

Сенсорні елементи на основі наносистеми багатошарові вуглецеві нанотрубки – поруватий кремній

І. Оленич, М. Павлик, Р. Серкіз

*Львівський національний університет імені Івана Франка,
вул. Драгоманова, 50, 79005 Львів, Україна
e-mail: igor.olenych@lnu.edu.ua*

У роботі запропоновано мережу багатошарових вуглецевих нанотрубок (mwCNTs), осаджену на шар поруватого кремнію (por-Si), як чутливий елемент газового сенсора. Порувата структура наносистеми mwCNTs–por-Si забезпечує збільшення робочої поверхні сенсора. Виявлено збільшення електричного опору та ємності сенсорних елементів внаслідок адсорбції молекул аміаку, ацетону та етанолу. Для оцінки сенсорних властивостей наносистеми mwCNTs–por-Si було досліджено концентраційні залежності адсорбційної здатності та динамічні характеристики резистивних та ємнісних сенсорів. Час відгуку одержаних сенсорних елементів на зміну концентрації молекул аміаку, ацетону та етанолу становить близько однієї хвилини при кімнатній температурі. Отримані результати розширюють перспективу застосування mwCNTs у сенсорних пристроях.

Ключові слова: наносистема, вуглецеві нанотрубки, поруватий кремній, газовий сенсор, адсорбційна здатність.

1 Вступ

Розробка недорогих і надійних газових сенсорів є важливою умовою для їх широкого застосування у побуті та промисловості, в науці та медицині, для контролю якості продуктів і моніторингу навколишнього середовища [1, 2]. Серед них особливе місце займають сенсори екологічно небезпечних та легкозаймистих газів, зокрема летких органічних сполук. Щоб підвищити чутливість та селективність газових сенсорів сьогодні активно досліджуються наноструктури та композитні наноматеріали з надвисокою питомою поверхнею [3–6]. Такий підхід відповідає основним напрямкам розвитку сенсорної електроніки, які поєднують базові принципи та технології мікроелектроніки і тенденцію мініатюризації та інтелектуалізації сенсорних пристроїв.

Надзвичайно перспективними в області сенсорної електроніки є вуглецеві нанотрубки (carbon nanotubes, CNTs). Завдяки високій чутливості до молекул NO₂, H₂, H₂S, NH₃, CO, водяної пари та пари великої кількості летких органічних сполук

CNTs привернули увагу багатьох дослідників [7–10]. Електрохімічні та адсорбційні властивості CNTs зумовлені їх структурними особливостями, за яких вся маса нанотрубок зосереджена у поверхневих шарах [11]. Крім того, електронні властивості CNTs – напівпровідникові чи металічні – визначаються їх хіральністю [12]. Як наслідок, подібно до напівпровідникових сенсорів адсорбцію газових молекул можна реєструвати за зміною електропровідності або ємності нанотрубок. З метою покращення сенсорних властивостей нанотрубки часто поєднують з іншими наноматеріалами, наприклад, CNTs осаджують або вирощують на поверхні поруватого кремнію (por-Si) [13, 14]. Наноструктури por-Si, які характеризуються високим співвідношенням поверхні до об'єму, також виявилися корисними в газосенсорних системах [15–17]. Для виявлення газу використовували зміну різних характеристик por-Si, а саме показника заломлення, спектру видимої фотолюмінесценції, електричного опору та ємності. Реєстрація останніх є найпростішим способом реалізації газового сенсора. Крім того, розгалужена мережа пор є ідеальною основою для впровадження у поруватий шар наночастинок різної природи [18–21]. Осаджені на поверхню por-Si CNTs можуть частково проникати у пори та формувати більшу мережу нанотрубок, ніж на плоскій поверхні, збільшуючи у такий спосіб чутливість сенсорного елемента.

Тому мета роботи полягала у створенні сенсорних елементів на основі мережі багатостінних CNTs (*mwCNTs*), сформованої на поверхні шару por-Si. Особлива увага була зосереджена на вивченні газоадсорбційних властивостей одержаних наносистем для підвищення їх функціональних можливостей.

2 Експеримент

Як основу сенсорного елемента було використано наноструктурований por-Si, одержаний методом електрохімічного травлення кремнієвої пластини товщиною 400 мкм з кристалографічною орієнтацією [100] в електроліті на основі фтористоводневої кислоти з співвідношенням компонентів $\text{HF}:\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} = 1:1$. Для підвищення ефективності утворення пор робочу поверхню кремнієвої пластини освітлювали лампою розжарення потужністю 500 Вт. У результаті електрохімічного травлення упродовж 10 хв при густині анодного струму $30 \text{ mA}/\text{cm}^2$ на кремнієвій підкладці формувалася макропоруватий шар por-Si. Після промивання у дистильованій воді та висушування на повітрі одержану структуру було розділено на експериментальні зразки розміром $6 \times 6 \text{ mm}$.

Водну суспензію *mwCNTs* діаметром 50-80 нм виробництва US Research Nanomaterials Inc з концентрацією 0,5 мг/мл після ультразвукової обробки упродовж 20 хв наносили на поверхню por-Si та висушували за кімнатної температури. Електричні контакти сенсорного елемента планарного типу було сформовано термовакуумним осадженням плівки Ag товщиною приблизно 0,5 мкм на відстані 2 мм один від одного, як це схематично зображено на рис. 1. Поверхня одержаної наносистеми була досліджена за допомогою скануючого електронного мікроскопу (SEM) "Selmi".

Сенсорні властивості мережі *mwCNTs* на поверхні por-Si досліджували у герметичній камері з контрольованим газовим середовищем. Для досліджень використовували екологічно важливі гази: аміак, ацетон та етанол у газоподібному стані.

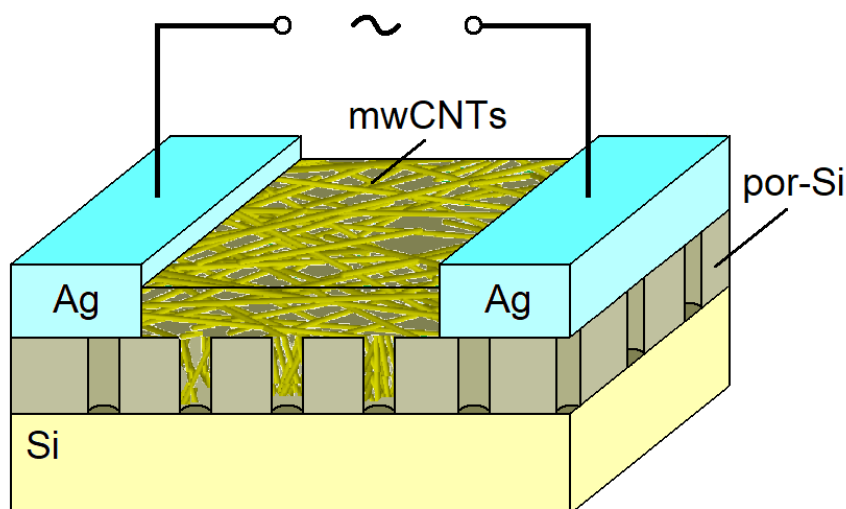


Рис. 1: Схема планарного сенсорного елемента на основі наносистеми mwCNTs–por-Si.

Конструкція експериментальної камери дає змогу контролювано збільшувати концентрацію аміаку з кроком 0,3%, а концентрацію ацетону та етанолу з кроком 0,4%. За допомогою сенсора “Honeywell” NH-4000-004 додатково вимірювали відносну вологість повітря у камері, яка становила 58–70%. Електричний опір та ємність отриманих сенсорних елементів вимірювали при кімнатній температурі за допомогою RLC вимірювача Nantek 1833C на частоті 1 кГц.

3 Результати та їх обговорення

Дослідження морфології поверхні сенсорних елементів на основі наносистеми mwCNTs–por-Si проводили з використанням СЕМ у режимі вторинних електронів (рис.2). На основі аналізу СЕМ-зображень при різних збільшеннях встановлено, що після висихання осадженої суспензії на поверхні por-Si утворюється неупорядкована і неоднорідна за щільністю мережа нанотрубок. З рис. 2 можна зробити висновок, що ультразвукова обробка суспензії mwCNTs упродовж 20 хв забезпечує достатній ступінь диспергування нанотрубок, який забезпечує їх ефективне проникання у макропори por-Si, адже для застосованих технологічних умов електрохімічного травлення кремнію діаметр пор може досягати декількох мікрон [22]. Враховуючи, що довжина mwCNTs зазвичай більша від діаметра пор, ми припускаємо, що нанотрубки у порах будуть орієнтовані переважно вздовж пор. Проте у реальних умовах, форма CNTs може відрізнитись від прямолінійної. З'єднання окремих нанотрубок та їх агломерацій утворює провідний шлях між електродами сенсорного елемента.

та. Утворена мережа *mWCNTs* характеризується більшою поруватістю порівняно з нанокompозитними плівками на основі сполучених полімерів [23], що забезпечує більшу площу робочої поверхні сенсорних елементів. Крім того, збільшення мережі *mWCNTs* завдяки розміщеним у порах нанотрубкам може сприяти підвищенню чутливості сенсорів до аналізованих газів.

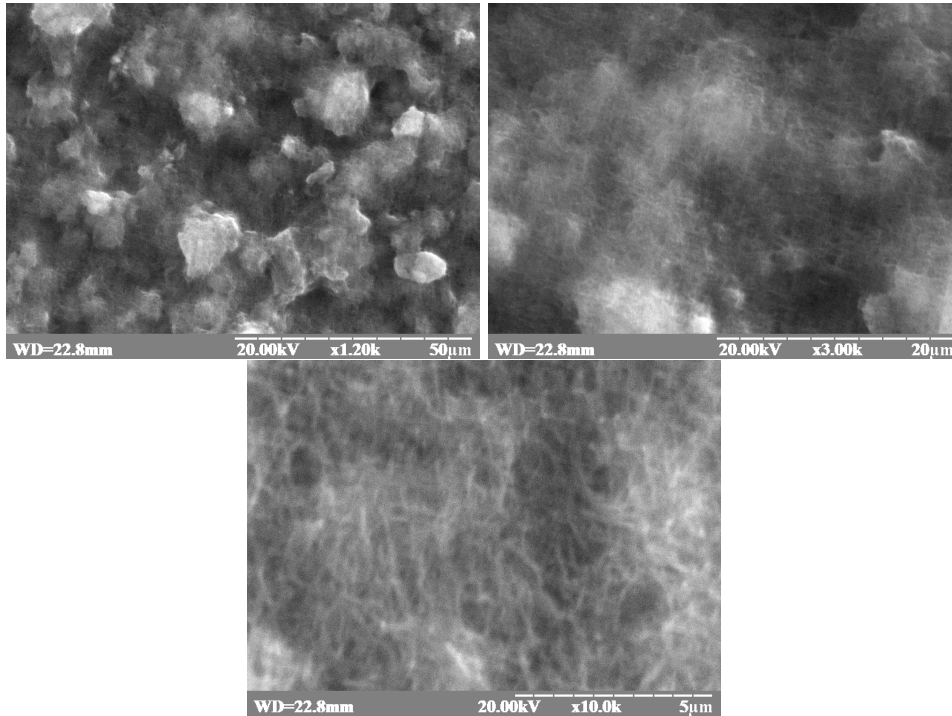


Рис. 2: SEM-зображення поверхні сенсорного елемента на основі наносистеми *mWCNTs-por-Si*.

На основі експериментальних досліджень виявлено, що електропровідність та ємність сенсорних елементів суттєво залежать від навколишньої атмосфери. Зокрема, спостерігалось збільшення опору та ємності наносистеми *mWCNTs-por-Si* у разі заповнення робочої камери досліджуваними газами, які характеризуються донорними властивостями (рис. 3). Отримані залежності можна пояснити взаємодією адсорбованих молекул з поверхнею *mWCNTs*, яким за відсутньої функціоналізації зазвичай властива провідність акцепторного типу. У підсумку, адсорбційно-електричні ефекти зумовлюють зменшення концентрації вільних носіїв заряду в нанотрубках. Оскільки провідність *mWCNTs* є значно більшою від провідності наноструктур *por-Si* [24], то утворена мережа нанотрубок шунтує шар *por-Si* та зменшує його вклад у відгук сенсорного елемента на адсорбцію газових молекул. Поруватий шар слугує лише матрицею для мережі *mWCNTs* і забезпечує збільшення робочої поверхні сенсора. Крім того, адсорбція молекул аміаку, етанолу та ацетону ймовірно зумовлює збільшення ефективної діелектричної проникності наносистеми *mWCNTs-por-Si*, що

спричиняє спостережуване підвищення ємності. Поєднання усіх цих ефектів формує результуючу електричну реакцію сенсорного елемента на зміну концентрації досліджуваних газів.

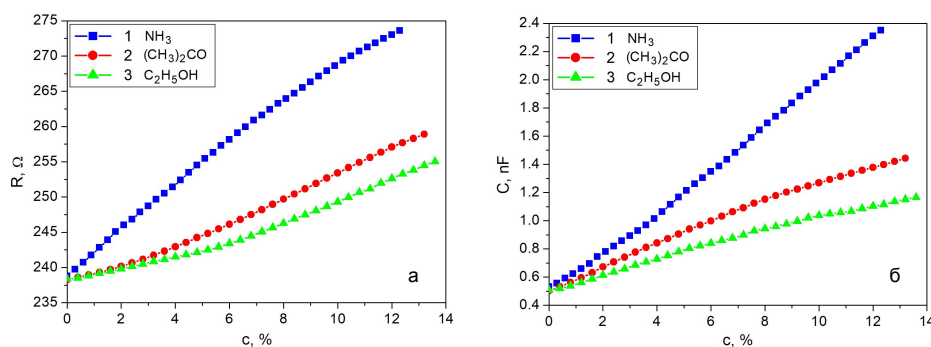


Рис. 3: Залежність опору (а) та ємності (б) сенсорного елемента на основі наносистеми mwCNTs-por-Si від концентрації молекул аміаку (1), ацетону (2) та етанолу (3).

Варто зазначити, що більший діапазон зміни опору та ємності спостерігався у випадку адсорбції молекул аміаку за однакової зміни концентрації досліджуваних газів. Ймовірно, це пов'язано з яскраво вираженими донорними властивостями аміаку і підвищенням відносної вологості повітря в експериментальній камері. Крім того, у діапазоні низьких концентрацій спостерігалось майже лінійне збільшення електричних характеристик сенсорного елемента з ростом концентрації молекул аміаку, ацетону та етанолу, що свідчить про постійну чутливість сенсора у цьому діапазоні. Для оцінки сенсорних властивостей наносистеми mwCNTs-por-Si було обчислено її адсорбційну здатність γ за допомогою виразу [25]:

$$\gamma = \frac{\Delta S/S}{\Delta c/c} \quad (1)$$

де $\Delta S/S$ – відносна зміна електричних характеристик (опору або ємності) сенсорного елемента, $\Delta c/c$ – відносна зміна концентрації молекул досліджуваних газів у робочій камері. Залежність адсорбційної здатності сенсорного елемента резистивного та ємнісного типів на основі mwCNTs-por-Si від концентрації молекул аміаку, етанолу та ацетону зображено на рис. 4.

Попри майже лінійні концентраційні залежності електричних характеристик у діапазоні низьких концентрацій наносистема mwCNTs-por-Si демонструє збільшення адсорбційної здатності з підвищенням концентрації аналізованих газів за рахунок зменшення знаменника у виразі (1). Аналіз отриманих залежностей свідчить про більшу чутливість до дії молекул аналізованих газів сенсора ємнісного типу, ніж резистивного. Адсорбційна здатність чутливих елементів на основі наносистеми mwCNTs-por-Si як резистивного, так і ємнісного типу була найвищою до молекул аміаку та найменшою до етанолу.

Зважаючи на високу чутливість електричних характеристик запропонованого сенсорного елемента до адсорбції молекул різних газів, забезпечення селективності

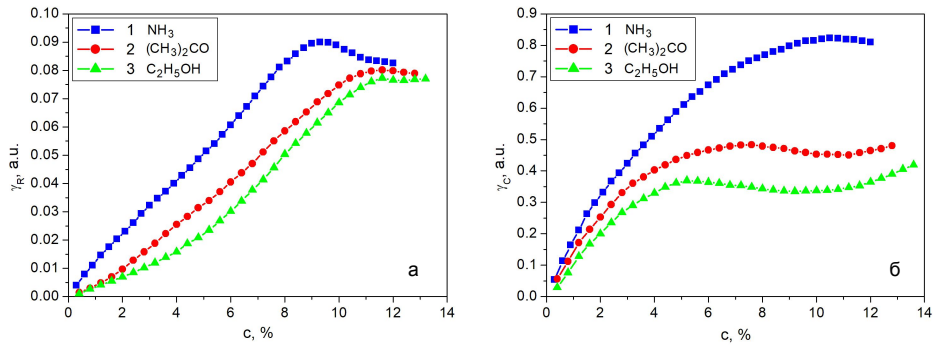


Рис. 4: Залежності адсорбційної здатності резистивного (а) та ємнісного (б) сенсорного елемента на основі наносистеми $mWCNTs-por-Si$ від концентрації молекул аміаку (1), ацетону (2) та етанолу (3).

сенсора до газу-аналізу вимагає використання додаткових механізмів розпізнавання газу. Одним з можливих механізмів може бути комп'ютерний аналіз перехресної чутливості системи сенсорних елементів, кожен з яких характеризується індивідуальним профілем функції перетворення.

Важливою динамічною характеристикою сенсорних матеріалів є час відгуку чутливого елемента на зміну концентрації аналізованого газу. На рис. 5 показано час відгуку газових сенсорів резистивного та ємнісного типів на основі наносистеми $mWCNTs-por-Si$. Швидкість реакції (тобто час, за який вихідний сигнал досягає 90% встановленого значення) сенсорів ацетону та етанолу при кімнатній температурі була дещо вищою, ніж сенсора аміаку. Загалом час реакції і час відновлення газових сенсорів на основі наносистеми $mWCNTs-por-Si$ становить близько однієї хвилини.

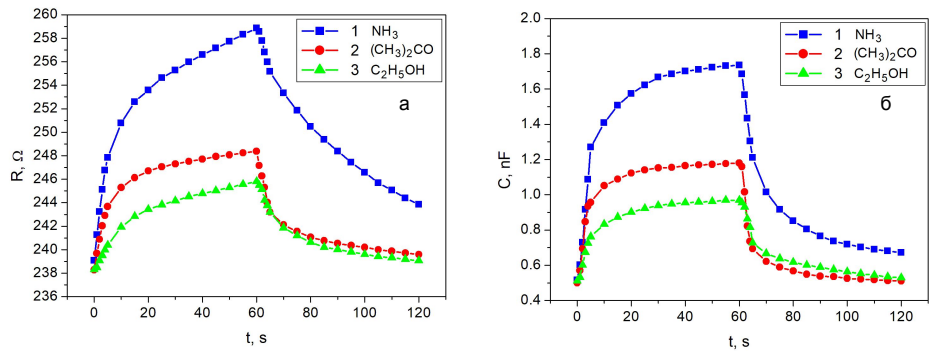


Рис. 5: Відгук електричного опору (а) та ємності (б) сенсорного елемента на основі наносистеми $mWCNTs-por-Si$ на зміну концентрації молекул аміаку (1), ацетону (2) та етанолу (3).

Як можна побачити на рис. 5, взаємодія $mWCNTs$ з молекулами аміаку, ацетону та етанолу має характер фізичної адсорбції, оскільки початкові значення опору та

ємності сенсорних елементів майже повністю відновлюються після видалення досліджуваних газів з експериментальної камери навіть без термостимулювання.

Висновки

Сенсорні елементи були отримані шляхом осадження водної суспензії mWCNTs на поверхню por-Si і подальшого висушування при кімнатній температурі. На основі аналізу СЕМ-зображень поверхні сенсорного елемента встановлено, що mWCNTs утворюють невпорядковану та неоднорідну за щільністю мережу, пориста морфологія якої сприяє підвищенню чутливості сенсора до адсорбції газових молекул.

Встановлено, що адсорбція молекул аміаку, ацетону та етанолу зумовлює збільшення опору та ємності сенсорів на основі наносистеми mWCNTs–por-Si. Аналіз концентраційних залежностей електричних характеристик та адсорбційної здатності одержаних сенсорних елементів у діапазоні 0,4–12 % свідчить про те, що mWCNTs найбільш чутливі до молекул аміаку. Крім того, газовий сенсор ємнісного типу характеризується більшою чутливістю порівняно з резистивним. Час відгуку сенсорних елементів на основі наносистеми mWCNTs–por-Si на зміну концентрації аналізованих газів становить близько однієї хвилини при кімнатній температурі.

1. Koulamas C. Real-Time Sensor Networks and Systems for the Industrial IoT: What Next? / C. Koulamas, M. T. Lazarescu // *Sensors*. – 2020. – Vol. 20. – P. 5023. doi: 10.3390/s20185023.
2. Chen Z. Humidity Sensors: A Review of Materials and Mechanisms / Z. Chen, C. Lu // *Sensor Letters*. – 2005. – Vol. 3. – P. 274. doi: 10.1166/sl.2005.045.
3. Tharsika T. Highly Sensitive and Selective Ethanol Sensor Based on ZnO Nanorod on SnO₂ Thin Film Fabricated by Spray Pyrolysis / T. Tharsika, M. Thanihachelvan, A. S. M. A. Haseeb, S. A. Akbar // *Frontiers in Materials*. – 2019. – Vol. 6. – P. 122. doi: 10.3389/fmats.2019.00122.
4. Cao A. Silicon Nanowire-Based Devices for Gas-Phase Sensing / A. Cao, E. J. R. Sudholter, L. C. P. M. de Smet // *Sensors*. – 2014. – Vol. 14. – P. 245–271. doi: 10.3390/s140100245.
5. Li C. J. Carbon Nanotube Sensors for Gas and Organic Vapor Detection / C. J. Li, Y. Lu, Q. Ye, M. Cinke, J. Han, M. Meyyappan // *Nano Lett.* – 2003. – Vol. 3. – P. 929–933. doi: 10.1021/nl034220x.
6. Singh E. Flexible Graphene-Based Wearable Gas and Chemical Sensors / E. Singh, M. Meyyappan, H. S. Nalwa // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. – 2017. – Vol. 9. – P. 34544–34586. doi: 10.1021/acsami.7b07063.
7. Wang Y. A Review of Carbon Nanotubes-Based Gas Sensors / Y. Wang, J. T. W. Yeow // *Journal of Sensors*. – 2009. – Vol. 2009. – P. 493904. doi: 10.1155/2009/493904.
8. Cantalini C. Sensitivity to NO₂ and cross-sensitivity analysis to NH₃, ethanol and humidity of carbon nanotube thin film prepared by PECVD / C. Cantalini, L. Valentini, I. Armentano, L. Lozzi, J. M. Kenny, S. Santucci // *Sens Actuat B*. – 2003. – Vol. 95. – P. 195–202. doi: 10.1016/S0925-4005(03)00418-0.

9. Mittal M. Carbon nanotube (CNT) gas sensors for emissions from fossil fuel burning / M. Mittal, A. Kumar // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2014. – Vol. 203. – P. 349–362. doi: 10.1016/j.snb.2014.05.080.
10. Guo S. Y. Transparent and flexible hydrogen sensor based on semiconducting single-wall carbon nanotube networks / S. Y. Guo, P. X. Hou, H. X. Wang, C. Shi, H. T. Fang, C. Liu // *Carbon*. – 2019. – Vol. 151. – P. 156–159. doi: 10.1016/j.carbon.2019.05.045.
11. Young S. J. Ethanol gas sensors based on multi-wall carbon nanotubes on oxidized Si substrate / S. J. Young, Z. D. Lin // *Microsyst. Technol.* – 2018. – Vol. 24. – P. 55–58. doi: 10.1007/s00542-016-3154-2.
12. Liu J. The electronic properties of chiral carbon nanotubes / J. Liu, J. Lu, X. Lin, Y. Tang, Y. Liu, T. Wang, H. Zhu // *Computational Materials Science*. – 2017. – Vol. 129. – P. 290–294. doi: 10.1016/j.commatsci.2016.12.035.
13. Shiraz H. G. Decorated CNT based on porous silicon for hydrogen gas sensing at room temperature / H. G. Shiraz, F. R. Astarai, S. Fardindoost, Z. S. Hosseini // *RSC Adv.* – 2016. – Vol. 6. – P. 44410–44414. doi: 10.1039/C6RA03541H.
14. Abbas S. K. Functionalized Carbon Nanotubes on Porous Silicon for Sensing Application / S. K. Abbas, A. N. Naje // *J. Nano- Electron. Phys.* – 2019. – Vol. 11, No 5. – P. 05015. doi: 10.21272/jnep.11(5).05015.
15. Ozdemir S. The potential of porous silicon gas sensors / S. Ozdemir, J. Gole // *Curr. Opin. in Solid State and Mater. Science*. – 2007. – Vol. 11. – P. 92–100. doi: 10.1016/j.cossms.2008.06.003.
16. Baratto C. Multiparametric Porous Silicon Sensors / C. Baratto, G. Faglia, G. Sberveglieri, Z. Gaburro, L. Pancheri, C. Oton, L. Pavese // *Sensors*. – 2002. – Vol. 2(3). – P. 121–126. doi: 10.3390/s20300121.
17. Монастирський Л. С. Система аналізу газів на основі структур поруватого кремнію / Л. С. Монастирський, І. Б. Оленич, О. І. Петришин, В. М. Лозинський // *Сенсорна електроніка і мікросистемні технології*. – 2018. – Т. 15, №2. – С. 88–96. doi: 10.18524/1815-7459.2018.2.136891.
18. Eom N. S. A. Room-Temperature H₂ Gas Sensing Characterization of Graphene-Doped Porous Silicon via a Facile Solution Dropping Method / N. S. A. Eom, H. B. Cho, Y. Song, W. Lee, T. Sekino, Y. H. Choa // *Sensors*. – 2017. – Vol. 17. – P. 2750. doi: 10.3390/s17122750.
19. Olenych I. B. Charge transport in porous silicon/graphene-based nanostructures / I. B. Olenych, L. S. Monastyrskii, O. I. Aksimentyeva, L. Orovchik, M. Y. Salamakha // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* – 2018. – Vol. 673. – P. 32–38. doi: 10.1080/15421406.2019.1578491.
20. Peng S. Nano-WO₃ film modified macro-porous silicon (MPS) gas sensor / S. Peng, H. Ming, L. Mingda, M. Shuangyun // *J. Semicond.* – 2012. – Vol. 33. – P. 054012. doi: 10.1088/1674-4926/33/5/054012.
21. Eom N. S. A. Ultrasensitive detection of low-ppm H₂S gases based on palladium-doped porous silicon sensors / N. S. A. Eom, H. B. Cho, H. R. Lim, T. Y. Hwang, Y. Song, Y. H. Choa // *RSC Adv.* – 2018. – Vol. 8. – P. 29995–30001. doi: 10.1039/C8RA05520C.
22. Olenych I. B. Electrical and Photoelectrical Properties of Porous Silicon Modified by Cobalt Nanoparticles / I. B. Olenych // *Journal of Nano- and Electronic Physics*. –

2014. – Vol. 6, No 4. – P. 04022.
23. Olenych I. B. Sensory properties of hybrid composites based on poly(3,4-ethylenedioxythiophene) - porous silicon - carbon nanotubes / I. B. Olenych, O. I. Aksimentyeva, L. S. Monastyrskii, Y. Y. Horbenko, L. I. Yarytska // *Nanoscale Research Letters*. – 2015. – Vol. 10. – P. 187. doi: 10.1186/s11671-015-0896-1.
24. Bisi O. Porous silicon: a quantum sponge structure for silicon based optoelectronics / O. Bisi, S. Ossicini, L. Pavesi // *Surf. Sci. Rep.* – 2000. – Vol. 38. – P. 1–126. doi: 10.1016/S0167-5729(99)00012-6.
25. Vashpanov Y. Dynamic Control of Adsorption Sensitivity for Photo-EMF-Based Ammonia Gas Sensors Using a Wireless Network / Y. Vashpanov, H. Choo, D. S. Kim // *Sensors*. – 2011. – Vol. 11. – P. 10930–10939. doi: 10.3390/s111110930.

References

1. C. Koulamas, M.T. Lazarescu, *Sensors* **20**, 5023 (2020). doi: 10.3390/s20185023.
2. Z. Chen, C. Lu, *Sensor Letters* **3**, 274 (2005). doi: 10.1166/sl.2005.045.
3. T. Tharsika, M. Thanahaichelvan, A. S. M. A. Haseeb, S. A. Akbar, *Frontiers in Materials* **6**, 122 (2019). doi: 10.3389/fmats.2019.00122.
4. A. Cao, E. J. R. Sudholter, L. C. P. M. de Smet, *Sensors* **14**, 245 (2014). doi: 10.3390/s140100245.
5. C. J. Li, Y. Lu, Q. Ye, M. Cinke, J. Han, M. Meyyappan, *Nano Lett.* **3**, 929 (2003). doi: 10.1021/nl034220x.
6. E. Singh, M. Meyyappan, H. S. Nalwa, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **9**, 34544 (2017). doi: 10.1021/acsami.7b07063.
7. Y. Wang, J. T. W. Yeow, *Journal of Sensors* **2009**, 493904 (2009). doi: 10.1155/2009/493904.
8. C. Cantalini, L. Valentini, I. Armentano, L. Lozzi, J.M. Kenny, S. Santucci, *Sensors and Actuators B: Chemical* **95**, 195 (2003). doi: 10.1016/S0925-4005(03)00418-0.
9. M. Mittal, A. Kumar, *Sensors and Actuators B: Chemical* **203**, 349 (2014). doi: 10.1016/j.snb.2014.05.080.
10. S. Y. Guo, P. X. Hou, H. X. Wang, C. Shi, H. T. Fang, C. Liu, *Carbon* **151**, 156 (2019). doi: 10.1016/j.carbon.2019.05.045.
11. S. J. Young, Z. D. Lin, *Microsyst. Technol.* **24**, 55 (2018). doi: 10.1007/s00542-016-3154-2.
12. J. Liu, J. Lu, X. Lin, Y. Tang, Y. Liu, T. Wang, H. Zhu, *Computational Materials Science* **129**, 290 (2017). doi: 10.1016/j.commatsci.2016.12.035.
13. H. G. Shiraz, F. R. Astarai, S. Fardindoost, Z. S. Hosseini, *RSC Adv.* **6**, 44410 (2016). doi: 10.1039/C6RA03541H.
14. S. K. Abbas, A. N. Naje, *J. Nano- Electron. Phys.* **11(5)**, 05015 (2019). doi: 10.21272/jnep.11(5).05015.
15. S. Ozdemir, J. Gole, *Curr. Opin. in Solid State and Mater. Science* **11**, 92 (2007). doi: 10.1016/j.cossms.2008.06.003.
16. C. Baratto, G. Faglia, G. Sberveglieri, Z. Gaburro, L. Pancheri, C. Oton, L. Pavesi, *Sensors* **2(3)**, 121 (2002). doi: 10.3390/s20300121.

17. L. S. Monastyrskii, I. B. Olenych, O. I. Petryshyn, V. M. Lozynskyi, *Sensor Electronics and Microsystems Technologies* **15(2)**, 88 (2018) (in Ukrainian). doi: 10.18524/1815-7459.2018.2.136891.
18. N. S. A. Eom, H. B. Cho, Y. Song, W. Lee, T. Sekino, Y. H. Choa, *Sensors* **17**, 2750 (2017). doi: 10.3390/s17122750.
19. I. B. Olenych, L. S. Monastyrskii, O. I. Aksimentyeva, L. Orovcik, M. Y. Salamakha, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* **673**, 32 (2018). doi: 10.1080/15421406.2019.1578491.
20. S. Peng, H. Ming, L. Mingda, M. Shuangyun, *J. Semicond.* **33**, 054012 (2012). doi: 10.1088/1674-4926/33/5/054012.
21. N. S. A. Eom, H. B. Cho, H. R. Lim, T. Y. Hwang, Y. Song, Y. H. Choa, *RSC Adv.* **8**, 29995 (2018). doi: 10.1039/C8RA05520C.
22. I. B. Olenych, *J. Nano- Electron. Phys.* **6**, 04022 (2014).
23. I. B. Olenych, O. I. Aksimentyeva, L. S. Monastyrskii, Y. Y. Horbenko, L. I. Yarytska, *Nanoscale Research Letters* **10**, 187 (2015). doi: 10.1186/s11671-015-0896-1.
24. O. Bisi, S. Ossicini, L. Pavesi, *Surf. Sci. Rep.* **38**, 1 (2000). doi: 10.1016/S0167-5729(99)00012-6.
25. Y. Vashpanov, H. Choo, D.S. Kim, *Sensors* **11**, 10930 (2011). doi: 10.3390/s111110930.

Статтю отримано: 22.09.2023
Прийнято до друку: 23.10.2023

Sensor elements based on the multi-walled carbon nanotubes – porous silicon nanosystem

I. Olenych, M. Pavlyk, R. Serkiz

*Ivan Franko National University of Lviv,
Dragomanov St., 50, 79005 Lviv, Ukraine
e-mail: igor.olenych@lnu.edu.ua*

Carbon nanotubes (CNTs) have a high potential for creating gas sensors with low power consumption, operation at room temperatures and miniature sizes of sensitive elements. Therefore, the possibility of using a network of multi-walled CNTs on porous silicon (por-Si) substrate as low-cost sensors for toxic and explosive gases is studied in the work. An increase in the network of mwCNTs due to the nanotubes placed in the pores can lead to a higher sensitivity of gas sensors. It was established that mwCNTs form a disordered and heterogeneous network based on the analysis of SEM images of the sensor element surface. The porous morphology of the mwCNT–por-Si nanosystem provides an increase in the working surface and sensitivity of the gas sensor. The sensory properties of the obtained nanosystem were studied in AC mode by measuring electrical resistance and capacitance under the influence of adsorption of ammonia, acetone and ethanol molecules. An increase in the resistance and capacitance of the sensor elements due to the adsorption of molecules of analyzed gases was found. Based on the analysis of the dependences of the electrical characteristics and sensing ability of the mwCNT – por-Si nanosystem on the concentration of ammonia, acetone and ethanol molecules in the 0.4–12% range, it was established that both resistive and capacitive type sensors have the greatest sensitivity to ammonia. In addition, the capacitive sensor element is characterized by a greater sensing ability than the resistive one. However, unambiguous identification of the analyte gas and determination of its concentration requires additional analysis of the response of the matrix of sensor elements with an individual profile of the transfer function. The response time of ammonia, acetone and ethanol sensors based on mwCNTs – por-Si nanosystem was about one minute at room temperature. The obtained sensor elements are characterized by quickly restoring functionality even without the use of special restoring procedures (e.g., heating). The mwCNTs–por-Si nanosystem shows the prospect of use in microelectronic sensor devices.

Key words: nanosystem, carbon nanotubes, porous silicon, gas sensor, sensing ability.