

## ЧУТЛИВІ ЕЛЕМЕНТИ ДАТЧИКА ТИСКУ НА ОСНОВІ ПЛІВОК Cr I Cu АБО Fe

**І.М. Пазуха, І.Ю. Проценко**

*Сумський державний університет, вул. Р.Корсакова, 2, Суми, 40007*

*e-mail: [protsenko@aph.sumdu.edu.ua](mailto:protsenko@aph.sumdu.edu.ua)*

*Запропонований чутливий елемент датчика тиску, який формується на основі багатошарової плівкової системи на основі шарів Cr і Cu або Fe. Наведені результати досліджень робочих характеристик датчика тиску на основі систем Fe/Cr та Cu/Cr, а також аналіз процесів дифузії і фазоутворення на межі поділу шарів і проблему стабільності інтерфейсів.*

### ВСТУП

На даний час залишається актуальним дослідження термо- і тензорезистивних, магніторезистивних, оптичних та ін. властивостей тонких плівок, оскільки вони відкривають перспективи широкого їх використання як чутливих елементів різноманітних сенсорів [1-7]. Зокрема, мова йде про можливість виготовлення на основі тонкоплівкових матеріалів тензорезисторів [4, 8]. Сфери застосування тензорезисторів не обмежуються лише створенням тензодатчиків. Їх також можна використовувати як чутливі елементи датчиків тиску, які знайшли своє практичне застосування при вимірюванні тиску в будь-яких рідких і газових середовищах, в умовах підвищеної вологості, прямої дії води та кислот, за наявності вібрацій, ударів, перенавантажень та багатьох інших сферах [7, 9-11]. Так, у роботі [7] був розроблений прототип датчика тиску на основі плівки оксидів In та Sn. Такий чутливий елемент характеризується п'єзорезистивним коефіцієнтом  $k = -4,3 \cdot 10^{-11} \text{ Па}^{-1}$ , що відповідає коефіцієнту тензочутливості  $\gamma = -2,8$  і дозволяє фіксувати перепад тисків у діапазоні від  $-6 \cdot 10^4 \text{ Па}$  до  $6 \cdot 10^4 \text{ Па}$ . Автори роботи [11] запропонували чутливий елемент для датчика тиску на основі манганину, який характеризується високим п'єзорезистивним коефіцієнтом ( $k = 17,3 \text{ МПа}^{-1}$ ) і може бути використаний для вимірювання значних перепадів тисків.

У тому випадку, коли чутливим елементом датчика є тонкоплівкова система, стабільність його роботи значною мірою буде визначатися процесами, які відбуваються на межі поділу окремих шарів. У зв'язку з цим нами були проведені дослідження процесів фазоутворення і взаємної дифузії атомів та пов'язана з ними стабільність інтерфейсів з метою створення чутливого елемента датчика тиску зі стабільними робочими характеристиками.

### МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Для дослідження фізичних процесів у чутливому елементі датчика тиску була розроблена проста конструкція, схематичне зображення якої зображене на рисунку 1. Робочою частиною датчика є тонка фторопластова мембрана (1) товщиною  $d = 0,5 \text{ мм}$ , на поверхню якої наноситься тонкоплівковий чутливий елемент (2) у вигляді одно- чи багатошарової плівки та мідні контактні майданчики (3) з попередньо нанесеним для кращої адгезії підшаром хрому (4), до яких приєднуються мікропайкою контактні дроти або срібні притискні контакти. Гумові ущільнювачі (5) використовуються для кращої фіксації притискних контактів на поверхні контактних майданчиків.

Нанесення чутливого елемента на поверхню мембрани та контактних майданчиків проводилося методом термічного (Cu, Cr) та електронно-променевого (Fe) випарування у вакуумній установці ВУП-5М (тиск газів залишкової атмосфери  $\sim 10^{-4}$  Па) зі швидкістю  $\omega \cong 2,0-2,5$  нм/с (Cu), 0,2-0,8 нм/с (Cr) та 2,0-3,0 нм/с (Fe) і температурі підкладки  $T_n = 300\text{K}$  (вимірювалася з використанням хромель-алюмелевої термопари і вольтметра УТ-70В). Товщина контролювалася за допомогою кварцового резонатора, що забезпечувало точність 10 %, та інтерферометричним методом (прилад МП-4). Вимірювання електричного опору здійснювалось цифровим вольтметром АРРА-109 з точністю  $\pm 0,06$  %.

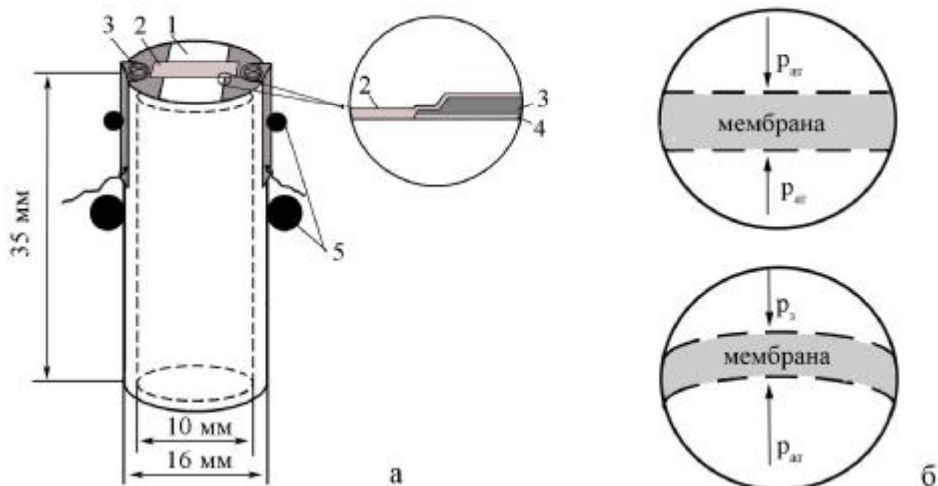


Рисунок 1 - Схематична конструкція датчика тиску (а) та принцип його роботи (б): 1 – фторопластова мембрана; 2 – чутливий елемент; 3 – мідні контактні майданчики; 4 – плівка Cr; 5 – гумові ущільнювачі.  $p_з$  – тиск залишкової атмосфери

Дослідження фазового складу проводилися рентгенографічним методом при використанні приладу X'Pert PRO (Карловий університет, м. Прага), дифузійних процесів – методом вторинно-іонної мас-спектрометрії. Шорсткість поверхні та інтерфейсів плівкових чутливих елементів визначалася за методикою малокутової дифракції рентгенівських променів [12] за допомогою програмного забезпечення X-Pert Reflectivity.

### РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Принцип роботи запропонованого нами датчика тиску базується на тензорезистивних властивостях чутливого елемента (рисунок 1,б): при зміні тиску у робочому об'ємі відносно до зовнішнього атмосферного тиску відбуваються деформації чутливого елемента датчика, внаслідок чого виникають механічні напруження розтягувального або стискувального характеру, які приводять до зміни електричного опору. Таким чином, матеріали, які використовуються при виготовленні чутливих елементів датчиків тиску, повинні мати високе значення коефіцієнта тензочутливості (КТ) і стабільність характеристик у робочому діапазоні тисків і температур. Досить простим варіантом є виготовлення чутливого елемента датчика тиску на основі плівки Cr, оскільки вона має гарну адгезію до матеріалу мембрани. Однак, як показали результати роботи [13], зразки Cr мають величину КТ  $\cong 40$  лише у діапазоні

пластичних деформацій  $\varepsilon_1 = 10\%$ , і тому не може бути використана як матеріал для датчика, оскільки його стабільна робота досягається лише в області пружних деформацій.

Одним із можливих варіантів збільшення величини КТ може бути перехід від одно- до багатошарових систем за рахунок появи додаткового механізму розсіювання носіїв електричного струму – межі поділу між шарами. Так, у роботі [14] був запропонована концепція виготовлення тензорезистора з металевого матеріалу – багатошарової плівки, яка складається з шарів Ni, Co та Cr. Скориставшись ідеями [14], чутливий елемент датчика тиску був виготовлений на основі дво- і багатошарових плівкових систем Cu/Cr та Fe/Cr. Нижнім шаром була вибрана плівка Cr з високою адгезією до мембрани, на яку наносився шар Cu або Fe. Вибір плівкових систем був зроблений з таких міркувань. Згідно з діаграмою стану [15], даними про фазовий стан (рисунок 2) та дифузійні процеси (рисунок 3) система Cu/Cr зберігає індивідуальність окремих шарів і має стабільний фазовий стан ГЦК-Cu + ОЦК-Cr з параметрами ґратки  $\bar{a} = 0,360 - 0,361$  нм (Cu) та  $\bar{a} = 0,288 - 0,289$  нм (Cr) відповідно при відносно великих температурах, а у системі Fe/Cr вже на стадії конденсації відбувається утворення твердого розчину (Fe, Cr), який зберігається при термовідпалюванні до 630 К і має ОЦК-ґратку з параметром  $\bar{a} = 0,289 \pm 0,001$  нм.

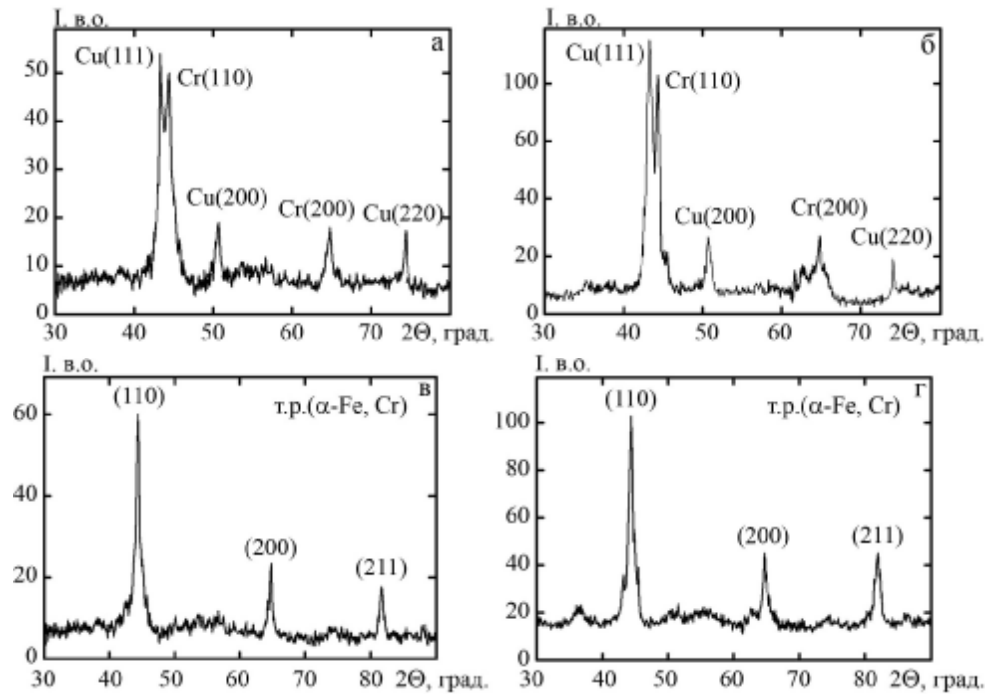


Рисунок 2 – Приклади рентгенограми від плівкових систем  $[Cu(30)/Cr(30)]_2/\Pi$  (а, б) і  $[Fe(10)/Cr(10)]_2/\Pi$  (в, г) у невідпаленому (а, б) та відпаленому до 630 К і (в, г) станах. У дужках вказана товщина в нм

Крім того, у роботі [17] було встановлено, що для системи Cu/Cr величина коефіцієнта  $\gamma_l = 2-4$  (загальна товщина зразка  $d = 30$  нм) і збільшується до  $\gamma_l = 22-28$  (загальна товщина зразка  $d=60$  нм) при сталій товщині шару Cu і при збільшенні товщини шару Cr. Для системи Fe/Cr характерна величина  $\gamma_l = 15-20$  [18]. Таким чином, системи Cu/Cr і Fe/Cr

перспективні при створенні чутливих елементів не тільки тензодатчиків, а й датчиків тиску.

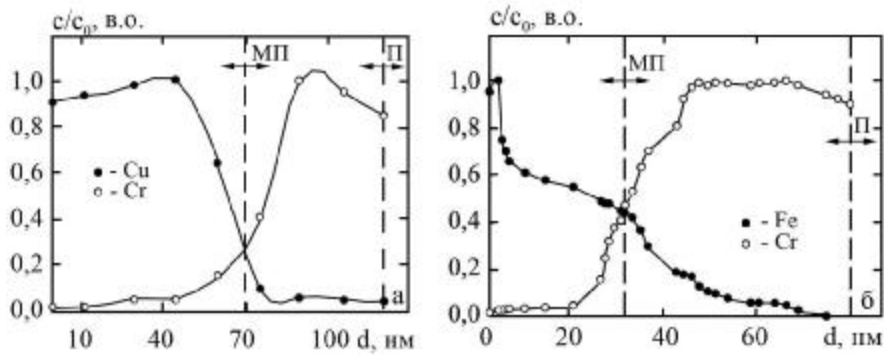


Рисунок 3 – Приклади дифузійних профілів відносної концентрації для плівкових систем  $Cu(80)/Cr(40)/\Pi$  (а), і  $Fe(40)/Cr(40)/\Pi$  (б) у невідпаленому стані. Дані для системи  $Fe(40)/Cr(40)/\Pi$  взяті із роботи [16]

На рисунку 4 зображені типові робочі характеристики запропонованого датчика тиску. Як видно з рисунка, залежність має дві ділянки, на першій із них вана має лінійний характер, причому при збільшенні величини  $p$  відносна зміна опору  $\Delta R/R_n$  також зростає, що повністю узгоджується із уявленням про тензоефект, а на другій – спостерігається немонотонна зміна опору при зміні тиску. Лінійна ділянка відповідає діапазону тисків у вакуумній камері  $p = 20-40$  Па, тому даний датчик можна використовувати для вимірювання форвакууму, наприклад у вакуумній установці ВУП-5М. Причиною різкого збільшення опору на другій ділянці є зміна швидкостей відкачки із робочої камери при переключенні режиму роботи з форвакууму на високий вакуум.

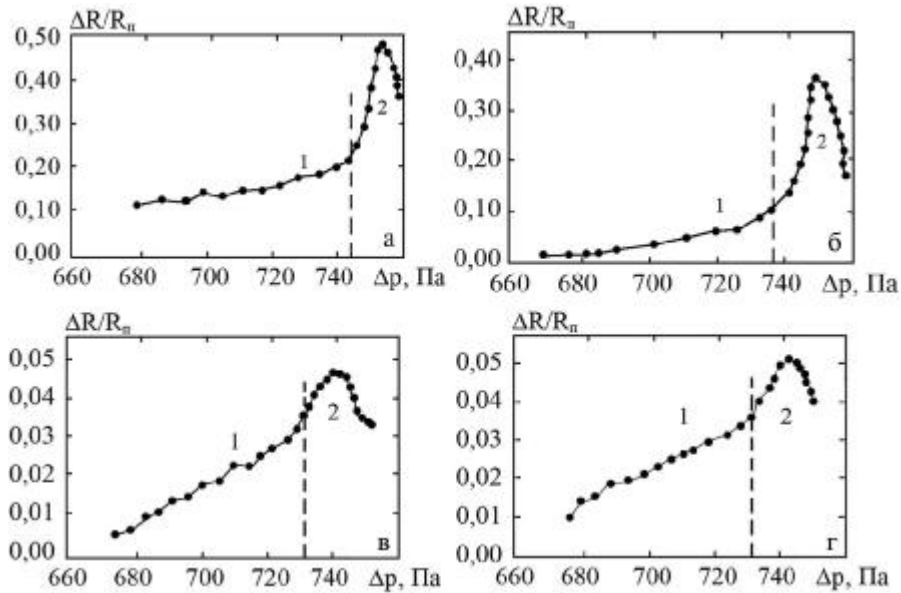


Рисунок 4 – Робочі характеристики датчика тиску на основі плівкових систем  $[Cu(20)/Cr(20)]_2/\Pi$  (а),  $[Cu(10)/Cr(15)]_2/\Pi$  (б),  $[Fe(15)/Cr(15)]_2/\Pi$  (в),  $[Fe(10)/Cr(10)]_2/\Pi$  (г), де  $\Delta p = p_{atm} - p_z$

На основі наведених робочих характеристик проводився розрахунок величини баричного коефіцієнта опору  $\gamma_p = R_n^{-1} \cdot dR/dp$ . Величина  $\gamma_p$  для системи Cu/Cr змінюється в межах від  $1,50 \cdot 10^{-3}$  до  $0,12 \cdot 10^{-3} \text{ Па}^{-1}$  в інтервалі товщин  $d = 50\text{-}120 \text{ нм}$ , для системи Fe/Cr - від  $0,50 \cdot 10^{-3} \text{ Па}^{-1}$  до  $0,35 \cdot 10^{-3} \text{ Па}^{-1}$  в інтервалі товщин  $d = 40\text{-}80 \text{ нм}$ .

Отримані нами робочі характеристики не дають можливості прямого вимірювання тиску в процесі роботи приладу, однак, користуючись означенням баричного коефіцієнта опору та виконавши нескладні математичні перетворення, можна отримати залежність опору від тиску у вакуумній камері:  $R(p) = R(p_0) \cdot e^{\gamma_p p}$ , де  $R(p_0)$  – опір при атмосферному тиску.

Стабільність роботи будь-якого сенсора, в тому числі й датчика тиску, чутливим елементом якого є багатошарова плівкова система, визначається якістю меж поділу між шарами, аналіз якої проводився із урахуванням рекомендацій [19]. На рисунку 5 наведені приклади рентгенівських рефлектометричних залежностей для плівкових систем  $[\text{Cr}(30)/\text{Cu}(30)]_2/\text{SiO}_2$  (а) та  $[\text{Fe}(10)/\text{Cr}(10)]_2/\text{Si}$  (б) і результати розрахунків товщини окремих шарів та шорсткості ( $\sigma$ ) інтерфейсів.

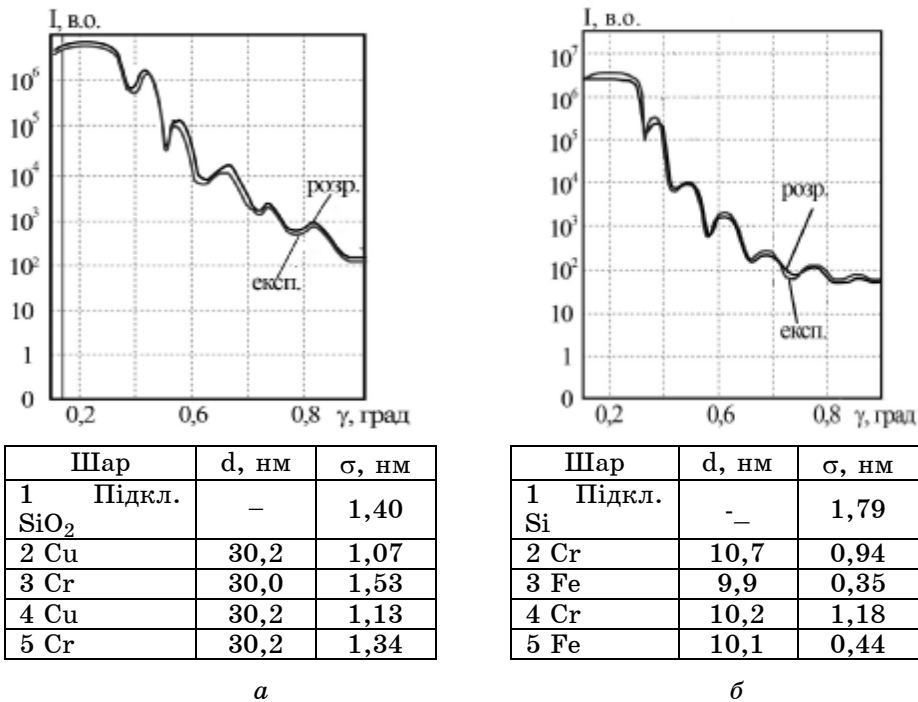


Рисунок 5 - Рентгенівські рефлектометричні залежності для плівкових систем  $[\text{Cr}(30)/\text{Cu}(30)]_2/\text{SiO}_2$  (а) та  $[\text{Fe}(10)/\text{Cr}(10)]_2/\text{Si}$  (б)

Як бачимо з рисунка 5,а, для системи Cu/Cr при кімнатній температурі величина  $\sigma$  лежить у межах від 1,07 до 1,53 нм. Ці дані узгоджуються із результатами, отриманими у роботах [19, 20] для систем з обмеженою взаємною розчинністю Fe/Nb/Fe [20] і Ag/Co [19] ( $\sigma = 0,90\text{-}1,20 \text{ нм}$  при  $T_b \leq 270 \text{ К}$  і  $\sigma = 1,5\text{-}4,5 \text{ нм}$  при  $T_b = 270\text{-}530 \text{ К}$ ), і підтверджують висновок про те, що якість інтерфейсів таких систем досить таки невисока і, як наслідок, це може призвести до погіршення стабільності роботи чутливих елементів датчиків, виготовлених на їх

основі. Отримані для системи Fe/Cr (рисунок 5,6) величини шорсткості інтерфейсів  $\sigma = 0,35 - 1,18$  нм узгоджуються із результатами роботи [21] для систем Fe/Cr ( $\sigma \cong 0,2$  нм), Cr/Fe ( $\sigma \cong 0,8$  нм) та роботи [20] для системи Fe/Cr/Fe ( $\sigma \cong 0,3$  нм) і має досить високу якість інтерфейсу. Таким чином, у системі на основі Fe і Cr, в якій по всьому об'єму утворюється т.р. (Fe, Cr), можна отримати вищу якість інтерфейсу, ніж у системі Cu/Cr, в якій зберігається індивідуальність окремих шарів.

### ВИСНОВКИ

Проведені дослідження дозволяють зробити висновок про можливість використання плівкових систем Cu/Cr і Fe/Cr як чутливих елементів датчиків тиску, оскільки ці системи мають стабільний фазовий стан, який відповідає ГЦК-Cu + ОЦК-Cr і твердому розчину (Fe, Cr) відповідно, у відносно широкому температурному інтервалі. Аналіз дифузійних процесів та якості меж поділу між шарами показав, що більш високу якість інтерфейсів можна отримати у системі Fe/Cr ( $\sigma = 0,35 - 1,18$  нм), тобто коли одна компонента в іншій має практично необмежену розчинність, а інша в першій – максимально обмежену.

### SUMMARY

#### PRESSURE SENSOR SENSING ELEMENT ON THE BASE OF THIN FILMS Cr AND Cu OR Fe

*I.M. Pazukha, I.Yu. Protsenko*

*Sumy State University, R-Korsakov str., 2, Sumy, 40007*

*Pressure sensor sensing element, which formed on the base of thin films Cr and Cu or Fe, was suggested. The results of experimental investigation working characteristics of pressure sensor on the base of systems Fe/Cr and Cu/Cr as well as analysis of diffusion processes and phase state at the interfaces and problem of interface stability was presented.*

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Giebler C., Adelerhof D.J., Kuiper A.E.T., Van Zon J.B.A. et al. Robust GMR Sensors for angle detection and rotation speed sensing // Sens. Actuators A.– 2001.– Vol. 91.– P. 16-20.
2. Treutler C.P.O. Magnetic sensors for automotive applications // Sens. Actuators A.– 2001.– Vol. 91.– P. 2-6.
3. Duenas T., Sehrbrock A., Lohndorf M. et al. Microsensor coupling magnetostriction and magnetoresistive phenomena // J.Magn.Magn. Mater.– 2002.– № 242-245.– P. 1132-1135.
4. Belavic D., Hrovat M., Pavlin M. Vertical thick film resistors as load sensors // J. Europ. Cer. Soc. – 2001. – Vol. 21., №10-11. – P. 1989-1992.
5. Chung G.-S. Characteristics of tantalum nitride thin film strain gauges for harsh environments // Sens. Actuat. A.– 2007.– Vol. 135.– P. 355-359.
6. Amor Ben A., Budde T., Gatzel H.H. A magnetoelastic microtransformer-based microstrain gauge // Sens. Actuat. A. – 2006. – V.126. – P. 41-44.
7. Kai Wah Yeung, Chung Wo Ong. Micro-pressure sensors made of indium tin oxide thin films // Sens. Actuat. A. – 2007. – Vol.137. – P. 1-5.
8. Schultes G., Schmitt M., Goettel D. et al. Strain sensitivity of TiB<sub>2</sub>, TiSi<sub>2</sub>, TaSi<sub>2</sub> and WSi<sub>2</sub> thin films as possible candidates for high temperature strain gauges // Sens. Actuat. A. – 2006. – Vol.126. – P. 287 – 291.
9. Sung-Pil Chang, Mark G. Allen. Demonstration for integrating capacitive pressure sensors with read-out circuitry on stainless steel substrate // Sens. Actuat. A. – 2004. – Vol.116. – P. 195-204.
10. Shirinov A.V., Schomburg W.K. Pressure sensor from a PVDF film // Sens. Actuat. A. – 2008. - Vol. 142. – P. 48-55.
11. Teng Lin, Yang Bang Chao, Du Xiao Song et al. Piezoresistance response of thin film manganin sensors // Sens. Actuat. A. – 2005. – Vol. 118. – P. 222-225.
12. Holly V., Pietsh V., Baumbach T. High-Resolution X-ray scattering from thin films and multilayers. – Heidenberg: НРС, 1999. – 149 p.
13. Забіла Є.О., Проценко І.Ю. Методика дослідження тензорезистивних властивостей тонких плівок хрому при відносно малих та великих деформаціях // УФЖ. – 2005. – Т.50, №7. – С. 729 – 736.

14. Пат. 98073761 Україна, G01B7/16. Чутливий елемент тензодатчика / Однорорець Л.В., Проценко С.І., Черноус А.М. – 30031144А; Заявл. 14.07.1998; Опубл. 15.12.2000, Бюл. №7-11. – С. 1.190.
15. Диаграммы состояния двойных металлических систем. / Под ред. Н.П. Лякишева. – Москва: Машиностроение, 1996. – Том 2. – 1022 с.
16. Бібик В.В., Однорорець Л.В., Шпетний І.О. Дослідження методом ВІМС взаємної дифузії атомів у тонкоплівковій системі Сг/Fe // Вісник СумДУ. Серія Фізика, математика, механіка – 2006. - №9(93). – С. 91-95.
17. Великодний Д.В., Гричановська Т.М., Однорорець Л.В. та ін. Тензочутливість металевих плівок: теоретичні моделі, експериментальні результати, застосування (огляд) // Вісник СумДУ. Серія Фізика, математика, механіка. – 2007. – №1. – С. 5-51.
18. Великодний Д.В., Проценко С.І., Проценко І.Е. Тензоефект в двухслойных пленках Cu/Cr и Fe/Cu // ФІП. – 2008. – Т. 6, № 1-2. – С. 37-42.
19. Kundu S. Mass dependent surface interface modification of Ag/Co films under controlled ion beam irradiation // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B. – 2006. – Vol. 242. – P. 542-545.
20. Гарифуллин И.А., Гарифьянов Н.Н., Салихов Р.И. Структура границ раздела в многослойных пленочных металлических гетероструктурах // Известия РАН. Серия физическая. – 2007. – Т. 71, №2. – С. 280-282.
21. Marszalek M., Tokman V., Protsenko S. et al. Auger spectroscopy analysis of interface roughness of Fe/Cr bilayers // Vacuum. – 2008. – Vol.82, №10. – P.1051-1056.

**Пазуха І.М.**, мол. наук. співробітник  
кафедри прикладної фізики;  
**Проценко І.Ю.**, доктор фіз.-мат. наук,  
професор, зав. кафедри прикладної  
фізики

*Надійшла до редакції 28 листопада 2008 р.*