

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-77-31>

УДК 543.27.08

БЕЛЯКОВСЬКИЙ Володимир

Приватна компанія «Сучасні оптичні технології»

<https://orcid.org/0000-0572-2054-9797>

e-mail: [v.belyakovskiy@gmail.com](mailto:v.belyakovskiy@gmail.com)

ЗАЩЕПКИНА Наталія

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

<https://orcid.org/0000-0001-9397-6632>

e-mail: [nanic1604@gmail.com](mailto:nanic1604@gmail.com)

ВОЛОШИН Олександр

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

e-mail: [voloshin2111@gmail.com](mailto:voloshin2111@gmail.com)

## ЗАСТОСУВАННЯ ІНТЕРФЕРЕНЦІЙНИХ СВІТЛОФІЛЬТРІВ НА ОСНОВІ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ТА НАПІВПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

Проблема чистоти повітря є надзвичайно актуальною для сучасної України, а саме, підтримки стану навколишнього середовища, життєдіяльності людини, перспективного розвитку промисловості країни. Забруднення повітря залежить від кількості викидів з різних джерел забруднення, до яких доєдналися забруднення від військових дій. Причому наразі спостерігається досить низький рівень розвитку системи контролю стану навколишнього середовища. Для вирішення питань, які постали у зв'язку з погіршенням екологічної ситуації в країні, є практична необхідність у створенні інформаційно-мобільних вимірювальних систем, в склад яких входять сучасні прилади з використанням продуктивних, точних і дешевих сенсорів для виявлення й вимірювання гранично допустимої концентрації забруднюючих речовин у повітрі статті надані наданні відомості щодо порівняльного аналізу, наявних на ринку України газоаналізаторів вуглекислого газу різних моделей. Згідно аналізу, запропонована інформаційна система вимірювання концентрацій токсичних, агресивних та отруйних газів, в склад якої входить газоаналізатор авторської розробки. Інформаційно-вимірювальна система поєднує в собі малі габарити, достатню точність вимірювання, простоту конструкції газоаналізатору та дешевизну складання. Було розроблено макет стенду інформаційно-вимірювальної системи (ІВС), що надало можливість забезпечувати вимірювання складу повітря з використанням сучасних технологій.

У статті представлені відомості щодо конструкцій інтерференційних світлофільтрів на основі діелектричних та напівпровідникових матеріалів для видимої області електромагнітного та інфрачервоного спектру, які застосовані в конструкції газоаналізатору, розглянуто спосіб виготовлення світлофільтрів. Для визначення конструкції світлофільтрів використовувалась спеціальна програма розрахунку спектральної характеристики фільтру в залежності від кількості шарів-плівки матеріалу та самого матеріалу, що напильюється. Описано розроблені конструкції вузькосмугових світлофільтрів для лазерних випромінювачів на основі плівок із  $Si$  та  $SiO_2$ . Застосування запропонованих вузькосмугових світлофільтрів для лазерних випромінювачів на основі плівок із  $Si$  та  $SiO_2$ , сьогодні надало можливість досягти створення інформаційно-вимірювальної системи для визначення складу газів, що є актуальним сьогодні при підвищеному забрудненню навколишнього середовища, а саме, повітря, конче необхідного для життєдіяльності живих організмів. Отримані дані спрямовані на побудову комплексного обладнання для моніторингу навколишнього середовища, що дозволяє формувати обґрунтовані рекомендації, реагування, визначення та контролю, надасть можливість попереджати про забруднення повітря, що буде сприяти надання своєчасних заходів для його очищення.

Ключові слова: інформаційно-вимірювальна система, роздільна здатність, спектр, ультрафіолетові світлодіоди, фотодіоди, моніторинг середовища.

BELYAKOVSKI Volodymyr

Private company "Modern Optical Technology"

ZASHCHEPKINA Nataliia, VOLOSHYN Oleksandr

National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorskyi Kyiv Polytechnic Institute"

## APPLICATION OF INTERFERENCE LIGHT FILTERS BASED ON DIELECTRIC AND SEMICONDUCTOR MATERIALS

The problem of clean air is extremely relevant for modern Ukraine, namely, maintaining the state of the environment, human life, and the prospective development of the country's industry. Air pollution depends on the amount of emissions from various sources of pollution, to which pollution from military operations has been added. Moreover, there is currently a rather low level of development of the environmental control system. To solve the issues that have arisen in connection with the deterioration of the ecological situation in the country, there is a practical need to create information and mobile measuring systems, which include modern devices using productive, accurate and cheap sensors for detecting and measuring the maximum permissible concentration of pollutants of substances in the air, the article provides information on a comparative analysis of different models of carbon dioxide gas analyzers available on the Ukrainian market. According to the analysis, an information system for measuring concentrations of toxic, aggressive and poisonous gases is proposed, which includes a gas analyzer developed by the author. The information and measurement system combines small dimensions, sufficient measurement accuracy, the simplicity of the gas analyzer design, and the low cost of assembly. A mock-up of the Information and Measurement System stand was developed, which made it possible to measure the composition of the air using modern technologies.

The article provides information on the comparative analysis of different models of carbon dioxide gas analyzers available

on the Ukrainian market. According to the analysis, an information system for measuring concentrations of toxic, aggressive and poisonous gases is proposed, which includes a gas analyzer developed by the author. The information and measurement system combines small dimensions, sufficient measurement accuracy, the simplicity of the gas analyzer design, and the low cost of assembly. A mock-up of the Information and Measurement System stand was developed, which made it possible to measure the composition of the air using modern technologies. The article presents information on the designs of interference light filters based on dielectric and semiconductor materials for the visible region of the electromagnetic and infrared spectrum, which are used in the construction of a gas analyzer, and the method of manufacturing light filters is considered. To determine the design of the light filters, a special program was used to calculate the spectral characteristics of the filter depending on the number of film layers of the material and the sprayed material itself. The developed designs of narrowband light filters for laser emitters based on Si and SiO films are described. The application of the proposed narrow-band light filters for laser emitters based on films of Si and SiO today made it possible to achieve the creation of an information and measurement system for determining the composition of gases, which is relevant today with increased pollution of the environment, namely, air, which is absolutely necessary for the vital activity of living organisms. The obtained data are aimed at building complex equipment for monitoring the environment, which allows for the formation of reasonable recommendations, response, determination and control, will provide an opportunity to warn about air pollution, which will facilitate the provision of timely measures for its purification.

Key words: information and measurement system, resolution, spectrum, ultraviolet leds, photodiodes, environmental monitoring.

### Постановка проблеми у загальному вигляді

#### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Актуальність проблеми збереження навколишнього середовища для життєдіяльності людини неможливо переоцінити. Цією проблемою вчені всього світу займаються на протязі десятиліть, результати обговорюються на наукових конференціях різного рівня та публікуються в наукових виданнях.

Для України вирішення проблеми збереження навколишнього середовища після повномасштабного вторгнення Росії стало надзвичайно важливим, як для підтримки життєдіяльності людини, так і для перспективного розвитку промислового сектору країни. Для вирішення питань, які постали у зв'язку з погіршенням екологічної ситуації в країні, існує практична необхідність у створенні інформаційних вимірювальних систем (ІВС), приладів, конструктивним базисом яких є використання продуктивних, точних і дешевих сенсорів, для виявлення і вимірювання гранично допустимої концентрації забруднюючих речовин у повітрі.

Було прийняте рішення щодо розробки ІВС для контролю вмісту шкідливих речовин в повітрі.

Для створення сучасної портативної інформаційно-вимірювальної системи по визначенню концентрації шкідливих речовин у повітрі, а саме вуглекислого газу, було розглянуто її складові. Насамперед, основним елементом ІВС для визначення та контролю якості повітря є газоаналізатор.

Аналіз приладів для газового аналізу, які використовуються в Україні показав, що сьогодні використовуються, переважно досить прості та дешеві закордонні моделі, ознакою яких є низький термін служби, посередня точність, при відсутності метрологічного забезпечення (табл. 1).[1-3].

Таблиця 1.

#### Порівняльна таблиця характеристик портативних газоаналізаторів, які використовуються в Україні

Газоаналізатор	Діапазон вимірювання	Похибки вимірювання
Дозор-С-П	0 - 1%, 0 - 5%, 0 - 20%, 0 - 100%	±0,060, ±0,25, ±1,25, ±5
121 ФА-01, 122 ФА-01, 123 ФА-01	0 - 6%, 0 - 10%	±0,2, ±0,4
305 ФА-02(МАРС-5)	для CO 0 - 15 г/м <sup>3</sup>	±10%
АНКАТ-7664Мікро	0 - 2, 0 - 5, 0 - 10	±0,1%, ±0,25%, ±0,5%
Greisinger G1910	0 - 2000, 0 - 20000	±0,2%, ±2%
TENMARS ST-501 sirius	0 - 9999 (ppm, мг/л)	±75 ppm

З огляду на конструкції оптико-абсорбційних газоаналізаторів вуглекислого газу у замкнених приміщеннях та їх технічні характеристик, які наведено у таблиці 1, було прийнято рішення розробити конструкцію оптико-абсорбційного газоаналізатора зі спектральним розділенням каналів з урахуванням виявлених недоліків.

Для спрощення конструкції газоаналізатора, підвищення надійності його роботи прийнято рішення щодо зменшення його конструктивних елементів.

В оптичному абсорбційному газоаналізаторі представлений на рис.1. [1-3]Для розділення інфрачервоного випромінювання на робочий та опорний канали в газоаналізаторі використане селективне інтерференційне дзеркало. Розділення світлового потоку шляхом введення у конструкцію газоаналізатора селективного інтерференційного дзеркала 4 дозволяє використати одну вимірювальну кювету та, тим самим, досягти зменшення можливих неселективних втрат випромінювання. А це в свою чергу, впливає на точність вимірів концентрації газів, зменшення кількості конструктивних елементів, підвищення надійності приладу. Відсутність у конструкції газоаналізатора рухомих частин створює умови для зменшення шумів - це спосіб підвищення точності вимірювань [1-4].

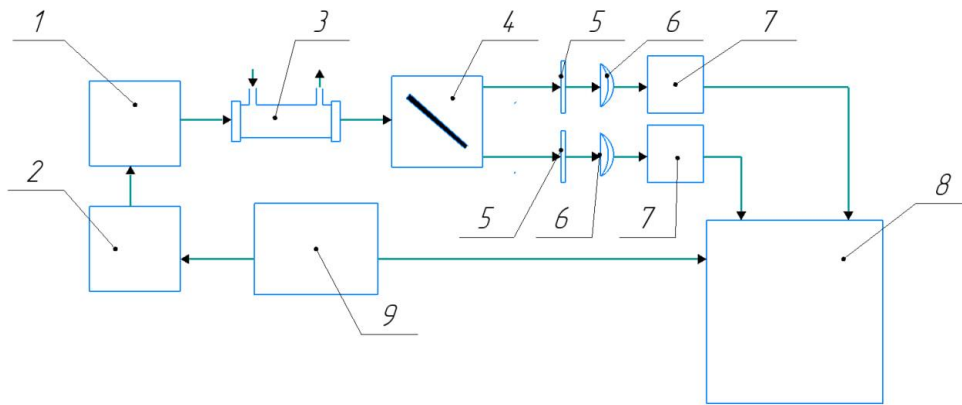


Рис. 1. Блок схема газоаналізатора:

1- джерело випромінювання; 2 - генератор імпульсів струму; 3 - газова к вимірювальна кювета; 4 - вузол селективного дзеркала; 5 - світлофільтри; 6 - фокусуєчі елементи; 7 - фотоприймачі; 8 - мікроконтролер та індикація.

В якості джерела випромінювання використане широкопasmове джерело, що при достатній потужності забезпечує можливість модуляції випромінювання з частотою до 5 Гц, при коефіцієнті модуляції на рівні 0,7-08. При необхідності може бути розглянута можливість застосування твердотільних модуляторів

Фотодетектори електрично з'єднані з блоком обробки інформації. Як засіб розділення інфрачервоного випромінювання на робочий та опорний канали використане селективне інтерференційне дзеркало. Блок-схема газоаналізатора: джерело випромінювання; генератор імпульсів струму; газова к вимірювальна кювета; вузол селективного дзеркала; світлофільтри; фокусуєчі елементи; фотоприймачі; - мікроконтролер та індикація [1,3].

Було розроблено макет ІВС) для вимірювання концентрації вуглекислого газу в приміщенні (рис. 1,2).

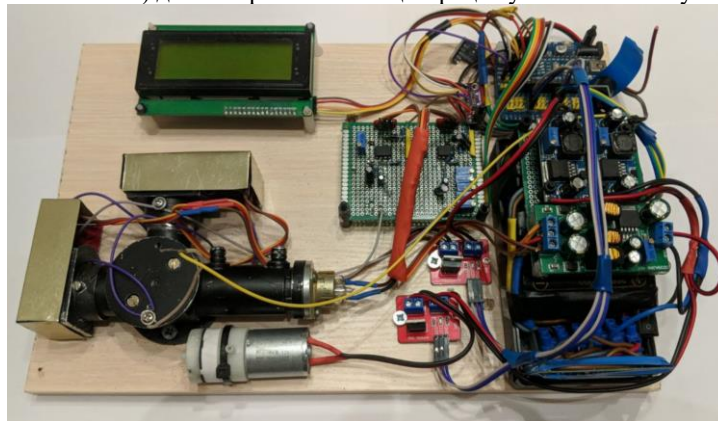


Рис. 2. Фото експериментального макету розробленої ІВС

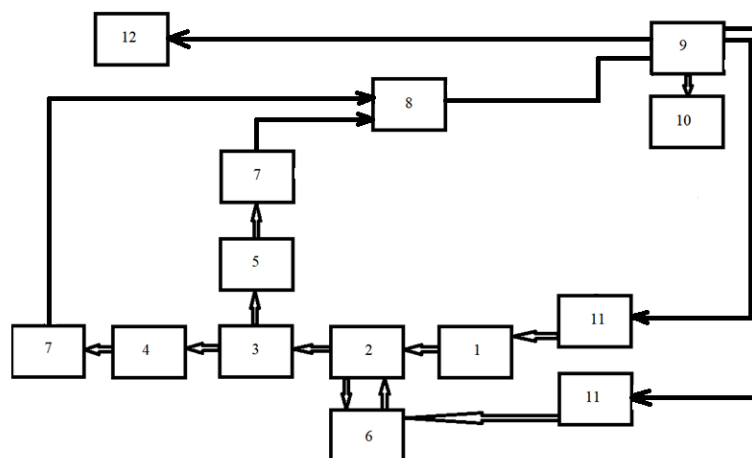


Рис.3 Структурна схема розробленої ІВС: 1 - джерело випромінювання; 2 – вимірювальна кювета; 3- дзеркальний дільник інфрачервоного випромінювання; 4 – приймач інфрачервоного випромінювання вимірювального канал; 5 - приймач інфрачервоного випромінювання опорного каналу; 6 – мікрокомпресор; 7 – первинні підсилювачі; 8 – інвертор та обмежувач напруги; 9 – мікроконтролер; 10 – динамік; 11 – ключі керування; 12 – дисплей.

Блок живлення, який має наступні характеристики: акумулятори з вихідною напругою 12 В. Блок живлення має наступні виходи +15В, -15В, +5В, +3.3В, +3.8В, +12В та заземлення.

Вимірювання концентрації газу проводиться за законом зворотного перетворення Ламберта Бугера Бера. При включенні приладу вмикається блок живлення та подаються відповідні напруги на блоки. Команда «вимірювання» включає мікрокомпресор (6), який через повітряний фільтр на протязі 5 секунд забезпечує подачу вимірюваного повітря в кювету(2), та після затримки на 5 секунд подачу імпульсного току живлення з частотою близько 2,5 Гц на інфрачервоне джерело випромінення (1), при цьому імпульси світлового потоку через прозорі в ІЧ діапазоні вікна з лейко сапфіру надходять в газову вимірювальну кювету(2), де відбувається поглинання світлового потоку газовою сумішшю у спектральній області полоси поглинання CO<sub>2</sub>. ІЧ випромінення з довжиною хвилі опорного каналу 3750 нм не поглинається газовою сумішшю.

Вузол селективного дзеркала (3) слугує для просторового рознесення випромінення з різними довжинами хвилі, для цього розташовано під кутом 45<sup>0</sup>, та має наступні характеристики:

Область високого пропускання для випромінення з довжинами хвиль від 4000нм до 5000нм, та область високого відбиття для діапазону довжин хвиль від 3000нм до 3900 нм. Таким чином, випромінення з довжиною хвилі 4300 нм без перешкод потрапляє на вузькосмуговий світлофільтр вимірювального каналу і далі через фокусуєчи елемент- на відповідний фотоприймач(4), а випромінення з довжиною хвилі опорного каналу- в такій же послідовності на свій фотоприймач(5), що розташований під кутом 90<sup>0</sup> до приймача вимірювального каналу.

Імпульси випромінення, що пройшли через відповідні світлофільтри та фокусуєчи елементи, викликають електричний відклик у своїх фотоприймачах.

Застосовані піроелектричні фотоприймачі із вхідними вікнами із просвітлених пластин кремнію з максимальним пропусканням в області 3500-4500 нм. Фотоприймачі розташовані на платах з попередніми підсилювачами(7) та елементами фільтрації живлення, що механічно зв'язані з фокусуєчими елементами (фоконами), вузлом селективного дзеркала(3), кюветою(2) та джерелом випромінювання(1) та виконані у вигляді моноблоку.

У зв'язку із великою інерційністю ІЧ джерела, наростання та спад інтенсивності відбуваються по експоненціальній кривій, тому зчитування інформації про величину сигналу по відповідним каналам відбувається з достатньою затримкою після початку імпульсу, тому враховується затримка з метою запобігання електричних наводок на ланцюги фотоприймача за рахунок перехідних процесів при достатньо потужному імпульсу (у декілька ампер) при вмиканні джерела. Після обробки сигналу на первинних підсилювачах (7) сигнал, через інвертор та обмежувач напруги(8), надходить на АЦП, що виконує відповідне перетворення сигналу та мікроконтролер (9), який виконує зчитування сигналів по каналам(4) та (5), накопичення для підвищення відношення сигнал/шум, обробку сигналів по зворотному перетворенню Ламберта Бугера Бера та врахування поправок по температурі газової суміші та тиску газу в кюветі від відповідних датчиків. З мікроконтролера подаються сигнали: на ключі керування(11), які відповідають за вмикання компресора та джерела випромінювання (1); на динамік(10), який дає звуковий сигнал після завершення кожного вимірювання із циклу; на дисплей (12), який відображає результат кожного вимірювання із циклу та допоміжні коефіцієнти. Характеристика ІВС наведена в таблиці 2.

Таблиця 2.

Характеристики ІВС

Діапазон вимірюваних концентрацій	0 - 1%
Основна похибка	0.05 %
Розміри ІВС	Довжина - 297мм
	Ширина - 210мм
	Висота - 100мм
Вага	2 кг
Напруга живлення ІВС	12 В
Тривалість циклу вимірювання	1 хв
Планований термін придатності	7 років
Робоча температура	20 <sup>0</sup> С
Робочий тиск повітря	760 мм. рт. ст.

Одним з найбільш перспективних напрямків робіт при створенні аналітичної техніки є застосування світлофільтрів в якості монохроматизуючих елементів. Це зумовлено високими експлуатаційними характеристиками світлофільтрів на основі оксидів металів, та напівпровідників, таких як германій та кремній. Світлофільтри на основі оксидів для ультрофіолетового (УФ) та видимого діапазонів, та кремній-оксид кремнію, або германій- оксид кремнію (в залежності від спектрального діапазону) мають високу стабільність параметрів у часі та в залежності від температури[3,4].

Напилення світлофільтрів виконувалось на установці вакуумного напилення ВУ 1А, із системою фотометричного контролю СФКТ 7511 за допомогою електронно променевої гармати та резистивним способом. Заготовка германію (Ge) розміщувались у мідному водоохолоджуваному тиглі, монооксид кремнію для резистивного випаровувача був розташований в човнику з танталу чи вольфраму, підкладки з полірованого лейкосапфіру розміщувались у касетах, після чого проводилась відкачка робочої камери до тиску  $1 \times 10^{-5}$  Па та нагрів арматури до  $180^{\circ}\text{C}$ . Напилення проводилось при прискорюючій напрузі 12 кВт. Параметри світлофільтрів після напилення вимірювались на спектрофотометрі SPECORD IR 75.

Інтерференційні світлофільтри, як засіб монохроматизації випромінювання, застосовується в багатьох галузях приладобудування, спектроскопії, аналітичній техніці, у точному машинобудуванні. При виборі параметрів світлофільтрів для вирішення конкретного завдання фотометрії потрібно враховувати ряд факторів, які суттєво впливають на процес вимірювання. Світлофільтри характеризуються рядом параметрів, таких як: довжина хвилі центра полоси пропускання  $\lambda_0$ , коефіцієнт пропускання  $T_{\text{макс}}$ , ширина полоси пропускання на рівні 0,5  $T_{\text{макс}}$   $\Delta\lambda_{0,5}$ , ширина полоси пропускання на рівні 0,  $T_{\text{макс}}$   $\Delta\lambda_{0,1}$ , та остаточне пропускання в неробочій ділянці спектру. Застосування інтерференційних світлофільтрів в аналітичній техніці потребує детального аналізу спектрів поглинання речовини що аналізується та супутніх домішок в багатокомпонентних сумішах.

Вибір параметрів, таких як довжина хвилі  $\lambda_0$ , півширина, та технологічний допуск на відхилення довжини хвилі від заданої проводиться на основі розрахунку коефіцієнтів поглинання випромінювання речовиною при заданій довжині пробігу в результаті та самого матеріалу, що напилюється. Ретельним аналізом полос поглинання супутніх газів вибрано довжину хвилі опорного каналу в діапазоні 3750 - 3900 нм, півширина цього світлофільтра може складати 80-90 нм, а область блокування, в залежності від спектрального діапазону чутливості фотоприймача, від 2000 нм – до 7000 нм.

Світлофільтр вимірювального каналу у спектральному відношенні, розміщується на пологій довгохвильовій гілці полоси поглинання, щоб забезпечити достатню лінійність зворотнього перетворення Бугера-Ламберта-Бера. Було вибрано довжину хвилі центру пропускання світлофільтра 4300 нм при півширині близько 120 нм. Селективне дзеркало може бути виконане на підкладці з полірованого лейкосапфіру, або монокристалічного кремнію, напиленням багатошарового покриття матеріалів з високим та низьким показниками заломлення, наприклад Ge-SiO<sub>2</sub>, або Si-SiO<sub>2</sub>. Дзеркало має мати високий коефіцієнт відбиття для довжини хвилі опорного каналу та високий коефіцієнт пропускання для довжини хвилі вимірювального каналу при куті падіння  $45^{\circ}$ . Довгохвильовий фронт кривої пропускання мусить мати достатню крутизну, щоб забезпечити пропускання для  $\lambda = 4300$  нм  $T \geq 85\%$ . Таким критеріям відповідають конструкція з 15 шарів Si-SiO<sub>2</sub> оптичною товщиною  $\lambda/4$ , при тому перший та останній шари мають оптичну товщину  $\lambda/8$  для згладжування спектральної кривої. На рисунках 3,4 наведені спектральні характеристики відрізаючого світлофільтра та вузькосмугового світлофільтра вимірювального каналу.

Для визначення впливу температури на поглинання енергії первинного перетворювача за рахунок розширення полоси поглинання та підвищення коефіцієнтів екстинкції, проведено розрахунок спектру поглинання CO<sub>2</sub> тієї ж концентрації для температури  $50^{\circ}\text{C}$ . Відношення коефіцієнтів поглинання при зміні температури від довжини хвилі центру смуги світлофільтра приведено на рисунку 4.

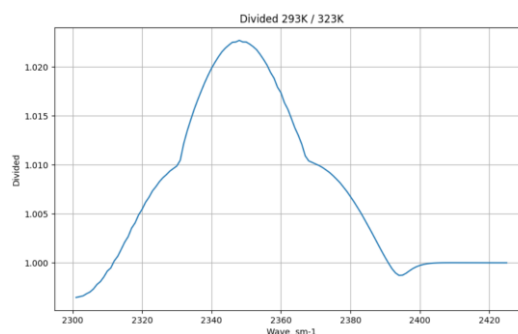


Рис. 4 Залежність відношення поглинань середі при різних температурах ( $20^{\circ}\text{C}$  та  $50^{\circ}\text{C}$ ) від довжини хвилі

На рисунку 5 представлено графік залежності відносного поглинання енергії у первинному перетворювачі від довжини хвилі центра пропускання світлофільтра. Розрахунок виконаний програмою RADIS для концентрації  $T$  CO<sub>2</sub> в 0,2 об'ємних відсотках для довжини пробігу 50 мм, при тиску 760 мм рт.ст. та температурі  $20^{\circ}\text{C}$ . Ілюстративне зображення конструкції вузькосмугового світлофільтра наведено на рис.6.

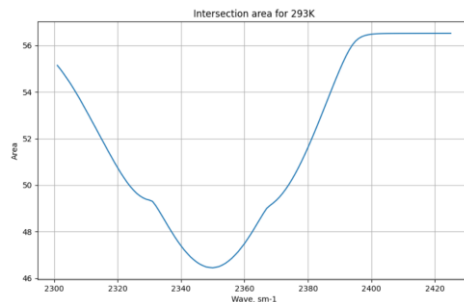


Рис. 5. Графік залежності відносного поглинання енергії у первинному перетворювачі від довжини хвилі центра пропускання світлофільтра

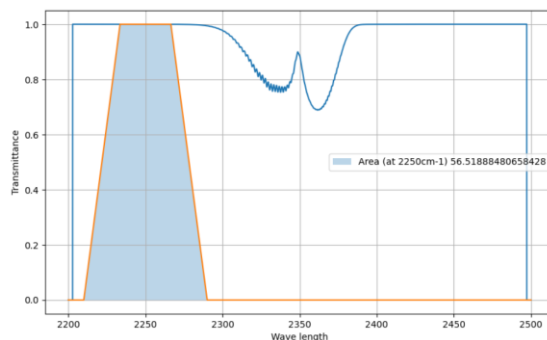


Рис. 6. Ілюстративне зображення конструкції вузькосмугового світлофільтра та точки спектра із найменшим приростом сигналу при зміні температури

Із аналізу графіків зрозуміло, що максимальний приріст сигналу відбувається на довжині хвилі  $2347 \text{ cm}^{-1}$ , також на цій довжині хвилі має місце мінімальна залежність приросту сигналу від температури. Приведені спектри поглинання вуглекислого газу та модель характеристики світлофільтра, який представлений трапецією та має пропускання 100%, ширину на рівні  $0.5T$  макс  $56 \text{ cm}^{-1}$  та  $33 \text{ cm}^{-1}$ .

Селективне інтерференційне дзеркало виконане на підкладці з полірованого лейкосапфіру, напленням багат шарового покриття матеріалів з високим та низьким показниками заломлення, а саме Ge-SiO. Дзеркало має високий коефіцієнт відбиття для довжини хвилі опорного каналу та високий коефіцієнт пропускання для довжини хвилі вимірювального каналу при куті падіння  $45^\circ$  (рис.7).

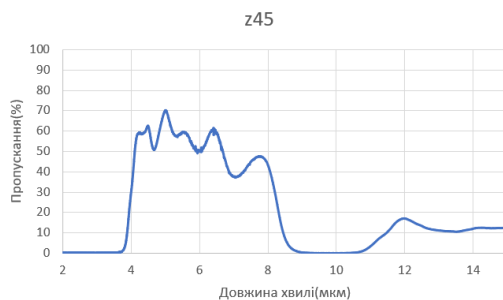


Рис.7. Залежність пропускання від довжини хвилі опорного каналу

Згідно до аналізу смуг поглинання супутніх газів було обрано довжину хвилі опорного каналу в діапазоні 3750 - 3900 нм, півширина цього світлофільтра може складати 80-90 нм, а область блокування, в залежності від спектрального діапазону чутливості фотоприймача, від 2000 нм – до 7000 нм.

Світлофільтр вимірювального каналу у спектральному відношенні розміщено на пологій довгохвильовій гілці смуги поглинання, щоб забезпечити достатню лінійність зворотнього перетворення Бугера-Ламберта-Бера. Було обрано довжина хвилі центру пропускання світлофільтра 4300 нм при півширині близько 120 нм (рис. 8, 9)



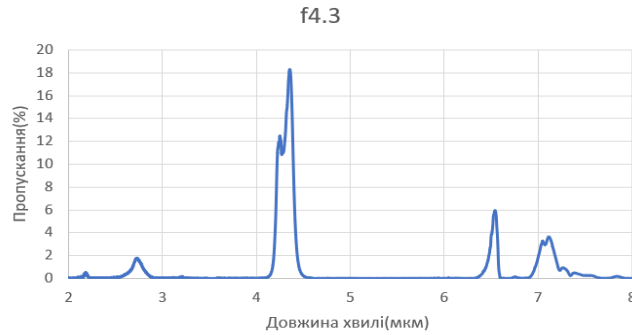


Рис. 8. Залежність пропускання через світлофільтр вимірювального каналу від довжини хвилі

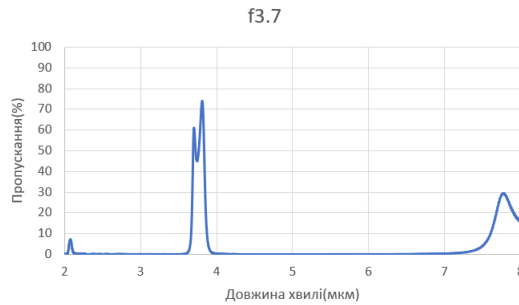


Рис. 9. Залежність пропускання через світлофільтр опорного каналу від довжини хвилі

Канали розділяються за допомогою інтерференційного селективного дзеркала на вимірювальний та опорний. До переваг запропонованої системи слід віднести відсутність рухомих механічних деталей, зокрема пристроїв модуляції каналів, що дає підвищену точність вимірювання та знижену вірогідність виходу з ладу; відсутність часового рознесення світлових каналів, що дозволяє уникнути додаткових заходів із герметизації оптичного каналу від проникнення вимірюваних газів, особливо при високих концентраціях або при великих коефіцієнтах поглинання, що також підвищує точність вимірювання.

Після проходження газової кювети, електромагнітні коливання потрапляють на світлороздільний фільтр, що розташований під кутом 45 градусів та розділяє пучок світла за спектром. Світло, що має довжину хвилі до 3.9 мкм відбивається під кутом 90 градусів та, через інтерференційний вузькосмуговий світлофільтр порівняльного каналу та фокусуючий елемент, потрапляє на відповідний фотоприймач. Частина світла із довжиною хвилі більше вищезгаданої границі – пропускається далі по вимірювальному каналу. Перед потраплянням пучка світла довжиною хвилі більше 3.9 мкм до фотоприймача у вимірювальному(основному) каналі, цей пучок проходить через інший інтерференційний вузькосмуговий світлофільтр, який пропускає електромагнітні коливання у діапазоні 4.22 – 4.34 мкм ( $\Delta\lambda 0.5 = 120$  нм, центр смуги пропускання – 4.28 мкм). Частина пучка світла, довжина хвилі якого становить менше 3.9 мкм, відбивається, потрапляє до порівнювального каналу та проходить через світлофільтр, що пропускає у діапазоні 3.72 – 3.88 мкм ( $\Delta\lambda 0.1 = 160$  нм, центр смуги пропускання – 3.8 мкм). Світлофільтр, що стоїть у опорному каналі, підбирається таким чином, щоб краї смуги пропускання не накладалися на смугу поглинання вуглекислого газу, задля уникнення неточності виміру. Сильна смуга поглинання вуглекислого газу знаходиться у районі 4,25-4,35 мкм, що відповідає обраному нами діапазону для вимірювального каналу газоаналізатора. Для створення програмного забезпечення ІВС була використана серія розробки Arduino IDE v 2.2.1. Програмний код написаний на мові C++, розроблений для мікроконтролера, який керує роботою дисплея, мікрокомпресора, датчика контролю тиску та джерела випромінювання. Обчислення кінцевого результату, з урахуванням коефіцієнтів температури та тиску здійснюється за формулою  $C = \ln(U_{\text{вим}}/U_{\text{оп}}) \cdot K_T \cdot K_P$ , де  $U_{\text{вим}}$  – значення вихідної напруги з вимірювального каналу,  $U_{\text{оп}}$  – значення вихідної напруги з опорного каналу,  $K_T$  – коефіцієнт температури,  $K_P$  – коефіцієнт тиску.

#### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Обґрунтовано необхідність створення інформаційно-вимірювальної системи шляхом впровадження нового конструктивного рішення, а саме: розділення вимірювальних каналів за спектром, що дозволить збільшити точність розроблюваного пристрою газоаналізатору, порівняно з аналогами, а саме, АНКAT-7664Мікро, Greisinger G1910, TENMARS ST-501 sirius. Створено макет інформаційно-вимірювальної системи для вимірювання концентрації вуглекислого газу у приміщенні з використанням конструкції авторського газоаналізатора, описано принципову схему системи контролю та характеристики ІВС (діапазон вимірюваних концентрацій 0-1%, похибка вимірювань складає до  $\pm 0.03$  % - зменшення похибки вимірювань

від  $\pm 0.17\%$  до  $\pm 4.97\%$ , розміри: 297мм x 210мм x 100мм, вага 2 кг, тривалість вимірювання - 1 хв, очікуваний термін роботи – 7 років). При розробці макету ІВС, було проведено дослідження залежності додаткової похибки газоаналізатора від параметрів світлофільтрів при зміні температури середовища, було обрано довжину хвилі опорного каналу в діапазоні 3750 - 3900 нм, півширина цього світлофільтра може складати 80-90 нм, а область блокування, в залежності від спектрального діапазону чутливості фотоприймача, від 2000 нм – до 7000 нм. Написано програмний код у середі розробки Arduino IDE на мові C++, та апробовано його роботу на практиці, що дозволило спростити термін отримання результатів вимірювання до 1 хвилини.

#### **Література**

1. Патент на корисну модель UA 150316 U МПК G01N 21/61 «Оптичний абсорбційний газоаналізатор/ Волошин О.В., Беяковський В.А.// 26.01.2022, Бюл.№ 4.
2. Беяковський В. Розробка прототипу інформаційно-вимірювальної системи для вимірювання концентрацій токсичних, агресивних та отруйних газів/ В. Беяковський, Н. Защепкіна, О. Волошин// Вимірювальна та обчислювальна техніка в техноло-гічних процесах. № 4. 2023. С.82- 66.
3. Волошин, О. В. Інформаційно-вимірювальна система вимірювання концентрації вуглекислого газу у приміщенні : магістерська дис. : 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка / Волошин Олександр Васильович . – Київ, 2024. – 95 с.
4. Кособуцький П.С. Метод обвідних в інтерферометрії Фабрі-Перо: Монографія. - Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. - 228 с.

#### **References**

1. Patent for a utility model UA 150316 U IPC G01N 21/61 "Optical absorption gas analyzer/ O.V. Voloshyn, V.A. Belyakovskii// 01/26/2022, Bull. No. 4.
2. Belyakovskii V. Development of a prototype information-measuring system for measuring concentrations of toxic, aggressive and poisonous gases/ V. Belyakovskii, N. Zashchepkina, O. Voloshyn// Measuring and computing equipment in technological processes. No. 4. 2023. P.82-66.
3. Voloshyn, O. V. Information and measurement system for measuring the concentration of carbon dioxide in the room: master's thesis. : 152 Metrology and information-measuring technology / Oleksandr Vasyliovych Voloshyn. - Kyiv, 2024. - 95 p.
4. Kosobutsky P.S. The contour method in Fabry-Perot interferometry: Monograph. - Lviv: Publishing House of Lviv Polytechnic, 2013. - 228 p.