

PACS numbers: 62.23.Kn, 68.55.jd, 68.60.Bs, 68.65.Ac, 73.50.Lw, 73.61.At, 81.15.Ef

## Особливості тензорезистивних властивостей тонких металевих плівок при пружній і пластичній деформації

Д. В. Великодний, К. В. Тищенко, І. Ю. Проценко

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

Представлено результати експериментальних досліджень тензорезистивного ефекту в одношарових плівках і дво- та тришарових плівкових системах на основі Cr і Cu або Fe та Pd і Gd в інтервалі дводеформації  $\Delta\varepsilon_{/1} = 0-1\%$  і  $\Delta\varepsilon_{/2} = 0-2\%$ . Проаналізовано залежність межі переходу від пружної до пластичної деформації в досліджуваних плівках від товщини та концентрації компонентів у багатошарових плівкових системах. Встановлено, що пластична деформація в одному з шарів плівкової системи може викликати аналогічну деформацію у всій плівковій системі, навіть якщо для інших шарів діапазон деформації ще не досягнув межі переходу пружня-пластична деформація.

The results of experimental studies of tensorresistive effect in single-layer films and two- and three-layer film systems based on Cr and Cu or Fe and Pd and Gd in intervals of two-deformation occurrence,  $\Delta\varepsilon_{/1} = 0-1\%$  i  $\Delta\varepsilon_{/2} = 0-2\%$ , are presented. The dependence of the limit of transition from elastic-to-plastic deformation in the studied films on thickness and concentration of components in the multilayer film systems is analysed. As revealed, the plastic deformation in one of the film-system layers can cause similar deformation in the entire film system, even if, for other components, the strain range does not reach the limit of the elastic-plastic deformation transition.

Представлены результаты экспериментальных исследований тензорезистивного эффекта в однослойных плёнках и двух- и трёхслойных плёночных системах на основе Cr и Cu или Fe и Pd и Gd в интервале двудеформации  $\Delta\varepsilon_{/1} = 0-1\%$  и  $\Delta\varepsilon_{/2} = 0-2\%$ . Проанализирована зависимость границы перехода от упругой к пластической деформации в исследуемых плёнках от толщины и концентрации компонентов в многослойных плёночных системах. Установлено, что пластическая деформация одного из слоёв плёночной системы вызывает аналогичную деформацию во всей плёночной системе, даже если для других слоёв диапазон деформации ещё не достиг границы перехода упругая-пластическая деформация.

**Ключові слова:** плівкові системи, тензоефект, пружня і пластична деформація, деформація переходу, коефіцієнт тензочутливості.

(Отримано 7 липня 2011 р.)

## 1. ВСТУП

Значна увага дослідників до тонкоплівкових матеріалів обумовлена можливостями їх практичного застосування для створення чутливих елементів сенсорів неелектричних величин з покращеними характеристиками [1–3]. Дослідження останніх років [4–7] відображають тенденцію пошуку різних матеріалів з покращеними тензорезистивними характеристиками і, зокрема, з підвищеною термостійкістю, більшою величиною коефіцієнта тензочутливості (КТ) і інтервалу пружньої деформації та лінійністю робочих характеристик. У зв'язку з цим вивчення механічних термо- і тензорезистивних, магнеторезистивних, оптичних та інших властивостей тонких плівок залишається актуальними і на даний час (див., наприклад, [8], [11–14]). Маловивченими залишаються питання, пов'язані з механізмом пластичної деформації та впливом на значення межі переходу від пружньої до пластичної деформації таких параметрів як товщина плівок, концентраційні співвідношення компонентів плівкових систем та ступінь дисперсності плівки.

## 2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

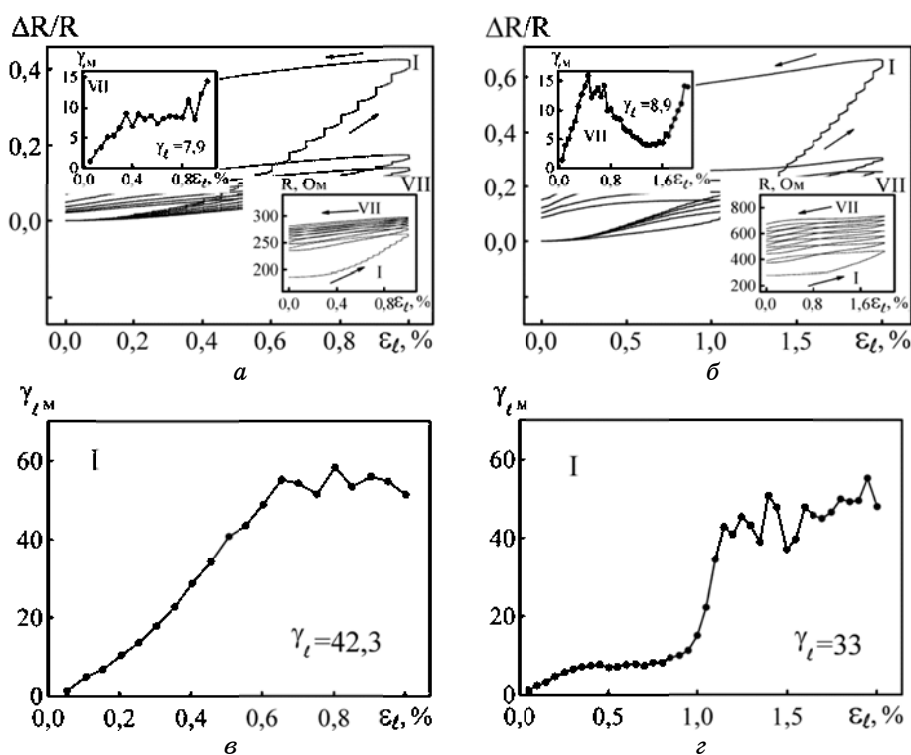
Конденсація плівкових матеріалів Cu, Cr, Gd, Pd та Fe, а також дослідження їх тензорезистивних властивостей виконувалися у вакуумній камері устави ВУП-5М (ступінь вакууму  $\cong 10^{-4}$  Па) з використанням сучасних засобів автоматизації фізичного експерименту — комп'ютеризованої системи збору даних та управління експериментом, що більш детально описано в роботах [12–14]). Це дало можливість одержати принципово нові експериментальні дані, в тому числі, дослідити зміну значень миттєвого ( $\gamma_{\ell m} = \frac{1}{R_i} \frac{dR_i}{d\varepsilon_{li}}$ ) та середньо-

го ( $\gamma_{\ell}$ ) КТ при великій кількості деформаційних циклів. Як відмічалося в роботах [12, 13] величина  $\gamma_{\ell}$  залежить від номера циклю «навантаження–зняття навантаження» і, починаючи з V–VII деформаційного циклів виходить на насиченість. Саме тому, як найбільш характерні, в роботі наводяться графіки залежності  $\gamma_{\ell m}$  від  $\varepsilon_{\ell}$  для першого та останнього деформаційних циклів. Кристалічна структура вивчалася методами електронної мікроскопії та електронографії (прилад ПЕМ-125К).

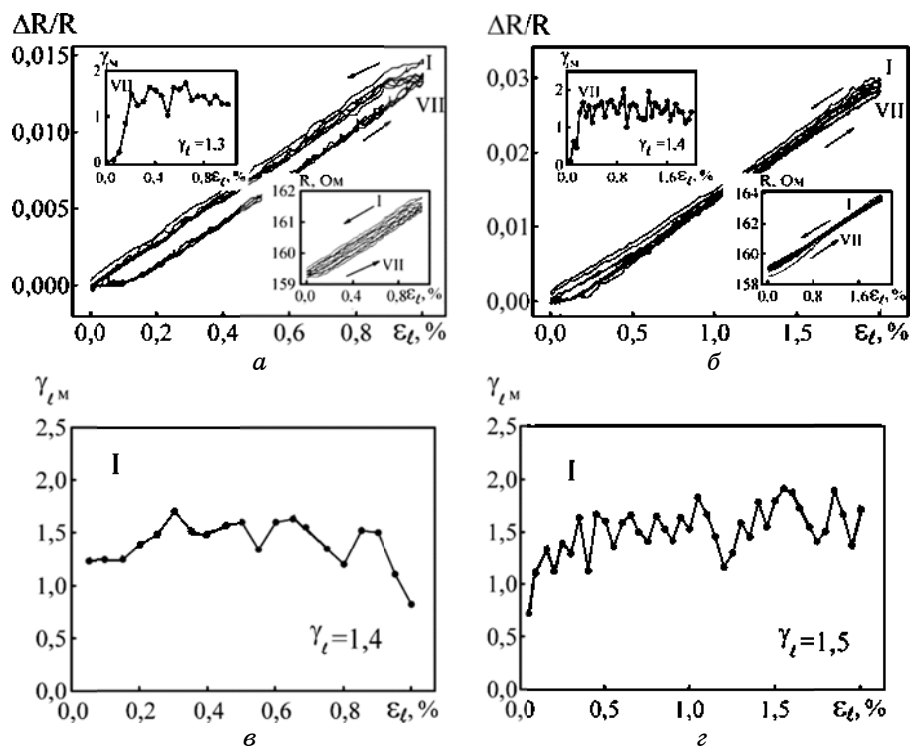
### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Нами виконано дослідження тензорезистивних властивостей плівкових матеріалів на основі Cr і Cu або Fe та Pd і Gd. Структурні дослідження вказують на те, що плівки Cr, Fe і Pd мають кристалічну ґратницю, яка відповідає масивним зразкам, а плівки Gd малої товщини знаходяться в аморфному стані ( $\alpha$ -Gd), а відносно товсті мають двофазний склад  $\alpha$ -Gd + GdH<sub>2</sub>.

**Одношарові плівки.** На рисунках 1–3 наведені серії типових деформаційних залежностей для плівок Cr, Gd і Pd, на основі яких виконувався розрахунок залежностей  $\gamma_l$  від  $\epsilon_l$  для двох інтервалів деформації  $\Delta\epsilon_l = 0-1\%$  та  $\Delta\epsilon_l = 0-2\%$ . Особливість даних залежностей — відмінність I деформаційного циклу «навантаження–зняття навантаження» в діапазоні деформацій  $\Delta\epsilon_l = 0-1\%$  від подальших, що пояснюється протіканням різних релаксаційних процесів (частинний поворот зерен, мікропластична деформація, перерозподіл і рух дефектів кристалічної будови та сторонніх атомів). При подальших



**Рис. 1.** Залежність  $\Delta R/R$ ,  $\gamma_l$  і  $R$  від  $\epsilon_l$  для  $\Delta\epsilon_{l1} = 0-1\%$  (а, б) і  $\Delta\epsilon_{l2} = 0-2\%$  (в, г) для плівки Cr(30 нм)/П. Римськими цифрами позначені номери деформаційних циклів.



**Рис. 2.** Залежність  $\Delta R/R$ ,  $\gamma_I$  і  $R$  від  $\varepsilon_I$  для  $\Delta\varepsilon_{I1} = 0-1\%$  (а, б) і  $\Delta\varepsilon_{I2} = 0-2\%$  (в, г) для плівки  $a\text{-Gd} + \text{GdH}_2(75)/\Pi$ .

циклях спостерігається певна стабілізація тензорезистивних властивостей плівкових систем.

Значний інтерес при дослідженні тензорезистивних властивостей становить саме I деформаційний цикл, оскільки при його реалізації виявляється механізм переходу від пружної до пластичної деформації. При цьому величина деформації переходу залежить від товщини плівки, зменшуючись з товщиною. Про перехід між типами деформації свідчить не тільки зміна кута нахилу деформаційної залежності та залежності  $\gamma_I$  і  $R$  від  $\varepsilon_I$ , а й поява сходинок, що з'являються в області пластичної деформації під час зупинок мікрогвинта на кожній поділці (через 0,05% деформації) на 10 с і відсутні в області пружної деформації.

Слід зазначити, що певні труднощі при інтерпретації одержаних результатів пов'язано з тим, що на величину  $\gamma_I$  починає впливати фактор, який раніше лишався поза увагою, а саме, межа переходу пружня/пластична деформація. Тому  $\gamma_I$  при певній величині деформації вже не може, без урахування величини переходу пружня/пластична деформація, виступати в ролі узагальненої характеристики тензоре-

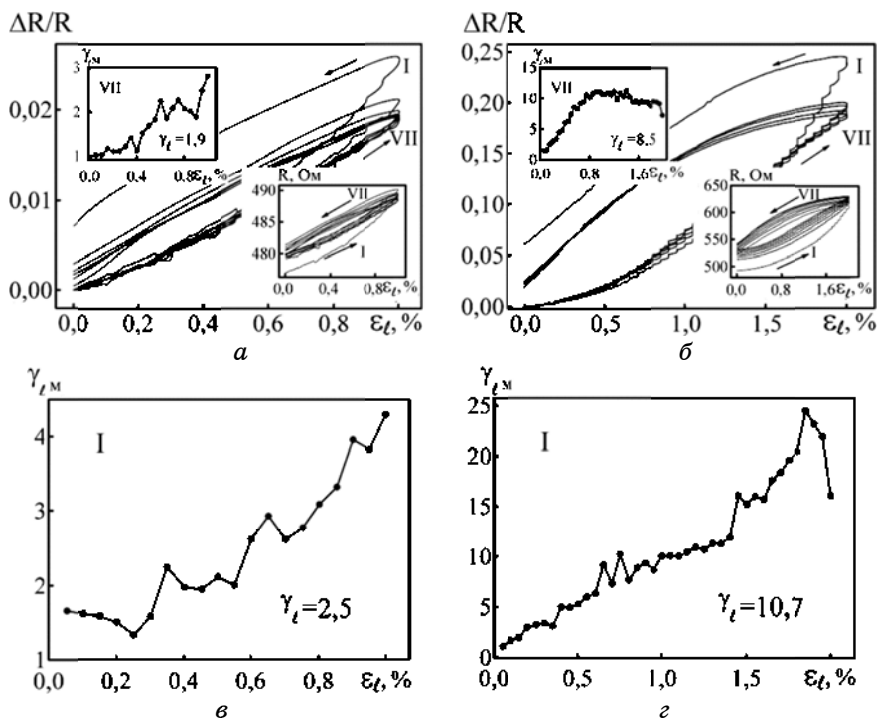


Рис. 3. Залежність  $\Delta R/R$ ,  $\gamma_I$  і  $R$  від  $\epsilon_I$  для  $\Delta\epsilon_{I1} = 0-1\%$  (а, б) і  $\Delta\epsilon_{I2} = 0-2\%$  (в, г) для плівки Pd(30)/П.

зистивних властивостей матеріялу. Відповідно до цього більш коректним буде порівняння  $\gamma_I$  для областей пружної деформації, а також  $\gamma_I$  при загальній деформації  $\Delta\epsilon_I = 0-1\%$  та  $\Delta\epsilon_I = 0-2\%$ , що дозволяє дати узагальнену характеристику досліджуваних процесів.

**Плівкові системи на основі Cr і Cu або Fe та Pd/Gd/Pd/П.** Виходячи з типових залежностей для зазначених плівкових систем, можна зробити відповідний висновок, що діапазон пружної деформації залежить від загальної товщини плівкової системи та зменшується зі збільшенням концентрації атомів плівки з меншою межею пружності.

Наприклад, у плівковій системі Cu/Cr/П (рис. 4) межа переходу від пружної (квазіпружної) до пластичної деформації може змінюватися в межах від 0,4 до 1,5% залежно від товщини плівки Cr (хоча зазначимо, що для плівки Cu дана межа переходу знаходиться за межами 2% деформації). Значення величини цього переходу зменшується зі збільшенням товщини шару Cr, що проілюстровано в табл. 1. У той же час межа переходу до пластичної деформації для плівкової системи Fe/Cr/П (рис. 5) знаходиться в значно вузькому діапазоні деформацій від 0,15 до 0,4% і збільшується зі збільшен-

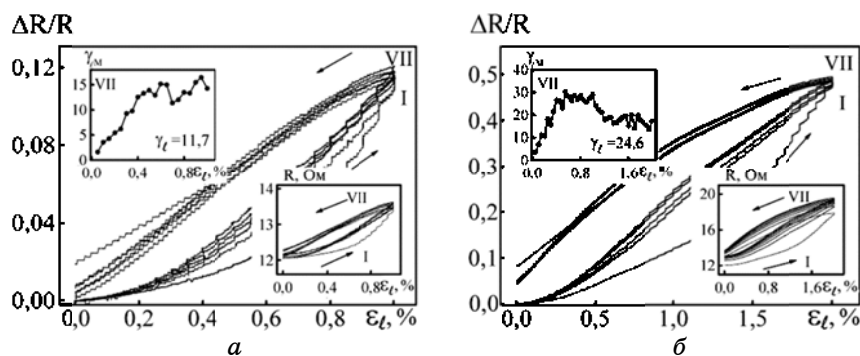


Рис. 4. Залежність  $\Delta R/R$ ,  $\gamma_I$  і  $R$  від  $\varepsilon_I$  для  $\Delta\varepsilon_{I1} = 0-1\%$  (а) і  $\Delta\varepsilon_{I2} = 0-2\%$  (б) для плівки Cu(20)/Cr(30)/Π ( $C_{Cu} = 59$  ат. %).

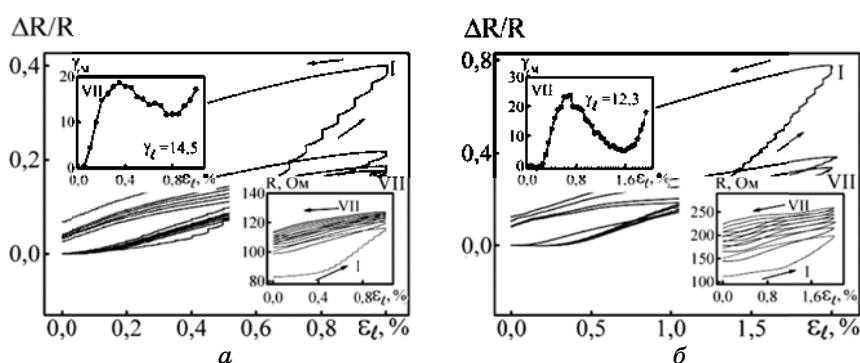


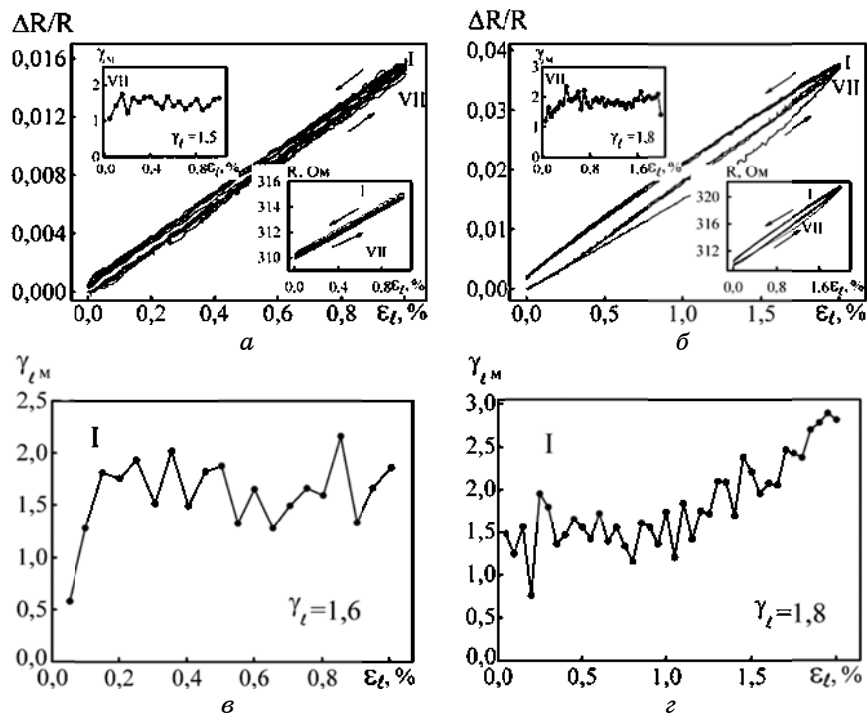
Рис. 5. Залежність  $\Delta R/R$ ,  $\gamma_I$  і  $R$  від  $\varepsilon_I$  для  $\Delta\varepsilon_{I1} = 0-1\%$  (а) і  $\Delta\varepsilon_{I2} = 0-2\%$  (б) для плівки Fe(20)/Cr(30)/Π ( $C_{Fe} = 59$  ат. %).

ням концентрації атомів Cr у плівковій системі (табл. 2).

До особливостей деформаційних залежностей плівкової системи Cu/Cr можна віднести те, що I деформаційний цикл у переважній більшості відрізняється від подальших циклів (значення  $\gamma_I$  менше, ніж при наступних циклях), надалі спостерігається стабілізація мікропластичних процесів і деформаційні криві майже повторюють одна одну (тут можна провести певну аналогію зі стабілізацією мікропластичних процесів).

У порівнянні з одношаровими плівками Fe, Cr та двошаровими Fe/Cr відмінність  $\gamma_I$  для I деформаційного циклю від подальших не перевищує 10%.

Розглядаючи плівкову систему Pd/Gd/Pd/Π (рис. 6), ми робимо висновок про те, що вона характеризується широким діапазоном пружної деформації (більше 2%), подібно до одношарових плівок Gd і Cu. У той же час система має невисокі значення  $\gamma_I$  (близько 1,5–



**Рис. 6.** Залежність  $\Delta R/R$ ,  $\gamma_I$  і  $R$  від  $\epsilon_I$  для  $\Delta\epsilon_{I1} = 0-1\%$  (а, б) і  $\Delta\epsilon_{I2} = 0-2\%$  (в, г) для плівки Pd(9)/a-Gd(19)/Pd(4)/Π ( $C_{Pd} = 61$  ат. %).

**ТАБЛИЦЯ 1.** Залежність інтервалу межі переходу пружня/пластична деформація і пружних модулів від концентрації атомів Cr у двошаровій плівці Cu/Cr/Π.

Плівкова система	$c_{Cr}$ , ат. %	$\epsilon_I^{пер}$ , %
Cu(20)/Cr(5)/Π	20	1,30
Cu(40)/Cr(10)/Π	23	1,20
Cu(25)/Cr(15)/Π	36	0,85
Cu(20)/Cr(15)/Π	41	0,75
Cu(20)/Cr(20)/Π	50	0,60
Cu(20)/Cr(30)/Π	59	0,50
Cu(20)/Cr(35)/Π	63	0,45
Cu(20)/Cr(45)/Π	69	0,40

2 одиниць).

Межа переходу пружня/пластична деформація вносить свої корективи в характер тензорезистивних властивостей. З одного боку, збільшується товщина плівкової системи, що повинно викликати

**ТАБЛИЦЯ 2.** Залежність інтервалу межі переходу пружня/пластична деформація від концентрації атомів Cr у двошаровій плівці Fe/Cr/П.

Плівкова система	$c_{Cr}$ , ат.%	$\epsilon_i^{пер}$ , %
Fe(70)/Cr(20)/П	0,23	0,15
Fe(50)/Cr(30)/П	0,37	0,25
Fe(45)/Cr(30)/П	0,40	0,30
Fe(40)/Cr(30)/П	0,43	0,30
Fe(20)/Cr(30)/П	0,59	0,40

зменшення величини середнього коефіцієнта тензочутливості, відповідно з розмірними залежностями для плівкових матеріалів, з іншого боку — перехід до пластичної деформації при менших значеннях  $\epsilon_i$  призводить до збільшення середнього значення величини КТ.

Автори виражають подяку студ. З. М. Макусі за допомогу при виконанні експериментів.

Роботу виконано в рамках бюджетної тематики при фінансовій підтримці МОНМС України.

#### ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. C. P. O. Treutler, *Sens. Actuators A*, **91**: 2(2001).
2. G. Rieger, K. Ludwig, J. Hauch, and W. Clemens, *Sens. Actuators A*, **91**: 7 (2001).
3. A. V. Amor, T. Budde, and H. H. Gatzel, *Sens. Actuators A*, **129**: 41 (2006).
4. A. Yamamoto and T. Tsutsumoto, *Diamond Relat. Mater.*, **13**: 863 (2004).
5. G.-S. Chung, *Sens. Actuat. A*, **135**: 355 (2007).
6. B. Fu and L. Gao, *Scripta Mater.*, **55**: 521 (2006).
7. J. Cao, Q. Wang, and H. Dai, *Phys. Rev. Lett.*, **90**: 157 (2003).
8. Л. В. Однодворець, С. І. Проценко, А. М. Черноус, І. Ю. Проценко, *Успехи физ. мет.*, **8**, № 2: 109 (2007).
9. H.-J. Lee, P. Zhang, and J. C. Bravman., *J. Appl. Phys.*, **93**: 1443 (2003).
10. S. P. Lacour, S. Wagner, Z. Huang, and Z. Suo., *Appl. Phys. Lett.*, **82**: 2404 (2003).
11. Є. О. Забіла, І. Ю. Проценко, *УФЖ*, **50**: 729 (2005).
12. Д. В. Великодний, С. І. Проценко, І. Ю. Проценко, *Металлофиз. новейшие технол.*, **30**: 1659 (2008).
13. S. I. Protsenko, D. V. Velykodnyi, V. A. Keraj, M. S. Desai, C. J. Panchal, and I. Yu. Protsenko, *J. Mater. Sci.*, **44**: 4905 (2009).
14. И. П. Бурык, Д. В. Великодний, Л. В. Однодворец, И. Е. Проценко, Е. П. Ткач, *ЖТФ*, **81**: 331 (2011).