

НАНОСТРУКТУРОВАНІ МУЛЬТИ-ФУНКЦІОНАЛЬНІ СЕНСОРНІ ЕЛЕМЕНТИ ЯК СКЛАДОВІ КІБЕР-ФІЗИЧНИХ СИСТЕМ

© Клим Г. І., 2015

Одержано та досліджено мульти-функціональні температурно- та волого-чутливі наноструктурно-оптимізовані сенсорні елементи в об’ємному та товстоплівковому виконанні для застосування в якості компонент кібер-фізичних систем. Спроектовано прототип системи контролю та реєстрації мікрокліматичних параметрів середовища з використанням розроблених наноструктурованих сенсорних елементів.

The multifunctional temperature- and humidity-sensitive nanostructured and optimized sensor elements in bulk and thick-film performance were prepared and studied for application as components of cyber-physical systems. The prototype of system for control and registration of microclimate environmental parameters with use of the developed nanostructured sensor elements was proposed.

Стан проблеми. В умовах сучасного розвитку інформаційних технологій інтенсивного розвитку набувають сучасні кібер-фізичні системи (КФС), які являють собою складні платформи взаємопов’язаних компонентів для забезпечення інтеграції фізичних процесів та кібер-світу [1]. Дані системи знаходять широке застосування в промислових системах контролю та управління [2], для контролю та зв’язку складових мережних систем [3], бездротових пристроїв [4], в охоронних системах, навігації, інтелектуальних будинках, системах розподілу ресурсів [1], тощо. Незалежно від особливостей архітектурної організації КФС [5], однією із складових слугують інтелектуальні сенсорні інформаційно-вимірювальні компоненти [6]. Сфера їх застосування постійно розширюється. Сенсори температури, тиску, вологості, іонізуючої радіації, газових забруднень атмосфери – ось далеко неповний перелік сенсорів за їх основним функціональним призначенням. Особливе місце в цьому переліку належить сенсорам температури та вологості (електронним пристроям для кількісного визначення температури та абсолютної/відносної вологості), оскільки моніторинг і контроль цих параметрів стану середовища на сьогоднішній день є важливим завданням в рамках використання в КФС, актуальність успішного розв’язання якого важко переоцінити.

Останні досягнення в суміжних галузях науки і техніки стимулювали підвищений інтерес щодо дослідження сенсорних елементів. Проте ефективна робота КФС можлива лише за умови забезпечення їх високоякісною первинною інформацією. Це вимагає створення принципово нових сенсорів на основі сучасних функціональних наноматеріалів з використанням нових фізичних ефектів, застосування сенсорних масивів та високочутливих, точних та стабільних вимірювальних каналів.

Значні роботи в напрямку створення подібних сенсорних систем для контролю температури, вологості, рівня шкідливих газів, тиску, освітлення, були проведені відомими світовими виробниками, зокрема E+E Electronic, Honeywell, Sensorsoft [7], тощо. Основним

недоліком таких систем є їх дороговизна. Дана робота присвячена розробці та дослідженню нових інтегрованих температурно- та волого-чутливих сенсорних елементів на основі функціональних керамічних наноматеріалів, які за своїми експлуатаційними характеристиками та мініатюрністю не поступаються відомим світовим аналогам, для їх імплементації в сучасні КФС.

Наноструктуровані керамічні сенсорні елементи та товстоплівкові структури. Для забезпечення максимальної чутливості з метою подальшої імплементації в КФС, керамічні температурно- та волого-чутливі активні елементи в об'ємному та інтегрованому товстоплівковому виконанні (рис. 1) одержували за оптимізованими технологічними режимами. Температурно-чутливу шпінельну кераміку системи $\text{NiMn}_2\text{O}_4\text{-CuMn}_2\text{O}_4\text{-MnCo}_2\text{O}_4$ спікали при різних температурно-часових режимах [8] з метою формування розвиненої структури зерен матеріалу, максимальної кількості основної фази шпінелі та оптимального вмісту додаткової фази NiO , яка, внаслідок процесу монолітизації, забезпечує стабільність елементів [8]. Волого-чутливу кераміку $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ спікали при максимальних температурах T_c 1100, 1200, 1300 та 1400 °С для одержання матеріалу з розгалуженою поруватою структурою, особливо на нанорівні, для забезпечення ефективних процесів адсорбції-десорбції вологи з навколишнім середовищем [9].

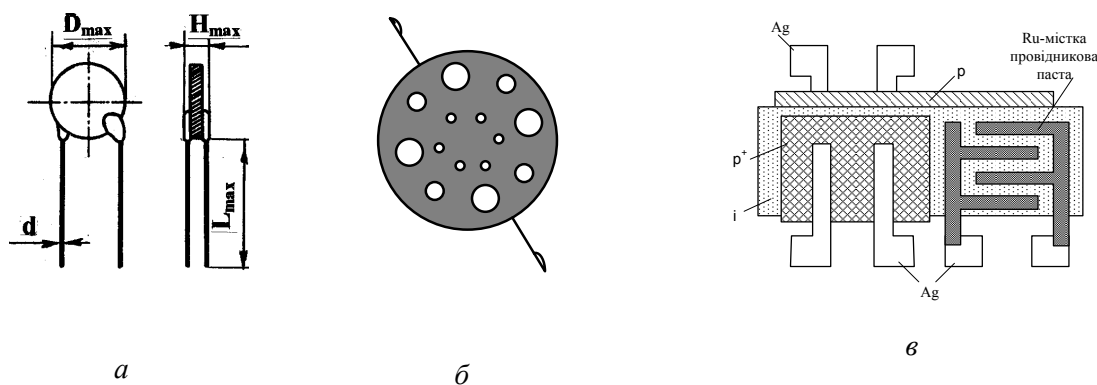


Рис. 1. Зовнішній вигляд та геометрична конструкція об'ємних сенсорів температури (а) вологості (а) та багаторівневих сенсорних структур(в).

Температурна- та волого-чутливість кераміки, а також товстоплівкових структур на її основі оцінювали із залежності електричного опору R від температури та відносної вологості (BB), відповідно. Електричний опір волого-чутливих керамічних елементів вимірювався в камері тепла та вологи PR-3E "ТАВАР" за температури 20 °С на ділянці $BB = 30 \div 99$ %. Випробування проводилися циклами в напрямку збільшення BB та у зворотному напрямку [9]. Для дослідження стабільності характеристик кераміки з часом, проводились деградаційні випробування (витримка 240 год при 40 °С та $BB = 95$ %).

На рис. 2 представлені залежності електричного опору R від BB до та після деградаційного тесту для активних елементів на основі волого-чутливої кераміки $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$, одержаної при різних T_c .

Як видно з рис. 2, найкращою волого-чутливістю володіють активні елементи кераміки, одержані при 1300 °С, оскільки вони характеризуються мінімальним гістерезисом в абсорбційно-десорбційних циклах та відтворюваністю характеристик після деградаційних випробувань. Такі властивості забезпечуються її внутрішнім наноструктуруванням завдяки оптимізації структури відкритих пор, мінімальному вмісту додаткової фази MgO та підбору

вихідних компонентів з відповідною площею питомої поверхні [9]. Саме ця кераміка в подальшому використовувалася для одержання товстоплівкових волого-чутливих елементів. Щодо температурно-чутливої кераміки, то найкращими характеристиками та стабільністю володіє монолітизований керамічний елемент з вмістом додаткової фази NiO 10 % [8].

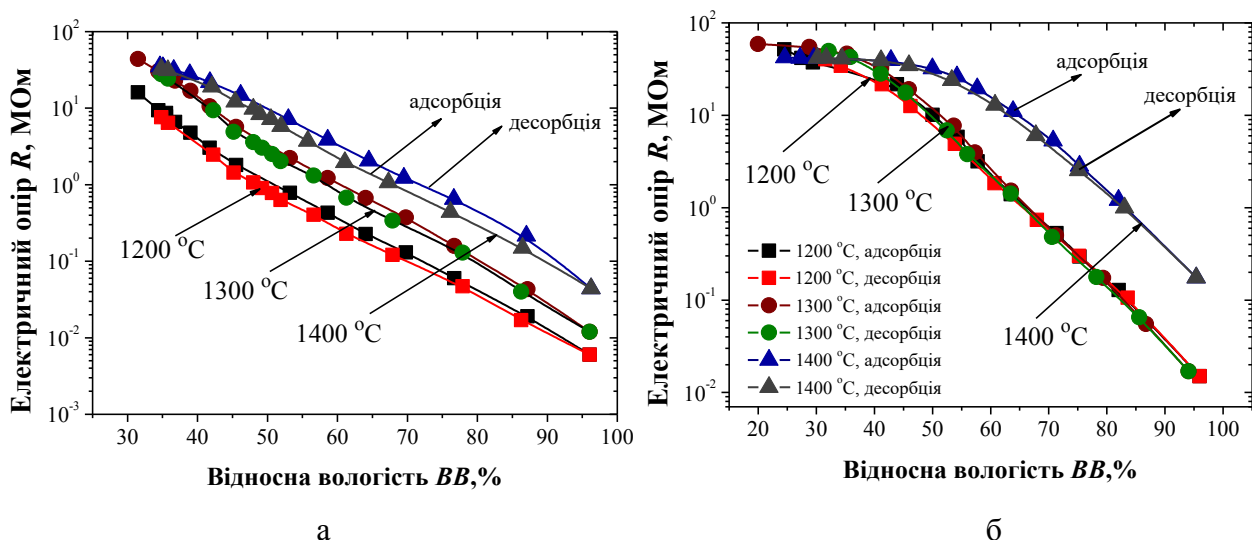


Рис. 2. Залежність електричного опору R від відносної вологості BB для волого-чутливих елементів кераміки $MgO-Al_2O_3$, спеченої при різних T_c до (а) та після (б) деградаційних випробувань.

Товстоплівкові елементи з p^- ($Cu_{0,1}Ni_{0,8}Co_{0,2}Mn_{1,9}O_4$) та p^+ ($Cu_{0,1}Ni_{0,1}Co_{1,6}Mn_{1,2}O_4$) типами електричної провідності та діелектричної кераміки $MgO-Al_2O_3$ (i -тип) одержували традиційним методом сіткографії з додаванням органічного розчинника, органічної зв'язки, екологічного скла без вмісту свинцю та оксиду вісмуту Bi_2O_3 до попередньо відібраних подрібнених керамічних порошків. Пасти наносили на очищені підкладки типу Rubalit 708 S із контактними доріжками з провідникової пасти Ag-Pt [10]. Слід зазначити, що формування товстоплівкових багатошарових $p-p^+$ та $p-p^+-p$ структур з підвищеною температурною чутливістю та волого-чутливих плівок проводилося в рамках єдиного технологічного процесу. Електричний опір температурно-чутливих товстоплівкових структур вимірювався між вибірковими ділянками в нормальній атмосфері на ділянці 25-85 °C з кроком 10 °C. Загальна похибка зміни температури по об'єму камери при вимірюванні опору не перевищувала $\pm 0,1$ °C.

Встановлено, що досліджувані температурно-чутливі одно- та мульти-рівневі товстоплівкові $p-p^+$ та $p-p^+-p$ структури володіють характерною лінійною залежністю електричного опору на ділянці температур від 298 К до 368 К в напівлогарифмічному масштабі (див. рис. 3,а) і адекватно описується співвідношенням [10]:

$$R(T) = R_{25} \cdot \exp\left(\frac{B}{T} - \frac{B}{298}\right), \quad (1)$$

де R_{25} – опір елемента при температурі $T = 25$ °C; B – температурна постійна.

Температурна постійна B зростає із збільшенням кількості шарів товстої плівки, сприяючи покращенню їх температурної чутливості.

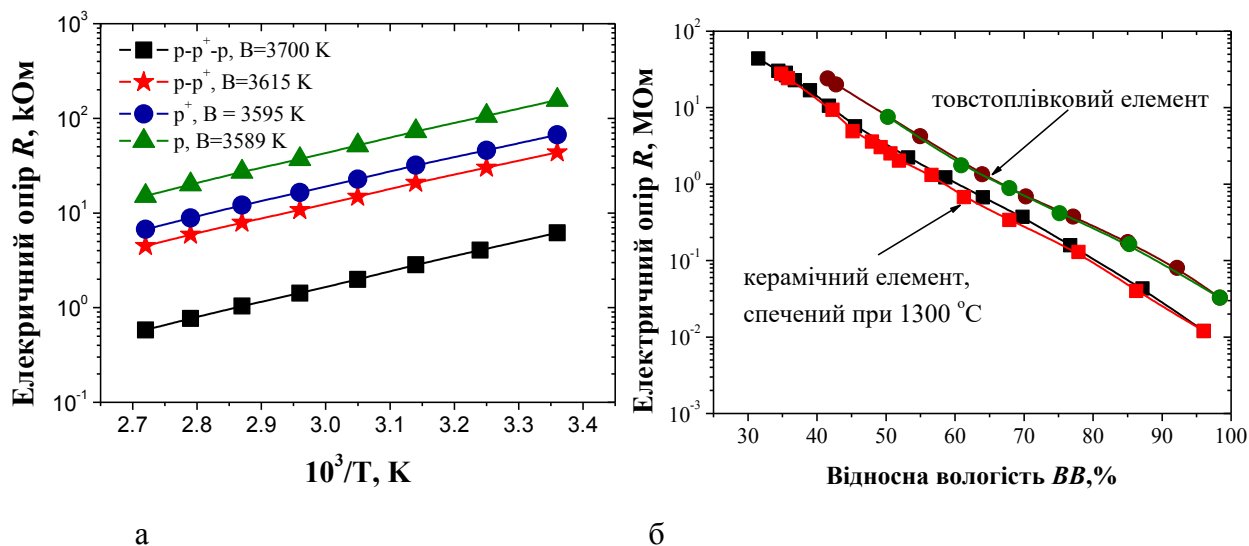


Рис. 3. Робочі характеристики температурно- (а) та волого-чутливих (б) товстоплівкових сенсорних структур

Волого-чутливі товстоплівкові сенсорні структури характеризуються вищою чутливістю в порівнянні з об'ємною керамікою $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ на ділянці BB від 40 % до 98 % та відновлюваністю характеристик в адсорбційно-десорбційних циклах (рис. 3,б).

Проектування прототипу КФС. Для оцінки можливості використання одержаних наноструктурованих сенсорних елементів в об'ємному та плівковому виконанні як компонентів КБС було спроектовано систему для моніторингу та контролю кліматичних параметрів середовища – прототипу КФС (схематично зображено на рис. 4).

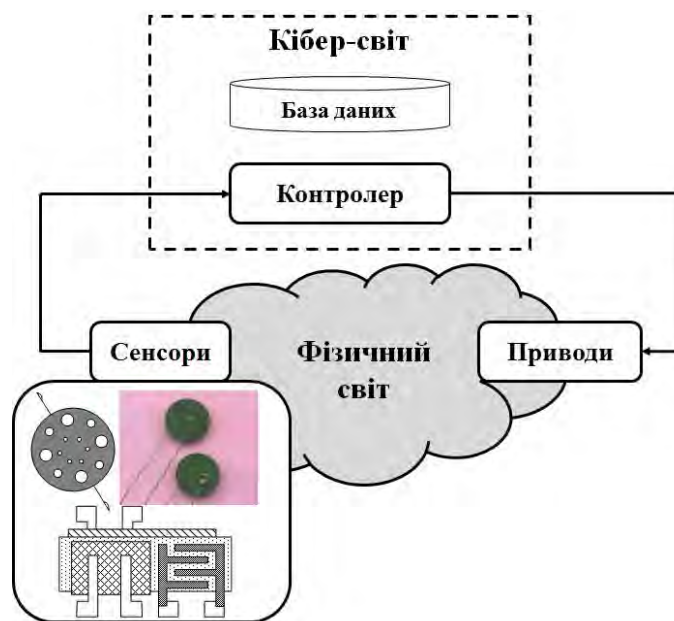


Рис. 4. Прототип КФС з використанням наноструктурованих сенсорних елементів.

Таку систему можна встановлювати як в приміщенні, так і на відкритому повітрі, вона забезпечує вимірювання, опрацювання та передавання даних відносної вологості та температури [11]. Основні вимоги, які ставляться до цієї системи: модульність структури, що дасть змогу на перспективу підключати нові сенсори; функціонування в повністю

автоматичному режимі; одержання і первинне опрацювання вимірювальної інформації; передавання вимірювальних даних на персональний комп'ютер на його запит в автоматичному режимі; створення і підтримка локальної бази даних.

Інформація від відповідних сенсорів через аналого-цифрові перетворювачі подаються до мікропроцесорної системи для подальшого опрацювання. Слід відзначити, що для забезпечення більш точної і лінійної відповідності показів, а також забезпечення номінальних параметрів (напруга/струм) до сенсорів введено додаткові корегуючі схеми включення активних елементів (подільники напруг) [11].

Програмне забезпечення системи пропонує інтерактивний режим роботи, що дозволить дистанційно встановлювати всі параметри вимірювань, змінювати інтервали між вимірюваннями, а також одержувати інформацію про роботу кожного з сенсорів конкретного комплексу у зручній для користувача формі. В звичайному режимі кожен з комплексів зможе декілька разів на добу давати запит, а одержана інформація буде надходити на центральний термінал без участі оператора.

Висновки. Одержано наноструктуровані температурно- та волого-чутливі об'ємні керамічні сенсорні елементи та екологічні товстоплівкові структури з p^- , p^+ та i -типами електричної провідності в інтегрованому мульти-функціональному виконанні. Результати електрофізичних досліджень свідчать про сумісність температурно- та волого-чутливих товстоплівкових структур, що дозволяє здійснювати незалежні та одночасні вимірювання вологості та температури середовища при формуванні відповідних електродів до температурно- та волого-чутливих шарів. Як прототип КФС запропоновано система контролю та реєстрації параметрів середовища з використанням наноструктурованих сенсорних елементів, з допомогою якої можна спостерігати, збирати, передавати, зберігати та аналізувати інформацію про мікрокліматичні параметри середовища.

1. Wolf W. *Cyber-physical systems // Embedded Computing.* – 2009. – P. 88-89. 2. Schoeler T. *The sepia cyber-physical production control system // J. Electrotechnic and Computer Systems.* – 2014. – № 13 (89). – P. 197-202. 3. Cao X., Cheng P., Chen J. Sun Y. *An online optimization approach for control and communication codesign in networked cyber-physical systems // IEEE Transactions on Industrial Informatics.* – 2009. – 9(1). – P. 439-450. 5. Hoang D.D., Hye-Young Paik Chae-Kyu Kim *Service-oriented middleware architectures for cyber-physical systems // Int. J. Computer Science and Network Security.* – 2012. – 12(1). – P. 79-87. 6. Kong X. *Analysis of sensor data in cyber-physical system // A Thesis Master of Science,* 2013. 7. *Режими доступу:* www.epluse.com; www.honeywell.com; www.sensorsoft.com. 8. Shpotyuk O., Balitska V., Hadzaman I., Klym H. *Sintering-modified mixed Ni-Co-Cu oxymanganospinel for NTC electroceramics // Journal of Alloys and Compounds.* – 2011. – 509. – P. 447-450. 9. Klym H., Ingram A., Hadzaman I., Shpotyuk O. *Evolution of porous structure and free-volume entities in magnesium aluminate spinel ceramics // Ceramics International.* – 2014. – 40. – P. 8561–8567. 10. Klym H., Hadzaman I., Shpotyuk O., Brunner M. *Integrated thick-film nanostructures based on spinel ceramics // Nanoscale Research Letters.* – 2014. – 9. – P. 149-1-6. 11. Клим Г.І., Варавва А.С. *Система контролю температури та вологості на базі PSoC з використанням наноструктурованих датчиків // Вісник НУ «ЛП», сер. Комп'ютерні системи та мережі.* – 2011. – № 717. – С. 53-58.

Наукові результати, подані у цій статті, було отримано в рамках дослідницького проекту ДБ/КІБЕР з реєстраційним номером 0115U000446, 01.01.2015 - 31.12.2017, фінансово підтриманим Міністерством освіти та науки України.