

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

**В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, А. Ю. Савицький**

**РАДІОВИМІРЮВАЛЬНІ  
ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ВОЛОГОСТІ  
НА ОСНОВІ МДН-СТРУКТУР**

**Монографія**

Вінниця  
ВНТУ  
2016

УДК 628.38  
ББК 32.854.2  
О-45

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 13 від 25.06.2015 р.)

Рецензенти:

**В. М. Кичак**, доктор технічних наук, професор

**С. М. Злепко**, доктор технічних наук, професор

**В. Г. Дейбук**, доктор фізико-математичних наук, професор

**Осадчук, В. С.**

О-45 Радіовимірювальні перетворювачі вологості на основі МДН-структур : монографія / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, А. Ю. Савицький. – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 152 с.

ISBN 978-966-641-649-3

В монографії проаналізовано сучасний стан розвитку напівпровідникових перетворювачів вологості газових середовищ, подано основи та конструктивні рішення побудови радіовимірювальних перетворювачів на основі генераторних вологочутливих МДН-структур. Розглянуто фізичні основи функціонування, електричні схеми та математичний апарат розрахунку параметрів цих схем.

Монографія розрахована на наукових та інженерно-технічних працівників, які займаються проектуванням і розробкою радіовимірювальних перетворювачів вологості газових середовищ, а також на аспірантів та студентів вищих технічних навчальних закладів.

УДК 628.38  
ББК 32.854.2

ISBN 978-966-641-649-3

© В. Осадчук, О. Осадчук, А. Савицький, 2016

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ .....	5
ВСТУП.....	6
<b>1 СУЧАСНИЙ СТАН РОЗВИТКУ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ВОЛОГОСТІ ГАЗОПОДІБНИХ СЕРЕДОВИЩ.....</b>	<b>9</b>
1.1 Аналіз вологості повітря як об'єкта вимірювання.....	10
1.2 Сучасні перетворювачі вологості газоподібних речовин.....	14
1.2.1 Аналіз методів вимірювання відносної вологості газів.....	14
1.2.2 Температурні та спектроскопічні перетворювачі вологості газів.....	16
1.2.3 Кулонометричні перетворювачі вологості газів .....	19
1.2.4 Сорбційні перетворювачі вологості газів .....	21
1.3 Вимірювальні схеми вторинних перетворювачів вологості ....	26
<b>2 РОЗРОБКА ПЕРВИННИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ВОЛОГОСТІ НА ОСНОВІ ВОЛОГОЧУТЛИВИХ МДН-СТРУКТУР .....</b>	<b>33</b>
2.1 Моделювання фізичної структури первинного перетворювача вологості газів.....	34
2.2 Обґрунтування використання вологочутливих МДН-структур з чутливим елементом на основі пористого SiO <sub>2</sub> для побудови первинного перетворювача.....	36
2.3 Розробка математичної моделі механізму вологочутливості двозатворної МДН-транзисторної структури на основі пористого окису кремнію.....	49
<b>3 РОЗРОБКА АВТОГЕНЕРАТОРНОГО ВТОРИННОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ВОЛОГОСТІ НА ОСНОВІ ДВОЗАТВОРНОГО ВОЛОГОЧУТЛИВОГО МДН-ТРАНЗИСТОРА .....</b>	<b>68</b>
3.1 Вибір оптимальної конструкції автогенераторних вторинних перетворювачів інформації .....	69

3.2 Розробка математичної моделі радіовимірювального перетворювача вологості на основі двозатворного вологочутливого МДН-транзистора.....	75
3.3 Розробка математичної моделі радіовимірювального перетворювача вологості на основі двох двозатворних вологочутливих МДН-транзисторів.....	93
<b>РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА РАДІОЧАСТОТНОГО ПРИЛАДУ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ВІДНОСНОЇ ВОЛОГОСТІ ПОВІТРЯ ЧИСТИХ ПРИМІЩЕНЬ ДЛЯ МІКРОЕЛЕКТРОННОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ.....</b>	<b>105</b>
4.1 Вимоги до вимірювання відносної вологості повітря чистих кімнат.....	106
4.2 Обґрунтування використання бездротового каналу передавання інформації.....	110
4.3 Застосування мікроконтролерів для створення ПК-сумісних цифрових частотомірів.....	113
4.4 Розрахунок інструментальної похибки і завадостійкості приладу для вимірювання відносної вологості повітря ЧК.....	120
ЛІТЕРАТУРА.....	129
ДОДАТОК А.....	140
ДОДАТОК Б.....	145

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АСКВКМ – автоматизована система керування вентиляцією і кондиціонування мікроклімату

АСКМ – автоматизована система керування мікрокліматом

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

БП – біполярний транзистор

ВАХ – вольт-амперна характеристика

ІМС – інтегральна мікросхема

МДН-транзистор – транзистор на основі структури метал-діелектрик-напівпровідник

МК – мікроконтролер

ПАР – поверхнево активна речовина

РПВ – радіовимірювальний перетворювач вологості

СЛАР – система лінійних алгебраїчних рівнянь

ТАН – транзисторний аналог негатрона

ЧК – чиста кімната

## ВСТУП

На сучасному етапі розвитку технологій і науково-технічного прогресу, основними напрямками розвитку електроніки і радіотехніки є удосконалення існуючих і створення нових методів і засобів збору, обробки, зберігання і передачі інформації з одного боку, а з іншого – створення високоточної і чутливої техніки систем автоматизації і контролю для промисловості, побутових цілей, транспорту, військової техніки тощо. Останній напрямок забезпечує розвиток і удосконалення технології виробництва, інтенсивне зростання продуктивності праці, забезпечення дотримання норм санітарно-гігієнічних умов праці персоналу та високої якості готової промислової продукції. Саме тому дослідження і розробки методик і вимірювальних засобів величин як електричної, так і неелектричної природи на сьогодні є актуальним науковим напрямком.

Вологість є важливим показником, що використовується в промисловості для визначення придатності та якості сировинних матеріалів, а також є невід’ємною складовою і контрольованим параметром повітряних середовищ виробничих, складських середовищ, мікроклімату технологічних середовищ. Тому розробка нових засобів й удосконалення існуючих систем вимірювання вологості речовин в усіх агрегатних станах займає одне з визначних місць в інформаційно-вимірювальній техніці.

Значний внесок у розвиток вітчизняної інформаційно-вимірювальної техніки зробили такі провідні вчені: З. Ю. Готра [8, 28, 31], В. В. Кухарчук [110], В. С. Осадчук [10–11, 13, 47, 103], О. В. Осадчук [12, 13, 47], М. А. Філінюк [49–51], а також закордонні вчені Г. Віглеб [9], О. Н. Негоденко [7], М. А. Берлінер [15], Е. А. Тутов [39–41] та ін.

На сьогоднішній день проблемами розробки і практичного застосування інформаційно-вимірювальної техніки займаються такі наукові заклади як Національний технічний університет «Львівська політехніка» (м. Львів), Національний технічний університет «КПІ» (м. Київ), Київський національний університет імені Тараса Шевченка (м. Київ), Харківський національний університет радіоелектроніки (м. Харків), Інститут фізики напівпровідників НАН України (м. Київ), Київський національний університет технологій та дизайну (м. Київ), Харківський націона-

льний технічний університет (м. Харків), Вінницький національний технічний університет (м. Вінниця).

Наукові дослідження цього напрямку розвинуті в наукових школах Вінницького національного технічного університету, а саме: розвиток теорії від'ємного опору і оцінка її ефективності розглянуті в роботах проф. М. А. Філінюка [49–51], дослідження теоретичних основ реактивних властивостей напівпровідникових приладів у роботах проф. В. С. Осадчука [10–11, 13, 47, 103], розробка теорії мікроелектронних частотних перетворювачів на основі транзисторних структур з від'ємним опором і її практичного застосування подано в роботах проф. О. В. Осадчука [12, 13, 47].

Актуальність теми полягає у необхідності удосконалення промислового устаткування й організації процесу виробництва, що досягається використанням сучасних досліджень і розробок в галузях матеріалознавства та інформаційно-вимірювальних технологій від етапу розробки і виготовлення первинного перетворювача інформації до проектування складних систем перетворення і обробки інформації.

Ефективність функціонування таких систем значною мірою забезпечується створенням ефективних алгоритмів роботи та адекватних реальності математичних моделей фізичних процесів перетворення і обробки інформації у вимірювальному каналі приладів. Це дозволяє врахувати всі суттєві фактори, що впливають на виробничий процес та якість готової продукції, забезпечують безпечність технологічного обладнання.

Визначення рівня вологості як невід'ємної складової газового середовища чистих кімнат, технологічних установок та інших газових об'ємів із заданим складом пов'язана із значним впливом вологи на протікання технологічних операцій та якості готової продукції мікроелектронної, хімічної, фармацевтичної, харчової та інших галузей промисловості завдяки її значним розчинним і окислювальним властивостям, що є перспективним науковим напрямком.

Удосконалення систем чистих кімнат, та й інших технологічних ліній і установок, може відбуватися на всіх рівнях перетворення інформації. На рівні первинного перетворювача, сучасні дослідження властивостей плівок аморфного пористого кремнію і його окису, дозволяють їх використання для створення чутливих шарів первинних перетворювачів вологості, як ємнісних чи резистивних, так і чутливих транзисторних МДН-структур.

Використання вологочутливих транзисторних структур в якості первинних перетворювачів відкриває перспективи проектування автогенераторних вторинних перетворювачів інформації, принцип дії яких засновано на перетворенні величини вимірюваного параметру у частотний інформативний сигнал. Дані вторинні перетворювачі характеризуються високою точністю і чутливістю вимірювання, завадостійкістю вихідного частотного сигналу, придатного для переведення у цифровий код для використання в сучасних комп'ютеризованих системах автоматизації виробництва, обробки за допомогою ЕОМ та інших мікропроцесорних систем збору і обробки інформації. При цьому, на відміну від параметричних перетворювачів інформації, усувається необхідність використання підсилювачів сигналу первинного перетворювача, які вносять власні шуми в інформативний сигнал.

Виходячи з наведених міркувань, використання принципу перетворення вимірюваної фізичної величини у частотний інформаційний сигнал за допомогою чутливих автогенераторних структур, дозволяє розробку й удосконалення радіотехнічних систем контролю параметрів систем технологічного обладнання та інших інформаційних систем, що є перспективним науковим напрямком.



## **1 СУЧАСНИЙ СТАН РОЗВИТКУ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ВОЛОГОСТІ ГАЗОПОДІБНИХ СЕРЕДОВИЩ**

Волога (вода у всіх її агрегатних станах) входить до складу багатьох речовин і матеріалів, газових середовищ і навіть гідрофобних речовин (наприклад, нафта і нафтопродукти), впливаючи тим самим на їх фізико-хімічні властивості і перспективи застосування для задоволення потреб людини, тому контроль і вимірювання цього параметра для різних речовин є необхідною умовою їх раціонального використання.

Тому на сучасному етапі розвитку науки і виробництва гостро стоїть питання удосконалення різноманітних радіотехнічних засобів та систем контролю параметрів і якості промислової продукції, в тому числі, мікроелектронної промисловості [1–6], забезпечення оптимальних параметрів мікроклімату для тривалого зберігання готової продукції та напівфабрикатів різноманітних галузей промисловості, забезпечення сприятливих умов для працівників, комфортного мікроклімату місць масового скупчення людей та в побуті.

Тому актуальним на сьогодні напрямком наукової і технічної діяльності є розробка теоретичних основ функціонування і практичної реалізації високоточних і чутливих перетворювачів різних фізичних величин, в тому числі вологості, для удосконалення інформаційно-вимірювальних систем автоматизації виробництва [7, 8], а також забезпечення санітарно-гігієнічних умов праці.

За останні десятиріччя в процесі удосконалення існуючої номенклатури інформаційно-вимірювальної техніки спостерігається тенденція до уніфікації технологій виробництва перетворювачів різних фізичних величин у рамках твердотільної (напівпровідникової) технології [20], що пов'язано із значними досягненнями таких галузей знань, як фізика твердого тіла, теорія поля, фізична хімія та ін., що дозволяє всебічно розглянути властивості напівпровідникових матеріалів для розробки і створення первинних перетворювачів фізичних величин з високими метрологічними показниками, а також зменшити їх масо-габаритні розміри, підвищити технологічність виготовлення, а отже зменшити їх собівартість.

Одним з напрямків вирішення поставленої задачі є розробка первинних перетворювачів фізичних величин (в тому числі вологості газоподібних речовин) на основі генераторних транзисторних структур з від'ємним диференційним опором [10–13], робота яких ґрунтується на основі теоретичних досліджень залежності амплітуди і спектрального складу вихідного сигналу від величини вимірюваного параметра навколишнього середовища і як наслідок, параметри вихідного інформативно-

го сигналу (спектральний склад, початкова фаза, частота). Це дозволяє отримувати частотний інформативний сигнал без аналого-цифрового перетворення, яке вносить свої похибки вимірювання і значно підвищує вартість вимірювального обладнання і систем контролю в цілому.

Проблематика цього питання розглядається в даному розділі.

### 1.1 Аналіз вологості повітря як об'єкта вимірювання

На сучасному етапі розвитку науки і техніки досить гостро стоїть проблема підвищення якості, ефективності виробництва промислової, сільськогосподарської продукції, дотримання санітарно-гігієнічних норм охорони праці, а також заданих параметрів виробничого, складського і побутового мікроклімату, забезпечення чистоти матеріалів.

Вологе незабруднене повітря можна розглядати як суміш повітря і пари, якій характерні широкі інтервали зміни вмісту вологи від  $2 \times 10^{-6}$  до  $4 \div 5 \%$  об'єму [14]. При звичайних температурах і тисках вологі газу можуть описуватися рівняннями ідеального газу із точністю, достатньою для вирішення практичних задач.

По-перше, такі газу описуються законом Дальтона, що виражається:

$$p = p_c + p_w, \quad (1.1)$$

де  $p_c$ ,  $p_w$  – відповідно парціальні тиски сухого повітря і водяної пари.

Для кількісної оцінки вмісту вологи використовують низку показників, які можна розділити на такі групи [15]:

1) величини, які характеризують концентрацію водяної пари, серед яких:

- абсолютна вологість  $a$ , тобто маса водяної пари, яка міститься в одиничному об'ємі газу, вимірюється в  $g / cm^3$ ;

- пружність, або парціальний тиск водяної пари  $p_w$ , виражається в  $Pa$ , або мм. рт. ст.

2) характеристики вологісних співвідношень:

- вологовміст – відношення маси водяної пари до маси сухого повітря. Цю величину можна також розглядати як співвідношення густини водяної пари до густини сухого повітря;

- об'ємний вологовміст  $\chi$  – відношення об'єму пари до об'єму сухого повітря;

- молярна частка водяної пари  $s$  – відношення кількості молей водяної пари до загальної кількості молей вологого повітря;

3) температура точки роси  $\tau_g$  – температура, яку отримує газ в результаті ізобаричного охолодження до повного насичення по відношенню до плоскої поверхні води (криги).

4) відносна вологість  $\varphi$  – відношення дійсної вологості газу до її максимумально можливої, яка відповідає насиченню при даній температурі. Величина  $\varphi$  показує ступінь насичення водяною парою, використовується, для характеристики вологості повітряних середовищ, виражається у відсотках.

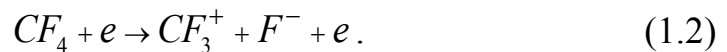
Такий показник, як відносна вологість (надалі просто вологість повітря) повітря є одним з найголовніших параметрів для визначенні кількісного складу водяної пари в повітрі, адже вона показує ту ступінь конденсації вологи, що може виникнути, наприклад, на поверхні продуктів харчування при їх збереженні, або на поверхні напівпровідникових пластин під час технологічних операцій.

Якщо розглядати мікроелектронну промисловість, то одним з пріоритетних напрямків її розвитку в наш час є підвищення якості та виходу придатних готових виробів. Така мета досягається розробкою нових і удосконаленням існуючих технологічних процесів і обладнання, що враховують всі фізико-хімічні процеси, які протікають в процесі виготовлення радіоелементів й інтегральних схем [16]. Іншим шляхом підвищення якості продукції і зниження відсотка браку є жорсткий контроль всіх параметрів технологічного процесу, забезпечення прийнятних характеристик використовуваних матеріалів, чистоти навколишнього газового середовища та інші умови, які впливають на якісні характеристики готової продукції [3].

Рівень вологості повітря, як одного з найголовніших факторів впливу на протікання технологічних операцій, нормується для різних операцій мікроелектронної технології: автоепітаксія кремнію, де при умові присутності в технологічній парогазовій суміші навіть мікрокількості вологи (біля 1 ppm) та інших кисневмісних домішок викликає ріст дефектного полікристалічного шару кремнію [5]. До неповторюваності результатів приводить наявність парів води в процесах вакуумно-плазмового травлення. Вміст вологи всередині корпусів інтегральних схем не повинен перевищувати 500 ppm, а в операціях збирання мікросхем – 50 ppm [5]. Такі жорсткі вимоги до вмісту вологи висуваються й іншими галузями промисловості. Так, в нафтохімічній і хімічній промисловості часто виникає необхідність визначити вологість в ароматичних вуглеводнях – її рівень не повинен перевищувати  $10^{-4} - 10^{-5}$  % загальної маси.

Розглянемо детальніше вплив вологості на протікання процесу плазмохімічної обробки кремнієвих пластин. Атмосферна волога, що потрапляє до вакуумної технологічної системи, стає додатковим реагентом, який бере участь у взаємодії частинок плазми з поверхнею оброблюваного матеріалу. Хімічні процеси, що протікають в плазмі, різноманітні і включають в себе велику кількість різновидів елементар-

них реакцій взаємодії, протікання яких залежить від параметрів технологічного процесу (тиск і склад робочого газу, температура газу і матеріалу, типу використовуваного розряду та інші). Про домінуючий тип хімічної реакції, що відбувається в цьому технологічному процесі, можна говорити лише з точки зору ймовірності його протікання в даних технологічних умовах [17]. В нерівноважній плазмі ВЧ-розряду, яка найчастіше використовується в процесах сухої обробки напівпровідникових пластин, найбільша ймовірність протікання дисоціативного прилипання [19]:



Процес вакуумно-плазмового травлення відбувається в нерівноважній низькотемпературній плазмі пониженого тиску. Середня енергія електронів в такій плазмі складає  $1..10$  еВ ( $1,6 \times 10^{-19}..1,6 \times 10^{-18}$  Дж), густина електронів  $10^9..10^{12}$ , тоді як енергія молекул газу складає  $0,05..0,1$  еВ, а їх густина в діапазоні тиску  $0,1..500$  Па складають  $10^{13}..10^{17} \text{ м}^{-3}$  [18].

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 ця реакція пройшла в 1 моль пари.

Оскільки 1 моль речовини містить  $N_A = 6,02 \times 10^{23}$  атомів, то енергія, що припадає на один атом:

$$\frac{\Delta N}{N_A} = \frac{241,83 \times 10^3}{6,02 \times 10^{23}} = 40,17 \times 10^{-20} = 2,5 \text{ eV}.$$

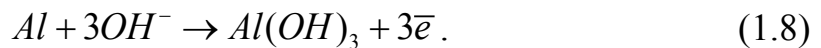
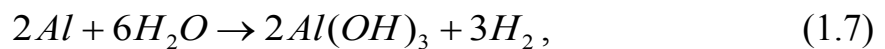
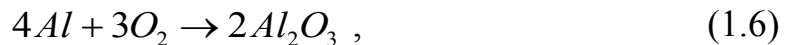
Як бачимо, більшість електронів мають таку енергію і тому існує висока ймовірність протікання реакції (4.1) при зіткненні електрона з молекулою води. Наведена реакція проходить через такі стадії:



Утворені іони, в свою чергу, можуть реагувати з оброблюваними пластинами, при цьому на поверхні останньої з'являються плівки з оксидів і гідрооксидів. Найбільше схильні до такої взаємодії плівки металізації.

Описаний процес дисоціації молекули води може відбуватись не лише всередині технологічних установок, але й у повітряній масі під дією різноманітних впливів навколишнього середовища: теплових, оптичних, радіаційних випромінювань тощо. Утворені іони мають досить високу хімічну активність і можуть взаємодіяти з поверхнями різноманітних матеріалів [19].

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 (1.6)–(1.8):



Фізичні характеристики електронів: енергія електронів, переріз дисоціації води при зіткненні з електроном, визначаються із закону розподілу за енергіями. Згідно з [14], швидкість таких реакцій визначається:

$$G = n_e n \left( \frac{2}{m_e} \right) \int_{E_{ne}}^{\infty} \sigma(E_e) f(E_e) E_e^{1/2} dE_e, \quad (1.9)$$

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;  $\Delta H$  – порогова енергія процесу виникнення високоенергетичних і хімічно активних частинок внаслідок зіткнення з електронами.

Рівняння (1.9)–(1.11) будуть справедливими і для взаємодії молекул води з іншими лужними і рідкоземельними металами (мідь, сплави) під час зберігання, чи обробки.

З наведеного вище видно, що наявна в повітрі волога може значно впливати на проходження промислових процесів. Тому одним з напрямків удосконалення технологічного обладнання і систем автоматизації є підвищення метрологічних характеристик перетворювачів вологості на основі сучасних досліджень в галузі фізики, матеріалознавства й інформаційних технологій.

## 1.2 Сучасні перетворювачі вологості газоподібних речовин

### 1.2.1 Аналіз методів вимірювання відносної вологості газів

Оптимальний метод вимірювання вологості газів обирається з врахуванням конкретних вимог, що ставляться до вимірювання, серед яких можна виділити точність, чутливість, час спрацювання, швидкодія, масогабаритні параметри [52, 104] інші вимоги, що ставляться до технологічних інформаційно-вимірювальних систем, які пов'язані з особливостями вимірювального середовища. Перший основний поділ методів вимірювання вологості газів є поділ на прямі і опосередковані [15].

В основі прямих методів лежить розділення досліджуваної речовини чи матеріалу на вологий і сухий залишки. При опосередкованому методі вимірювання вологість матеріалу визначається за фізичними властивостями матеріалів чи іншими величинами, функціонально пов'язаними з вологістю.

Більш детально методи вимірювання вологості можна розділити на такі групи [31]:

1. Вилучення водяної пари з газової суміші, що базується на кількісних вимірюваннях її складу. Серед конкретних методів виділяються: термографітичний, електролітичний, газової хроматографії, титрування Карла-Фішера. Складність видалення пари з газових сумішей робить цю групу методів малоперспективними для практичного використання.

2. Методи, що ґрунтуються на використанні фізико-хімічних властивостей води, серед яких: використання властивості поглинання електромагнітних випромінювань у діапазонах НВЧ, ІЧ та УФ, нейтронного розсіювання, зміна діелектричної сталої та електропровідності. Ці методи можна використовувати для створення мікроелектронних перетворювачів вологості у випадках вимірювання великих об'ємів досліджуваної речовини.

3. Методи, що ґрунтуються на зміні фізико-хімічних властивостей і характеристик вимірювальних матеріалів під дією молекул води. Випаровування, адсорбція і дифузія молекул води, а також їх хімічна взаємодія з чутливим матеріалом, призводить до зміни температури, електропровідності, діелектричної сталої, механічних характеристик, а також теплопровідності останнього.

Функціональний зв'язок цих властивостей з вмістом вологи у досліджуваному середовищі є основою побудови різних типів перетворювачів вологості, що працюють за принципом опосередкованого визначення вологості речовин і матеріалів.

Оскільки в цій роботі розглядається проблема удосконалення приладів підтримки заданих параметрів газових середовищ, серед яких є і вологість повітря, то розглянемо основні механізми фіксації вологості і принципи перетворення величини вологості газового середовища в ін-

формативний електричний сигнал, а також первинних перетворювачів вологості газових середовищ атмосферного і підвищеного тиску, які можуть бути застосовані в промисловості.

На рис. 1.1 продемонстровано систематизацію первинних перетворювачів вологості газових середовищ за принципом перетворення вологості в електричний сигнал [8, 31].

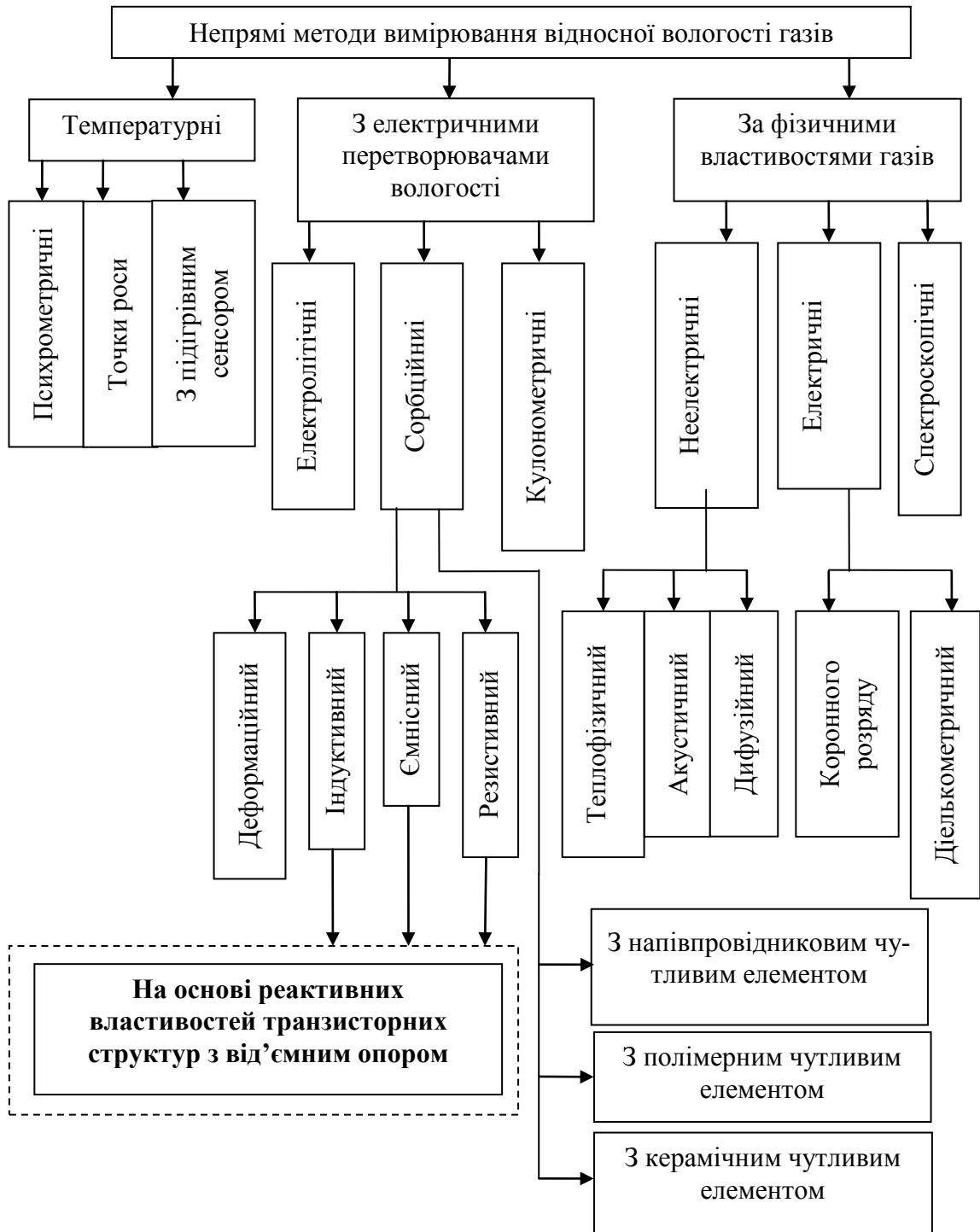


Рисунок 1.1 – Систематизація непрямих методів вимірювання вологості повітря

В подальшому в роботі розглянемо типи і конструкції тих перетворювачів вологості, метрологічні і конструктивні параметри яких дозволяють їх використовувати для вимірювання вологості повітря в промислових умовах.

### 1.2.2 Температурні та спектроскопічні перетворювачі вологості газів

Ці методи ґрунтуються на використанні ефекту розсіювання чи поглинання вологою оптичного випромінювання певного діапазону довжини хвилі. При цьому волога може бути конденсованою на поверхні спеціального охолодженого дзеркала.

Розглянемо принцип функціонування гігрометра точки роси, що реалізує цей принцип. Всередині вимірювальної камери газ, що аналізується, охолоджується до температури насичення водяної пари, тобто точки роси. Цю температуру визначають в момент конденсації пари на плоскій полірованій поверхні дзеркала. Для охолодження газу використовують дроселюючі, термоелектричні, термомагнітні пристрої. Момент випадання роси фіксується фотоелектричним і кондуктометричним способом. В останньому випадку вимірюють поверхневий опір дзеркала, на якому знаходиться конденсат. Знаючи точку роси і температуру газу, можна обчислити вологість за формулою [20]

$$\varphi = \frac{p_1}{p_2}, \quad (1.10)$$

де  $p_1$  і  $p_2$  – відповідно тиск насиченої пари при точці роси і температурі газу.

Перевагою таких перетворювачів є низький поріг визначення вологості (в точці роси  $-100^{\circ}\text{C}$  відповідає концентрація вологи  $10^{-6}\%$ ), похибка найкращих зразків від  $0,3$  до  $0,5^{\circ}\text{C}$ , але не перевищує одного градуса Цельсія. Недолік таких пристроїв: неможливість визначення вологості газів, температура конденсації яких вища вимірюваної точки роси.

Прикладом первинного перетворювача вологості такого типу, є пристрій, принцип роботи якого заснований на використанні багаторазового повного внутрішнього відбиття, розробленого для контролю вмісту емульсійної води в інших зріджених газах [21]. Світловий потік від випромінювача за допомогою модулятора, що несе інтерференційні фільтри з різними спектрами пропускання, спрямовується на пластину, змочену з обох боків аналізованою емульсією. Після багаторазового відбиття від границі пластина-зразок випромінювання спрямовується на фоторезистор [21]. Електричний сигнал останнього підсилюється і реєструється



Іншим прикладом структури гігрометрів такого типу є двохелектродний напівпровідниковий перетворювач точки роси поданий на рис. 1.2 [7, 31, 34]:

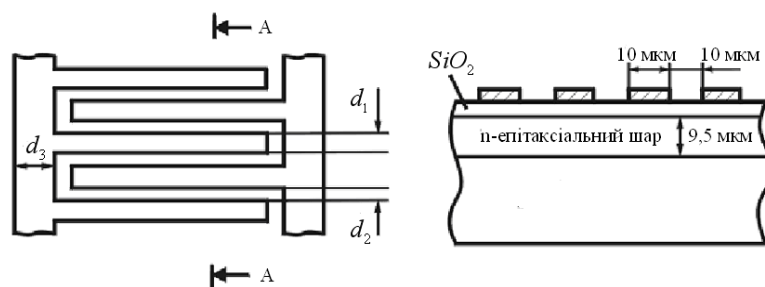


Рисунок 1.2 – Структура гігрометра точки роси на основі пористого кремнію

Поверхнева провідність структури при наближенні до точки роси збільшується згідно з законом, близьким до експоненційного. Утворення на поверхні твердої фази призводить до різкого зменшення електропровідності конденсату. В даному перетворювачі вологості саме шар пористого окису кремнію є вологочутливим елементом, що демонструє можливість застосування шару пористого кремнію та його окису для створення вологочутливого шару, на основі якого можливо створювати перетворювачі вологості резистивного, ємнісного типу, а також створювати плівки вологочутливого матеріалу в МДН-структурах.

На даний час найширше представленим класом спектроскопічних перетворювачів вологості газів є оптичні, в основі функціонування яких лежить властивість води поглинати інфрачервоне випромінювання певної довжини хвилі. Така її властивість дозволяє створювати перетворювачі, які б вимірювали вологість різних матеріалів: твердих, рідких та газоподібних [14, 22].

Здатність молекул води поглинати оптичне випромінювання засновано на тому, що атомна поляризація атомів кисню, які входять до складу 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 [14]. 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, де молекула води має спектр поглинання на частоті 1,94 мкм. 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 рівня відносної вологості [14, 22].

Огляд літературних джерел [9, 14, 20, 23–26] показав, що при вимірюванні вологості газових середовищ використовують два основні методи побудови оптичного тракту. Перший – джерело і приймач оптичного випромінювання розміщуються на протилежних внутрішніх поверхнях вимірювальної камери і перешкодою проходження випромінювання є власне поглинання молекулами води. Іншим шляхом побудови оптичного шляху випромінювання є включення до складу вимірювальної камери охолоджуваного дзеркала (рис. 1.3) [24–26]. На поверхні останнього випадає конденсат і оптичне випромінювання при попаданні на нього, поглинається і розсіюється, причому інтенсивність описаних процесів залежить від товщини плівки конденсату на поверхні, а отже від величини вологості досліджуваного газового середовища. Перевагами такого типу конструкцій перетворювачів вологості є значно менші геометричні розміри, менша чутливість до забруднення досліджуваного газового середовища і спектрального складу випромінювання. Прикладом реалізації описаного методу вимірювання вологості є конструкція оптичного перетворювача вологості газів, що показана на рис. 1.3 [26].

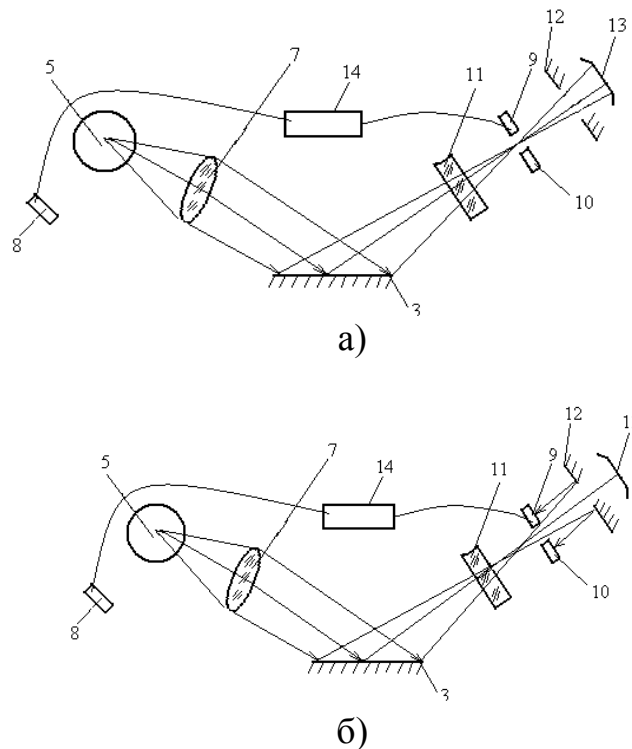


Рисунок 1.3 – Проходження променів світла в оптичній схемі перетворювача вологості: а) – при відсутності конденсату на дзеркалі; б) – при наявності конденсату на дзеркалі

Принцип роботи приладу на рис. 1.4 полягає у тому, що газ подається під надлишковим тиском у вимірювальну камеру 1. До моменту випадання конденсату (див. рис. 1.3а) на охолоджуваному дзеркалі 3, світловий потік, який формується освітлювальною лампою 5 і об'єктивом 7, відбиваючись від поверхні охолоджуваного дзеркала 3, проходить крізь отвір фотоприймача 9 і потрапляє у світлову пастку 13. Через те, що світлова пастка 13 має ламану поверхню, в ній відбувається повне гасіння світлового потоку. На фотоприймач відбитого світлового потоку 9 випромінювання при цьому не потрапляє. При випаданні конденсату на поверхні охолоджуваного дзеркала 3 змінюються умови відбиття випромінювання (див. рис. 1.3б). При цьому світловий потік частково потрапляє на дзеркало 12 і, відбившись від нього, потрапляє на фотоприймач відбитого світлового потоку 9. Електричні сигнали від фотоприймача 8, який міститься в тубусі 4 вузла освітлювача, і фотоприймача відбитого світлового потоку 9 порівнюються у блоці порівняння електричних сигналів від фотоприймачів 14. Різке зменшення різниці цих сигналів характеризує момент випадання конденсату на поверхні охолоджуваного дзеркала [26].

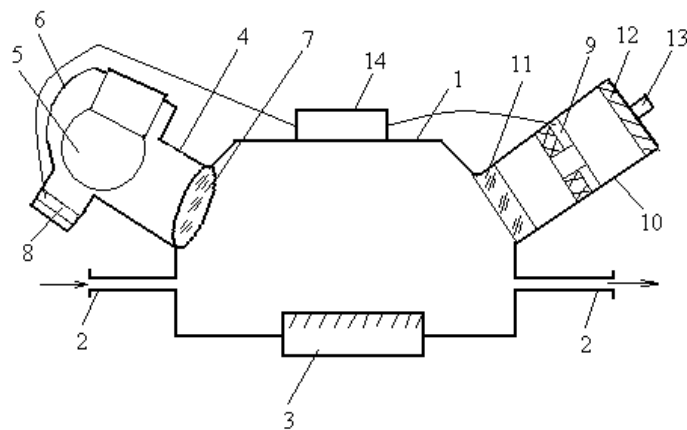


Рисунок 1.4 – Конденсаційний гігрометр

В ході структурного аналізу виявлено [9, 14, 20], що ці оптичні прилади мають значний недолік, пов'язаний з тим, що геометричні розміри оптичної системи мають бути підігнані з точністю до десятих мікрон, тому такі прилади є дуже чутливими до всіх видів механічних коливань, одиночних і серійних ударів тощо. Тому експлуатація таких приладів вимагає великих коштів на утримання у робочому стані, що відображається на собівартості продукції.

### 1.2.3 Кулонометричні перетворювачі вологості газів

Кулонометричні перетворювачі вологості працюють за принципом неперервного поглинання вологи плівкою гігроскопічної речовини і од-

## ЛІТЕРАТУРА

1. Автоматизация технологического оборудования микроэлектроники / А. А. Сазонов, Р. В. Корнилов, Н. П. Кохан [та ін.]. – М. : Высш. шк., 1991. – 331 с.
2. Технология БИС / К. Пирс, А. Адамс, Л. Кац [та ін.]. – М. : Мир, 1986. – 400 с.
3. Каленик Дмитрий Владимирович. Технология материалов электроники : Учебное пособие / Д. В. Каленик – Челябинск : Изд. ЮУрГУ, 2001. – Ч. 1. – 119 с.
4. Березин Андрей Сергеевич. Технология и конструирование интегральных микросхем : учебн. пособие для вузов / А. С. Березин, О. Р. Мочалкина – М. : Радио и связь, 1992. – 320 с.
5. Коледов Леонид Александрович. Технология и конструирование микросхем, микропроцессоров и микросборок / Коледов Л. А. – М. : Радио и связь, 1989. – 400 с.
6. Технология СБИС : в 2х кн. / С. Зи, К. Могэб, Д. Фрейзер [та ін.]. – М. : Мир, 1986. – 453 с.
7. Микроэлектронные преобразователи неэлектрических величин : учебное пособие / О. А. Агеев, В. М. Мамиконова, В. В. Петров [та ін.]. – Таганрог : Изд-во ТРТУ, 2000. – 153 с.
8. Давачі : довідник / З. Ю. Готра, Л. Я. Іляницький, Є. С. Поліщук, та ін. ; під ред. З. Ю. Готри та О. І. Чайковського]. – Львів : Каменяр, 1995. – 312 с.
9. Виглеб Г. Датчики / Г. Виглеб ; [пер. с нем. М. А. Хацериова] – М. : Мир, 1989. – 196 с.
10. Осадчук В. С. Сенсори вологості : навчальний посібник / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Л. В. Крилик – Вінниця : УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2003. – 208 с.
11. Осадчук Володимир Степанович. Напівпровідникові перетворювачі інформації : навчальний посібник / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук – Вінниця : ВНТУ, 2004. – 208 с.
12. Осадчук Олександр Володимирович. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором / О. В. Осадчук – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2000. – 303 с.

13. Осадчук Володимир Степанович. Напівпровідникові прилади з від'ємним опором : навчальний посібник / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук – Вінниця : ВНТУ, 2006. – 162 с.

14. Мухитдинов Маил. Оптические методы и устройства контроля влажности / М. Н. Мухитдинов, Э. С. Мусаев – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 96 с.

15. Берлинер Михаил Андреевич Измерение влажности. / М. А. Берлинер – М. : Энергия, 1973. – 400 с.

16. Патент України на корисну модель № 31602, (51) МПК (2006.01) H01L 21/302. Спосіб плазмохімічної обробки матеріалів / А. Ю. Савицький, Ю. С. Кравченко ; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № 200714875 ; заявл. 27.12.2007 ; опубл. 10.04.08, Бюл. № 7.

17. Киреев В. Ю. Плазмохимическое и ионно-химическое травление микроструктур / В. Ю. Киреев, Б. С. Данилин, В. И. Кузнецов / – М. : Радио и связь, 1983. – 128 с.

18. Данилин Б. С. Расчет стационарной концентрации радикалов и скорости травления материалов в плазме газовых разрядов / Б. С. Данилин, В. Д. Жураков, В. И. Кузнецов // Химия высоких энергий. – 1980. – № 1. – С. 72–77.

19. Коттон Френк. Основы неорганической химии / Ф. Коттон, Дж. Уилкинсон – М. : Мир, 1979. – 679 с.

20. Пинхусович Роман Леонидович. Методы и приборы для измерения относительной влажности / Р. Л. Пинхусович, В. П. Коломыйцев – М. : Энергоатомиздат, 1977. – 413 с.

21. А. св. № 1257480 СССР, МКИ G01N 21/81. Датчик влажности газовых смесей / С. О. Мирумянц, В. С. Макаров, Н. И. Москаленко ; заявл. 27.01.85 ; опубл. 15.09.85. ; Бюл. № 34.

22. Савицький А. Ю. Оптичні сенсори вологості робочих газів підвищеного і атмосферного тиску / А. Ю. Савицький, Ю. С. Кравченко // Оптико-електронні інформаційно-вимірвальні технології. – 2008. – № 16. – С. 175–182.

23. Патент України на корисну модель № 39596, (51) МПК (2006.01) G01N 21/53. Конденсаційний гігрометр / А. Ю. Савицький, Ю. С. Кравченко ; заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет – № 200803001 ; заявл. 07.03.2008 ; опубл. 10.03.2009 ; Бюл. № 5.

24. Патент України на корисну модель № 34559, (51) МПК (2006.01) G01N 21/53. Газоаналізатор / А. Ю. Савицький, Ю. С. Кравченко, О. Л. Гладковська ; заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет – № 200804620 ; заявл. 10.04.2008 ; опубл. 11.08.2008 ; Бюл. № 15.

25. Патент України на корисну модель № 34556, (51) МПК (2006.01) G01N 21/53. Оптичний газоаналізатор / А. Ю. Савицький, Ю. С. Кравченко, Л. В. Крилик ; заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет – № 200804585 ; заявл. 10.04.2008 ; опубл. 11.08.2008 ; Бюл. № 15.

26. Патент України на корисну модель № 40956, (51) МПК (2006.01) G01N 21/53. Конденсаційний гігрометр / А. Ю. Савицький, В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Л. В. Крилик ; заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет – № 200814735; заявл. 22.12.2008 ; опубл. 27.04.2009 ; Бюл. № 8.

27. Курмашев Ш. Д. Кремниевые МДП–структуры с оксидами редкоземельных элементов в качестве диэлектрика / Ш. Д. Курмашев, И. М. Викулин, С. В. Ленков // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2001. – № 6. – С. 6–9.

28. Мікроелектронні сенсори фізичних величин : науково-навчальне видання / [В. Вуйцік, З. Ю. Готра, В. В. Григор'єв та ін.] ; під ред. З. Ю. Готри. – [том 1]. – Львів : Ліга-Прес, 2002. – 475 с.

29. А. с. № 1288557 СССР, МКИ G01N 19/12. Датчик влажности / Т. И. Берелашвили, К. С. Сибашвили, Г. А. Вартанов ; заявл. 27.07.86 ; опубл. 07.02.87. Бюл. № 22.

30. Бутурлин Андрей Иванович. Микроэлектронные датчики влажности / А. И. Бутурлин // Зарубежная электронная техника. – 1984. № 9. – С. 354.

31. Мікроелектронні сенсори фізичних величин : науково-навчальне видання. В 3 томах. Том 1 / Вуйцік В., Готра З. Ю., Григор'єв В. В [та ін.]; за редакцією З. Ю. Готри. – Львів : Ліга-Прес, 2002. – 475 с.

32. Porous silicon coupled with thermoelectric cooler: humidity sensor / A. Foucaran, B. Sorli, M. Garsia // Sensors and Actuators. – 2000. – № 79. – P. 189–193.

33. Capacitive SiO humidity sensors with novel microstructures / A. T. Wu, M. Seto, M. J. Brett // Sensors and materials. – 1999. – № 8. – P. 493–505.

34. Пат. 3345596 (USA). Relative humidity sensor / R. A. Delaney. – Publ. 1967.

35. Пат. 3906426 (USA). Humidity sensor / L. E. Frazee, A. V. Fraioli. – Publ. 1975.

36. Channon N. D., Barnwell P. G. A thick film humidity sensor // Components, Hybrids, and Manufacturing Technology. 2003 – v. 3, № 2. – P. 237–243.

38. IEEE Solid-State Sensors Conference. – Los Angeles, 1984. – P. 8–9.

39. Равновесные и неравновесные процессы на пористом кремнии / Е. А. Тутов, Н. М. Павленко, Е. Е. Тутов [та ін.] // Письма в ЖТФ. – 2006, Т. 32, выпуск 13. – С. 6–12.

40. Влияние адсорбции паров воды на вольт-фарадные характеристики гетероструктур на пористом кремнии / Е. А. Тутов, Н. М. Павленко, Э. П. Домашевская [та ін.] // Журнал технической физики. – 2003, Т. 73, выпуск 11. – С. 83–90.

41. Гетерофазные процессы при взаимодействии пористого кремния с водой / Е. А. Тутов // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2009. – Т. 9, выпуск 1. – С. 131–137.

42. Патент № 59-23598 Японії, кл. G01N27/02, Напівпровідниковий сенсор вологості / Такаси Нуэ, опубл. 13.03.92.

43. Патент України на корисну модель № 40955, (51) МПК (2006.01) G01N 21/53. Гігрометричний сенсор на польовому транзисторі / А. Ю. Савицький, В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Л. В. Крилик ; заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет – № 200814731 ; заявл. 22.12.2008 ; опубл. 27.04.2009 ; Бюл. № 8.

44. Савицький А. Ю. Вологочутливий двозатворний МДН-транзистор / Савицький А. Ю., Осадчук О. В. // Вісник ВПІ. – 2010. № 6 – С. 93–96.

45. Патент України на корисну модель № 34240, (51) МПК (2006.01) G01N 25/56. Сенсор вологості / З. Ю. Готра, О. З. Готра, К. Камуда, І. Є. Дубницька, заявник та патентовласник державний університет «Львівська політехніка» – № 99063374; заявл. 17.06.1999 ; опубл. 15.02.2001; Бюл. № 1.

46. Патент України на корисну модель № 34264, (51) МПК (2006.01) G01N 25/56. Сенсор вологості / З. Ю. Готра, О. З. Готра, К. Камуда, І. Є. Дубницька, заявник та патентовласник державний університет

«Львівська політехніка» – № 99063429; заявл. 18.06.1999 ; опубл. 15.02.2001; Бюл. № 1.

47. Осадчук В. С. Мікроелектронні сенсори температури з частотним виходом : навч. посіб. / В. С. Осадчук, Осадчук В. С., Н. С. Кравчук – Вінниця : ВНТУ, 2007. – 163 с.

48. Особенности вольт-амперных характеристик и температурные зависимости электропроводимости слоев пористого кремния / Л. М. Сорокин, В. И. Соколов, Е. А. Калмыков [та ін.] // Письма в ЖТФ. – 2010. Т. 36, – С. 61–69.

49. Філінюк М. А. Аналіз впливу зворотного зв'язку на параметри динамічного негatrona на польовому транзисторі / М. А. Філінюк, О. О. Лазарєв // Вісник ВПІ. – 2000. – № 6. – С. 94–97.

50. Філінюк М. А. Дослідження енергетичних властивостей нелінійної ємності / М. А. Філінюк, О. О. Лазарєв // Вісник ВПІ. – 2000. – № 4. – С. 92–95.

51. Негатроника / С. А. Гаряинов, А. Н. Серьезнов, Л. Н. Степанова, Н. А. Филинюк – Новосибирск : Наука, 1995. – 320 с.

52. Кулаков Михаил Васильевич. Технологические измерения и приборы для химических производств / М. В. Кулаков – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1983. – 424 с.

53. Хамакава Й. Аморфные полупроводники и приборы на их основе / Й. Хамакава – М. : Металлургия, 1986. – 376 с.

54. Смит Ричард. Полупроводники / Смит Р. – М. : Мир, 1982. – 560 с.

55. Аморфные полупроводники / М. Бродски, Д. Карлсон, Дж. Коннел, [та ін.] / – М. : Мир, 1962. – 419 с.

55. Горелик Семен Самуилович. Материаловедение полупроводников и диэлектриков / С. С. Горелик – М. : Металлургия, 1988. 320 с.

56. Шалимова Клавдия Васильевна. Физика полупроводников / К. В. Шалимова – М. : Энергия, 1971. – 312 с.

57. Зи С. Физика полупроводниковых приборов : в 2х кн. – Кн. 2. / Зи С. – М. : Мир, 1984. – 456 с.

58. Крилик Л. В. Мікроелектронні частотні перетворювачі вологості на основі напівпровідникових структур з від'ємним опром : дис. кандидата тех. наук : 05.13.05 / Л. В. Крилик. – Вінниця, 2005. – 221 с.



59. Курносов Анатолий Иванович. Технология производства полупроводниковых приборов: учеб. пособие для вузов / А. И. Курносов, В. В. Юдин – М. : Высш. шк., 1986. – 386 с.
60. Ковалевский Александр Альбертович. Физико-химические основы влагочувствительности пленок оксида кремния / А. А. Ковалевский, И. Л. Баранов // Микроэлектроника. – 1996. – Т. 25. Вып. 4. С. 298–302.
61. Тутов Е. А. Неравновесные процессы в емкостных сенсорах на основе пористого кремния / Е. А. Тутов, А. Ю. Андрюков, С. В. Рябцев // Письма в ЖТФ. – 2011. Т. 33, – С. 53–58.
62. Грег С. Адсорбция, удельная поверхность, пористость / С. Грег, К. Синг – М. : Мир, 1984. – 304 с.
63. Разевиг Всеволод Данилович. Схемотехническое моделирование с помощью Micro-Cap 7 / В. Д. Разевиг – М. : Горячая линия-Телеком, 2003. – 368 с.
64. Савицький А. Ю. Радіовимірювальний перетворювач вологості на основі вологочутливого МДН-транзистора / А. Ю. Савицький, О. В. Осадчук // Вісник ВПШ. 2011, № 5 – С. 167–171.
65. Патент України на корисну модель № 75700, (51) МПК (2011.01) G01N 27/22. Спосіб вимірювання вологості / О. В. Поджаренко, М. О. Куцевол, О. М. Куцевол ; заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет – № 2004032000 ; заявл. 18.03.2004 ; опубл. 15.05.2006 ; Бюл. № 5.
66. Патент України на корисну модель № 14659, (51) МПК (2011.01) G01N 27/22. Ємнісний вологомір / О. В. Поджаренко, М. О. Куцевол, О. М. Куцевол ; заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет – № 200511929 ; заявл. 12.12.2005 ; опубл. 15.05.2006 ; Бюл. № 5.
67. Догадин Николай Борисович. Основы радиотехники / Н. Б. Догадин – СПб. : Лань, 2007. – 272 с.
68. Патент України на корисну модель № 65925, (51) МПК (2011.01) G01N 21/53. Напівпровідниковий пристрій для виміру вологості / А. Ю. Савицький, О. В. Осадчук, Л. В. Крилик; заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет – № 201102377 ; заявл. 28.02.2011 ; опубл. 26.12.2011 ; Бюл. № 24.
69. Савицький А. Ю. Принципи вимірювання відносної вологості газів атмосферного і пониженого тиску / А. Ю. Савицький, В. С. Осадчук, О. В. Осадчук // Вісник ХНУ. 2011, № 3 (176) – С. 196–200.

70. Патент України на корисну модель № 42218, МПК (2011.01) G01N 21/53. Напівпровідниковий гігрометричний сенсор / А. Ю. Савицький, О. В. Осадчук, Л. В. Крилик, О. Л. Гладковська, О. С. Звягін ; заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет – № 20090090 ; заявл. 06.02.2009 ; опубл. 25.06.2009 ; Бюл. № 12.

71. Савицький А. Ю. Радіовимірювальний сенсор вологості / А. Ю. Савицький, О. В. Осадчук // V міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП–2011)»: тези доповідей. Вінниця. – 2011. – С. 140–141.

72. Савицький А. Ю. Радіовимірювальний сенсор вологості / А. Ю. Савицький, О. В. Осадчук // I міжнародна наукова конференція пам'яті професора Володимира Поджаренка «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах (ВКДТС–2011)»: тези доповідей. – Вінниця. – 2011. – С. 66.

73. Савицький А. Ю. Частотний перетворювач вологості / Осадчук О. В., Савицький А. Ю. // X міжнародна конференція «Контроль і управління в складних системах»: тези доповідей. Вінниця. – 2010. – С. 92.

74. Савицький А. Ю. Автогенераторний вимірювальний перетворювач з від'ємним опором / С. В. Барабан, А. Ю. Савицький // VII-ая международная научно-техническая конференция «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникация (РТ-2011)»: тези доповідей. Севастополь. – 2011. – С. 427.

75. Электрические измерения. Средства и методы измерений / К. П. Дьяченко, Д. И. Зорин, П. В. Новицкий, Е. Г. Шрамков – М. : Высшая школа, 1972. – 520 с.

76. Савицький А. Ю. Прилад для вимірювання і контролю відносної вологості газів з частотним виходом / А. Ю. Савицький, О. В. Осадчук // Нові технології. Науковий вісник Кременчуцького університету економіки, інформаційних технологій і управління. – 2011, № 3 (33) – С. 3–8.

77. Хайнеман Р. PSPICE Моделирование работы электронных схем / Р. Хайнеман / – М. : ДМК, 2005. – 325 с.

78. Разевиг Всеволод Данилович. Пакет схемотехнического моделирования PSpice 5 / В. Д. Разевиг – М. : Физматлит, 1994. – 256 с.

79. Тугов Н. М. Полупроводниковые приборы / Н. М. Тугов, Б. А. Глебов, Н. А. Чарыков – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.
80. Герман-Галкин Сергей Григорьевич. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в Matlab 6.0 : учебн. пособие./ С. Г. Герман-Галкин – Спб. : КОРОНА-принт, 2001. – 321 с.
81. Сдвижков Олег Анатольевич. Математика на компьютере: Maple 8 / О. А. Сдвижков – М. : Солон-прес, 2003. – 176 с.
82. Дьяконов В. П. Maple 8 в математике, физике, образовании / В. П. Дьяконов – М. : Солон-прес, 2003. – 576 с.
83. Чернышова Татьяна Ивановна. Моделирование электронных схем / Т. И. Чернышова, Н. Г. Чернышов – Тамбов : ТГТУ, 2010. – 80 с.
84. Савицький А. Ю. Автогенераторний вимірювальний перетворювач з від'ємним опором / А. Ю. Савицький // Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій «РТ - 2011» : матеріали 7-ї міжнар. молодіжної наук.-техн. конф. / М-во освіти і науки, молоді та спорту України, Севастоп. нац. техн. ун-т ; наук. ред. Ю. Б. Гімпілевич. – Севастополь : СевНТУ, 2011. – 479 с.
85. Барабан С. В. Мікроелектронний перетворювач температури на основі піроелектричної структури / С. В. Барабан, А. Ю. Савицький // XV Міжнародний молодіжний форум «Радиоелектроника и молодежь в XXI веке» : тези доповідей. Харків. – 2011. – С. 372.
86. Златин Иосиф. Создание и редактирование моделей в OrCAD 15.7. Ч 1 / И. Златин // Компоненты и технологии. – 2007. – № 6. – С. 124–128.
87. Златин Иосиф. Создание и редактирование моделей в OrCAD 15.7. Ч 2 / И. Златин // Компоненты и технологии. – 2007. – № 7. – С. 149–154.
88. Златин Иосиф. Создание и редактирование моделей в OrCAD 15.7. Ч 3 / И. Златин // Компоненты и технологии. – 2007. – № 8. – С. 154–160.
89. Разевиг Всеволод Данилович. Система сквозного проектирования электронных устройств DesignLab 8.0 / В. Д. Разевиг – М. : Солон-Прес, 1999. – 698 с.
90. Патент України на корисну модель № 46483, (51) МПК (2011.01) G01N 27/12. Напівпровідниковий пристрій для виміру вологості / О. В. Осадчук, В. С. Осадчук, Л. В. Крилик, заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № 2001055284 ; заявл. 24.07.2001 ; опубл. 15.02.2002, Бюл. № 5.

91 Патент України на корисну модель № 46483, (51) МПК (2006.01) G01N 27/12. Вимірювач вологості / О. В. Осадчук, В. С. Осадчук, Л. В. Крилик, заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № 2001074689 ; заявл. 05.07.2001 ; опубл. 15.02.2002, Бюл. № 5.

92. Ла-Салль Ж. Исследование устойчивости прямым методом Ляпунова / Ж. Ла-Салль, С. Левшец – М. : Мир, 1964. – 168 с.

93. Данилина Тамара Ивановна. Технология СБИС: учебн. пособие / Т. И. Данилина, В. А. Кагадей – Томск : Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2007. – 287 с.

94. Уайт В. Проектирование чистых помещений / В. Уайт / – М. : Клинрум, 2004. – 360 с.

95. Стефанов Евгений Васильевич. Вентиляция и кондиционирование воздуха / Е. В. Стефанов / – СПб. : АВОК СЕВЕРО-ЗАПАД, 2005. – 399 с.

96. Федотов Алексей Евгеньевич. Чистые помещения / А. Е. Федотов – М. : Асинком, 2003. – 576 с.

97. ГОСТ ИСО 14644-4-2002. Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды: Часть 4. Проектирование, строительство, ввод в эксплуатацию. – введ. 01.03.2003. – М. : Стандартиформ, 2003. – 17 с. – (Межгосударственный стандарт).

98. ГОСТ ИСО 14644-4-2002. Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды: Часть 2. Требования к контролю и мониторингу для подтверждения постоянного соответствия. – введ. 01.03.2003. – М. : Стандартиформ, 2003. – 19 с. – (Межгосударственный стандарт).

99. Классификация систем кондиционирования воздуха / Режим доступа к статье: [http://www.abok.ru/for\\_spec/articles](http://www.abok.ru/for_spec/articles).

100. Селецька О. О. Радіовимірювальні оптичні перетворювачі для визначення часу плазмохімічного травлення : дис. кандидата тех. наук : 05.11.08 / Селецька Олена Олександрівна. – Вінниця, 2010. – 205 с.

101. Мирский Григорий Яковлевич. Электронные измерения / Г. Я. Мирский. – М. : Радио и связь, 1986. – 440 с.

102. Яценков Владимир Семенович. Микроконтроллеры Microchip с аппаратной поддержкой USB / В. С. Яценков – М. : Горячая линия – Телеком, 2008. – 400 с.

103. Осадчук В. С. Температурні та оптичні мікроелектронні частотні перетворювачі : навч. посіб. / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, В. Г. Вербицький – Вінниця: ВНТУ, 2001. – 195 с.

104. Левшин Евгений Сергеевич. Электрические измерения физических величин / Е. С. Левшин, В. П. Новицкий – Л. : Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.
105. Орнатский Петр Павлович. Теоретические основы информационно-измерительной техники / П. П. Орнатский – К. : Выща школа, 1983. – 455 с.
106. Нефедов Владимир Иванович. Метрология и радиоизмерения в телекоммуникационных системах : учеб. пособие / В. И. Нефедов, В. И. Хахин. – М. : Высшая школа, 2001. – 383 с.
107. Засоби та методи вимірювань неелектричних величин / Є. С. Поліщук, М. М. Дорожовець, Б. І. Стадник [та ін.]. – Львів : Бескид Біт, 2008. – 618 с.
108. Дорожовець Михайло Миронович. Опрацювання результатів вимірювання : навч. посіб. / М. М. Дорожовець. – Львів : Львів. політехніка, 2007. – 624 с.
109. Пождаренко Володимир Олександрович. Вимірювання і комп'ютерно-вимірювальна техніка / В. О. Пождаренко, В. В. Кухарчук. – К. : НМК ВО, 1991 – 240 с.
110. Яценков Владимир Семенович. Микроконтроллеры Microchip с аппаратной поддержкой USB / В. С. Яценков – М. : Горячая линия – Телеком, 2008. – 400 с.
111. Стенцель Йосип Іванович. Метрологія та технологічні вимірювання в хімічній промисловості. Аналітичні прилади і методи контролю. Ч.2. : навч. посібник / Й. І. Стенцель – Луганськ : Східноукраїнський нац. ун-т, 2000. – 263 с.
112. USB-частотомір / О. В. Осадчук, С. В. Барабан, О. С. Звягін, Р. В. Криночкін // 6-а міжнародна науково-практична конференція «Дні науки – 2010» : тези доповіді. – 2010. – С. 32–34.
113. Интегральные стабилизаторы напряжения 78xx, 79xx, 78Lxx, 79Lxx, LMxxx. – Режим доступа к статье: <http://rf.atnn.ru/s4/spr-400.html>.
114. Сорокин Л. М. Особенности вольт-амперных характеристик и температурные зависимости электропроводимости слоев пористого кремния / Л. М. Сорокин, В. И. Соколов, А. Е. Калмыков, А. В. Черняев // Письма в ЖТФ. 2010, Том 36, Вып. 24. – С. 61–68.
115. Гоноровский Иван Сергеевич. Радиотехнический цепи и сигналы / И. С. Гоноровский – М. : Советское радио, 1977. – 608 с.

116. Мельник Юрий Александрович. Основы радиотехники и радиотехнические устройства / Мельник Ю. А., Стогов Г. В. – М. : Сов. Радио, 1973. – 368 с.

117. Иванов М. Т. Основы радиотехники и радиотехнические устройства / М. Т. Иванов, А. Б. Сергиенко, В. Н. Ушаков – М. : Высш. Школа, 2002. – 306 с.

118. Дворяшин Борис Владимирович. Основы метрологии и радиоизмерений: учебн. пособие / Б. В. Дворяшин – М. : Радио и связь, 1993. – 320 с.

119. Левшина Валентина Степановна. Электрическое измерение физических величин / В. С. Левшина, П. В. Новицкий – Л. : Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.

120. Leon O. Bipolar–JFET–MOSFET Negative Resistance Devices / Leon O. Chua, Juebang Yu, Youying Yu. // IEEE Transactions on Circuits and Systems. – 1985. – V. 32, № 1, – P. 43–52.

121. Баскаков Сергей Иванович. Радиотехнические цепи и сигналы / С. И. Баскаков – М. : Высшая школа, 2000. – 462 с.

122. Кузьмин Иван Васильевич. Основы теории информации и кодирования / И. В. Кузьмин, В. А. Кедрус – К. : Выща школа, 1986. – 238 с.

*Наукове видання*

**Осадчук Володимир Олександрович  
Осадчук Олександр Володимирович  
Савицький Антон Юрійович**

## **РАДІОВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ВОЛОГОСТІ НА ОСНОВІ МДН-СТРУКТУР**

Монографія

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено А. Ю. Савицьким

Підписано до друку 27.12.2015 р.  
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.  
Гарнітура Times New Roman.  
Друк різнографічний. Ум. др. арк. 8,78.  
Наклад 300 (1-й запуск 1–75) пр. Зам № В2016-01

Вінницький національний технічний університет,  
КІВЦ ВНТУ,  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,  
ВНТУ, ГНК, к. 114.  
Тел. (0432) 59-85-32.

**publish.vntu.edu.ua**; *email*: kivc.vntu@gmail.com.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано ФОП Барановська Т. П.  
21021, м. Вінниця, вул. Порика, 7.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 4377 від 31.07.2012 р.