

## МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ПОВЕРХНОСТИ И ПЛЁНКИ

PACS numbers: 73.50.Lw, 73.61.At, 73.90.+f, 81.40.Rs

### Дослідження і прогнозування тензорезистивних властивостей плівкових систем на основі Cr, Cu і Sc

С. І. Проценко, А. М. Чорноус

Сумський державний університет,  
вул. Римського-Корсакова, 2,  
40007 Суми-7, Україна

Проведено подальші дослідження ефекту тензочутливості в тришарових плівкових системах на основі Cr, Cu і Sc. Виходячи із теоретичної моделі тензоефекту, яка враховує деформаційну залежність не лише середньої довжини вільного пробігу електронів, але і коефіцієнтів дзеркальності поверхні плівки, проходження межі зерен та межі поділу шарів, розраховано тривимірні діаграми залежності коефіцієнта поздовжньої тензочутливості від товщини двох шарів при фіксованій товщині третього.

Проведены дальнейшие исследования эффекта тензочувствительности в трехслойных пленочных системах на основе Cr, Cu и Sc. Исходя из теоретической модели тензоефекта, учитывающей деформационную зависимость не только средней длины свободного пробега электронов, но и коэффициентов зеркальности поверхности пленки, прохождения границы зерен и границы раздела слоев, рассчитаны трехмерные диаграммы зависимости коэффициента продольной тензочувствительности от толщины двух слоев при фиксированной толщине третьего.

The further studies of the effect of tensosensibility in three-layer film systems based on Cr, Cu, and Sc are carried out. Outgoing from theoretical model of tensosensibility, taking into account the deformation dependence not only mean free path of electrons, but also coefficients of reflectivity of a film surface, transmission coefficient at the grain boundary and at the interface of layers. The three-dimensional diagrams of dependence of coefficient longitudinal tensosensibility of thickness of two layers at fixed thickness of third layer are calculated.

**Ключові слова:** тришарова плівкова система, тензочутливість, Cr, Cu і Sc, коефіцієнт дзеркальності, коефіцієнт проходження межі зерна, коефіцієнт проходження межі поділу шарів.

(Отримано 10 червня 2002 р., після доопрацювання — 17 березня 2003 р.)

## 1. ВСТУП

При експериментальному дослідженні напруженого стану різних конструкцій, при перетворенні деформації в електричний сигнал у різних вимірювальних пристроях широко використовуються тензорезистори, які виготовляються із дротів або фольги [1]. Поряд з цим багато досліджень вказують на більшу ефективність плівкових тензодатчиків, хоча у випадку металевих плівок величина коефіцієнтів поздовжньої і поперечної тензочутливості значно менша ( $\gamma \sim 1-10$ ) у порівнянні із напівпровідниковими (див., наприклад, [2]). Хоча останні мають значні переваги над металевими: високий коефіцієнт тензочутливості (КТ), лінійність деформаційної залежності, малий температурний коефіцієнт опору (ТКО), стійкість до магнітних полів та ін., але вони мають і недоліки, які пов'язані з їх крихкістю, низькою температурною стабільністю, хімічною активністю, підвищеними вимогами до матеріалів контакту та методів його формування. З такої точки зору металеві плівкові тензодатчики у деяких випадках (наприклад, при високих температурах) можуть виявитися більш ефективними у порівнянні з напівпровідниковими. У зв'язку з цим постійно ведеться пошук можливостей збільшення КТ у металевих плівках (використання плівкових сплавів, перехід до багатошарових плівкових систем та ін.).

У ряді попередніх робіт [3–5] було проаналізовано основні ефекти, які визначають фізичні процеси в одношаровому металевому тензодатчику. Зокрема, у роботі [3] було встановлено кореляцію між величиною коефіцієнта поздовжньої ( $\gamma_l$ ) тензочутливості і числом електронів провідності. У роботі [4] здійснено розділення внеску у величину  $\gamma_l$  таких електронних процесів, як розсіювання на фононах, зовнішніх поверхнях плівки та зерномежового розсіювання. Авторами [4] було отримано і експериментально перевірено своєрідне правило адитивності для величини  $\gamma_l$ :

$$\gamma_l = \frac{\rho_0}{\rho} \gamma_{0l} + \frac{\rho_d}{\rho} \gamma_{dl} + \frac{\rho_{gb}}{\rho} \gamma_{gbl},$$

де  $\gamma_{0l}$ ,  $\gamma_{dl}$ ,  $\gamma_{gbl}$  — відповідний внесок у КТ вказаних вище процесів розсіювання;  $\rho$ ,  $\rho_0$ ,  $\rho_d$  та  $\rho_{gb}$  — питомий опір плівки, масивного зразка, обумовленого поверхневим та зерномежовим розсіюванням електронів. У роботі [5] авторами було здійснено адаптацію теоретичної моделі тензоефекту в двошарових монокристалічних плівках [6] до таких же полікристалічних плівкових систем. Не дивлячись на те, що автори [5] врахували не тільки зміну середньої довжини вільного пробігу (СДВП) електронів та геометричних розмірів при деформації плівкового зразка, але і внесок в питомий опір зерномежового та поверхневого розсіювання електронів, від-

повідність розрахункових і експериментальних величин була незадовільною (різниця складала від 30 до 100%), що автори спробували пояснити дифузійними процесами на межі поділу шарів, які чітко фіксуються методом вторинно-іонної мас-спектроскопії (ВІМС) (див. також роботу [7] і цитовану у ній літературу). Поряд з цим автори [5] вперше відмітили, що невідповідність розрахункових і експериментальних даних може бути пов'язана також з деформаційною залежністю ефективного коефіцієнта дзеркальності ( $p$ ) та коефіцієнта проходження межі зерна ( $r$ ), хоча на той час існувала авторитетна думка [8, 9] про відсутність такої залежності. У плані експериментальної перевірки допущення [5] про роль дифузійних процесів на межі поділу шарів важливо було отримати експериментальні величини КТ на прикладі плівкових систем із обмеженою об'ємною та зерномежевою дифузиею елементів.

Згідно з даними [10] таким вимогам задовольняють дво- та багат шарові зразки на основі Cr і Cu [7] або Cr, Cu і Sc [11], оскільки об'ємна розчинність складає доли ат. % [10] і індивідуальність окремих шарів зберігається як у невідпаленому стані [7], так і після відпалювання до  $T \cong 600\text{--}700\text{ K}$  [11]. Поряд з цим необхідно відмітити, що, згідно з [10], в системі Cu–Sc можливе утворення перехідних фаз  $\text{Cu}_4\text{Sc}$ ,  $\text{Cu}_2\text{Sc}$  та  $\text{CuSc}$ , але з надзвичайно вузькою областю гомогенності.

Співставлення експериментальних і розрахункових на основі моделі [5] величин КТ показали, що і в цьому випадку розходження досягають значної величини. У зв'язку з цим автори [12] запропонували різновид моделі [5, 6] для багат шарових систем з урахуванням деформаційних ефектів для параметрів  $p$  і  $r$ , а також для коефіцієнта проходження межі поділу окремих шарів ( $Q$ ), але при допущенні про рівність  $Q$  і  $r$ , деформаційних коефіцієнтів  $\eta_Q$  і  $\eta_r$  та похідних

$$\frac{d \ln k}{d \ln Q} \text{ і } \frac{d \ln k}{d \ln r}.$$

У зв'язку з цим мету даної роботи можна сформулювати таким чином: вивчення впливу межі поділу шарів на величину коефіцієнта поздовжньої тензочутливості та експериментальна перевірка теоретичної моделі тензочутливості [12] з урахуванням деформаційних ефектів.

## 2. ТЕОРЕТИЧНА МОДЕЛЬ З УРАХУВАННЯМ ДЕФОРМАЦІЙНИХ ЕФЕКТІВ

Для отримання робочого співвідношення автори [12], виходячи з означення коефіцієнта поздовжньої тензочутливості

$$\gamma_l = \frac{d \ln R}{d \ln l}$$

і закону Ома для паралельного з'єднання, записали

$$\frac{1}{R} = \frac{a}{l} (d_1 \sigma_{01} F_1 + d_2 \sigma_{02} F_2 + \dots + d_n \sigma_{0n} F_n), \quad (1)$$

де

$$R = \rho \frac{l}{ad}$$

— опір плівкової системи ( $l$ ,  $a$  і  $d$  — відповідно довжина, ширина і товщина плівкової системи);  $\rho^{-1}_i = \sigma_{0i} F_i$  ( $\rho_i$ ,  $\sigma_{0i}$  — питомий опір металу  $i$ -го шару та питома провідність масивної плівки  $i$ -го шару;  $F_i = F_i(k_i, m_i)$  — функція Фукса, де

$$k_i = \frac{d_i}{\lambda_{0i}} \quad \text{і} \quad m_i = \frac{L_i}{\lambda_{0i}}$$

— зведені товщина і середній розмір кристалітів,  $\lambda_{0i}$  — СДВП електрона в об'ємі масивного  $i$ -го шару).

Співвідношення (1) перетворюється до вигляду

$$\gamma_l = A_1 \left( 1 + \eta_{01l} + \mu_1^* - \frac{d \ln F_1}{d \ln l} \right) + \dots + A_n \left( 1 + \eta_{0nl} + \mu_n^* - \frac{d \ln F_n}{d \ln l} \right) + 1 + \mu_s, \quad (2)$$

де

$$\mu^* = \mu_f \frac{1 - \mu_s}{1 - \mu_f}$$

— зведений коефіцієнт Пуассона ( $\mu_s$  і  $\mu_f$  — коефіцієнти Пуассона для підкладки і плівки);

$$\eta_{0l} = - \frac{d \ln \lambda_0}{d \ln l} \quad (\eta_{0l} + 1 = - \frac{d \ln \sigma_0}{d \ln l});$$

$$A_i = \frac{d_i \sigma_{0i} F_i}{\sum_{i=1}^n d_i \sigma_{0i} F_i}$$

Доданок

$$\frac{d \ln F_i(k_i, m_i)}{d \ln l}$$

можна записати (див. [12]) у розгорнутому вигляді з урахуванням

як внутрішнього, так і зовнішнього розмірних ефектів.

Виходячи із (2), можна записати співвідношення для КТ плівкової системи з довільною кількістю шарів. У випадку, коли електричні властивості  $i$ -го шару визначаються електронами провідності  $i$ -го і  $(i \pm 1)$ -го шарів (а це можливо при виконанні умови  $\lambda_{01} \sim \sim d_2 + d_3$  і  $\lambda_{03} \sim \sim d_2 + d_1$ ), співвідношення (2) авторів [12] можна подати у такому дещо скорегованому (автори [12] розглядали лише випадок переходу електронів між сусідніми шарами) вигляді:

$$\begin{aligned}
 \gamma_l = A_1 & \left\{ \left( \gamma_{01l}^p + \mu_1^* \right) - \left( 1 - \frac{\beta_1}{\beta_{01}} \right) \left[ \left( 2\gamma_{01l}^p - 1 - \mu_1^* - \eta_{p1'} \frac{\partial \ln k_1}{\partial \ln p_1} - \right. \right. \right. \\
 & \left. \left. \left. - \eta_{Q2'} \frac{\partial \ln k_1}{\partial \ln Q_{12}} - \eta_{r1'} \frac{\partial \ln m_1}{\partial \ln r_1} \right) + \right. \\
 & \left. + \left( \gamma_{02l}^p - 1 - \mu_2^* - \eta_{p2'} \frac{\partial \ln k_2}{\partial \ln p_2} - \eta_{Q2'} \frac{\partial \ln k_2}{\partial \ln Q_{21}} - \eta_{r2'} \frac{\partial \ln m_2}{\partial \ln r_2} \right) \frac{\beta_{01}}{\beta_{02}} + \right. \\
 & \left. + \left( \gamma_{03l}^p - 1 - \mu_3^* - \eta_{p3'} \frac{\partial \ln k_3}{\partial \ln p_3} - \eta_{Q3'} \frac{\partial \ln k_3}{\partial \ln Q_{31}} - \eta_{r3'} \frac{\partial \ln m_3}{\partial \ln r_3} \right) \frac{\beta_{01}}{\beta_{03}} \right\} + \dots + \quad (3) \\
 & + A_3 \left\{ \left( \gamma_{03l}^p + \mu_3^* \right) - \left( 1 - \frac{\beta_3}{\beta_{03}} \right) \left[ \left( 2\gamma_{03l}^p - 1 - \mu_3^* - \eta_{p3'} \frac{\partial \ln k_3}{\partial \ln p_3} - \eta_{Q31'} \frac{\partial \ln k_3}{\partial \ln Q_{31}} - \right. \right. \right. \\
 & \left. \left. \left. - \eta_{r3'} \frac{\partial \ln m_3}{\partial \ln r_3} \right) + \left( \gamma_{01l}^p - 1 - \mu_1^* - \eta_{p1'} \frac{\partial \ln k_1}{\partial \ln p_1} - \eta_{Q31'} \frac{\partial \ln k_1}{\partial \ln Q_{13}} - \eta_{r1'} \frac{\partial \ln m_1}{\partial \ln r_1} \right) \frac{\beta_{03}}{\beta_{01}} + \right. \right. \\
 & \left. \left. + \left( \gamma_{02l}^p - 1 - \mu_2^* - \eta_{p2'} \frac{\partial \ln k_2}{\partial \ln p_2} - \eta_{Q23'} \frac{\partial \ln k_2}{\partial \ln Q_{23}} - \eta_{r2'} \frac{\partial \ln m_2}{\partial \ln r_2} \right) \frac{\beta_{03}}{\beta_{02}} \right] \right\} + 1 + \mu_s,
 \end{aligned}$$

де враховано, що

$$\frac{d \ln F}{d \ln k} \cong \frac{d \ln F}{d \ln m} = \left( 1 - \frac{\beta}{\beta_0} \right),$$

де  $\beta_i$  та  $\beta_{0i}$  — ТКО  $i$ -го шару товщиною  $d_i$  та для масивного зразка;  $\gamma_{0i}^p$  — КТ масивного зразка, виражений через питомий опір;

$$\eta_{p_i'} = - \frac{d \ln p}{d \ln l}, \quad \eta_{r_i'} = - \frac{d \ln r}{d \ln l} \quad \text{і} \quad \eta_{Q_i'} = - \frac{d \ln Q}{d \ln l}.$$

Оскільки усі величини у правій частині (3) відносно легко можна обчислити, виходячи із відповідних експериментальних даних, це

відкриває можливість здійснити апробацію теоретичної моделі [12]. Зауважимо, що доданки з індексом  $i$  враховують електричні властивості даного шару, а з індексами  $i \pm 1$  — вплив сусідніх шарів на електричні властивості  $i$ -го шару. В тому випадку, коли виконується умова  $\lambda_{03} < d_2 + d_1$  або  $\lambda_{01} < d_2 + d_3$ , не враховуються відповідно третій або п'ятий рядок у співвідношенні (3).

### 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДАНІ І МЕТОДИКА ЇХ ОБРОБКИ

При вимірюванні КТ необхідно мати на увазі, що у процесі поздовжньої деформації (до  $\varepsilon_l \cong 2\%$ ) відносна зміна опору плівки складає величину до 1%. У зв'язку з цим важливим питанням у методиці вимірювання КТ є формування плівкових контактів та визначення величини деформації. Суть методики, запропонованої нами, полягає в наступному.

На підкладку у вигляді фольги із Ni конденсується тонкий шар SiO (шляхом сумісного випаровування при  $T \cong 1470$  К порошку SiO<sub>2</sub> і Si у еквівалентних співвідношеннях). На SiO формується контакт на основі двошарової системи Cu/Al. Плівка Al ( $d = 20$  нм) забезпечує адгезію, а верхній шар Cu змінної товщини (його товщина змінюється східцями до 2 мкм) складається з плівки Cu ( $d \cong 60$  нм), сконденсованої безпосередньо на плівку Al, і товстого, електролітично осадженого шару Cu, який має східчасту структуру, що дозволяє сформувати плавний перехід досліджуваного плівка/контакт. Плівкові зразки, які досліджувались, конденсувались на SiO між контактними майданчиками (розмір зразків 5×2 мм). Відмітимо також, що зразок і контакти можна сформувати на склотекстоліті [5] або фторопласті Ф4 [11], але на таких підкладках вдається реалізувати пружну деформацію лише до  $T \cong 520$  К, в той час як на підкладці з SiO — до 670 К.

Для дослідження електрофізичних властивостей плівкових зразків безпосередньо у вакуумі (установка ВУП-5М, тиск залишкових газів  $10^{-4}$  Па) використовувався спеціально сконструйований пристрій, який дозволяє вимірювати електричний опір за чотириточковою схемою в інтервалі температур 300–670 К на двох ідентичних зразках, один із яких може бути zdeформований у статичному або динамічному режимі (крок деформації  $\Delta\varepsilon_l = 0,05\%$  забезпечується точним мікрогвинтом). Фазовий склад і кристалічна структура (залежність середнього розміру кристалітів одношарових плівок від їх товщини) вивчалися за допомогою мікроскопа ЕММА-4, елементний склад і дифузійні процеси досліджувались методом ВІМС (прилад МС-7201М, первинні іони N<sub>2</sub> або Ar), товщина вимірювалася за допомогою інтерферометра МІІ-4. Було отримано, що при швидкостях конденсації плівок більших від 1 нм/с у зразках відсутні домішкові фази ScH<sub>2</sub>, Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cr<sub>3</sub>O, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cu<sub>2</sub>O або пере-

хідні фази  $\text{Cu}_4\text{Sc}$ ,  $\text{Cu}_2\text{Sc}$  та  $\text{CuSc}$ . Дані з вторинно-іонної мас-спектрометрії вказують на те, що в тришарових плівкових системах до і після відпалювання зберігається індивідуальність шарів, хоча має місце обмежена зерномежова дифузія. Таким чином, тришарові плівкові системи на основі Cr, Cu і Sc можна розглядати як модельні зразки, які задовольняють умові паралельності (1).

Для апробації співвідношення (3) було застосовано методику, запропоновану у роботі [12]. Суть її полягає у тому, що для одношарових плівок — складових багатшарової плівкової структури — будується експериментальна залежність ТКО від товщини для недеформованої та статично zdeформованої плівки. ТКО розраховувався за кривою охолодження другого або третього циклу термостабілізації за схемою «нагрівання—охолодження». Приклад розмірної залежності  $\beta-d$ , а також після перебудови у напрямних координатах  $\beta d-d$  та  $\beta^{-1}d-d$  представлено для випадку плівок Sc на рис. 1. Такі дані у сукупності з експериментальною залежністю середнього розміру кристалітів від товщини дозволяють провести

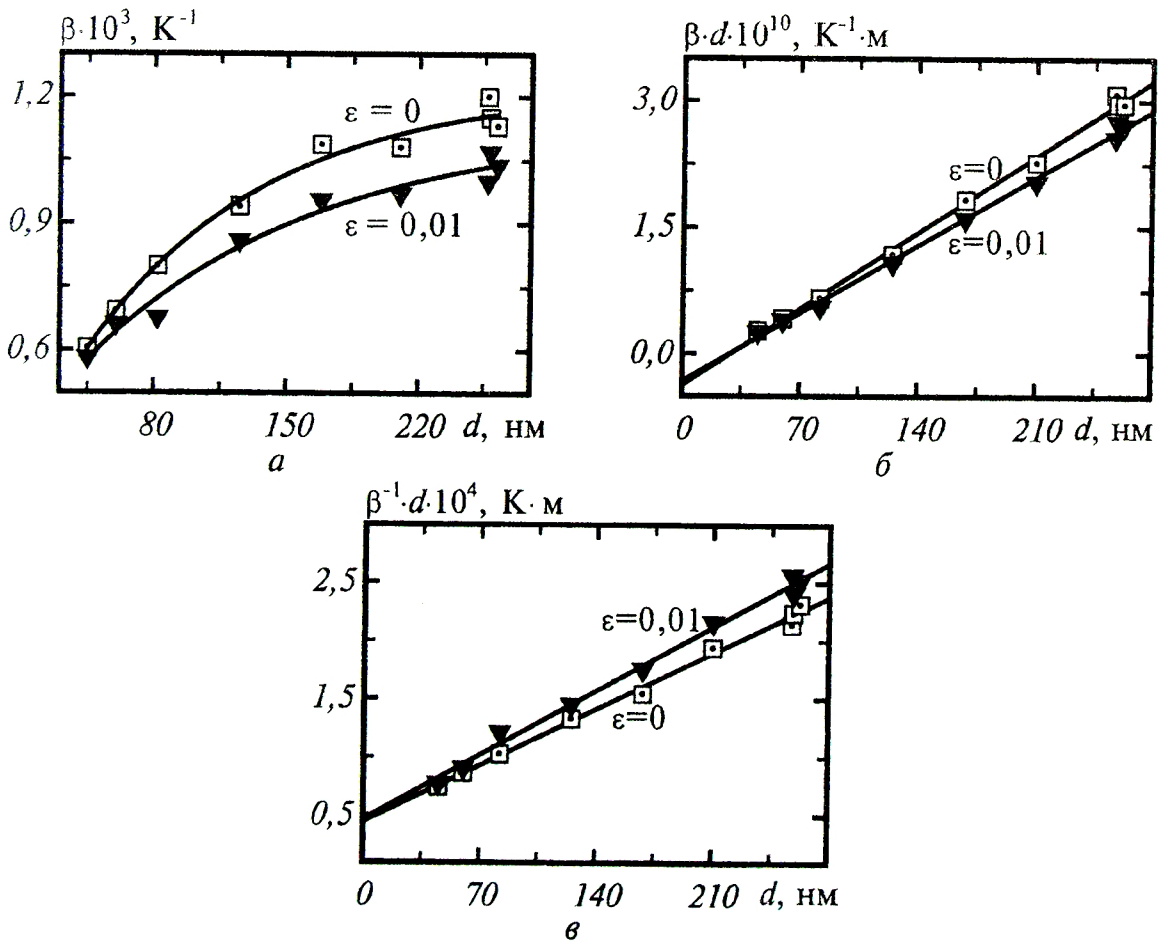


Рис. 1. Залежність термічного коефіцієнта опору від товщини у різних координатах для недеформованих і zdeформованих плівок Sc.

розрахунок деформаційних коефіцієнтів  $\eta_{0l}$ ,  $\eta_{pl}$ ,  $\eta_{rl}$  та  $\eta_{Ql}$  та відповідних похідних

$$\frac{d \ln k}{d \ln p} = \frac{p}{k} \frac{dk}{dp}, \quad \frac{d \ln m}{d \ln r} = \frac{r}{m} \frac{dm}{dr} \quad \text{та} \quad \frac{d \ln k}{d \ln Q} = \frac{p}{k} \frac{dk}{dQ}$$

(ще раз підкреслимо, що в теоретичній моделі [12] допускається рівність  $r$  та  $Q$  і відповідних похідних, оскільки межу поділу шарів з точки зору електронних процесів можна розглядати як межу зерен). Для цього можна скористатися відомими (див., наприклад, [13]) лінеаризованою та ізотропною моделями К. Тельє, А. Тоссе і Ц. Пішар. Це дає можливість отримати  $\lambda_0$  та  $\lambda_g = \lambda_0 f(\alpha)$  — СДВП, яка лімітується межами зерен;

$$f(\alpha) = \frac{\beta_g}{\beta_0}$$

— функція зерномежового розсіювання електронів;

$$\alpha = \frac{\lambda_0}{L} \frac{R}{1-R}$$

( $R$  — коефіцієнт розсіювання електрона на межі зерна, який аналітично пов'язаний із  $r$ );  $\beta_\infty = \lim_{d \rightarrow \infty} \beta$ ; коефіцієнти  $p$  і  $r(Q)$  для двох серій ідентичних зразків — недеформованих та деформованих. Підкреслимо, що відповідність співвідношення (3) з експеримен-

**ТАБЛИЦЯ 1.** Параметри електроперенесення плівок Cr, Cu і Sc.

Недеформовані плівки ( $\epsilon = 0$ )	Деформовані плівки ( $\epsilon = 0,01$ )	$\eta_{0l} = \gamma_{0l} - 1$	$\eta_{pl}$	$\frac{d \ln k}{d \ln p}$
$p$	$p$			
Хром				
0,105	0,056	-3,04	46,55	0,048
$\lambda_0(1-p) = 56,1$ нм; $\beta_g = 2,38 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$	$\lambda_0(1-p) = 64,6$ нм; $\beta_g = 2,25 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$			
Скандій				
0,144	0,181	-4,04	-25,52	-0,174
$\lambda_0(1-p) = 138,1$ нм; $\beta_g = 1,44 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$	$\lambda_0(1-p) = 156,9$ нм; $\beta_g = 1,27 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$			
Мідь				
0,186	0,061	0,28	67,03	-0,003
$\lambda_0(1-p) = 97,3$ нм; $\beta_g = 2,04 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$	$\lambda_0(1-p) = 111,9$ нм; $\beta_g = 1,95 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$			



тальними даними буде значно кращою, якщо замість величини  $\beta_{0i}$  скористатися  $\beta_{gi}$ .

Табл. 1 і рис. 2 дають уявлення про величину або розмірну залежність (від товщини плівки) вказаних параметрів електроперенесення для одношарових плівок Cr, Cu і Sc (відмітимо, що деякі дані табл. 1 (для плівок Cu) наведено у роботі [14]). При цьому необхідно підкреслити наступне.

Оскільки із фізичних міркувань є сенс розглядати залежність  $r$  від  $L$ , але при розрахунках зручно користуватися величинами  $r$  для різних товщин, то на рис. 2, а приведено значення  $r$  для плівок Cr, Sc і Cu в інтервалі товщин 20–260 нм.

Виходячи із означення деформаційних коефіцієнтів, можна записати

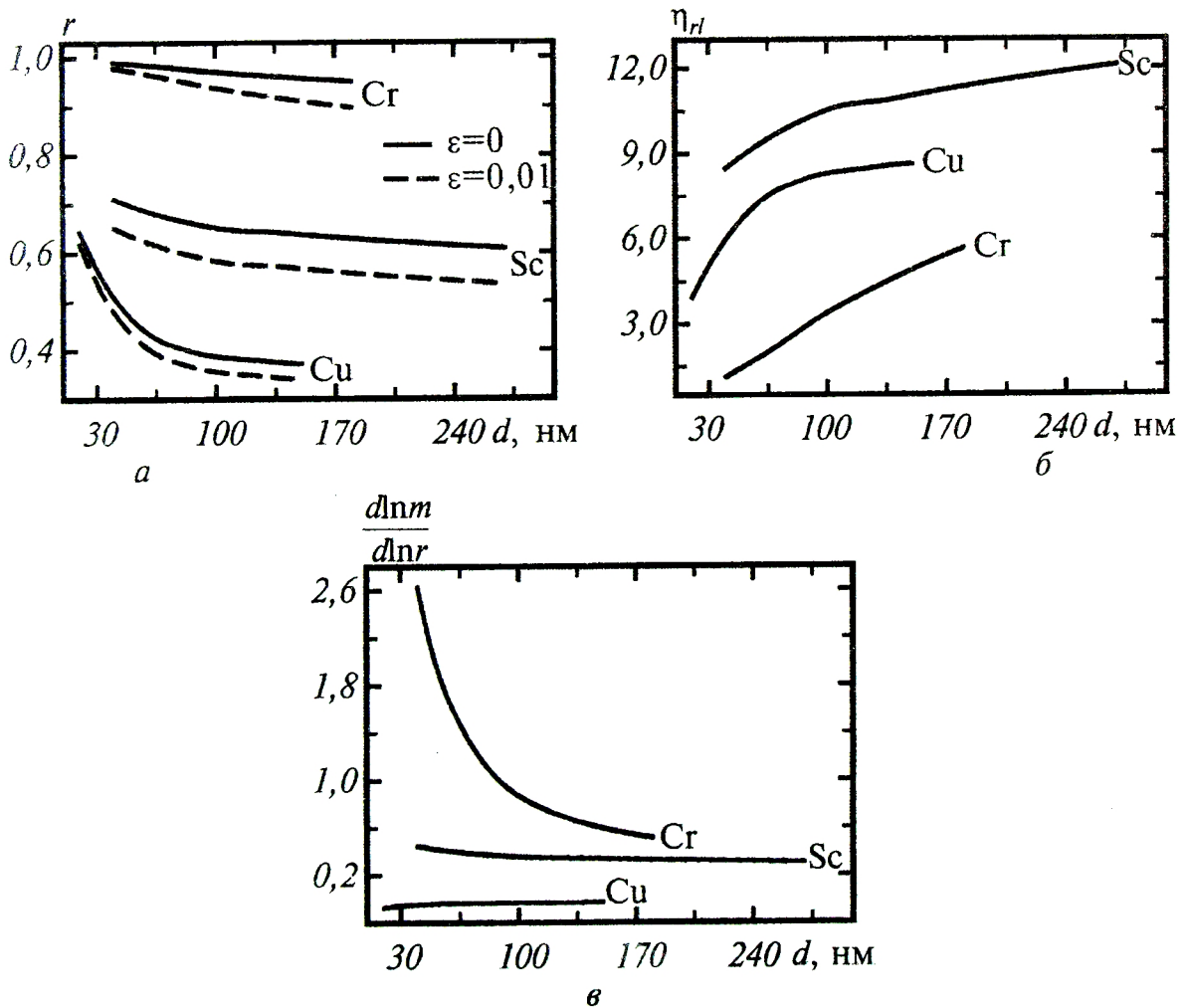


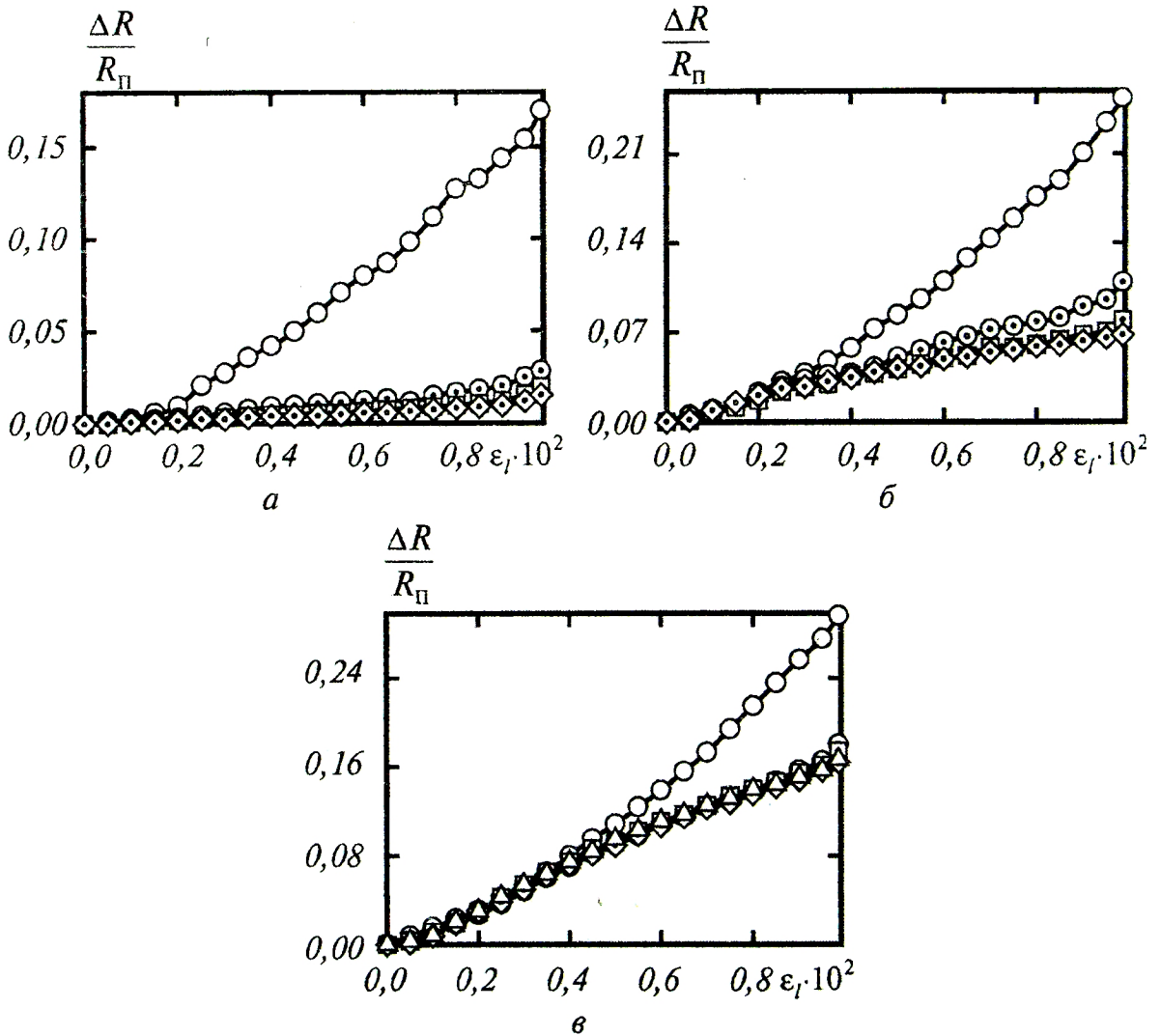
Рис. 2. Величина коефіцієнта проходження межі зерна (а),  $\eta_r$  (б) та  $\frac{d \ln m}{d \ln r}$  (в) для плівок Cr, Sc і Cu різної товщини.

$$\eta_{pl} = -\frac{1}{p(0)} \frac{p(\varepsilon_l) - p(0)}{\varepsilon_l}, \quad \eta_{rl} = \eta_{ql} = -\frac{1}{r(0)} \frac{r(\varepsilon_l) - r(0)}{\varepsilon_l},$$

хоча, якщо розрахувати  $\eta_{0l}$  за аналогічним співвідношенням

$$\eta_{0l} = -\frac{1}{\lambda_0(0)} \frac{\lambda_0(\varepsilon_l) - \lambda_0(0)}{\varepsilon_l},$$

то буде допущено похибку, оскільки зміна СДВП  $\Delta\lambda_0$  визначається не тільки ступенем деформації ( $\Delta\lambda_{0\varepsilon_l}$ ), а також і зміною коефіцієнтів  $p$ ,  $r$  і  $Q$ , що обумовить відповідну зміну  $\Delta\lambda_{0p}$ ,  $\Delta\lambda_{0r}$  і  $\Delta\lambda_{0Q}$ . У зв'язку з цим  $\eta_{0l}$  краще за все обчислювати із тензOMETРИЧНИХ ДАНИХ ДЛЯ МА-



**Рис. 3.** Залежність  $\Delta R/R_{\pi}$  від  $\varepsilon_l$  для деформаційних циклів «навантаження—зняття навантаження» для плівок Sc (88 нм) (а), Cr (40 нм) (б), Cr (70 нм)/Cu (44,5 нм)/Sc (55 нм)/Π (в). Номер циклу: ○ — I, ⊙ — II, □ — III, ◇ — IV, △ — V. Π — підкладка,  $R_{\pi}$  — початковий опір.

сивних зразків.

При вимірюванні КТ одно- та багатошарових плівок необхідно врахувати, що його величина суттєво залежить від номера деформаційного циклу «навантаження—зняття навантаження». Це пов'язано з тією обставиною, що у процесі деформації в плівкових зразках відбуваються різні релаксаційні процеси (розвернення зерен, генерація і/або анігіляція дефектів, в окремих випадках протікання мікропластичної деформації (плівки Ti [13]), завершення міжшарових дифузійних процесів через насичення меж зерен атомами іншого сорту та деякі ін.). В одних випадках (плівки Cu [14]) вони закінчуються при IV–V деформаційних циклах, хоча в одношарових плівках Cr і Sc, багатошарових Co/Ni/П [15], Cr/Cu/Sc/П — практично після I циклу (рис. 3).

Виходячи із означення КТ, величина  $\gamma_I$  знаходиться як тангенс кута нахилу деформаційної залежності. Оскільки у співвідношення (3) входять величини  $\gamma_{0i}^p$ , то для одношарових плівок можна скористатися або їх експериментальною величиною, або розрахунковою за співвідношенням  $\gamma_{0i}^p = \eta_{0i} + 1$ .

Про вплив кількості деформаційних циклів на величину  $\gamma_I$  одно- та тришарової плівкової системи дають уявлення результати, наведені в табл. 2 (тут же приведено відношення КТ кожного із шарів (позначено  $\gamma_I^{Me}$ ) до КТ всієї плівкової системи).

Дані табл. 2 однозначно вказують на те, що КТ одношарової плівки як компоненти тришарової системи завжди менший в декілька разів у порівнянні з КТ тришарової системи, що вказує на значний вплив межі поділу шарів на тензочутливість.

Дані табл. 3 дають можливість оцінити якісно вплив межі поділу окремих шарів на величину у  $\gamma_I$  тришарової плівки. Згідно з оцінкою [14] внесок деформаційних ефектів параметрів  $p$  і  $r$  у величину  $\gamma_I$  одношарової плівки складає (4–10)%. Як впливає з результатів, представлених у табл. 3, у випадку плівок Cr і Sc спо-

**ТАБЛИЦЯ 2.** Порівняння  $\gamma_I$  для одно- та тришарових плівкових систем при різних деформаційних циклах.

Плівкова система (нм)	$d$ , нм	Коефіцієнт тензочутливості $\gamma_I$					$\gamma_I^{Me}/\gamma_I$		
		I	II	III	IV	V	$\gamma_I^{Cr}/\gamma_I$	$\gamma_I^{Sc}/\gamma_I$	$\gamma_I^{Cu}/\gamma_I$
Cu (120)/Sc (70)/Cr (75)/П	252	5,8	7	7,1	7,8	7,7	0,36	0,11	0,28
Cu (140)/Cr (65)/Sc (200)/П	412	5,5	7,2	7,0	8,2	8,2	0,39	0,09	0,26
Cr (70)/Cu (45)/Sc (55)/П	169	26	18	18	17	17	0,17	0,05	0,36
Cr (55)/Cu (120)/Sc (250)/П	402	11	7,3	7,3	7,4	7,5	0,56	0,10	0,29
Cr (90)/Sc (100)/Cu (145)/П	334	14	16	18	18	20	0,12	0,04	0,12
Cu (25)/Cr (70)/Cu (50)/П	156	14	11	11	10	10	0,24	—	—
Cu (140)/Cr (80)/Cu (75)/П	299	6,0	6,0	6,0	8,0	7,0	0,33	—	0,30

**ТАБЛИЦЯ 3.** Порівняння  $\gamma_I$  для одно- та тришарових плівкових систем однакової товщини.

Плівкова система (нм)	$d^{Me}, d, \text{нм}$	$\gamma_I^{Me}/\gamma_I$		
		$\gamma_I^{Cr}/\gamma_{I\text{екс}}$	$\gamma_I^{Sc}/\gamma_{I\text{екс}}$	$\gamma_I^{Cu}/\gamma_{I\text{екс}}$
Cu (120)/Sc (70)/Cr (75)/П	252	0,16	0,10	0,27
Cu (140)/Cr (65)/Sc (200)/П	412	0,13	0,09	0,22
Cr (70)/Cu (45)/Sc (55)/П	169	0,07	0,05	0,12
Cr (55)/Cu (120)/Sc (250)/П	402	0,15	0,10	0,24
Cr (70)/Sc (25)/Cu (145)/П	241	0,07	0,04	0,12
Cr (90)/Sc (100)/Cu (145)/П	334	0,06	0,04	0,10
Cu (25)/Cr (70)/Cu (50)/П	156	0,13	0,08	0,22
Cu (140)/Cr (80)/Cu (75)/П	299	0,16	0,11	0,29

стерігається узгодження, яке дає можливість стверджувати, що зерномежове і розсіювання на межі поділу шарів дають приблизно однаковий внесок у величину  $\gamma_I$ , хоча у випадку плівок Cu роль останнього фактора менш значна.

Результати апробації співвідношення (3) з урахуванням або без врахування деформаційних ефектів представлено на прикладі тих самих плівкових систем у табл. 4. Звертає на себе увагу добра відповідність експериментальних і розрахункових за співвідношенням (3) результатів, хоча у випадку одношарових плівок має місце [14] помітне розходження.

Це дало можливість зробити висновок, що у теоретичній моделі [12] урахування деформаційних ефектів здійснено коректно, і це послужило методичною основою для прогнозування тензочутливості плівкових систем у широкому інтервалі товщин методом комп'ютерного моделювання.

**ТАБЛИЦЯ 4.** Порівняння експериментальних і розрахункових даних для  $\gamma_I$  тришарових плівкових систем.

Плівкова система (товщина, нм)	Коефіцієнт тензочутливості $\gamma_I$			
	екс-пер.	розрахунок		$\frac{ \gamma_{I\text{експ}} - \gamma_{I\text{розн}} }{\gamma_{I\text{експ}}}$
		з урахуванням деформаційних ефектів	без урахування деформаційних ефектів	
Cr (70)/Cu (45)/Sc (55)/П	17,0	17,6	8,0	0,03
Cr (55)/Cu (120)/Sc (250)/П	7,5	8,3	5,9	0,1
Cu (120)/Sc (70)/Cr (75)/П	7,8	9,3	5,1	0,19
Cu (140)/Cr (65)/Sc (200)/П	8,2	7,1	3,6	0,13
Cu (25)/Cr (80)/Cu (50)/П	9,5	7,1	4,1	0,25
Cu (140)/Cr (80)/Cu (75)/П	7,0	5,1	3,6	0,27

#### 4. ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕНЗОЧУТЛИВОСТІ ПЛІВКОВИХ СИСТЕМ

Принцип прогнозування полягав у розрахунку тривимірних діаграм в координатах  $\gamma_I - d_i - d_k$  при фіксованій товщині одного з шарів (перший шар контактує з підкладкою). Нами було розроблено у математичному середовищі Mathcad 2001 і Professional програму, яка дає можливість розраховувати такі параметри:  $\lambda_0(1 - p)$ ,  $\lambda_g$ ,  $p$ ,  $r$ ,  $\eta_{0l}$ ,  $\eta_{pl}$ ,  $\eta_{rl}$  ( $\eta_{Ql}$ ), похідні з правої частини співвідношення (3) та  $\gamma_I$ . Тривимірні діаграми розраховували із кроком 1 нм вздовж  $d_i$  та  $d_k$ , що дає можливість отримати від  $17 \cdot 10^3$  (рис. 4, а-в) до  $30 \cdot 10^3$  (рис. 4, г) точок на діаграмі. Крім цього, програма дозволяє спостерігати динаміку зміни (анімацію) поверхні  $\gamma_I = \gamma_I(d_i, d_k, d_j = \text{const})$ .

На рис. 4 представлено найбільш типові тривимірні діаграми при різному чергуванні шарів Cr, Cu і Sc. Аналіз таких діаграм вказує на те, що максимальна або мінімальна величина  $\gamma_I$  досягається у тих плівкових системах, де другим шаром є плівка Cu або Cr. Повного розуміння даного ефекту ми не маємо, але, очевидно,

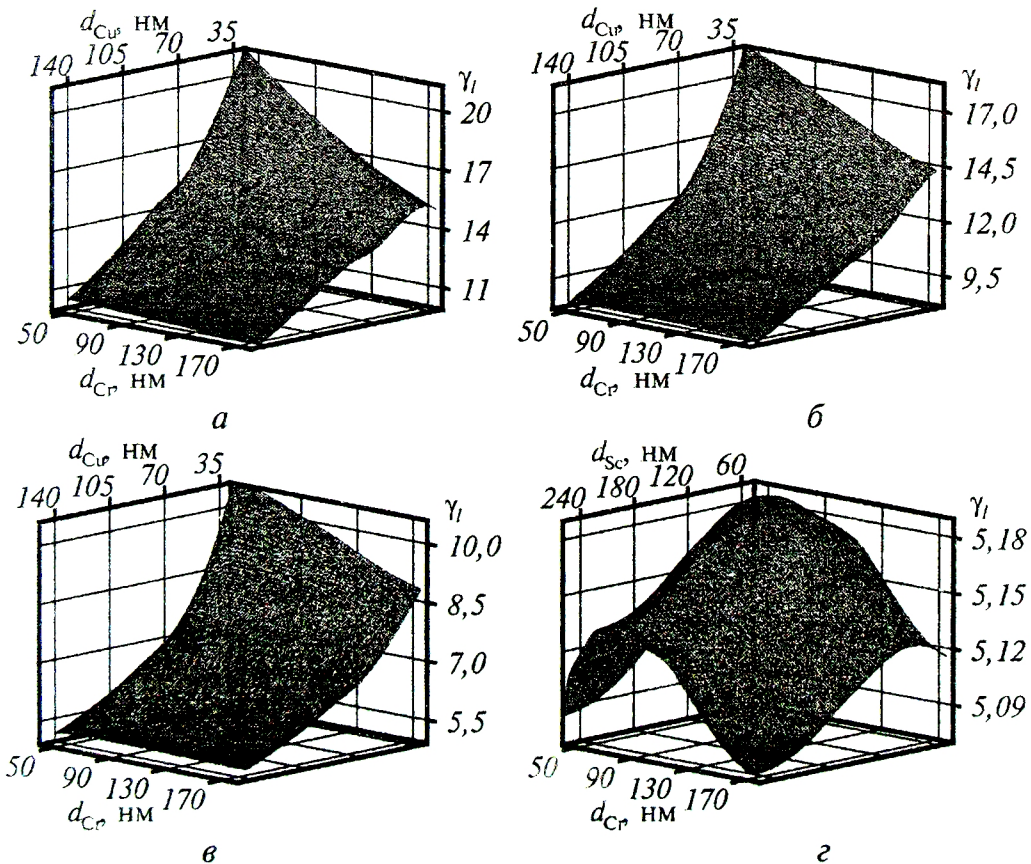


Рис. 4. Тривимірні діаграми для  $\gamma_I$  при фіксованій товщині одного з шарів. Плівкові системи: Cr/Cu/Sc(46)/П (а), Cu/Sc(46)/Cr/П (б), Cu/Cr/Sc(46)/П (в), Cu(140)/Cr/Sc/П (г).

це пов'язано з міжшаровими переходами електронів із плівки Cu у верхні і нижні шари Cr і Sc (мається на увазі, що у Cu велика концентрація вільних електронів). Можливо, певну роль відіграє відміна у будові межі поділу Cu/Cr, Cu/Sc і Cr/Sc. Це призводить до зменшення опору плівок Cr і Sc, збільшення їх чутливості до деформації і, як наслідок, — до збільшення  $\gamma_I$ .

Крім цього, було помічено, що розмірна залежність  $\gamma_I(d)$  найбільш чутлива до зміни товщини плівки Cu. В той же час, якщо її фіксована товщина  $d_{Cu} > 100$  нм, то зміна  $d_{Cr}$  і  $d_{Sc}$  практично не впливає на величину КТ (рис. 4, з).

#### 4. ВИСНОВКИ

Представлені в роботі результати дають можливість говорити про такі особливості тензоефекту в металевих тришарових плівкових системах:

— величина коефіцієнта тензочутливості тришарової системи у декілька разів більша у порівнянні із одношаровою плівкою, яка є компонентою тришарової системи, або у порівнянні із одношаровою такої ж товщини, як і тришарова система, що можна пояснити великою роллю процесів розсіювання електронів на межі поділу шарів при деформації зразка;

— експериментальна перевірка теоретичної моделі [12] на прикладі тришарової системи на основі Cr, Cu і Sc показала, що в явищі тензочутливості сильну роль відіграє деформаційна залежність параметрів електроперенесення; коректне їх врахування дає добре узгодження експериментальних і розрахункових даних;

— здійснено комп'ютерне моделювання і прогноз тензорезистивних властивостей тришарових плівкових систем на основі Cr, Cu і Sc.

Отримані висновки можна до деякої міри розповсюдити і на випадок інших багатшарових плівкових систем.

Роботу виконано при частковому фінансуванні в рамках держбюджетної теми №8.01.01.03-05 Міністерства освіти і науки України.

#### ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Н. П. Клокова, *Тензорезисторы* (Москва: Машиностроение: 1990).
2. Г. В. Ханова, *Розробка фізико-технологічних основ одержання плівок сульфїду самарію для тензорезисторів і дослідження їх параметрів*: Автореф. дис. ... канд. фіз.-мат. наук (Київ: ІФН НАНУ: 2000).
3. Е. Б. Ласюченко, И. Е. Проценко, *ВАНТ*, 2(10): 94 (1999).
4. О. В. Lasyuchenko, I. Yu. Protsenko, and A. M. Chornous, *Functional Mater.*, 6, No. 5: 880 (1999).
5. А. И. Кузьменко, С. В. Петренко, И. Е. Проценко, *ВАНТ*, 2(10): 87(1990).

6. F. Khater and M. El-Hiti, *Phys. Status Solidi B*, **148**, No. 1: 241 (1988).
7. Л. В. Однодворець, С. И. Проценко, А. И. Салтыкова, *Металлофиз. новейшие технол.*, **21**, № 8: 71 (1999).
8. F. Warkusz, *Prog. Surf. Sci.*, **10**: 287 (1980).
9. C. R. Tellier and A. J. Tosser, *Size Effect in Thin Films* (Amsterdam; Oxford; New York: Elsevier Sci. Publ. Co.: 1982).
10. *Диаграммы состояния двойных металлических систем* / Под ред. Н. П. Лякишева (Москва: Машиностроение: 1997), т. 2.
11. О. Б. Ласюченко, *Ефект тензочутливості у плівкових системах на основі Cu, Cr і Sc*: Автореф. дис. ... канд. фіз.-мат. наук (Суми: СумДУ: 2001).
12. O. Lasychenko, L. Odnodvoretz, and I. Protsenko, *Cryst. Res. Technol.*, **35**, № 3: 329 (2000).
13. Ю. М. Овчаренко, Н. М. Опанасюк, І. Ю. Проценко та ін., *УФЖ*, **42**, № 7: 826 (1997).
14. О. Б. Ласюченко, И. Е. Проценко, А. Н. Черноус и др., *Тонкие пленки в электронике* (Харків: ННЦ «ХФТІ»: 2001).
15. И. Е. Проценко, А. Н. Черноус, *Металлофиз. новейшие технол.*, **16**, № 12: 18 (1994).