

ПРИНЦИП РОБОТИ ФОТОАКУСТИЧНОГО ЕФЕКТУ ТА ПРИБЛАДІВ НА ЙОГО ОСНОВІ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У даній статті було розглянуто фотоакустичний ефект та використання його у сучасних витратомірах. Були описані основні типи та принципи роботи приладів заснованих на фотоакустичному ефекті та наведені основні формули для обрахунку вихідних даних приладів.

Ключові слова: фотоакустичний ефект, витратоміри, світло, спектроскопія

Abstract

In this article the photoacoustic effect and its use in modern flowmeters were considered. The main types and principles of operation of devices based on the photoacoustic effect were described and the basic formulas for calculating the initial data of the devices were given.

Keywords: photoacoustic effect, flowmeters, light, spectroscopy

Вступ

Фотоакустичний ефект був описаний ще в 19 столітті кількома вченими, тобто за деякий час до винаходу конденсаторного передавача або інших пристроїв, які мали б змогу записувати і кількісно визначати параметри звукової хвилі. Однак незабаром був визнаний потенціал перетворення світла в звук і використаний для виявлення газів. Зокрема, можливість вимірювання інтенсивності світла за допомогою газонаповненої герметично закритої комірки була досліджена в контексті підвищення селективності першого так званого недисперсійного інфрачервоного спектрометра (NDIR).[1] Датчики NDIR в той час і досі демонструють перехресну чутливість до великої кількості видів газу через широку спектральну характеристику твердотільних детекторів світла. Щоб подолати цей недолік, спочатку Шик у 1920-х роках, а потім Вейнгору, Люфт і Лерер усвідомили потенціал використання цільового газу як фільтруючого середовища, оскільки він має майже ідентичні спектральні характеристики. Це дозволило максимізувати інформативність сигналу світлового перетворювача.

Основи фотоакустики

Передумовою фотоакустики є поглинання світла частинками. З точки зору селективності в газовому зондуванні, це робить фотоакустику порівнянною з іншими методами, заснованими на поглинанні, особливо з так званою спектроскопією поглинання діодного лазера (TDLAS) і недисперсійною інфрачервоною абсорбційною спектроскопією (NDIR), залежно від джерела світла та використовуюваного налаштування. Сильні характеристики поглинання пов'язані з дипольними переходами між електронними, коливальними або обертальними станами, а також їх комбінаціями. Сила окремих переходів між двома станами молекули або атома підсумовується в параметрах, що залежать від температури T , тиску p і частоти ω , так званого перерізу поглинання $\sigma_p T(\nu)$ Форма лінії $\sigma_p T(\nu)$ залежить від тиску та температури, і для типових використовуваних інтенсивностей світла ефектами насичення однієї лінії поглинання можна не враховувати.

При поглинанні фотона можливі різні шляхи релаксації збудженої системи. Їх можна розділити на радіаційні та безрадіаційні процеси або їх комбінацію. Для сильного фотоакустичного сигналу процеси безвипромінювальної релаксації повинні домінувати над повторним випромінюванням фотонів. У тих випадках, коли невипромінювальні процеси відбуваються набагато швидше, ніж радіаційні, більша частина енергії фотонів перетворюється в коливальну та поступальну енергію. В ідеалі повна енергія фотона $E_p = h\nu$ перетворюється у внутрішню та поступальну енергію молекули. Ці системи, як правило, добре підходять для генерування сильних фотоакустичних сигналів,

оскільки це призведе до локального нагрівання, що призводить до підвищення температури та тиску. Тому фотоакустичну спектроскопію можна розглядати як доповнення до флуоресцентної спектроскопії.

Модулюючи інтенсивність світла, можна генерувати періодичні зміни тиску, які, у свою чергу, можна легко вловити за допомогою пристрою для виявлення звуку, такого як мікрофон або камертон. Це можна зробити за допомогою електронних засобів, оптико-акустичних компонентів або механічних подрібнювачів, щоб налаштувати частоту модуляції до резонансної частоти акустичних резонаторів. На рисунку 1 схематично зображено процеси, які беруть участь у генерації звукової хвилі. Тип модуляції може змінюватися, а тип джерела світла може обмежувати доступні частоти збудження звукових хвиль. Якщо покладатися на використання струму джерела світла для модуляції інтенсивності, то теплові джерела світла в даний час обмежені частотами порядку 30 Гц. З іншого боку, світлодіоди (світлодіоди) та діодні лазери можуть легко модулюватися інтенсивністю за допомогою струму їх руху. Теоретично можна досягти частоти до кількох МГц. При використанні одномодових лазерів використання модуляції довжини хвилі є додатковим варіантом для створення фотоакустичного сигналу. У будь-якому випадку, діапазон частоти модуляції інтенсивності ν_M обмежений фундаментальними міркуваннями: з одного боку, вона повинна бути швидше, ніж час молекулярної дифузії $1/\tau_{diff}$, обернений, тому що в іншому випадку хвиля тиску не може утворитися. З іншого боку, частота модуляції має бути повільнішою, ніж час молекулярної релаксації $1/\tau_R$, щоб система могла реагувати на зміни.

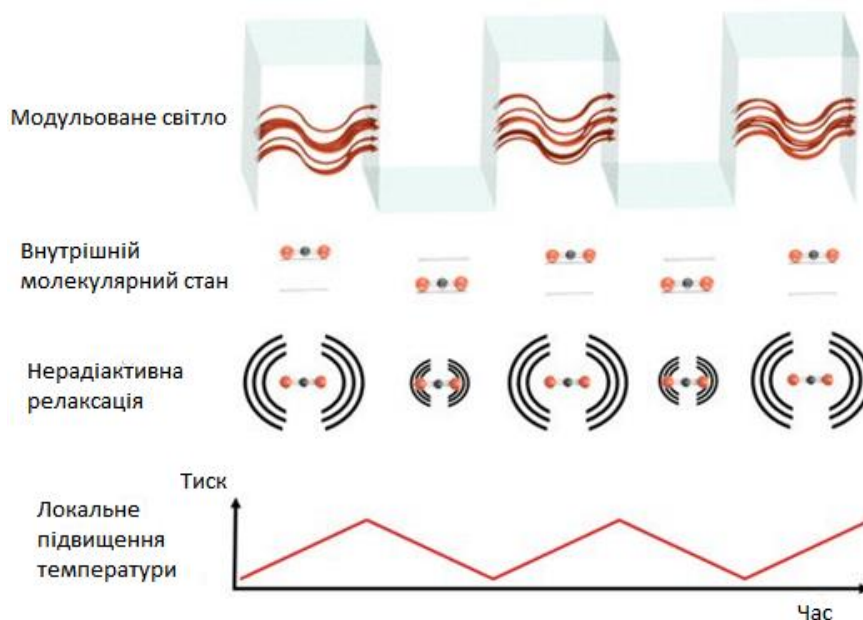


Рисунок 1. Спрощене схематичне зображення найбільш релевантних процесів для генерації фотоакустичного сигналу

Модуляція інтенсивності випромінювання збуджує внутрішні молекулярні стани. Внаслідок безвипромінювальних релаксаційних процесів частина енергії фотона перетворюється в тепло, що призводить до локального підвищення температури і тиску. Таким чином, періодична модуляція світла призводить до хвилі тиску, яка може бути виявлена за допомогою відповідних елементів перетворювача.

При цьому доцільно згадати два принципово різних підходи використання фотоакустичного ефекту для виміру зовнішніх або внутрішніх витрат, а саме пряму та непряму фотоакустику. [2]

Непряма фотоакустика, є рішенням тоді, коли пристрій для виявлення звуку не пов'язаний безпосередньо з аналітом, тобто газовою матрицею, що підлягає аналізу. На відміну від цього, у прямій фотоакустичній установці звук, який генерується аналітом, виявляється, коли він акустично пов'язаний із середовищем, яке підлягає аналізу. Потенціал з точки зору чутливості та мініатюризації двох підходів регулюється різними параметрами, які будуть наведені нижче.

Прямі та непрямі налаштування

На рисунку 2 схематично показано виявлення характерного газового сліду (вуглекислого газу — CO_2), основних компонентів повітря (азот — N_2 і кисню — O_2), а також сильна зміна вологості (вода — H_2O), що також може бути причиною перехресної чутливості. На ньому зображено два типи фотоакустичних установок, які розрізняються залежно від того, чи перебуває газова суміш, що підлягає аналізу, у безпосередньому контакті з пристроєм виявлення звуку чи ні.

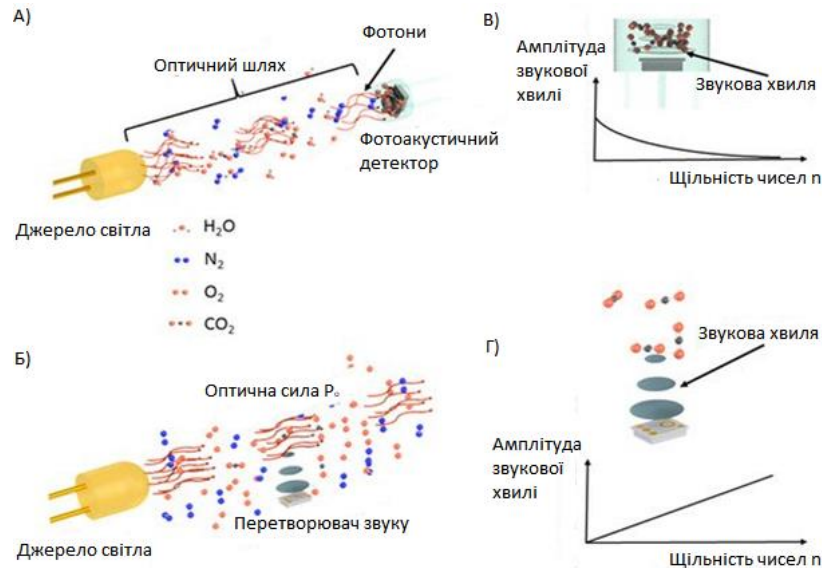


Рисунок 2. Схема для порівняння найбільш базових установок прямої (Б) та непрямой (А) фотоакустичної спектроскопії. Для визначення інтенсивності світла використовується фотоакустичний детектор. Чутливість регулюється за допомогою довжини оптичного шляху, а виявлений акустичний сигнал зменшується зі збільшенням щільності газу, який потрібно виявити (В), (Г). Чутливість можна регулювати за допомогою оптичної сили P_0 , що використовується для збудження молекул. Акустичний сигнал збільшується зі збільшенням щільності цільового газу (Г).

Хоча це може здатися незначною відмінністю, вона має важливі наслідки щодо способу роботи систем та їхнього відповідного потенціалу з точки зору мініатюризації, чутливості та довгострокової стабільності. З використанням обох типів налаштування було розроблено багато різноманітних і складних пристроїв. Однак притаманні відмінності через різні налаштування залишаються. Зважаючи на вимоги до заявки, важливо вибрати той чи інший спосіб.

Непряма фотоакустика (налаштування NDIR)

Перші комерційно доступні пристрої для виявлення газу на основі фотоакустики були засновані на установці типу NDIR з використанням двокамерної системи [3]. Також варто згадати установку яку розробили вчені Люфт і Лерер так званий Ultrarotabsorptionsschreiben (URAS). Принцип його роботи зображено на рисунку 3 і демонструє кілька добре продуманих функцій, включаючи вкорінений еталонний канал і нульовий сигнал за відсутності аналіту. Основна ідея установки полягає у використанні герметично закритої комірки, наповненої типом газу, який потрібно виявити, і оснащення пристроєм для виявлення звуку для вимірювання поглинання світла. Це означає, що установка є прототипом сучасної бездисперсійної спектроскопії поглинання (NDIR), де для визначення концентрації газу використовується ослаблення світла на оптичному шляху між джерелом світла і детектором світла. Для зондування слідів газу можна припустити, що закон Бера–Ламберта–Бугера (також закон Бера–Ламберта) є дійсним наближенням ослаблення світла: [4]

$$I(\nu, l) = I(\nu, 0) e^{-\sigma_p T(\nu) \cdot n \cdot l},$$

де $I(\nu, l)$ і $I(\nu, 0)$ – інтенсивність світла на частоті випромінювання ν після і перед оптичним шляхом l , відповідно, $\sigma_p T(\nu)$ – залежний від частоти перетин поглинання газу, а n – чисельна

щільність. Сама ідея NDIR спектроскопії полягає в тому, що для отримання інформації про концентрацію газу не потрібен дисперсійний оптичний елемент. Це, у свою чергу, означає, що детектор світла виконує інтеграцію всіх частот, які випромінює джерело світла, у межах функції відгуку, тобто його вихідний сигнал може бути записаний у вигляді:

$$A(n, \nu) \sim \int \infty 0 I(\nu, l) \cdot D(\nu) d\nu$$

де $D(\nu)$ – частотно-залежна чутливість детектора. Залежність від довжини оптичного шляху l це означає, що за цим параметром можна налаштувати чутливість і динамічний діапазон налаштування. Ефекти насичення можуть виникати, якщо занадто багато молекул поглинають світло до того, як досягнуть детектора, що обмежує динамічний діапазон. Таким чином, довжина оптичного шляху l є основним інструментом проектування для регулювання діапазону вимірювань і роздільної здатності пристроїв NDIR. Ступінь селективності цієї установки залежить від спектральних функцій як випромінювача світла, так і детектора, оскільки кінцевий сигнал є результатом спектральної згортки випромінювача та детектора. У найпростішій версії спектрально широкосмуговий або вузькосмуговий тепловий випромінювач можна комбінувати з широкосмуговим детектором, таким як термістор або фоторезистор, що створює велику кількість перехресної чутливості до інших газів. З цієї причини спектральні фільтри часто використовуються для обмеження відповідного спектрального діапазону для покриття відповідних смуг поглинання. Спектральні фільтри також можна використовувати для реалізації еталонного каналу, який може врахувати коливання оптичної потужності, що випромінюється джерелом світла, наприклад, типова установка для датчика NDIR буде використовувати два спектральні фільтри, перший з яких для смуг поглинання газу, що підлягають детектуванню, а другий — смуговий прохід, де не спостерігається поглинання жодної або лише кількох молекул.

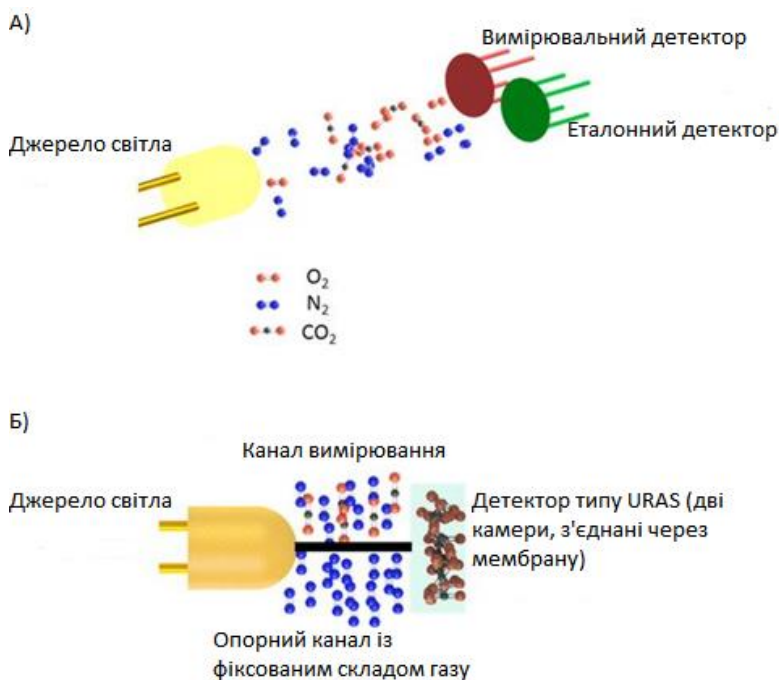


Рисунок 3. Порівняння між широко використовуваною на сьогоднішній день установкою NDIR (A) та установкою URAS (B). NDIR представлений двома детекторами з різними функціями спектральної характеристики які діють як вимірювальний і опорний канал відповідно. Детектор URAS складається з двох камер, заповнених газом, який потрібно виявити, і з'єднаних через мембрану. Оптичний тракт поділяється на еталонну частину з фіксованим газовим складом і вимірювальну частину, що містить аналіт.

В 1930-х роках Лафт і Лерер зрозуміли, що функція реакції детектора стандартних широкосмугових детекторів, таких як фоторезистори, вносить більшу кількість чутливості до інших видів газу, і відповідний спектральний фільтр не завжди може бути здійсненним. Це особливо актуально там, де багато молекул демонструють перекриваються спектральні характеристики,

наприклад, в $3 \text{ мкм}/3000 \text{ см}^{-1}$ спектральна область, де багато вуглеводнів демонструють сильні лінії поглинання через розтяжні вібрації. Тому вони прийшли до ідеї використовувати газ для виявлення як спектральний фільтр. Крім того, вони використовували фотоакустичний ефект як механізм перетворювача для перетворення світлової енергії в електричний сигнал. Щоб реалізувати опорний канал, два паралельних оптичних шляху однакової довжини освітлюються одним і тим же джерелом світла. Один шлях заповнений газовою сумішшю, що підлягає аналізу, тоді як другий шлях містить незмінну газову суміш, що містить фіксовану концентрацію аналіту. \

Розробка датчика типу URAS розширилася від датчиків окису вуглецю (CO) і включила багато інших малих молекул, включаючи метан (CH_4) і вуглекислий газ (CO_2). Крім того, з тих пір все більше компаній розробили власні рішення на основі подібних принципів. З появою технології мікросистем почалися спроби мініатюризувати установку URAS. З цією метою моделювання функції чутливості стандартного NDIR та фотоакустичного NDIR підкреслює потенціал мініатюризації, і експериментальні дані підтверджують це.

Чутливість збільшується приблизно на один порядок в порівнянні з пристроями NDIR, що використовують вузькосмугові інтерференційні фільтри залежно від спектральних властивостей газу. Причина в тому, що лише фотони на частотах, що збігаються з характеристиками поглинання цільового газу, додають до сигналу для фотоакустичного NDIR. Кілька версій мініатюризованого фотоакустичного NDIR було продемонстровано в останні роки з використанням теплових випромінювачів, світлодіодів (LED) і лазерів як джерел світла, а також мікрофонів мікроелектромеханічних систем (MEMS), кварцових камертонів (QTF) або кантилеверів, як звукові перетворювачі. Оскільки більшість мікрофонів мають постійну чутливість у широкому діапазоні частот, модуляцію інтенсивності джерела світла можна вибирати досить вільно, завжди беручи до уваги, що амплітуда фотоакустичного сигналу зменшується зі збільшенням частоти модуляції $1/\nu_{MOD}$.

Однак при використанні, наприклад, QTF, фотоакустичний сигнал повинен збігатися з резонансом системи. Хоча це обмежує можливі частоти модуляції, воно також впроваджує вбудований вузькосмуговий акустичний фільтр для запобігання навколишнім шумам. Однією з причин є те, що мікрофони QTF або MEMS часто використовуються як легкодоступні стандартні перетворювачі звуку для представлення систем підтвердження принципу. Крім того, реалізувати детектори типу URAS в технології мікросистем, а також в системній інженерії є більш складним завданням. Отже, залишається завданням створити конфігурацію, яка реалізує еталонний канал при використанні фотоакустичних детекторів для створення пристроїв NDIR. Однією з можливостей є створення системи з використанням одного джерела світла з двома однаковими детекторами на різних оптичних шляхах. Таким чином, ефективна довжина оптичного шляху зменшується, але довгострокові зміни джерела світла можуть бути скориговані. В якості альтернативи, два фотоакустичних детектора можуть бути послідовно вирівняні, причому один містить цільовий газ, а інший заповнений газом, який не демонструє жодних або лише частково перекриваються спектральні сигнатури. Поправку на флуктуації інтенсивності джерела світла можна отримати, якщо обидва спектри поглинання знаходяться в межах спектру випромінювання джерела світла, але тільки один реагує на газ, який потрібно виявити.

Прямі налаштування

Установка для прямої фотоакустики принципово відрізняється від NDIR, тобто непрямих установок, засобом підвищення чутливості та досягнення селективності. У той час як для непрямих фотоакустичних установок чутливість здебільшого визначається довжиною оптичного шляху l , прямі установки покладаються на збільшення оптичної потужності P_0 для збільшення створюваного акустичного сигналу. Це стає очевидним, якщо подивитися на генерацію сигналу S :

$$S = C \cdot n \cdot \sigma_p T(\nu) \cdot n_0$$

де C – специфічна для системи константа, n – щільність чисел, а $\sigma_p T(\nu)$ – переріз поглинання. На відміну від непрямих установок, селективність досягається за рахунок спектральних властивостей джерела світла, включаючи можливі спектральні фільтри. Вплив генерації сигналу на газову характеристику сенсорних систем поширюється на динамічний діапазон, оскільки в прямих

установках воно обмежене співвідношенням сигнал/шум, з одного боку, і динамічним діапазоном звукового перетворювача, з іншого боку. Останній може бути надзвичайно великим, оскільки, наприклад, мікрофони MEMS зазвичай мають динамічний діапазон 100 дБ, що еквівалентно 5 порядкам щільності газу. Попереднє рівняння показує, що збільшення оптичної потужності покращить продуктивність системи. Крім того, зменшення акустичного шуму або посилення генерованого звуку допоможе покращити співвідношення сигнал/шум. Тим більше, що лазерні джерела в середньому інфрачервоному діапазоні стали легкодоступними, в області лазерної фотоакустичної спектроскопії різко зросли внески. Тим не менш, перші лазерні фотоакустичні системи датчиків газу були продемонстровані понад 50 років тому, а про надчутливий пристрій було повідомлено ще в 1971 році, підкреслюючи потенціал комбінації лазера як джерело світла та фотоакустичний ефект для хімічного аналізу та екологічних досліджень. Залежно від вимог конкретного завдання вимірювання, світлодіоди або джерела теплого світла можуть виявитися більш ефективними, і насправді багато комерційно доступних рішень використовують прості прямі фотоакустичні установки. На рисунку 4 узагальнено основні установки, що використовуються для виконання прямої фотоакустичної спектроскопії. Слід зазначити, що комбінація акустичного резонатора і, наприклад, QTF, звичайно, можлива і вже була продемонстрована. Тим не менш, вибір того чи іншого підходу завжди буде залежати від системних вимог, як стає зрозумілим із порівняння налаштувань на основі мікрофона та налаштувань важеля.

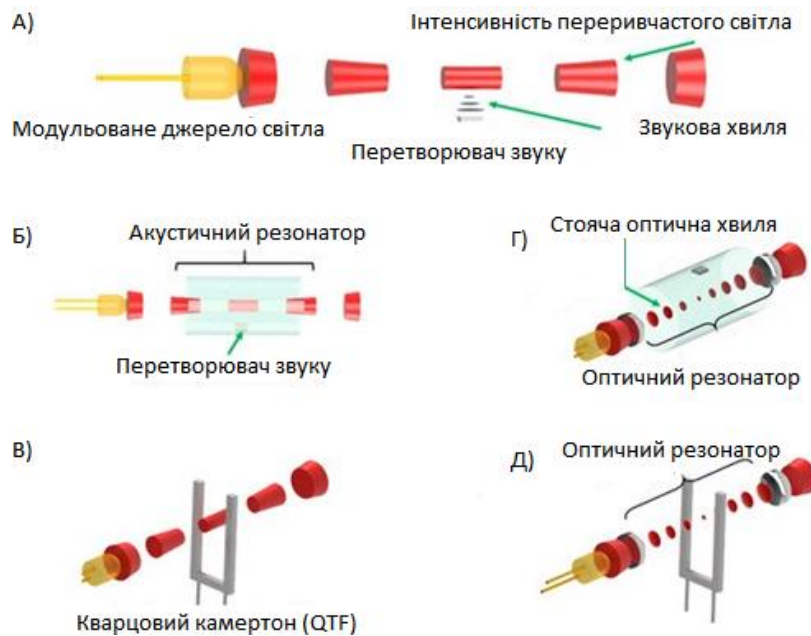


Рисунок 4. Схематичне зображення різних базових установок для фотоакустичної спектроскопії різного ступеня складності. А) Найпростіша установка популярна серед кількох комерційних виробників через її простоту: модульоване джерело світла генерує переривчастий світловий промінь, який, у свою чергу, генерує фотоакустичний сигнал. Амплітуда звукової хвилі вимірюється за допомогою звукового перетворювача, Б) акустичні резонатори використовуються для посилення генерованої акустичної хвилі, В) кварцовий камертон (QTF) може служити недорогим резонатором з вузькою смугою пропускання, Г), Д). Щоб збільшити доступну оптичну потужність, оптичний резонатор або багатопрхідні комірочки можуть служити для помноження фотоакустичного сигналу.

Для оптимізації фотоакустичного сигналу та забезпечення специфічного виявлення видів газу використання лазерних джерел відіграє ключову роль у більшості лабораторних установок. Висока спектральна щільність і якість променя дозволяють розробляти надчутливі пристрої, а використання стратегій покращення для збільшення акустичного сигналу дозволяє створювати високочутливі та специфічні аналізатори.

Описані вище технології активно використовуються до тепер у деяких типах витратомірів. Однією ж новітніх галузей фотоакустичної спектроскопії вважається фотоакустична спектроскопія з покращеним акустичним резонатором, інформація про яку наведена нижче.

Фотоакустична спектроскопія з покращеним акустичним резонатором

З самого початку прямої фотоакустичної спектроскопії використання акустичних резонаторів було центральним інженерним завданням і дає огляд основних концепцій. Акустичний резонатор може виконувати дві задачі, а саме ізоляцію від акустичного шуму навколишнього середовища та посилення фотоакустичного сигналу. Залежно від розміру системи застосовуються різні режими поширення акустичної хвилі та формування стоячих хвиль. У будь-якому випадку, найважливішим показником якості цього елемента є добротність, яка є часто використовуваною показником якості, що описує якість резонатора і пов'язаний з ним коефіцієнт посилення резонансної хвилі. Для акустичних резонаторів добротність може бути виражена як:

$$Q = U_0 \delta\nu,$$

де U_0 — резонансна частота, а $\delta\nu$ — напівмаксимальна ширина лінії резонансу на повну ширину. Отже, фотоакустична хвиля повинна відповідати одній з резонансних частот, щоб досягти посилення сигналу. Для створення надчутливих пристроїв були розроблені засоби погашення зовнішнього шуму та паразитних сигналів, наприклад, від вікон, витончені та розумні конструкції та способи роботи. Серед найбільш широко використовуваних підходів є використання так званих диференціальних фотоакустичних елементів. Установка використовує два однакових акустичних резонатора і порівнює сигнали мікрофона, розміщеного в кожному. Існує два різних методи використання цієї установки: більш поширений метод — збуджувати газ лише в одному з резонаторів, але мають один буферний об'єм і вікна для обох резонаторів. Таким чином, шум, виявлений обома мікрофонами, є однаковим і може використовуватися для отримання сигналу лише залежно від потужності світла та щільності чисел. В якості альтернативи, акустична хвиля може збуджуватися в обох резонаторах, але при різниці фаз π , тобто 180° , що збільшує сигнал приблизно в 2 рази. У будь-якому випадку, з цими налаштуваннями залишається проблема компенсації дрейфів світлової потужності чутливості мікрофона. Серед прикладів для підвищення довготривалої стабільності та забезпечення автоматизованої компенсації дрейфів є так звана схема збудження диференціального режиму [5]. Вона використовує виявлення різних режимів резонатора, які несуть різну інформацію щодо концентрації газу та шуму, що в кінцевому підсумку призводить до отримання суто залежного від газу сигналу за допомогою лише одного резонатора. Один резонатор також можна використовувати для виявлення різних газів, наприклад, шляхом мультиплексування лазерних джерел. Хоча багато зусиль спрямовані на підвищення чутливості, давня мета мініатюризації цих установок, щоб зробити їх портативними, також переслідується. З точки зору мініатюризації, 3-D-принтери та кремнієва технологія використовувалися для створення простіших і менших установок зі зниженою продуктивністю, але за набагато меншою вартістю та потребою меншої інфраструктури.

Оскільки потужність сигналу покращує продуктивність з точки зору нижньої межі виявлення та кращої роздільної здатності, використання або багатовідбиваючих осередків, або оптичних резонаторів почало викликати великий інтерес протягом багатьох років. З цією метою високоякісні резонатори можуть збільшити доступну оптичну потужність для генерації сигналу на кілька порядків. Однак важливо зазначити, що зміни в оптичному вирівнюванні якості дзеркала можуть призвести до помітних шансів у продуктивності, тому ці параметри потрібно точно контролювати. Зрештою, як видно з вище вказаних рівнянь будь-яка зміна оптичної сили призведе до зміни сигналу. Використання різних методів посилення також ускладнює налаштування, оскільки має бути виконано кілька умов резонансу одночасно, включаючи перехід поглинання (центральна частота генерації), оптичний резонатор (центральна частота генерації) та акустичний резонатор (частота модуляції). У будь-якому випадку, залишається фундаментальним питанням, що акустичні резонатори схильні до змін їх добротності та резонансної частоти внаслідок зміни параметрів навколишнього середовища, включаючи температуру, вологість та сама газова матриця, оскільки швидкість звуку залежить від усіх цих факторів. Це необхідно враховувати при характеристиці та розгортанні фотоакустичних систем із покращеним акустичним резонатором.

Висновок

У даній статті було розглянуто фотоакустичний ефект та використання його у сучасних витратомірах. Були описані основні типи та принципи роботи приладів заснованих на фотоакустичному ефекті та наведені основні формули для обрахунку вихідних даних приладів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. How does an NDIR CO2 Sensor Work? [Електронний ресурс] // CO2Meter. – 2022. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.co2meter.com/blogs/news/how-does-an-ndir-co2-sensor-work>.
2. J. Kopaczek. Direct and indirect optical transitions in bulk and atomically thin MoS2 studied by photoreflectance and photoacoustic spectroscopy / J. Kopaczek, S. J. Zelewski, M. P. Polak. // Journal of Applied Physics. – 2019. – №125.
3. Robert Lee. Complete Gas Sensor Circuit Using Nondispersive Infrared (NDIR) / Robert Lee, Walt Kester. // Analog Dialogue. – 2016. – №50.
4. Anne Marie Helmenstine. Beer's Law Definition and Equation [Електронний ресурс] / Anne Marie Helmenstine. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.thoughtco.com/beers-law-definition-and-equation-608172>.
5. Palzer S. Photoacoustic-Based Gas Sensing: A Review [Електронний ресурс] / Stefan Palzer. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/9/2745/htm>.

Ільчук Дмитро Русланович — аспірант кафедри радіотехніки, Вінницький національний технічний університет, Demabels@gmail.com

Осадчук Олександр Володимирович — докт. техн. наук, проф., зав. кафедри радіотехніки, Вінницький національний технічний університет, osadchuk.av69@gmail.com

Ільчук Дмитро Русланович - Postgraduate Student, Department of Radio Engineering, Vinnytsia National Technical University, Demabels@gmail.com

Osadchuk Olexander Volodimirovich - Dr. tech. Sciences, Prof., Head Department of Radio Engineering, Vinnytsia National Technical University, osadchuk.av69@gmail.com