

## Тензорезистивні властивості плівкових наноструктур на основі пермалою та срібла

Д.О. Шуляренко, О.В. Пилипенко, К.В. Тищенко, І.М. Пазуха\*, Л.В. Однодворець

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

(Одержано 15.12.2017, у відредагованій формі – 14.01.2017, опубліковано online 15.02.2018)

У роботі представлені результати дослідження тензорезистивних властивостей (інтегральний  $(\gamma)_{int}$  і диференціальний  $(\gamma)_{dif}$  коефіцієнти тензочутливості) тонкоплівкових наноструктур на основі пермалою  $Ni_{80}Fe_{20}$  (Py) та срібла (Ag), отриманих одночасною конденсацією компонент з двох незалежних джерел, а також дані для складових компонентів системи. Визначені основні закономірності тензорезистивних властивостей Py та Ag у діапазоні товщин  $d = 10-60$  нм. Показано, що на концентраційних залежностях  $(\gamma)_{int}$  спостерігається максимум при  $c_{Ag} = 30-35$  ат.%, прояв якого пов'язаний зі структурними змінами в плівковій системі, пов'язаними зі змінами характеру розподілу кристалітів та їх середнього розміру при зміні концентрації компонент.

**Ключові слова:** Тонкоплівкова наноструктура, Одночасна конденсація, Тензорезистивні властивості, Концентраційна залежність.

DOI: 10.21272/jnep.10(1).01011

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

### 1. ВСТУП

Сучасні тенденції розвитку сенсорної електроніки вимагають комплексного підходу до вивчення електрофізичних властивостей чутливих елементів з метою створення плівкових тензорезисторів із стабільними робочими характеристиками.

Тонкоплівкові наноструктури на основі феромагнітних сплавів  $Ni_xFe_{1-x}$  та благородних металів (Au, Ag чи Cu) використовуються як чутливі елементи сенсорів неелектричних величин, у цифрових пристроях магніторезистивної пам'яті тощо [1, 2]. На даний час тонкоплівкові наноструктури на основі сплаву  $Ni_{80}Fe_{20}$  та Ag, знайшли практичне застосування при виготовленні сенсорів магнітного поля, що працюють в діапазоні полів від 50 мТл до 10 Тл [3].

За останні роки були проведені експериментальні дослідження, присвячені вивченню магнітних та магніторезистивних властивостей систем, сформованих на основі феромагнітних сплавів  $Ni_xFe_{1-x}$  та благородних металів. Зокрема, систематично вивчені явища гігантського магнітоопору в мультиштатах та наноструктурах на основі сплавів  $Ni_xFe_{1-x}$  та благородних металів дозволили визначити, що його величина залежить від таких факторів як концентрація компонент магнітного сплаву, метод та умови отримання, процес термовідпалювання та ін. [4, 5]. Однак, практично відсутні роботи, присвячені вивченню їх механічних та тензорезистивних властивостей.

У роботі була поставлена задача дослідження тензорезистивних властивостей плівкових зразків на основі пермалою  $Ni_{80}Fe_{20}$  (Py) та срібла (Ag), отриманих у вакуумі методом одночасної конденсації, з метою створення на їх основі чутливого елемента сенсора деформації, в якому б був мінімізований вплив процесів дифузії та фазоутворення на робочі характеристики.

### 2. МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Тонкоплівкові зразки отримувалися методом електронно-променевої конденсації одночасно з двох незалежних джерел (пермалою 79 нм (79-80 мас.% Ni, 2-5 мас.% Mo, 13-16 мас.% Fe) та Ag) у вакуумній камері приладу ВУП-5М при тиску газів залишкової атмосфери  $10^{-4}$  Па. Дві серії зразків загальною товщиною 25 та 55 нм і осаджувалися на полістиролові підкладки в одному циклі зі швидкістю  $\omega = 0,1$  нм/с. Схематичне зображення системи «випаровувачі-підкладкотримач» представлена на рис. 1.

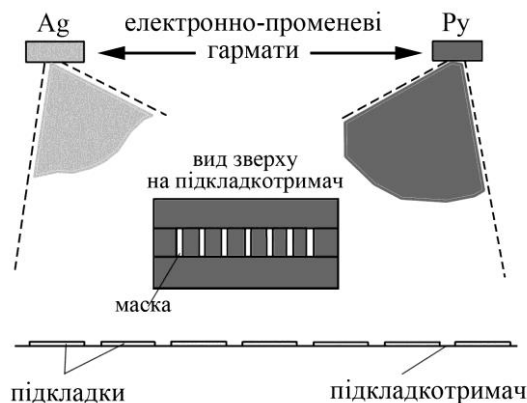
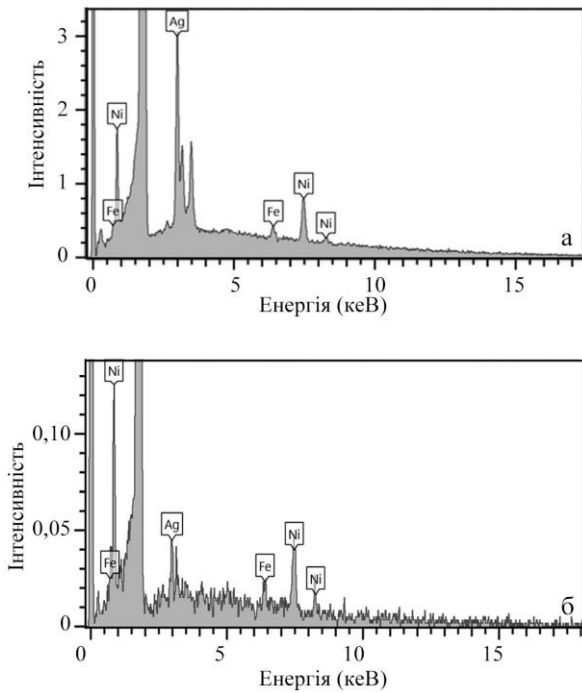


Рис. 1 – Схематичне зображення системи випаровувачі-підкладкотримач, що була використана для формування методом одночасної конденсації плівкових систем

Хімічний склад отриманих плівкових контролювався методом рентгенівського енергодисперсійного аналізу (прилад Tescan VEGA3) з точністю до 1 ат.% приклад енергодисперсійних спектрів представлено на рис. 2. У результаті були отримані плівкові зразки на основі пермалою та срібла в діапазоні концентрації  $c_{Ag} = 15-80$  ат.%. Дослідження тензорезистивних властивостей проводилося у свіжосконденсованих зразках після конденсації протягом 3-х циклів «навантаження ↔ зняття

\* iryna.pazukha@gmail.com



**Рис. 2** – Енергодисперсійні спектри для плівкових наноструктур на основі пермалю та срібла загальною товщиною 55 нм при концентрації  $c_{Ag} = 34$  (а) та 63 ат. % (б)

навантаження» у деформаційному інтервалі  $\Delta \varepsilon_l = 0-1$  %. Розрахунки інтегрального  $(\gamma)_{int}$  та диференціального  $(\gamma)_{dif}$  коефіцієнтів поздовжньої тензочутливості здійснювалися згідно [6] відповідно за співвідношеннями:  $(\gamma)_{int} = (1/R(0)) \cdot (\Delta R/\Delta \varepsilon_l)$  та  $(\gamma)_{dif} = (1/R_i) \cdot (dR_i/d\varepsilon_{li})$ , де  $R(0)$  – опір при нульовій поздовжній деформації;  $R_i$  і  $dR_i$  – електричний опір плівкового зразка на початку деформаційного інтервалу  $\Delta \varepsilon_l$  і його зміна при збільшенні поздовжньої деформації на  $d\varepsilon_{li}$ , відповідно.

### 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Типові деформаційні залежності  $\Delta R/R(0)$  та  $\gamma_{dif}$  від  $\varepsilon_l$  для компонентів досліджуваної плівкової структури для деформаційного інтервалу  $\varepsilon_l = 0-1$  % на прикладі плівок Ru(25)/П та Ag(25)/П представлені на рис. 3 і 4 відповідно.

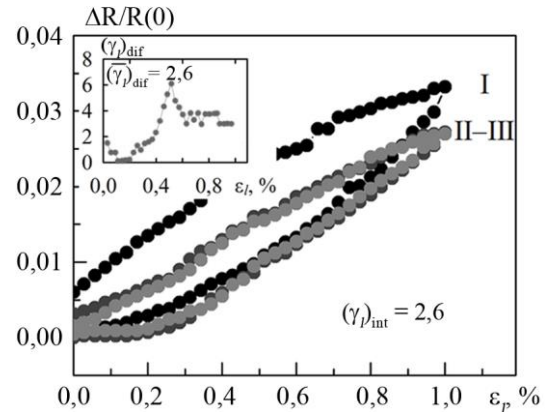
Оскільки, детальні дослідження тензорезистивних властивостей компонентів плівкової системи Ru та Ag було проведено у наших передніх роботах [7, 8], то наведемо лише основні закономірності тензорезистивних властивостей для одношарових плівок пермалю та срібла:

1. Розрахунки величини  $(\gamma)_{int}$ , показали, що плівки Ru характеризуються дещо більшим у порівнянні з плівками Ag значенням інтегрального коефіцієнту поздовжньої тензочутливості.

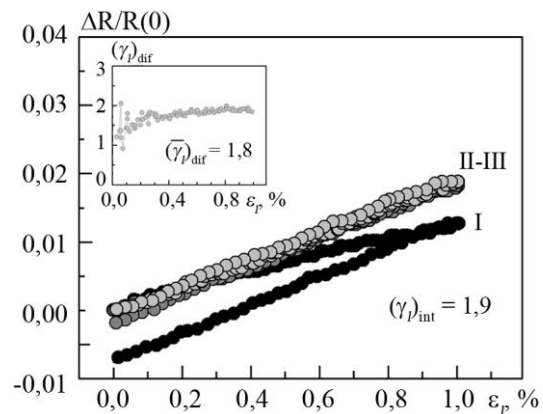
2. Для плівки Ag пружна деформація має місце до величини  $\varepsilon_l \cong 1\%$ , а для Ru величина межі переходу від пружної до пластичної деформації  $\varepsilon_{пер}$  поступово зменшується з 0,75 до 0,2 із ростом товщини в інтервалі  $d = 10-55$  нм.

3. Розмірна залежність для одношарових плівок Ag типова для одношарових плівок металів (при збі-

льшенні товщини зразків відбувається поступове зменшення величини інтегрального коефіцієнту тензочутливості). У той час для плівок Ru характерне зростання величини  $(\gamma)_{int}$  при збільшенні товщини, оскільки дослідження проводилися як в області пружності, так і в області пластичності. Прояв ефектів пластичності призводить до зміни характеру механізмів розсіювання електронів і, як наслідок, не тільки збільшення опору зразків, але і його чутливості до деформації ( $dR/d\varepsilon$ ) відносно збільшення  $R$  [9].



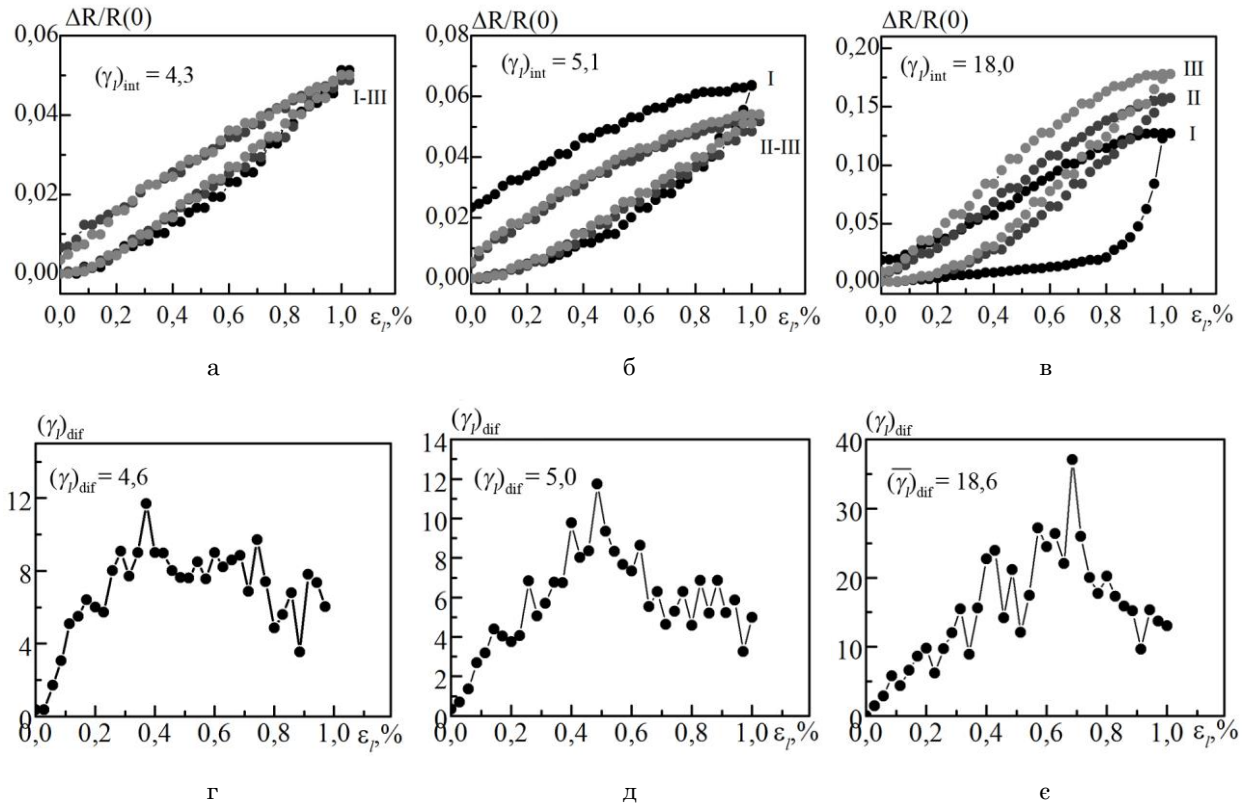
**Рис. 3** – Залежність  $\Delta R / R$  та  $(\gamma)_{dif}$  від  $\varepsilon_l$  (вставка) для плівки Ru(25нм)/П для деформаційного інтервалу  $\Delta \varepsilon_l = (0 - 1)$  %. Римськими цифрами позначені номери циклів деформації



**Рис. 4** – Залежність  $\Delta R / R$  від  $\varepsilon_l$  та  $(\gamma)_{dif}$  (вставка) для плівки Ag(25)/П

На рис. 5 наведені серії деформаційних залежностей для трьох циклів «навантаження ↔ зняття навантаження» та залежності  $(\gamma)_{int}$  від  $\varepsilon_l$  для останнього циклу для плівок з концентрацією  $c_{Ag} = 20, 55, 75$  ат.%. Як видно з рис. 5 форма деформаційних залежностей залежить від концентрації компоненту плівкової структури. При концентрації  $c_{Ag} = 75$  ат.%, тенденція до стабілізації тензорезистивних властивостей спостерігається вже на першому деформаційному циклі. Величина  $(\gamma)_{int}$  практично не залежить від його номеру. При цьому слід зазначити також, що характер деформаційних залежностей для плівкових наноструктур з концентрацією  $c_{Ag} = 75$  ат.% до аналогічної залежності для тонких одношарових плівок Ag (рис. 4).

При збільшенні концентрації пермалю відбувається поступове розширення деформаційної петлі.

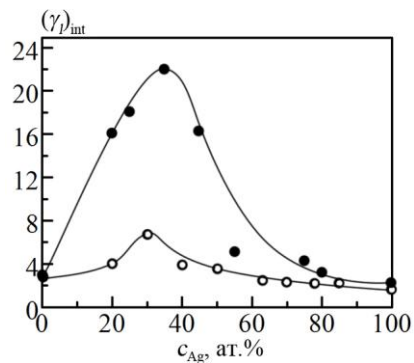


**Рис. 5** – Залежність  $\Delta R / R(0)$  (а-в) та  $(\gamma)_{diff}$  для першого деформаційного циклу (г-е) від  $\epsilon_p$  для плівкових наноструктур на основі Ru та Ag загальною товщиною 25 нм для деформаційного інтервалу  $\Delta \epsilon_p = (0 - 1) \%$  при  $c_{Ag}$ , ат. %: 75 (а, г), 55 (б, д), 20 (в, е)

При концентрації  $c_{Ag} = 55$  ат.%, перший деформаційний цикл відрізняється від подальших, а тенденція до стабілізації починає проявлятися лише після другого циклу. В той же час характерною особливістю залежностей  $\Delta R / R(0)$  від  $\epsilon_p$  для зразка з  $c_{Ag} = 20$  ат.% є те, що всі три цикли «навантаження  $\leftrightarrow$  зняття навантаження» відрізняються один від одного, а величина  $(\gamma)_{int}$  збільшується з номером деформаційного циклу. Це свідчить про той факт, що стабілізаційні процеси не завершуються на третьому циклі.

Аналіз отриманих даних дозволяють зробити висновки про те, що в тензорезистивних властивостях плівкових наноструктур на основі Ru та Ag певну роль повинен відігравати концентраційний ефект, а також структурні зміни, які відбуваються у плівці при деформації. Оскільки діапазон деформації обмежується 1%, то суттєвий вплив на тензоефект мікроструктурних змін мало ймовірний. Вплив розмірного фактору в даному випадку проявляється лише з точки зору прояву внутрішнього розмірного ефекту, який реалізується у маядасівському розсіюванні на межах зерен. Оскільки компоненти досліджуваних зразків срібло та пермалой мають різний тип кристалічної структури (крупнокристалічна у плівок Ag та нанорозмірна, лабіринтного типу у Ru), то в плівкових наноструктурах, сформованих на їх основі, швидше за все буде відбуватися зміна характеру розподілу кристалітів та їх середнього розміру в залежності від  $c_{Ag}$ . Зовнішній розмірний ефект, який пов'язаний з фуксівським розсіюванням на зовнішніх поверхнях не розглядається оскільки всі зразки

мають однакову товщину. Ці процеси детально проаналізовані в роботі [10], автори якої показали, що зовнішній розмірний ефект визначає розмірну залежність  $\gamma$ , а внутрішній розмірний ефект – абсолютну величину  $\gamma$ .



**Рис. 6** – Концентраційна залежність інтегрального коефіцієнта тензочутливості для плівкових систем на основі Ru та Ag загальною товщиною 25 (●) і 55 (○) нм.

На рис. 6 представлена концентраційна залежність інтегрального коефіцієнта тензочутливості при загальній товщині плівкових зразків 30 та 55 нм (аналогічна за характером залежності отримана авторами [6] для плівкових матеріалів на основі Fe і Au). Аналіз залежності показує, що при  $d = 25$  нм збільшення вмісту пермалой у складі наноструктурних плівок (Ru+Ag)/Pi призводить до різкого збільшення інтегрального коефіцієнта тензочутливості. Максимум на концентраційні залежності  $(\gamma)_{int}$  спо-

стерігається при  $c_{Ag} = 35$  ат.%. Достатньо значне збільшення величини  $(\gamma)_{int}$  швидше за все пов'язано зі змінами, які відбуваються в кристалічній структурі зразків при зміні концентрації компонент у плівковому зразку, та, ймовірно, зі змінами процесу зерномежевого розсіювання, який, як зазначалося вище, й визначає абсолютну величину коефіцієнта тензочутливості. В той же час при збільшенні товщини досліджуваних зразків на залежностях  $(\gamma)_{int}$  від  $c_{Ag}$  зростання величини інтегрального КТ не на стільки суттєве, хоча й має місце прояв максимуму при  $c_{Ag} = 30$  ат.% ( $(\gamma)_{int} = 6,7$ ). Це свідчить про той факт, що у величині інтегрального коефіцієнта тензочутливості відіграють значну роль не тільки концентраційні, а й розмірні ефекти.

Відмітимо також, що аналогічно до попередньо представлених досліджень для одношарових плівок Py та Ag на залежностях диференціального коефіцієнта

тензочутливості  $(\gamma)_{dif}$  спостерігається максимум, який відповідає межі переходу пружна/пластична деформація. Зазначимо, що при зміні концентрації компонент у досліджуваних зразках на основі пермалою та срібла відбувається зміщення межі переходу пружна/пластична деформація, що також швидше за все пов'язано зі структурними змінами у зразках.

### ПОДЯКА

Автори висловлюють подяку проф. Проценку І.Ю. за плідну дискусію та цінні зауваження.

Робота виконана в рамках держбюджетної теми 0116U002623 (2016-18 рр.) Міністерства освіти і науки України.

## Strain Properties of Thin Film Nanostructures Based on Permalloy and Silver

D.O. Shuliarenko, O.V. Pylypenko, K.V. Tyschenko, I.M. Pazukha, L.V. Odnodvoretz

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

The results of investigation strain properties (integral  $(\gamma)_{int}$  and differential  $(\gamma)_{dif}$  strain coefficients) of thin film nanostructures based on permalloy  $Ni_{80}Fe_{20}$  (Py) silver (Ag), prepared by method of co-evaporation from independent sources, and results for components of the systems are presented. The main peculiarities of Py and Ag strain properties in the range of thicknesses  $d = 10-60$  nm are determinate. It has been shown that the maximum at the  $c_{Ag} = 30-36$  at.% is observed at the concentration dependences of  $(\gamma)_{int}$ . The presence of a maximum is due to the structural changes in the film systems.

**Keywords:** Thin film nanostructures, Co-evaporation, Strain properties, Concentration dependence.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Vijay V. Kondalkara, Xiang Lia, Yanga Keekeun Leea, *Procedia Engineer.* **168**, 675 (2016).
2. Yen Guo, Yong Deng, Shan X. Wang, *Sens. Actuat. A: Phys.* **263**, 159 (2017).
3. L. Vieux-Rochaz, R. Cuchet, M.H. Vaudaine *Sens. Actuat. A: Phys.* **81**, 53 (2000).
4. Lei Chan, You Zhou, Chng Lei, Zhi-Min Zhou, *Mater. Sci. Eng. B* **101**, 172 (2010).
5. A. Tiwari, M.S. Kumar, *J. Magn. Magn. Mater.* **303**, e165 (2006).
6. O.V. Pylypenko, L.V. Odnodvoretz, M.O. Shumakova, I.Yu. Protsenko, *Prob. At. Sci. Tech.* **105**, 131 (2016).
7. I.M. Pazukha, Z.M. Makukha, Yu.M. Shabelnyk, I.Yu. Protsenko, *J. Nano- Electron. Phys.* **4**, 03020 (2012).
8. O.V. Pylypenko, I.M. Pazukha, A.S. Ovrutskyi, L.V. Odnodvoretz, *J. Nano- Electron. Phys.* **8**, 03022 (2016).
9. K.V. Tyschenko, L.V. Odnodvoretz, I.Yu. Protsenko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* **33**, 10, 1351 (2011).
10. C.R. Tellier, A.J. Tosser, *Size Effects in Thin Films*, 310 (Ch.I – A. – O. – N-Y: Elsevier: 1982).