

Методи підвищення чутливості оптоелектронних сенсорів

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

Статтю присвячено дослідженню методів підвищення чутливості оптоелектронних сенсорів в газоаналізаторах. Автором розглянуто методи, пов'язані з модифікацією камери з газовою сумішшю, через яку пропускається оптичний потік: метод збільшення роздільної здатності приладів, метод збільшення товщини поглинального газового шару, методи генерації та обробки аналітичного сигналу. Доведено, що серед описаних методів – метод збільшення роздільної здатності приладів і метод збільшення товщини поглинального газового шару мають недоліки, які унеможливають, або значно технічно ускладнюють їх реалізацію на практиці. В той же час метод генерації та обробки аналітичного сигналу є перспективною розробкою і може бути реалізований практично. В свою чергу, цей метод розглядається в двох варіаціях: диференціювання змінного аналітичного сигналу та метод розрахунку з урахуванням заважаючих перешкод. Перша варіація отримала назву - метод двох ліній. Друга варіація відома як двопроменевий метод. Така варіація методу генерації аналітичного сигналу використовується в автоматичних абсорбційних газоаналізаторах, що використовують електричну або оптичну компенсацію нульового сигналу. Окрему увагу приділено метаматеріалам, плазмонним ефектам і квантовим точкам як перспективним інструментам мініатюризації сенсорів із покращеними характеристиками. У статті систематизовано сучасні підходи до підвищення ефективності сенсорних систем, а також наведено порівняльний аналіз їх переваг та обмежень. Зазначено, що міждисциплінарний підхід до створення сенсорів нового покоління забезпечує більш високі показники точності, швидкодії та надійності. Перспективними напрямками подальших досліджень слід вважати розробку мультифункціональних сенсорних систем із динамічним переналаштуванням параметрів, дослідження взаємодії оптичного випромінювання з гібридними наноструктурами, а також впровадження штучного інтелекту для підвищення точності та автономності сенсорного аналізу. Таким чином, отримані результати формують наукове підґрунтя для подальшої розробки високотехнологічних сенсорних платформ із покращеними метрологічними характеристиками.

Ключові слова: газоаналізатор, оптоелектронний пристрій, чутливість, селективність, математична модель, схема багаторазового відбиття.

Вступ

Визначення складу та концентрації речовини є невід'ємною частиною багатьох технологічних процесів у промисловості та широко використовується в геології, біології, хімії, дослідженні космічних об'єктів, медицині, криміналістиці, сільському господарстві та інших галузях. У зв'язку з необхідністю більш ефективного використання інфрачервоних газоаналізаторів та розширенням областей їх застосування, зростають вимоги до підвищення чутливості та селективності. Вибір тієї чи іншої вимірювальної схеми для газоаналізаторів визначається в кожному конкретному випадку вимогами до приладу з точки зору його метрологічних, експлуатаційних та економічних характеристик.

Серед сенсорів важливе значення посідають сенсори газу, які мають широкий спектр застосування. Вони використовуються для контролю навколишнього середовища, в технологічних лініях, які можна характеризувати широким діапазоном зміни концентрацій шуканого компонента в атмосфері, для

визначення та вимірювання різних компонентів газової суміші, для встановлення присутності в системі газу визначеного виду, для перевищення допустимих концентрацій газу у повітрі виробничих приміщень, в сигнальних пристроях для індикації вибухонебезпечних концентрацій газу у повітрі. За останні роки накопичено великий досвід розробки хімічних газоаналізаторів, що реалізують термохімічний та адсорбаційний метод вимірювання концентрацій шуканого компонента. Явище адсорбції широко використовується при створенні напівпровідникових сенсорів.

Джерела [1]–[4], зокрема, містять фундаментальні праці з оптоелектронних приладів і сенсорів, що окреслюють загальні принципи роботи та класифікацію пристроїв. Автори посилаються на класичні та сучасні підручники, що забезпечують теоретичне підґрунтя дослідження. Особливо цінними є праці, присвячені практичним аспектам підвищення чутливості. Зокрема, джерело [6] висвітлює інтеграцію нанотехнологій у сенсорні системи, тоді як у [9] і [11] розглянуто питання застосування поверхневого плазмонного резонансу — одного з найбільш перспективних методів посилення сигналу в оптоелектронних сенсорах. Також важливе значення мають праці, що аналізують інноваційні матеріали та компоненти: джерела [10], [13] містять результати досліджень новітніх метаматеріалів, які дозволяють формувати надчутливі структури із заданими спектральними властивостями. Праці [5] і [6] поглиблюють розуміння електронної інтеграції сенсорів із системами обробки сигналу, що актуально в умовах розвитку IoT і смарт-технологій.

1. Сучасні технології застосування оптоелектронних сенсорів в газоаналізаторах

Технологію газового зондування можна знайти на двох провідних комерційних платформах: електронних (лямбда-зонди) та оптичних (недисперсійні інфрачервоні (NDIR) датчики та оптроди). Лямбда-зонди виготовляються з електролітів або газочутливих плівок, які використовують іонну провідність електролітів або адсорбцію газів та зв'язування гідроксильних груп на матеріалах на основі оксидів металів (МО). Сучасні автомобільні лямбда-зонди, також відомі як «автомобільні кисневі датчики», використовують твердий електроліт на основі оксиду цирконію (YSZ), стабілізованого оксидом ітрію, у геометріях широкосмугових датчиків. Конструкція широкосмугового датчика була адаптована з ранньої конструкції вузькосмугового датчика YSZ, яка використовувала просту комірку Нернста. Конструкція широкосмугового датчика пропонує покращену лінійність датчика порівняно з вузькосмуговими конструкціями в широкому діапазоні значень співвідношення повітря та палива. Хоча фізична конструкція електролітичних лямбда-зондів змінилася в попередні роки, датчик не зазнав покращень з точки зору електролітичних матеріалів. [11]

Лямбда-зонди також базуються на газочутливих оксидних плівках замість електролітів, в яких використовуються МО-матеріали. МО-матеріали включають широкий спектр окислених перехідних металів. Ці МО зазнають електронних змін, коли гази або ЛОС хемосорбуються або зв'язуються з гідроксильними групами на поверхні матеріалу, тим самим збільшуючи або зменшуючи питомий опір МО. Взаємодія газу з матеріалом відбувається лише за високих температур, які називаються «температурами активації», необхідних для МО.

Високі температури активації є поширеними як для електролітичних, так і для датчиків газу МО. Доведення електролітичних датчиків та датчиків газу МО

до цих високих температур вимагає електронних нагрівальних елементів. Зниження температури активації лямбда-зонда може бути досягнуто за допомогою промоторних матеріалів та каталітичних металів. Деякі матеріальні платформи, такі як металоорганічні каркаси (MOF), також досліджуються як альтернативні матеріальні платформи та показали зниження температури активації порівняно з датчиками МО. Незважаючи на те, що проблему температури активації можна вирішити, сучасні лямбда-зонди все ще страждають від використання електронних нагрівальних елементів та електричних сигналів, що робить їх непридатними для використання в горючих або занурених середовищах. [13]

Однак оптичні газові датчики не залежать від електричних сигналів або нагрівачів, що робить їх придатними для використання у водних або горючих середовищах. Оптичні газові датчики використовують інфрачервоне (ІЧ) або видиме світло як функціональний механізм виявлення, що робить їх застосовними в широкому діапазоні середовищ. Різноманітність оптичних датчиків NDIR використовує джерела ІЧ-випромінювання, що падають на різні газоподібні аналіти, для вимірювання поглинання випромінюваних ІЧ-спектрів відносно еталонної камери. Аналіти, що вимірюються, знаходяться в газових комірках з великою довжиною оптичного шляху та оптичними фільтруючими елементами, що робить їх громіздкими та непридатними для мобільних застосувань та застосувань багатовидового зондування. [12]

У середній інфрачервоній області спектра знаходяться фундаментальні смуги поглинання багатьох промислових та природних газів, серед яких бутан, метан, пропан, двоокис вуглецю та монооксид вуглецю, оксиди азоту, сірка та інші [2]. Інтенсивність смуг поглинання в цій спектральній області значно вища, ніж інтенсивність смуг поглинання в інших областях спектра, крім того, відстань між сусідніми лініями максимальна.

У зв'язку з цим оптичні датчики, побудовані за принципом вимірювання частини випромінювання, що поглинається газом, що детектується, будуть більш чутливими та селективними порівняно з датчиками, що працюють в інших спектральних діапазонах.

2. Методи підвищення чутливості оптоелектронних сенсорів

Вирішення основних проблем аналізу, пов'язаних з підвищенням чутливості та селективності методу, досягається шляхом:

- збільшення роздільної здатності приладів;
- використання різних методів генерації та обробки аналітичного сигналу.
- збільшення товщини поглинального газового шару [1].

Розглянемо схему із кількаретровим відбиттям оптичного потоку випромінювання.

Схема (рис. 1) – відображає траєкторію кількаретрового відбиття потоку випромінювання.

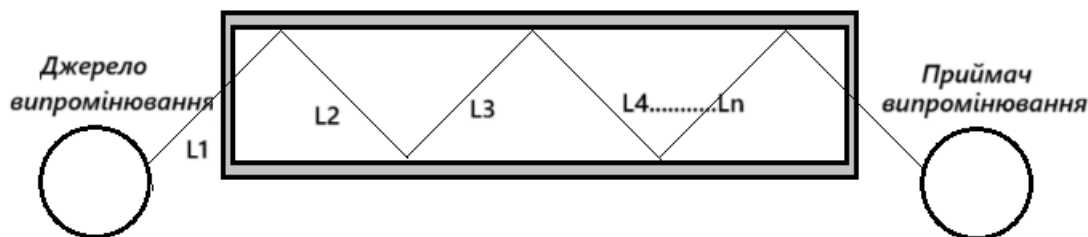


Рис. 1. Схема кількарізного відбиття потоку випромінювання

Прийmemo значення, оптичної довжини потоку

$$L_1 = L_2 = L_3 = L_4 = \dots = L_n \quad (1)$$

При цьому коефіцієнт відбиття:

$$Kv_1 = Kv_2 = Kv_3 = Kv_4 = \dots = Kv_n \quad (2)$$

При такій схемі оптичний потік випромінювання, проходить скрізь газову камеру, відбивається n разів, потрапляє на приймач випромінювання ПВ.

У відповідності до закону Ламберта-Бугера-Бера, потік відбитого випромінювання можна описати відповідною формулою. [6]

Перший потік випромінювання перед відбиттям визначається наступним чином:

$$Rh_n = KvRh_0 e^{-CLN} \quad (3)$$

Другий, третій і усі наступні потоки випромінювання визначаються аналогічно

$$Rh_n = KvRh_{n-1} e^{-CLN} \quad (4)$$

Підставимо значення параметрів у формулу, тоді

$$Rh_n = Kv^n Rh_0 e^{-nCLN} \quad (5)$$

$$Kv < 1$$

З отриманого виразу видно, що при багаторізовому відбитті оптичного потоку кількість використовуваних не є нескінченною, оскільки коефіцієнт відбиття не перевищує 1. Виходячи з цього, робимо висновок, що після кожного відбиття потік випромінювання згасає, тобто

$$Rh = Rh_0 \quad (6)$$

Відповідно, даний метод не забезпечує необхідне підвищення чутливості первинного випромінювання. Це пов'язано з тим, що через часткове поглинання випромінювання потоку, який потрапляє на приймач випромінювання ПВ може надійти потік, який слабкіше за пороговий.

Вищеописаний метод ґрунтується на прагненні абсолютно ізолювати аналітичну лінію від фіксованого спектру поглинання. Застосування цих методів в аналізі газових середовищ дає хороші результати. Тим не менш, на практиці такий прямий шлях підвищення чутливості оптоелектронного сенсора не є реалістичним, оскільки необхідно складне, коштовне і високотехнологічне обладнання.

Розглянемо проходження оптичного випромінювання через шар газової суміші (рис. 2).

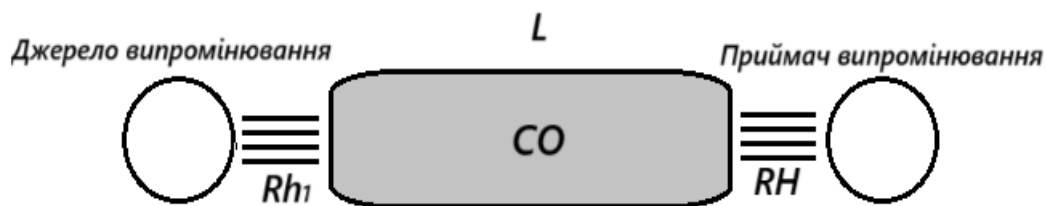


Рис. 2. Проходження оптичного випромінювання через шар газової суміші

Потік оптичного випромінювання, який випромінюється з джерела випромінювання ДВ, проходить скрізь газову камеру, внаслідок чого потрапляє до приймача випромінювання ПВ. Відповідно до закону Бугера-Ламберта-Бера, шари речовини однакової товщини, за інших рівних умов, завжди поглинають однакову частину падаючого на них оптичного випромінювання. [7]

$$Rh_n = Rh_1 e^{-CLN} \quad (7)$$

де Rh_1 – початковий потік випромінювання;

Rh – потоки випромінювання після проходження через шар речовини;

C – коефіцієнт поглинання;

L – довжина оптичного шляху;

N – концентрація цільового компонента.

Оптична густина – це величина, що обчислюється за формулою

$$D = \ln(Rh_1 / Rh) \quad (8)$$

$$D = e^{-CLN}$$

Внаслідок спрощення формули визначаємо концентрацію шуканого компонента

$$Con = \frac{1}{CL} \ln \left(\frac{Rh_1}{Rh} \right) \quad (9)$$

Очевидно, що рівень концентрації шуканого компонента залежить не тільки від коефіцієнта поглинання k , але й від довжини проходження оптичного шляху L .

Таким чином, при збільшенні довжини оптичного шляху L ми можемо досягти рівень необхідної чутливості первинного перетворювача. Тим не менш, реалізувати практично цей метод підвищення чутливості оптоелектронного сенсора є неможливим. Це обумовлено громіздкістю первинного перетворювача, оскільки зі збільшенням довжини оптичного шляху L , мають бути збільшені габаритні розміри первинного перетворювача.

У зв'язку з цим безпосереднє збільшення довжини оптичного шляху L для оптоелектронного пристрою не дасть шуканого результату. Робимо висновок, що для створення високочутливого доцільно спиратися на інші принципи, наприклад, із застосуванням багаторазового відбиття оптичного випромінювання.

Розглянемо метод, в основі якого лежать різноманітні методики генерації та обробки аналітичного сигналу.

Головна перевага цих методик полягає у зміні характеру сигналу та умов вимірювання, а саме, переході від реєстрації малих змін амплітуди відносно великого постійного сигналу до реєстрації або амплітуди сигналу на нульовому фоні, або амплітуди сигналу, що змінюється за періодичним законом. При застосуванні цих методів можна отримати більш високу чутливість оптоелектронного сенсора, тим самим підвищити точність вимірювання. [3]

Відомі методи обробки сигналів: диференціювання змінного аналітичного сигналу та метод розрахунку з урахуванням заважаючих перешкод.

Диференціальний метод генерації аналітичного сигналу розглядається в двох варіаціях.

Перша варіація отримала назву - метод двох ліній. Її суть полягає в тому, що поглинання вимірюється на двох частотах f_0 і f_1 шляхом послідовного або одночасного пропускання зондуючого випромінювання через поглинаюче газове середовище, $I(\lambda_0)$ збігається з максимумом $c(\lambda_0)$ поглинання смугою шуканого компонента, та $I(\lambda_1)$ збігається з мінімумом $c(\lambda_1)$ поглинання смугою шуканого компонента. Якщо є відомості про значення диференціального коефіцієнта поглинання

$$\Delta c = c(\lambda_0) - c(\lambda_1) \quad (10)$$

то вимірювання коефіцієнту інтенсивності дасть можливість розрахувати концентрацію поглинаючих частинок:

$$Con_x = \ln \frac{I(\lambda_1) - I(\lambda_2)}{\Delta c L} \quad (11)$$

де L – товщина шару поглинаючого газу.

Друга варіація відома як двопроменевий метод. Її суть полягає в тому, що зондуюче випромінювання з певною частотою, яка наближено збігається з максимумом поглинання шуканого компонента, пропускається через дві однакові кювети, одна з яких – робоча – заповнена аналізованою газовою сумішшю, а друга – еталонною (базовою) газовою сумішшю із відомим складом. Різниця між сигналами еталонного та робочого каналів є мірою концентрації шуканого компонента.

Така варіація методу генерації аналітичного сигналу використовується в автоматичних абсорбційних газоаналізаторах, що використовують електричну або оптичну компенсацію нульового сигналу [5].

Метод модуляції формування аналітичного сигналу полягає в досягненні синусоїдальної зміни інтенсивності випромінювання, що падає на приймач, за допомогою різних методів. Така модуляція може бути досягнута як за допомогою спеціальних пристроїв, розміщених перед приймачем випромінювання, так і шляхом зміни частоти зондуючого випромінювання або частоти поглинання детектованих атомів чи молекул. У першому випадку вимірюваний сигнал залежить лише від тієї частини зондуючого випромінювання, яка відповідає спектру поглинання визначуваного компонента газової суміші. Ця частина випромінювання випромінюється спеціальними пристроями, що пропускають випромінювання лише в певних частинах спектра, які відповідають структурі спектра поглинання детектованих атомів чи молекул.

Такі елементи, розміщені перед приймачем випромінювання, забезпечують модуляцію амплітуди реєстрованого сигналу. У поєднанні із синхронним детектуванням, тобто записом сигналу в момент, коли корелюючий елемент виділяє лише спектр поглинання визначеного компонента, методи кореляції дозволяють значно зменшити вплив на результати визначення будь-яких домішок, спектр поглинання яких має малу кореляцію за структурою з аналізованим.

В якості корелюючих елементів можна використовувати спеціальні пластини (маски) з чергуванням прозорих та непрозорих зон, що повторюють положення ліній поглинання в площині спектрального зображення на виході

спектрального приладу. Модуляція амплітуди сигналу в цьому випадку відбувається за рахунок коливань маски в площині зображення спектра поглинання. Недоліком цього методу модуляції сигналу є необхідність використання дисперсійного обладнання з хорошою роздільною здатністю та створення цілого набору масок для аналізу різних газів. [8]

Модуляцію амплітуди зонduючого випромінювання також можна здійснювати за допомогою спеціальних комірок, певна кількість газу яких визначається зміною тиску в них. На відміну від попередньої схеми, ця є більш універсальною, оскільки при зміні аналітичного завдання необхідно лише заповнити кювету відповідним газом. Однак його суттєвим недоліком є мала глибина модуляції амплітуди сигналу.

Очевидно, більш перспективним є використання скануючого інтерферометра Фабрі-Перо як корелюючого елемента, константу якого можна вибрати відповідно до структури смуги поглинання визначуваного компонента газової суміші. Довжина хвилі максимального пропускання інтерферометра сканується зміною положення одного з дзеркал, а перехід до визначення нового компонента здійснюється зміною бази інтерферометра.

Інший принцип властивий методам, заснованим на використанні явищ зсуву частоти поглинання молекулами або частоти випромінювання джерел при їх розміщенні в магнітному (ефект Зеемана) або електричному (ефект Штарка) полях. У першому випадку використовується явище розщеплення енергетичних рівнів поглинаючих або випромінюючих атомів чи молекул у зовнішньому магнітному полі на три (нормальний ефект Зеемана) або більше (аномальний ефект Зеемана) складових. Якщо джерело випромінювання або поглинальна комірка розміщені в змінному магнітному полі, то спостерігається відповідне сканування частоти зонduючого випромінювання відносно лінії поглинання або сканування частоти лінії поглинання відносно частоти зонduючого випромінювання. У цих випадках сигнал приймача має амплітудну модуляцію з частотою зміни напруженості магнітного поля. Як правило, джерело випромінювання, або рідше поглинальна кювета, розміщується в змінному магнітному полі. [7]

Розщеплення ліній поглинання в електричному полі (ефект Штарка) використовується для визначення полярних молекул, наприклад, аміаку або діоксиду сірки. У цьому випадку абсорбційну кювету з аналізованим газом поміщають у змінне електричне поле. [11]

Аналізований газ поміщають у змінне електричне поле. Зупинимося на спеціальних методах обробки зареєстрованого сигналу. Диференціальний метод обробки аналітичного сигналу - метод похідних - базується на вимірюванні першої або другої похідної сигналу приймача, що змінюється за гармонічним законом. Цей метод обробки аналітичного сигналу дозволяє ідентифікувати слабкі лінії поглинання на сильному фоні та тим самим покращити аналітичні характеристики методу за рахунок збільшення співвідношення корисного сигналу до шуму.

Інтегральний метод аналітичної обробки сигналів з урахуванням інтерференційних перешкод базується на вивченні характеру та інтенсивності спектрів поглинання аналізованих газів у певному діапазоні довжин хвиль та врахуванні їх взаємних перешкод. Цей метод обробки сигналів є дуже трудомістким і практично неможливим без використання комп'ютера. Найпростіший метод при аналізі складних технологічних газів, де перекриття

враховувалися шляхом розв'язання системи рівнянь, що характеризують внесок у поглинання на трьох зареєстрованих довжинах хвиль від основних компонентів газової суміші. [9]

Розглянуті нами методи обробки зареєстрованого сигналу, поряд із прямим виявленням змін інтенсивності зонduючого випромінювання, що пройшло через поглинаюче газове середовище, широко використовуються в різних схемах абсорбційних газоаналізаторів.

Метод полягає в тому, що інформація про концентрацію досліджуваного газу отримується шляхом порівняння двох зареєстрованих оптичних випромінювань з різними довжинами хвиль. Довжина хвилі, одна з яких лежить у максимумі спектральної смуги поглинання, що аналізується, – вимірювальна довжина хвилі, а інша – у смугі непоглинання аналізованого газу – опорна довжина хвилі. У цьому випадку селективне поглинання аналізованим газом високе при вимірювальному потоці випромінювання, але відсутнє при опорному потоці. Шетленд назвав цей метод методом диференціального поглинання розсіяної енергії. У літературі також використовується термін «двоххвильовий метод диференціального поглинання» [10].

На основі двуххвильового методу потоки випромінювання Rh_{λ_1} та Rh_{λ_2} , що проходять через газову камеру відповідно до закону Бугера – Ламберта – Бера, визначаються за формулою:

$$Rh_{\lambda_1} = Rh_{0\lambda_1} e^{-C_1 Con_1 L} e^{-C_2 Con_2 L} \quad (12)$$

$$Rh_{\lambda_2} = Rh_{0\lambda_2} e^{-C_1 Con_1 L} \quad (13)$$

де Con_1 – концентрація газової суміші;

Con_2 – концентрація шуканого компонента;

C_1 – коефіцієнт розсіювання газової суміші на довжинах хвиль λ_2 ;

C_2 – коефіцієнт поглинання газу, що визначається, на довжинах хвиль λ_2 ;

L – довжина камери із газом;

$Rh_{0\lambda_1}$ та $Rh_{0\lambda_2}$ – початкові потоки.

В такому випадку зв'язок між двома потоками можна описати виразом:

$$\frac{Rh_{\lambda_1}}{Rh_{\lambda_2}} = \frac{Rh_{0\lambda_1} e^{-C_1 Con_1 L} e^{-C_2 Con_2 L}}{Rh_{0\lambda_1} e^{-C_1 Con_1 L}} \quad (14)$$

Якщо початкові потоки мають однакові значення, тоді:

$$\frac{Rh_{\lambda_1}}{Rh_{\lambda_2}} = e^{-C_2 Con_2 L} \quad (15)$$

Виходячи з цього, можемо визначити концентрацію шуканого компонента:

$$Con_2 = \left(\frac{1}{L C_2} \right) \ln \left(\frac{Rh_{\lambda_1}}{Rh_{\lambda_2}} \right) \quad (16)$$

Отримані вирази можна перетворити наступним чином:

$$\frac{U_{\lambda_1}}{U_{\lambda_2}} = e^{-C_2 Con_2 L} \quad (17)$$

Звідси концентрація шуканого компонента визначається як

$$Con_2 = \left(\frac{1}{Lc_2} \right) \ln \left(\frac{U_{\lambda_1}}{U_{\lambda_2}} \right) \quad (18)$$

Отже, чутливість двохвильових оптоелектронних газоаналізаторів на основі визначається наступним чином

$$S = \frac{d \left(\frac{U_{\lambda_1}}{U_{\lambda_2}} \right)}{dCon_2} = -(c_2 L) e^{-C_2 Con_2 L} \quad (19)$$

Чутливість оптоелектронних газоаналізаторів експоненціально зменшується зі збільшенням визначеної концентрації Con_2 .

3. Висновок

В статті досліджено методи підвищення чутливості оптоелектронних сенсорів в газоаналізаторах. Вирішення основних проблем аналізу, пов'язаних з підвищенням чутливості та селективності методу, досягається методами збільшення роздільної здатності приладів, використання різних методів генерації та обробки аналітичного сигналу, збільшення товщини поглинального газового шару.

Метод збільшення товщини поглинального газового шару ґрунтується на прагненні абсолютно ізолювати аналітичну лінію від фіксованого спектру поглинання. Застосування цих методів в аналізі газових середовищ дає хороші результати. Тим не менш, на практиці такий прямий шлях підвищення чутливості оптоелектронного сенсора не є реалістичним, оскільки необхідно складне, коштовне і високотехнологічне обладнання. Відповідно, даний метод не забезпечує необхідне підвищення чутливості первинного випромінювання. Це пов'язано з тим, що через часткове поглинання випромінювання потоку, який потрапляє на приймач випромінювання ПВ може надійти потік, який слабкіше за пороговий.

Реалізувати практично метод збільшення роздільної здатності є неможливим. Це обумовлено громіздкістю первинного перетворювача, оскільки зі збільшенням довжини оптичного шляху, мають бути збільшені габаритні розміри первинного перетворювача.

У зв'язку з цим безпосереднє збільшення довжини оптичного шляху L для оптоелектронного пристрою не дасть шуканого результату. Робимо висновок, що для створення високочутливого доцільно спиратися на інші принципи, наприклад, із застосуванням багаторазового відбиття оптичного випромінювання.

Головна перевага методів генерації та обробки аналітичного сигналу полягає у зміні характеру сигналу та умов вимірювання, а саме, переході від реєстрації малих змін амплітуди відносно великого постійного сигналу до реєстрації або амплітуди сигналу на нульовому фоні, або амплітуди сигналу, що змінюється за періодичним законом. При застосуванні цих методів можна отримати більш високу чутливість оптоелектронного сенсора, тим самим підвищити точність вимірювання.

Інтегральний метод аналітичної обробки сигналів з урахуванням інтерференційних перешкод базується на вивченні характеру та інтенсивності спектрів поглинання аналізованих газів у певному діапазоні довжин хвиль та

врахуванні їх взаємних перешкод. Цей метод обробки сигналів є дуже трудомістким і практично неможливим без використання комп'ютера. Найпростіший метод при аналізі складних технологічних газів, де перекриття враховувалися шляхом розв'язання системи рівнянь, що характеризують внесок у поглинання на трьох зареєстрованих довжинах хвиль від основних компонентів газової суміші.

Розглянуті нами методи обробки зареєстрованого сигналу, поряд із прямим виявленням змін інтенсивності зонduючого випромінювання, що пройшло через поглинаюче газове середовище, широко використовуються в різних схемах абсорбційних газоаналізаторів.

Список літератури

1. Іщенко, В. А. Високочутливі засоби контролю малих концентрацій газів : монографія / В. А. Іщенко, В. Г. Петрук. – Вінниця : ВНТУ, 2020. – 138 с.
2. Пристай, Т. В. Чутливий елемент оптичного сенсора діоксиду сірки / Т. В. Пристай, З. М. Микитюк, А. В. Фечан // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2015. – № 29(1). – С. 150–154.
3. Федоров, О. С. Сучасні прилади хімічної розвідки підрозділів ДСНС України / О. С. Федоров, Є. Д. Слепужніков // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : тези доп. XXVII міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD2019, 15–17 травня 2019 р. – Харків : НТУ «ХПІ», 2019. – С. 146.
4. Кожем'яко, В. П. Оптоелектронна схемотехніка / В. П. Кожем'яко, С. В. Павлов, М. Г. Тарновський. – Вінниця : УНІВЕРСУМ, 2008. – 189 с.
5. Sodiqovna, R. O. Development Of A Photoelectric Device for Obtaining an Electrostatic Field Under the Influence of Light Currents / R. O. Sodiqovna, T. B. Abdivositovich // 2022 International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT). – 2022. – P. 1–3.
6. Ismailov M. Science and Innovation. – 2022. – Vol. 1, No. 7. – P. 744–749.
7. Rayimdjanova, O. E3S Web of Conferences. – 2023. – Vol. 452. – Article 01011.
8. Siddikov, I. CEUR Workshop Proceedings. – 2022. – Vol. 2899. – P. 64–70.
9. Akhmedov, T. Journal of Physics. Conference Series (Online). – 2021. – Vol. 1889, No. 2.
10. Mirza, M. Novel Top-Contact Monolayer Pentacene-Based Thin-Film Transistor for Ammonia Gas Detection / M. Mirza, J. Wang, D. Li, S. A. Arabi, C. Jiang // ACS Applied Materials & Interfaces. – 2024. – Vol. 6. – P. 5679–5684.
11. Li, L. High Performance Field-Effect Ammonia Sensors Based on a Structured Ultrathin Organic Semiconductor Film / L. Li, P. Gao, M. Baumgarten [та ін.] // Advanced Materials. – 2013. – Vol. 25. – P. 3419–3425.
12. Cavallari, M. R. Organic Thin-Film Transistors as Gas Sensors: A Review / M. R. Cavallari, L. M. Pastrana, C. D. Sosa [та ін.] // Materials. – 2021. – Vol. 14, No. 3.
13. Sizov, A. S. Highly Sensitive Air-Stable Easily Processable Gas Sensors Based on Langmuir–Schaefer Monolayer Organic Field-Effect Transistors for Multiparametric H₂S and NH₃ Real-Time Detection / A. S. Sizov, A. A. Trul, O. V. Borshchev [та ін.] // ACS Applied Materials & Interfaces. – 2018. – Vol. 10. – P. 43831–43841.

References

1. Ishenko, V. A. Visokochutlivi zasobi kontrolyu malih koncentracij gaziv :

monografiya / V. A. Ishenko, V. G. Petruk. – Vinnicya : VNTU, 2020. – 138 s.

2. Pristaj, T. V. Chutlivij element optichnogo sensora dioksidu sirki / T. V. Pristaj, Z. M. Mikityuk, A. V. Fechan // Optiko-elektronni informacijno-energetichni tehnologiyi. – 2015. – № 29(1). – S. 150–154.

3. Fedorov, O. S. Suchasni priladi himichnoyi rozvidki pidrozdiliv DSNS Ukrayini / O. S. Fedorov, Ye. D. Slepuzhnikov // Informacijni tehnologiyi: nauka, tehnika, tehnologiya, osvita, zdorov'ya : tezi dop. HHVII mizhnar. nauk.-prakt. konf. MicroCAD2019, 15–17 travnya 2019 r. – Harkiv : NTU «HPI», 2019. – S. 146.

4. Kozhem'yako, V. P. Optoelektronna shemotehnika / V. P. Kozhem'yako, S. V. Pavlov, M. G. Tarnovskij. – Vinnicya : UNIVERSUM, 2008. – 189 s.

5. Sodiqovna, R. O. Development Of A Photoelectric Device for Obtaining an Electrostatic Field Under the Influence of Light Currents / R. O. Sodiqovna, T. B. Abdivositovich // 2022 International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT). – 2022. – P. 1–3.

6. Ismailov M. Science and Innovation. – 2022. – Vol. 1, No. 7. – P. 744–749.

7. Rayimdjanova, O. E3S Web of Conferences. – 2023. – Vol. 452. – Article 01011.

8. Siddikov, I. CEUR Workshop Proceedings. – 2022. – Vol. 2899. – P. 64–70.

9. Akhmedov, T. Journal of Physics. Conference Series (Online). – 2021. – Vol. 1889, No. 2.

10. Mirza, M. Novel Top-Contact Monolayer Pentacene-Based Thin-Film Transistor for Ammonia Gas Detection / M. Mirza, J. Wang, D. Li, S. A. Arabi, C. Jiang // ACS Applied Materials & Interfaces. – 2024. – Vol. 6. – P. 5679–5684.

11. Li, L. High Performance Field-Effect Ammonia Sensors Based on a Structured Ultrathin Organic Semiconductor Film / L. Li, P. Gao, M. Baumgarten [ta in.] // Advanced Materials. – 2013. – Vol. 25. – P. 3419–3425.

12. Cavallari, M. R. Organic Thin-Film Transistors as Gas Sensors: A Review / M. R. Cavallari, L. M. Pastrana, C. D. Sosa [ta in.] // Materials. – 2021. – Vol. 14, No. 3.

13. Sizov, A. S. Highly Sensitive Air-Stable Easily Processable Gas Sensors Based on Langmuir–Schaefer Monolayer Organic Field-Effect Transistors for Multiparametric H_2S and NH_3 Real-Time Detection / A. S. Sizov, A. A. Trul, O. V. Borshchev [ta in.] // ACS Applied Materials & Interfaces. – 2018. – Vol. 10. – P. 43831–43841.

Надійшла до редакції 16.05.2025, розглянута на редколегії 16.05.2025

Methods to enhance the sensitivity of optoelectronic sensors

The article is devoted to the study of methods for increasing the sensitivity of optoelectronic sensors in gas analyzers. The author considers methods related to the modification of a chamber with a gas mixture through which an optical flow is passed: a method for increasing the resolution of devices, a method for increasing the thickness of the absorbing gas layer, methods for generating and processing an analytical signal. It is proved that among the described methods, the method for increasing the resolution of devices and the method for increasing the thickness of the absorbing gas layer have disadvantages that make it impossible or significantly technically difficult to implement them in practice. At the same time, the method for generating and processing an analytical signal is a promising development and can be implemented in practice. In turn, this method is considered in two variations: differentiation of a variable analytical signal and a calculation method taking into account interfering interference. The first

variation is called the two-line method. The second variation is known as the two-beam method. This variation of the analytical signal generation method is used in automatic absorption gas analyzers that use electrical or optical zero signal compensation. Special attention is paid to metamaterials, plasmonic effects, and quantum dots as promising tools for miniaturizing sensors with improved characteristics. The article systematizes modern approaches to increasing the efficiency of sensor systems, and also provides a comparative analysis of their advantages and limitations. It is noted that an interdisciplinary approach to creating new-generation sensors provides higher accuracy, speed, and reliability. Promising areas for further research should be the development of multifunctional sensor systems with dynamic parameter reconfiguration, research into the interaction of optical radiation with hybrid nanostructures, and the introduction of artificial intelligence to increase the accuracy and autonomy of sensor analysis. Thus, the results obtained form the scientific basis for the further development of high-tech sensor platforms with improved metrological characteristics.

Key words: gas analyzer, optoelectronic device, sensitivity, selectivity, mathematical model, multiple reflection scheme.

Відомості про авторів:

Охрімчук Олександр Борисович – студент-аспірат, НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського». Електронна пошта: o.okhrimchuk-me26@iit.kpi.ua, телефон: +380991527036, ORCID: 0000-0003-4024-8601.

Вербицький Володимир Григорович – д.т.н., професор, НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського». Електронна пошта: v.g.verbitskiy@gmail.com, телефон: +380685296267, ORCID: 0000-0001-5717-0797.

About the authors:

Okhrimchuk Oleksandr Borysovych – postgraduate student, NTUU “KPI”. e-mail: o.okhrimchuk-me26@iit.kpi.ua, phone: +380991527036, ORCID: 0000-0003-4024-8601.

Verbytskyi Volodymyr Hryhorovych – Doctor of Technical Sciences, Professor, NTUU “KPI”. E-mail: v.g.verbitskiy@gmail.com, phone: +380685296267, ORCID: 0000-0001-5717-0797.