

**Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет**

САВИЦЬКИЙ АНТОН ЮРІЙОВИЧ

УДК 628.889:621.373.53

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

Спеціальність 05.11.08 – радіовимірювальні прилади

Автореферат

**дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук**

Вінниця – 2013

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Вінницькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Осадчук Олександр Володимирович,
Вінницький національний технічний університет,
завідувач кафедри радіотехніки.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Яненко Олексій Пилипович,
Національний технічний університету України „КПІ”,
професор кафедри радіоконструювання і виробництва
радіоапаратури;

доктор технічних наук
Бех Олександр Дмитрович, старший науковий співробітник,
Інститут проблем математичних машин і систем НАН України
м. Київ, провідний науковий співробітник.

Захист відбудеться "24" травня 2013 р. о 9³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 05.052.02 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ауд. 210 ГНК.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95.

Автореферат розісланий "23" квітня 2013 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

В.Ю. Кучерук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Одним з пріоритетних напрямків розвитку науки і техніки є розробка й удосконалення існуючих радіотехнічних систем збору, передавання й обробки інформації, спрямованих на удосконалення устаткування й 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 забезпечується створенням ефективних алгоритмів роботи та адекватних реальності математичних моделей фізичних процесів перетворення і обробки інформації у вимірювальному каналі приладів. Це дозволить 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 галузях промисловості завдяки її значним розчинним і окислювальним властивостям, що є перспективним науковим напрямком.

Удосконалення систем чистих кімнат, так 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 чутливих до вологості транзисторних структур в якості первинних перетворювачів відкриває перспективи проектування автогенераторних вторинних перетворювачів інформації, принцип дії яких ґрунтується на перетворенні величини вимірюваного параметру у частотний інформативний сигнал. Дані вторинні перетворювачі характеризуються високою точністю і чутливістю вимірювання, завадостійкістю вихідного частотного сигналу та можливістю їх 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.

З огляду на вищевказане, використання принципу перетворення вимірюваної фізичної величини у частотний інформативний 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.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота проводилась відповідно до держбюджетної фундаментальної науково-дослідної роботи протягом 2009–2012 рр.: „Розробка математичних моделей мікроелектронних частотних перетворювачів магнітного поля на основі транзисторних структур з від'ємним опором” (НДР № державної реєстрації 0110U002160).

Мета і задчі дослідження

Метою роботи є підвищення чутливості радіовимірювальних перетворювачів вологості повітря чистих кімнат для мікроелектронної промисловості, на основі автогенераторних структур з від'ємним диференційним опором та первинним перетворювачем вологості на основі двохзатворного вологочутливого МДН-транзистора.

Об'єктом дослідження є процес перетворення відносної вологості повітря чистих кімнат у частотний сигнал за функціональною залежністю.

Предмет дослідження – радіовимірювальні перетворювачі вологості повітря чистих кімнат на основі реактивних властивостей вологочутливих двозатворних МДН-транзисторних структур з чутливим шаром пористого окису кремнію в якості підзатворного діелектрика.

Для досягнення поставленої мети у дисертаційній роботі розв'язуються такі *задачі*:

- проаналізувати сучасний стан розвитку і найбільш розповсюджені види перетворювачів вологості газових середовищ та обґрунтувати необхідність використання перетворювачів вологості повітря з частотним виходом;

- удосконалити математичну модель первинного перетворювача вологості повітря чистих кімнат на основі двозатворного вологочутливого МДН-транзистора з вологочутливим шаром підзатворного пористого діелектрика;

- розробити радіовимірювальні перетворювачі вологості на основі біполярного р-п-р транзистора і вологочутливого двозатворного МДН-транзистора та двох вологочутливих двозатворних МДН-транзисторів;

- розробити математичні моделі радіовимірювальних перетворювачів вологості повітря в часовому домені, на основі яких отримати залежність напруг і струмів у часі, залежності частоти генерації та чутливості вимірювання від величини відносної вологості повітря чистих кімнат;

- провести експериментальну перевірку адекватності отриманих математичних моделей радіовимірювальних перетворювачів вологості на основі двозатворного вологочутливого МДН-транзистора;

- розробити прилад з бездротовим каналом передавання інформації для вимірювання вологості повітряного середовища систем чистих кімнат;

- здійснити метрологічну оцінку інструментальної похибки приладу для вимірювання вологості повітря чистих кімнат і впровадити розроблені радіовимірювальні перетворювачі у практику.

Методи дослідження ґрунтуються на використанні: рівнянь фізичної електроніки та математичної фізики при розробці математичних моделей на основі вологочутливого двозатворного МДН-транзистора; рівнянь математичної фізики при розробці математичних моделей радіовимірювальних перетворювачів вологості повітря; теорії змінних стану, диференційного та інтегрального числення, теорії функції комплексної змінної, теорії розрахунку електричних кіл за методом контурних струмів для визначення функції перетворення та рівняння чутливості радіовимірювального перетворювача вологості.

Наукова новизна одержаних результатів

Наукова новизна роботи полягає в отриманні таких результатів:

1. Вперше розроблено елементи теорії взаємодії вологи з чутливими транзисторними МДН-структурами, які містять вологочутливий шар пористого окису кремнію в якості підзатворного діелектрика, що дало змогу обґрунтувати вплив параметрів даних первинних перетворювачів вологості на частоту вихідного сигналу радіовимірювальних перетворювачів вологості, а також отримати аналітичні залежності еквівалентної ємності, активної і реактивної складових повного опору від вологості оточуючого середовища.

2. Вперше теоретично досліджено вплив вологості повітря на величину повного опору та параметри елементів еквівалентної схеми та граничну частоту функціонування вологочутливих транзисторних МДН-структур, а також величину повного опору, частоту і форму вихідного сигналу радіовимірювальних перетворювачів вологості на основі МДН-структур.

3. Теоретично встановлено підвищення завадостійкості і чутливості вимірювання параметру вологості повітря радіотехнічних систем чистих кімнат шляхом компенсації реактивними властивостями вологочутливих МДН-структур активних втрат при реалізації

радіовимірювальних приладів для визначення вологості на основі МДН-структур, в яких використовується частота як інформативний параметр сигналу.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що:

1. На основі розробленої математичної моделі, що описує вплив вологи на елементи еквівалентної схеми вологочутливої транзисторної МДН-структури, запропоновано методику розрахунку параметрів первинного перетворювача вологості на основі вологочутливого двозатворного МДН-транзистора з чутливим шаром підзатворного діелектрика, виготовленого з пористого окису кремнію.

2. Отримано в результаті математичного моделювання аналітичні вирази і графічні залежності еквівалентної ємності, активної і реактивної складових повного опору вологочутливої двозатворної транзисторної МДН-структури від величини вологості оточуючого середовища, які у вимірювальному діапазоні від 0 % до 100 % відповідно складають від 17 до 87 пФ, від 2014 до 1680 Ом та від 2,6 до 6,95 МОм.

3. Розроблено радіовимірювальні перетворювачі вологості для вимірювання відносної вологості повітря чистих кімнат:

- на основі біполярного р-п-р транзистора і вологочутливого двозатворного МДН-транзистора для вимірювання відносної вологості повітря чистих кімнат в діапазоні вимірювання вологості від 0 до 100% чутливість складає 16 - 34 кГц/%;

- на основі двох вологочутливих двозатворних МДН-транзисторів для вимірювання відносної вологості повітря чистих кімнат в діапазоні вимірювання вологості від 0 до 100% чутливість складає 27 - 38 кГц/%.

4. Розроблено пакет прикладних програм в середовищі „Matlab 5.2” для визначення характеру зміни активної і реактивної складових повного опору вологочутливої двозатворної транзисторної МДН-структури, а також пакет прикладних програм у середовищі „Maple” для визначення функції перетворення і рівняння чутливості для розроблених радіовимірювальних перетворювачів вологості на основі біполярного р-п-р транзистора і вологочутливого двозатворного МДН-транзистора, а також радіовимірювального перетворювача вологості на основі двох вологочутливих двозатворних МДН-транзисторів для вимірювання вологості повітря чистих кімнат.

5. Розроблено автогенераторний прилад для вимірювання вологості повітря чистих кімнат радіотехнічної системи керування вентиляцією і кондиціонуванням мікроклімату чистої кімнати з бездротовим каналом передавання інформації.

Реалізація результатів роботи. Результати дисертаційної роботи впроваджено на державномк підприємстві науково-дослідному інститут «Гелій» (м. Вінниця, акт від 15.09.2012) у вигляді мікропроцесорного приладу для вимірювання відносної вологості повітря чистих кімнат з бездротовим каналом передавання інформації, а також у навчальний процес кафедри радіотехніки при виконанні лабораторних робіт з курсу «Сенсори фізичних величин» для магістрів спеціальності 8.090701 – «Радіотехніка» (м. Вінниця, акт від 18.09.2012).

Особистий внесок здобувача. Основні положення і результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно у Вінницькому національному технічному університеті. В роботах опублікованих у співавторстві здобувачеві належать: аналіз методів удосконалення обладнання і сучасного стану розвитку перетворювачів вологості газових середовищ в мікроелектронній промисловості [3, 4, 11–15], розробка конструкції [18, 19] і математичної моделі первинного перетворювача відносної вологості газових середовищ на основі двозатворного вологочутливого МДН-транзистора [2, 6], розробка принципової електричної схеми [16] математичної моделі радіовимірювального перетворювача вологості на основі двозатворної вологочутливої транзисторної МДН-структури [1, 8], розробка електричної принципової схеми радіовимірювального перетворювача вологості на основі двох вологочутливих двозатворних МДН-транзисторів [17, 20] та його математичної моделі [5, 7], удосконалення автоматизованої системи керування вентиляцією і кондиціонуванням

мікроклімату чистої кімнати шляхом введення двоканальної мікропроцесорної системи вимірювання вологості газового середовища ЧК [9, 10].

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень, викладених в дисертації, апробовані на наукових конференціях, серед них: X міжнародна конференція “Контроль і управління в складних системах (КУСС-2010)” (19—21 жовтня 2010 р., м. Вінниця); IV Міжнародна науково-технічна конференція "Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП-2009)" (8—10 жовтня 2009 р., м. Вінниця); VIII Міжнародна молодіжна науково-технічна конференція „Сучасні проблеми радіоелектроніки та телекомунікацій „РТ-2012” (11—15 квітня 2011 р., м. Севастополь); XVI Міжнародний молодіжний форум "Радіоелектроніка і молодь у XXI столітті" (17—19 квітня 2011 р., м. Харків), а також конференціях професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів Вінницького національного технічного університету в 2007—2011 рр.

Публікації. Результати дисертації опубліковано у 20 наукових працях. Серед них 5 статей у науково-фахових журналах, 5 статей у науково-технічних журналах та збірниках праць науково-технічних конференцій, отримано 10 патентів України на корисну модель.

Обсяг і структура дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу і 4-х розділів, висновків, списку використаних джерел і 6 додатків. Загальний обсяг дисертації 191 сторінка, основний матеріал викладено на 150 сторінках, містить 76 рисунків, 1 таблицю. Список використаних джерел складається з 122 найменувань. Додатки містять результати розрахунків, фрагменти програмного забезпечення та акти впровадження результатів роботи.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** до дисертаційної роботи обґрунтовано її актуальність, визначено мету та задачі дослідження. Сформульована наукова новизна та практична цінність отриманих результатів, а також показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

У **першому розділі** розглянуто властивості атмосферної вологи та проаналізовано її вплив на протікання технологічних операцій в системах з контрольованим складом газів. На даному етапі розвитку промисловості одним з пріоритетних напрямків підвищення якості продукції є розробка та створення нових комплексів устаткування та інформаційно-вимірювальних систем і систем автоматизації, що враховують всі важливі параметри, які суттєво можуть впливати на проведення технологічних операцій, тому підвищення чутливості вимірювання вологості повітря чистих кімнат (ЧК) є перспективним науковим напрямом.

Проведено аналіз розповсюджених в промисловості типів первинних перетворювачів вологості, наведено їх систематизацію. Сучасні дослідження хімічних та електрофізичних характеристик плівок аморфних напівпровідників та діелектриків (кремнію і його окису) дозволяють виготовлення на їх основі первинних, як ємнісних, так і транзисторних перетворювачів різних хімічних сполук за інтегральною технологією, які відрізняються високою точністю та чутливістю до вимірюваної величини, хімічною та механічною стійкістю до впливу факторів оточуючого середовища.

При розгляді можливих схем реалізації вторинних перетворювачів інформації зроблено висновок про те, що перспективним науковим напрямком є розробка перетворювачів вологості, які працюють за принципом перетворення „вологість газу – частота інформаційного сигналу” на основі чутливих транзисторних структур з від’ємним диференційним опором, що володіють високою точністю і чутливістю вимірювання, частотний інформативний сигнал має високу завадостійкість. При цьому усувається необхідність використання підсилювачів аналогового сигналу, які викриваються в схемах параметричних перетворювачів інформації, при цьому точність вимірювання частоти обмежується стабільністю еталонного кварцевого генератора.

У другому розділі розроблено математичну модель первинного перетворювача вологості повітря чистих кімнат на основі двозатворного МДН-транзистора з чутливим шаром пористого окису кремнію в якості підзатворного діелектрика.

На рис. 1 наведено розріз запропонованого первинного перетворювача вологості:

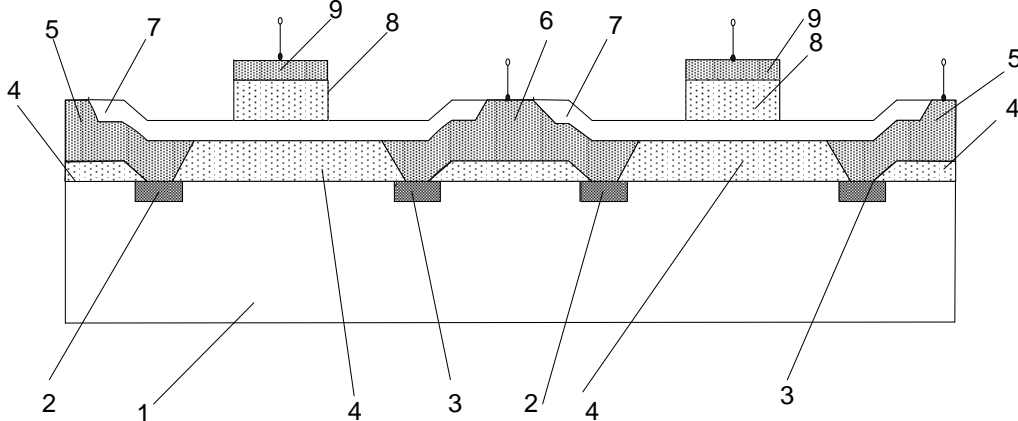


Рисунок 1 – Вологочутливий двозатворний МДН-транзистор: 1 – підкладка; 2 – області витоку; 3 – область стоку; 4 – плівка SiO_2 ; 5 – провідні плівки; 6 – суміщена стоково-витокова область; 7 – плівкові затвори; 8 – чутливі шари з пористого SiO_2 ; 9 – керувальні електроди

В процесі адсорбції молекул води, чутливий шар підзатворного діелектрика змінює свою діелектричну сталу, а також концентрацію вільних носіїв заряду на границі розділу плівок і тим самим змінює ємність, яка виникає під затворними діелектриками, що збільшує реактивний опір структури, а також активний опір провідних плівок.

Для побудови математичної моделі запропонованого первинного перетворювача (рис. 1), необхідно розглянути його еквівалентну схему. В основу створення еквівалентної схеми двозатворного вологочутливого МДН-транзистора покладено модель малого сигналу МДН-транзистора, в якій врахований вплив вологості оточуючого газового середовища на електрофізичні параметри її елементів.

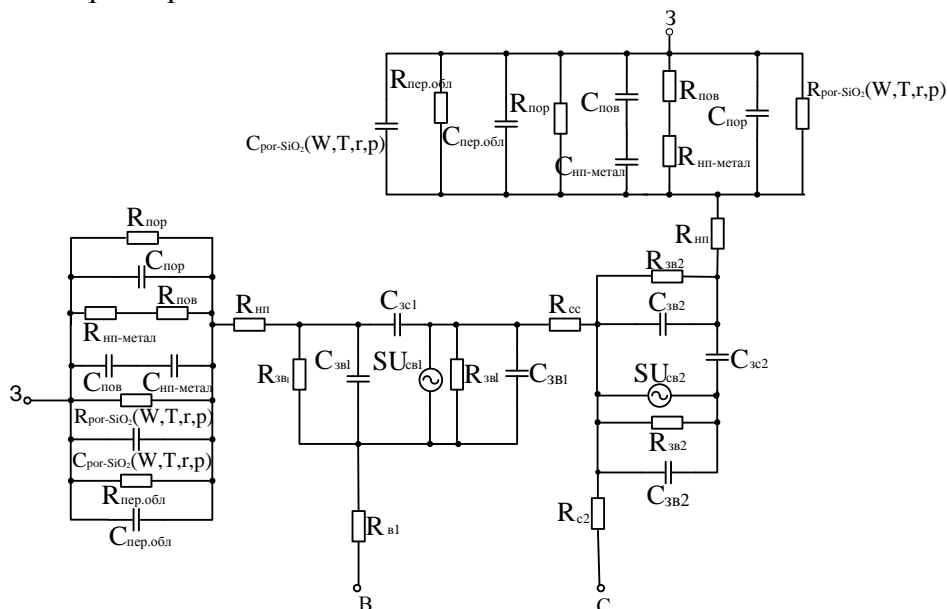


Рисунок 2 – Еквівалентна схема двозатворного вологочутливого МДН-транзистора

Елементи еквівалентної схеми (рис. 2) описуються наступним чином: $SU_{\bar{n}d1}, SU_{\bar{n}d2}$ – струми, які протікають через канали двозатворного МДН-транзистора, фактично є добутками напруг $U_{\bar{n}d1}, U_{\bar{n}d2}$, які падають на каналах транзистора, на крутизну характеристики

транзистора; R_{ce} – опір стік-витік; R_{ca} – опір затвор-витік; R_{nc} – загальний опір суміщеної області стоку-витоку другого затвора двозатворного МДН-транзистора; $\tilde{N}_{i\delta\delta.i\delta\delta}$ – розподілена ємність пористого кремнія; $\tilde{N}_{i\delta}$ – ємність незаповнених пор чутливого елементу; $\tilde{N}_{i\delta-i\delta\delta\delta}$ – ємність бар'єрного шару метал-напівпровідник; $\tilde{N}_{i\delta a}$ – ємність повітряного проміжку в порах чутливого елементу; $\tilde{N}_{por-SiO_2}(W, T, r, p)$ – ефективна ємність вологочутливого шару окису кремнія; $R_{i\delta}$ – опір стінок пор; $R_{i\delta a}$ – опір повітряного проміжку в порах чутливого шару; $R_{i\delta-i\delta\delta\delta}$ – опір бар'єрного шару метал-напівпровідник, $R_{por-SiO_2}(W, T, r, p)$ – опір, пов'язаний з волого чутливістю; $R_{i\delta\delta.i\delta\delta}$ – омичний опір перехідних областей; R_{n1} , R_{a1} – омичний опір стокової і витокової областей відповідно; $R_{i\delta}$ – омичний опір шару підзатворного діелектрика.

В результаті математичного моделювання МДН-конденсатора, утвореного під затворним електродом, отримано аналітичну залежність його ємності від вологості, температури і тиску повітря, що описується рівністю (1)

$$\tilde{N}_{por-SiO_2}(W, T, r, p) = \frac{S}{d_{eff}} \cdot \left[\varepsilon_{SiO_2} \left(1 - \frac{S_{i\delta\delta}}{S} \right) + \varepsilon_0 \left(\frac{S_{i\delta\delta}}{S} l \left(1 - \frac{1}{t} \left(\frac{1}{1 - \frac{p}{p_0}(W, r)} - \frac{1}{1 + \frac{p}{p_0}(W, r) (\theta \exp \left[\frac{q - q_L}{RT} \right] - 1)} \right) + \frac{S_{i\delta\delta}}{S} (1 - l) \right) + \varepsilon_{H_2O} \frac{S_{i\delta\delta}}{S} l \frac{1}{t} \left(\frac{1}{1 - \frac{p}{p_0}(W, r)} - \frac{1}{1 + \frac{p}{p_0}(W, r) (\theta \exp \left[\frac{q - q_L}{RT} \right] - 1)} \right) \right] \right] \quad (1)$$

де $\frac{p}{p_0}(W, r) = \exp \left(\frac{2\sigma WMV_{\delta\delta i}}{mrRT} \right)$; $V_{\delta\delta i}$ – об'єм чистої кімнати; m – маса водяної пари; M – молярна маса води; r – радіус пор діелектрика; t – час адсорбції; ε_{eff} , d_{eff} – ефективні параметри окисної плівки; $S_{i\delta\delta}$ – площа перерізу пор, паралельного площині електрода, на межі діелектричного шару і електрода; S – площа електрода; l – відношення площі доступних для води пор до їх загальної кількості; W – вологість повітря.

Виходячи з рівності (1), отримано залежності ємності вологочутливої МДН-структури з діелектричним шаром $por-SiO_2$ від вологості, температури і радіусу пор чутливого матеріалу, представлені на рис.3:

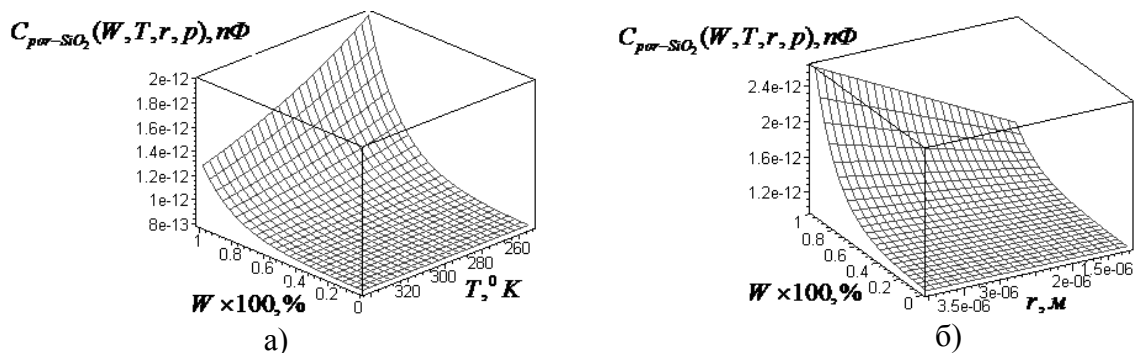


Рисунок 3 – Залежність ємності вологочутливого МДН-конденсатора від: а) – вологості і температури; б) – середньоквадратичного радіуса пор і вологості оточуючого середовища

Як видно з наведених вище рисунків, вологочутлива ємність зростає при збільшенні вологості, збільшенні радіусу пор (збільшення маси адсорбованої води) і зменшенні температури (до наближення до точки роси).

На основі математичного моделювання первинного перетворювача вологості (рис. 1), виходячи з його еквівалентної схеми (рис. 2) отримано вираз для його повного опору:

$$Z_{\Sigma}(W, T, r, p) = R_G + jX_G, \quad (2)$$

$$R_G = \frac{(O^2 - P^2)(F^2 - E^2) - 2R(F^3O - FOE^2) - 2REP(F^2 - E^2) + 4(RFE^2O + OPFE + RE^2PF)}{(F^2 - E^2)^2 + (2FE)^2};$$

$$X_G = \frac{2FE(O^2 + P^2) + 4R(F^2OE + PE^2F) + (-2REO + 2REP)(F^2 - E^2) + 2OP(F^2 - E^2)}{(F^2 - E^2)^2 + (2FE)^2};$$

$$O - jP = \frac{R_{ii\delta} - j\omega R_{ii\delta}^2 C_{ii\delta}}{(\omega^2 R_{por-SiO_2}^2(W, T, r, p) C_{por-SiO_2}^2(W, T, r, p) + 1)} \times$$

$$\times \frac{(R_{ii\dot{a}} + R_{ii-\dot{a}\dot{o}\dot{a}\dot{e}}) - j(R_{ii\dot{a}} + R_{ii-\dot{a}\dot{o}\dot{a}\dot{e}})^2 (\omega C_{ii\dot{a}} + \omega C_{ii-\dot{a}\dot{o}\dot{a}\dot{e}})}{(R_{ii\dot{a}} + R_{ii-\dot{a}\dot{o}\dot{a}\dot{e}})^2 (\omega C_{ii\dot{a}} + \omega C_{ii-\dot{a}\dot{o}\dot{a}\dot{e}})^2 + 1} \cdot (\omega^2 R_{ii\delta}^2 C_{ii\delta}^2 + 1) \times$$

$$\times \frac{(R_{por-SiO_2}(W, T, r, p) - j\omega R_{por-SiO_2}^2(W, T, r, p) \tilde{N}_{por-SiO_2}(W, T, r, p))}{(\omega^2 R_{por-SiO_2}^2(W, T, r, p) \tilde{N}_{por-SiO_2}^2(W, T, r, p) + 1) \cdot [(R_{ii\dot{a}} + R_{ii-\dot{a}\dot{o}\dot{a}\dot{e}})^2 (\omega C_{ii\dot{a}} + \omega C_{ii-\dot{a}\dot{o}\dot{a}\dot{e}})^2 + 1]} \times$$

$$\times \frac{1}{\omega^2 R_{ii\delta}^2 C_{ii\delta}^2 + 1};$$

$$F - jE = \frac{(R_{ii\delta} - j\omega R_{ii\delta}^2 C_{ii\delta})}{\omega^2 R_{ii\delta}^2 C_{ii\delta}^2 + 1} \cdot \frac{(R_{ii\dot{a}} + R_{ii-\dot{a}\dot{o}\dot{a}\dot{e}}) - j(R_{ii\dot{a}} + R_{ii-\dot{a}\dot{o}\dot{a}\dot{e}})^2 (\omega C_{ii\dot{a}} + \omega C_{ii-\dot{a}\dot{o}\dot{a}\dot{e}})}{(R_{ii\dot{a}} + R_{ii-\dot{a}\dot{o}\dot{a}\dot{e}})^2 (\omega C_{ii\dot{a}} + \omega C_{ii-\dot{a}\dot{o}\dot{a}\dot{e}})^2 + 1} +$$

$$+ \frac{(R_{ii\delta} - j\omega R_{ii\delta}^2 C_{ii\delta})}{\omega^2 R_{ii\delta}^2 C_{ii\delta}^2 + 1} \cdot \frac{(R_{por-SiO_2}(W, T, r, p) - j\omega R_{por-SiO_2}^2(W, T, r, p) \tilde{N}_{por-SiO_2}(W, T, r, p))}{\omega^2 R_{por-SiO_2}^2(W, T, r, p) \tilde{N}_{por-SiO_2}^2(W, T, r, p) + 1} +$$

$$+ \frac{(R_{ii\dot{a}} + R_{ii-\dot{a}\dot{o}\dot{a}\dot{e}}) - j(R_{ii\dot{a}} + R_{ii-\dot{a}\dot{o}\dot{a}\dot{e}})^2 (\omega C_{ii\dot{a}} + \omega C_{ii-\dot{a}\dot{o}\dot{a}\dot{e}})}{(R_{ii\dot{a}} + R_{ii-\dot{a}\dot{o}\dot{a}\dot{e}})^2 (\omega C_{ii\dot{a}} + \omega C_{ii-\dot{a}\dot{o}\dot{a}\dot{e}})^2 + 1} \times$$

$$\times \frac{(R_{por-SiO_2}(W, T, r, p) - j\omega R_{por-SiO_2}^2(W, T, r, p) C_{por-SiO_2}(W, T, r, p))}{\omega^2 R_{por-SiO_2}^2(W, T, r, p) C_{por-SiO_2}^2(W, T, r, p) + 1}.$$

Еквівалентна ємність первинного перетворювача на основі вологочутливого двозатворного МДН-транзистора, виходячи з рівності (2), визначається рівнянням

$$C_{MOSFET,eqv}(W,T,r,p) = \frac{1}{2\pi X_G(W,T,r,p)} = \frac{1}{(F^2 - E^2)^2 + (2FE)^2} = \frac{1}{2\pi \left[2FE(O^2 + P^2) + 4R(F^2OE + PE^2F) + (-2REO + 2REP)(F^2 - E^2) + 2OP(F^2 - E^2) \right]} \quad (3)$$

На основі отриманої математичної моделі вологочутливого двозатворного МДН-транзистора, використовуючи пакет прикладних програм MatLab 5.2, отримано графіки залежностей активної, реактивної складових повного опору та ємності даного первинного перетворювача вологості, які подано на рис. 4.

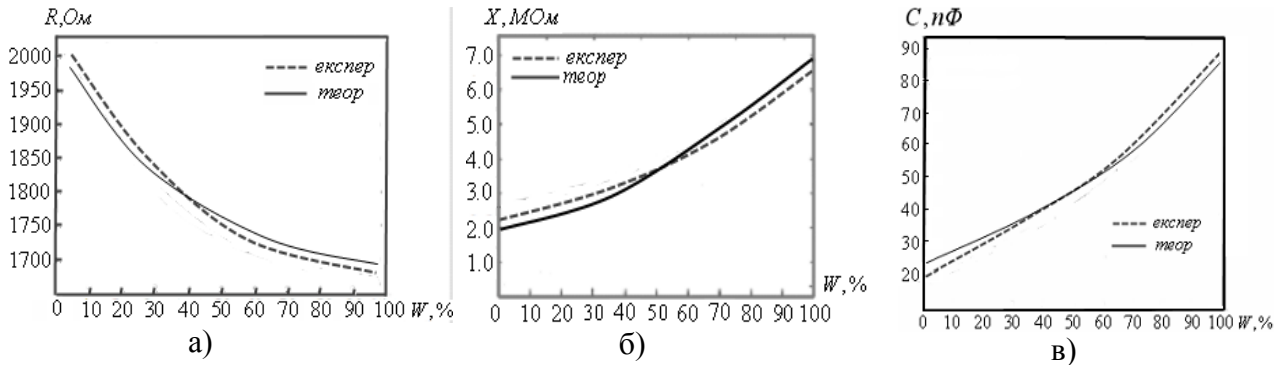


Рисунок 4 – Теоретична і експериментальна залежності: а) – активної складової повного опору, б) – реактивної складової повного опору, в) – еквівалентної ємності двозатворного вологочутливого МДН-транзистора від вологості оточуючого газового середовища

З графіків на рис. 4 видно, що такі параметри як активна, реактивна складова повного опору і ємність вологочутливого двозатворного МДН-транзистора залежать від величини вологості оточуючого газового середовища. Так при зміні вологості від 0% до 100% діапазон зміни активного опору складає 2014–1680 Ом, реактивного опору 2,6–6,95 МОм, еквівалентної ємності транзистора – від 17 пФ до 87 пФ. Повний опір даного первинного перетворювача, як видно з результатів математичного моделювання, має активну складову повного опору, що слабо змінюється від вологості повітря і вологочутливу реактивну складову (яка має ємнісний характер), величина якої, як і ємності затворних областей вологочутливого двозатворного МДН-транзистора, залежить від діелектричної сталої підзатворного шару діелектрика, а отже, кількості адсорбованої з повітря води. Тому такий чутливий елемент доцільно використовувати для побудови перетворювачів вологості газових середовищ, що працюють в широкому діапазоні значень вимірювального параметру.

Виходячи із аналізу еквівалентної схеми (рис. 2), гранична частота функціонування первинного перетворювача визначається рівністю (4)

$$f_{\omega} = \frac{g_m \cdot \left(C_{i\dot{a}\dot{d}\dot{i}\dot{a}\dot{e}} + \tilde{N}_{por-SiO_2}(W,T,r,p) + \frac{C_{i\dot{i}\dot{a}}\tilde{N}_{i\dot{i}-i\dot{a}\dot{d}}}{C_{i\dot{i}\dot{a}} + \tilde{N}_{i\dot{i}-i\dot{a}\dot{d}}} + C_{i\dot{i}\dot{d}} + \frac{C_{c\dot{n}1}\tilde{N}_{c\dot{n}2}}{C_{c\dot{n}1} + \tilde{N}_{c\dot{n}2}} \right)}{2\pi \left(C_{i\dot{a}\dot{d}\dot{i}\dot{a}\dot{e}} + \tilde{N}_{por-SiO_2}(W,T,r,p) + \frac{C_{i\dot{i}\dot{a}}\tilde{N}_{i\dot{i}-i\dot{a}\dot{d}}}{C_{i\dot{i}\dot{a}} + \tilde{N}_{i\dot{i}-i\dot{a}\dot{d}}} + C_{i\dot{i}\dot{d}} \right) \cdot \left(\frac{C_{c\dot{n}1}\tilde{N}_{c\dot{n}2}}{C_{c\dot{n}1} + \tilde{N}_{c\dot{n}2}} \right)}, \quad (4)$$

де g_m – крутизна по затвору транзистора.

У **третьому розділі** розроблено автогенераторний вторинний перетворювач вологості повітря чистих кімнат на основі РПВ з двома вологочутливими двозатворними МДН-транзисторами. У випадку, коли первинний перетворювач інформації є чутливою транзисторною структурою, використання розповсюджених мостових, або резонансних коливальних схем не можливо. Тому, було запропоновано реалізацію вторинного

перетворювача вологості на основі автогенераторної транзисторної структури з від'ємним диференційним опором. Розроблено математичну модель даного вторинного перетворювача вологості повітря чистих кімнат, яка виконана у часовому домені, що дало змогу отримати не тільки аналітичні вирази рівняння чутливості та функції перетворення, а й миттєві значення струмів і напруг в часі в будь-якій точці схеми.

З метою забезпечення встановлених вимог до вологості повітря чистих кімнат, рівень якої в умовах використання в мікроелектронній промисловості повинен становити 45–55% в залежності від типу проведеної технологічної операції, була запропонована схема електрична принципова автогенераторного вторинного перетворювача вологості на основі двох вологочутливих двозатворних МДН-транзисторів (рис. 5), в якому за рахунок збільшення ефективної площі сорбції вологості і конструкції первинного перетворювача, досягнуто оптимального діапазону вимірювання і можливості застосування в заданих умовах.

На основі еквівалентної схеми РПВ на основі двох вологочутливих двозатворних МДН-транзисторів (рис. 6) створено математичну модель запропонованого вторинного перетворювача вологості.

Елементи еквівалентної схеми описуються наступним чином: U_1 , U_2 – напруга керування і напруга живлення схеми; L – індуктивність; R_1 і R_4 – внутрішні опори джерел живлення; R_2 і R_3 – навантажувальні опори переходів стік-витік і база-колектор транзисторів; R_{ds} , R_d , R_s – об'ємні опори каналу, стоку, витоків двозатворного МДН-транзистора; C_s , C_d , $C_{MOSFET.eqv}(W,T,r,p)$ – ємності затвор-витік, затвор-стік, та еквівалентна вологочутлива ємність двозатворного вологочутливого МДН-транзистора; I_{pt} – струм двозатворного МДН-транзистора.

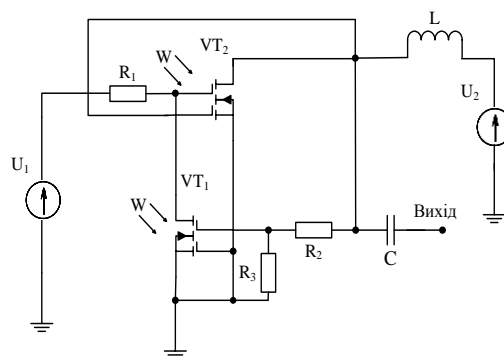


Рисунок 5 – Схема електрична принципова РПВ на основі двох вологочутливих двозатворних МДН-транзисторів

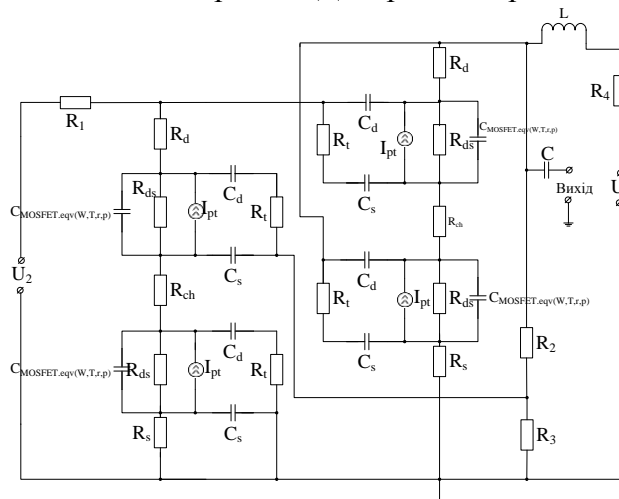


Рисунок 6 – Еквівалентна схема РПВ на основі двох двозатворних вологочутливих МДН-транзисторів

Виходячи з еквівалентної схеми РПВ на основі двох вологочутливих двозатворних МДН-транзисторів, створено його динамічну модель (система рівнянь (5)), зробивши наступні підстановки:

$$\left\{ \begin{array}{l} L \frac{di_L(t)}{dt} = U_1 + A_1 - \frac{-(U_2 + 2U_{C_{MOSFET.eqv}}(W,T,r,p)(t)) + \frac{A_2}{R_t} R_1 + \frac{U_{C_s}(t)}{R_s} R_1 - \frac{A_3}{R_t} R_1 - \frac{2A_2}{R_t} R_1}{R_d - R_4} R_t + \\ + \frac{\frac{U_{C_{MOSFET.eqv}}(W,T,r,p)(t)}{R_{ds}} R_1 + (2R_{ds} + R_d) \frac{U_{C_{MOSFET.eqv}}(W,T,r,p)(t)}{R_{ds}} + U_{C_s}(t)}{R_d - R_1} R_t; \\ C_d \frac{dU_{C_d}}{dt} = \frac{U_{C_s}(t) - U_{C_{MOSFET.eqv}}(W,T,r,p)(t) - U_{C_d}(t)}{R_t}; \\ C_{MOSFET.eqv}(W,T,r,p) \frac{dU_{C_{MOSFET.eqv}}(W,T,r,p)}{dt} = \frac{A_3}{R_t} + I_{pt} + \frac{A_2}{R_t} - \frac{U_{C_{MOSFET.eqv}}(W,T,r,p)(t)}{R_{ds}}; \\ C_s \frac{dU_{C_s}}{dt} = \frac{U_{C_s}(t)}{R_s} - \frac{A_3}{R_t} - \frac{2A_2}{R_t} + \frac{U_{C_{MOSFET.eqv}}(W,T,r,p)(t)}{R_{ds}}, \end{array} \right. \quad (5)$$

де $A_1 = 3U_{C_s} - U_{C_d} - \frac{U_{C_s}}{R_s} R_t + U_{C_{MOSFET.eqv}}(W,T,r,p)$; $A_2 = U_{C_s} - U_{C_{MOSFET.eqv}}(W,T,r,p) - U_{C_d}$; $A_3 = U_1 + A_1 - U_L$.

Для того, щоб знайти функцію перетворення даного вторинного перетворювача, створено його еквівалентну схему за змінним струмом (рис. 7):

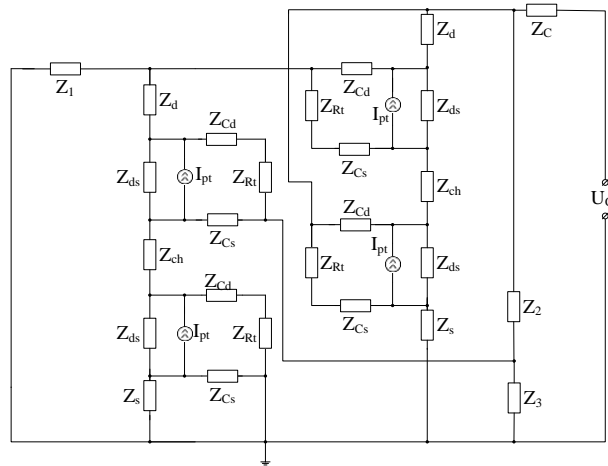


Рисунок 7 – Еквівалентна модель РПВ на основі двох вологочутливих двозатворних МДН-транзисторів за змінним струмом

На основі еквівалентної схеми (рис. 7) отримано функцію перетворення, яка показує залежність частоти вихідного сигналу РПВ від величини вимірюваного параметру, описується рівнянням (6).

$$F(W) = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC_{eqv.\lambda-diod}(W)}}, \quad (6)$$

$$\text{де } C_{eqv.\lambda-diod}(W) = \frac{1}{\omega} \cdot \frac{i_{pt}(\Lambda_{RE}^2(W) + \Lambda_{IM}^2(W))}{U(\Omega_{IM}(W)\Lambda_{RE}(W) - \Omega_{RE}(W)\Lambda_{IM}(W))},$$

$$\Omega_{RE}(W) = \alpha_{RE} + \beta_{RE} + \gamma_{RE} + \delta_{RE} + \chi_{RE} + \varepsilon_{RE} + \phi_{RE} + \varphi_{RE},$$

$$\begin{aligned}\Omega_{IM}(W) &= \alpha_{IM} + \beta_{IM} + \gamma_{IM} + \delta_{IM} + \chi_{IM} + \varepsilon_{IM} + \phi_{IM} + \varphi_{IM}, \\ \Lambda_{RE}(W) &= \eta_{RE} + \psi_{RE} + \kappa_{RE} + \mu_{RE} + \nu_{RE} + \theta_{RE} + \varrho_{RE} + \rho_{RE}, \\ \Lambda_{IM}(W) &= \eta_{IM} + \psi_{IM} + \kappa_{IM} + \mu_{IM} + \nu_{IM} + \theta_{IM} + \varrho_{IM} + \rho_{IM}.\end{aligned}$$

В свою чергу дані підстановки описуються наступними рівностями:

$$\begin{aligned}\alpha_{RE} + j\alpha_{IM} &= -Z_3^2 \dot{D}(W) \dot{A}(W) \dot{G}(W); & \beta_{RE} + j\beta_{IM} &= \dot{D}(W) \dot{B}(W) \dot{E}(W) \dot{A}(W) \dot{G}(W); \\ \gamma_{RE} + j\gamma_{IM} &= \dot{D}(W) \dot{B}(W) \dot{E}(W) Z_s Z_5; & \chi_{RE} + j\chi_{IM} &= \dot{D}(W) Z_{ch}^2 \dot{E}(W) \dot{G}(W); \\ \varepsilon_{RE} + j\varepsilon_{IM} &= \dot{D}(W) Z_2^2 Z_{ch}^2; & \dot{E}(W) &= \dot{Z}_{cs1}(W) + \dot{Z}_s; & \delta_{RE} + j\delta_{IM} &= Z_2^2 \dot{B}(W) \dot{G}(W) \dot{A}(W), \\ \varphi_{RE} + j\varphi_{IM} &= \dot{B}(W) Z_2^2 Z_s Z_5; & \dot{G}(W) &= \dot{Z}_2 + \dot{Z}_3 + \dot{Z}_c; & \phi_{RE} + j\phi_{IM} &= \dot{B}(W) Z_3^2 Z_s Z_5; \\ \dot{Z}_c + 2\dot{Z}_{ds}(W) + \dot{Z}_{ch} + \dot{Z}_d + \dot{Z}_1 &= \dot{A}(W); & \dot{Z}_{ch} + \dot{Z}_{cs}(W) + \dot{Z}_3 + \dot{Z}_{Rt} + \dot{Z}_{cd}(W) &= \dot{B}(W); \\ \dot{Z}_{ds} + \dot{Z}_{cd}(W) + \dot{Z}_{Rt} + \dot{Z}_{cs}(W) &= \dot{C}(W); & \dot{Z}_d + 2\dot{Z}_{ds}(W) + \dot{Z}_{ch} + \dot{Z}_s + \dot{Z}_2 + \dot{Z}_3 &= \dot{D}(W).\end{aligned}$$

Рівняння чутливості показує, наскільки змінить інформативний параметр РПВ при одиничній зміні вимірюваного параметру. Аналітичний вираз рівняння чутливості даного вторинного перетворювача вологості описується рівнянням (7).

$$S(W) = -\frac{1}{4} \frac{\frac{dC_{eqv.\lambda-diod}(W)}{dW}}{\pi (LC_{eqv.\lambda-diod}(W))^{3/2}}. \quad (7)$$

На основі отриманих аналітичних виразів функції перетворення (6) і рівняння чутливості (7) отримано їх графіки (рис. 8).

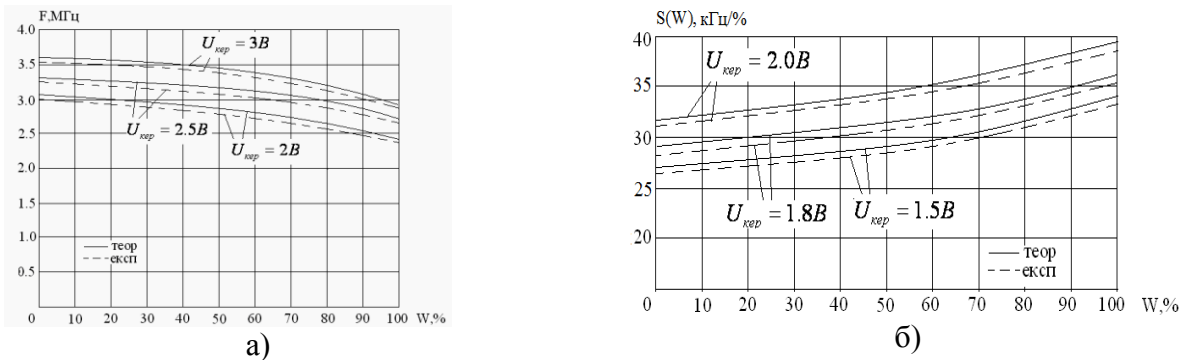


Рисунок 8 – а) теоретична і експериментальна залежності частоти генерації РПВ від величини вимірювального параметру; б) графік чутливості РПВ в діапазоні вимірювання при різних значеннях напруги керування

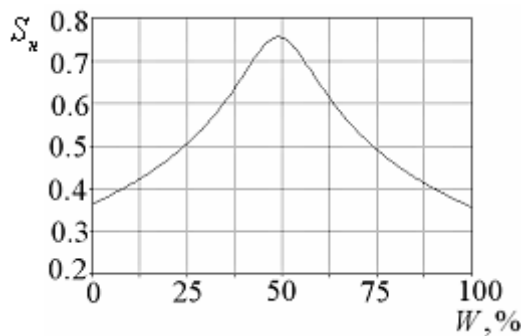


Рисунок 9 – Графік нормованої чутливості РПВ в залежності від вологості
З графіка нормованої чутливості РПВ (рис. 9), що описується рівнянням,

$S_i = \frac{S^W \cdot W}{F_{\text{ннн}}}$, де W – вологість повітря; $F_{\text{ннн}}$ – нормувальна частота, видно, що він має

екстремум на проміжку 45–55%, що дає змогу його використання для визначення вологості повітря в системах чистих кімнат в мікроелектронній промисловості. Тому конструкцію даного вторинного перетворювача вологості пропонується для використання в приладі для вимірювання вологості повітря чистих кімнат системи керування і кондиціонування повітря ЧК.

У четвертому розділі в ході структурного аналізу системи кондиціонування повітря чистої кімнати (рис. 10) було зроблено висновок, що підвищення чутливості вимірювання вологості повітря в даній системі можна досягти шляхом застосування частотного принципу перетворення вимірюваного параметру в чутливих до вологості автогенераторних структурах з від'ємним опором. При цьому було запропоновано розміщення двох РПВ: в об'ємі чистої кімнати та в системі рекуперації повітря, що також дозволить підвищити чутливість вимірювання та зменшити витрати на кондиціонування повітря.

Розроблено прилад для вимірювання вологості повітряного середовища чистих кімнат для мікроелектронної промисловості, який входить до складу системи вимірювання відносної вологості повітря ЧК. Структурна схема приладу подана на рис.

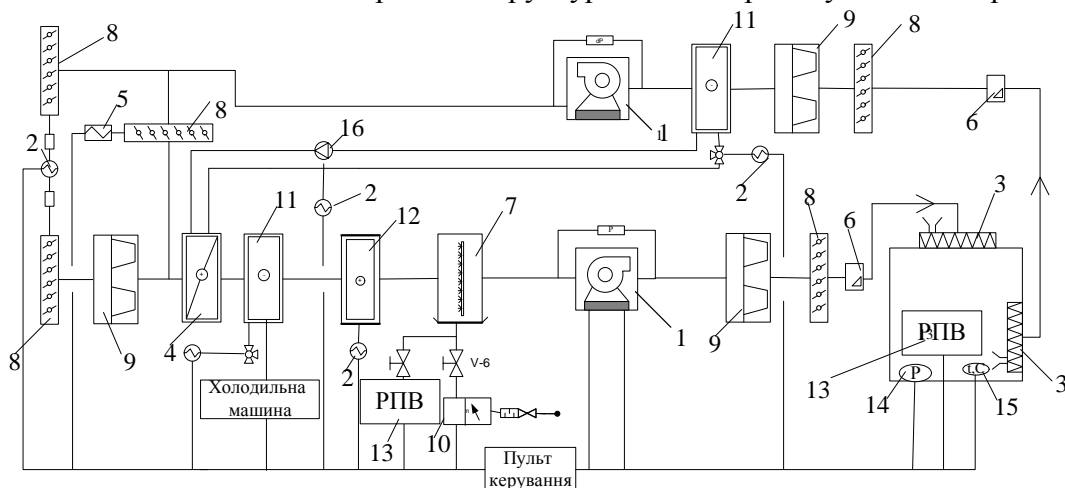


Рисунок 10 – Система кондиціонування повітря чистої кімнати: 1 – центральний вентилятор; 2 – теплообмінник; 3 – повітряний фільтр; 4 – нагрівач повітря; 5 – витяжна решітка; 6 – витратомір; 7 – паровий зволожувач; 8 – впускний клапан; 9 – фільтр грубої очистки; 10 – електричний водонагрівач; 11 – повітроохолоджувач; 12 – повітрянагрівач; 13 – РПВ на основі двох вологочутливих двозатворних МДН-транзисторів; 14 – температурний перетворювач; 15 – перетворювач тиску; 16 – витратомір вихровий

Система вимірювання вологості повітря ЧК (рис. 12) містить два перетворювача вологості повітря. Перший перетворювач вимірює вологість всередині власне чистої кімнати, другий – всередині системи рекуперації. При зміні вологості в будь-якій з контрольних точок, змінюється еквівалентна ємність вологочутливого двозатворного МДН-транзистора (первинного перетворювача), що в свою чергу змінює частоту коливання вторинного перетворювача вологості повітря (РПВ), який слугує модулятором генератора носійного сигналу (рис. 11).

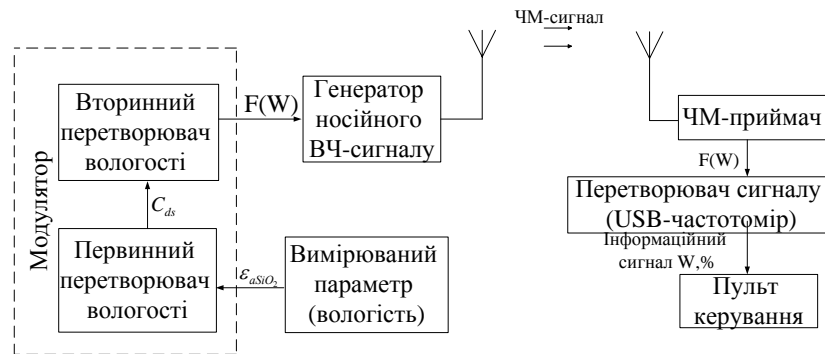


Рисунок 11 – Структурна схема приладу для вимірювання вологості повітря ЧК

В приймальній частині приладу сигнал демодулюється і визначається частота інформаційного сигналу, функціонально пов'язану з вимірювальним параметром. Використання мікропроцесорного частотоміра дозволяє використання первинних перетворювачів вологості з нелінійною функцією перетворення. Результати вимірювання повинні виводитись для подальшої обробки на пульт керування і на дисплей.

З метою зменшення впливу забруднюючих факторів, обумовлених розгерметизацією системи, на протікання технологічних операцій, було запропоновано структуру приладу для вимірювання відносної вологості повітря чистих кімнат з бездротовим каналом передавання даних.

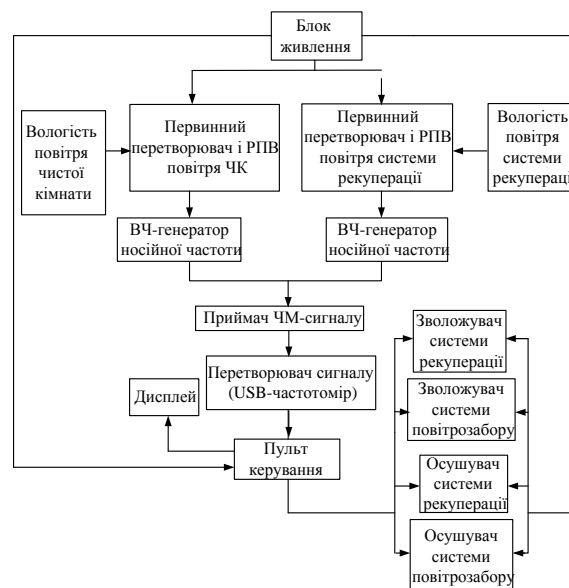


Рисунок 12 – Структурна схема системи вимірювання і контролю вологості повітря чистих кімнат

Порівняння розробленого радіовимірювального приладу з відомими вказує на те, що чутливість розробленого приладу більша в 1.11 рази за відомі. Розраховано комплексний показник технічного рівня розробленого приладу, згідно якого розроблений радіовимірювальний перетворювач вологості повітря чистих кімнат в 1.13 рази краще в порівнянні з існуючими. Розраховано інструментальну похибку, яка для нестабілізованого режиму роботи складає $\delta_{\Sigma} = 2.44\%$, а для стабілізованого $\delta_{\Sigma} = 1.04\%$. Розрахунок завадостійкості інформаційного каналу показує, що відношення сигнал/шум на виході розробленого приладу для вимірювання відносної вологості повітря ЧК у стабілізованому випадку функціонування дорівнює 467, що в порівнянні з амплітудною модуляцією, в якій даний показник не перевищує 1, доводить переваги приладів на основі частотного методу перетворення вимірюваної величини і відповідної модуляції для бездротового передавання даних.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі у науковому плані розроблено елементи теорії взаємодії вологи з чутливими транзисторними МДН-структурами, які містять вологочутливий шар підзатворного пористого окису кремнію, теоретично досліджено вплив вологості повітря на величину повного опору та параметри елементів еквівалентної схеми та граничну частоту функціонування даних структур, а також величину повного опору, частоту і форму вихідного сигналу радіовимірювальних перетворювачів вологості на основі МДН-структур. Теоретично встановлено підвищення завадостійкості і чутливості вимірювання параметру вологості повітря радіотехнічних систем чистих кімнат при реалізації радіовимірювальних приладів, в яких використовується частота як інформативний параметр.

В практичному плані створено новий клас радіовимірювальних перетворювачів вологості повітря чистих кімнат на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним диференційним опором.

Розроблено пакет прикладних програм в обчислювальному середовищі "MatLab" для математичного моделювання параметрів вологочутливого двозатворного МДН-транзистора, та пакет прикладних програм в середовищі "Maple" для моделювання радіовимірювальних перетворювачів вологості повітря чистих кімнат з врахуванням залежності реактивних властивостей вологочутливого двозатворного МДН-транзистора від величини вологості оточуючого газового середовища.

Отримано такі основні наукові і практичні результати:

1. Вперше розроблено елементи теорії взаємодії вологи з чутливими транзисторними МДН-структурами, які містять вологочутливий шар пористого окису кремнію в якості підзатворного діелектрика, що дає змогу обґрунтувати вплив параметрів даних первинних перетворювачів вологості на частоту вихідного сигналу радіовимірювальних перетворювачів вологості, а також отримати аналітичні залежності еквівалентної ємності, активної і реактивної складових повного опору від вологості оточуючого середовища.

2. Вперше теоретично досліджено вплив вологості повітря на величину повного опору та параметри елементів еквівалентної схеми та граничну частоту функціонування вологочутливих транзисторних МДН-структур, а також величину повного опору, частоту і форму вихідного сигналу радіовимірювальних перетворювачів вологості на основі МДН-структур.

3. Теоретично встановлено підвищення завадостійкості і чутливості вимірювання параметру вологості повітря радіотехнічних систем чистих кімнат шляхом компенсації реактивними властивостями вологочутливих МДН-структур активних втрат при реалізації радіовимірювальних приладів для визначення вологості на основі МДН-структур, в яких використовується частота як інформативний параметр сигналу.

4. В результаті математичного моделювання отримано аналітичні і графічні залежності активної та реактивної складових повного опору і еквівалентної ємності вологочутливого двозатворного МДН-транзистора в залежності від вологості оточуючого газового середовища, який у вимірювальному діапазоні вологості повітря від 0 % до 100 % має чутливість від 1,86 до 3,42 пФ/%.

5. В результаті математичного моделювання на основі нелінійних еквівалентних схем вологочутливих двозатворних МДН-структур з чутливим шаром підзатворного діелектрика з пористого окису кремнію, в яких враховано вплив вимірюваного параметру на елементи даних нелінійних еквівалентних схем, отримано функцію перетворення і рівняння чутливості у аналітичному і графічному вигляді, які можуть бути використані для розрахунку параметрів радіовимірювальних перетворювачів вологості повітря чистих кімнат.

6. Розроблено схеми автогенераторних радіовимірювальних перетворювачів вологості повітря чистих кімнат:

– з чутливим елементом на основі вологочутливого двозатворного МДН-транзистора в діапазоні вимірювання вологості від 0 до 100% чутливість складає 16 - 34 кГц/%;

– з чутливими елементами на основі двох вологочутливих двозатворних МДН-транзисторів в діапазоні вимірювання вологості від 0 до 100% чутливість складає 27 - 38 кГц/%.

7. Розроблені радіовимірювальні перетворювачі вологості повітря використані для розробки приладу для вимірювання відносної вологості повітря чистих кімнат, що входить до складу структурної та принципової схем системи вимірювання і контролю відносної вологості повітря чистих кімнат, яка входить до складу автоматизованої системи керування мікрокліматом (АСКМ) чистої кімнати для мікроелектронної промисловості. Інструментальна похибка приладу для вимірювання відносної вологості повітря ЧК у стабілізованому режимі становить $\pm 1,04\%$, а його чутливість у 1.11 раз вища за відомі аналоги. Аналіз проведених теоретичних та експериментальних досліджень показав, що математичні моделі описують поведінку перетворювачів з похибкою $\pm 5\%$.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Савицький А.Ю. Радіовимірювальний перетворювач вологості на основі вологочутливого МДН-транзистора / Савицький А.Ю., Осадчук О.В. // Вісник Вінницького політехнічного інститута. – 2011. – №5. – С. 167–171. – ISSN: 1997-9274.

2. Савицький А.Ю. Вологочутливий двозатворний МДН-транзистор / Савицький А.Ю., Осадчук О.В. // Вісник Вінницького політехнічного інститута. – 2010. – №6. – С. 93–96. – ISSN 1997–9266.

3. Савицький А.Ю. Принципи вимірювання відносної вологості газів атмосферного і пониженого тиску / Савицький А.Ю., Осадчук В.С., Осадчук О.В. // Вісник ХНУ. – 2011. – №3 (176). – С. 196–200. – ISSN 2226-9150.

4. Савицький А.Ю. Оптичні сенсори вологості робочих газів підвищеного і атмосферного тиску / Савицький А.Ю., Кравченко Ю.С. // Оптико-електронні інформаційно-вимірювальні технології. – 2008. – №16. – С. 175-182. – ISSN 1681-7893.

5. Савицький А.Ю. Прилад для вимірювання і контролю відносної вологості газів з частотним виходом / Савицький А.Ю. Осадчук О.В. // Нові технології. Науковий вісник Кременчуцького університету економіки, інформаційних технологій і управління. – 2011. – №3 (33). – С.3–8. – ISSN: 1810-3049.

6. Савицький А.Ю. Радіовимірювальний сенсор вологості / Савицький А.Ю., Осадчук О.В. // V міжнародна науково-технічна конференція "Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП–2011)": міжнар. наук.-техн. конф., Вінниця 19 — 21 трав. 2011 р.: тези доповіді. – 2011. – С. 140–141. – ISBN 978-966-641-6.

7. Савицький А.Ю. Радіовимірювальний сенсор вологості / Савицький А.Ю. Осадчук О.В. // I міжнародна наукова конференція пам'яті професора Володимира Поджаренка "Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах (ВКДТС–2011)": міжнар. наук. конф., Вінниця 18 — 20 жов. 2011 р.: тези доповіді. – 2011. – С. 66. – ISBN 978-966-641-429-6.

8. Савицький А.Ю. Частотний перетворювач вологості / Осадчук О.В., Савицький А.Ю. // X міжнародна конференція "Контроль і управління в складних системах": міжнар. наук.-техн. конф., Вінниця 19 — 21 жовт. 2010 р.: тези доповіді. – 2010. – С. 92. – ISBN 978-966-641-6.

9. Савицький А.Ю. Засіб для вимірювання та контролю вологості / Савицький А.Ю., Звягін О.С. // 16-й міжнародний молодіжний форум "Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке": міжнар. наук.-техн. конф., Харків 17 — 19 квіт. 2012 р.: тези доповіді. – 2012. – С. 89-90. – ISBN 978-641-3.

10. Савицький А.Ю. Автогенераторний вимірювальний перетворювач з від'ємним опором / Савицький А.Ю. // Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій «РТ - 2011»: Матеріали 7-ої міжнар. молодіжної наук.-техн. конф., Севастополь 11 — 15 квітня 2011 р. М-во освіти і науки, молоді та спорту України, Севастоп. нац. техн. ун-т; наук. ред. Ю.Б. Гімпілевич. — Севастополь: СевНТУ, 2011. — С. 479. — ISBN 942-218-311-2.

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

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

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

14. 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.

15. 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.

16. 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.

17. 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 – №200900901; заявл. 06.02.2009; опубл. 25.06.2009; Бюл. № 12.

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

19. Патент України на корисну модель № 60003, (51) МПК (2006.01) G01N 27/12. Вологочутливий сенсор на польовому транзисторі / Осадчук О.В., Крилик Л.В., Звягін О.С., Савицький А.Ю., Богачов Ю.Ю. заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № 201013213; заявл. 08.11.2010; опубл. 10.06.2011, Бюл. №11.

20. Патент України на корисну модель № 68883, (51) МПК (2006.01) G01N 21/53. Напівпровідниковий сенсор вологості / А.Ю. Савицький, О.В. Осадчук, Л.В. Крилик; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № 201112864; заявл. 03.11.2011; опубл. 10.04.2012, Бюл. №7.

АНОТАЦІЯ

Савицький А.Ю. Радіовимірювальні перетворювачі вологості на основі МДН-структур. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.08 – радіовимірювальні прилади. – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2013.

Дисертаційна робота присвячена розробці радіовимірювального перетворювача вологості повітря чистих кімнат для систем чистих кімнат в мікроелектронній промисловості. В якості первинного перетворювача інформації запропоновано використання двозатворного вологочутливого МДН-транзистора, а в якості вторинного перетворювача інформації – радіовимірювальний перетворювач вологості на основі автогенераторних структур з від'ємним диференціальним опором, що реалізують принцип перетворення „кількісна ознака вимірюваної величини – частотний інформативний сигнал”.

У дисертаційній роботі розглянуто вплив вологості на електрофізичні характеристики транзисторних МДН-структур з вологочутливим шаром пористого окису кремнію в якості підзатворного діелектрика. В результаті математичного моделювання отримано аналітичні і графічні залежності активної, реактивної складових повного опору, а також еквівалентної ємності даної структури від величини вимірюваного параметру, а також враховано вплив температури і тиску атмосфери на елементи еквівалентної схеми даного первинного перетворювача. На основі результатів розробленої математичної моделі первинного перетворювача вологості, було зроблено висновок про доцільність їх використання в автогенераторних вторинних перетворювачів вологості для систем чистих кімнат, що володіють високою чутливістю і завадостійкістю інформаційного сигналу і можуть використовуватись в якості модулятора генератора ЧМ-коливань, які можуть передаватись на відстань бездротовим шляхом. Розроблено математичну модель радіовимірювальних перетворювачів вологості повітря чистих кімнат, виконаних у часовому домені, в яких враховано вплив вимірюваного параметру, а також температури і тиску оточуючого повітряного середовища на елементи еквівалентної схеми даних перетворювачів, на основі якої отримано функцію перетворення і рівняння чутливості.

Запропоновано мікропроцесорний прилад для вимірювання параметру вологості повітря систем чистих кімнат, в якому за рахунок використання частотного методу перетворення збільшено чутливість вимірювання, а також дало змогу використання даного перетворювача інформації в якості модулятора передавальної частини приладу.

Ключові слова: вологість, чиста кімната, автогенераторний перетворювач, чутливість, завадостійкість.

АННОТАЦІЯ

Савицкий А.Ю. Радиоизмерительные преобразователи влажности на основе МДП-структур. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученого степеня кандидата технических наук по специальности 05.11.08 – радиоизмерительные приборы. - Винницкий национальный технический университет, Винница, 2013.

Влажность, как неотъемлемая составляющая любой газовой среды, существенно влияет на протекание различных технологических операций, тем самым влияет на качество и выход пригодных изделий, в том числе, и в микроэлектронной промышленности. Одним из путей совершенствования систем контроля и управления технологическим оборудованием является применение новых методов сбора и обработки информации о величине параметров данного оборудования, которые существенно влияют на протекание технологических операций.

Диссертационная работа посвящена разработке радиоизмерительных преобразователей влажности на основе чувствительных МДП-структур. Современные исследования свойств аморфных пленок полупроводников и диэлектриков (в том числе, кремния и его окиси) позволяют их применение для создания чувствительных пленок разнообразных датчиков химических веществ. Совершенствование систем измерения и

контроля параметров технологического оборудования может осуществляться на каждом этапе формирования и преобразования информационного параметра об исследуемой величине. На уровне первичного преобразователя, высокая точность и чувствительность последнего может обеспечиваться использованием новых материалов чувствительного элемента и конструктивного исполнения самого преобразователя. Применение двухзатворной МДП-структуры с влажочувствительным шаром подзатворного диэлектрика на основе пористой окиси кремния позволяет с одной стороны увеличить чувствительность измерения, а с другой стороны – дает возможность изготовления первичного преобразователя по интегральной технологии на одном кристалле. В результате математического моделирования получены зависимости активной и реактивной составных полного сопротивления, а также эквивалентной емкости двухзатворного влажочувствительного МДП-транзистора в зависимости от влажности, а также давления и температуры окружающей газовой среды.

Разработаны элементы теории взаимодействия влаги с чувствительными МДП-транзисторными структурами, в которых, в качестве влагопоглощающего вещества используется подзатворный слой пористой окиси кремния, что дало возможность создать математическую модель данного первичного преобразователя влажности.

В результате математического моделирования получены аналитические и графические зависимости активной и реактивной составляющих полного сопротивления и эквивалентной емкости двухзатворного влажочувствительного МДП-транзистора в зависимости от влажности окружающей воздушной среды, который в измерительном диапазоне влажности воздуха от 0 % до 100 % владеет чувствительностью от 1,86 до 3,42 пФ/%.

Обычные мостовой и резонансный методы реализации вторичного преобразователя влажности в случае применения транзисторной структуры в качестве первичного преобразователя неприменимы, поэтому был предложен принцип преобразования „влажность воздуха – частота информационного сигнала” на основе автогенераторных транзисторных структур с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Это позволяет увеличить точность и чувствительность измерения, частотный информационный сигнал обладает высокой помехоустойчивостью, а точность измерения частоты сигнала ограничивается только стабильностью эталонного кварцевого генератора.

Разработаны схемы автогенераторных радиоизмерительных преобразователей влажности воздуха чистых комнат:

- с чувствительным элементом на основе влажочувствительного двухзатворного МДП-транзистора в диапазоне измерения влажности от 0 до 100% чувствительность составляет от 16 до 34 кГц/%;

- с чувствительными элементами на основе двух влажочувствительных двухзатворных МДП-транзисторов в диапазоне измерения влажности от 0 до 100% чувствительность составляет от 27 до 38 кГц/%.

На основе разработанной математической модели вторичного преобразователя влажности, выполненной во временном домене, получены аналитические зависимости функции преобразования и уравнения чувствительности, в которых, в отличие от существующих, учтено влияние как измеряемого параметра (влажности), так и температуры и давления воздуха в объеме чистой комнаты на электрофизические параметры элементов эквивалентной схемы.

Разработана конструкция микропроцессорного прибора для измерения влажности воздуха чистых комнат с беспроводным каналом передачи информационного сигнала. В качестве частотного модулятора передающей части прибора предложено выполнить на основе радиоизмерительного преобразователя влажности на основе двух влажочувствительных двухзатворных МДП-транзисторов.

Рассчитана систематическая погрешность и помехоустойчивость информационного канала данного прибора для измерения влажности воздуха чистых комнат.

Ключевые слова: влажность, чистая комната, автогенераторный преобразователь, чувствительность, помехоустойчивость.

ABSTRACT

Savitsky A.Y. Radiomeasuring humidity transformers based on MDS-structures. – A manuscript.

A thesis for a candidate of technical sciences degree by speciality 05.11.08 – Radiomeasuring devices. - Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia – 2013.

The thesis is devoted to the development of the radiomeasuring humidity transformer for the clean room's air. As the primary information converter is offered to use two-gate humidity-sensitive MOSFET. The secondary converter is offered the using of the radiomeasuring humidity transformer based on self-generating structures with negative resistance, which are using the principle of transformation „quantitative sign of measurand - frequency informative signal”.

The influence of humidity on electrophysical parameters MOSFETs with humidity-sensitive porous silicone-oxide layer is considered in the thesis. The analytical and graphic expressions of the active and reactive resistances and equivalent capacitance of the MOSFET are got as a result of mathematical design. On the basis of primary humidity transformer's mathematical model the conclusion was done about expedience of their use for the generating secondary humidity transformers for the systems of clean rooms, which own a high sensitiveness and stability to the hindrances of the information signal, and can be used as a FM-modulator in the in the wireless information systems.

The construction of the microprocessor device for the measurement of the clean room's air humidity is offered, which has improved firmness to the hindrances by using of frequency transformation method, and allowed application of the secondary transformer as FM-modulator of the transmitter part of device.

Keywords: humidity, clean room, generator transformer, sensitiveness, conversion function.

Підписано до друку 27. 03. 2013 р. Формат 29.7x42^{1/4}
Наклад 120 прим. Зам. № 2013-078

Надруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету.
м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95. Тел.: (0432) 59-81-59