МАТЕРІАЛИ ДЛЯ СЕНСОРІВ

SENSOR MATERIALS

PACS numbers: 65.70.+y, 72.15.Jf, 73.61.-r
УДК 539.2, 539.37, 621.316.8

ТЕНЗОРЕЗИСТИВНИЙ ЕФЕКТ У ТОВСТИХ ПЛІВКАХ НА ОСНОВІ ЛЕГОВАНОГО СУРМОЮ ДИОКСИДУ ОЛОВА

Б. М. Рудь, А. Г. Гончар, Є. Я. Тельніков

Інститут проблем матеріалознавства НАН України,
вул. Крижанівського 3, Київ 03142, тел. 424-23-71, e-mail: artgonch@ukr.net

Анотація

ТЕНЗОРЕЗИСТИВНИЙ ЕФЕКТ У ТОВСТИХ ПЛІВКАХ НА ОСНОВІ ЛЕГОВАНОГО СУРМОЮ ДИОКСИДУ ОЛОВА

Б. М. Рудь, А. Г. Гончар, Є. Я. Тельніков

Досліджено тензорезистивний ефект у високоомних товстих плівках на основі SnO_2 — Sb. Виявлено, що досліджені плівки мають високу тензочутливість, це робить їх перспективними для використання у тензодатчиках. Встановлено, що величина і знак коефіцієнта тензочутливості залежать від методу вимірювання. Пояснення зв'язується зі структурними особливостями плівок і механізмом їх електропровідності. На тензочутливість плівки також впливає матеріал підкладки.

Ключові слова: товсті резистивні плівки, коефіцієнт тензочутливості, тунелювання.

Summary

PIEZORESISTIVE EFFECT IN THICK FILMS ON THE BASIS OF ANTIMONY DOPED TIN OXIDE

B. M. Rud, A. G. Gonchar, E. Ya. Telnikov

Piezoresistive effect in high-ohmic thick films on the basis of SnO_2 — Sb is investigated. It is discovered that the films possess high values of gauge factor, which makes them promising for use in the strain sensors. It is established that the magnitude and the sign of the gauge factor are dependent on the particular measurement method. The proposed explanation for this observation takes into account structural characteristics of the films and their electrical conductivity mechanism. It is also established that the strain sensitivity of the films depends on the substrate material.

Key words: thick resistive films, gauge factor, tunneling

Аннотация

ТЕНЗОРЕЗИСТИВНИЙ ЕФФЕКТ В ТОЛСТЫХ ПЛЕНКАХ НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА ОЛОВА ЛЕГИРОВАННОГО СУРЬМОЙ

Б. М. Рудь, А. Г. Гончар, Е. Я. Тельников

Исследован тензорезистивный эффект в высокоомных толстых пленках на основе SnO_2 — Sb. Обнаружено, что исследованные пленки обладают высокой тензочувствительностью, это делает их перспективными для использования в тензодатчиках. Установлено, что величина и знак коэффициента тензочувствительности зависят от метода измерений. Объяснение связывается со структурными особенностями пленок и механизмом их электропроводности. На тензочувствительность пленок также оказывает влияние материал подложки.

Ключевые слова: толстые резистивные пленки, коэффициент тензочувствительности, туннелирование.

Вступ

Товсті резистивні плівки на основі легового сурмою диоксиду олова (SnO_2 —Sb) являють собою гетерофазне середовище, що складається із скляної матриці з розподіленими в ній частками струмопровідної фази. Така структура формується при термообробці нанесеної на підкладку методом трафаретного друку пасти, у якій як струмопровідна фаза, так і склов'язуюче знаходяться у вигляді дисперсних порошків. В результаті розм'якшення скла і коагуляції його часток формується скляна матриця, яка забезпечує консолідацію плівки і її адгезію до підкладки.

Одним з основних структурних елементів, який багато в чому визначає взаємозв'язок між структурою і електрофізичним властивостями таких плівок, є діелектричний нанорозмірний (до декількох десятків нм [1]) прошарок між сусідніми частками струмопровідної фази. Товщина прошарку, що визначає переважний механізм електропроводності, залежить від вмісту, дисперсності і характеру розподілу часток струмопровідної фази у об'ємі плівки. Властивості товстоплівкових резисторів на основі легового сурмою диоксиду олова нами вивчено досить детально [2-6].

В останні роки спостерігається зростання числа публікацій, що присвячені можливості використання товстоплівкових резисторів на основі сполук рутенію як чутливих елементів тензодатчиків [7-10]. Відомо, що тензорезистивний ефект обумовлений не тільки зміною геометричних розмірів у процесі деформації, але і є внутрішньою властивістю матеріалу.

Основною характеристикою служить коефіцієнт тензочутливості γ :

$$\gamma = \left(\frac{\Delta R}{R} \right) / \left(\frac{\Delta l}{l} \right) = \frac{\Delta R}{R \epsilon}, \quad (1)$$

де R — електроопір матеріалу, l — довжина резистора, ϵ — відносна деформація.

В залежності від напрямку деформації — уздовж або поперек напрямку електричного струму розрізняють подовжній (γ_l) та поперечний (γ_t) коефіцієнти тензочутливості:

$$\gamma_l = \frac{\Delta \rho}{\rho \epsilon} + (1 + 2\nu) = \gamma^i + (1 + 2\nu), \quad (2)$$

$$\gamma_t = \gamma^i - 1, \quad (3)$$

де ρ — питомий електроопір матеріалу, ν — коефіцієнт Пуассона.

Другий член рівнянь (2), (3) пов'язаний з геометричною зміною розмірів зразка, а γ^i — зі зміною фізичних параметрів. Величезний інтерес до тензорезистивного ефекту в товстих плівках обумовлений тим, що хоча їхній опір і менш чутливий до зовнішнього механічного впливу в порівнянні з острівцевими плівками і напівпровідниками, але при цьому товстоплівкові резистори мають цілу низку істотних переваг. До числа таких переваг відносяться низькі значення температурних коефіцієнтів γ і електроопору (ТКО), їх висока технологічність і стабільність властивостей, низька собівартість. Усе це робить товстоплівкові резистори надзвичайно перспективними матеріалами для застосування в галузі сенсорної мікроелектроніки.

Метою даної роботи було дослідження тензочутливості товстих плівок на основі диоксиду

олова, легованого сурмою, що добре себе зарекомендували як високоомні резистори [2-4].

Методика експерименту

Зразки резистивних плівок одержували методом трафаретного друку з паст, які мали в своєму складі порошки SnO_2 , легованого Sb (3,3 ат. %) із середнім діаметром часток 0,2 мкм і 1 мкм, порошки свинцевоборосилікатного скла й органічну зв'язку, яка цілком вигорала в процесі термообробки. Вміст скла в пастах складав 40, 50 і 60 мас. %. Термообробка здійснювалася на повітрі при температурі 1093 К у конвейєрній печі ПЕК — 8.

Вимірювання тензочутливості зразків проводилися двома методами.

У першому методі використовувалися довгі і вузькі (90 x 7 мм) сталеві підкладки, покриті діелектричною емаллю. Розміри нанесених на них резистивних плівок складали 40 x 4 мм. Для вимірювання подовжнього коефіцієнту тензочутливості використовувалася схема одноосового розтягування. Розтяжне зусилля, що прикладається до торців підкладки, реєструвалося методом динамометрії. До недоліків методу відноситься те, що їм можна визначити лише подовжній коефіцієнт тензочутливості γ_1 при розтягуванні, а також обмеженість у виборі матеріалу підкладки.

В другому методі використовувалася схема триточкового згинання [7], яка представлена на рис. 1. Метод придатний для визначення тензочутливості товстих плівок, нанесених як на металеві, так на керамічні і ситалові підкладки.

Рис. 1. Схема триточкового згинання для вимірювання тензочутливості плівок.

Для деформації плівки до центра підкладки, яка розміщена на ножових опорах, прикладається зусилля. При цьому плівка на верхній

стороні підкладки стискається, а на нижній розтягується. Величина відносної деформації плівки, розташованої в центрі підкладки, описується рівнянням [7]:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{6 \delta t}{L^2}, \quad (4)$$

де δ — прогин підкладки, t — товщина підкладки, L — відстань між опорами.

Для вимірювання тензочутливості по методу триточкового згинання використовувалися плівкові зразки розміром 2 x 2 мм, нанесені на підкладки розміром 60 x 48 мм. Як підкладки використовувалися емальована сталь, алюмооксидна кераміка, кераміка на основі нітриду алюмінію, а також ситал.

Результати експерименту та їх обговорення

На рис. 2 наведено результати вимірювання тензорезистивного ефекту за першим методом, які ілюструють лінійне збільшення $\Delta R/R$ з ростом деформації ε при одноосовому розтягуванні для плівок з вмістом склосвязуючого 40, 50, 60 мас. %. Характер залежності не змінювався і після наступних циклів деформації. Коефіцієнт подовжньої тензочутливості обчислювався по тангенсу кута нахилу прямих до осі відносних деформацій ε . Значення подовжнього коефіцієнту тензочутливості в залежності від вмісту в композиції склосвязуючого складало: $\gamma_1 = 39,3$ (40 мас. %); 60,1 (50 мас. %); 47,5 (60 мас. %).

Рис. 2. Зміна електроопору при розтягуванні товстоплівкових зразків. Вміст склосвязуючого в мас. %: 1 — 40; 2 — 50; 3 — 60.

З наведених даних видно, що величина коефіцієнту тензочутливості резистивних товстих плівок на основі $\text{SnO}_2\text{-Sb}$ велика і порівнянна зі значеннями γ для тонких острівцевих плівок з тунельним механізмом провідності. Для плівок, в яких переважає тунельний механізм провідності, тензорезистивний ефект пов'язаний зі зміною умов для тунелювання носіїв заряду, тобто ширини і висоти потенціального бар'єру між острівцями при деформації [11,12]. При великих відстанях між острівцями тунелювання перестає бути переважним механізмом провідності. Від зміни механізму провідності в плівках відбувається різка зміна величини коефіцієнту тензочутливості.

У товстих плівках на основі $\text{SnO}_2\text{-Sb}$ при вмісті склов'язуючого більше 40 мас. % перенос заряду крізь діелектричні прошарки між струмопровідними частками здійснюється за допомогою тунелювання [1-3]. Високі значення коефіцієнту тензочутливості в досліджених плівках також підтверджують домінування в них тунельного механізму провідності. Максимальна величина γ спостерігалася для плівок з вмістом склов'язуючого 50 мас. %. Більш низькі значення γ для плівок з вмістом склов'язуючого 60 мас. % пояснюються тим, що збільшення вмісту скла в композиції при-

водить до збільшення товщини скляних прошарків. У таких плівках поряд з тунельним механізмом провідності істотну роль починає грати механізм стрибкової провідності. У плівках з вмістом скла 40 мас. % присутня велика кількість контактуючих часток, між якими відсутній скляний прошарок. І в тім і в іншому випадках роль тунельного механізму переносу заряду знижується, що і приводить до більш низьких значень γ .

У таблиці 1 наведено результати вимірювання γ і γ_t при розтягуванні по методу триточкового згинання. Крім того, була виміряна величина γ_t при стисканні. Для всіх плівок значення γ_t при стисканні за абсолютною величиною дорівнює значенню γ_t при розтягуванні і має протилежний знак. Подовжній коефіцієнт тензочутливості при розтягуванні для всіх плівок за абсолютною величиною приблизно на 30 % більше поперечного коефіцієнту тензочутливості при розтягуванні.

Як видно з таблиці, додатні коефіцієнти тензочутливості спостерігалися тільки у плівок на ситалових підкладках. Плівки на підкладках з AlN демонстрували невідтворювану зміну опору при найменших навантаженнях, у зв'язку з чим результати вимірювання γ цих зразків не було включено в таблицю.

Таблиця 1

Електроопір і коефіцієнти тензочутливості плівок на основі $\text{SnO}_2\text{-Sb}$.

Середній діаметр часток порошку $\text{SnO}_2\text{-Sb}$	0,2 мкм			1 мкм				
Матеріал підкладки	Алюмооксидна кераміка			Алюмооксидна кераміка			Сталь	Ситал
Вміст скла, мас. %	40	50	60	40	50	60	50	50
R , КОм/кв	29,3	73,22	230,8	68,4	259,7	5650	169,8	290,5
γ_l	-4,7	-6,8	-5,5	-7,2	-12,8	-8,4	-13,8	+45,1
γ_t	-3,3	-4,9	-4,1	-5,1	-9,6	-6,5	-10,2	+33,7

Від'ємні значення коефіцієнтів тензочутливості в табл. 1 свідчать про те, що при розтягуванні за даним методом величина електроопору плівок зменшується. Такі результати виявилися для нас досить несподіваними, тому що раніше подібного ефекту в літературі не спостерігалось. З представлених даних видно, що результати вимірювання γ , проведені двома різними методами, відрізняються не тільки по абсолютній величині, але навіть і за знаком. Так, наприклад, якщо величина γ плівок з вмістом склов'язуючого 50 мас. % на сталевих

емальованих підкладках при одноосьовому розтягуванні складала +60,1, то при вимірюванні методом триточкового згинання в плівках того ж складу на таких же підкладках величина γ складала -13,8.

Такі результати можуть бути пояснені, якщо врахувати структурні особливості плівок на основі системи $\text{SnO}_2\text{-Sb}$. Фотографії структур досліджених плівок, які були одержані за допомогою скануючого мікроскопу "Stereoskan-S4 — 10", наведено на рис. 3. Видно, що частки $\text{SnO}_2\text{-Sb}$ сферичної або близь-

Рис. 3. Фотографії шліфів плівок на основі $\text{SnO}_2 - \text{Sb}$ з середнім діаметром струмопровідних часток 1 мкм (а,б,в) та 0,2 мкм (г). Вміст склозв'язуючого в композиції (мас. %): а) 40, б) та г) 50, в) 60. Світлі ділянки — струмопровідні частки, темні — скло. Збільшення 700.

кої до неї форми із середнім діаметром 1 мкм практично рівномірно розподілені в скляній матриці. При вмісті скла 60 мас. % спостерігається структурування, яке полягає у вишикуванні часток $\text{Sn}_2\text{O}-\text{Sb}$ навколо більш великих утворень скла. Зі збільшенням вмісту склофазу збільшується товщина діелектричних прошарків між частками струмопровідної фази. Підвищення дисперсності часток провідної фази приводить до зменшення товщини скляних прошарків і для плівок із середнім діаметром часток SnO_2-Sb 0,2 мкм помітні вже конгломерати часток, які розділені прошарками. Така картина корелює з розрахунком, що здійснений нами в [13] на підставі виведеного з побудованої структурної моделі рівняння:

$$\Delta = d \left(\sqrt[3]{\frac{x'}{x}} - 1 \right), \quad (5)$$

де Δ — товщина прошарку, d — середній діаметр струмопровідних часток, x — об'ємний вміст струмопровідної фази, x' — відносна щільність упаковки струмопровідних часток в об'ємі плівки.

Як видно з рис. 3, частки струмопровідної фази з діелектричними прошарками утворюють в об'ємі плівки розгалужені ланцюги, по яких і здійснюється перенос заряду. Для такої структури характерна велика кількість тунельних переходів, спрямованих під кутом до вектору напруженості електричного поля, і шляхи протікання струму в значній мірі звивисті. Необхідно відзначити, що навіть при наявності прямих контактів між частками провідної фази спікання між ними не відбувається і на межі контакту існує потенціальний бар'єр.

При розтягуванні плівки частина діелектричних прошарків настільки збільшує свою тов-

щину, що стає недоступною для тунелювання. Оскільки діелектричні прошарки є ланками струмопровідних ланцюгів, то обрив навіть однієї такої ланки приводить або до вимикання цілого ланцюга з процесу струмопереносу, або до її перебудови в більш звивисту конфігурацію. Такі процеси не можуть не спричинити помітного росту електроопору плівки. Таким чином, на наш погляд, тензорезистивний ефект у товстих плівках з ланцюжковою структурою, на відміну від острівцевих тонких плівок, може бути пов'язаний не тільки зі зміною умов для тунелювання між частками, але і зі зміною шляхів протікання струму (зміною конфігурації провідних кластерів) при деформації. Таким механізмом зміни електроопору при деформації можна пояснити великі величини тензочутливості досліджених плівок.

При дослідженні впливу деформації на електроопір плівок необхідно враховувати той факт, що при подовжнім розтягуванні плівки відбувається її стиск у поперечних напрямках. Ущільнення плівки по ширині і товщині і, таким чином, зменшення товщин прошарків між частками в цих напрямках повинно приводити до залучення в процес переносу заряду часток, раніше розділених занадто широкими для тунелювання прошарками, і утворенню нових струмопровідних ланцюгів. Для випадку одноосевого розтягування поперечна деформація визначається коефіцієнтом Пуассона підкладки і дані процеси не грають істотної ролі. Електроопір при розтягуванні росте і коефіцієнт тензочутливості плівок γ додатний. На наш погляд, для плівок на основі диоксиду олова, легованого сурмою, збільшення електропровідності при розтягуванні по методу триточкового згинання пояснюється саме пе-

ревагою процесів зміни конфігурації провідних кластерів, утворення нових провідних ланцюжків над процесами їхнього розриву і збільшення товщин діелектричних прошарків між частками. Коефіцієнт тензочутливості в даному випадку від'ємний і за абсолютною величиною в кілька разів менше значень, отриманих при одноосьовому розтягуванні. Така поведінка може бути обумовлена як нерівномірною (за рахунок кривизни поверхні згинання) деформацією плівки по товщині, так і впливом на плівку радіальних і тангенціальних напружень.

Те, що досліджені плівки на підкладці із ситалу (на відміну від плівок на сталі й алюмооксидній кераміці) демонструють збільшення електроопору при згинанні, свідчить про значний вплив підкладки на електрофізичні властивості плівок. Про це також свідчать величини електроопору плівок на різних підкладках, які наведено в табл. 1. Раніше [6] нами була досліджена роль підкладок у формуванні електрофізичних властивостей плівок на основі $\text{SnO}_2\text{-Sb}$. Для усіх використаних у даній роботі композицій хімічна взаємодія між плівкою і підкладкою була відсутня і вплив підкладок на властивості плівок обумовлений неузгодженістю коефіцієнтів термічного розширення (КТР). У таблиці 2 наведено величини КТР підкладок, що використовувалися в роботі. КТР плівкової композиції на основі $\text{SnO}_2\text{-Sb}$ (α_k), розрахований за правилом сумішей для матричних структур, складає величину $58,78 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$, модуль пружності $E_k = 120 \times 10^9 \text{ Па}$. Неузгодженість КТР плівки і підкладки приводить до деформації плівки і виникненню залишкових термічних напружень на межі поділу плівка-підкладка при охолодженні в процесі термообробки.

Таблиця 2

КТР підкладок і залишкові термічні напруження (σ_k), викликані неузгодженістю КТР плівки і підкладки.

Матеріал підкладки	Сталь	Алюмооксидна кераміка	Ситал	AlN
КТР $10^6, \text{ K}^{-1}$	11	6	5,2	4,8
$\sigma_k 10^{-7}, \text{ Па}$	35,95	0,842	-4,76	-7,57

Плівки на підкладках із сталі та алюмооксидної кераміки ($\alpha_k < \alpha_n$) стають в результаті термообробки стиснутими, а на підкладках із ситалу і кераміки на основі AlN ($\alpha_k > \alpha_n$) розтягнутими. Величини залишкових термічних напружень, які розраховано по формулі

$$\sigma_k = (\alpha_n - \alpha_k) \Delta T / (1/E_k - 1/kE_n), \quad (6)$$

де α_n і E_n — КТР і модуль пружності підкладки відповідно; k — відношення товщини підкладки до товщини плівки; ΔT — температурний інтервал, наведено в табл. 2.

Додаткові значення відповідають напруженням стискання, від'ємні — напруженням розтягування. Передаючись в об'єм плівки, ці напруження змінюють картину напруженого стану в прошарку між струмопровідними частками. Залишкові термічні напруження впливають на площу контакту на міжфазній межі струмопровідна фаза-діелектрик і на параметри потенціального бар'єру, утвореного діелектричним прошарком. Механізм такого впливу описаний нами в [5,6].

Розтягування по методу триточкового згинання плівок на підкладках з AlN і ситалу, які в результаті термообробки вже знаходяться в розтягнутому стані, приводить до значного збільшення електроопору, тобто до великого і додатного γ . Виходячи з вищесказаного, величина коефіцієнту тензочутливості плівок на цих підкладках при вимірюваннях методом одноосового розтягування повинна бути вищою, однак механічні властивості даних матеріалів роблять такі вимірювання досить складними. Важливо відзначити, що залишкові термічні напруження розтягування зменшують область пружного поведіння плівок. Як відзначалося вище, плівки на підкладках з нітриду алюмінію демонструють непружне поведіння, пов'язане з утворенням мікротріщин при найменшому прикладеному навантаженні. Непружне поведіння плівок на підкладках із ситалу починається при величинах відносної деформації $1,5 \cdot 10^{-4}$, у той час як плівки на підкладках із сталі та алюмооксидної кераміки мали гарну відтворюваність результатів у всьому інтервалі вимірювань (до $6 \cdot 10^{-4}$).

З даних, наведених у табл. 1, видно, що при вимірюванні по методу триточкового згинання залежність γ від вмісту склозв'язуючого в композиції зберігається такою ж, як і для вимірювань по методу одноосового розтягування. І для композицій із середнім діаметром часток порошку провідної фази $d = 0,2$ мкм і для композицій з $d = 1$ мкм максимальне за модулем значення γ мають плівки з вмістом склозв'язуючого 50 мас. %.

Плівки, у яких використовувався порошок провідної фази з $d = 0,2$ мкм, мають менший електроопір і менший γ у порівнянні з плівками, в яких середній діаметр часток складав 1 мкм (табл. 1). У першому випадку формується структура, для якої характерна наявність

більш вузьких прошарків між частками провідної фази, більша кількість контактуючих часток, і, таким чином, менші значення питомого опору плівок, ніж у випадку статистичного розподілу при однаковому вмісті скла в композиції (табл. 1).

Висновки

Високі значення γ плівок на основі легованого сурмою диоксиду олова обумовлені установленим в попередніх дослідженнях домінуванням тунельного механізму переносу заряду між струмопровідними частками крізь діелектричні прошарки. На величину і знак коефіцієнту тензочутливості впливають структурні особливості досліджених плівок, метод вимірювання, а також неузгодженість КТР плівки і підкладки.

Високі значення коефіцієнту тензочутливості і висока стабільність властивостей, більш низька собівартість у порівнянні з плівками на основі сполук рутенію обумовлюють перспективність плівок на основі $\text{SnO}_2\text{-Sb}$ для використання як чутливих елементів тензодатчиків.

Список літератури

1. Виноцкий И. М., Рудь Б. М., Тельников Е. Я., Гончар А. Г., Роль контактной разности потенциалов на межфазных границах в композиционных толстых пленках в формировании их электрофизических свойств // *Металлофизика и новейшие технологии*. — 2002. — Т. 24, №9. — С. 1261–1266.
2. Дышель Д. Е., Рудь Б. М., Смолин М. Д., Природа активационной проводимости в композиционных пленках на основе порошков легированного диоксида олова и стекла // *Порошковая металлургия*. — 1987. — №11. — С. 63–68.
3. Дышель Д. Е., Рудь Б. М., Смолин М. Д., Стоянов И. А., Электропроводность гранулированных пленок “легированный диоксид олова-стекло” // *Радиотехника и электроника*. — 1988. — Т. 33, №10. — С. 2214–2216.
4. Дышель Д. Е., Рудь Б. М., Смирнов В. П., Смолин М. Д., Влияние структуры на электросопротивление толстых пленок на основе легированного диоксида олова // *Изв. АН СССР. Сер. Неорг. матер.* — 1985. — Т. 21, №10. — С. 1706–1709.
5. Гончар А. Г., Виноцкий И. М., Дышель Д. Е., Взаимосвязь термических напряжений с электрофизическими свойствами резистивных толстых пленок на основе $\text{SnO}_2\text{-Sb}$ // *Доповіді НАНУ*. — 2001. — №5. — С. 82–89.

6. Гончар А. Г., Рогозинська А. О., Рудь Б. М., Віницький І. М., Вплив підкладки на електрофізичні властивості композиційних плівок на основі $\text{SnO}_2\text{-Sb}$ // УФЖ. — 2003. — Т. 48, №2. — С. 146–150.
7. Belavic D., Pavlin M., Gramc S., Hrovat M., Santo-Zarnic M., Some Applications of Thick-Film Strain Gauge // In Proc. of 24 th Intern. Conf. and Exhib., IMAPS., Poland. — 2000. — P. 199–202.
8. Grimaldi C., Ryser P., Strdssler S., Gauge factor enhancement driven by heterogeneity in thick-film resistors // J. Appl. Phys. — 2001. — V. 90, N1. — P. 322–327.
9. Prudenziati M. Thick film sensors. — N. Y.: Elsevier. — 1994. — 464 p.
10. Canali C., Malavasi D., Morten B., Prudenziati M., Taroni A. Strain sensitivity in thick-film resistors // IEEE Trans., Comp., Hybrids., and Manuf. Technol. — 1980. — V. 3, N 3. — P. 421–423.
11. Мейскин З. Г. Несплошные и керметные пленки. — В кн.: Физика тонких пленок. М.: Мир, 1978. — Т8. — С. 106–179.
12. Parker R. L., Krinsky A., Electrical resistance-strain characteristics of thin evaporated metal films // J. Appl. Phys. — 1963. — V. 34, N 9. — P. 2770–2775.
13. Виницкий И. М., Дышель Д. Е., Рудь Б. М., Тельников Е. Я., Определение параметров структуры и их влияние на электропроводность керметных пленок на основе твердых растворов $\text{BaB}_6\text{-LaB}_6$ и $\text{SnO}_2\text{-Sb}$ // Порошковая металлургия. — 1991. — №6. — С. 43–48.