

УДК 621.382

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-26-05

Гребьонкін Є. О., Заворотний В. Ф.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МУЛЬТИСЕНСОРНІ ПЛАТФОРМИ НА ОСНОВІ МЕМС ДЛЯ АНАЛІЗУ ГАЗІВ

У роботі здійснено порівняльний аналіз різних мультисенсорних МЕМС платформ для аналізу газів. Для ефективного детектування газових сумішей та індивідуальних газів виявлено, що результати вимірювань, такі як чутливість, швидкість відповіді та селективність сенсорів, підтверджуються теоретичними та експериментальними дослідженнями. Одержані дані дозволяють зробити висновок, що використання мультисенсорних МЕМС платформ є перспективним для точного та швидкого аналізу газів, оскільки вони поєднують високу чутливість та можливість одночасного моніторингу кількох параметрів. У результаті аналізу виявлено, що для певних типів газів доцільно використовувати платформу з інтегрованими сенсорами для виявлення кількох параметрів газових сумішей, що забезпечує більш точні результати в порівнянні з використанням окремих сенсорів.

Ключові слова: МЕМС, мультисенсорні платформи, газові сенсори, теплові сенсори, фотоакустичні сенсори, електрохімічні сенсори, сепараційні колонки, прекоцентрації, автономні сенсори.

Постановка проблеми. Зростання потреб у моніторингу якості повітря, контролі промислових процесів, виявленні небезпечних газів та інших застосувань обумовлює стрімкий розвиток технологій газового аналізу. Газові сенсори є ключовим інструментом у цих сферах завдяки їх компактності, швидкій реакції та здатності до інтеграції в сучасні пристрої. Проте кожна з існуючих технологій газових сенсорів має свої вади, які обмежують їх ефективність і застосування в реальних умовах.

Однією з основних проблем є недостатня селективність сенсорів. Наприклад, електрохімічні сенсори демонструють високу чутливість до певних газів, але їхні характеристики часто змінюються під впливом вологості, температури чи інших домішок у газовій суміші [1, с. 317]. Акустичні сенсори, такі як кварцові мікроваги (QCM), є дуже чутливими до змін маси, але їх точність залежить від умов навколишнього середовища. Оптичні сенсори мають високу точність і селективність, але зазвичай потребують складних оптичних систем, що обмежує їх використання у компактних і недорогих пристроях [2, с. 61]. У той же час, теплові сенсори ефективно визначають термофізичні параметри газів, але вони можуть демонструвати меншу чутливість до низьких концентрацій певних газів [3, с. 28].

Ще однією значущою проблемою є стабільність роботи сенсорів при довготривалому використанні. Наприклад, хеморезистивні матеріали з часом деградує, що впливає на їх відтворюваність і точність. Інші сенсори можуть бути чутливими до фізичних пошкоджень або впливу агресивних середовищ.

Існує декілька способів подолання цих викликів. Один із них – конструктивне вдосконалення сенсорів, зокрема шляхом використання наноматеріалів [2, с. 63]. Інший підхід передбачає покращення обробки корисних сигналів, наприклад, із застосуванням технологій штучного інтелекту. Також, доволі перспективним напрямом є створення мультисенсорних платформ, які поєднують різні типи сенсорів на одній МЕМС-основі, що відкриває нові можливості для підвищення точності та універсальності вимірювань. Такий підхід дозволяє:

- Підвищити селективність шляхом об'єднання даних з різних типів сенсорів, що реагують на різні фізико-хімічні властивості газів. Наприклад, поєднання електрохімічних і теплових сенсорів дозволяє враховувати вплив температури і вологості на чутливість.

- Покращити точність і чутливість, оскільки дані з різних сенсорів можуть доповнювати один одного. Наприклад, акустичні сенсори можуть забезпечити високу чутливість до маси, а оптичні — високу селективність до конкретних газів.

- Підвищити надійність і стабільність завдяки використанню резервування даних. У разі деградації одного типу сенсора його функцію можуть частково компенсувати інші.

- Оптимізувати енергоспоживання і зменшити розмір системи завдяки інтеграції всіх елементів на одній платформі, що особливо важливо для портативних і автономних пристроїв.

Таким чином, мультисенсорні платформи на основі MEMC технологій є ефективним рішенням для нівелювання недоліків окремих типів сенсорів, що робить їх перспективними для широкого спектра застосувань у газовому аналізі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні дослідження в галузі мультисенсорних MEMC платформ для аналізу газів демонструють суттєвий прогрес у підвищенні чутливості, селективності та стабільності роботи газових сенсорів. Аналіз сучасних наукових публікацій свідчить, що дуже перспективним підходом є поєднання різних типів сенсорів на єдиній платформі для покращення якості вимірювань.

Дослідження, присвячені мультисенсорним платформам, можна поділити на три основні групи. Перша група включає платформи, що поєднують різні типи газових сенсорів, наприклад теплопровідні, оптичні та електрохімічні [4, с. 1159; 6, с. 432]. Такі системи забезпечують розширений функціонал та покращену селективність завдяки комбінованому аналізу сигналів з різних джерел. Друга група досліджень фокусується на платформах із однотипними сенсорами, але з використанням різних матеріалів або вимірювальних режимів, що дозволяє досягти високої точності аналізу певних газів [8, с. 1; 9, с. 187; 10, с. 1203; 11, с. 4р]. Третя група охоплює мультисенсорні платформи, що інтегрують газові сенсори з іншими приладами, такими як датчики температури, вологості або потоку газу, або преконцентратори та сепараційні колонки, що значно розширює можливості системи [12, с. 410; 14, с. 145].

Значна увага приділяється також методам обробки сигналів, зокрема застосуванню алгоритмів машинного навчання для підвищення точності ідентифікації газів та компенсації перехресної чутливості. Крім того, сучасні дослідження активно зосереджені на мініатюризації сенсорних елементів і зниженні енергоспоживання, що відкриває перспективи для впровадження автономних газоаналізаторів у портативних та бездротових системах моніторингу.

Мета роботи. Метою статті є проведення аналізу сучасних досліджень і оцінка перспектив використання мультисенсорних платформ на основі MEMC для газового аналізу, а також виявлення ключових напрямів для подальшого вдосконалення таких систем шляхом комбінування сенсорів різних типів.

Викладення основного матеріалу. Класифікація мультисенсорних MEMC платформ.

Аналіз сучасних досліджень і публікацій показав, що мультисенсорні MEMC платформи для аналізу газів можна умовно поділити на три групи залежно від їх конфігурації: платформи з газовими сенсорами різних типів, платформи з однотипними газовими сенсорами та платформи, де газові сенсори поєднуються із приладами іншого призначення.

Платформи з газовими сенсорами різних типів. Варіант конструкції платформи даного типу, де різні сенсори працюють на основі фізичної взаємодії з газом і виготовлені за технологією поверхневої мікрообробки на спільному кремнієвому кристалі представлено у [4, с. 1159]. В такому сенсорі, визначення вуглекислого газу (CO_2) та водню (H_2) здійснюється тепловим сенсором за принципом вимірювання теплопровідності, та зручно реалізується з використанням MEMC технологій [5, с. 233]. Інфрачервоні спектри поглинання CH_4 , CO , CO_2 та C_2H_6 , зображені на рисунку 1, добре розділені й можуть бути ідентифіковані за допомогою інфрачервоної спектроскопії у діапазоні довжин хвиль від 3.4 до 4.3 мкм. Для підвищення спектральної роздільної здатності як основний метод оптичного детектування у розглянутій платформі обрано масив недисперсійних інфрачервоних аналізаторів (NDIR), а також розглянуто можливість додаткового розміщення фотоакустичного сенсору для підвищення селективності. Основними викликами у розробці є сумісність технології виготовлення з інтегральними схемами та коротка оптична траса в мікросистемі [4, с. 1158].

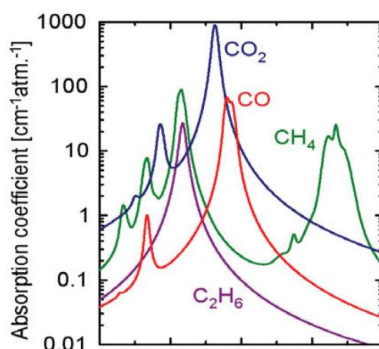


Рисунок 1 – Інфрачервоні спектри поглинання CH_4 , CO , CO_2 та C_2H_6 [4, с. 1159]

Підсумовуючи, в розглянутому варіанті конструкції використовуються три окремі типи газових сенсорів: Тепловий сенсор (базується на визначенні теплопровідності газу), недисперсійний інфрачервоний аналізатор (NDIR) та фотоакустичний сенсор

Запропонована мультисенсорна MEMS платформа зображена на рисунку 2. На схемі представлено двочипове рішення, що складається з основного сенсорного чипа (знизу) та оптичного фільтра (зверху).

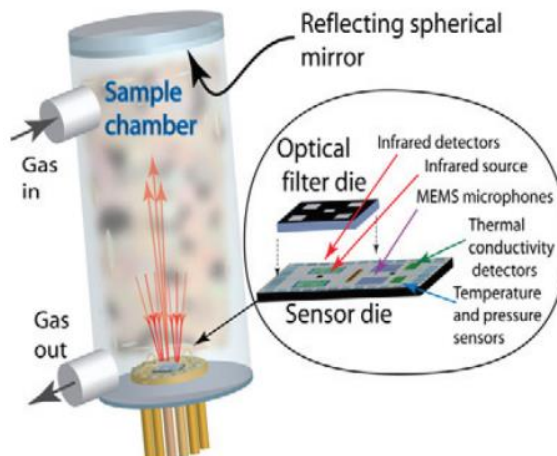


Рисунок 2 – Запропонована мультисенсорна платформа [4, с. 1159]

Конструктивно, розглянута платформа складається з таких компонентів:

- Детектор теплопровідності газу
- Теплові інфрачервоні джерела для NDIR та фотоакустичного методу
- Теплові інфрачервоні детектори для NDIR
- MEMC-мікрофони для фотоакустичної сенсорики
- Датчики температури (термопари) та тиску для компенсації впливу зовнішніх факторів

Запропонована комбінація сенсорів значно покращує селективність аналізу газових сумішей завдяки використанню кількох фізичних принципів одночасно. Поєднання методу вимірювання теплопровідності для визначення H_2 і CO_2 , інфрачервоного поглинання для CH_4 , CO і CO_2 , а також фотоакустичного аналізу дозволяє компенсувати недоліки кожного окремого підходу. Використання масиву термопар у недисперсійних інфрачервоних аналізаторах підвищує спектральну роздільну здатність, а додавання фотоакустичного сенсора допомагає покращити чутливість системи.

Така комбінація методів виявилася ефективною для багатокомпонентного аналізу газів, оскільки забезпечує високу вибірковість і знижує ризик перехресної чутливості. Однак реалізація цієї інтегрованої системи вимагає технологічно складного виробництва та оптимізації оптичного шляху в мікросистемах. Перші прототипи показали перспективність такого підходу, але подальші дослідження необхідні для покращення стабільності та точності вимірювань.

Інший відомий варіант конструкції платформи з газовими сенсорами різних типів представлено у [6, с. 432]. Він являє собою монолітно інтегровану мікросистему для виявлення органічних та неорганічних газів, яка поєднує три основні типи сенсорів: резонансні кантилевери, ємнісні сенсори та електрохімічні сенсор у вигляді пластин-мікронагрівачів. Резонансні кантилевери та ємнісні сенсори здебільшого чутливі до летких органічних сполук, коли як електрохімічні сенсори переважно використовуються для детектування неорганічних газів [6, с. 437]. Система виготовлена за допомогою 0.8- μm КМОН технології, що дозволяє інтегрувати сенсорні елементи разом із електронікою обробки сигналів та цифровим комунікаційним інтерфейсом (рис. 3).

Основу масочутливих вимірювань у цій мікросистемі складають кремнієві кантилевери, вкриті полімерними шарами. Поглинання газів змінює масу полімерного шару, що, своєю чергою, спричиняє зсув резонансної частоти кантилевера [7, с. 3084]. Вимірювання частоти здійснюється п'єзореzystивним датчиком, інтегрованим у структуру кантилевера.

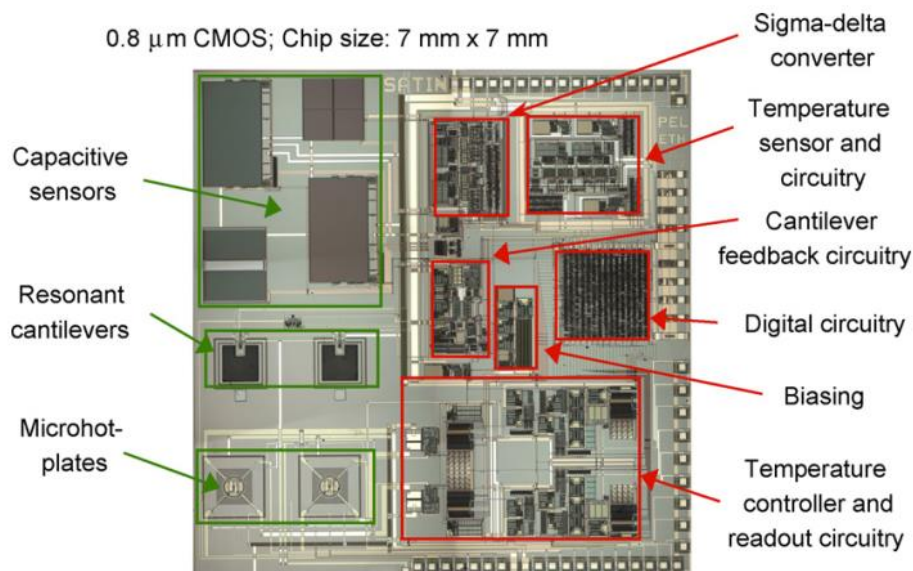


Рисунок 3 – Мікрофотографія запропонованої платформи [6, с. 432]

Альтернативно, ємнісні сенсори, що базуються на інтердигітальних електродах, використовуються для аналізу змін діелектричних властивостей полімерного шару при поглинанні аналіту. Даний підхід дозволяє отримати додаткову інформацію про склад газової суміші, оскільки різні леткі органічні сполуки демонструють характерні зміни ємності залежно від їхньої полярності та хімічної природи.

Для детектування неорганічних газів, зокрема оксиду вуглецю, використовується металооксидна чутлива плівка, нанесена на пластину-мікронагрівач. Чутливий шар складається з нанокристалічного SnO_2 , легованого 0.2% Pd, що підвищує його чутливість до CO. Температурний контроль здійснюється за допомогою терморезистора, виготовленого з полікристалічного кремнію та інтегрованого у нагрівальний елемент, що дозволяє підтримувати стабільну робочу температуру у межах 200–350°C [6, с. 434]. Опір металооксидного шару змінюється внаслідок окисно-відновних реакцій, що відбуваються на його поверхні при взаємодії з цільовими газами.

Покращена селективність сенсора досягається завдяки комбінації різних типів сенсорів та алгоритмів обробки даних. Використання ємнісних сенсорів, які є чутливими до змін вологості, дозволяє компенсувати перехресну чутливість електрохімічного сенсора до водяної пари. Окрім того, завдяки застосуванню полімерних покриттів різної товщини можна досягти додаткової селективності до летких органічних сполук, оскільки їхня дифузія у полімер залежить від молекулярної маси та коефіцієнта розподілу. Таким чином, розглянута мікросистема забезпечує точне визначення як органічних, так і неорганічних газів навіть у складних газових середовищах.

Платформи з однотипними газовими сенсорами. Варіант конструкції платформи, в якому мікросистема являє собою двофункціональний сенсор для вимірювання теплопровідності та інфрачервоного (ІЧ) поглинання газів, виготовлений за технологією КНІ КМОН МЕМС, представлено у [8, с. 1]. Основна концепція пристрою базується на використанні одного резистивного мікронагрівача як для теплового сенсорного елемента, так і для джерела інфрачервоного випромінювання. Сенсор виготовлено на комерційній фабриці за 1- μm технологічним процесом, а його розміри не перевищують 1×1 мм², що робить його перспективним для застосування у портативних пристроях. Конструкцію сенсора зображено на рисунку 4.

Конструктивно сенсор базується на пластині КНІ з вольфрамовим мікронагрівачем. Вольфрамовий елемент інтегрований у металізаційний шар КМОН, що забезпечує повторюваність процесу та високу стабільність характеристик. Нагрівач розташований між шарами діоксиду кремнію та покритий верхнім пасиваційним шаром. Тонка мембрана товщиною 5 мкм формується за допомогою глибокого реактивного іонного травлення на зворотній стороні пластини, що забезпечує високу термічну ізоляцію нагрівального елемента [8, с. 1, 2]. Базовий принцип роботи сенсора ґрунтується на вимірюванні зміни електричного опору мікронагрівача, що залежить від теплопровідності навколишнього газового середовища, та розглянуто у [2, с. 62]. Водночас, у випадку аналізу парникових газів, зокрема CO_2 , відбувається

додаткове поглинання інфрачервоного випромінювання, що вносить ще одну змінну до загального температурного балансу.

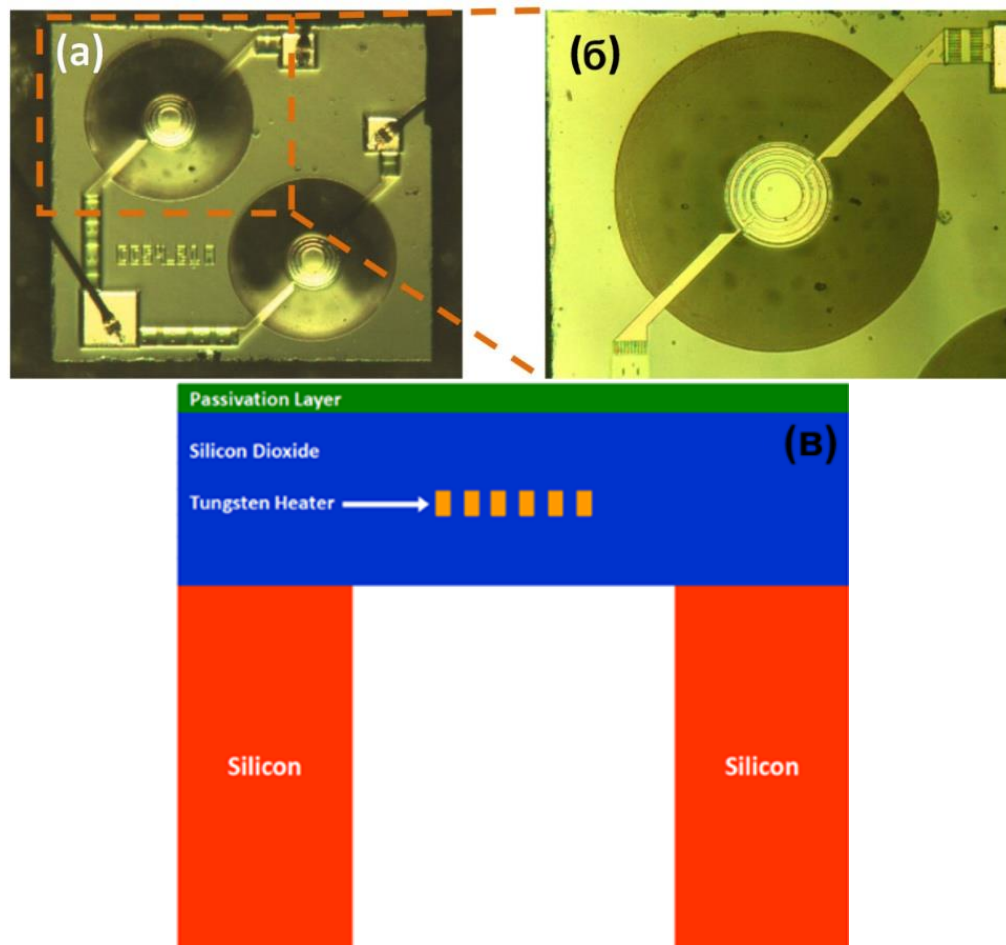


Рисунок 4 – Конструкція розглянутого сенсора:

(а) - оптична мікрофотографія повного чипа із двома сенсорами, (б) - збільшена фотографія одного сенсора з нагрівальним елементом на мембрані, (в) - схематичне зображення поперечного перерізу сенсора (не в масштабі) [8, с. 1, 3]

Однією з ключових особливостей сенсора є його здатність виконувати як вимірювання теплопровідності, так і детектування газів на основі ІЧ-поглинання за допомогою єдиного елемента. Це дозволяє розрізняти гази, які мають схожу теплопровідність, але відрізняються інфрачервоними характеристиками. Для повітря та аргону вольфрамовий нагрівач показує лінійну зміну опору відповідно до теплопровідності. Водночас, для CO_2 спостерігається перетин кривих потужності на рівні 10 мВт, що свідчить про домінування механізму ІЧ-поглинання, як зображено на рисунку 5.

Розглянутий підхід забезпечує підвищену селективність сенсора, оскільки поєднання двох методів дозволяє покращити диференціацію газів. Використання мікронагрівача як джерела ІЧ-випромінювання та сенсора одночасно значно знижує енергоспоживання пристрою, яке не перевищує 45 мВт при 700°C . Висока термічна ізоляція мембрани також забезпечує можливість інтеграції електроніки керування та обробки сигналів на тому ж чипі, що робить цей сенсор перспективним рішенням для портативних газоаналізаторів.

Інший варіант конструкції платформи з однотипними сенсорами, запропонований у [9, с. 187; 10, с. 1203], є детектором теплопровідності з компенсацією впливу потоку газу, який реалізований на основі подвійної MEMS-структури. Основною особливістю пристрою є використання двох тонкоплівкових сенсорів, розташованих на мембранах в одному чипі, що працюють диференційно. Завдяки різній глибині вимірювальних камер обидва сенсори демонструють різну реакцію на зміну теплопровідності газів, що дозволяє ефективно компенсувати вплив потоку та підвищити точність вимірювання.

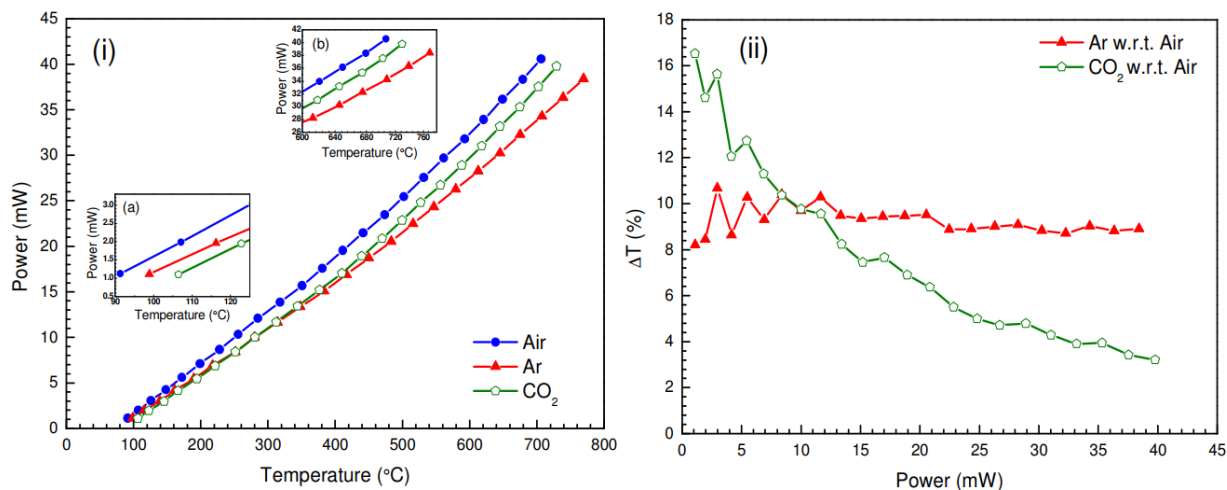


Рисунок 5 – Експериментальні результати вимірювань у повітрі, аргону та вуглекислого газу. (i) Крива залежності потужності від температури, де вставка (a) показує збільшену область нижчих температур, що відповідає чистому ефекту теплопровідності для всіх газів, а вставка (b) демонструє підсилений ефект тепловідведення на вищих температурах через додаткове поглинання в ІЧ-спектрі CO₂. (ii) Крива відсоткової зміни температури відносно повітря, що показує точку перетину для CO₂ [8, с. 3]

Сенсори виготовлені із застосуванням технологій поверхневого та об'ємного мікрOMEХАнічного оброблення. Основним матеріалом для нагрівального елемента є полікристалічний кремній, а самі сенсори інтегровані на тонких Si₃N₄ мембранах товщиною 0.6 мкм. Для мінімізації теплових втрат використані напівпровідникові термопари, що розташовані у визначених точках мембрани та вимірюють температурний градієнт між нагрівальним елементом і підкладкою [9, с. 187].

Запропонована платформа складається з двох однакових сенсорних елементів, виготовлених на одній підкладці (рис. 6). Кожен із них містить резистивний нагрівальний елемент і термопари, які вимірюють різницю температур між мембраною та підкладкою з обох боків нагрівача. Нагрівальний елемент і сенсор температури інтегровані в тонку мембрану, що формує герметичну газонаповнену камеру. Обмін газу між цією камерою та простором під мембраною можливий через мікроотвори або прорізи в мембрані (рис. 6).

Одна з камер є відносно неглибокою (2 мм), тоді як друга значно глибша — на всю товщину пластини (525 мкм) (рис. 6,б). Типові розміри сенсорної мембрани становлять 250 × 330 мкм² [10, с. 1203].

Принцип роботи сенсора ґрунтується на зміні ефективної теплопровідності між мембраною (чутливою зоною) та підкладкою. У сенсорі з неглибокою камерою основний внесок у теплопровідність дає тонкий шар газу під мембраною, що забезпечує високу чутливість сенсора до зміни теплопровідності газу, тоді як інший сенсор виконує функцію компенсуючого пристрою [9, с. 187].

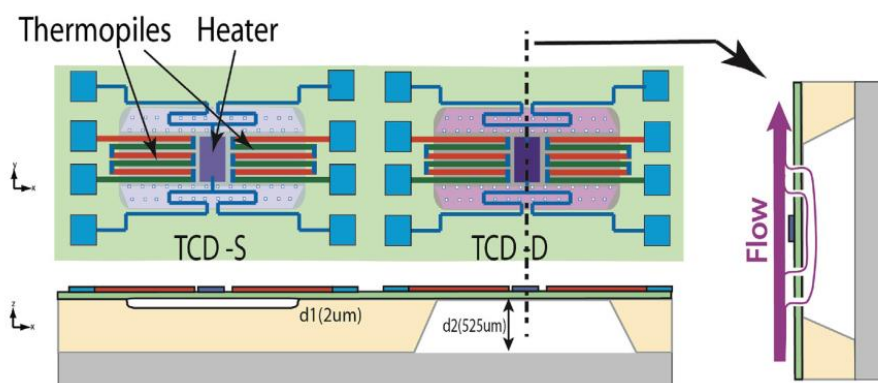


Рисунок 6 – Будова платформи з двома сенсорами теплопровідності. (a) Вид зверху на платформу. (б) Поперечний переріз пристрою [9, с. 188]

Сенсори здатні детектувати широкий спектр газів, включаючи водень, гелій та вуглекислий газ. Для досягнення високої селективності застосовується метод компенсації потоку шляхом диференційного вимірювання, що значно знижує похибку, пов'язану з варіаціями швидкості газового потоку. Випробування показали, що використання розглянутої MEMS-конфігурації дозволяє зменшити вплив потоку на результати вимірювань у 4-20 разів залежно від типу газу та умов експлуатації [9, с. 197]. Таким чином, розглянута платформа є перспективним рішенням для застосувань у газовому аналізі, де важливі як точність, так і швидкість вимірювань, а також визначення величини потоку газу, що протікає через середовище сенсора.

Інший варіант компонування декількох однотипних газових сенсорів з можливістю розміщення на одній платформі, представлено у [11, с. 4р], де розглянуто технологічні вдосконалення мультисенсорного пристрою на основі електрохімічних металооксидних сенсорів, що працюють із мікронагрівачем у вигляді пластини та використовується метод струменевого друку для нанесення хімічно-чутливих матеріалів.

Конструкція кожного сенсора базується на кремнієвій підкладці з термоізоляційною мембраною $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$, на яку нанесені платинові електроди: один виконує функцію нагрівача, інший використовується як сенсорний елемент. Для формування чутливого шару було застосовано метод струменевого друку, що дозволило рівномірно осадити наночастинки CuO , ZnO та SnO_2 відповідно на кожен окремий сенсор, які демонструють різну реакцію на гази [11, с. 4р]. Будову окремого сенсора зображено на рисунку 7.

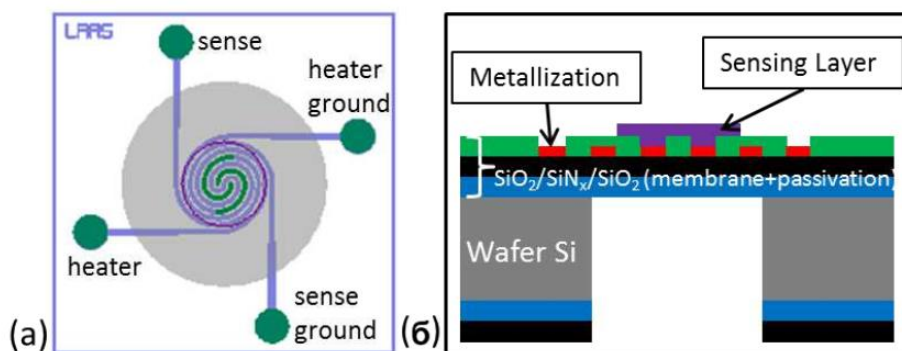


Рисунок 7 – Будова газового сенсора з мікронагрівачем у вигляді пластини: (а) вигляд чипа зверху, (б) поперечний переріз [11, с. 4р]

Сенсор здатен визначати чотири типи газів (CO , NO_2 , NH_3 , $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$) у низьких концентраціях (100 ppm, 0.2 ppm, 5 ppm і 2 ppm відповідно). Для підвищення селективності використано температурну модуляцію: робоча температура змінюється від 200°C до 500°C з відповідними змінами електричного струму через чутливий шар [11, с. 4р]. Це дозволяє отримати динамічні відгуки сенсорів, що аналізуються методом головних компонент (РСА), що суттєво покращує розрізнявальну здатність сенсора. При одночасному використанні трьох сенсорів з різними представленими хімічно-чутливими матеріалами, селективність платформи покращується. Результати аналізу головних компонент із перехресним порівнянням з трьох сенсорів зображено на рисунку 8.

Аналіз поведінки кожного з трьох сенсорів у присутності газів показав їхню значно різну залежність від температури та напруги. Хоча отримані результати дозволили класифікувати всі протестовані середовища за допомогою методу головних компонент, для подальшого вдосконалення системи розпізнавання доцільно розглянути використання керованих методів прийняття рішень, таких як дерево рішень або дискримінантний аналіз.

Платформи, де газові сенсори поєднуються із приладами іншого призначення. В дану категорію включені платформи, що поєднують газові сенсори з іншими типами приладів, такими як датчики температури та вологості або преконцентратори чи сепараційні колонки для підвищення точності та розширення функціональності аналізу газових сумішей. Така інтеграція дозволяє отримувати багатовимірні дані, покращуючи селективність та чутливість сенсорних систем. Варіант такої платформи розглянуто у [12, с. 410].

У статті представлено розробку мультисенсорної MEMS платформи для екологічного моніторингу, виготовленої за технологією CMOS-сумісного мікромеханічного оброблення. Основна мета дослідження – інтеграція декількох сенсорів на одному кремнієвому чипі з

можливістю бездротової передачі даних, що забезпечує високу чутливість, надійність і низьке енергоспоживання.

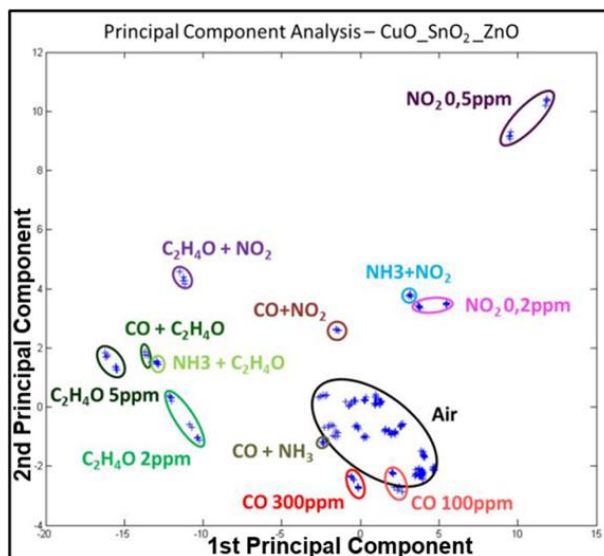


Рисунок 8 – Результати аналізу головних компонент із перехресним порівнянням даних із сенсорів з різним хімічно-чутливим матеріалом [11, с. 4р]

Конструкція мультисенсорного пристрою включає сенсори температури, відносної вологості, корозії, теплопровідності газу та швидкості потоку газу, розміщені на єдиній підкладці. Для виготовлення чипа застосовано методи поверхневого та об'ємного мікрOMEханічного оброблення, що дозволило інтегрувати всі сенсори в компактній формі. Основою структури є шар нітриду кремнію (600 нм), на якому сформовано нагрівальні резистори та чутливі елементи. Термопары з полікристалічного кремнію використовуються для вимірювання температури, а ємнісні сенсори визначають рівень вологості. Чутливий шар полііміду нанесено методом спін-коутінгу, що забезпечує стабільну роботу сенсорів вологості [12, с. 413].

Методики виготовлення передбачають багат шарове травлення для формування підвишених структур, зокрема теплового сенсора, який працює на основі підвишених алюмінієвих балок. Експериментально підтверджено, що сенсор здатен виявляти зміну теплопровідності газів, зокрема аргону, гелію та повітря, що робить його перспективним для аналізу газових сумішей.

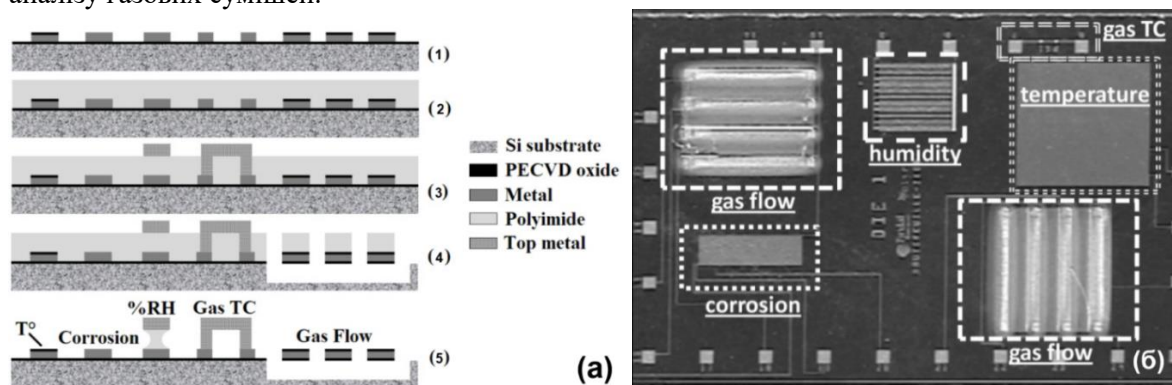


Рисунок 9 – Схема процесу виготовлення (а) та мікрофотографія мультисенсорної платформи (б) [12, с. 414]

Для компенсації перехресних впливів та покращення точності вимірювань застосовано алгоритми корекції перехресної чутливості, яка може спотворювати результати вимірювань. У дослідженні [13, с. 622] запропоновано методи компенсації небажаних впливів температури, вологості, тиску та газового потоку, що покращують точність сенсорних вимірювань, у [12, с. 414] ці алгоритми було покращено.

Температурна корекція. Через температурну залежність електричного опору всі резистивні сенсори піддаються впливу змін температури. Це компенсується використанням

температурного сенсора як еталону, що дозволяє коригувати температурні флуктуації в реальному часі або під час аналізу даних.

Вплив вологості. Було зафіксовано зміну опору навіть у пасивованих металевих треках через адсорбцію води. Встановлено, що ефект залежить від товщини оксиду SiO_2 під металом: тонкіші шари спричиняють більші зміни опору. Оптимізація товщини оксидного шару дозволила зменшити вплив вологи до менш ніж 2%.

Вплив тиску. Згідно з результатами дослідження [12, с. 425], тиск до 1 бар не має суттєвого впливу на роботу більшості сенсорів, за винятком теплового. Незначна зміна ємності сенсора вологості ($\approx 3.4\%$) пояснюється виведенням насиченого вологою повітря і є оборотною, тому впливом тиску можна знехтувати.

Вплив газового потоку. Було досліджено ефект повітряного потоку на сенсори в контрольованих умовах. Для більшості сенсорів його вплив виявився незначним, проте теплопровідний сенсор показав зниження опору через втрати тепла конвекцією. Це підтвердило необхідність корекції в реальних умовах експлуатації.

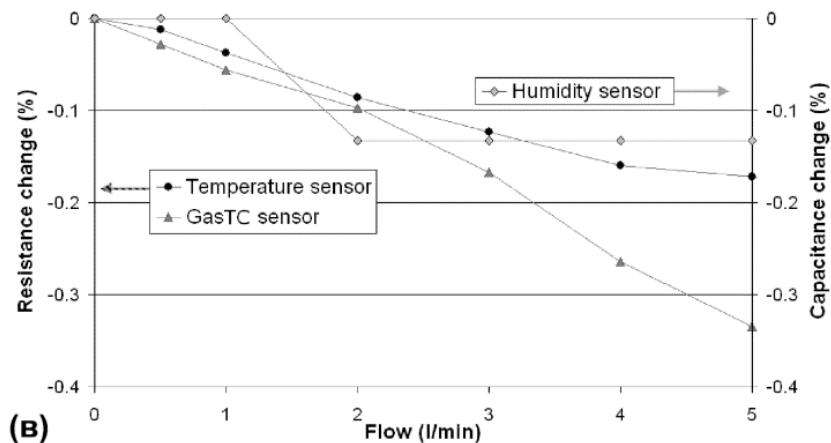
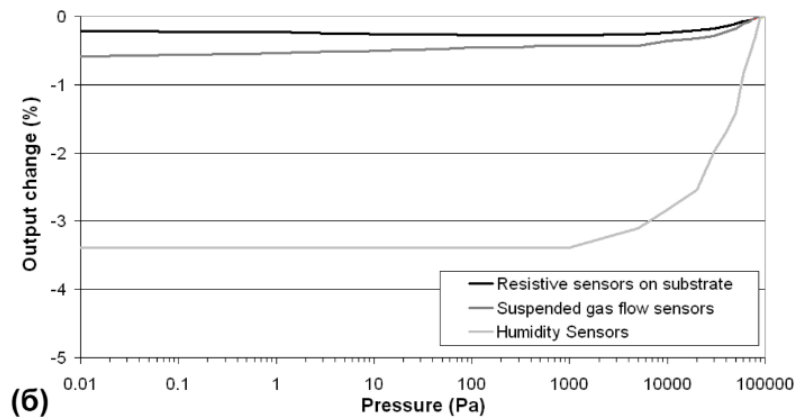
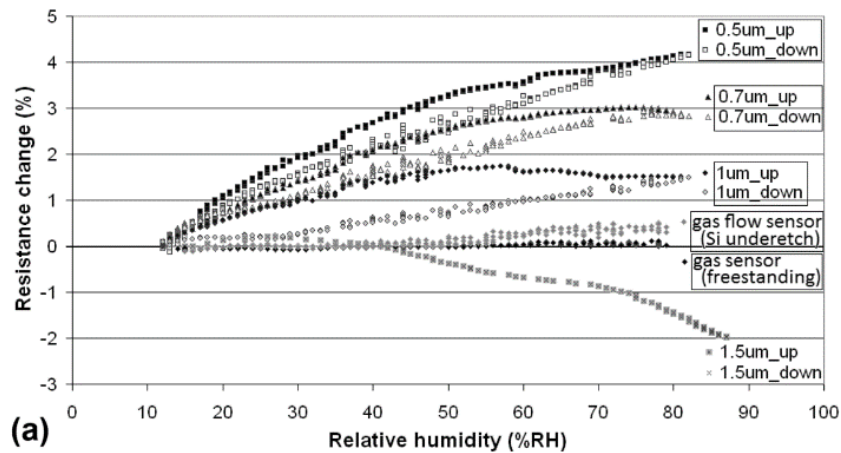


Рисунок 10 – Вплив вологості (а), тиску (б) та потоку газу (в) на характеристики сенсорів [12, с. 424]

Розглянута система інтегрована на бездротову модульну платформу Tyndall25, що дозволяє зчитувати дані в реальному часі та забезпечує запис результатів у внутрішню пам'ять. Вона підтримує протоколи передачі даних через ZigBee та Bluetooth, що дає змогу створювати масштабовані мережі для моніторингу навколишнього середовища [12, с. 426].

Оцінка енергоспоживання показала, що пристрій споживає 49 мВт при одночасній роботі всіх сенсорів, що робить його придатним для автономних екологічних моніторингових систем. Випробування продемонстрували стабільність роботи сенсорів при температурах від -20°C до 85°C , що підтверджує можливість їх застосування у різних кліматичних умовах.

Інший варіант платформи, що поєднують газові сенсори з іншими типами приладів, представлено у [14, с. 145], де розглянуто систему Zebra GC, що базується на інтеграції мікрофабрикованих компонентів, зокрема преконцентратора (μPC) [15, с. 131], мікросепараційної колонки (μSC) [16, с. 309] та вбудованого детектора теплопровідності (μTCD). Запропонований підхід забезпечує підвищену чутливість, зменшене енергоспоживання та високу портативність у порівнянні з традиційними методами газової хроматографії.

Конструкція сенсора передбачає поєднання преконцентратора, що акумулює аналіти шляхом адсорбції на матеріалі Tenax TA, із мікросепараційною колонкою, покритою полідиметилсилоксаном (PDMS), який слугує стаціонарною фазою для ефективного розділення компонентів. Нагрівання преконцентратора до 200°C забезпечує швидке десорбування та утворення вузького імпульсу введення, що покращує селективність аналізу [14, с. 147]. Оптимізована конструкція дозволяє здійснювати детектування на основі змін теплопровідності газу, які фіксуються інтегрованим тепловим сенсором, зображена на Рисунку 11.

Прекоцентратор - це кремнієво-скляний чип розміром $13\text{ мм} \times 13\text{ мм}$, який містить масив мікростовпчиків з великим співвідношенням сторін усередині квадратної порожнини розміром 1 см . Мікростовпчики формуються методом об'ємної мікрообробки 4-дюймової кремнієвої пластини з використанням глибокого реактивного іонного травлення для досягнення глибини 240 мкм . На задню сторону пластини наноситься 1-мкм шар оксиду, осадженого методом плазмохімічного осадження з парової фази (PECVD), який виконує роль ізолятора. Потім пластина розрізається на окремі чипи. Мікростовпчики покриваються тонким ($\sim 200\text{ нм}$) шаром адсорбенту Tenax TA, після чого вони закриваються боросилікатною скляною пластиною шляхом анодного з'єднання. На задній стороні чипа осаджується $40\text{ нм}/230\text{ нм}$ шар Cr/Ni , який слугує нагрівачем і датчиком температури, використовуючи електронно-променевий випарник. Номінальний опір нагрівача і датчика температури становить приблизно $15\text{ }\Omega$ і $250\text{ }\Omega$ відповідно. Нарешті, до впускного та випускного отворів приклеюються зрощені капілярні трубки. Для виготовлення теплового сенсора виконується двоетапне анізотропне травлення кремнію. Спочатку формується неглибока порожнина $2\text{--}3\text{ мкм}$, що запобігає контакту металевих з'єднань на боросилікатному склі зі стінками сепараційної колонки в кремнії після з'єднання. Далі у кремнієвій пластині формується довгий канал шириною 70 мкм і глибиною 240 мкм . Резистори виготовляються на скляній підкладці методом відриву з осадженого $40\text{ нм}/100\text{ нм}/25\text{ нм}$ шару $\text{Cr}/\text{Ni}/\text{Au}$ за допомогою електронно-променевого випарника. Скляна і кремнієва підкладки вирівнюються і з'єднуються разом. Нагрівачі та датчики температури виготовляються на задній стороні чипа за допомогою нержавіючої сталеві трафаретної маски. Після цього капілярні трубки приклеюються до впускних/випускних отворів. Нарешті, стінки колонкового каналу покриваються тонким ($\sim 250\text{ нм}$) шаром OV-1 [14, с. 147]. Також, важливим конструктивним рішенням стало використання інноваційної системи керування потоком, що мінімізує перешкоди від впорскування газу та забезпечує стабільний потік носія під час аналізу.

Після проведення тестування окремих чіпів, прекоцентратор було підключено до сепараційної колонки та теплового сенсору для перевірки гібридної інтеграції. Компактний дизайн дозволив зменшити довжину ліній передачі, що призвело до зниження утворення холодних зон, які можуть знижувати ефективність. З іншого боку, оптимальні витрати для прекоцентратора та сепараційної колонки виявилися різними, тому було необхідно знайти компроміс у виборі витратного потоку для інтегрованої системи. Для тестування, в середовище сенсора завантажили суміш із шести сполук. Як показано на рисунку 12, всі шість сполук були розділені та ідентифіковані менш ніж за 2 хвилини [14, с. 151].

Розглянута система характеризується низьким енергоспоживанням ($\sim 2,75\text{ Вт}$), що робить її придатною для польових досліджень. Використання прекоцентратора та мікросепараційної колонки для теплового сенсора має ряд переваг та недоліків. Серед основних переваг можна

виокремити збільшення чутливості, оскільки прекоцентратор дозволяє зібрати більше молекул газу перед їх подачею в сенсор, що підвищує чутливість навіть до низьких концентрацій газів.

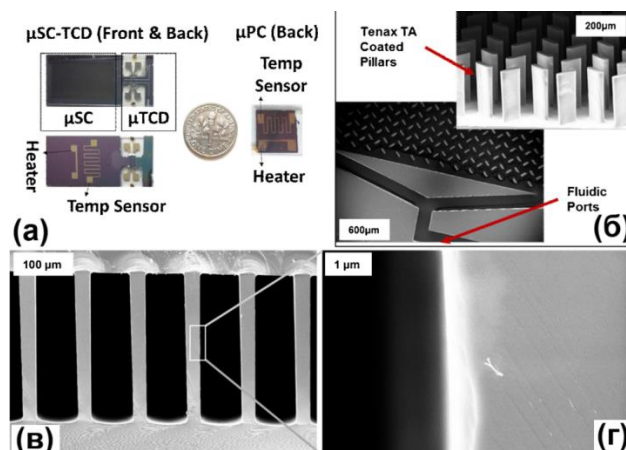


Рисунок 11 – Мікропристрої (а), зображення мікростійок в прекоцентраторі зроблене скануючим електронним мікроскопом (б), покриття з полідиметилсилоксану на внутрішній стінці каналу колонки (в, г) [14, с. 147]

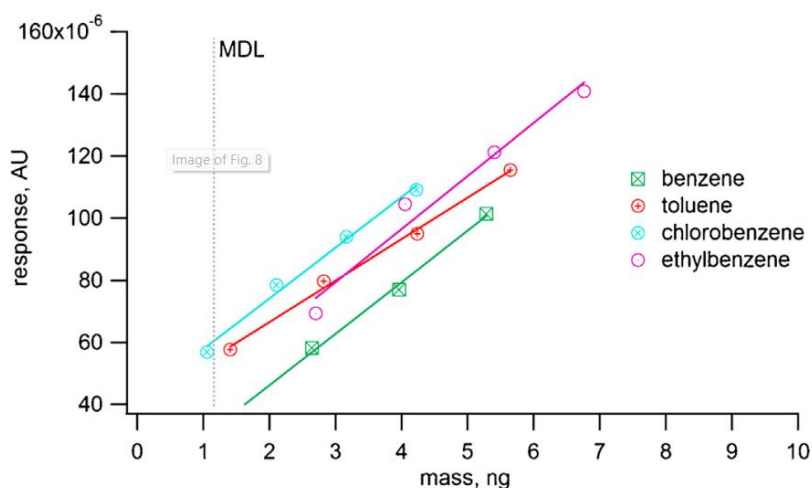


Рисунок 12 – Мінімальна межа виявлення для тестових сполук за допомогою теплового сенсора [14, с. 151]

Мікросепараційна колонка дозволяє розділяти компоненти газової суміші, що покращує селективність сенсора і дозволяє точніше визначати склад суміші. Крім того, використання прекоцентратора дозволяє зменшити вплив фонових газів на результати вимірювань, що робить аналіз більш точним. Така інтеграція також може скоротити час аналізу, оскільки колонка готує гази до подачі в сенсор, що зменшує час, необхідний для досягнення точних результатів.

Висновки. Проведене дослідження підтверджує, що використання мультисенсорних платформ на основі МЕМС є перспективним напрямом у газовому аналізі, який дозволяє покращити селективність, чутливість та стабільність вимірювань. У результаті аналізу різних конфігурацій мультисенсорних систем було визначено, що ефективність таких платформ значною мірою залежить від їхньої конструкції, типів інтегрованих сенсорів та методів обробки отриманих сигналів.

Розгляд платформ із сенсорами різних типів показав, що їхнє комбінування дає можливість отримувати більш точну інформацію про склад газової суміші. Наприклад, поєднання теплопровідних сенсорів із оптичними дозволяє зменшити вплив змін вологості та температури на результати вимірювань [4, с. 1160]. Використання одностипних сенсорів, зокрема електрохімічних, але з різними активними матеріалами або температурними режимами, дозволяє покращити селективність до певних газів [11, с. 4p].

Інтеграція додаткових сенсорів, таких як температурні, вологості або потоку газу, значно підвищує точність отриманих даних та забезпечує можливість корекції впливу зовнішніх

факторів [12, с. 423]. Такий підхід робить мультисенсорні платформи більш універсальними та придатними для застосування у різних сферах, включаючи екологічний моніторинг, промислову безпеку та контроль якості повітря.

Крім того, дослідження підтвердили важливість алгоритмів обробки даних у мультисенсорних системах. Використання методів машинного навчання дозволяє компенсувати перехресну чутливість та автоматично розпізнавати газові суміші з високою точністю. Це відкриває можливості для створення інтелектуальних систем газового аналізу, здатних адаптуватися до змін у навколишньому середовищі.

Значна увага приділяється також мініатюризації мультисенсорних платформ та зниженню їхнього енергоспоживання. Завдяки прогресу в МЕМС-технологіях стало можливим створення компактних і малопотужних сенсорних чипів, які можуть бути інтегровані у портативні пристрої або бездротові мережі моніторингу. Це особливо важливо для автономних екологічних систем та мобільних пристроїв контролю газового середовища.

Отже, мультисенсорні платформи на основі МЕМС є ефективним рішенням для газового аналізу, що поєднує високу точність, швидкість відповіді та широкий спектр можливостей для ідентифікації різних газів та їхніх сумішей. Подальший розвиток цієї технології має включати вдосконалення матеріалів чутливих елементів, оптимізацію алгоритмів обробки сигналів та розробку енергоефективних інтегрованих сенсорних рішень для широкого спектра застосувань.

Інформаційні джерела

1. Wang C., et al. Metal oxide gas sensors: sensitivity and influencing factors. *Sensors*. 2010. P. 2088-2106.
2. Гребьонкін Є., Заворотний В. Використання наноматеріалів в газових мемс сенсорах. Вчені записки таврійського національного університету імені в.і. вернадського Серія: Технічні науки. 2024. Том 34 (74). № 6. Частина 1. P. 59-68.
3. Gardner E. L., Gardner J. W., Udreă F. Micromachined thermal gas sensors—A review. *Sensors*. 2023. 681p.
4. De Graaf G., et al. Sensor platform for gas composition measurement. *Procedia Engineering*. 25. 2011. P. 1157-1160.
5. Kommandur S., et al. A microbridge heater for low power gas sensing based on the 3-Omega technique. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2015. P. 231-238.
6. Li Y., et al. Monolithic CMOS multi-transducer gas sensor microsystem for organic and inorganic analytes. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2007. P. 431-440.
7. Lange D., et al. Complementary metal oxide semiconductor cantilever arrays on a single chip: mass-sensitive detection of volatile organic compounds. *Analytical Chemistry*. 2002. P. 3084-3095.
8. Sarfraz S., et al. A dual mode SOI CMOS MEMS based thermal conductivity and IR absorption gas sensor. *SENSORS, 2013 IEEE*. 2013. P. 1-4.
9. De Graaf G., et al. Micro thermal conductivity detector with flow compensation using a dual MEMS device. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2016. P. 186-198.
10. De Graaf G., et al. Flow compensation in a MEMS dual-thermal conductivity detector for hydrogen sensing in natural gas. 2015 Transducers-2015 18th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS). 2015. P. 1203-1206.
11. Dufour N., et al. Technological improvements of a metal oxide gas multi-sensor based on a micro-hotplate structure and inkjet deposition for an automotive air quality sensor application. 25th Micromechanics and Microsystems Europe workshop (MME 2014). 2014. P. 4.
12. Hautefeuille M., et al. Development of a microelectromechanical system (MEMS)-based multisensor platform for environmental monitoring. *Micromachines*. 2011. P. 410-430.
13. Hautefeuille M., et al. Miniaturised multi-MEMS sensor development. *Microelectronics Reliability*. 2009. P. 621-626.
14. Garg A., et al. A mini gas chromatography system for trace-level determination of hazardous air pollutants. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2015. P. 145-154.
15. Tian W., et al. High sensitivity three-stage microfabricated preconcentrator-focuser for micro gas chromatography. *TRANSDUCERS'03. 12th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems. Digest of Technical Papers (Cat. No. 03TH8664)*. 2003. P. 131-134.
16. Ali S., et al. MEMS-based semi-packed gas chromatography columns. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2009. P. 309-315.

Hrebonkin Ye., Zavorotnyi V.

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

MULTISENSOR MEMS-BASED PLATFORMS FOR GAS ANALYSIS

The paper presents a comparative analysis of various multisensor MEMS-based platforms for gas analysis. For effective detection of gas mixtures and individual gases, it has been found that measurement results such as sensor sensitivity, response time, and selectivity are confirmed by theoretical and experimental studies. The obtained data suggest that the use of multisensor MEMS-based platforms is promising for accurate and rapid gas analysis, as they combine high sensitivity with the capability of simultaneous monitoring of multiple parameters. The analysis results indicate that for certain types of gases, it is advisable to use a platform with integrated sensors capable of detecting multiple parameters of gas mixtures, providing more accurate results compared to the use of individual sensors.

Keywords: MEMS, multisensor platforms, gas sensors, thermal sensors, photoacoustic sensors, electrochemical sensors, separation columns, preconcentrators, autonomous sensors.