

МАГНІТОДЕФОРМАЦІЙНИЙ ЕФЕКТ У ДВОШАРОВИХ ПЛІВКАХ Co/Cu

З. М. Макуха, І. Ю. Проценко
*Сумський державний університет,
Україна*

Надійшла до редакції 01. 07. 2014

Представлені результати дослідження структурно-фазового стану двошарових плівок основи Co та Cu до та після деформації. Встановлено, що пружна деформація практично не впливає на кристалічну структуру зразків. Досліджено вплив перпендикулярного магнітного поля на тензорезистивні властивості зразків, розраховано магнітний коефіцієнт коефіцієнта тензочутливості. Магнітне поле призводить до збільшення коефіцієнту тензочутливості.

Ключові слова: двошарові плівки Co/Cu, магнітодеформаційний ефект, коефіцієнт тензочутливості, пружна деформація.

МАГНІТОДЕФОРМАЦИОННЫЙ ЭФФЕКТ У ДВУХСЛОЙНЫХ ПЛЕНКАХ Co/Cu

З. Н. Макуха, И. Е. Проценко

Представленные результаты исследования структурно-фазового состояния пленок на основе Co и Cu до и после деформации. Установлено, что упругая деформация практически не влияет на кристаллическую структуру образцов. Исследовано влияние перпендикулярного магнитного поля на тензорезистивные свойства образцов, рассчитан магнитный коэффициент коэффициента тензочувствительности. Магнитное поле приводит к увеличению коэффициента тензочувствительности.

Ключевые слова: двухслойные пленки Co/Cu, магнитодеформационный эффект, коэффициент тензочувствительности, пластическая деформация.

MAGNETO-STRAIN EFFECT IN DOUBLE — LAYER FILM Co/Cu

Z. M. Makukha, I. Yu. Protsenko

The results of a structural-phase state study of the films based on Co and Cu before and after strain were presented in the work. It was found that the elastic deformation didn't influence the crystal structure of the samples. The influence of a perpendicular magnetic field on the strain properties of thin-film samples was investigated, magnetic coefficient of the gauge factor was calculated. Magnetic field leads to increase of the gauge factor.

Keywords: double-layer films Co/Cu, magneto-strain effect, gauge factor, magnetic coefficient of the gauge factor, elastic strain.

ВСТУП

Розробка багатофункціональних датчиків, які б реєстрували дві та більше величин одночасно, є актуальною проблемою фізики тонких плівок. Одним із варіантів такого датчика може бути тензодатчик на основі малодослідженого магнітодеформаційного ефекту [1, 2], тобто залежності тензочутливості від величини зовнішнього магнітного поля. Ця проблема знаходиться в полі зору дослідників з точки зору впливу магнітного поля на тензорезистивні та механічні властивості масивних і плівкових

матеріалів [3—5]. Було встановлено, що дія магнітне поле невеликого значення призводить до збільшення значення коефіцієнта тензочутливості (КТ) у масивних аморфних металічних сплавах на основі Fe, в той час як збільшення величини магнітного поля призводить до зменшення КТ з виходом на насичення у цих сплавах [3]. У напівпровідникових матеріалах *p*-типу провідності у магнітному полі величиною 3 Тл спостерігається зменшення КТ (відносна зміна опору становить 12 % при дії магнітного поля та 9,5 % без поля, тобто

КТ зменшується з 4 до 3 відповідно) при деформації $\epsilon_i = 0,03\%$ [4]. Питання зміни фазового стану та кристалічної структури плівкових матеріалів у процесі та після деформації було вивчено і обговорено в роботах [6—8].

Метою даної роботи було дослідження тензорезистивних характеристик плівкових матеріалів в умовах дії зовнішнього перпендикулярного магнітного поля, а також впливу деформації на структуру та фазовий стан плівок. Плівкові системи на основі Со та Си представляють значний інтерес з точки зору можливого їх застосування як чутливих елементів мікросенсорів, оскільки в цих системах утворюється твердий розчин на стадії конденсації, а також реалізується спин-залежне розсіювання електронів.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

Плівкові зразки отримувалися методом термічного випаровування у вакуумній установці ВУП-5М (10^{-3} — 10^{-4} Па). Товщина контролювалась в процесі конденсації методом кварцового резонатора, а також уточнювалась після наплення методом оптичної інтерферометрії. Для дослідження тензорезистивних властивостей та магнітодеформаційного ефекту зразки деформувалися в інтервалі пружної деформації для даних матеріалів $\epsilon_i = (0—0,4)\%$ за допомогою автоматизованої системи з комп'ютерним управлінням процесу (детальніше робота установки описана в [9]). Як підкладки використовувалися смужки полістиролу, у яких інтервал пружної деформації до 2%, тобто зразки деформувалися пружно.

Цикл «навантаження-зняття навантаження» проводився без, а потім при дії зовнішнього магнітного поля, орієнтованого перпендикулярно до напрямку розтягу плівки. Магнітне поле створювалось постійними магнітами з індукцією 30 мТл.

Середнє та миттєве значення коефіцієнту повздовжньої тензочутливості розраховувались за формулами [10]:

$$\gamma_l = \frac{1}{R_{\Pi}} \frac{\Delta R}{\Delta \epsilon_l} \quad \text{і} \quad \gamma_{li} = \frac{1}{R_i} \frac{\Delta R_i}{\Delta \epsilon_{li}}$$

де R_{Π} та R_i — початкове та миттєве значення електричного опору; $\Delta R = R(\epsilon_i) - R(0)$ та $\Delta R_i = R(\epsilon_{li} + \Delta \epsilon_{li}) - R(\epsilon_{li})$ — зміна опору у всьому в інтервалі деформації ($\Delta \epsilon_i$) та в інтервалі $\Delta \epsilon_{li}$; ϵ_i — значення поздовжньої деформації.

Для кількісної оцінки магнітодеформаційного ефекту при повздовжній деформації зразка було розраховано магнітний коефіцієнт коефіцієнту тензочутливості (МККТ), за формулою [1, 2]:

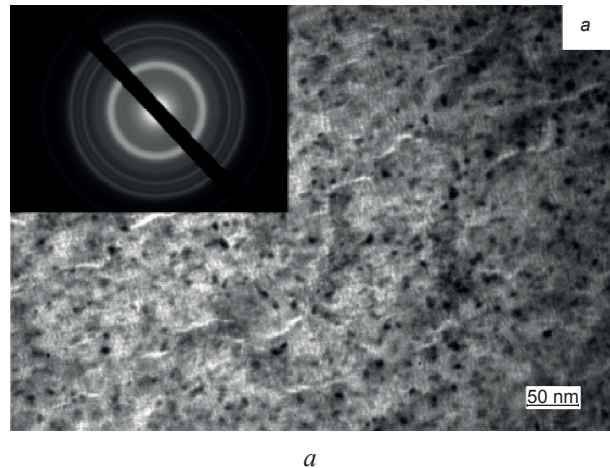
$$\beta_{\gamma_{lB}} = \frac{1}{\gamma_l(0)} \left(\frac{\Delta \gamma_l}{\Delta B} \right)_{\epsilon_i} \quad (1)$$

де $\Delta \gamma_l = \gamma_l(B) - \gamma_l(0)$; ΔB — зміна індукції прикладеного магнітного поля.

Дослідження структурно-фазового стану проводилося за допомогою приладу ПЕМ-125К. На полістиролові смужки конденсувався шар NaCl (товщина в декілька десятків нм), а потім плівка Со або пошарово осаджувався Со та Си. Після проведення циклів «навантаження ↔ зняття навантаження» зразки препарувалися для електронно-мікроскопічних досліджень їх структурного стану, тобто електроннографічні дослідження проводилися до та після деформації зразка, що дозволило визначити вплив деформації на зазначені властивості.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Були проведені дослідження у одно- і двошарових плівок на основі Со та Си перед та після деформації до 0,4%. Результати представлені на рис. 1, на прикладі Со(30 нм)/NaCl/П.



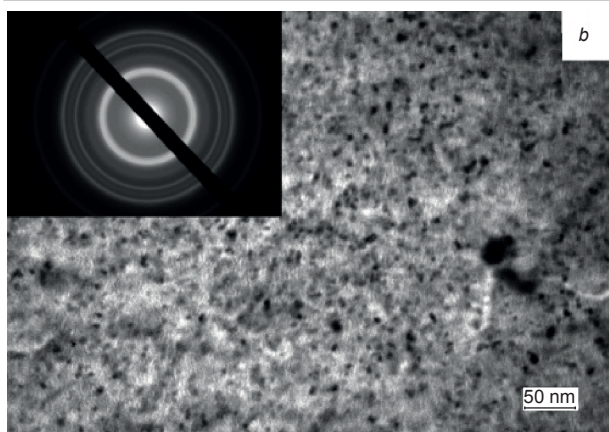
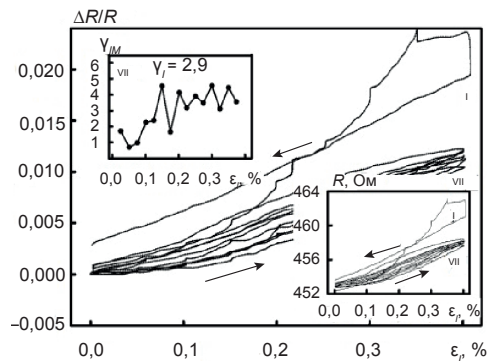


Рис. 1. Кристалічна структура та дифракційні картини від одношарової плівки Co(30)/П у свіжосконденсованому стані (а) та після деформації до $\epsilon_t = 0,4\%$ (б)

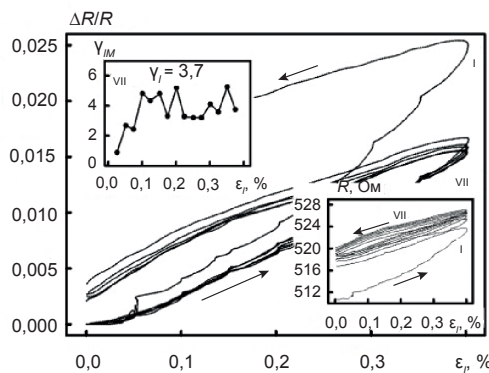
Одношарові зразки мають кристалічну решітку, що відповідає ГЦП-Со, у двошарових, окрім ГЦП-Со, на електронограмах фіксуються кільця твердого розчину т. р. (Cu, Co) на основі ґратки ГЦК-Сu.

Після деформації (рис. 1б) суттєвих змін в структурно-фазовому стані не спостерігається, що можна пояснити тим, що зразки деформуються пружно, на відміну від, наприклад, даних робіт [6, 7], в яких зразки зазнають пластичної деформації, в результаті чого спостерігаються зміна фазового стану, рух дислокацій з об'єму зерна на його межі та утонення зразка. Розшифрування електронограм наведено в табл. 1.

Типові деформаційні залежності одно- та двошарових плівкових систем без та при дії перпендикулярного магнітного поля ($B = 30$ мТл) представлені на рис. 2, 3 (деформація без дії магнітного поля рис. 2а, 3а, та при внесенні зразків в магнітне поле 2б, 3б).



а



б

Рис. 2. Залежність $\Delta R/R$, R та γ_t від ϵ_t для плівки Co(30)/П без (а) та при дії магнітного поля (б)

Таблиця 1

Розрахунок електронограм від одношарової плівки ГЦП-Со(30)/NaCl/П у свіжосконденсованому стані та після деформації до $\epsilon_t = 0,4\%$

№	$\epsilon_t = 0\%$				№	$\epsilon_t = 0,4\%$			
	I, в. о.	$d_{hkl}, \text{Å}$	hkl	a, Å		I, в. о.	$d_{hkl}, \text{Å}$	hkl	a, Å
1	C	2,16	100	2,50	1	C	2,18	100	2,51
2	C	2,04	111	—	2	C	2,06	111	—
3	C	1,92	101	—	3	C	1,93	101	—
4	сл	1,49	102	—	4	сл	1,51	102	—
5	ср	1,25	110	2,51	5	ср	1,27	110	2,53
6	сл	1,16	103	—	6	сл	1,17	103	—
7	ср	1,07	201	—	7	ср	1,08	201	—
\bar{a} (ГЦП-Со) = 2,51 Å \bar{a}_0 (ГЦП-Со) = 2,51 Å [11]					\bar{a} (ГЦП-Со) = 2,52 Å				

C — сильна; ср — середня; сл — слабка

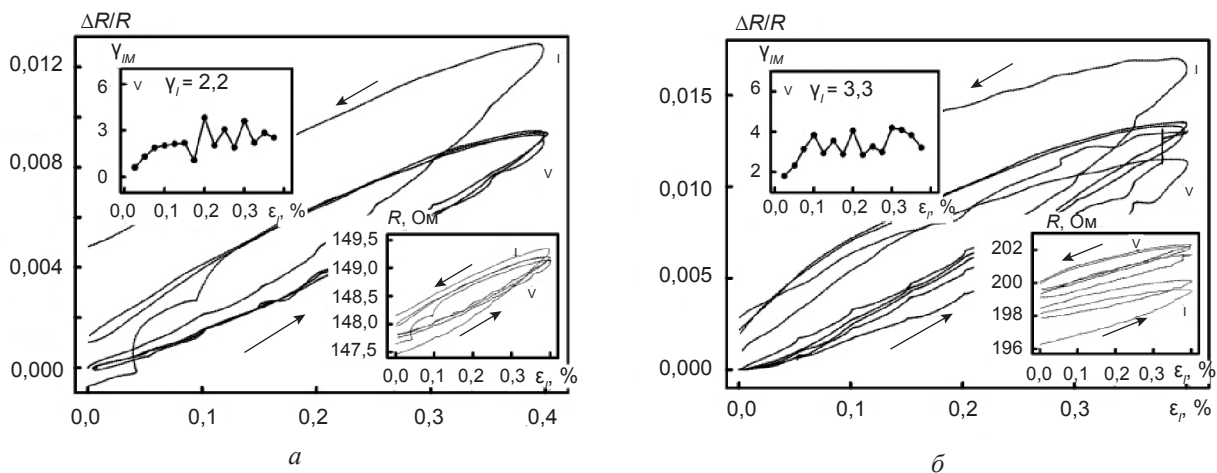


Рис. 3. Залежність $\Delta R/R$, R та γ_I від ϵ_p для плівки $\text{Co}(20)/\text{Cu}(30)/\text{PI}$ без (а) та при дії магнітного поля (б)

Для деформаційних залежностей характерна типова відміна першого деформаційного циклу від наступних, що пов'язано з релаксаційними процесами у плівці. Коефіцієнт тензочутливості для одношарових плівок Co знаходиться в межах $\gamma_I = (1,4\text{—}2,9)$, для двошарових — $\gamma_I = (1,3\text{—}3,4)$ в залежності від товщини зразка. Коефіцієнт тензочутливості, в межах похибки, спадає з товщиною та відповідає класичній розмірній залежності. Відносно мале значення γ_I пояснюється можливим збільшення коефіцієнта Пуассона до величини, більшої, ніж 0,5 (детальніше див. [12]). Розрахунок величини МККТ здійснювався за формулою (1).

З отриманих результатів можна зробити висновок, що магнітне поле призводить до збільшення коефіцієнту тензочутливості для одно- та для двошарових плівкових систем на основі Co і Cu , а величина МККТ має значення $7,1\text{—}16,7 \text{ Тл}^{-1}$ (табл. 2).

ВИСНОВКИ

Вивчено структурно-фазовий стан плівкових матеріалів на основі Co та Cu до та після деформації $\epsilon_p = (0\text{—}0,4) \%$. Встановлено, що пружна деформація практично не впливає на кристалічну структуру і не змінює фазовий стан систем.

Досліджено вплив магнітного поля на тензорезистивні властивості одно- та двошарових систем на основі Co та Cu . Встановлено, що перпендикулярне магнітне поле призводить до збільшення коефіцієнту тензочутливості, що можна пояснити динамікою руху електронів у магнітному полі (більш детально див. [13]).

Робота виконана у рамках держбюджетної тематики № 0112U001381 Міністерства освіти і науки України (2012—2014 р. р.).

Таблиця 2

Величина γ_I і МККТ для плівок Co та двошарових плівкових систем Cu/Co

Зразок	Загальна товщина, нм	Середнє значення γ_I		$\beta_{\gamma_{IV}}$, Тл^{-1}
		$B = 0$	$B = 30 \text{ мТл}$	
Одношарові плівки				
$\text{Co}(30)/\text{PI}$	30	1,4	1,1	7,1
$\text{Co}(36)/\text{PI}$	36	2,9	3,7	9,2
$\text{Co}(40)/\text{PI}$	40	2,2	1,1	16,6
Двошарові плівки				
$\text{Cu}(10)/\text{Co}(30)/\text{PI}$	40	1,3	1,9	15,4
$\text{Cu}(20)/\text{Co}(30)/\text{PI}$	50	2,2	3,3	7,6
$\text{Cu}(40)/\text{Co}(30)/\text{PI}$	70	1,6	2	16,7
$\text{Cu}(50)/\text{Co}(30)/\text{PI}$	80	2,7	3,3	7,4

ЛІТЕРАТУРА

1. Проценко С. І. Магнітодеформаційний ефект у тонких металевих плівках // Ж. нано- та електрон. фіз. — 2009. — Т. 1, № 2. — С. 7—10.
2. Makukha Z. M., Protsenko S. I., Odnodvoret L. V., Protsenko I. Yu. Magneto-strain effect in double-layer film system // J. Nano-Electron. Phys. — 2012. — Vol. 4, No. 2. — P. 02043 p.
3. Захарченко Н. І., Семенько М. П. Влияние магнитного поля на тензорезистивный эффект в аморфных сплавах на основе железа // ФММ. — 2007. — Т. 104, № 2. — С. 150—154.
4. Wang W. L., Liao K. J., Hu C. G., Wang S. X., Kong C. Y., Liao H. Y. Study on piezoresistive effect of diamond films under magnetic field // Sens. Actuat. A — Phys. — 2003. — Vol. 108, No. 55. — P. 55—58.
5. Golovin Y. I. Magnetoplastic effect in solids // Solid State Phys. — 2004. — Vol. 46, No. 5. — P. 789—824.
6. Огородников В. В., Малышевский К. В. Молекулярно-динамическое моделирование растяжения нанокристалла NiAl // Металлофиз. новейшие технол. — 2001. — Т. 23, № 8. — С. 1029—1039.
7. Hoo-Jeong Lee, Ping Zhang, John C. Bravman. Tensile failure by grain thinning in micromachined aluminum thin films // J. Appl. Phys. — 2003. — Vol. 93, No. 3. — P. 1443—1451.
8. Read D. T. Tension-tension fatigue of cooper thin films // Int. J. Fatigue. — 1998. — Vol. 20, No. 3. — P. 203—209.
9. Protsenko S. I., Velykodnyi D. V., Keraj V. A., Desai M. S., Panchal C. J., Protsenko I. Yu. Electrophysical properties of Cu/Cr and Fe/Cr film systems within elastic and plastic deformation range // J. Mater. Sci. — 2009. — Vol. 44, No. 18. — P. 4905—4910.
10. Tishchenko K. V., Odnodvoret L. V., Protsenko I. Yu. Electrophysical properties of nanodimensional Pt thin films // Metallofiz. noveishie tekhnol. — 2011. — No. 33. — 1351 p.
11. Горелик С. С., Расторгуев Л. Н., Скаков Ю. А. Рентгенографический и электронографический анализ металлов. Приложения. — М.: Металлургия, 1970. — 3 с.
12. Protsenko I. Yu., Odnodvoret L. V., Tyschenko K. V., Shumakova M. O. Features strain properties thin-films: anomalous small of strain coefficient // J. Mech. Eng. Technol. — 2013. — Vol. 1, No. 1. — P. 34—39.
13. Сынашенко О. В., Ткач Е. П., Бурый И. П., Ордворец Л. В., Проценко С. И., Шумакова Н. И. Магниторезистивные свойства многослойных наноразмерных пленочных систем // ВАНТ. Серия: Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники. — 2009. — № 6. — С. 169—174.

LITERATURA

1. Protsenko S. I. Magnitodeformacijnij efekt u tonkih metalvih plivkah // Zh. nано- та електрон. фіз. — 2009. — Vol. 1, No. 2. — P. 7—10.
2. Makukha Z. M., Protsenko S. I., Odnodvoret L. V., Protsenko I. Yu. Magneto-strain effect in double-layer film system // J. Nano-Electron. Phys. — 2012. — Vol. 4, No. 2. — P. 02043.
3. Zaharchenko N. I., Semenko M. P. Vliyanie magnitnogo polya na tenzorezistivnyj effekt v amorfnyh splavah na osnove zheleza // FMM. — 2007. — Vol. 104, No. 2. — P. 150—154.
4. Wang W. L., Liao K. J., Hu C. G., Wang S. X., Kong C. Y., Liao H. Y. Study on piezoresistive effect of diamond films under magnetic field // Sens. Actuat. A — Phys. — 2003. — Vol. 108, No. 55. — P. 55—58.
5. Golovin Y. I. Magnetoplastic effect in solids // Solid State Phys. — 2004. — Vol. 46, No. 5. — P. 789—824.
6. Ogorodnikov V. V., Malyshevskij K. V. Molekulyarno-dinamicheskoe modelirovanie rastyazheniya nanokristala NiAl // Metallofiz. noveishie tehno. — 2001. — Vol. 23, No. 8. — P. 1029—1039.
7. Hoo-Jeong Lee, Ping Zhang, John C. Bravman. Tensile failure by grain thinning in micromachined aluminum thin films // J. Appl. Phys. — 2003. — Vol. 93, No. 3. — P. 1443—1451.
8. Read D. T. Tension-tension fatigue of cooper thin films // Int. J. Fatigue. — 1998. — Vol. 20, No. 3. — P. 203—209.
9. Protsenko S. I., Velykodnyi D. V., Keraj V. A., Desai M. S., Panchal C. J., Protsenko I. Yu. Electrophysical properties of Cu/Cr and Fe/Cr film systems within elastic and plastic deformation range // J. Mater. Sci. — 2009. — Vol. 44, No. 18. — P. 4905—4910.
10. Tishchenko K. V., Odnodvoret L. V., Protsenko I. Yu. Electrophysical properties of nanodimensional Pt thin films // Metallofiz. noveishie tekhnol. — 2011. — No. 33. — 1351 p.
11. Gorelik S. S., Rastorguev L. N., Skakov Yu. A. Rentgenograficheskij i elek-tronograficheskij analiz metallov. Prilozheniya. — М.: Metallur-giya, 1970. — 3 p.
12. Protsenko I. Yu., Odnodvoret L. V., Tyschenko K. V., Shumakova M. O. Features strain

- properties thin-films: anomalous small of strain coefficient // J. Mech. Eng. Technol. — 2013. — Vol. 1, No. 1. — P. 34—39.
13. Synashenko O. V., Tkach E. P., Buryk I. P., Odnodvorec L. V., Procenko S. I., Shumakova N. I. Magnitorezistivnye svojstva mnogoslojnyh nanorazmernih plenochnyh sistem // VANT. Seriya: Vakuum, chistye materialy, sverhprovodniki. — 2009. — No.6. — P. 169 —174.