,102
$\bar{a}$ (ГЦК-Ag) = 0,407 нм; $a_0$ (ГЦК-Ag) = 0,408 нм [11].							
Co	1	С	0,215	100	ГЦП-Co	0,248	0,216
	2	ДС	0,204	111	ГЦК-Co	0,354	0,204
	3	сер	0,192	101	ГЦП-Co	-	0,191
	4	сер	0,177	200	ГЦК-Co	0,354	0,177
	5	сер	0,125	220	ГЦК-Co	0,354	0,125
	6	сл	0,106	311	ГЦК-Co	0,355	0,107
$\bar{a}$ (ГЦК-Co) = 0,354 нм, $\bar{a}$ (ГЦП-Co) = 0,250 нм; $a_0$ (ГЦК-Co) = 0,355 нм; $a_0$ (ГЦП-Co) = 0,251 нм [11].							
Ag/Co	1	ДС	0,236	111	ГЦК-Ag	0,407	0,236
	2	С	0,220	100	ГЦП-Co	0,251	0,215
	3	сер	0,204	200	ГЦК-Ag	0,408	0,204
	4	сл	0,190	101	ГЦП-Co	-	0,191
	5	сер.	0,143	220	ГЦК-Ag	0,408	0,144
	6	сл	0,124	110	ГЦП-Co	0,251	0,125
	7	сл	0,122	311	ГЦК-Ag	0,406	0,123
$\bar{a}$ (ГЦК-Ag) = 0,407 нм; $\bar{a}$ (ГЦП-Co) = 0,251 нм.							

ДС – дуже сильна, С – сильна, сер – середня, сл – слабка

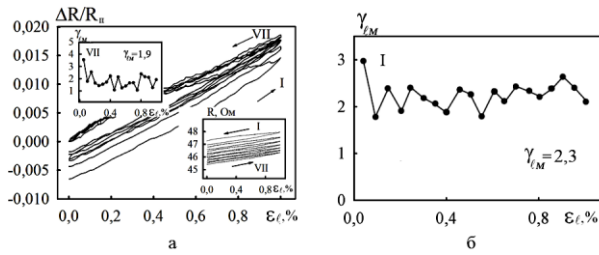


Рис. 3 – Залежність  $\Delta R / R$ ,  $\gamma_M$  і  $R$  від  $\varepsilon_L$  (а) та залежність  $\gamma_M$  від  $\varepsilon_L$  для I деформаційного циклу (б) для плівки Ag(38)/П. Римськими цифрами позначені номери деформаційних циклів

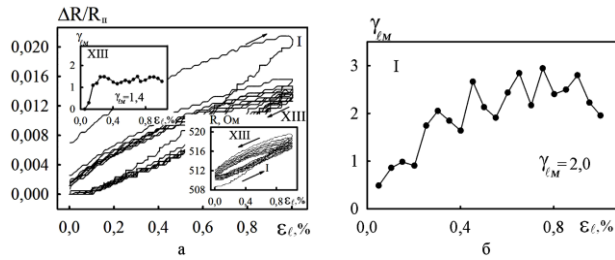


Рис. 4 – Залежність  $\Delta R / R$ ,  $\gamma_M$  і  $R$  від  $\varepsilon_L$  (а) та залежність  $\gamma_M$  від  $\varepsilon_L$  для I деформаційного циклу (б) Co(70)/П

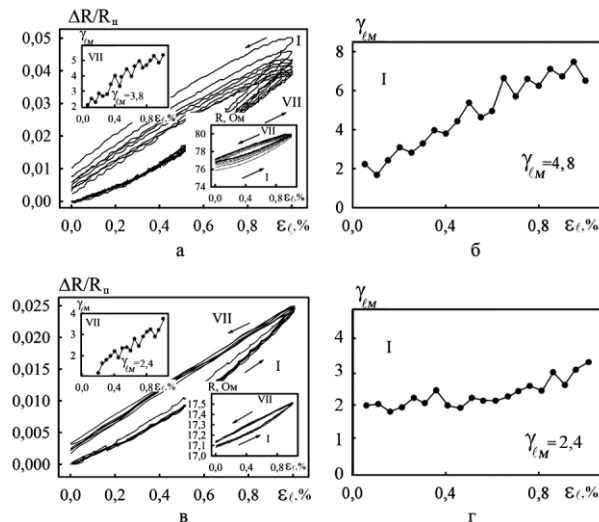


Рис. 5 – Залежність  $\Delta R / R$ ,  $\gamma_M$  і  $R$  від  $\varepsilon_L$  (а, в) та залежність  $\gamma_M$  від  $\varepsilon_L$  для I деформаційного циклу (б, г) для плівкових систем Ag(15)/Co(45)/П (а, б) та Ag(40)/Co(20)/П (в, г)

Таблиця 2 – Значення  $\gamma$  для різних деформаційних циклів для двошарових систем Ag/Co при  $\Delta\varepsilon_L = 0-1\%$ , та порівняння його із  $\gamma$  плівок Ag і Co

Зразок	Загальна товщина, d, нм	Середні значення $\gamma$ для різних деформаційних циклів							$\frac{\gamma_{Co}}{\gamma_I}$	$\frac{\gamma_{I}^{Ag}}{\gamma_I}$
		I	II	III	IV	V	VI	VII		
Ag(18)/Co(17)/П	35	0,77	1,63	1,79	1,80	2,27	3,19	4,25	0,55	0,41
Ag(22)/Co(22)/П	44	3,99	3,72	3,64	3,61	3,60	3,58	3,55	0,50	0,47
Ag(40)/Co(20)/П	60	2,38	2,39	2,43	2,44	2,40	2,34	2,37	0,61	0,66
Ag(15)/Co(45)/П	60	4,78	4,47	4,22	4,15	4,04	3,91	3,85	0,38	0,41
Ag(35)/Co(40)/П	75	2,54	2,53	2,51	2,49	2,50	2,51	2,50	0,45	0,43
Ag(45)/Co(36)/П	81	4,37	3,26	3,03	2,89	2,79	2,74	2,70	0,42	0,40

Починаючи з другого деформаційного циклу спостерігається тенденція до стабілізації тензорезистивних властивостей. Крім того, виходячи з типових залежностей для одно- та двошарових зразків, можна зробити висновок, що діапазон пружної деформації для систем Ag/Co залежить від концентрації атомів Co, плівка якого має меншу межу пружності у порівнянні із плівками Ag.

На залежностях  $\gamma_M$  від  $\varepsilon_L$  для плівкової системи Ag(45)/Co(36)/П спостерігається ефект аномального збільшення коефіцієнта тензочутливості від деформації (вставка на рис. 5в). Максимум на залежності миттєвого КТ відповідає межі переходу пружна/пластична деформація. Аналогічна нелінійність на залежностях  $\gamma_M$  від  $\varepsilon_L$  спостерігалася у попередніх дослідженнях (наприклад, [13, 14]).

Пояснити фізичну природу максимуму на залежності миттєвого коефіцієнта повздовжньої тензочутливості  $\gamma_M$  від деформації  $\varepsilon_L$  для двошарових плівкових системах можна проаналізувавши умову екстремуму (максимуму), яка отримується шляхом спрощення рівняння  $\partial\gamma_M/\partial\varepsilon_L = 0$ . Співвідношення для  $\gamma_M$  представлені в [10]. Проведений аналіз вказує на те, що поява максимуму на залежності  $\gamma_M$  від  $\varepsilon_L$  обумовлена нелінійною по деформації зміною питомого опору, яка відбувається при використанні застосованого у даній роботі динамічного режиму розтягування зразка, та зі структурними процесами, що протікають у плівкових системах при переході від пружної до пластичної деформації.

Порівняння середньої величини  $\gamma$  для одношарових плівок Ag і Co із величиною  $\gamma$  двошарових систем Ag/Co однакової загальної товщини, всієї системи представлено у таблиці 2. Аналіз даних вказує на те, що значення  $\gamma$  двошарових зразків більше, ніж в одношарових. Оскільки в системі зберігається індивідуальність окремих шарів, то свій внесок у загальну величину коефіцієнта тензочутливості дають процеси розсіювання на межі поділу шарів, тобто наявність інтерфейсного розсіювання призводить до збільшення величини  $\gamma$ . Це відкриває можливість створення чутливого елемента тензодатчика на основі багатшарової плівкової системи, компонентами якої виступають плівки Ag і Co.

#### 4. ВИСНОВКИ

Проведений аналіз експериментальних даних дозволяє зробити наступні висновки:

- деформаційні залежності двошарових систем Ag/Co характеризуються вузьким діапазоном пружної деформації, межа переходу пружна/пластична деформації як для Ag/Co, так і для Co залежить від загальної товщини;
- наявність нелінійності на залежностях  $\gamma_m$  від  $\epsilon_i$  пов'язана з переходом від пружної до пластичної

деформації та структурними змінами в плівках;  
– величина КТ двошарових плівкових систем більша у порівнянні із одношаровою плівкою з такою ж товщиною як і двошарова, що можна пояснити додатковим розсіюванням електронів на межі поділу шарів.

Робота виконана в рамках держбюджетної теми № 0112U001381.

### Тензорезистивные свойства тонкопленочных систем на основе Ag и Co

И.М. Пазуха, З.М. Макуха, Ю.М. Шабельник, И.Е. Проценко

Сумский государственный университет, ул. Римского-Корсакова, 2, 40007 Сумы, Украина

Представлены экспериментальные результаты исследования тензорезистивных свойств пленок Ag, Co и двухслойных пленочных систем на их основе в интервале деформации  $\Delta\epsilon = 0-1\%$ . Показано, что пластическая деформация в слое Co приводит к аналогичной деформации во всей системе, независимо от того, что для слоя Ag диапазон деформации еще не достиг границы перехода упругая/пластическая деформация. При переходе от одно- к двухслойной системе происходит увеличение коэффициента тензочувствительности вследствие возникновения дополнительного механизма рассеивания электронов на границе раздела слоев.

**Ключевые слова:** Двухслойные пленочные системы, Тензоэффект, Коэффициент тензочувствительности, Упругая и пластическая деформация, Интерфейсное рассеивание.

### Tensoresistive Properties of Thin Film Systems Based on Ag and Co

I.M. Pazukha, Z.M. Makukha, Yu.M. Shabelnyk, I.Yu. Protsenko

Sumy State University, 2, Rimsky Korsakov Str., 40007 Sumy, Ukraine

The results of research strain deformation properties of thin films Ag, Co and two-layers films Ag/Co in the range of deformation  $\Delta\epsilon = 0-1\%$  were presented. The plastic deformation in Co layer caused a similar deformation in the entire film system, even if the strain range Ag layer is not reached the limits of the transition elastic/plastic deformation. The increasing of gauge factor value of two-layer systems in comparison with thin films Ag and Co appears as a result of electron interface scattering.

**Keywords:** Two-layer film systems, Tensorresistive effect, Gauge factor, Strain and plastic deformation, Interface scattering.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. A.V. Amor, T. Budde, H.H. Gatzert, *Sensor. Actuat. A-Phys.* **129**, 41 (2006).
2. S. He, M.M. Mench, S. Tadigadapa, *Sensor. Actuat. A-Phys.* **125**, 170 (2006).
3. C.P.O. Treutler, *Sensor. Actuat. A-Phys.* **91**, 2 (2001).
4. G. Rieger, K. Ludwig, J. Hauch, W. Clemens W, *Sensor. Actuat. A-Phys.* **91**, 7 (2001).
5. S. Kenane, E. Chainet, B. Nguyen, A. Kadri, N. Benbrahim, J. Voiron, *Electrochem. Commun.* **4**, 167 (2002).
6. S. Dokupil, M.-T. Bootsmann, S. Stein, M. Löhndorf, E. Quandt, *J. Magn. Magn. Mater.* **290**, 795 (2005).
7. J.A. Kitine, E.E. Fullerton, *J. Magn. Magn. Mater.* **320**, 1217 (2008).
8. Є.О. Забіла, І.Ю. Проценко, *УФЖ* **50** №7, 727 (2005) (E.O. Zabyla, I.Yu. Protsenko, *Ukr. J. Phys.* **50**, 727 (2005)).
9. Д.В. Великодний, С.І. Проценко, І.Ю. Проценко, *Металлофіз. новітні технології*, **30**, 1659 (2008) (D.V. Velykodny, S.I. Protsenko, I.Yu. Protsenko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* **30**, 1659 (2011)).
10. К.В. Тищенко, Л.В. Олександрів, І.Ю. Проценко, *УФМ* **33** №8, 1351 (2011).
11. С.С. Горелик, Л.Н. Расторгуев, Ю.А. Скаков, *Рентгенографічний і електронографічний аналіз металів* (Москва: ГНТИ: 1963).
12. С.І. Проценко, І.В. Чешко, Д.В. Великодний, О.В. Синашенко, Л.В. Олександрів, І.М. Пазуха, І.Ю. Проценко, *УФМ* **8** №4, 247 (2007).
13. S.I. Protsenko, D.V. Velykodny, V.A. Kheraj, M.S. Desai, C.J. Panchal, I.Yu. Protsenko, *J. Mater. Sci.* **44**, 4905 (2009).
14. І.П. Буряк, Д.В. Великодний, Л.В. Олександрів, І.Е. Проценко, Е.П. Ткач, *Tech. Phys.* **56**, 232 (2011).