

М. КОГДАСЬ

ДОСЛІДЖЕННЯ АДСОРБЦІЇ МОЛЕКУЛ ПОБУТОВОГО ГАЗУ НА ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОРУВАТОГО КРЕМНІЮ

Предмет. У статті комплексно досліджено адсорбцію молекул побутового газу на поверхні поруватого кремнію та її вплив на електрофізичні властивості матеріалу. **Мета.** Визначення впливу адсорбції молекул побутового газу на електрофізичні характеристики поруватого кремнію та виявлення можливостей використання цього ефекту для розроблення ефективних газових сенсорів. **Завдання.** У межах дослідження проведено комплексне вивчення адсорбції газу на поруватому кремнії, виміряно зміни провідності та ємності матеріалу під впливом адсорбції газу, визначено оптимальні умови для детектування побутового газу, розглянуто можливості використання досягнутих результатів у розробленні технологій моніторингу якості повітря та безпеки середовища, а також досліджено вплив різних концентрацій побутового газу на електрофізичні характеристики поруватого кремнію. **Методи.** У дослідженні впроваджено методи електрофізичного аналізу для вимірювання змін провідності та ємності матеріалу. **Результати.** Досягнуті результати свідчать про значущий ефект адсорбції на електрофізичні властивості поруватого кремнію. Виявлено, що адсорбційний шар газу на поверхні матеріалу викликає не лише збільшення провідності, але й значні зміни в ємності, що може бути використано для розроблення ефективних газових сенсорів. **Висновки.** Електрофізичні зміни є показниками адсорбції та можуть бути використані для реального газового моніторингу. Існують оптимальні умови для детектування побутового газу. Визначено вплив концентрацій газу на електрофізичні характеристики поруватого кремнію. Розглянуто можливості застосування досягнутих результатів у виробництві екологічно чистих сенсорних систем для моніторингу якості повітря.

Ключові слова: поруватий кремній; адсорбція; побутовий газ; електропровідність; діелектрична проникність; метан; сенсори.

Вступ

Завдяки своїм унікальним властивостям наноматеріали на основі кремнію дедалі частіше застосовуються в різних галузях науки й техніки. Як правило, технологія створення наноструктур у вигляді квантових ям, ниток і точок досить складна.

З другої половини ХХ ст. спостерігається тенденція щодо зменшення розмірності напівпровідникових структур. Квантові ями, нитки й точки зараз присутні в багатьох пристроях, таких як лазери, надпотужні комп'ютери, мобільні телефони, та є ключем до розвитку технології наногетероструктурної електроніки [1].

Електричними властивостями кремнію можна керувати за допомогою створення на його основі наноструктур – просторово розділених кремнієвих ділянок із розмірами в кілька нанометрів. Тоді носії заряду (дірки та електрони) набувають додаткової енергії внаслідок квантового розмірного ефекту [2–4].

Поруватий кремній (ПК) – це нанокристал, пронизаний сіткою з пор, де квантові ефекти відіграють основну роль. Тому ПК можна розглядати як квантову губку, і як губка він може просочуватися різними хімічними речовинами [5]. ПК має унікальні

фізичні властивості [6] і в принципі сумісний із сучасною мікроелектронною технологією.

ПК має дуже велику внутрішню поверхню (приблизно $10^3 \text{ м}^2/\text{г}$), що в 10^3 – 10^5 разів більша, ніж у кристалічного кремнію. Таке збільшення значно підвищує адсорбційну здатність поверхні без збільшення розміру кристала. Хоча поверхня ПК пасивується, вона залишається високохімічно активною, що є важливою особливістю ПК.

Велика внутрішня поверхня та висока хімічна активність ПК роблять використання цього матеріалу для газового аналізу дуже перспективним.

ПК – ефективний матеріал для розроблення різноманітних сенсорів на його основі. Як згадувалося вище, поряд із великою площею внутрішньої поверхні та високою хімічною активністю, ПК має певні переваги. По-перше, технологія електрохімічного травлення кремнію є простою та добре відпрацьованою, що може значно спростити виготовлення сенсорів на основі ПК і знизити їх вартість. По-друге, сенсори на основі ПК можуть бути виготовлені на одній підкладці разом із керуючою мікросхемою, що дає змогу спростити та здешевити технічну вартість виготовлення кінцевого пристрою. По-третє, у деяких дослідженнях [7–9]

повідомляється про досить низьку робочу температуру (150–200°C) структур на основі ПК, за якої виявляється чимало шкідливих газів (різні вуглеводні, водень, аміак, діоксид азоту, оксид вуглецю). Важливо також наголосити на високій чутливості ПК до різних речовин. Основними недоліками ПК у використанні для газового аналізу є низька селективність та погіршення властивостей із часом (ефект старіння) [10]. Селективність потенційних сенсорів на основі ПК можна підвищити введенням різних каталітичних металів (Pt, Pd, Au, Ni) у поруватий шар або за допомогою спеціальних молекулярних фільтрів у сенсорі.

Аналіз проблеми й наявних методів

Адсорбційна чутливість поруватого напівпровідника – це його здатність реагувати на зміни в речовинах, адсорбованих на його поверхні. Поруваті напівпровідники особливо чутливі до молекул і атомів, адсорбованих на їх поверхні, завдяки великій кількості пор у структурі. Адсорбційна чутливість може бути використана для виявлення газів, парів, хімічних сполук та інших речовин у навколишньому середовищі.

Адсорбційна чутливість поруватих напівпровідників основана на зміні електричних, оптичних та інших фізичних властивостей матеріалу під впливом адсорбатів. З допомогою вимірювання та інтерпретації цих змін можна виявити та ідентифікувати адсорбовані речовини.

Відомо, що під час адсорбції на непоруватих і поруватих адсорбентах кількість адсорбованого газу або пари змінюється на різних ділянках ізотерми адсорбції. Наприклад, у разі непоруватих і мікропоруватих адсорбентів вплив властивостей адсорбенту, текстури та умов експерименту найбільш виражений у ділянці низьких відносних тисків, тоді як у разі крупнопоруватих адсорбентів вплив помітний лише за умови високих тисків, близьких до тиску насичення. У ділянці моношарового заповнення зростання адсорбції сповільнюється з підвищенням тиску та визначається утворенням пологих зон на ізотермі адсорбції, розмір яких залежить від внутрішньої структури поруватого матеріалу. У подальшому підвищенні тиску кількість адсорбованого матеріалу збільшується завдяки багатомолекулярній адсорбції, та в разі поруватих

середовищ із капілярною конденсацією адсорбція припиняється. Характер ізотерми адсорбції, яка відображає внутрішню структуру твердого тіла, визначає ступінь розвитку певних типів пор і дає змогу визначити розмір і характер структурного типу та питому поверхню адсорбенту [7].

Мета статті – дослідити процес адсорбції молекул побутового газу на поруватому кремнії, що дасть змогу вдосконалити сенсорні технології для ефективного виявлення та моніторингу газових забруднень у повітрі.

Вирішення завдання

Для отримання шарів поруватого кремнію використовували структури кремнію, леговані оловом і кремнієм (Si:Sn – Si:Si). Як підкладка застосовувався бік $n + -\text{Si:Sn}$ завтовшки 400 мкм з концентрацією носіїв заряду 10^{18} см^{-3} , на яку наносився шар $n\text{-Si:Si}$ завтовшки 20 мкм і концентрацією носіїв заряду 10^{16} см^{-3} [8].

Перед початком отримання поруватих зразків у вакуумній камері на підкладку напилували металевий контакт.

Поруватий шар Si було отримано методом імпульсного анодного електрохімічного травлення з параметрами ($T_{\text{off}} = 40 \text{ мс}$ і $T_{\text{on}} = 100 \text{ мс}$) і силою струму 10 мА, для вирощування поруватих шарів було обрано однокамерну комірку (рис. 1). Травлення проводили в умовах кімнатної температури без освітлення в комірці із платиновим електродом і робочою площею 1 см^2 [9–11]. Для приготування досліджуваних зразків використовували розчин $\text{HF}:\text{CH}_3\text{OH}=1:1$ з додаванням HCl (5:1 за об'ємом) та FeCl_3 (20 мл) відповідно. Поруватість контролювалася з допомогою вагового методу й методу фотолюмінесценції.

Після отримання поруватого шару зразки просушувались і на цей шар електрохімічним методом як метал-каталізатор вплавили нікель зі спиртового розчину NiCl_2 за температури 70°C. Схема отриманого зразка зображена на рис. 2.

Вакуумна адсорбційна установка призначена для подачі різних адсорбентів. Схема показана на рис. 3. Установка дає змогу підтримувати тиск вакууму $p \sim 10^{-5} \text{ мм рт. ст.}$ протягом тривалого часу.

Зразки закріплювали в тримачі та поміщали в експериментальну комірку, виводи якої під'єднували до вимірювальної плати персонального комп'ютера.

Електрична схема вимірювання описана нижче. Стабілізацію температури проводили за допомогою зовнішнього нагрівального елемента, встановленого в експериментальній комірці. Досліджувати ВАХ можна

в широкому діапазоні температур (до 300°C), у вакуумі та в атмосфері, контрольованій різними газами [12].

Вимірювання ВАХ були повністю автоматизовані.

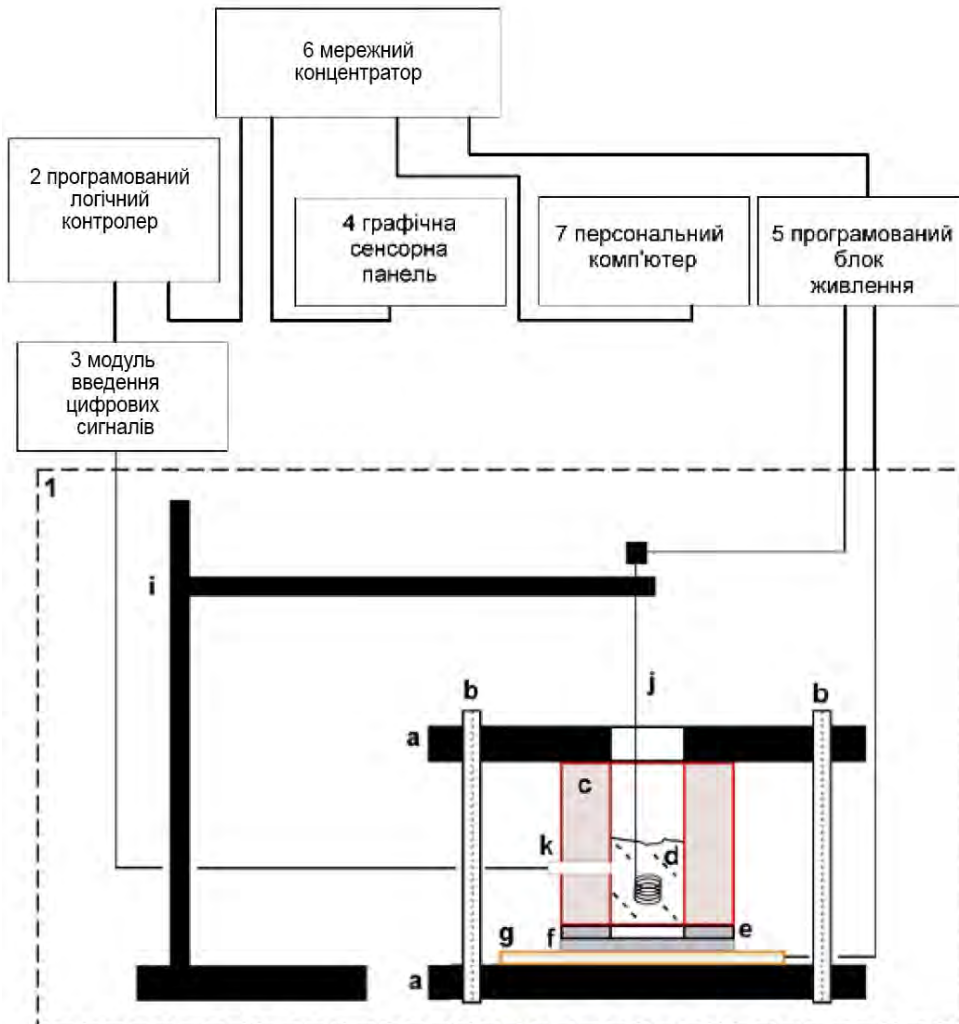


Рис. 1. Структурна схема системи керування вирощуванням поруватого шару:

a – затискачі; *b* – шпильки затискача; *c* – фторопластова комірка; *d* – електролітичний концентрат;
e – ізоляційна підкладка; *f* – пластина (зразок Si); *g* – омичний електрод; *i* – штатив;
j – платиновий електрод; *k* – цифровий сенсор температури

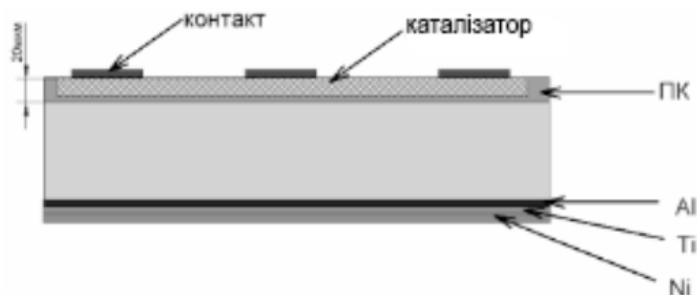


Рис. 2. Схема поруватого зразка кремнію з металевим каталізатором

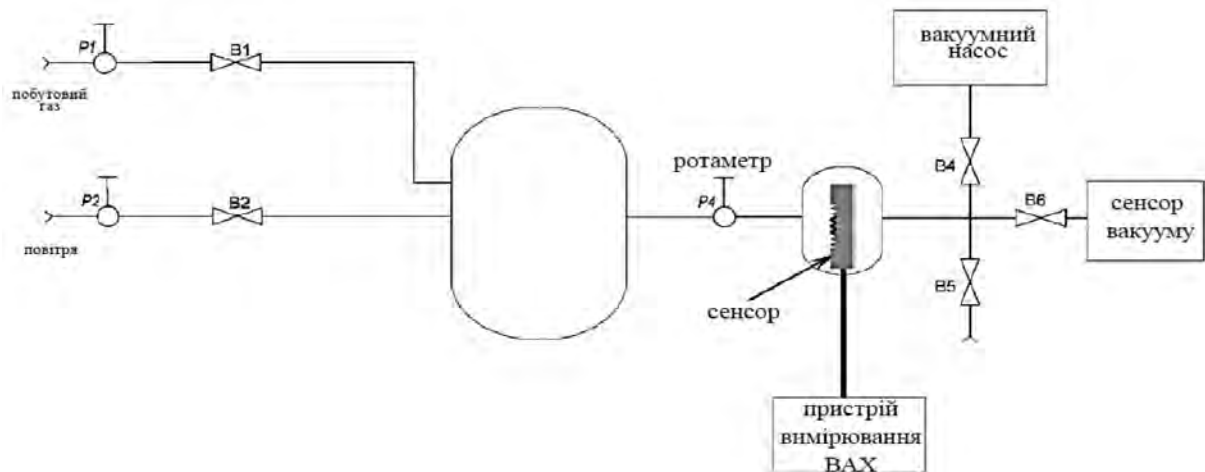


Рис. 3. Схема стенда для вимірювання вольт-амперних характеристик

Побутовий газ є сумішшю вуглеводнів, де більшу частку становить метан – від 92% до 98%. Побутовий газ також містить важчі вуглеводні – гомологи метану: етан (C_2H_6), пропан (C_3H_8), бутан (C_4H_{10}). Побутовий газ не має кольору та запаху. Щоб можна було визначити витік за запахом, у газ додають незначну кількість спеціальної речовини – одоранту. Як одорант застосовується етилмеркаптан у кількості 16 г на 1000 м^3 природного газу [13].

Оскільки метан становить більшу частину побутового газу, було досліджено вплив його

адсорбції до зразків Ме/ПК-Ni/Si. На рис. 4 подані ВАХ зразка за трьох температур: 23°C , 70°C , 150°C . З рисунка видно, що за кімнатної температури ВАХ структури має яскраво виражений "діодний" характер, а основну роль у провідності відіграє потенційний бар'єр на межі ПК/Si [14]. "Прямому" напрямку відповідає негативна напруга на металевому електроді. Це означає, що фактором, який обмежує протікання струму в "прямому" напрямку, є інжекція дірок із кремнію в шар ПК. Відповідно, зворотний струм обумовлений інжекцією електронів у шар ПК із кремнію.

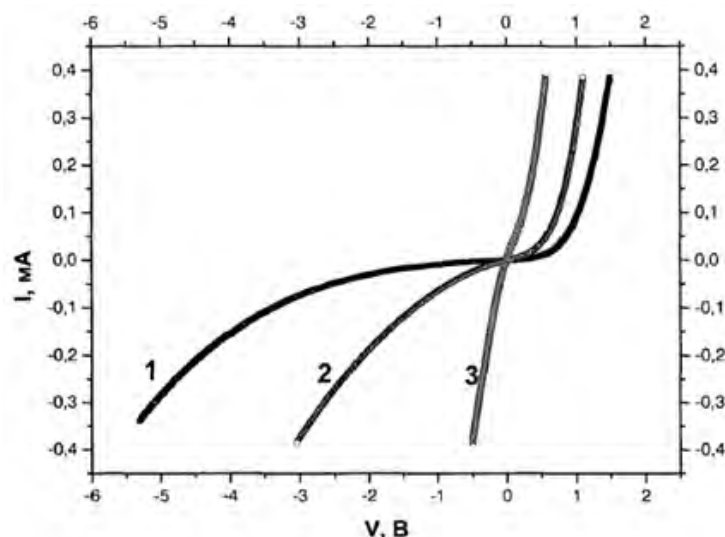


Рис. 4. ВАХ структури Ме/ПК-Ni/Si у вакуумі за різних температур.

Умови вимірювання ВАХ: 1) $T = 23^\circ\text{C}$; 2) $T = 70^\circ\text{C}$; 3) $T = 150^\circ\text{C}$. Знак напруги відповідає напрузі на кремнії

На рис. 5 показано типові ВАХ досліджуваних структур у вакуумі та після напуску метану в експериментальну комірку, виміряні в різні

інтервали часу. На рис. 6 видно, що зміна величини відносної зміни струму через структуру Ме/ПК-Ni/Si від напуску метану в експериментальну комірку

з досліджуваним зразком зростає з температурою немонотонно. За температур, менших за 60°C, ефект впливу адсорбції метану на струм через структуру відсутній, але, починаючи з 70°C, величина

відносної зміни струму через структуру стає відмінною від нуля, і швидкість її зростання максимальна за температур 100–150°C.

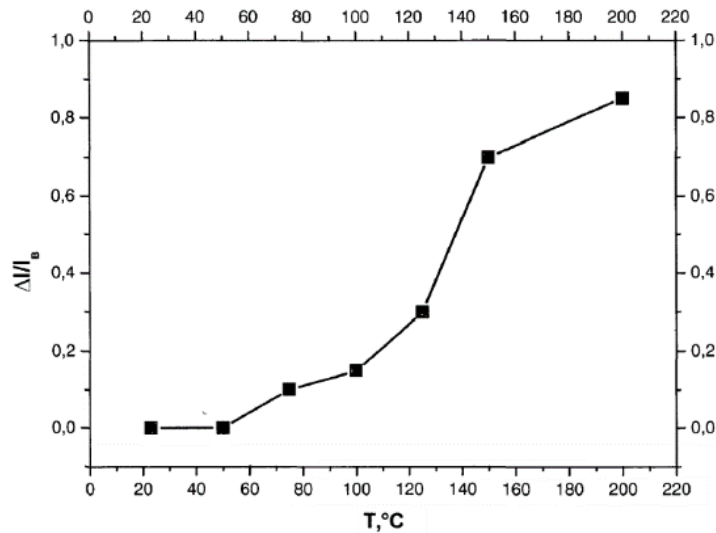


Рис. 5. Відносна зміна струму через структуру Me/PK-Ni/Si під час адсорбції метану за різних температур.

Напруга на металевому електроді $V_g = 3,5$ В. $\Delta I = I_g - I_M$,

де I_g – величина струму у вакуумі; I_M – величина струму в атмосфері метану

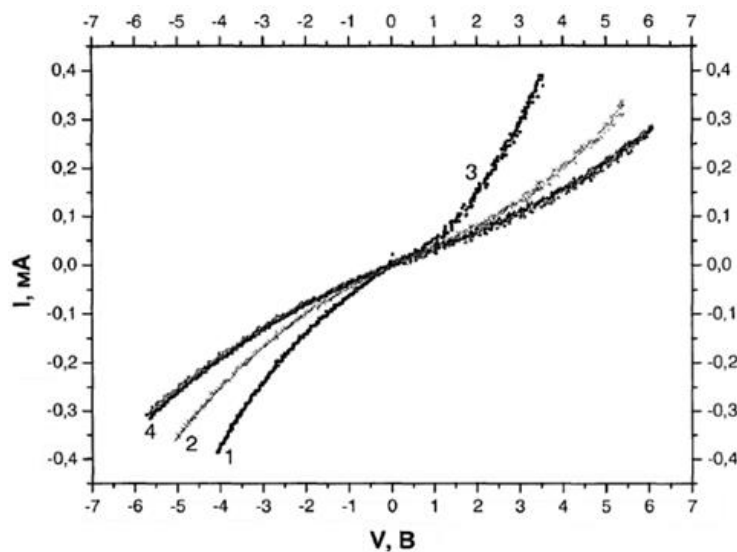


Рис. 6. Вплив метану на ВАХ структури Me/PK-Ni/Si. Температура зразка $T = 150^\circ\text{C}$. Тиск метану $p = 20$ торр.

Умови вимірювання ВАХ: 1) вакуум;

2) за 3 хв після напуску метану в комірку;

3) за 15 хв після напуску метану в комірку;

4) за 30 хв після напуску метану в комірку

Подальше нагрівання зразка до 200°C також призводить до збільшення впливу адсорбції метану на провідність зразка, але темп зростання відносної зміни струму значно зменшується, і можна припустити, що за температур значно вищих за 200°C ефект впливу адсорбції метану на провідність буде

стабільним. Це можна пояснити тим, що молекули метану за умови підвищення температури активно дисоціюють з утворенням водню, молекул типу CH_x ($0 < x < 4$) та їх різних проміжних сполук. Ці молекули хімічно більш активні та частіше впливають на зміну електрофізичних характеристик зразка.

Однак зі зростанням температури зменшується загальний темп адсорбції на поверхні ПК, тому величина відносної зміни струму через структуру Ме/ПК-Ni/Si під час адсорбції метану на поверхні зразка виходить на сталу величину за температури, що перевищує 200°C. Отже, можна вважати, що оптимальна температура для детектування метану структурами Ме/ПК-Ni/Si дорівнює 150°C. За цієї температури спостерігається помітна чутливість експериментальних структур до метану. Проте температура 150°C залишається набагато нижчою за робочі температури наявних напівпровідникових (металооксидних) датчиків.

За температури $T = 150^\circ\text{C}$ ВАХ стає симетричною щодо нуля напруги, і струм обмежений самим шаром ПК. Можна припустити, що за високої температури в ПК відбувається перехід електрона з валентної зони в метал, коли на затворі позитивна напруга. Тоді дірка, що утворилася, рухатиметься в протилежному напрямку з ПК/Si. Тобто можливий процес генерації носіїв заряду в ПК, і тому ВАХ стає симетричною щодо знака напруги. Виходячи з майже

квадратичної залежності струму від напруги, можна припустити, що пряму та зворотну гілку ВАХ утворюють струми, обмежені просторовим зарядом (ТОПЗ) у шарі ПК [15].

У цій роботі вивчався вплив побутового газу на ВАХ структур Ме/ПК-Ni/Si. Щоб унеможливити неминучий вплив парів води, побутовий газ попередньо осушували. Було встановлено, що за кімнатних температур побутовий газ не чинить помітного впливу на ВАХ зразка, а за температури $T = 150^\circ\text{C}$ спостерігається значний вплив адсорбції побутового газу на ВАХ системи Ме/ПК-Ni/Si. На рис. 7 зображено ВАХ зразка за напусків осушеного побутового газу в експериментальну комірку, а також за подальшого вакуумування зразка. На рис. 7 видно, що вплив адсорбції побутового газу на ВАХ зразка аналогічний впливу адсорбції метану. Тобто абсолютна величина струму як за позитивної, так і за негативної напруги на металевому контакті значно зменшується після напуску адсорбату в експериментальну комірку порівняно з вакуумом.

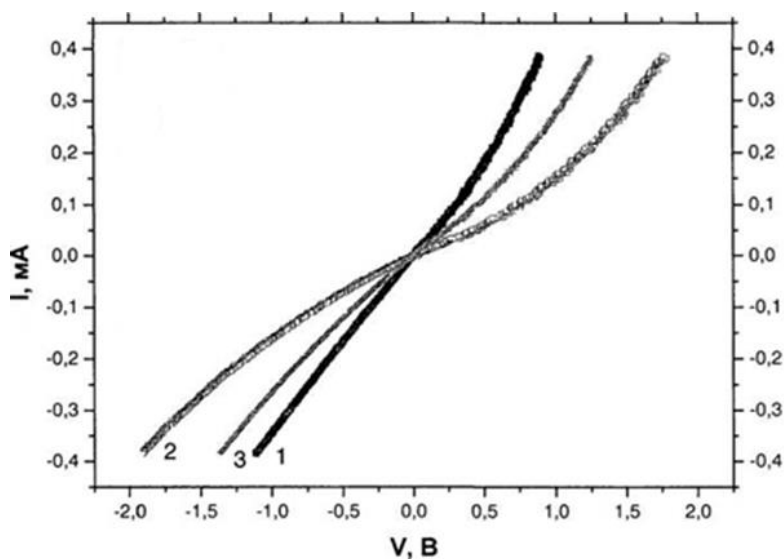


Рис. 7. Вплив адсорбції осушеного побутового газу на ВАХ структури Ме/ПК-Ni/Si. Температура зразка $T = 150^\circ\text{C}$.

- Тиск побутового газу $p = 17$ торр. Умови вимірювання ВАХ: 1) вакуум;
2) за 30 хв після напуску побутового газу в комірку;
3) за 30 хв після вакуумування зразка

Однаковий вплив побутового газу та метану на ВАХ структури Ме/ПК-Ni/Si можна пояснити тим, що метан становить більшу частину побутового газу, а інші компоненти (етан, пропан, бутан) є його гомологами та схожі за хімічними властивостями. Наявність етилмеркаптану в складі побутового газу не чинить додаткового помітного впливу

на ВАХ зразка через мізерну малу частку цієї домішки $\sim 0,02$ ppm. Механізм чутливості побутового газу зводиться до механізму чутливості зразка до метану, де основна роль відводиться атомарному водню, що утворюється під час дисоціації вихідних вуглеводневих молекул у ділянці металічного контакту й на нанокластерах металу-каталізатора.

Під час проведення експериментів із напусками осушеного побутового газу постало питання про багаторазове використання структур $\text{Me}/\text{ПК-Ni}/\text{Si}$ для детектування газів. Важливо простежити в динаміці, як швидко відновлюється провідність зразка в процесі відкачування газу з експериментальної комірки й наскільки вона змінюється за умови повторного напуску газу. Важливо визначити кількість таких ітерацій "напуск газу – відкачування", протягом яких ще можна розрізнити вплив адсорбції газу, що напускається, на провідність експериментальної структури.

На рис. 8 показано вплив адсорбції побутового газу на величину струму під час послідовних напусків і відкачування адсорбату. Напруга на металевому затворі $Vg = 1 \text{ В}$, температура зразка $T = 150^\circ\text{C}$.

Адсорбційні експерименти з побутовим газом показали, що основна зміна провідності структури відбувається в перші кілька хвилин після напуску або відкачування газу з експериментального осередку, тому інтервал часу, упродовж якого зразок витримували в атмосфері побутового газу й у вакуумі, дорівнював 10 хв.

На рис. 8 видно, що протягом 10 хв в умовах першого напуску газу відбувається значне (майже удвічі) зменшення струму через зразок. Після вакуумування експериментальної структури величина струму збільшується, але його значення на 19% менше, ніж величина струму до першого напуску. Наступні напуски та відкачування побутового газу з комірки також супроводжуються значною зміною струму, до того ж у процесі кожного вакуумування зразка величина струму \sim на 11% менша, ніж величина струму під час попереднього вакуумування. Після п'ятого напуску адсорбату в експериментальну комірку та вакуумування структури величина струму через зразок приблизно дорівнює величині струму, що відповідає першому напуску газу в комірку. Необхідно зауважити, що відносна зміна струму зменшується незначно. Якщо після першого напуску побутового газу в комірку $\Delta I/I_0 = 0,48$, то після шостого – $\Delta I/I_0 = 0,3$. Щоб повністю відновити провідність структури $\text{Me}/\text{ПК-Ni}/\text{Si}$ потрібне короткочасне прогрівання у вакуумі за $T \sim 200^\circ\text{C}$.

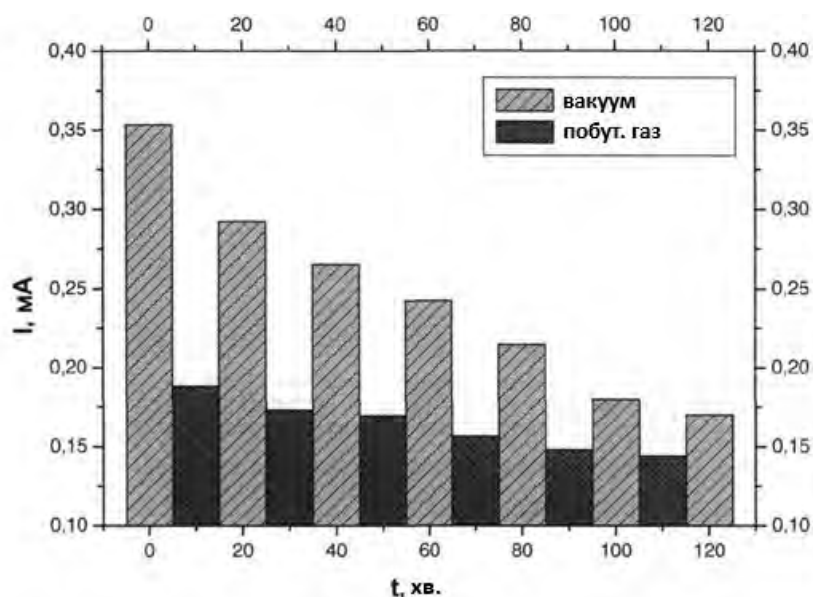


Рис. 8. Вплив адсорбції побутового газу на величину струму під час послідовних напусків і відкачування адсорбату. Температура зразка $T = 150^\circ\text{C}$. Напруга на металевому електроді $Vg = 1 \text{ В}$. Тиск побутового газу $p = 17 \text{ торр}$

Експерименти з осушеним побутовим газом показують, що структури $\text{Me}/\text{ПК-Ni}/\text{Si}$ можуть бути використані в сенсорах для детектування побутового газу, і ці датчики здатні працювати багаторазово без додаткового оброблення.

Подані в роботі [14] результати показують, що адсорбція кисню на поверхні ПК призводить

до різноспрямованих ефектів від адсорбції метану. Незважаючи на те, що чутливість структури $\text{Me}/\text{ПК-Ni}/\text{Si}$ до молекул побутового газу зі зростанням температури збільшується, а до кисню, навпаки, зменшується [15], залишається незрозумілим, як змінюватиметься провідність зразка під час напуску метану в експериментальну комірку, якщо

до цього здійснити напуск атмосферного повітря та його не відкачувати з комірки.

Для з'ясування цього питання було проведено наступний експеримент. Спочатку зразок піддавався термовакуумному обробленню (ТВО), після якого в експериментальну комірку напускали атмосферне повітря за умови малого тиску. Температура зразка становила 150°C. Водночас спостерігалася зміна

ВАХ зразка. Після встановлення стабільної ВАХ проводився напуск побутового газу в експериментальну комірку та визначався його додатковий вплив на ВАХ зразка. Наприкінці експерименту зразок вакуумували понад годину для того, щоб дослідити відновлення провідності експериментальної структури. На рис. 9 показано кінетику зміни величини струму за напруги на металевому контакті $V_g = 2$ В.

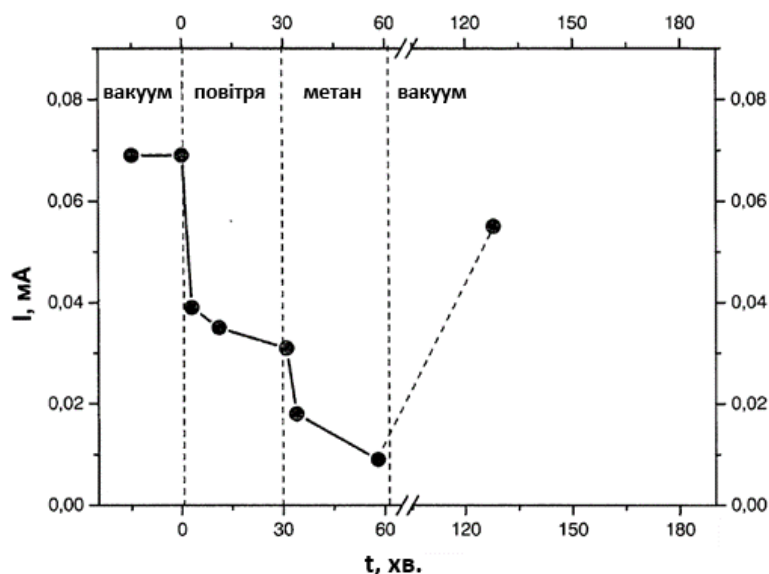


Рис. 9. Вплив адсорбції побутового газу на величину струму під час послідовних напусків і відкачування адсорбату. Температура зразка $T = 150^\circ\text{C}$. Напруга на металевому електроді $V_g = 1$ В. Тиск побутового газу $p = 17$ торр

З рис. 9 видно, що вплив адсорбції повітря призводить до зменшення величини струму. Тобто вплив адсорбції повітря на ВАХ експериментальної структури можна звести до впливу кисню як хімічно найактивнішої компоненти повітря. Хоча в повітрі є багато інших хімічно активних компонент, що впливають на електрофізичні властивості зразка, насамперед вуглекислий газ і водяна пара. Дуже важливим є той факт, що на тлі деякого зменшення величини струму після напуску повітря в камеру під час подальшого напуску побутового газу відбувається додаткове зменшення струму, до того ж адсорбційний ефект впливу побутового газу на провідність структури можна порівняти з адсорбційним ефектом від повітря. Тобто експериментальні структури за підвищеної температури здатні "відчувати" побутовий газ на тлі атмосферного повітря. Також важливо зазначити, що після вакуумування зразка відбулося часткове відновлення його провідності.

З усього сказаного вище можна зробити висновок, що структури Me/ПК-Ni/Si мають високу адсорбційну чутливість до молекул побутового газу і здатні його "відчувати" навіть на тлі атмосферного повітря.

Висновки

Виявлено значне збільшення чутливості структур на основі ПК до молекул метану й побутового газу за умови додавання в поруватий шар металокатализатора (Ni). Уведення нанокластерів Ni призводить до більшого зростання чутливості до вуглеводнів. З'ясовано, що гетероструктурам Me/ПК-Ni/Si властива висока адсорбційна чутливість до різних газових середовищ, насамперед до таких вибухонебезпечних газів, як метан і побутовий газ. Показано, що мінімальна температура детектування метану та побутового газу значно нижча за робочі температури наявних напівпровідникових (металооксидних) сенсорів. Установлено, що механізм чутливості досліджених гетероструктур до молекул вуглеводнів не пов'язаний із впливом адсорбованого на поверхні ПК кисню. Визначено, що експериментальні структури здатні виявляти метан на фоні атмосферного повітря. Надалі планується отримати сенсори з іншими каталітичними металами (Pt, Pd, Au), а також дослідити селективність таких газів, як водень, вуглекислий газ, кисень тощо.

Список літератури

- Levitsky I. A. Porous Silicon Structures as Optical Gas Sensors. *Sensors*. 15(8). 2015. P. 19968–19991. DOI: <https://doi.org/10.3390/s150819968>
- Gor G. Y., Huber P., Bernstein N. Adsorption-induced deformation of nanoporous materials. *Applied Physics Reviews*. 2017. № 011303. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4975001>
- Santana J. E., de Santiago F., Miranda Á., Pérez L. A., Salazar F., Trejo A., Cruz-Irisson M. Fluorinated porous silicon as a sensor material for environmentally toxic gases: a first-principles study. *Materials Advances*. 2021. P. 1072–1082. DOI: <https://doi.org/10.1039/D0MA00884B>
- Kayahan E. Porous silicon-based CO₂ sensors with high sensitivity. *International Journal of Electronics and Optoelectronics*, 2018. 1(1). P. 24–27. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.03.024>
- Korotcenkov G., Rusu E. How to Improve the Performance of Porous Silicon-Based Gas and Vapor Sensors. Approaches and Achievements. *Physica Status Solidi A: Applications and Materials Science*. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1002/pssa.201900348>
- Когдась М. Г., Оксанич А. П., Холод О. Г., Притчин С. Е. Удосконалення методу отримання поруватого шару на підкладках n-GaAs. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського*. 2018. Том 29 (68) № 6, частина 2. С. 228–234. URL: https://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2018/6_2018/part_2/44.pdf
- Mhamdi H., Azaiez K., Fiorido T., Benabderrahmane Zaghoulani R., Lazzari J. L., Bendahan M., Dimassi W. Room temperature NO₂ gas sensor based on stain-etched porous silicon: Towards a low-cost gas sensor integrated on silicon. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2022. V. 139. 109325 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2022.109325>
- Loni A., Defforge T., Caffull E., Gautier G., Canham L. T. Porous silicon fabrication by anodization: Progress towards the realization of layers and powders with high surface area and micropore content. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2015. 209. P. 25–33. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2015.03.006>
- Оксанич А., Когдась М., Холод О., Мащенко М. Розробка високочутливих датчиків водню на базі діодів Шотткі, виготовлених із нанорозмірних шарів n-GaAs. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2018. Вип. 2(109). С. 9–14. DOI: 10.30929/1995-0519.2018.2.P.9-14
- Ghorbani Shiraz H. Efficient room temperature hydrogen gas sensing based on graphene oxide and decorated porous silicon. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017, 43(23). P. 15707–15717. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.05.045>
- Wang B., Zhang H., Phuong H. T., Jin F., Yang J. F., Ishizaki K. Gas permeability and adsorbability of the glass-bonded porous silicon carbide ceramics with controlled pore size. *Ceramics International*. 2014. 41(1). P. 1614–1620. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.10.032>
- Wang W., Gao Y., Tao Q., Liu Y. Z., Zuo J. J., Ju X. C., Zhang J. K. A Novel Porous Silicon Composite Sensor for Formaldehyde Detection. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*. 2015. V. 43, Issue 6. P. 849–855. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1872-2040\(15\)60829-5](https://doi.org/10.1016/S1872-2040(15)60829-5)
- Chang-Fang Wang, Mirikka P. Sarparanta Multifunctional porous silicon nanoparticles for cancer theranostics. *Biomaterials*. 2015. Vol. 48. 108–118. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2015.01.008>
- Choi M. S., Na H. G., Mirzaei A., Bang J. H., Oum W., Han S., Choi S. W., Kim M., Jin C., Kim S. S., Kim H. W. Room-temperature NO₂ sensor based on electrochemically etched porous silicon. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019. V. 811. 151975 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.151975>
- Su-Ran Li, Fang-Yi Huo, Han-Qi Wang Recent advances in porous nanomaterials-based drug delivery systems for cancer immunotherapy. *J Nanobiotechnology*. 2022. № 20. 277 p. DOI: 10.1186/s12951-022-01489-4

References

- Levitsky, I. A. (2015), "Porous Silicon Structures as Optical Gas Sensors", *Sensors*, 15(8), P. 19968–19991. DOI: <https://doi.org/10.3390/s150819968>
- Gor, G. Y., Huber, P., & Bernstein, N. (2017), "Adsorption-induced deformation of nanoporous materials", *Applied Physics Reviews*, 4, № 011303. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4975001>
- Santana, J. E., de Santiago, F., Miranda, Á., Pérez, L. A., Salazar, F., Trejo, A., & Cruz-Irisson, M. (2021), "Fluorinated porous silicon as a sensor material for environmentally toxic gases: a first-principles study", *Materials Advances*, P. 1072–1082. DOI: <https://doi.org/10.1039/D0MA00884B>
- Kayahan, E. (2018), "Porous silicon-based CO₂ sensors with high sensitivity", *International Journal of Electronics and Optoelectronics*, 1(1), P. 24–27. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.03.024>
- Korotcenkov, G., & Rusu, E. (2019), "How to Improve the Performance of Porous Silicon-Based Gas and Vapor Sensors. Approaches and Achievements", *Physica Status Solidi A: Applications and Materials Science*. DOI: <https://doi.org/10.1002/pssa.201900348>
- Kogdas, M., Oksanych, P., Kholod, G., Pritchyn, E. (2018), "Improvement of the method of creating contacts from the Schottky barrier to porous GaAs", *Scientific Notes of the Tauride National University named after V.I. Vernadsky*. Vol. 29 (68) No. 6, part 2, P. 228–234. URL: https://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2018/6_2018/part_2/44.pdf
- Mhamdi, H., Azaiez, K., Fiorido, T., Benabderrahmane Zaghoulani, R., Lazzari, J. L., Bendahan, M., & Dimassi, W. (2022), "Room temperature NO₂ gas sensor based on stain-etched porous silicon: Towards a low-cost gas sensor integrated on silicon", *Sensors and Actuators B: Chemical*. V. 139. 109325 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2022.109325>

8. Loni, A., Defforge, T., Caffull, E., Gautier, G., & Canham, L. T. (2015), "Porous silicon fabrication by anodization: Progress towards the realization of layers and powders with high surface area and micropore content", *Microporous and Mesoporous Materials*, 209, P. 25–33. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2015.03.006>
9. Kogdas, M., Oksanych, P., Kholod, G., Mashenko, M. (2018), "Development of highly sensitive hydrogen sensors based on Schottky diodes made of nanoscale n-GaAs layers", *Bulletin of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, Issue 2(109) P. 9–14. DOI: 10.30929/1995-0519.2018.2.P.9-14
10. Ghorbani Shiraz, H. (2017), "Efficient room temperature hydrogen gas sensing based on graphene oxide and decorated porous silicon", *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(23), P. 15707–15717. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.05.045>
11. Wang, B., Zhang, H., Phuong, H. T., Jin, F., Yang, J. F., & Ishizaki, K. (2014), "Gas permeability and adsorbability of the glass-bonded porous silicon carbide ceramics with controlled pore size", *Ceramics International*, 41(1), P. 1614–1620. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.10.032>
12. Wang, W., Gao, Y., Tao, Q., Liu, Y. Z., Zuo, J. J., Ju, X. C., & Zhang, J. K. (2015), "A Novel Porous Silicon Composite Sensor for Formaldehyde Detection", *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 43(6), P. 849–855. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1872-2040\(15\)60829-5](https://doi.org/10.1016/S1872-2040(15)60829-5)
13. Chang-Fang Wang, Mirkka P. (2015), "Sarparanta Multifunctional porous silicon nanoparticles for cancer theranostics", *Frontiers in Chemistry*, Vol. 48, P. 108–118. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2015.01.008>
14. Choi, M. S., Na, H. G., Mirzaei, A., Bang, J. H., Oum, W., Han, S., Choi, S. W., Kim, M., Jin, C., Kim, S. S., & Kim, H. W. (2019), "Room-temperature NO₂ sensor based on electrochemically etched porous silicon", *Journal of Alloys and Compounds*. V. 811. 151975 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.151975>
15. Su-Ran Li, Fang-Yi Huo, Han-Qi Wang (2022), "Recent advances in porous nanomaterials-based drug delivery systems for cancer immunotherapy", *J Nanobiotechnology*, 20. 277 p. DOI: 10.1186/s12951-022-01489-4

Надійшла 28.02.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Когдась Максим Григорович – кандидат технічних наук, доцент, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, доцент кафедри автоматизації та інформаційних систем, Кременчук, Україна; e-mail: kogdasmax@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7208-2680>

Kogdas Maksym – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Associate Professor at the Department of Automation and Information Systems, Kremenchuk, Ukraine.

STUDY OF ADSORPTION OF HOUSEHOLD GAS MOLECULES ON ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF POROUS SILICON

Purpose. This research comprehensively investigates the adsorption of household gas molecules on porous silicon surfaces and its impact on the electrophysical properties of the material. The primary aim is to understand how the adsorption process influences the electrical conductivity and capacitance of porous silicon. **Methodology.** The study employs various electrophysical analysis methods to measure changes in the material's conductivity and capacitance caused by gas adsorption. Furthermore, the research explores optimal conditions for detecting household gas and establishes the correlation between the degree of adsorption and alterations in electrophysical parameters. **Originality.** The research contributes novelty by not only revealing increased conductivity due to adsorption but also significant changes in capacitance, providing a foundation for developing efficient gas sensors. Additionally, the article discusses the potential applications of porous silicon in developing novel materials for gas sensors to detect various airborne pollutants. **Results.** In addition to the previously mentioned findings, the article highlights the results of experiments studying the influence of different concentrations of household gas on the electrophysical characteristics of porous silicon. This insight refines optimal parameters for the effective detection of gas pollutants. The research also discusses the applicability of the results in producing environmentally friendly and highly efficient sensor systems. **Practical Value.** The obtained conclusions deepen our understanding of the interaction between porous silicon and household gas, crucial for advancing gas sensor technologies. The study opens broad possibilities for applying porous silicon in highly sensitive and reliable gas sensors for diverse practical applications, including safety monitoring and air quality control in industrial and domestic settings. The practical implications extend to the development of real-time, eco-friendly sensor systems.

Keywords: porous silicon; adsorption; household gas; electrical conductivity; dielectric permeability; methane, sensors.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Когдась М. Г. Дослідження адсорбції молекул побутового газу на електрофізичні властивості поруватого кремнію. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. № 1 (27). С. 246–255. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2024.27.246>

Kogdas, M. (2024), "Study of adsorption of household gas molecules on electrophysical properties of porous silicon", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (27), P. 246–255. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2024.27.246>