

МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ПОВЕРХНОСТИ И ПЛЁНКИ

PACSnumbers: 68.60.Dv, 68.65.Ac, 72.10.Fk, 73.50.Lw, 73.61.At, 81.15.Ef, 81.40.Rs

Особливості тензоефекту в плівках на основі ОЦК-Fe і α -Gd

К. В. Тищенко, Л. В. Однодворець, І. Ю. Проценко

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

Представлено результати експериментальних досліджень і порівняльної аналізи особливостей тензорезистивного ефекту в одношарових плівках Fe і дво- та тришарових плівкових системах на основі ОЦК-Fe і аморфного Gd (α -Gd) у двох деформаційних інтервалах $\Delta\varepsilon_{l1} = 0-1\%$ і $\Delta\varepsilon_{l2} = 1-2\%$. Встановлено, що пластична деформація шару α -Gd спричиняє аналогічну деформацію шару ОЦК-Fe в інтервалі деформації, яка відповідає його пружній деформації. Цей ефект супроводжується максимумом і областю насиченості на залежності миттєвого коефіцієнта тензочутливості від поздовжньої деформації.

The results of experimental investigations and comparative analysis of features of resistance strain effect in single-layer Fe films and two- and three-layer film systems based on b.c.c. Fe and amorphous Gd (α -Gd) in two deformation intervals $\Delta\varepsilon_{l1} = 0-1\%$ and $\Delta\varepsilon_{l2} = 1-2\%$ are presented. As revealed, the plastic deformation of α -Gd layer causes similar deformation of b.c.c. Fe layer within the interval of deformation, which corresponds to its elastic deformation. This effect is accompanied with a maximum and the saturation region in the dependence of the instantaneous strain-gauge factor on the longitudinal strain.

Представлены результаты экспериментальных исследований и сравнительного анализа особенностей тензорезистивного эффекта в однослойных плёнках Fe и двух- и трёхслойных плёночных системах на основе ОЦК-Fe и аморфного Gd (α -Gd) в двух деформационных интервалах $\Delta\varepsilon_{l1} = 0-1\%$ и $\Delta\varepsilon_{l2} = 1-2\%$. Установлено, что пластическая деформация слоя α -Gd вызывает аналогичную деформацию слоя ОЦК-Fe в интервале деформации, которая соответствует его упругой деформации. Этот эффект сопровождается максимумом и областью насыщения на зависимости мгновенного коэффициента тензочувствительности от продольной деформации.

Ключові слова: плівкові системи, пластична деформація, тензорезистивні ефекти.

(Отримано 11 березня 2011 р.)

1. ВСТУП

Особливості кристалічної структури і магнетні властивості багатошарових плівок на основі ОЦК-Fe і *a*- або ГЦП-Gd постійно знаходяться в полі зору дослідників [1, 2]. Автори [2] відмічають, що магнетні властивості мультишарів Fe/Gd (Голлів ефект і Керрив ефект) суттєво залежать від структурного стану (аморфний (*a*) чи кристалічний) плівок як Fe, так і Gd. Згідно даних [2, 3] перехід *a* → ОЦК у плівках Fe відбувається при $d \cong 1,7$ нм [2], а плівки Gd при $d < 15$ нм знаходяться в аморфному стані (фіксується два гало з ефективними міжплощинними віддальми 0,28 і 0,18 нм, на основі яких у більш товстих шарах формуються лінії (002) і (102) ГЦП-Gd), а в інтервалі товщин $15 < d < 40$ нм — в аморфно-кристалічному стані [3]. Ці висновки до деякої міри підтверджуються електронно-мікроскопічними знімками, одержаними методом cross-section у режимі високої роздільної здатності, на яких шари Gd, на відміну від Fe, мають розупорядковану структуру [4]. Результати робіт [1, 5], в яких плівкові зразки одержували шляхом одночасної конденсації компонент [1] або випаровуванням сполук GdFe₂, GdFe₅ та Gd₂Fe₁₇ [5], дозволяють зробити висновок, що і в цьому випадку плівкові стопи мають аморфну будову.

Дослідження багатьох авторів (наприклад, [6–11]) вказують на те, що фазовий склад плівок Gd дуже чутливий до умов одержання. Зокрема, згідно даних [6–8], у процесі конденсації Gd у технологічному вакуумі ($\cong 10^{-3}$ – 10^{-4} Па) в плівках стабілізується ГЦК-фаза GdH₂ (параметер ґратниці $a = 0,524$ – $0,560$ нм), яка при термовідпалюванні розпадається при $T \cong 400$ К [8] з одночасним утворенням оксиду Gd₂O₃ [8–11]. Як показали наші дослідження в *a*-Gd плівках домішковою фазою може бути GdH₂.

Узагальнюючи результати досліджень авторів, ми приходимо до висновку, що на даний момент магнетні властивості плівкових систем на основі Fe і Gd і їх взаємозв'язок зі структурно-фазовим станом вивчені в достатній мірі. В той же час електрофізичні властивості і, зокрема, тензорезистивні, не вивчені взагалі. На наш погляд, такі дослідження на прикладі системи ОЦК-Fe/*a*-Gd/П (П — підложжя) дозволять виявити нові особливості тензоефекту в умовах, коли підкладка (у нашому випадку — полістирол) зберігає свої пружні властивості в широкому інтервалі поздовжньої деформації (до $\epsilon_t = 2\%$), а шар *a*-Gd — навпаки, має інтервал пружної деформації менший, ніж плівки ОЦК-Fe, що обумовить вплив на тензоефект у плівках Fe шару з *a*-Gd. Відмітимо, що питомий опір *a*-Gd $\rho \cong 10^{-5}$ – 10^{-6} Ом·м, значення якого більш ніж на порядок вище у порівнянні з плівкою Fe, обумовить шунтування шару *a*-Gd, і тому його вплив

буде виявлятися лише в механічних властивостях. З такої точки зору нами і були виконані дослідження в даній роботі.

2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Пошарова конденсація плівок *a*-Gd/Fe/П або Fe/*a*-Gd/Fe/П здійснювалася у вакуумі $\cong 10^{-4}$ Па при $T_n \cong 300$ К. Плівки Gd були в аморфному стані (фіксувалося два гало з ефективними міжплощинними віддалями 0,311 і 0,180 нм, на основі яких формуються лінії (100) і (102) ГЦП-Gd, що дещо відрізняється від результатів [3]) при товщинах до 30–40 нм і частково в кристалічному стані при більших товщинах. Плівки Fe мали ОЦК-фазу в інтервалі товщин $d \cong 7$ –60 нм.

$$\text{Миттєве значення коефіцієнта поздовжньої деформації } \gamma_{lm} = \frac{1}{R_i} \frac{dR_i}{d\varepsilon_{ii}}$$

і його середнє значення (γ_l) вимірювалось за допомогою автоматизованої системи, яка більш детально описана в попередніх роботах [12–14]. При аналізі одержаних результатів нами враховувалися дані роботи [15], в якій описані тензорезистивні ефекти в аморфних масивних металевих стопах на основі Fe. Як відмічалось і в роботах [12, 13] величина γ_l залежить від номера деформаційного циклу «поздовжня деформація–зняття навантаження» і, починаючи з V–VII деформаційного циклів, виходить на насиченість. У зв'язку з цим більшість результатів наведені для VII циклу.

3. РЕЗУЛЬТАТИ І ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

3.1. Одношарові плівки Fe

Для встановлення впливу плівки *a*-Gd на тензорезистивні властивості плівки Fe нами були виконані дослідження на одношарових плівках Fe на полістироловій підкладці.

На рисунках 1 і 2 наведено серію деформаційних залежностей, на основі яких виконується розрахунок γ_{lm} і γ_l , і залежностей γ_l від ε_l для двох інтервалів деформації $\Delta\varepsilon_{l1} = 0$ –1% та $\Delta\varepsilon_{l2} = 0$ –2%. Основна відміна цих залежностей полягає в тому, що в інтервалі деформації $\Delta\varepsilon_{l1}$ плівки Fe товщиною $d \cong 7, 9, 12, 18$ і 50 нм деформуються пружно або квазіпружно, оскільки залежність γ_{lm} від ε_l має майже лінійний характер (відхил від лінійності з виходом на насиченість має місце в плівках із $d > 50$ нм). В той же час в інтервалі деформацій $\Delta\varepsilon_{l2}$ тенденція до насиченості залежності γ_{lm} від ε_l виявляється при $d > 10$ нм і $\Delta\varepsilon_{l\text{нас}} \cong 0,7$ –0,9%.

На рисунку 3 представлена залежність середньої величини кое-

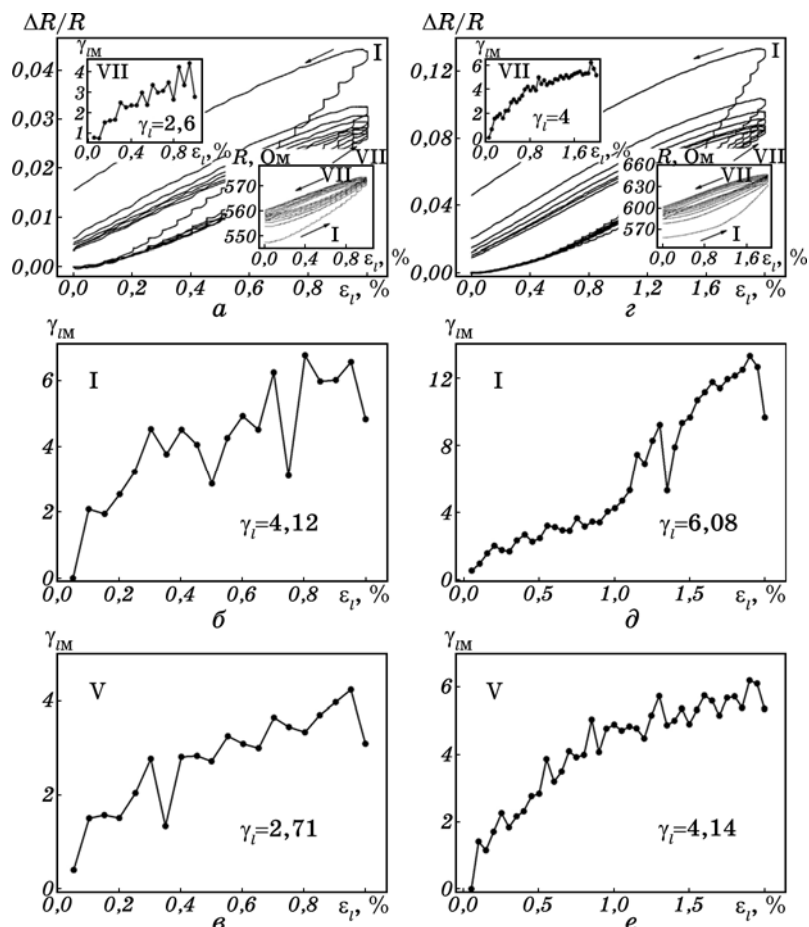


Рис. 1. Залежність $\Delta R/R$, γ_{IM} і R від ε_l для $\Delta\varepsilon_{l1} = 0-1\%$ (а-в) і $\Delta\varepsilon_{l2} = 0-2\%$ (z-е) для плівки Fe(18)/Π.

фіцієнта тензочутливості γ_l від d . Різке збільшення γ_l при $d > 30$ нм пояснюється нами ефектами пластичності, які спричиняють не тільки збільшення опору зразків (рис. 1 а, z), але і його чутливості до деформації $\left(\frac{dR}{d\varepsilon_l}\right)$ майже в два рази відносно збільшення R .

3.2. Двошарові плівкові системи a-Gd (5-45)/Fe(18-50)/Π

Характерною особливістю тензоефекту в інтервалі $\Delta\varepsilon_{l1}$ є вихід залежності γ_{IM} від ε_l на насиченість при $\Delta\varepsilon_{l1\text{нас}}$ від 0,4% ($d_{Gd} \cong 5$ нм) до 0,6% ($d_{Gd} \cong 45$ нм). У другому деформаційному інтервалі $\Delta\varepsilon_{l2}$ вели-

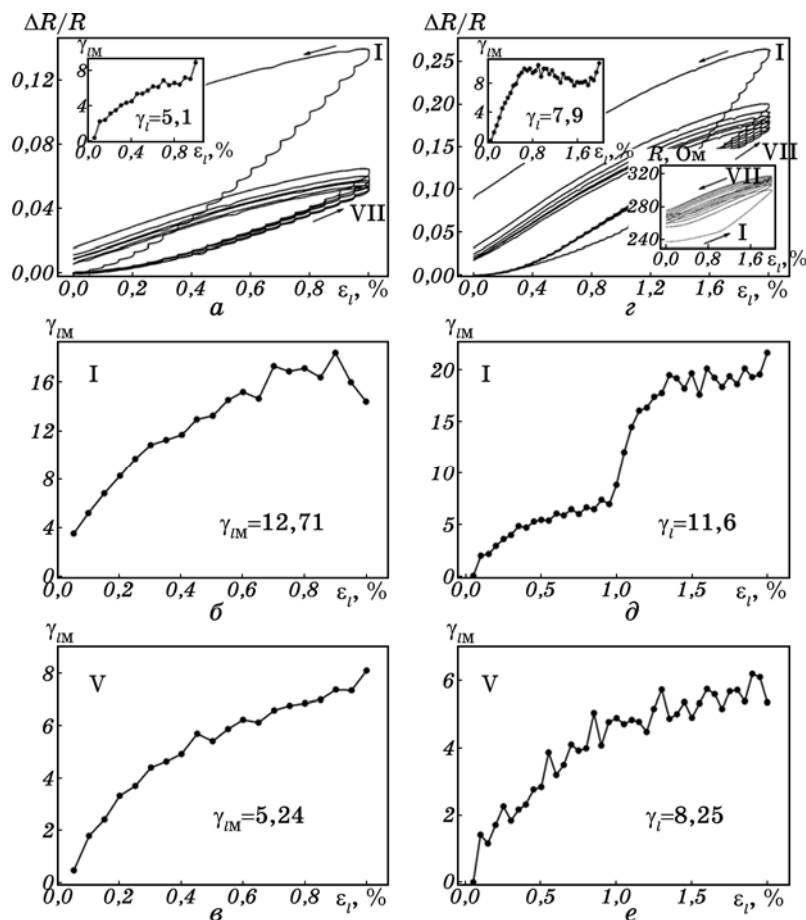


Рис. 2. Залежність $\Delta R/R$, $\gamma_{IМ}$ і R від ε_I для $\Delta\varepsilon_{I1} = 0-1\%$ (а-в) і $\Delta\varepsilon_{I2} = 0-2\%$ (z-е) для плівки Fe(50)/П.

чина $\Delta\varepsilon_{Iнас}$ змінюється від $0,8\%$ ($d_{Gd} \cong 5$ нм) до $1,1\%$ ($d_{Gd} \cong 45$ нм). Рисунок 4 ілюструє на прикладі плівкової системи α -Gd(30)/Fe(50)/П цю особливість, а також нову, а саме, появу максимуму на залежності $\gamma_{IМ}$ від ε_I в інтервалі $\Delta\varepsilon_{I2}$ перед виходом її на насиченість. Величина $\gamma_{IМ}$ в максимумі в два рази більша $\gamma_{IМнас}$.

При $\varepsilon_I \cong 2\%$ залежність $\gamma_{IМ}$ від ε_I наближається до другого максимуму, який нечітко виявляється в одношаровій плівці Fe(50)/П (рис. 2, z, вставка). Очевидно положення цього максимуму відповідає певному деформаційному механізму, а його висота — інтенсивності процесу. Зокрема, він може відповідати переходу від пружної (квазіпружної) до пластичної деформації, коли дислокації починають рухатися з об'єму до меж зерен плівки Fe, а другий максимум може бути пов'язаний з їх локалізацією на межах або зерно-

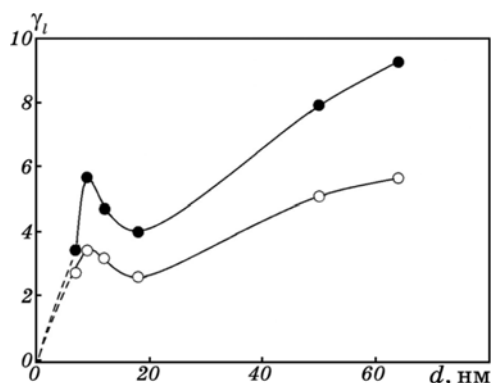


Рис. 3. Залежність γ_l від товщини плівки Fe. Інтервал деформацій, %: \circ — $\Delta\epsilon_{l1}$, \bullet — $\Delta\epsilon_{l2}$.

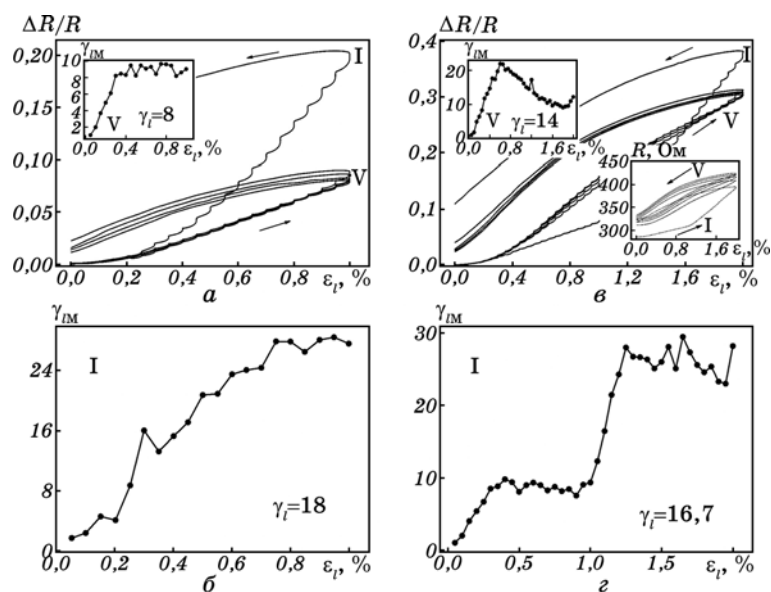


Рис. 4. Залежність $\Delta R/R$, γ_{lm} і R від ϵ_l для плівкової системи α -Gd(30)/Fe(50)/П.

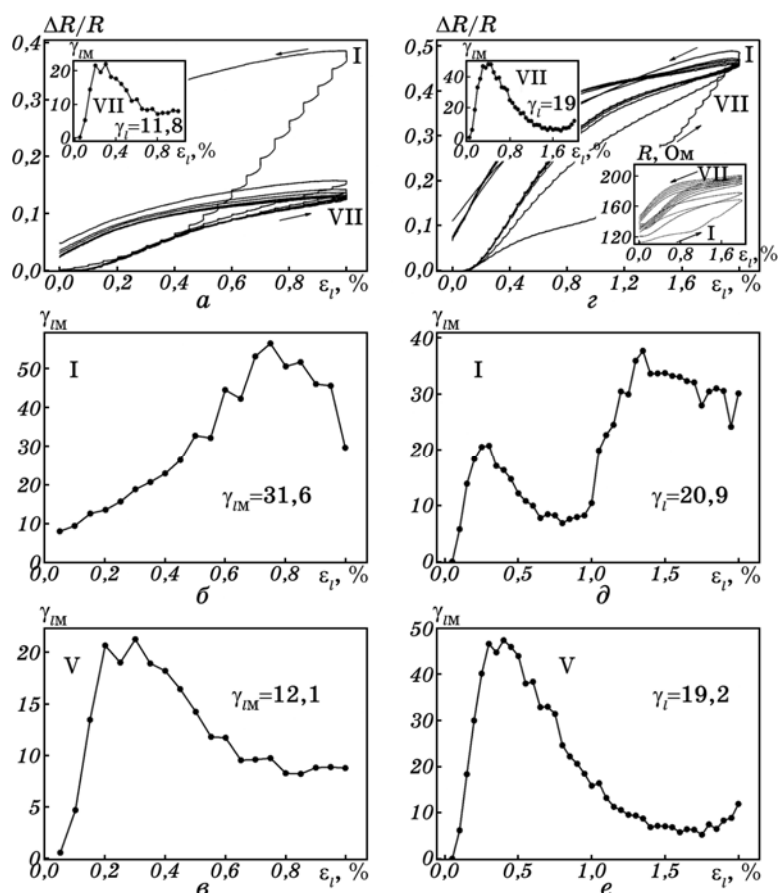
межовим проковзуванням. Виходячи з рис. 4, в (вставка) плівка α -Gd стимулює більш інтенсивне протікання цих процесів.

3.3. Тришарові плівкові системи Fe(5–40)/ α -Gd(4–30)/Fe(8–50)/П

Загальну характеристику цих плівкових систем представлено в табл. 1.

ТАБЛИЦЯ 1. Загальна характеристика тришарових плівкових систем для VII деформаційного циклю.

Система	c_{Fe} , ат. %	c_{Gd} , ат. %	Інтервал 0–1%			Інтервал 0–2%			
			$\gamma_{I\text{нас}}$	$\epsilon_{I\text{нас}}$, %	$\epsilon_{I\text{мах}}$	$\gamma_{I\text{нас}}$	$\epsilon_{I\text{нас}}$, %	$\gamma_{I\text{мах}}$	$\epsilon_{I\text{мах}}$
Fe(20)/ α -Gd(7)/Fe(15)/П	93,3	6,7	3,0	0,20	–	8,0	1,15	–	–
Fe(21)/ α -Gd(12)/Fe(15)/П	92,5	7,5	6,0	0,75	0,35	3,0	1,00	70	0,35
Fe(38)/ α -Gd(25)/Fe(42)/П	90,0	10,0	7,0	0,70	0,20	3,0	1,40	50	0,30
Fe(12)/ α -Gd(19)/Fe(14)/П	79,3	20,7	1,9	0,20	–	1,0	1,50	15	0,40
Fe(7)/ α -Gd(30)/Fe(22)/П	73,0	27,0	2,9	0,30	–	1,0	1,20	14	0,40

**Рис. 5.** Залежність $\Delta R/R$, $\gamma_{I\text{нас}}$ і R від ϵ_I для плівкової системи Fe(38)/ α -Gd(25)/Fe(42)/П.

Відмінність тензорезистивних властивостей тришарових систем від двошарових полягає лише в збільшенні максимальної величини $\gamma_{l_{\max}}$ і $\epsilon_{l_{\max}}$.

Рисунок 5 ілюструє сказане на прикладі плівкової системи Fe(38)/a-Gd(25)/Fe(42)/П.

Нечітке виявлення максимуму на залежності γ_{lm} від ϵ_l в одношарових плівках Fe (рис. 1 і 2) вказує на те, що шар a-Gd починає при $\epsilon_{l_{\max}} \approx 0,30-0,40\%$ деформуватися пластично і спричиняти таку ж деформацію в шарах Fe, які мають сильний адгезійний зв'язок з a-Gd (є підстави вважати, що на межах поділу утворюється проміжний шар твердого розчину, що і забезпечує високу адгезію).

Дані таблиці 1 вказують на те, що на перший погляд, величини $\gamma_{l_{\max}}$ та $\gamma_{l_{\max}}$ залежать від ефективної концентрації c_{Gd} , хоча, очевидно, в даному випадку має значення не концентрація атомів Gd, а товщина шару a-Gd. При її збільшенні зменшується величина $\gamma_{l_{\max}}$ (особливо в інтервалі деформації $\Delta\epsilon_{l2}$), що можна пояснити поступовим переходом шарів Gd від аморфного до аморфно-кристалічного стану.

Таким чином, дослідження тензорезистивного ефекту в одношарових плівках Fe, дво- і тришарових плівкових системах на основі шарів Fe і a-Gd дозволили зробити висновок, що максимум на залежності γ_{lm} від ϵ_l і відносно мала величина $\gamma_{l_{\max}}$ обумовлені впливом пластичної деформації шару a-Gd, яка має місце при $\epsilon_l > 0,3-0,4\%$.

Роботу виконано в рамках міжнародного проекту науково-технічного співробітництва між Сумським державним університетом і Університетом Барода (м. Вадодара, Індія).

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Л. В. Киренский, А. А. Неделько, В. А. Буравихин, И. М. Пузей, *Изв. Академии наук СССР. Серия физическая*, **XXIX**, № 4: 689 (1965).
2. T. Stobiecki, M. Czapkiewicz, and M. Korsecwicz, *J. Magn. Magn. Mater.*, **140-144**: 535 (1995).
3. В. О. Васьковський, А. В. Свалов, А. В. Горбунов и др., *ФТТ*, **43**, вып. 4: 672 (2001).
4. H. Miyagawa, H. Shiraoka, M. Tani et al., *J. Cryst. Growth*, **311**: 2143 (2009).
5. В. І. Присяжнюк, О. Г. Миколайчук, І. С. Дуцяк, *ФХТТ*, **4**, № 2: 271 (2003).
6. A. A. A. Hussain and T. S. Al-Bassam, *Thin Solid Films*, **59**: 77 (1979).
7. S. Yamaguchi, *Cryst. Res. Technol.*, **16**, No. 7: K93 (1981).
8. І. В. Чешко, І. Ю. Проценко, *Вісник Сум ДУ. Серія: Фізика, математика, механіка*, № 8 (80): 143 (2005).
9. J. A. Nelson and L. H. Bennett, *J. Am. Chem. Soc.*, **124**, No. 12: 2979 (2002).
10. J. Niinisto, N. Petrova, M. Putkonen et al., *J. Cryst. Growth*, **285**: 191 (2005).
11. A. A. Dakhel, *J. Alloys Compd.*, **388**: 244 (2000).
12. В. Великодний, С. І. Проценко, І. Ю. Проценко, *Металлофиз. новейшие технол.*, **30**, № 12: 1659 (2008).

13. S. I. Protsenko, D. V. Velykodnyi, V. A. Keraj et al., *J. Mater. Sci.*, **44**, No. 18: 4905 (2009).
14. И. П. Бурьк, Д. В. Великодний, Л. В. Однодворец и др., *ЖТФ*, **81**, вып. 2: 331 (2011).
15. М. П. Семенько, М. І. Захаренко, Ю. А. Куницький, А. П. Шпак, *Успехи физ. мет.*, **10**: 331 (2009).