

## ВИКОРИСТАННЯ ІНТЕРФЕРОМЕТРА ФАБРІ-ПЕРО ЯК СПЕКТРАЛЬНОЇ МАСКИ

Ю. Ю. Білак<sup>ORCID</sup>, В. Р. Козубовський, М. І. Роль<sup>ORCID</sup>

*ДВНЗ “Ужгородський національний університет”, пл. Народна, 3, Ужгород*

(Отримано 22 жовтня 2022 р.; в остаточному вигляді — 09 січня 2023 р.; прийнято до друку — 17 січня 2023 р.; опубліковано онлайн — 26 січня 2023 р.)

Прецизійний аналіз складних газових сумішей — актуальне завдання сьогодення, оскільки від його точності та якості залежить не тільки здоров'я людини, а й екологія населених пунктів чи планети загалом. Традиційні методи аналізу газового середовища недосконалі, а ті, що мають необхідну чутливість та селективність, не забезпечують отримання результатів аналізу в особливо короткі терміни.

Стаття присвячена класичним оптичним кореляційним методам аналізу газових сумішей, що мають квазіперіодичну структуру спектра. Розроблено модифікацію аналізатора та показано, що використання модифікованого інтерферометра Фабрі-Перо як кореляційної маски забезпечує експресну реалізацію селективності компонентів вимірювання. Усе це відкриває нові можливості для оптимізації інтерферометричних приладів та інтерферометричних методів газового аналізу.

**Ключові слова:** інтерференційні прилади, інтерферометр Фабрі-Перо, інтерференційно-поляризаційний фільтр, спектр, методи сканування спектра, аналізатор, кореляційна маска.

DOI: <https://doi.org/10.30970/jps.27.1402>

### I. ВСТУП

У наш час усе актуальніші дослідження проблеми аналізу складних газових сумішей. Традиційні методи газового аналізу, що мають значну селективність (до прикладу, газова хроматографія), не забезпечують необхідної терміновості отримання результатів. Тому стрімкого розвитку набули саме оптичні кореляційні методи аналізу, які характеризуються високою селективністю. Принцип їхньої роботи базується на збігові спектра аналізованого газу зі спектром еталонного газу чи з так званим еталонним спектром, що формуються за допомогою дифракційної ґратки і так званої маски, яка пропускає певні ділянки спектра. Саме на цьому принципі створено цілу низку класичних приладів газового аналізу [1].

Сьогодні Фабрі-Перо-інтерферометрію використовують для досліджень у багатьох галузевих та наукових напрямках. Так, у комплексній праці [2] ретельно описано використання інтерферометричних методів дослідження для створення волоконно-оптичних датчиків для вимірювання різноманітних фізичних величин. Значна частина статті присвячена саме датчикам на базі інтерферометра Фабрі-Перо. У праці [3] автори продемонстрували можливість використання заповненого магнітною рідиною оптичного датчика Фабрі-Перо для вимірювання магнітних полів. У роботі [4] досліджено волоконно-оптичні датчики тиску з нечутливістю до температури на основі інтерферометрії Фабрі-Перо. У праці [5] проаналізовано мініатюрний інтерферометр Фабрі-Перо для вимірювання високих температур за допомогою двоядерного фотонно-кристалічного волокна. Праця [6] присвячена розробці простих волоконно-оптичних датчиків вологості на основі зовнішньої порожнини Фабрі-Перо, виготовленої з плівки ацетату бутирату целюлози.

Використання інтерферометра Фабрі-Перо (багатопророєвої інтерференції) також є одним із можливих способів одержати просторовий спектральний розклад в інструментальній оптиці. Причому розумно розрахована різниця ходу інтерферометра для одночасного отримання багатьох частот дає змогу реалізувати Фур'є-аналіз світлових імпульсів, тобто надкоротких імпульсів.

Наведений вище аналіз наукових праць підтверджує актуальність досліджень у сфері багатопророєвої інтерферометрії та перспективність розробки модифікацій інтерферометра Фабрі-Перо.

### II. ІНТЕРФЕРОМЕТРИ ТА ІНТЕРФЕРЕНЦІЙНО-ПОЛЯРИЗАЦІЙНІ ФІЛЬТРИ

Використання інтерферометрів як кореляційних масок для газового аналізу через їхню новизну ще не набуло широкого застосування, тому кількість наукових робіт з цієї тематики обмежена. Фундаментальними працями, де описано застосування інтерференційно-поляризаційних фільтрів (ІПФ) для газового аналізу компонентів, що мають квазіперіодичну структуру спектра поглинання, є [7, 8]. Прикладну цінність має реалізація Фабрі-Перо-інтерферометрії, описана в роботі [9]. Варто також виділити працю [10], у якій описано резонатор Фабрі-Перо для дослідження мікрволокна із використанням 193-нм УФ-опромінення та техніку фазової маски. У роботі подано деякі нові характеристики, які приписуються зміні індексу в ґратці та дисперсії ефективної довжини ґратки. Конструктивні результати роботи можуть мати потенціал для створення ультразвукових перетворювачів та фотоакустичних зображень.



Функція пропускання фільтра інтерферометра аналогічна функції пропускання аналізованого газу в його смугі поглинання. Нагадаємо, що дія інтерференційно-поляризаційних фільтрів базується на інтерференції поляризованих променів світла.

На рис. 1 наведено спектр поглинання NH<sub>3</sub> в ділянці 190–255 нм і пропускання ІФФ, товщина фазової пластини якого дорівнює:

$$d = \frac{\lambda_c^2}{D(n_e - n_o)} = 1.22 \text{ мм}, \quad (1)$$

де  $n_o$ ,  $n_e$  — показники заломлення звичайного й незвичайного променів відповідно;  $D$  — спектральний період смуги поглинання аналізованого газу;  $\lambda_c$  — довжина хвилі середини спектрального інтервалу. Значення  $d = 1.22$  мм отримано для значення  $\lambda_c = 215$  нм; аналізований газ — NH<sub>3</sub>; матеріал пластини — кристалічний кварц.

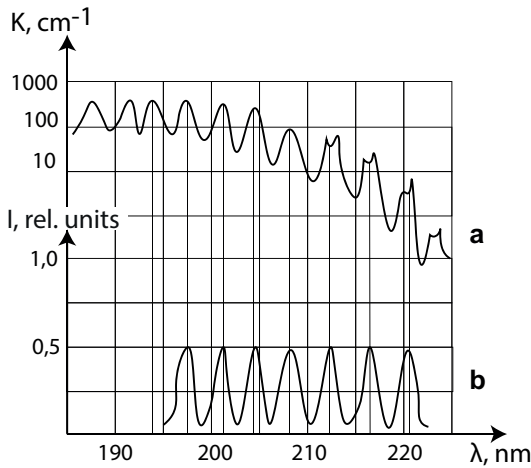


Рис. 1. Спектр поглинання NH<sub>3</sub> і функція пропускання ІФФ  
Fig. 1. Absorption spectrum of NH<sub>3</sub> and transmission function of IPF

Для модуляції спектра пропускання ІФФ (періодичного його зсуву щодо структури смуги поглинання аналізованої газової компоненти) використовують або обертання одного з оптичних елементів ІФФ щодо оптичної осі приладу, або встановлення додаткового оптичного елемента — модулятора. Таким модулятором може слугувати електрооптичний або акустооптичний кристал. Однак модуляція ІФФ за допомогою електрооптичних або акустооптичних кристалів є доволі складною, у зв'язку з чим у працях [11–13] запропоновано використовувати як кореляційну маску інтерферометр Фабрі–Перо (ІФП).

ІФП, як відомо, є багатопроменевим приладом і його функція пропускання описується функцією Ейрі [14]:

$$I = \frac{I_0(1 - R)^2}{(I - R)^2 + 4R \sin^2(\delta/2)}, \quad (2)$$

де  $R = \sqrt{r_1 r_2}$ , а  $r_1$ ,  $r_2$  — коефіцієнти відбивання кожного із дзеркал ІФП;  $I_0$  — інтенсивність падаючого світла;  $\delta = 2\pi\Delta S/\lambda + \varphi$ ,  $\Delta S$  — різниця ходу;  $\varphi$  — різниця фаз, що враховує можливість зміни фази під час відбиття.

Уводячи величину  $F^2 = 4R/(I - R)^2$ , отримуємо:

$$I = \frac{I_0}{I + F^2 \sin^2(\delta/2)}. \quad (3)$$

На рис. 2 наведена залежність (2) для різних значень коефіцієнта відбиття  $R$ . Максимуми пропускання ІФП реалізуються за виконання умов:  $\delta = 2m\pi$ ,  $m = 0, 1, \dots$

У цих максимумах  $I_{\max} = I_0$ . Інтервали частот між двома сусідніми максимумами — це ділянка вільної дисперсії ІФП:

$$\delta\nu = \frac{c}{\Delta S} = \frac{c}{2nd}, \quad (4)$$

де  $n$  — показник заломлення середовища між відбивальними поверхнями ІФП;  $d$  — база ІФП;  $c$  — швидкість світла. Вираз (4) справедливий за нормального падіння випромінювання на ІФП.

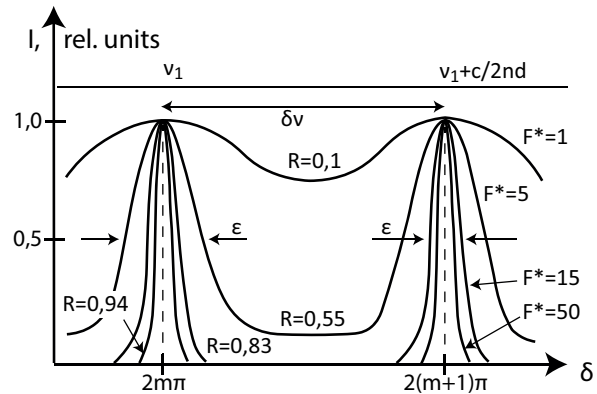


Рис. 2. Функція пропускання ІФП для різних значень коефіцієнтів відбиття  $R$  ( $F^* = 2\pi/\varepsilon$  — різкість ІФП;  $\varepsilon$  — ширина його максимуму пропускання)

Fig. 2. Transmission function of IPF for different values of reflection coefficients  $R$  ( $F^* = 2\pi/\varepsilon$  — sharpness of IPF;  $\varepsilon$  — width of its transmission maximum)

Ділянка вільної дисперсії в одиницях довжин хвиль виражається так:

$$\delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2nd}. \quad (5)$$

Тут  $\delta\lambda$  — не стала величина і залежить від довжини хвилі. Тому (5) можна використовувати у разі, коли  $\delta\lambda$  значно менша від  $\lambda$ . Як бачимо, змінюючи коефіцієнти відбиття дзеркал або базу ІФП, можна суттєво змінити функцію пропускання ІФП, максимально наблизивши її до функції поглинання аналізованого газу.

Вираз (2) справедливий за відсутності поглинання в дзеркалах і за відсутності відхилень їхньої поверхні від ідеальної площини. Функцію пропускання ІФП в разі реальних дзеркал описано в праці [15].

### III. СУТЬ МЕТОДУ ТА СПОСОБИ СКАНУВАННЯ СПЕКТРА

Як бачимо, функція Ейрі становить собою періодичну функцію з періодом, що дорівнює ділянці зворотної дисперсії, і шириною максимуму пропускання, який визначається коефіцієнтом відбиття дзеркал, їх поглинанням, дефектами дзеркал та їх взаємним нахилом. Отже, змінюючи ці параметри, можна отримати будь-яку періодичну функцію частоти. Тобто, якщо спектр аналізованого газу має періодичну структуру (обертальну або коливальну), то, змінюючи параметри ІФП, можна її відтворити на певному інтервалі довжин хвиль і таким способом створити кореляційну спектральну маску для аналізованого газу. В цьому й полягає основна суть методу селективного аналізу газових компонентів за допомогою ІФП.

Уперше ІФП запропонував Р. Вуд у 1904 році та застосував для виділення однієї з компонент жовтого дублета натрію. Наведений на рис. 1 спектр пропускання ІФП Вуда можна віднести також і до функції пропускання ІФП з відстанню між дзеркалами  $d = 5.45$  мкм;  $R = 0.6$ ,  $A = 0.1$ , де  $A$  — поглинання в дзеркалах. Отже, ІФП є якісною спектральною маскою і для аналізу газу  $\text{NH}_3$ . Зрозуміло, щоб отримати промодульований світловий потік, необхідно реалізувати сканування максимумів пропускання інтерферометра на величину, що дорівнює половині ділянки його вільної дисперсії.

Відомими є три способи сканування інтерференційної картини, які ще й набули широкого застосування:

*Сканування спектра зміною тиску всередині інтерферометра* є простим і надійним способом. Однак його доцільно використовувати за досить значних товщин ІФП. Справді, показник заломлення  $n$  газу залежить від тиску  $P$ :

$$(n - 1) = (n_0 - 1)P/P_0, \quad (6)$$

де  $n_0$  — показник заломлення газу за початкового тиску  $P_0$ . Для повітря  $n_0 = 1.0003$  за тиску  $P_0 = 760$  мм.рт.ст. З (6) можна отримати, що приріст атмосферного тиску  $P$  спричиняє збільшення  $\Delta n$ :

$$\Delta n = 4 \times 10^{-7} \Delta P. \quad (7)$$

Тоді для сканування ІФП на величину його вільної дисперсії  $\Delta \lambda$  необхідно змінити тиск:

$$\Delta P = \frac{\lambda}{8d \times 10^7}. \quad (8)$$

*Другий спосіб базується на зміні кута падіння світла на ІФП*, від якого, згідно з умовою максимуму  $2d \cos \Theta = m\lambda$ , залежить різниця ходу. Для зміни кута  $\Theta$  ІФП повертають відносно вертикальної осі за

допомогою, до прикладу, крокового двигуна. Кут, на який необхідно повернути ІФП для сканування на величину його ділянки вільної дисперсії:

$$\Theta_s = \frac{1}{2} \frac{\lambda_0 n}{d} = \frac{1}{2n} \frac{2\lambda_0 \Delta s}{10^4}, \quad \Delta s = \frac{1}{2nd}. \quad (9)$$

Для еталонів незначної товщини кути нахилу становлять  $\sim 15^\circ$  і є цілком доступними. При цьому їхні параметри, пропускання в максимумі та ширина апаратного контуру змінюються несуттєво ( $\sim 10 - 15\%$ ). Для інтерферометрів, що мають значну товщину ( $\sim 10$  мм і більше), такі нахили не допустимі. У цьому разі промені зміщуються один до одного, частина з них не перекривається й не інтерферує. Зауважимо, що паралельний пучок світла діаметром  $D$ , який падає на еталон під кутом  $\Theta$ , зазнає, крім можливих утрат внаслідок поглинання, також і втрати внаслідок відбивання променів, що не інтерферують, кількість яких збільшуються зі збільшенням  $d$  і пропорційна відношенню  $d/D$  (товщини еталона й діаметра пучка).

*Третій спосіб сканування базується на зміні відстані між пластинами ІФП*. Точність переміщення однієї з пластин має бути дуже висока ( $0.0025 - 0.0075$  мкм). Зміну відстані можна реалізувати механічними або електромеханічними методами. Ці методи хоч і можливі, однак пов'язані з великими технологічними труднощами, які є наслідком необхідності забезпечення високої точності переміщення.

Найбільш простим і поширеним способом третього типу є зміна відстані між пластинами ІФП з використанням п'єзоелектричного ефекту. Для цього використовують п'єзокераміку — полікристалічну речовину, в складі якої є титанат барію. Реалізується метод наявності електричного поля в п'єзоелектричному диску, на якому закріплено одне із дзеркал ІФП і який, своєю чергою, регулює відстань між дзеркалами. Причому частота сканування цим методом може бути значною (близько десятка кілогерц).

Той чи той спосіб сканування може бути обраний, залежно від конструкції ІФП чи газоаналізатора загалом. Так, якщо в ролі ІФП вибрано плоску паралельну пластину (еталон), то сканування може бути реалізованим тільки зміною нахилу до осі приладу. Однак це приводить до зменшення пропускання в ділянці максимуму, розширення максимуму та його зсуву. Окрім того, для ультрафіолетової (УФ) ділянки спектра товщина еталона повинна бути дуже малою для досягнення збігу ділянки вільної дисперсії зі спектральним інтервалом між лініями коливної структури спектра. Тому для УФ-ділянки еталона не використовують.

Отже, можна зробити висновок, що в УФ-ділянці спектра як спектральну маску доцільно застосовувати ІФП з п'єзокерамічним скануванням її частот. В інфрачервоній (ІЧ) ділянці можна використовувати й еталон, а сканувати нахилом еталона до оптичної осі приладу.

IV. ЕКСПЕРИМЕНТ

Досліджували можливість сканувати спектр поглинання  $\text{SO}_2$  в ділянці 220 нм. На рис. 3 наведена функція пропускання для  $R \sim 0,7$ ,  $\lambda \sim 220$  нм,  $\Delta\lambda \sim 1,7$  нм. За умови, що  $\lambda/\Delta\lambda = k$  — парне значення,  $I = I_0$ , за  $k$  непарного  $I = 0,006 \cdot I_0$ .

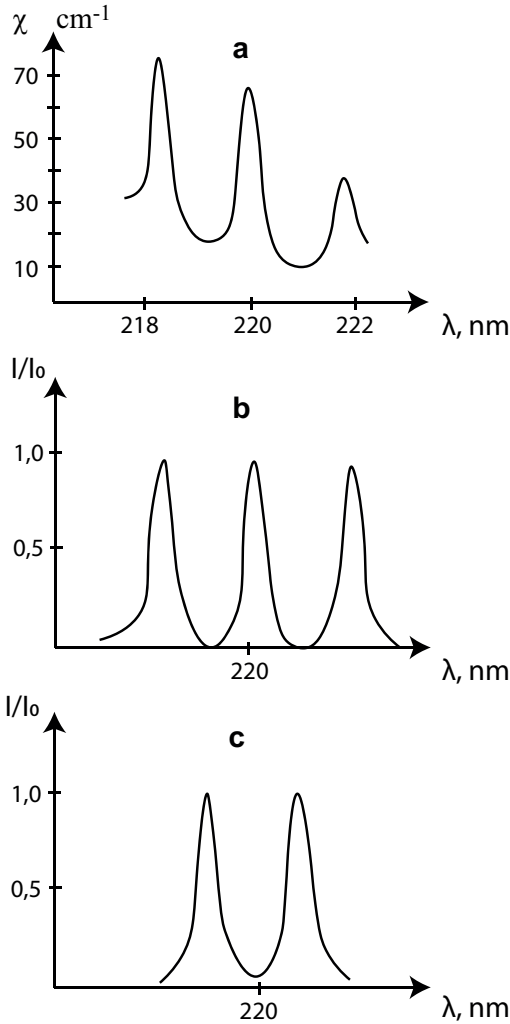


Рис. 3. Спектр поглинання  $\text{SO}_2$  (a) і пропускання інтерферометра Фабрі-Перо (b, c)  
 Fig. 3.  $\text{SO}_2$  absorption spectrum (a) and Fabry-Pérot interferometer transmission (b, c)

Ділянка вільної дисперсії 1,7 нм відповідає відстані між дзеркалами інтерферометра  $d = 14,4$  мкм. Рис. 3, b відрізняється від рис. 3, c зміною  $d$  на  $0,11$  мкм ( $\lambda/2$ ). На рис. 3, a зображено спектр поглинання  $\text{SO}_2$  у ділянці 220 нм. Причому, із рис. 3 бачимо, що під час проходження випромінювання послідовно через кювету, що містить  $\text{SO}_2$ , та інтерферометр у випадку (b), піки пропускання інтерферометра збігаються з максимумами поглинання  $\text{SO}_2$ . Отже, якщо реалізувати сканування довжини інтерферометра на величину  $\pm\lambda/2$ , то випромінювання, що пройшло кювету

з  $\text{SO}_2$  та інтерферометр, буде промодульовано по інтенсивності з частотою, подвоєною щодо частоти сканування. При цьому глибина модуляції буде пропорційною концентрації  $\text{SO}_2$  у кюветі.

Із урахуванням цього принципу модифіковано вище описаний кореляційний аналізатор  $\text{SO}_2$ , модифікована блок-схема якого наведена на рис. 4. Аналізатор складається з дейтерієвої лампи ДДС-30 1, коліматора 2, кювети 3, через яку прокачується аналізована газова суміш, світлофільтрів 4, сканувального інтерферометра Фабрі-Перо 5, об'єктива 6, ФЕП-142 7, узгоджувального підсилювача 8, підсилювача 9, що регулюється, селективного фільтра другої гармоніки 10, синхронного детектора 11, фільтра низьких частот 12, підсилювача сталого струму 13, індикатора 14, генератора 15, фазообертача 16, селективного фільтра першої гармоніки 17, синхронного детектора 18, фільтра низьких частот 19 та підсилювача постійного струму 20.

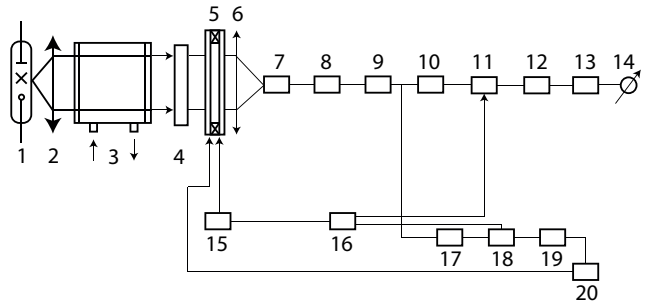


Рис. 4. Блок-схема модифікованого аналізатора  $\text{SO}_2$   
 Fig. 4. Block diagram of the modified  $\text{SO}_2$  analyzer

Аналізатор працює так. Випромінювання від лампи ДДС-30 1 формується в коліматорі 2 і направляється в кювету 3 з аналізованим газом ( $\text{SO}_2$ ), набуваючи характерної спектральної структури (рис. 3, a). Далі випромінювання проходить через інтерференційний світлофільтр 4, який виділяє робочу ділянку спектра (див. рис. 4) і потрапляє на сканувальний ІФП 5, що утворений дзеркалами з коефіцієнтами відбивання  $R = 0,7$ . Товщину інтерферометра  $d$  вибираємо з умови рівності періоду структури  $\text{SO}_2$  ( $\Delta\lambda_{\text{SO}_2}$ ) і ділянки вільної дисперсії інтерферометра ( $\Delta\lambda_u$ ):  $\Delta\lambda_{\text{SO}_2} = \Delta\lambda_u = 1,7$  нм (див. рис. 3, c). Щоб отримати на виході інтерферометра промодульований світловий потік, на сканувальний ІФП подаємо керуючу напругу звукової частоти ( $\sim 70$  Гц) від генератора 15. При цьому положення за частотою інтерференційних максимумів періодично коливається з тією самою частотою щодо свого середнього положення, яке збігається з положенням смуг пропускання в спектрі  $\text{SO}_2$ , що викликає амплітудну модуляцію світлового потоку, який пройшов через ІФП на подвоєній частоті (див. рис. 3). Причому амплітуда промодульованого світлового потоку пропорційна інтенсивності смуг поглинання  $\text{SO}_2$ , тобто концентрації  $\text{SO}_2$  у досліджуваній газовій пробі. У ролі тестової суміші, за

якою можна калібрувати прилад по концентрації, може слугувати  $\text{CH}_4$  [11].

Для отримання максимальної глибини амплітудної модуляції за такої самої концентрації  $\text{SO}_2$  необхідно, щоб частотне зміщення інтерференційних максимумів відповідало зміні порядку інтерференції, тобто в крайніх точках цього зміщення частотне положення  $m$ -го інтерференційного максимуму займав, до прикладу,  $(m - 1)$ -й максимум. Останнє виконується, якщо різниця ходу променів, що інтерферують  $\Delta$ , змінюється на величину, яка дорівнює довжині хвилі  $\lambda$  цих променів. Оскільки  $\Delta = 2d$ , то товщина інтерферометра має змінюватися на  $\lambda/2$ . Для цього амплітуда генератора 15 повинна мати значення  $U_g = \lambda/2\alpha$ , де  $\alpha$  — коефіцієнт лінійного подовження управляючого елемента ІФП під дією поданої напруги.

Промодульований у такий спосіб світловий потік фокусується об'єктивом 6 на фотокатод ФЕП-142 7. Сигнал, що знімається з ФЕП, подається через погоджувальний каскад 8 на підсилювач 9, далі на селективний фільтр другої гармоніки 10 та синхронний детектор 11. Опорний сигнал подається на синхронний детектор від генератора 15 через подвоювач частоти та фазообертач 16. Сигнал синхронного детектора згладжується фільтром низьких частот 12, підсилюється підсилювачем сталого струму 13 і поступає на індикатор 14, який проградуїований в одиницях концентрації  $\text{SO}_2$ .

Для усунення самовільного дрейфу середнього положення смуг пропускання ІФП (маски) щодо структури смуги поглинання  $\text{SO}_2$  використано систему автоналаштування маски. Для цього сигнал, що знімається з ФЕП 7, додатково надходить через підсилювачі 8 і 9 на селективний фільтр першої гармоніки 17, синхронний детектор 18 та опорний сигнал, який поступає від генератора 15. Сигнал синхронного детектора згладжується фільтром низьких частот 19, підсилюється підсилювачем сталого струму 20 і надходить на управляючий елемент сканувального ІФП 5.

Як уже згадувалось, за збігу середнього положення інтерференційних максимумів із максимумами пропускання в спектрі поглинання  $\text{SO}_2$  модуляція довжини інтерферометра щодо цієї робочої точки спричиняє появу на виході ФЕП сигналу на подвоєній частоті генератора  $2\omega$ , причому сигнал на частоті  $\omega$  відсутній. Під час зміщення робочої точки від початкового положення на виході ФЕП з'являється сигнал із частотою  $\omega$ , який підсилюється і фіксується синхронним детектором 18, надходить на підсилювач сталого струму 20 і подається на управляючий елемент (п'єзокераміку КП-1) сканувального ІФП. Причому величина і знак напруги, яка знімається з синхронного детектора 18, залежить від величини й напрямку зміщення робочої точки щодо структури смуги поглинання  $\text{SO}_2$ , а також від співвідношення фаз сигналів, які надходять на синхронний детектор 18 з ФЕП і генератора 15. Тому фазообертачем 16 дібрано таке їх співвідношення, щоб напруга, що знімається з синхронного детектора 18, яка була раніше підсилена і яка далі поступає на п'єзокераміку, приводила до

зміщення інтерференційних максимумів до максимумів пропускання спектра  $\text{SO}_2$ , тобто повертала їх до середнього положення.

## V. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ТА ВИСНОВКИ

Лабораторні випробування описаного макета аналізатора  $\text{SO}_2$  продемонстрували його високі метрологічні параметри. Основна наведена похибка становила 1% на шкалі 0–10000 ppm і 10% на шкалі 0–1000 ppm. Довжина кювети дорівнює 170 мм, час прогріву макета становив 30 хвилин, мінімальна вимірювана концентрація 25 ppm.

Щодо зовнішніх чинників, то згідно з аналізом, наведеним у працях [15, 16], при наших розмірах бази інтерферометра на нього не повинні впливати зміна атмосферного тиску та зміна температури в усьому наявному в наших умовах діапазоні вимірювань. Щодо тиску, все справді так, однак коливання температури суттєво впливає на інтерферометри цієї конструкції. Для врахування температурної залежності експериментально досліджено залежності пропускання лазерного випромінювання 0.63 мкм інтерферометра від температури термостата, на якому він був розташований [11, 17]. Результати експерименту свідчать, що база інтерферометра все ж незначно змінюється з плином часу, що своєю чергою приводить до зміни робочої точки під час сканування з допомогою п'єзокоректора інтерферометра і, відповідно, до зміни гармонічного складу корисного сигналу та його амплітуди. Тому ми передбачили стабілізацію параметрів інтерферометра за спектральними параметрами аналізованого газу.

Аналізатор має високу селективність. Похибка, викликані компонентами, що заважають ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}$ ), становить близько 5% на шкалі (0–1000 ppm).

Зазначимо, що наведена функція Ейрі є дійсною для ідеального ІФП. Для отримання ж реального розподілу інтенсивності необхідно враховувати дефекти дзеркал інтерферометра, тобто похибки під час їх встановлення [15].

У цьому конкретному прикладі для збільшення чутливості, тобто зменшення похибки, необхідно, як показує розрахунок, збільшити коефіцієнт відбиття дзеркал до 0.8–0.85 і встановити довгохвильову межу пропускання світлофільтра на рівні 0.1 за  $\lambda = 230$  нм.

Використання інтерферометра Фабрі–Перо як кореляційної маски дає змогу легко переходити від вимірювання одного компонента до вимірювання інших. Так, використовуючи таку саму елементну базу, змінивши відстань між дзеркалами, можна аналізувати такі компоненти, як  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{O}_3$  та інші.

У таблиці 1 наведені діапазони довжин хвиль, у яких можливо аналізувати найбільш поширені газові компоненти за допомогою пропонованого методу, періоди характерної структури цих компонентів, відстань між дзеркалами інтерферометра Фабрі–Перо та матеріал дзеркал. У деяких газів, указаних у таблиці, структура спектра відмінна від періодичної ( $\text{H}_2\text{S}$ ,

NO, O<sub>3</sub>). У цьому разі необхідно виділити за допомогою світлофільтра ділянку спектра, де його структура квазіперіодична. Останнє може привести лише до незначного зменшення корисного сигналу на основній частоті й появи сигналу на інших частотах. При цьо-

му в систему автоналаштування маски необхідно ввести пороговий пристрій, який запобігатиме появі сталої напруги на керуючому елементі інтерферометра під час його оптимального налаштування щодо спектра аналізованого газу.

№ з/п	Вимірюваний компонент	Довжина хвилі / частота	Період структури	Відстань між дзеркалами	Матеріал дзеркал
1	SO <sub>2</sub>	210 nm	1.67 nm	13 μm	Кварц КУ
		300 nm	1.95 nm	23 μm	Кварц КУ
		1127 cm <sup>-1</sup>	13.4 cm <sup>-1</sup>	1.47 mm	Кераміка КО41
2	CO	2100 cm <sup>-1</sup>	4.3 cm <sup>-1</sup>	1.16 mm	Кераміка КО1
		200 nm	3.75 nm	5.3 μm	Кварц КУ
3	NO	210 nm	10.8 nm	2 μm	Кварц КУ
		1912 cm <sup>-1</sup>	3.7 cm <sup>-1</sup>	1.36 mm	Кераміка КО1
4	CH <sub>4</sub>	2930 cm <sup>-1</sup>	10.3 cm <sup>-1</sup>	0.49 mm	Кварц КИ
5	CO <sub>2</sub>	2300 cm <sup>-1</sup>	2 cm <sup>-1</sup>	2.5 mm	Кераміка КО1
6	NH <sub>3</sub>	210 nm	3.8 nm	5.8 μm	Кварц КУ
		3200 cm <sup>-1</sup>	20.1 cm <sup>-1</sup>	0.25 mm	Кварц КИ
		1150 cm <sup>-1</sup>	19.5 cm <sup>-1</sup>	0.26 mm	Кераміка КО41
7	O <sub>3</sub>	320 nm	2.6 nm	19.7 μm	Кварц КУ
8	H <sub>2</sub> S	1200 cm <sup>-1</sup>	12 cm <sup>-1</sup>	0.4 mm	Кераміка КО41
9	NO <sub>2</sub>	440 nm	4.17 nm	23 μm	Кварц КВ

Табл. 1. Параметри інтерферометричних масок (наведено ділянку дисперсії інтерферометра в одиницях довжин хвиль та частот (стала інтерферометра), тобто  $\Delta\nu = 1/(2L)$  [см<sup>-1</sup>])

Table 1. Parameters of interferometric masks (the interferometer dispersion range is given in units of wavelengths and frequencies (interferometer constant), i. e.,  $\Delta\nu = 1/(2L)$  [cm<sup>-1</sup>])

Як бачимо з таблиці 1, метод забезпечує широкі можливості для селективного аналізу газових сумішей.

Отже, кореляційні маски на основі ІФП можна широко використовувати для аналізу газових компонентів, що мають квазіперіодичну структуру спектра. Порівняно з іншими приладами подібного типу вони мають набагато більшу світлосилу:  $U = \Omega A$ , де  $\Omega$  — тілесний кут;  $A$  — світловий діаметр ІФП за такої самої роздільної здатності. Це має вирішальне значення

для дистанційних приладів [17]. Крім того, невелика вага й габарити, дають змогу створити на їхній основі переносні прилади. Однак, оскільки ІФП — багатопроменевий інтерферометр, процедура оптимізації його параметрів досить складна, хоча технічні методи розв'язання цієї проблеми є [12]. Крім того, для деяких спектральних ділянок відсутня елементна база для створення інтерференційних приладів, а методи модуляції їхніх параметрів достатньо складні.

[1] M. M. Millan, R. M. Hoff, *Appl. Opt.* **16**, 1609 (1977). <https://doi.org/10.1364/AO.16.001609>.  
 [2] Md. R. Islam, M.M. Ali, M.-H. Lai, K.-S. Lim, A. Harith, *Sensors*, **14** 7451 (2014); <https://doi.org/10.3390/s140407451>.  
 [3] R.-q. Lv, Y. Zhao, D. Wang, Q. Wang, *IEEE Photon. Tech. Lett.* **26**, 217 (2014); <https://doi.org/10.3390/s16050620>.  
 [4] C.-W. Lai, J.-P. Yur, C.-C. Liao, Y.-L. Lo, *Recent Pat.*

*Signal Process* **1**, 48 (2011); <https://doi.org/10.7498/aps.66.070708>.  
 [5] Y. Du *et al.*, *IEEE Sens. J.* **14**, 1069 (2014); <https://doi.org/10.1109/JSEN.2013.2286699>.  
 [6] W. Xu, W.-B. Huang, X.-G. Huang, C.-Y. Yu, *Opt. Fiber Technol.* **19**, 583 (2013); <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2013.09.005>.  
 [7] В. А. Новиков, А. А. Молчанов, *Журн. прикл. спектр.* **48**, 1026 (1988).

- [8] Г. М. Хапланов, Т. Г. Сизенко, В. Н. Остахов, АС 1156457 СССР, МКИ G01N 21/45 (1982).
- [9] L. Crescentini, *Appl. Opt.* **30**, 3114 (1991); <https://doi.org/10.1364/AO.30.003114>.
- [10] X. Wang *et al.*, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* **111**, 012013 (2018); <https://doi.org/10.1088/1755-1315/111/1/012013>.
- [11] V. R. Kozubovsky, Yu. Yu. Bilak, *J. Appl. Spectrosc.* **89**, 495 (2022); <https://doi.org/10.1007/s10812-022-01385-7>.
- [12] В. Р. Козубовский, В. Л. Голдовский, О. Д. Крайслер, АС 1182345 СССР, МКИ G01N 21/61 (1985).
- [13] G. Fortunato *et al.*, patent 2555747 France (1985).
- [14] В. И. Малышев, *Введение в экспериментальную спектроскопию* (Наука, Москва, 1979).
- [15] А. Г. Жиглинский, В. В. Кучинский, *Реальный интерферометр Фабри-Перо* (Машиностроение, Ленинград, 1983).
- [16] И. В. Скоков, *Многочувствительные интерферометры в измерительной технике* (Машиностроение, Москва, 1989).
- [17] V. R. Kozubovskii, Yu. Yu. Bilak, *Ukr. J. Phys.* **66**, 664 (2021); <https://doi.org/10.15407/ujpe66.8.664>.

## USING THE FABRY-PÉROT INTERFEROMETER AS A SPECTRAL MASK

Yu. Bilak, V. Kozubovskii, M. Rol

*Uzhhorod National University, 3, Narodna Sq., Uzhhorod*

Precise analysis of complex gas mixtures is an urgent task today, since its accuracy and quality is important not only for human health, but also for the ecology of population centers or the planet as a whole. Traditional methods of gas environment analysis are imperfect, and those that have the necessary sensitivity and selectivity do not yield results in a particularly short time.

Nowadays, the Fabry-Pérot interferometry is used for research in a significant number of industrial and scientific areas. The analysis of the works presented in this paper confirms the relevance of research in the field of multibeam interferometry and the prospects of developing modifications of the Fabry-Pérot interferometer.

The article is devoted to classical optical correlation methods for the analysis of gas mixtures with a quasi-periodic structure of the spectrum. A modification of the analyzer was developed and it was shown that the use of the modified Fabry-Pérot interferometer as a correlation mask ensures the express realization of the selectivity of the measurement components.

An experimental study was conducted to test the possibility of scanning the SO<sub>2</sub> absorption spectrum in the 220 nm region. Laboratory tests of the described layout of the SO<sub>2</sub> analyzer demonstrated its high metrological parameters. The main reported error was 1% on the 0–10000 ppm scale and 10% on the 0–1000 ppm scale. The length of the cuvette was 170 mm, the warm-up time of the model was 30 minutes, the minimum measured concentration was 25 ppm.

We can state that the correlation masks based on the IFP can be widely used for the analysis of gas components with a quasi-periodic structure of the spectrum. Compared to other devices of a similar type, they have a much higher luminous intensity:  $U = \Omega A$ , where  $\Omega$  is the solid angle;  $A$  is the light diameter of the IFP with the same resolution. This is crucial for remote instruments [V. R. Kozubovskii, Yu. Yu. Bilak, *Ukr. J. Phys.* **66**, 664 (2021)]. In addition, their small weight and dimensions allow one to create portable devices based on them. However, since the IFP is a multi-beam interferometer, the procedure for optimizing its parameters is rather complicated, although technical methods for solving this problem exist [V. R. Kozubovskii, V. L. Goldovskii, O. D. Kraysler, AS 1182345 USSR, MКИ G01N 21/61].

The conducted analysis and research open up new opportunities for the optimization of interferometric devices and interferometric methods of gas analysis.

**Key words:** interference devices, Fabry-Pérot interferometer, interference-polarization filter, spectrum, spectrum scanning methods, analyzer, correlation mask.