

УДК 621.38

Ю.С. КРАВЧЕНКО, А.Ю САВИЦЬКИЙ

ОПТИЧНІ СЕНСОРИ ВОЛОГОСТІ РОБОЧИХ ГАЗІВ ПІДВИЩЕНОГО І АТМОСФЕРНОГО ТИСКУ

*Вінницький національний технічний університет,
Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021, Україна*

Анотація: Розглянуто вплив вологості на технологічний процес виготовлення інтегральних мікросхем, принципи побудови сенсорів вологості робочих плазмоутворюючих газів для мікроелектронної технології. Проаналізовано шляхи підвищення чутливості таких сенсорів і перспектива їх використання в технологічних умовах.

Анотация: Рассмотрено влияние влажности на технологический процесс производства интегральных микросхем, принципы построения датчиков влажности рабочих плазмообразующих газов для микроэлектронной технологии. Проанализировано пути повышения чувствительности таких датчиков и перспективы их применения в технологических условиях.

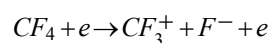
Abstract. This paper is devoted to the influence of moisture on technological process of the integrated circuits manufacturing, principles of construction of moisture sensors, that could be using for analyses of the plasma-formative gases for microelectronic technology and the ways of rising their sensitiveness and the perspectives of their applications at the technologic conditions were analyzed.

ВСТУП

Одним з провідних напрямків розвитку мікроелектронної технології є підвищення якості готових виробів, їх довговічності та надійності. Дана мета досягається жорстким контролем параметрів всіх технологічних процесів виробництва, в тому числі, параметри виробничого мікроклімату. Вологість атмосфери, як складова технологічного мікроклімату, в багатьох фазах в мікроелектронного виробництва, повинна підтримуватись в рамках жорстких допусків [1]. Атмосферна волога взаємодіє в першу чергу взаємодіє з поверхнею оброблюваних матеріалів. Одночасно з адсорбцією молекул води з повітря на поверхню одночасно адсорбуються на поверхні молекули розчинених у воді кислот і лугів, які вступають в хімічні реакції поверхневим шаром пластини, що в свою чергу погіршує електрофізичні параметри сформованих в приповерхневому шарі елементів інтегральних мікросхем (ІМС).

АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ

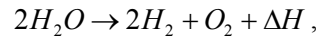
Атмосферна волога, що потрапляє до вакуумної технологічної системи, стає додатковим реагентом, який приймає участь у взаємодії частинок плазми з поверхнею оброблюваного матеріалу. Хімічні процеси, що протікають в плазмі, різноманітні і включають в себе велику кількість різновидів елементарних реакцій взаємодії, протікання яких залежить від параметрів технологічного процесу (тиск і склад робочого газу, температура газу і матеріалу, типу розряду, що використовується та ін.). Про домінуючий тип хімічної реакції, що відбувається в даному технологічному процесі можна говорити лише з точки зору ймовірності її протікання в даних технологічних умовах [2]. В плазмі ВЧ-розряду, яка найчастіше використовується в мікроелектронній технології, відбуваються такі основні типи елементарних взаємодій: реакції під дією електронного удару, реакції при зіткненні між важкими частинками плазми, гетерогенні реакції та реакції, спричинені випромінюванням плазми. Наприклад, при плазмохімічному травленні кремнію в плазмі фторвміщуючих вуглеводнів найвища ймовірність протікання мають реакції, найістотношою є реакція дисоціативного прилипання [2]:



Процес вакуумно-плазмового травлення відбувається в нерівноважній низькотемпературній плазмі пониженого тиску. Середні енергії електронів в такій плазмі складає 1-10 eВ

($1.6 \cdot 10^{-19} - 16 \cdot 10^{-19}$ Дж), густина електронів $10^9 - 10^{12} \text{ c}^{-3}$, тоді як енергія молекул газу складає 0,05-0,1 eВ, а їх густина при тисках 0,1-500 Па складають $10^{13} - 10^{17} \text{ c}^{-3}$ [2].

Розглянемо можливі фізико-хімічні процеси, які відбуваються за участю вологи в процесі плазмохімічної обробки напівпровідникових матеріалів. Під дією електронного удару, молекула води розпадається на кисень і водень:



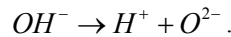
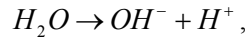
де $\Delta H = 241.83$ кДж – енергія, потрібна для того, щоб дана реакція пройшла в 1 моль пари.

Так, як 1 моль речовини містить $N_a = 6.02 \cdot 10^{23}$ атомів, то енергія, що припадає на один атом:

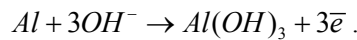
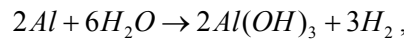
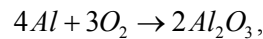
$$\frac{\Delta H}{N_a} = \frac{241.83 \cdot 10^3}{6.02 \cdot 10^{23}} = 40.17 \cdot 10^{-20} \text{ Дж} = 2.5 \text{ eВ},$$

Як бачимо, більшість електронів володіють такою енергією і тому існує висока ймовірність протікання вищенаведеної реакції при зіткненні електрона з молекулою пари.

Вищенаведена реакція проходить через такі стадії:



Утворені іони в свою чергу можуть реагувати з оброблюваними пластинами, при цьому на поверхні останньої з'являються плівки з окисів і гідроокисів. Найбільше схильні до такої взаємодії металеві плівки. Наприклад, алюміній, один з найважливіших металів, що використовується для формування контактів і виводів ІМС, легко вступає в реакцію з даними іонами, а також і з самою молекулою води:



Фізичні характеристики електронів (енергія електронів, переріз дисоціації води при зіткненні з електроном). Згідно з [3], швидкість цієї реакції визначається:

$$G = n_e n \left(\frac{2}{m_e} \right) \int_{E_{ne}}^{\infty} \sigma(E_e) f(E_e) E_e^{1/2} dE_e,$$

де n_e і n - відповідно концентрації електронів і молекул газу, продуктом яких є високоенергетичні і хімічно активні частинки, m_e - маса електрона, E_e - енергія електронів, $\sigma(E_e)$ - переріз взаємодії електронів і молекул, ΔH - порогова енергія процесу виникнення високоенергетичних і хімічно-активних частинок внаслідок зіткнення з електронами. З рівняння видно, що значення G може бути аналітично визначено тільки при умові відомої функції розподілення електронів за швидкостями $f(E_e)$. Дана задача вирішується тільки за певних наближень. В даний час свідцтва про функцію розподілу є тільки для обмежених видів розрядів розрядів для одноатомних і двоатомних газів [4]. В решті випадків використовуються наближення. Цікавими є два окремих випадки: перший – розподіл за енергіями виникає через пружні зіткнення, що виникає при втраті енергії електронами тільки через пружні зіткнення при довжині вільного пробігу, який не залежить від енергії. Даний випадок дає розподіл Дрюйвестейна [2]:

$$f(E_e) = 1.04 (\bar{E}_e)^{-3/2} \exp[0.55(E_e / \bar{E}_e)^2] E_e^{1/2},$$

де $\bar{E}_e = \frac{1}{2} m_e \bar{v}_e^2$ - середня енергія електронів.

Другий випадок – максвелівський розподіл, який враховує лише зіткнення між електронами, а

саме їх взаємне відштовхування, що призводить до зміни їх енергії:

$$f_M = (27/2\pi)^{1/2} (\bar{E}_e)^{-3/2} \exp(-1.5E_e / \bar{E}_e) E_e^{1/2}.$$

При рівній середній енергії при максвелівському розподілі в плазмі міститься значно більше швидких електронів, ніж при розподілі Дрьюївестейна. Згідно [5], максвелівський розподіл є добрим наближенням електронів в плазмі атомарних газів, оскільки в таких газах рівні збудження широко розкидані від основного стану до потенціалу іонізації. Тому, втрати при непружних зіткненнях відбувається при доволі низьких енергіях. В інертних газах рівні збудження знаходяться набагато ближче до потенціалу іонізації, тому при низьких значеннях відношення напруженості електричного поля до тиску газу, втрати виникають тільки при пружних зіткненнях.

Як показано вище, молекули води, присутні в складі плазмоутворюючого робочого газу, є досить активними і можуть впливати на весь технологічний процес, властивості і якість готової продукції. Тому вхідний контроль вологості робочих газів для плазмохімічної обробки матеріалів, має велике значення для підвищення якості мікроелектронних виробів, а також зменшення браку їх виробництва.

Для визначення вологості газів застосовується багато різновидів сенсорів вологості. Методи вимірювання вологості, які є основою побудови останніх розділяються на прямі і опосередковані.

В основі прямих методів лежить розділення досліджуваної речовини чи матеріалу на вологу і сухий залишок. При опосередкованому методі вимірювання вологості матеріалу визначається за фізичними властивостями чи величинами, функціонально пов'язаними з вологістю.

Відомо [6], що вміст води в речовині чи матеріалі визначає його фізичні властивості – теплові, оптичні, механічні, електрофізичні та ін. Функціональний зв'язок цих властивостей з вмістом води є основою побудови різних типів вимірювачів вологості, що працюють на принципі опосередкованого визначення вологості речовин і матеріалів. Серед таких методів найбільш важливими є: кондуктометричний, диелькометричний, НВЧ, радіаційні, оптичні, теплофізичні.

На даний час перспективним напрямком є оптична вологометрія, основою якої є властивість води поглинати інфрачервоне випромінювання певної довжини хвилі. Така її властивість дозволяє створювати сенсори, які б вимірювали вологість різних матеріалів: твердих, рідких та газоподібних.

Розглянемо оптичні властивості води. При атомній поляризації атоми кисню, які входять в склад молекули води, мають складний вид руху, який обумовлений синтезом трьох стандартних коливань: абсолютно симетричних кутових, абсолютно симетричних пружних, асиметрично пружних. Спектри поглинання цих коливань мають максимум на довжинах хвиль відповідно 2.74, 6.27, і 2.66 мкм. Показники поглинання на цих довжинах хвиль досить великі, однак через відсутність високостабільних малогабаритних джерел і приймачів випромінювання ці довжини хвиль при розробці промислових приладів не використовуються. Найбільший інтерес представляє ближній ІЧ-діапазон. Спектр поглинання води у ближній ІЧ-облаті, як показано в таблиці 1, складається з ближніх гармонік [7].

Таблиця 1.

Спектр поглинання води

Довжина хвилі, мкм	Приналежність	Показник поглинання, %
0,76	Вищі гармоніки	0,26
0,97	Вищі гармоніки	0,46
1,19	Комбінаційні складові	1,05
1,45	Комбінаційні складові	26,0
1,94	—	100

Найбільш оптимальним для практичного використання є довжина хвилі 1,94 мкм. Так, як поглинання води в цьому діапазоні носить характер індукованої поляризації, що супроводжується коливанням атомів, таке явище вважається атомною поляризацією. Вода, що потрапляє в речовину, змінює її спектр. Із різних спектральних характеристик сухої речовини (рис.1, крива 1) і при вологості 9% H_2O (крива 2) виходить, що на довжині хвиль 1,94 мкм вода має значний коефіцієнт поглинання. Тому, якщо контрольований об'єкт опромінювати ІЧ-випромінюванням з такою довжиною хвилі і вимірювати потужність пройденого чи відбитого потоку випромінювання, то вона буде змінюватися в залежності від вологості.

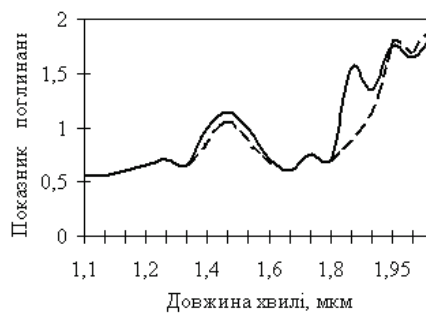


Рис. 1. Діаграма залежності показника поглинання води від довжини хвилі

При побудові вимірювачів вологості спектральні характеристики є основою, за якою вибирають довжини хвиль вимірювального і опорного потоків випромінювання. Спектральні характеристики речовини можна отримати, використовуючи спеціальні спектрофотометри чи дискретні інтерференційні світлофільтри. Розглянемо приклади побудови ІЧ-сенсорів вологості, що використовуються в електронній технології.

Найчастіше в систему плазмохімічної обробки матеріалів робочий газ подається з посудини, де він знаходиться у зрідженому стані, через натікач безпосередньо до реакційної камери. В залежності від місця впускного каналу, робочий газ може знаходитись у зрідженому стані, при нормальному тиску, або пониженому тиску. Для кожного з розглянутих випадків необхідна своя конструкція сенсора вологості, яка б враховувала особливості газу даного тиску.

При аналізі вологості насиченої пари над балоном, з якого робочий газ подається у вакуумну систему, доцільно використовувати сенсори вологи рідин. Одним з різновидів оптичних сенсорів вологості, які доцільно використовувати в даних умовах, є інфрачервоні сенсори вологості з використанням світлофільтрів, які розрізняються за принципом побудови первинних перетворювачів. Первинні перетворювачі ІЧ-сенсорів вологості – сукупність випромінювача, модулятора, світлофільтрів і фотоприймачів, розташованих певним чином. Даний вид сенсорів вологості може застосовуватись для аналізу зріджених газів і газів під великим тиском.

Найбільш поширених в наш час є теплові випромінювачі [7], лампи накалювання, у яких накалювальний елемент виготовлений із вольфраму. Основною перевагою таких джерел є дешевизна, простота конструкції й експлуатації. Наряду з цим лампи мають ряд недоліків: крихкість, зміна спектральних характеристик в процесі горіння, низький ККД, строк експлуатації не перевищує 2000 год.

Світлофільтри в ІЧ-сенсорах вологості є одним з основних елементів. По конструктивним особливостям їх прийнято розділяти на тверді, рідкі і газоподібні. Фізичні процеси, що в них проходять також різноманітні: вибіркоче поглинання (адсорбція), заломлення, відбиття і розсіювання, інтерференція, поляризація, дифракція. Найчастіше використовуються інтерференційні світлофільтри, перевагами яких є можливість отримання спектральної характеристики і дуже вузької смуги пропускання.

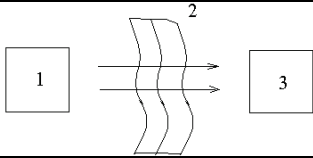
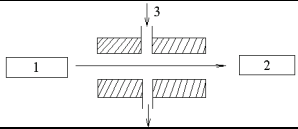
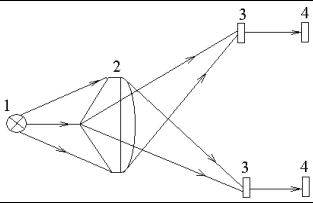
Другим головним елементом, який надає параметрам випромінювання певну часову залежність. Звичайно використовують дискові модулятори, що представляють собою металічний диск з отворами, закріплений на валу синхронного двигуна.

Розглянемо оптичні схеми, які найчастіше використовуються для побудови технологічних сенсорів вологості, які наведені нижче в таблиці [7]:

На рисунку представлено схему приладу, принцип роботи якого заснований на використанні багаторазового повного внутрішнього відбиття (БПВВ), розробленого для контролю вмісту емульсійної води в інших зріджених газах [8].

Світловий потік від випромінювача 1 за допомогою модулятора 2, що несе інтерференційні фільтри з різними спектрами пропускання, напрямляються на пластину БПВВ 3, змочених з обох боків аналізованою емульсією 4 після багаторазового відбиття від границі пластина-зразок випромінювання направляється на фоторезистор 4 сигнал з фоторезистора після підсилення підсилювачем 5 направляється на детектор 6, функціональний перетворювач 7 і реєструється самописцем 8.

Таблиця 2.

Оптична схема	Основні вузли
	1 – випромінювач, 2 – сорбент, 3 – фотоприймач
	1 – випромінювач, 2 – фотоприймач, 3 – напрям протікання робочого газу
	1 – випромінювач, 2 – призма, 3 – світлофільтр, 4 – фотоприймач

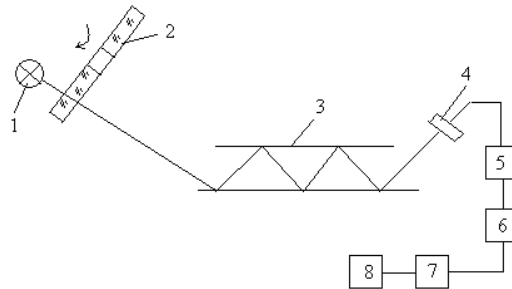


Рис. 2. Пристрій для визначення вологості

При аналізі структури сенсорів вологості з використанням сорбентів (в тому числі схеми установок [11,12]), було помічено, що дані установки мають ряд недоліків, а саме: неоднорідне осадження конденсату на поверхні сорбенту, що призводить до неоднорідності оптичних властивостей останнього і, відповідно, виникнення похибок вимірювання. Найголовнішим недоліком адсорбційних сенсорів вологості є „отруєння” сорбенту і необхідність його частоті заміни, що призводить до розгерметизації вакуумної системи, що є небажаним при протіканні технологічного циклу.

Більш перспективними з точки зору практичного використання є конденсаційні гігрометри, які можуть працювати при атмосферному і пониженому тиску аналізованого робочого газу і принцип дії яких оснований на ефекті розсіювання випромінювання конденсованою паровою на поверхні дзеркала. Розглянемо конкретні приклади використання даного методу.

В системах автоматичного управління технологічними процесами, де необхідна висока чутливість при малих об’ємах контрольованого середовища, для вимірювання вологості газу ефективно може бути використаний гігрометр [9], схема якого зображена на рисунку.

Блок джерела випромінювання містить лампу, два плоских дзеркала 1 і два конденсори, які збирають потоки з двох протилежних напрямків і які посилюють їх в площину світлоподільної пластини 3, де вони розділяються. Таке джерело випромінювання дозволяє виключити похибку вимірювання, яка визвана нерівномірністю розподілу потоку випромінювання від різних ділянок тіла каналу. Двопроменевий блок включає в себе інтерференційний фільтр 4, що виділяє область спектру у спектрі поглинання води, вимірювач – оптичний клин 5, світлофільтр 6, який виділяє область спектру поза спектром поглинання, підлаштувальний клин 7 і плоскі дзеркала 8 і 9, що слугують для зведення вимірювального і опорного потоків випромінювання в площину комутатора модулятора 10. конструкція кювети 11 забезпечує багаторазове проходження потоків через досліджуваний газ за допомогою призм 12. Корегування потоків по діаметру здійснюється перед кожним входженням випромінювання в кювету за допомогою конденсорів 13. Так, як потоки випромінювання вимірювального і опорного каналів проходять один і той самий шлях в досліджуваному середовищі, похибки, обумовлені забрудненням скла лінз і наявністю домішок в контрольованому середовищі, виключається.

При наявності в досліджуваному середовищі парів води з'являється розбіжності потоків на опорній і вимірювальній довжині хвилі. Змінна складова сигналу виходу фотоприймача 14 через підсилювач 15 подається на керувальну обмотку реверсного двигуна 16, який зміщенням клину 5 через редуктор 17 компенсує нерівність потоків. Напрямок обертання двигуна 16 визначається полярністю керувальної напруги. Підлаштувальний клин 7, що зміщується через редуктор 18 двигуном 19, слугує для попереднього виставлення рівності потоків на опорній і вимірювальній довжинах хвиль (за допомогою блоку керування 20).

Основна похибка вимірювання приладу залежить від оптичної густини. При оптичній густині газу, рівній 0,02, вона складає 10%, при 0,05 – відповідно 4% і при 0,2 – не перевищує 3%. Перевага приладу – чутливість до низької концентрації пари.

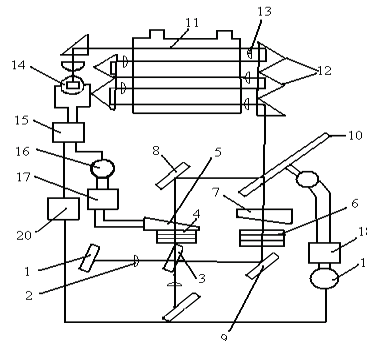


Рис. 3. Автоматичний інфрачервоний вимірювач вологості

Прикладом конвенційного гігрометра може служити запропонований в роботі [10]. На рисунку зображена схема приладу, у якому випромінювання від джерела 1, відбиваючись від плоского дзеркала 2, потрапляє на сферичне дзеркало 4. Відстань між джерелом 1 випромінювання до сферичного дзеркала 4 за ходом променя рівна радіусу кривизни сферичного дзеркала. Випромінювання від сферичного дзеркала 4, другий раз відбившись від плоского дзеркала 2, фокусується в площину діафрагми 5 і потрапляє на робочий приймач випромінювання 6, який знаходиться на подвійній фокусній відстані від сферичного дзеркала. Контрольний приймач 7 розташований в безпосередній близькості до джерела випромінювання. Вимірювання відносної вологості газу здійснюють шляхом порівняння рівня електричного сигналу від приймачів випромінювання 6 і 7. Плоске дзеркало 2 в робочому охолоджується до випадення роси на його поверхні. Чутливість приладу забезпечується двома факторами: по-перше, конденсат на дзеркалі 2 розфокусує пучок випромінювання, по-друге, він поглинає хвилі, які лежать в його смузі поглинання.

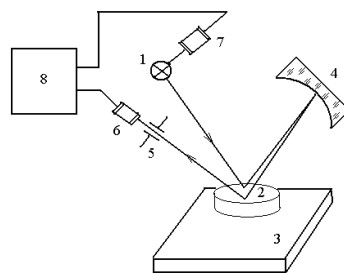


Рис. 4. Сенсор вологості газових сумішей

Недоліком приладів даної конструкції може слугувати те, що процес конденсації пари на поверхні дзеркала залежить від концентрації аналізованого робочого газу. Але в процесах плазмохімічної обробки матеріалів, робочий газ подається імпульсами, протягом якого тиск газу змінюється, тому конденсаційні гігрометри можуть мати понижену чутливість вимірювань.

ВИСНОВКИ

Аналіз робіт [13, 14] показує, що напрям розвитку сенсорів вологості робочих газів для плазмохімічного виробництва пов'язаний із знаходженням оптимальних варіантів виконання оптичної системи приладу і додання небажаних оптичних ефектів (різних видів аберацій, дисперсії, розсіювання та ін.).

Іншим перспективним напрямком розвитку оптичної вологометрії є підвищення точності обробки електричних сигналів, сформованих чутливими елементами у відповідь на дію зовнішнього фактора, функціонально пов'язаного з вологістю аналізованого матеріалу, для чого пропонується вводити чутливий елемент в схему частотного перетворювача. В роботах [15-18] розглядається доцільність використання даних схем для обробки електричного сигналу, який формується у чутливих елементах різноманітних сенсорів, у тому числі і оптичних сенсорів вологості.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Сазонов А.А., Корнилов Р.В., Кохан Н.П., Лукичев А.Ю., Осокин В.И., Таран В.А., Федукін В.А. Автоматизація технологического оборудования микроэлектроники. – М.: Высшая школа, 1991. – 331 с.
2. Киреев В.Ю., Данилин Б.С., Кузнецов В.И. Плазмохимическое и ионно-химическое травление микроструктур. – М.: Радио и связь, 1983. – 128 с.
3. А.с. 10773644 СССР, МКИ G 01 N 21/81 Устройство для определения влажности/ Р.А. Хайдаров, Г.А. Карапетов, В.В. Зыков и др. – 05.02.83. Бюл. №41.
4. Hoffman K. Feuchtemessung durch Infrarotreflexin. – Chemie-Ingenieur-Technik, 1963, № 1, S. 55-62.
5. Иванов А.А., Соболева Т.К. Неравновесная плазмохимия. – М.: Атомиздат, 1978. – 264 с.
6. Берлинер М.А. Измерение влажности. 2-е изд. М.: Энергия, 1973. – 400 с.
7. Мухитдинов М., Мусаев Э.С. Оптические методы и устройства контроля влажности. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 96 с.
8. А.с. 701241 СССР, МКИ G 01 N 21/81. Инфракрасный измеритель влажности эмульсионной воды/ А.А. Абдуллаев, В.М. Золотарев, И.А. Китушина и др. – 30.11.84.- Бюл. № 48.
9. Автоматический инфракрасный гигрометр / В.П. Тогулев, Ю.Н. Устимов, Л.Г. Гросс, Ю.А. Петров. – ОМП, 1977, №3, с.25-27.
10. А.с. 1257480 СССР, МКИ G 01 N 21/81. Датчик влажности газовых смесей/ С.О. Мирумянц, В.С. Макаров. – 15.09.86.- Бюл. №34.
11. Патент України № 34264, кл. G 01 N 25/56 Сенсор вологості/ З.Ю. Готра, О.З. Готра, К. Камуда, І.Є. Д. - 15.02.01.- бюл. №1.
12. А.с. 1175432 СССР, МКИ G 01 N 21/81. Абсорбционный газоанализатор./ М.А. Сухиненко. - 15.10.85.- бюл. №38.
13. Патент України № 50437, кл. G 01 N 21/61. Газоанализатор/ Л.А. Міхеєнко, Є.В. Вівчарик, С.О. Корніяка. – 15.10.02.- Бюл №10
14. А.с. 488126 СССР, МКИ G 01 N 21/81. Конденсационный гигрометр/ В.А. Стромский, С.Н. Мивлютин. – 12.05.75.- Бюл. №6.
15. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Реактивні властивості транзисторів і транзисторних схем. – Вінниця:УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1999. – 275 с.
16. Осадчук В.С., Осадчук О.В., Вербицький В.Г. Температурні та оптичні мікроелектронні частотні перетворювачі. – Вінниця:УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2001. –196 с.
17. Осадчук В.С., Осадчук О.В., Крилик Л.В. Сенсори вологості. – Вінниця:УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2003. –208 с.
18. Осадчук А.В. Фоточувствительные преобразователи на основе структур с отрицательным сопротивлением. – Винница: Континент, 1998. – 130 с.

Надійшла до редакції 08.06.2008р.

КРАВЧЕНКО ЮРІЙ СТЕПАНОВИЧ – доцент кафедри електроніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна