
ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

УДК 621.375; 543.272

В.С. ОСАДЧУК¹, О.В. ОСАДЧУК¹, В.Ф. ЯРЕМЧУК², Н.С. КРАВЧУК², С.М. СМІШНИЙ¹

ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ГАЗУ

¹*Вінницький національний технічний університет,
21021, Хмельницьке шосе, 95, м.Вінниця, Україна,
Тел.: (0432) 59-84-81; E-mail: osadchuk69@mail.ru*

²*Вінницький державний педагогічний університет
ім. М. Коцюбинського, м.Вінниця, Україна*

Анотація. Розглянуто основні принципи побудови волоконно-оптичних систем реєстрації газів, зокрема CH₄, C₃H₈, C₂H₄, C₂H₂, H₂, NH₃ та pH. Представлено приклади використання волокна, як оптичного тракту, і як чутливого елемента, для побудови волоконно-оптичних газоаналізаторів. Огляд доводить доцільність практичного використання існуючих конструкцій і матеріалів та розробки нових систем для створення волоконно-оптичних перетворювачів газу, які сумісні з сучасними вимірювальними приладами аналізу робочих характеристик волоконно-оптичних ліній зв'язку, що забезпечує можливість дистанційного контролю газів.

Аннотация. Рассмотрены основные принципы построения волоконно-оптических систем регистрации газов, в частности CH₄, C₃H₈, C₂H₄, C₂H₂, H₂, NH₃ и pH. Представлено примеры использования волокна, как оптического тракта, и как чувствительного элемента, для построения волоконно-оптических газоанализаторов. Обзор показывает целесообразность практического использования существующих конструкций и материалов и разработке новых систем для создания волоконно-оптических преобразователей газа, которые совместимые с современными измерительными приборами анализа рабочих характеристик волоконно-оптических линий связи, что обеспечивает возможность дистанционного контроля газов.

Abstract. Basic principles of construction of the fiber optical systems of registration of gases are considered, in particular CH₄, C₃H₈, C₂H₄, C₂H₂, H₂, NH₃ and pH. The examples of the use of fiber are presented, as an optical highway, and as a sensible element, for the construction of fiber optical gas analyzers. A review is shown by expedience of the practical use of existent constructions and materials and to development of the new systems for creation of fiber optical transformers of gas, which consonant with the modern measuring devices of analysis of workings descriptions of fiber optical communication lines, that provides a controlled from distance checking of gases feature.

Ключові слова: волоконно-оптичні сенсори, частота, концентрація газу.

ВСТУП

З кожним роком розширюються номенклатура та області застосування волоконно-оптичних первинних вимірювальних перетворювачів і приладів на їх основі [1]. Не стала винятком і область газовимірювальної техніки. Застосування волоконних трактів у складі спектрометрів і хроматографів надзвичайно розширює технічні можливості застосування спектральних методів дослідження речовин у промисловості. Зокрема, використовуючи волоконні сенсори (ВС), можна проводити вимірювання в багатьох точках одночасно. При низькій концентрації досліджуваних речовин доцільно застосовувати багатопрохідні комірки. Завдяки цьому різко підвищується чутливість. Наприклад, вдається вимірювати концентрацію метану з похибкою не більше ±0,05 % при довжині ВС до 3 км [1].

ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

На рис. 1. зображено деякі хімічні сполуки та відповідні їм довжини хвиль в області 2-11 мкм. У цьому випадку необхідно використовувати халькогенідне скло [1].

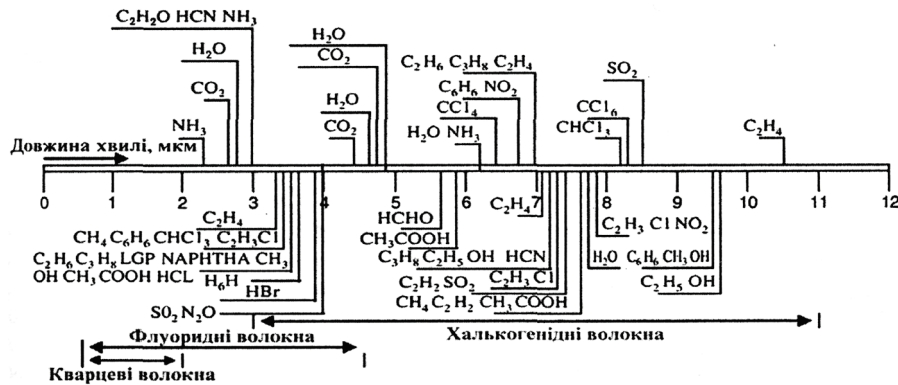


Рис. 1. Інфрачервоне поглинання продуктів харчування, ліків, пластмас, газів, а також типи оптичних волокон відповідно до довжини хвилі

Одним з найнебезпечніших газів повітряного середовища виробничих ділянок є метан (CH_4). Він не тільки токсичний для робочого персоналу, але і утворює з повітрям вибухонебезпечну суміш з нижньою границею вибуху (НГВ) 5% об. CH_4 . Проводяться інтенсивні дослідження по створенню волоконно-оптичних датчиків (ВОД) концентрації метану [2], принцип дії яких ґрунтується на явищі спектрального оптичного поглинання. ВОД вільні від недоліків, наприклад, електричних датчиків (низька швидкодія, мала чутливість, низька селективність щодо газів, швидке отруєння каталізатора, необхідність частих калібрувань, незахищеність від дії електромагнітних завад), крім того, вони органічно поєднуються з сучасними волоконно-оптичними системами передачі інформації, що забезпечує можливість дистанційного контролю метану в атмосфері [3].

Всі волоконно-оптичні хімічні датчики за принципом дії можна умовно поділити на два класи:

- датчики, в яких чутливий елемент знаходиться поза волоконно-оптичним кабелем (ВОК) (або світловодом);
- датчики, в яких чутливим елементом є сам ВОК (або світловод) [4].

У першому випадку волокно виступає, як передавальний пристрій оптичного сигналу, тобто, як оптичний тракт. У другому, як чутливий елемент, який сприймає та реагує на вимірювальний подразник навколишнього середовища, та в подальшому, знову ж таки, передає оптичний сигнал, який містить інформативний параметр до кінцевого реєструючого пристрою.

Розглянемо приклад використання волокна, як оптичного тракту, для побудови волоконно-оптичних газоаналізаторів (ВОГА) [5]. Винахід відноситься до техніки аналітичного і вимірювального приладобудування для виявлення і визначення концентрації газів і може бути використане у вугільній, хімічній, нафтопереробній, газовій і інших галузях промисловості. На кресленні (рис.2) показана блок-схема запропонованого газоаналізатора.

Газоаналізатор містить імпульсний випромінювач 1 із спектральною смугою випромінювання, що перекриває лінії поглинання і прозорості досліджуваного газу, вхідне оптичне волокно 2, багатোধодову оптичну кювету, що

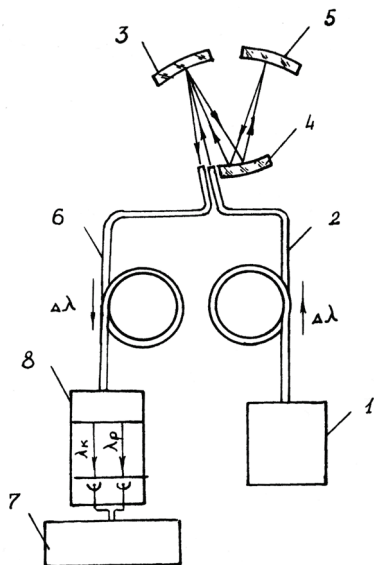


Рис.2. Блок-схема волоконно-оптичного газоаналізатора (ВОГА)

складається з трьох сферичних дзеркал -3, -4, -5, вихідне оптичне волокно 6, блок реєстрації і обробки інформації 7, спектральний інтегральний демультиплексор 8.

Запропонований газоаналізатор працює таким чином. Випромінювання спектральною шириною $\Delta\lambda$ від випромінювача 1 з частотою імпульсів, яка узгоджена з блоком реєстрації і обробки інформації,

вводиться в оптичне волокно 2, інший торець якого встановлений на подвійній фокусній відстані від дзеркала 3 багатоходової кювети на продовженні поверхні дзеркала 4 на відстані 200 мкм від його краю. Оскільки апертура випромінювання, що виходить з волокна, збігається з апертурою вхідного і вихідного випромінювання багатоходової кювети, то оптичне випромінювання DI , пройшовши заздалегідь встановлену в кюветі довжину оптичного шляху, фокусується на торець вихідного оптичного волокна 6, встановленого на відстані 200 мкм від середини торця волокна 2 в одній з ним площині. Випромінювання, що пройшло через кювету з досліджуванним газом, по вихідному волокну 6 поступає в спектральний інтегральний демультіплексор 8, на виході якого випромінювання шириною по 10-15 ангстремів формується (для одного газу) на два приймачі, один з яких реєструє випромінювання, яке збігається з лінією прозорості газу λ_k , а інший – випромінювання, яке співпадає з лінією поглинання газу λ_p .

Блок реєстрації і обробки інформації 7 реєструє відношення сигналів від випромінювань, що дійшли до приймачів в лініях поглинання і прозорості газу, порівнює з даними градування і інформацію про концентрацію досліджуваного газу видає в зручному для оператора вигляді.

Таким чином, запропонований волоконно-оптичний прилад для дистанційного аналізу газів дозволяє реєструвати одночасно концентрацію декілька газових компонентів, смуги поглинання і прозорості яких розташовані поблизу одна від одної і в межах смуги випромінювання випромінювача.

У окремому випадку, наприклад, запропонований газоаналізатор може бути використаний для виявлення вибухонебезпечної концентрації метану у вугільних шахтах на довжині хвилі поглинання 1,665 мкм. Розрахунки показують, що використання в схемі газоаналізатора кварцового демультіплексора і кварцових волокон з втратами енергії не більше 0,6 дБ на км, дають можливість реєструвати метан на відстанях (по довжині волоконного кабелю) до 5 км і більш.

Розглянемо приклад використання волокна, як чутливого елемента, для побудови волоконно-оптичних газоаналізаторів (ВОГА) [6].

Волоконно-оптичний газовий датчик (рис.3), який має кристалічне волокно з порожнистим ядром. Датчик включає джерело світла 9, оптичне волокно 2 по якому поширюється світлова хвиля 1, корпус 5, приймач випромінювання 11. Оптичне кристалічне волокно з порожнистим ядром містить мікропори сумірні з молекулярним розміром досліджуваного газу. За наявності деякої концентрації газу 4, і залежно від вибору джерела випромінювання 1, відбувається розсіювання і (або) поглинання світла. За значенням вихідної інтенсивності випромінювання отримують інформацію про концентрацію газу.

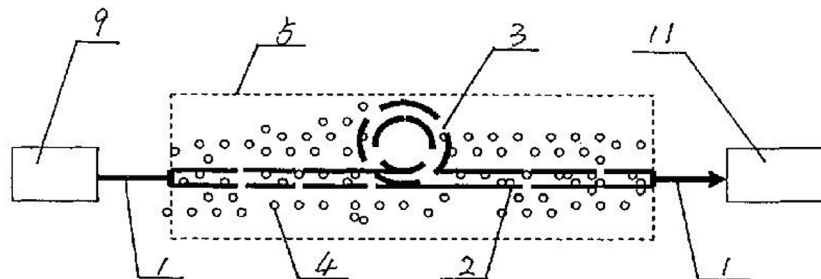


Рис. 3. Волоконно-оптичний газовий датчик з кристалічним волокном із порожнистим ядром

Розробники з Gaz De France (Service National), Франція, запропонували ще одну конструкцію ВОГА з волоконно-оптичним чутливим елементом [7].

Запропонована система волоконно-оптичних датчиків, що включають, принаймні одне оптичне волокно певної конструкції, для того, щоб вимірювати фізичний або хімічний параметр, який може змінюватися в навколишньому середовищі E (рис.4.), куди поміщений датчик. Згадане волокно складається з оболонки 3, ядра 5, оточеного цією оболонкою, осі 7 напрямку проходження світла (випромінювання), і частини 9 із оптичними змінами товщини, формуючи оптичну світлову дифракцію 10. Частини 9 розташовані під кутом α відносно напрямку волокна 7, причому $0 < \alpha < 90$ град. Частина оболонки 3 має у своєму складі активний матеріал, оптичні властивості якого змінюються як функція зміни в згаданому параметрі P в межах навколишнього середовища, де знаходиться датчик. Активним матеріалом, наприклад, може бути гетерополісілоксан (heteropolysiloxane), тобто, використовується метод рефлектометричного аналізу для реєстрації змін в параметрі P .

Цікавий також винахід, який запропонований у роботі [8].

На рис.5. представлений (у частковому поперечному перерізі) водневий датчик. Газовий датчик включає резонансний пристрій довжини хвилі у волокні, яким слугують брегівські решітки 330. Волокно поширює дві хвилі: носійну і робочу. Шар реагуючого на газ матеріалу 335 приєднаний до волокна. Матеріал поглинає газ за температурною залежністю (за так званою - газовою поглинаючою температурною нормою). Робоча хвиля використовується, щоб нагрівати матеріал, який із нагріванням збільшує газову поглинальну температурну норму, таким чином збільшуючи і покращуючи вимірювальні характеристики датчика, особливо при використанні його в умовах низьких температур.

Датчик складається з оптичного волокна 305, яке включає основне волокно 310, внутрішню оболонку 315, зовнішню оболонку 320 і захисний прошарок 325, при чому, основне волокно 310 має показник заломлення більший, ніж показник заломлення внутрішньої оболонки 315, яка, у свою чергу, має показник заломлення більший, ніж показник заломлення зовнішньої оболонки 320. Як було вже сказано вище, оптичне волокно 310 включає брегівські решітки 330, які дають резонансну частоту при попаданні на них носійної хвилі. Матеріалом поглинання газу є паладій 335 (або сплав паладію). Шар паладію 335 діє як матеріал, абсорбуючий водень (відбувається хімічна реакція), з виділенням гідриду паладію. Під час цієї реакції, матеріал розширюється. В результаті шар паладію 335 спричинятиме напруження в оптичному волокні 305. Величина розширення і, таким чином, напруження залежить від кількості водню, який поглинений. Проміжний шар 340, дуже добре закріплює і паладій і кварц.

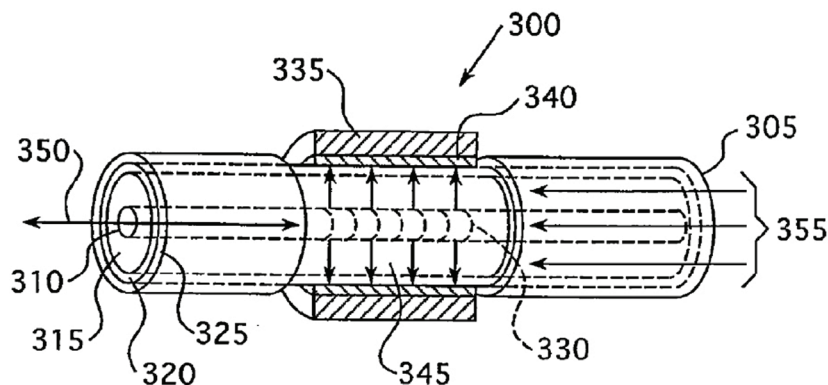


Рис. 5. Водневий ВОГА

Волокно 305 також включає оптичну область сигналу 345, який є найближчим до шару паладію 335. Сигнал 345 поглинається шаром паладію 335. Внутрішня оболонка 315, при розширенні шару паладію, змінюватиме свій показник заломлення, внаслідок чого робоча довжина хвилі 355, пройде з внутрішньої оболонки 315 в оптичну області сигналу 345. Носійна хвиля 350, поширюючись в основному волокні 310, зіткнеться з брегівськими решітками 330, при цьому носійна довжина хвилі резонансу буде відбиватися назад в протилежному напрямі. Розширення шару паладію 335 спричинить напруження в оптичному волокні 305, тобто, і в основному волокні 310 також, і, таким чином, змінить інтервал решітки 330. Отже, зміни в інтервалі решітки, що залежать від напруження, викликаного розширенням шару паладію 335, змінять довжину хвилі резонансу, яка відбивається від брегівських решіток 330. Спектральні зміни резонансної частоти, можуть використовуватися, щоб характеризувати і визначити концентрацію водню в середовищі.

У роботі [3] представлені результати розрахунку основних характеристик волоконно-оптичного датчика концентрації метану, що використовує принцип диференціального оптичного поглинання в діапазоні довжин хвиль 1,33 мкм, залежно від параметрів використаних компонентів. Результати проведених розрахунків показують, що ВОД концентрації метану, що використовує існуючу елементну базу і працює на лінії поглинання 1,332 мкм, може забезпечити реєстрацію концентрації метану на рівні 0,1% при довжині волоконного тракту ~1км, що достатньо для ряду практичних застосувань. Поліпшення характеристик ВОД можливе при переході на лінію поглинання метану 1,667 мкм і розробці відповідних оптоелектронних компонент, насамперед напівпровідникових джерел випромінювання з потужністю, що вводиться у волокно, не менше 100 мкВт і фотодіодів з темними струмами менше 1нА. Це відкриває можливість реалізації промислового ВОД, що забезпечує вимірювання концентрації метану на рівні 0,05% (тобто 1% нижньої границі вибуховості (НГВ)) при довжині волоконного тракту ~10км. Представлена методика розрахунку може бути використана для оцінки характеристик ВОД, призначених для дистанційного вимірювання концентрації інших горючих і вибухонебезпечних газів (наприклад, C₃H₈, C₂H₄, C₂H₂ і ін.), смуги поглинання яких розташовані в ближній ІЧ області спектру, де загасання кварцового волокна мале.

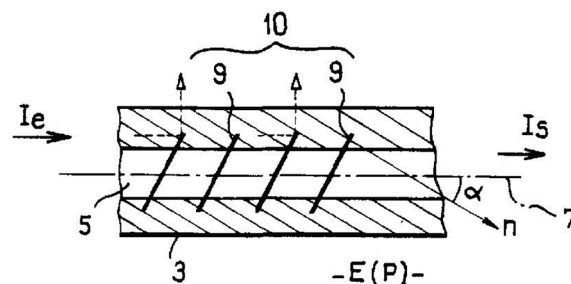


Рис. 4. Волоконно-оптичний газовий датчик з використанням волокна з оптичними змінами товщини

У Фізико-технічному інституті ім. А.Ф. Іоффе РАН, С.-Петербург, був розроблений інфрачервоний датчик на основі напівпровідникового інжекційного лазера з довжиною хвилі випромінювання 3,3 мкм, поєднаного з акустооптичним модулятором на базі аморфного сплаву Si-Te за допомогою халькогенідного волокна. Коефіцієнт модуляції випромінювання досягає 70 % при тривалості імпульсу $\geq 0,3$ мкс, що дозволяє використовувати датчик у цілях газового аналізу. У роботі показана можливість ефективної модуляції пучка випромінювання з довжиною хвилі 3,3 мкм, який розходить з торця волокна, що може бути використано при створенні волоконно-оптичних датчиків на основі діодних лазерів і акустичних або фотонних приймачів сигналу для реєстрації речовин, смуги поглинання яких лежать в середній інфрачервоній області спектру [9].

У статті [10] запропоновано модель побудови системи для вимірювання концентрації метану в повітрі. Обговорюються основні принципи побудови і роботи волоконно-оптичної вимірювальної системи. В основу розробленої системи покладено один з методів лазерної спектроскопії молекулярних газів і спосіб безпосередньої передачі оптичних інформаційних сигналів по волоконно-оптичних лініях зв'язку.

Для реєстрації газу в повітрі запропоновано використовувати метод частотно-модульованої (ЧМ) лазерної спектроскопії на базі напівпровідникових лазерних джерел. Цей метод дозволяє не тільки реєструвати гази, але і вимірювати концентрацію газів за слабкими лініями поглинання в спектральному діапазоні вікон прозорості кварцового волокна (від 0,7 до 0,9 мкм; від 1,2 до 1,35 мкм і від 1,45 до 1,65 мкм). З цією метою, для збільшення чутливості вимірювальної системи, запропоновано використовувати метод ЧМ лазерної спектроскопії з одночасною реєстрацією першої і другої гармонік частоти модуляції.

В роботах [1, 11] наведено фізичне обґрунтування і створено волоконно-оптичні сенсори рівня водневого показника середовища (рН) та концентрації аміаку (NH_3), які працюють на ефекті розсіювання світла в гетеропереході поліанілін-кварцове волокно і є сумісні з сучасними вимірювальними приладами аналізу робочих характеристик волоконно-оптичних ліній зв'язку.

В результаті виконання ДКР Російської Федерації «Створення волоконно-оптичної системи для безперервного контролю вмісту метану у вугільних шахтах, в нафтогазовидобувних і переробних виробництвах» в рамках ФЦП «Національна технологічна база на 2002-2006 роки» розроблено [12]:

- 1) - волоконна оптична система вимірювання концентрації метану, що складається з багатоходової оптичної кювети, волоконно-оптичного тракту і стандартного електронного обладнання і призначена для безперервного контролю вмісту метану у вугільних шахтах, в нафтовидобувних і переробних виробництвах.
- 2) Волоконно-оптична система безперервного контролю вмісту метану, аналогів не має і володіє наступними основними характеристиками:
 - дистанційність: до 10 км.;
 - чутливість: 0,1 об.%;
 - робочий діапазон: 0 – 5 об.%.

Інтерес до ВОС обумовлений цілим рядом їх переваг у порівнянні з традиційними первинними вимірювальними перетворювачами [1]:

- велика чутливість, що перевершує чутливість, наприклад, криогенних перетворювачів;
- великий динамічний діапазон зміни вимірюваного параметра; відносна простота;
- геометрична універсальність, тобто можливість створення перетворювача довільної форми;
- малі габарити;
- можливість проведення вимірювань у важкодоступних і віддалених місцях (дистанційні вимірювання);
- можливість досягнення великої довжини взаємодії ВОС із зовнішньою величиною;

- створення безконтактних перетворювачів;
- відсутність чутливості до зовнішніх електромагнітних завад;
- повна електрична розв'язка ВОС (високий електричний опір);
- широкий температурний інтервал роботи;
- можливість роботи в агресивних середовищах (корозійна стійкість), вогнебезпечних і вибухонебезпечних приміщеннях, в умовах дії іонізуючих випромінювань і радіації;
- загальна технологічна основа для створення ВОС найрізноманітнішого призначення (технологічна, фізична універсальність);
- сумісність ВОС з інтегрально-оптичною технологією та елементами;
- можливість створення перетворювачів, що не вимагають електричних джерел живлення (пасивний режим роботи).

Серед недоліків ВОС можна назвати невелику механічну міцність світловодів, труднощі введення випромінювання в одномодовому світловоді, і нелінійність передавальних характеристик, відсутність на сьогодні єдиної концепції під час розробки [1].

Технічні характеристики оптичних волокон і напівпровідникових лазерів, що серійно випускаються, дозволяють реалізувати волоконно-оптичну систему для реєстрації метану в повітрі економічно сумірно з вартістю звичайних каналів оптичного зв'язку [10].

Тобто, на основі існуючих волоконно-оптичних систем та спеціально розроблених оптичних волокон та матеріалів, аналіз газового середовища є більш метрологічно точним, практичним, надійнішим, а в деяких випадках, таких наприклад, як одночасне вимірювання в багатьох точках на відстані (у кілька км) кількох газів, єдино можливим.

ВИСНОВКИ

Розглянуто основні принципи побудови волоконно-оптичних систем реєстрації газів, зокрема CH_4 , C_3H_8 , C_2H_4 , C_2H_2 , H_2 , NH_3 та рН. Представлено приклади використання волокна, як оптичного тракту, і як чутливого елемента, для побудови волоконно-оптичних газоаналізаторів. Огляд доводить доцільність практичного використання існуючих конструкцій і матеріалів та розробки нових систем для створення волоконно-оптичних перетворювачів газу, які сумісні з сучасними вимірювальними приладами аналізу робочих характеристик волоконно-оптичних ліній зв'язку, що забезпечує можливість дистанційного контролю газів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Мікроелектронні сенсори фізичних величин: Науково-навчальне видання. В 3 томах. Том 3. Книга 2 / [В. Вуйцік, З.Ю. Готра, О.З. Готра, В.В. Григор'єв, В. Каліта, О.М. Мельник, Є. Потенці, В.В. Черпак]; За редакцією З.Ю. Готри. - Львів: Ліга-Прес, 2007. - 367 с.
2. Волоконно-оптические датчики / [Т. Окоси, К. Окамото, М. Оцу, Х. Нисихара, К. Кюма, К. Хататэ]; Под ред. Т. Окоси: Пер. с япон. - Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. - 256 с.
3. Миронов С.А. Волоконно-оптический датчик концентрации метана: расчет основных характеристик // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. -2007. -Вестник 44. -С. 72-78.
4. Seitz W.R. Chemical sensors with fiber optics // Crit. Rev. in Anal. Chem.1988. V.19. P. 15.
5. Пат. 2091764 Российская Федерация, МПК⁶ G01 N21/61. Волоконно-оптический газоанализатор / Мирумянц С.О., Марциновский В.А.; заявитель и патентообладатель Научно-производственное объединение "Государственный институт прикладной оптики". - №94030252/25; заявлено 1994.08.16; опубл. 1997.09.27.
6. Пат. CN1900696 (A) Китайська Народна Республіка (China), МПК⁶ G01 N21/31, G01 N21/27. Hollow core photon crystal fiber-optic fiber gas / Xue Chenyang Zhang [CN]; заявник та патенто власник Univ Zhongbei [CN]. - №200610012988.9; заявлено 26.07.06; опубл. 24.01.2007.
7. Пат. 0542603 (A1) Франція (France), МПК⁵ G01 N21/77; G02 B6/16 . Optical fibre sensor for measuring a parameter, procedure for evaluating the parameter, and application of the sensor to gas measurement / Di Bin Philippe [FR], Facq Paul [FR], Pichery Thierry [FR]; заявник та патенто власник Gaz De France (Service National) [FR]. - №92402993.7; заявлено 05.11.92; опубл. 16.05.1993.
8. Пат. WO2008136870 (A2) США (USA), МПК⁶ G01 N21/31. Fiber optic gas sensor / Chen Peng [US], Buric michael P [US], Swinehart Philip R [US], Maklad Mokhtar S [US]; заявники та патенто власники University Of Pittsburgh - Of The Commonwealth System Of Higher Education [US/US]. - №PCT/US2007/087725; заявлено 17.12.2007; опубл. 13.11.2008.
9. Зотова Н.В., Карандашев С.А., Кулакова Л.А., Матвеев Б.А., Мелех Б.Т., Стусь Н.М., Талалакин

- Г.Н. Волоконно-оптический датчик на основе диодного лазера среднего инфракрасного диапазона и акустооптического модулятора // Письма в ЖТФ. -1997. - Т. 23, № 20. –С. 14-18.
10. Мачехин Ю. Л. Основные принципы построения волоконно-оптической системы регистрации метана в воздухе // Прикладная радиоэлектроника. -2005. -Т. 4, №3. – С. 326-330.
11. Кремер І.П. Сенсори контролю параметрів довкілля на основі провідних полімерів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.27.01 „Твердотільна електроніка”/ Кремер І.П. –Львів, 2007. -21 с.
12. Промышленность обычных вооружений - портал предприятий промышленности обычных вооружений [Электронный ресурс] // НП ППП Роспроммедиа. – Режим доступа : <http://www.ov-prom.rudevelopments.php?id=6#5>.

Надійшла до редакції 11.11.2008р.

ОСАДЧУК В.С. – академік АІНУ, д.т.н., проф., зав. кафедри електроніки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна.

ОСАДЧУК О.В. – д.т.н., проф., зав. кафедри радіотехніки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна.

ЯРЕМЧУК В.Ф. – к.т.н, доц., доцент кафедри фізики Вінницького державного педагогічного університету ім. М. Коцюбинського, м. Вінниця, Україна.

КРАВЧУК Н.С. – к.т.н, доц., доцент кафедри фізики Вінницького державного педагогічного університету ім. М. Коцюбинського, м. Вінниця, Україна.

СМІШНИЙ С.М. – пошукач кафедри електроніки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна.