

ЭКСПРЕССНЫЙ АНАЛИЗ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПЕКТРАЛЬНОГО КОРРЕЛЯТОРА НА ОСНОВЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА ФАБРИ–ПЕРО**В. Р. Козубовский*, Ю. Ю. Билак**

УДК 543.42;535.41

<https://doi.org/10.47612/0514-7506-2022-89-3-394-399>

Ужгородский национальный университет, Ужгород, Украина;
e-mail: kozubvr@gmail.com, yubill76@gmail.com, yuriy.bilak@uzhnu.edu.ua

(Поступила 18 февраля 2022)

Описаны оптические корреляционные методы анализа газовых смесей с квазипериодической структурой спектра. Разработана конструкция прибора для демонстрации возможности использования интерферометра Фабри–Перо в качестве корреляционной маски. Приведен конкретный пример использования интерферометра в дистанционном анализаторе метана.

Ключевые слова: интерференционный прибор, интерферометр Фабри–Перо, интерференционно-поляризационный фильтр, спектр, метод сканирования спектра, анализатор, корреляционная маска.

The article is devoted to the latest optical correlation methods for the analysis of gas mixtures with a quasi-periodic spectrum structure. The developed design of the device is presented to demonstrate the possibility of using the Fabry-Perot interferometer as a correlation mask. A specific example of using an interferometer in a remote methane analyzer is also described.

Keywords: interference devices, Fabry-Perot interferometer, interference-polarization filter, spectrum, spectrum scanning methods, analyzer, correlation mask.

Введение. Одной из основных задач спектроскопии является не только точный анализ сложных газовых смесей, но и быстрое получение необходимых результатов. От качества результатов и их экспрессного получения зависит не только здоровье человека, но и экология планеты в целом. Традиционные методы анализа газовой среды несовершенны, а обладающие необходимой чувствительностью и селективностью не обеспечивают получения результатов анализа с необходимой разрешающей способностью и светосилой. В работах [1–5] приведены классические примеры использования интерферометра Фабри–Перо (ИФП) в качестве корреляционной маски для газового анализа. Известно, что ИФП является многолучевым прибором. Функция пропускания ИФП называется функцией Эйри [6, 7]:

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

где $R = \sqrt{r_1 r_2}$, r_1 и r_2 — коэффициенты отражения зеркал ИФП; I_0 — интенсивность падающего света;

$\delta = \frac{2\pi\Delta S}{\lambda} + \varphi$; ΔS — разность хода; δ — разность фаз, которая учитывает возможное изменение фазы при отражении.

EXPRESS ANALYSIS OF GAS MIXTURES USING SPECTRAL CORRELATOR BASED ON THE FABRY-PEROT INTERFEROMETER

V. R. Kozubovsky*, Yu. Yu. Bilak (Uzhhorod National University, Uzhhorod, Ukraine; e-mail: kozubvr@gmail.com, yubill76@gmail.com, yuriy.bilak@uzhnu.edu.ua)

Вводя $F^2 = 4R / (I - R)^2$, получаем:

$$I = \frac{I_0}{1 + F^2 \sin^2(\delta/2)}. \quad (2)$$

На рис. 1 приведены зависимости $T(\delta)$ для разных коэффициентов отражения R . Максимумы пропускания ИФП реализуются при условии $\delta = 2m\pi$, $m = 0, 1, \dots$. В этих максимумах $I_{\max} = I_0$. Интервал частот между соседними максимумами — область свободной дисперсии ИФП:

$$\delta\nu = c / \Delta S = c / 2nd, \quad (3)$$

где n — показатель преломления среды между зеркалами ИФП; d — база ИФП; c — скорость света. Выражение (3) справедливо при нормальном падении излучения на ИФП. Область свободной дисперсии в единицах длины волны:

$$\delta\lambda = \lambda^2 / 2nd. \quad (4)$$

Здесь $\delta\lambda$ не является постоянной величиной и зависит от длины волны, поэтому (4) можно использовать только в случае $\delta\lambda \ll \lambda$. Варьируя коэффициентом отражения зеркал (базой ИФП), можно существенно изменить функцию пропускания ИФП, приблизив ее к функции поглощения анализируемого газа. Выражение (1) справедливо в отсутствие поглощения в зеркалах и отклонения их поверхности от идеальной плоскости. Функция пропускания ИФП в случае реальных зеркал описана в работах [8—10].

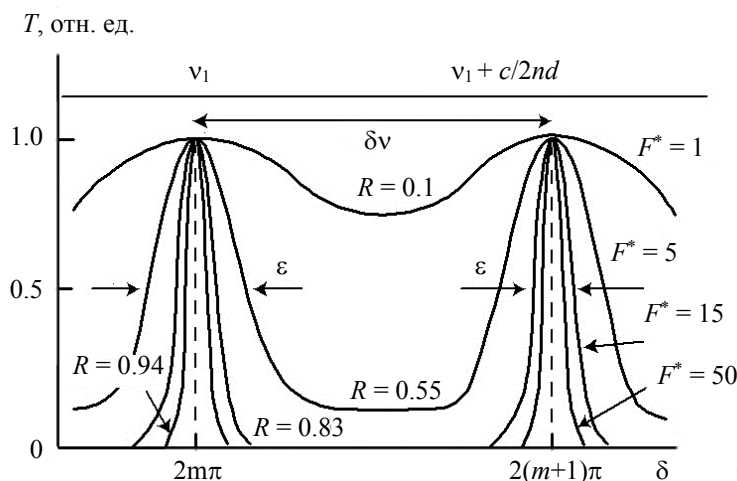


Рис. 1. Функция пропускания ИФП для разных коэффициентов отражения R ; $F^* = 2\pi/\varepsilon$ — резкость ИФП, ε — ширина максимума пропускания

Функция Эйри представляет собой периодическую функцию с периодом, равным области обратной дисперсии, и шириной максимума пропускания, который определяется коэффициентом отражения зеркал, их поглощением, дефектами зеркал и их взаимным наклоном. Изменив эти параметры, можно получить любую периодическую функцию частоты: если спектр анализируемого газа имеет периодическую структуру (вращательную или колебательную), то изменением параметров ИФП можно воспроизвести ее на определенном участке длин волн и создать корреляционную спектральную маску для анализа данного газа. В этом заключается сущность метода селективного анализа газовых компонентов с помощью ИФП.

Способы сканирования с помощью ИФП. ИФП является эффективной спектральной маской для анализа газов с периодической структурой. Для получения промодулированного светового потока необходимо реализовать сканирование максимумов пропускания интерферометра на величину, равную половине области его свободной дисперсии. Для быстрого сканирования интерференционной картины на практике используют два способа сканирования.

Первый базируется на изменении угла падения света на интерферометр, от которого в соответствии с условием максимума $2d\cos\theta = m\lambda$ зависит разность хода. Для изменения угла θ ИФП поворачивают вокруг вертикальной оси, например, с помощью шагового двигателя. Угол, на который необходимо повернуть ИФП для сканирования на величину его области свободной дисперсии:

$$\theta_S = \sqrt{\frac{\lambda_0 n}{d}} = \sqrt{\frac{2\lambda_0 \Delta S}{10^4}} n, \quad \Delta S = 1/2nd. \quad (5)$$

Для эталонов незначительной толщины углы наклона 15° вполне допустимы. При этом их параметры — пропускание в максимуме и ширина аппаратного контура — незначительно (на 10—15 %) изменяются. Для интерферометров толщиной ≥ 10 мм такие наклоны недопустимы. В этом случае интерферирующие лучи смещаются друг относительно друга, соответственно, их часть не перекрывается и не интерферирует. Параллельный пучок света диаметром D , падая на эталон под углом θ , кроме возможных потерь из-за поглощения испытывает потери вследствие роста количества лучей, которые не проинтерферировали. Это количество возрастает с увеличением толщины образца d и становится пропорциональным отношению d/D .

Второй способ сканирования основан на изменении расстояния между пластинами ИФП. Точность перемещения одной из пластин должна быть очень высока (0.0025—0.0075 мкм). Изменение расстояния может быть реализовано механическими или электромагнитными методами. Эти методы реальны, но их реализация связана со значительными технологическими трудностями.

Возможен более простой способ изменения расстояния между пластинами — температурный нагрев кольцевой трубки, на которой закреплены пластины. При этом термическое расширение имеет большую инерцию и может привести к деформации оправы зеркала ИФП.

Для сканирования можно использовать также магнитострикционный эффект, который заключается в изменении линейного размера тела под действием магнитного поля. Это явление характерно для никеля, кобальта, железа, а также инвара.

Наиболее распространенный способ изменения расстояния между пластинами ИФП — использование пьезоэлектрического эффекта. В интерференционных устройствах чаще всего применяют пьезокерамику — поликристаллическое вещество, в составе которого содержится титанат бария. При создании электрического поля в пьезокерамической втулке, на которой закреплено одно из зеркал ИФП, изменяется расстояние между зеркалами. Причем частота сканирования может быть достаточно велика (порядка десятков килогерц).

Способ сканирования может быть выбран в зависимости от конструкции ИФП или газоанализатора в целом. Так, если в качестве ИФП выбрана плоскопараллельная пластина (эталон), то сканирование может быть осуществлено только изменением ее наклона относительно оптической оси прибора. Это приводит, как отмечалось выше, к уменьшению пропускания в максимуме ИФП, расширению максимума и его дальнейшему смещению на

$$\delta\lambda = \frac{\lambda_0 \theta}{2n^2}. \quad (6)$$

В УФ-области, где для достижения совпадения области свободной дисперсии со спектральным интервалом между линиями колеблющейся структуры требуются малые толщины ИФП, эталоны, как правило, не применяются. Однако в ИК-области 1—16 мкм эталоны из плавленого кварца, сапфира, CaF, ZnSe, Ge и других материалов с успехом используют для выделения спектральных структур [9]. Таким образом, для создания спектральной маски в УФ-области целесообразно применять ИФП с пьезоэлектрическим сканированием частот, а в ИК-области лучше использовать эталоны, а сканирование осуществлять посредством наклона эталона относительно оптической оси прибора.

Эксперимент. Исследованы возможности сканирования спектра поглощения CH_4 (P -ветви) в области $3000\text{—}2850\text{ см}^{-1}$ с помощью лейкосапфирового эталона с напылением Al (с торцов) с коэффициентом отражения $R = 0.5$, при этом одно из зеркал закреплено на пьезокорректоре КП-1. На рис. 2, а приведены спектр поглощения смеси CH_4 в N_2 с концентрацией 2.14 об.% в кювете длиной 10 см с расстоянием между отдельными линиями поглощения 10.4 см^{-1} , а также спектр пропускания лейкосапфирового эталона толщиной $d = 0.44$ мм с $R = 0.5$. Зависимость положения максимумов пропускания эталона от его угла наклона приведена на рис. 2, б. Поскольку область свободной дисперсии эталона $\delta\nu = 11.4\text{ см}^{-1}$ (120 \AA), для сканирования его пиков пропускания на величину $\delta\nu$ достаточно углов наклона прибора $\sim 8^\circ$. В этом случае каждый пик пропускания эталона полностью

сканирует соответствующую линию поглощения CH_4 . Профиль пиков пропускания эталона зарегистрирован с помощью ИКС-31 (ширина пиков 3 см^{-1} , пропускание в максимуме 13 %).

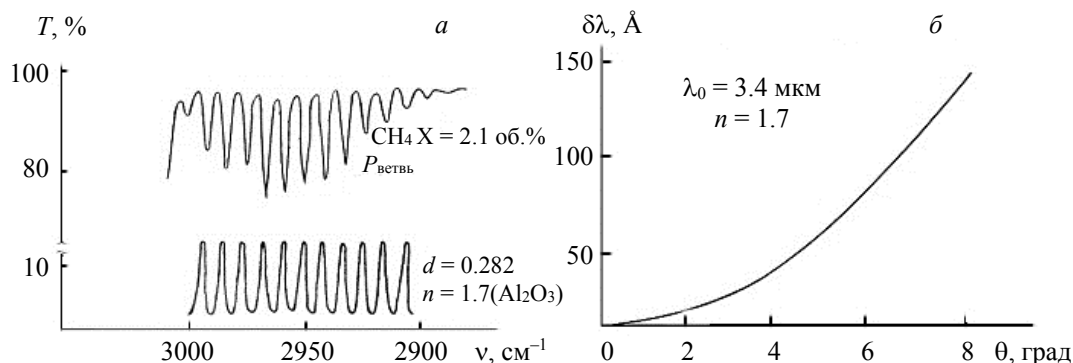


Рис. 2. Спектры поглощения CH_4 при $L = 10 \text{ см}$ и пропускания лейкосапфирового эталона (а), а также зависимость смещения максимумов пропускания от угла наклона эталона (б)

Регистрация смещения спектра пропускания ИФП в области 200 нм реализована с помощью монохроматора МДР-3. Излучение от лампы ДДС-30 формировалось в параллельный световой поток с помощью кварцевой линзы и дальше пропускалось сквозь ИФП. С помощью второй линзы оно фокусировалось на входную щель монохроматора. Спектр пропускания ИФП регистрировался с помощью ФЭП-142, сигнал с ФЭП поступал на усилитель У5-9 и самописец КСП-4. Юстирование ИФП реализовалось с помощью излучения He-Ne-лазера [10, 11], а расстояние между зеркалами изменялось с помощью дифференциальных винтов с последующим установлением области свободной дисперсии по записи спектра пропускания ИФП. Точная подгонка d реализовывалась подачей постоянного напряжения определенной полярности на пьезокорректор КП-1. Это приводит и к сканированию пиков пропускания ИФП в пределах $\delta\lambda$. В качестве источника постоянного напряжения использован ВИП-010.

Из рис. 2, б также видно, что зависимость сдвига $\delta\lambda$ от угла наклона не является линейной, поэтому уменьшать ширину полосы пропускания системы регистрации полезного сигнала нельзя (для аммиака NH_3 такая зависимость линейна).

Конструктивное исполнение корреляционной маски на основе ИФП и соответствующая юстировка. Для использования в качестве корреляционной маски ИФП должен отвечать определенным требованиям: жесткость конструкции исключает самопроизвольную разъюстировку; постоянство параметров ИФП независимо от внешних условий; возможность точной настройки базы ИФП; устройство для точного юстирования параллельности зеркал; возможность сканирования функции пропускания ИФП.

Наиболее приемлемый для нашего случая способ сканирования ИФП — модуляция его базы при размещении одного из зеркал ИФП на пьезокерамике и подаче на нее переменного напряжения. Пьезокорректор КП-1 разработан специально для сканирования ИФП, поэтому гарантируются сохранение параллельности зеркал ($\sim 5''$) при сканировании и большой диапазон перемещений (до 5 мкм при 230 В). Что касается жесткости конструкции при возможности точных юстировки зеркал и установки размеров базы, нами было предложено техническое решение ИФП с оптимизацией прибора [12], позволяющее выполнить данные требования.

Схема конструкции ИФП приведена на рис. 3. Зеркала 3 ИФП установлены с помощью прижимов из инвара: одно непосредственно на инваровой плите 2, второе на пьезокорректоре 4, который с помощью инваровой накидной гайки крепится к плите из инвара 1. В плитах 1 и 2 выполнены резьбовые отверстия и прорези б, образующие клеммные соединения плат со стержнями, неподвижность которых обеспечивается поджимом винтов 7. Юстирование ИФП осуществляется следующим образом. В плату 1 с резьбовыми отверстиями с шагом Ш1 вкручивают стержни 5 с соответствующими резьбовыми участками с шагом Ш1. Затем к противоположным концам стержней с резьбой, шаг которой Ш2, приставляют плиту 2 с резьбовыми отверстиями с шагом Ш2. Если Ш1 < Ш2 и оба участка резьбы правые, закручивание стержней в плату 2 приводит к ее сближению с платой 1. Одновремен-

ным закручиванием стержней в платы с закрепленными на них зеркалами устанавливают длину резонатора, а поочередным “дожиманием” стержней юстируют пространственное положение зеркал, которое фиксируют поджатием винтов 7. Поскольку разность шагов Ш1 и Ш2 может быть достаточно мала (при повороте стержней на 360° расстояние между платами изменяется на 50 мкм), то удается достичь точности юстировки зеркал 0.08 мкм и точности установки базы ИФП 0.2 мкм. Высокая точность установки параллельности зеркал и базы ИФП без дополнительных юстировочных устройств обеспечивает жесткость конструкции.

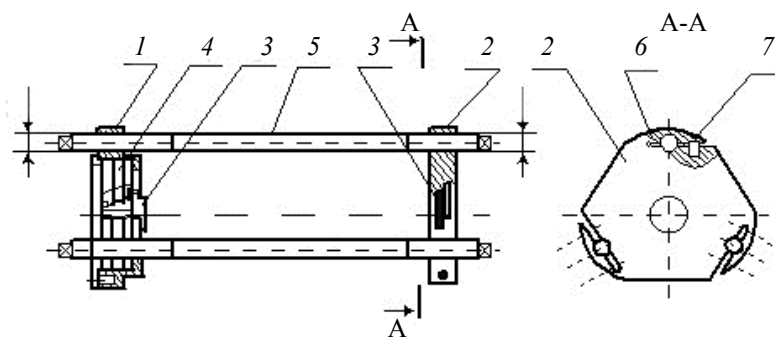


Рис. 3. Конструкция ИФП, используемая в анализаторе NH_3

Что касается воздействия внешних факторов, то, согласно [7], при наших размерах базы ИФП на него не должно влиять изменение атмосферного давления и температуры во всем диапазоне. Относительно давления, действительно, так, но изменение температуры оказывает существенное влияние на ИФП данной конструкции. Это связано с тем, что стержни имеют далеко не микронные размеры и их удлинение вызывает смену базы. Кроме того, керамика BaTiO_3 и сама конструкция пьезокорректора склонны к воздействию температуры.

Для учета температурного влияния экспериментально исследована зависимость пропускания лазерного излучения 0.63 мкм ИФП от температуры термостата, на который он помещен. Термостат охлаждался парами жидкого азота до температуры -10°C . Лазерное излучение регистрировалось фотодиодом ФД-5Г и сигнал через усилитель подавался на самописец. Результат эксперимента представлен на рис. 4. Видно, что при охлаждении база ИФП изменяется на семь полуволн (на 2.2 мкм), при базе $d = 5.5$ мкм это 40 %, т. е. ИФП не является фактически маской для анализа NH_3 . Для достижения стабильности ИФП по температуре его можно термостатировать. Однако база интерферометра с течением времени изменяется незначительно, что приводит к изменению рабочей точки при сканировании с помощью пьезокорректора ИФП и, следовательно, изменению гармонического состава полезного сигнала и его амплитуды. По этой причине предусмотрена стабилизация параметров ИФП по спектральным параметрам анализируемого газа [13].

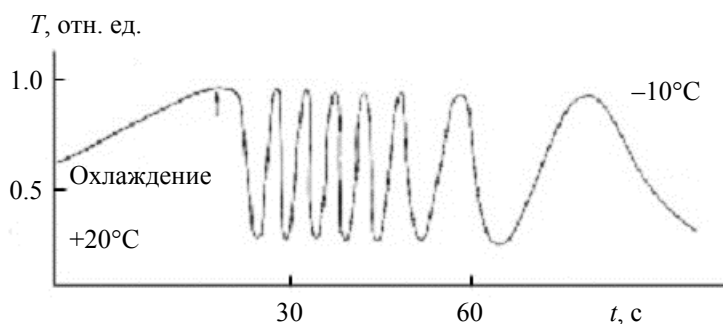


Рис. 4. Пропускание лазерного излучения ИФП в зависимости от температуры окружающей среды; $\lambda = 0.63$ мкм

Заключение. Для решения множества задач необходимы приборы для экспрессного выявления концентрации того или иного газа на трассах (в производственных помещениях, вдоль газопроводов, на производственных площадках и др.) [14], позволяющие определять усредненные концентрации загрязнителя в исследуемых регионах, изучать процессы переноса и диффузии атмосферного воздуха в кратчайшие сроки. Разработана конструкция прибора для демонстрации возможности использования интерферометра Фабри—Перо в качестве корреляционной маски. С его помощью продемонстрировано определение метана (а также аммиака) на трассе длиной до 50 м с использованием активного источника излучения. Структурная схема имеет высокую чувствительность, стабильна к мешающим внешним воздействиям среды. Систематическая погрешность анализа вызвана в основном отклонением пропускания анализируемой среды от номинального значения, принятого при калибровке прибора. Случайная составляющая погрешности в большой степени определяется флуктуациями постоянной составляющей сигнала и уменьшается с понижением концентрации анализируемого газа.

- [1] **В. Р. Козубовский.** Журн. прикл. спектр., **45**, № 3 (1986) 359—364 [**V. R. Kozubovskii.** J. Appl. Spectr., **45** (1986) 891—894]
- [2] **В. Р. Козубовский, В. Л. Голдовский, О. Д. Крайслер.** Корреляционный анализатор газа, а. с. 1182345 СССР, МКИ G01N 21/61, N 3722259/24-25; 30.09.85 (1985)
- [3] **В. Р. Козубовский, З. И. Перчи.** Газоанализатор, а. с. 1307993 СССР, МКИ G01N 21/35, N 3805414; 3.01.87 (1987)
- [4] **G. Fortunato.** Detecteus Interferometrique de Gaz, патент 2555747, Франция МКИ G01N 21/45, N 8319010; 31.05.85 (1985)
- [5] **G. Fortunato, A. Galais, D. Laurent.** Detecteur degas par interferometric, патент 2566532, Франция МКИ G01N 21/45, 21/61, N 8409882; 27.12.85 (1985)
- [6] **D. P. Mahapatra, S. K. Mattoo.** Appl. Opt., **25**, N 10 (1986) 1646—1649
- [7] **Р. Межерис.** Лазерное дистанционное зондирование, пер. с англ., Москва, Мир (1987)
- [8] **В. И. Малышев.** Введение в экспериментальную спектроскопию, Москва, Наука (1979)
- [9] **И. В. Скоков.** Многолучевые интерферометры в измерительной технике, Москва, Машиностроение (1989)
- [10] **А. Г. Жиглинский, В. В. Кучинский.** Реальный интерферометр Фабри-Перо, Ленинград, Машиностроение (1983)
- [11] **В. Р. Козубовский, В. Л. Голдовский, И. С. Лищенко.** Устройство для юстировки оптических элементов, а. с. 1322852 СССР, МКИ G01B 27/62, H01S 3/02, N 3898670/24-10; 8.03.87 (1987)
- [12] Исследование с целью разработки трассового измерителя аммиака в атмосфере: Отчет о НИР (заключительный). СКБ средств аналитической техники; 0570 267410; N ГР.01826001180, Ужгород (1984)
- [13] **V. Kozubovsky, Y. Bilak.** Ukr. J. Phys., **66**, N 8 (2021) 664—673
- [14] **В. Р. Козубовский, Ю. Ю. Билак.** Журн. прикл. спектр., **89**, № 1 (2022) 118—124