МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО І РОЗРОБКА ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ

УДК 621.382

ПРИЛАД ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ І КОНТРОЛЮ ВІДНОСНОЇ ВОЛОГОСТІ ГАЗІВ З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ

А.Ю. Савицький, О.В. Осадчук.
Вінницький національний технічний університет.

Розглянуто принцип функціонування, а також описані результати математичного моделювання і експериментальних досліджень приладу для вимірювання відносної вологості інертних і хімічно активних газів з частотним виходом, який може бути застосованим для дослідження відносної вологості газів як атмосферного, так і підвищеного тиску в промислових умовах і в побуті.

***Ключові слова**: відносна вологість, пористий окис кремнію, від'ємний опір, частотний перетворювач.*

Вступ

Розробка мікроелектронних сенсорів є перспективним науково-технічним напрямком у створенні елементної бази для інформаційно-вимірювальних і керуючих систем.

Вимірювання вологості як складової будь-якого газового середовища має високе практичне значення для підвищення якості і виходу придатних виробів електронної техніки, хімічної, фармацевтичної промисловості, продуктів харчування, інших промислових виробів, забезпечення санітарно-гігієнічних норм як побутових, так і виробничих мікрокліматів та ін.

На даний час широко досліджуються фізико-хімічні властивості шарів пористого кремнію і його окису для створення первинних перетворювачів газових сенсорів [1; 2]. Беззаперечною перевагою таких газових сенсорів є сумісність технології пористого окису кремнію з іншими кремнієвими технологіями, що дозволяє проектувати і виготовляти дані пристрої за інтегральною технологією, що дозволяє зменшити їх масо-габаритні параметри, а також знизити собівартість засобів технологічного контролю і, відповідно, собівартість готової продукції підприємств, де вони застосовуються. Другою перевагою сенсорів вологості на основі пористого окису кремнію є те, що вони також можуть застосовуватись для фіксації в об'ємі пор різних водорозчинних речовин, наявність яких необхідно визначити [3; 4].

1. Використання частотного перетворювача вологості на основі двох вологочутливих двохзатворних МДН-транзисторів

В ході теоретичних досліджень показано, що в якості вимірювальних схем сенсорів фізичних величин (температури, тиску, вологості, складу речовини, магнітного і електричного поля) доцільно використовувати генераторні схеми на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором [5]. Запропоновані прилади дають змогу значно покращити метрологічні характеристики сенсорів вологості, оскільки застосовують принцип перетворення "вологість-частота".

Для підвищення чутливості вимірювальних схем було запропоновано використання в якості активних елементів схеми двохзатворні вологочутливі МДН-транзистори, у яких один з шарів підзатворного діелектрика представлено шаром вологочутливого пористого окису кремнію [6]. Це дозволить значно збільшити ступінь впливу вологості на роботу частотного перетворювача, при цьому зменшивши паразитні впливи, які могли б діяли на дискретний чутливий конденсатор [7].

На рис. 1 представлено схему електричну принципову сенсора вологості з частотним виходом на основі двох вологочутливих двохзатворних МДН-транзисторів [7].

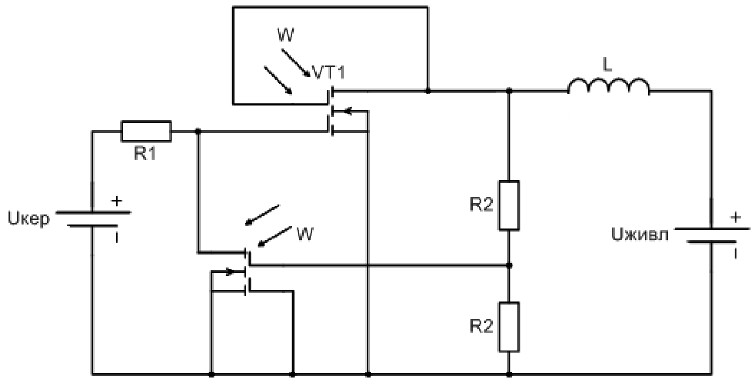

Рис. 1. Схема електрична принципова радіовимірювального сенсора вологості на основі двох вологочутливих двохзатворних МДН-транзисторів

В даній схемі в ролі вологочутливих елементів використовуються два двохзатворних МДН-транзистори, в яких одним з шарів підзатворного діелектрика виступає шар $por-Si$. При зміні вологості навколишнього середовища шар гідрофільного $por-Si$ адсорбує вологу і змінює при цьому прохідну ємність транзистора. Дана ємність входить в склад загальної ємності, що виникає на електродах стік першого двохзатворного МДН-транзистора – витік другого двохзатворного МДН-транзистора, яка разом з індуктивністю *L* утворюють коливальне коло *L-C*, яке, з огляду на вищевказане, має залежну від вологості резонансну частоту коливань.

Для визначення ВАХ функції перетворення і рівняння чутливості на рис. 2 наведено еквівалентну схему сенсора вологості з частотним виходом на основі двох вологочутливих двохзатворних МДН-транзисторів.

Елементи еквівалентної схеми описуються наступним чином: $U_{кер}$, $U_{живл}$ – напруга керування і напруга живлення схеми, L – індуктивність, R_1 – активний опір затвора двохзатворного вологочутливого МДН-транзистора, 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, витоку двохзатворного МДН-транзистора; C_s, C_d, C_{ds} – ємності затвор-витік, затвор-стік, стік-витік двохзатворного МДН-транзистора, I_{pt} – струм двохзатворного МДН-транзистора.

Оскільки розроблена схема працює як генератор, тоді всі внутрішні джерела струму і напруги потрібно розглядати як змінні в часі. Тому, використавши метод змінних станів, представимо перетворену еквівалентну схему (рис. 2), у якій зроблено наступне спрощення: $I_{bt} = (I_f - I_r)/QB$.

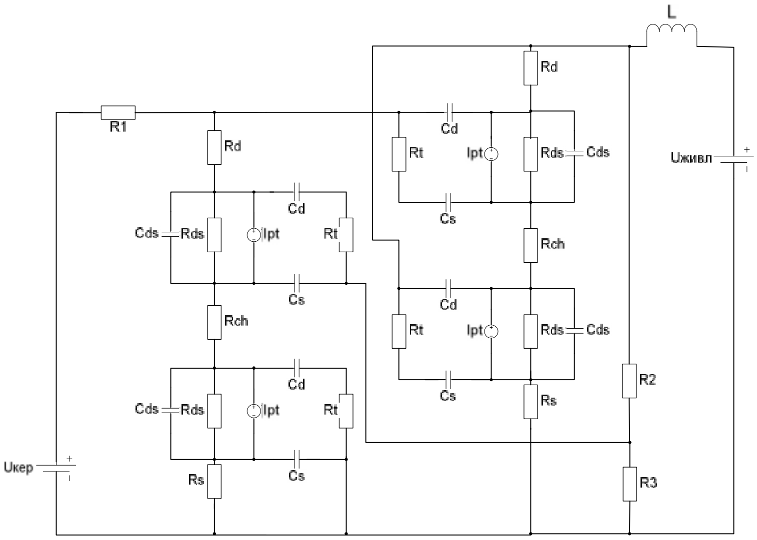

Рис. 2. Еквівалентна схема сенсора вологості з частотним виходом з чутливим елементом на основі двох двохзатворних вологочутливих МДН-транзисторів

Обравши напрямки обходу контурів, запишемо систему рівнянь за законами Кірхгофа для цієї схеми:

$$\begin{cases} U_L = U_{\text{живл}} + i_{R_2}R_2 - i_{R_3}R_3; \\ i_{R_{ds}} = \dfrac{U_{C_{ds}}}{R_{ds}}; \\ i_{C_d} = \dfrac{U_{C_s} - U_{C_{ds}} - U_{C_d}}{R_t}; \\ i_{R_1} = i_{R_d} + i_{C_d} + i_{C_s}; \\ i_{R_d} = \dfrac{-(U_{\text{кер}} + 2U_{C_{ds}}) + i_{R_1}R_1 + (2R_{ds} + R_d)i_{ds} + i_{R_s}R_s}{R_d}; \\ i_{R_s} = \dfrac{U_{C_s}}{R_s}; \\ i_{R_2} = \dfrac{U_{C_s} - i_{C_s}R_t + i_{R_s}R_s - i_{R_3}R_3}{R_2}; \\ i_{R_3} = \dfrac{U_{C_d} - U_{C_s} - i_{C_d}R_t - i_{R_s}R_s}{R_3}; \\ i_{C_d} = i_{R_d} + I_{pt} + i_{C_d} - i_{R_{ds}}; \\ i_{C_s} = i_{R_s} + I_{pt} - i_{C_{ds}} - i_{C_d}. \end{cases} \quad (1)$$

Вважаючи заданими відповідні значення напруг на ємностях та струм через індуктивність, розв‘яжемо систему рівнянь (1) відносно наступних величин: U_L, i_{c_d}, i_{c_s}, $i_{c_{ds}}$, а оскільки напруги і струми схеми сенсора вологості з частотним виходом з чутливим елементом на основі двох двохзатворних вологочутливих МДН-транзисторів змінюються у часі, то, враховуючи, що струм ємності і напруга на індуктивності описуються виразами: $i_C = C\dfrac{dU_C}{dt}$, $U_L = C\dfrac{di_L}{dt}$, розв’язок системи (1) можна записати наступним чином:

$$
\begin{cases}
L\dfrac{di_L(t)}{dt}=U_{живл}+A_1-\dfrac{-(U_{кер}+2U_{C_{ds}}(t))+\dfrac{A_2}{R_t}R_1+\dfrac{U_{C_s}(t)}{R_s}R_1-\dfrac{A_3}{R_t}R_1-\dfrac{2A_2}{R_t}R_1}{R_d-R_1}R_t+\\
+\dfrac{\dfrac{U_{C_{ds}}(t)}{R_{ds}}R_1+(2R_{ds}+R_d)\dfrac{U_{C_{ds}}(t)}{R_{ds}}+U_{C_s}(t)}{R_d-R_1}R_t;\\
C_d\dfrac{dU_{C_d}}{dt}=\dfrac{U_{C_s}(t)-U_{C_{ds}}(t)-U_{C_d}(t)}{R_t};\\
C_{ds}\dfrac{dU_{C_{ds}}}{dt}=\dfrac{A_3}{R_t}+I_{pt}+\dfrac{A_2}{R_t}-\dfrac{U_{C_{ds}}(t)}{R_{ds}};\\
C_s\dfrac{dU_{C_s}}{dt}=\dfrac{U_{C_s}(t)}{R_s}-\dfrac{A_3}{R_t}-\dfrac{2A_2}{R_t}+\dfrac{U_{C_{ds}}(t)}{R_{ds}},
\end{cases}
\qquad (2)
$$

де $A_1=3U_{C_s}-U_{C_d}-\dfrac{U_{C_s}}{R_s}R_t+U_{C_{ds}}$,

$A_2=U_{C_s}-U_{C_{ds}}-U_{C_d}$,

$A_3=U_{живл}+A_1-U_L$.

З огляду на те, що система рівнянь (2) містить в собі доданки, які описують нелінійні елементи (джерела струму), то система є нелінійною. Нелінійні елементи схеми описуються наступним чином:

$$
I_{pt}=\begin{cases}
0, U_{GS}-U_{VTO}\le 0\\
\beta\cdot(U_{GS}-U_{VTO})^2, U_{GS}-U_{VTO}\le U_{DS}\\
\beta\cdot U_{DS}\cdot\left[2\cdot(U_{GS}-U_{VTO})-U_{DS}\right], U_{GS}-U_{VTO}>U_{DS},
\end{cases}
$$

де NF, NR – коефіцієнти неідеальності польового транзистора в прямому та інверсному режимах функціонування, BF, BR – максимальний коефіцієнт передачі струму, VTO – порогова напруга, β – крутизна характеристики вологочутливого двохзатворного МДН-транзистора.

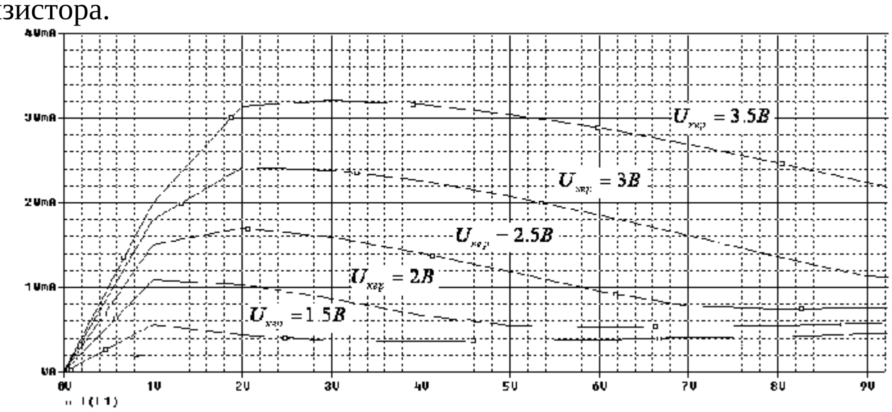

Рис. 3. Експериментальна ВАХ сенсора вологості з частотним виходом

Перевірка адекватності моделі, проведена в середовищі Maple, дозволяє переконатися в її адекватності. Розрахунок показує, що при наявності певного рівня відносної вологості навколишнього середовища на виході схеми виникають синусоїдні коливання, наприклад, з частотою 1,27 *МГц* при рівні відносної вологості 20%.

Для проведення експериментальних досліджень було зібрано схему на основі транзисторів BF 998. В ході експериментальних досліджень було визначено ВАХ сенсора вологості з частотним виходом.

З графіка на рис. 3 видно, що при різних значеннях напруги керування на виході схеми з'являється ділянка від'ємного диференційного опору, яка компенсує втрати енергії на активних елементах схеми і тим самим забезпечує позитивний зворотній зв'язок схеми.

Виходячи з умов рівноваги Ляпунова, на основі системи рівнянь (2) отримали функцію перетворення сенсора вологості з частотним виходом з чутливим елементом на основі двох двохзатворних вологочутливих МДН-транзисторів:

$$F(W) = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{4R_{ds}^2C_{ds}C_sC_d + R_{ds}^2C_{ds}^2(C_d + C_s) - LC_sC_d}{2R_{ds}^2C_{ds}^2C_sC_d}} + \sqrt{\frac{\sqrt{(4R_{ds}^2C_{ds}C_sC_d + R_{ds}^2C_{ds}^2(C_d + C_s) - LC_sC_d)^2 + 4LR_{ds}^2C_{ds}^2C_sC_d(C_d + C_s)}}{2R_{ds}^2C_{ds}^2C_sC_d}} \quad (3)$$

Виходячи з рівності (2), отримали графік залежності частоти генерації схеми в залежності від величини відносної вологості оточуючого середовища:

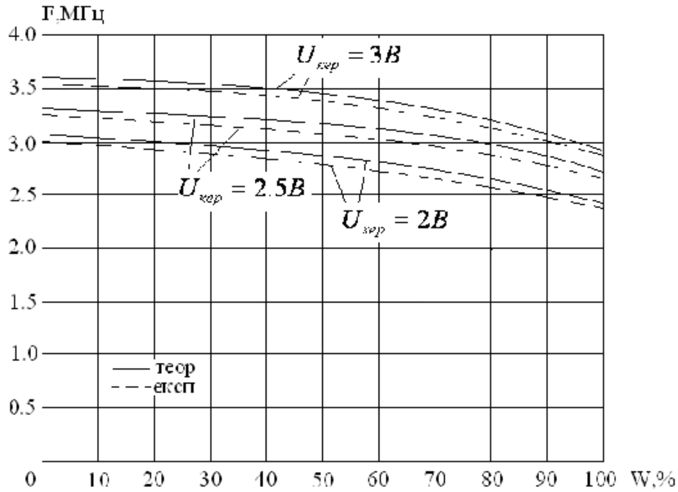

Рис. 4. Теоретична і експериментальна залежності частоти генерації сенсора вологості з частотним виходом від величини вимірювального параметра

З рис. 4 видно, що при збільшенні напруги керування частота генерації вимірювальної схеми росте на всіх діапазонах виміру вологості, причому найбільший збіг між теоретичною і експериментальною складовими отримали при напрузі керування $U_{кер} = 3$. Подальше збільшення напруги керування, як видно з графіка рис. 4, призведе до протікання критичних струмів через вологочутливі двозатворні МДН-транзистори.

Шляхом диференціювання виразу функції перетворення отримаємо рівняння чутливості сенсора вологості на основі двох двозатворних вологочутливих МДН-транзисторів:

$$S(W) = \frac{4R_{ds}^2C_sC_d\frac{dC_{ds}(W)}{dW} + 2(C_d + C_s)R_{ds}^2C_{ds}(W)\frac{dC_{ds}(W)}{dW}}{4\sqrt{A_{32}}R_{ds}^2C_{ds}^2(W)C_dC_s} - \frac{\sqrt{A_{32}}\frac{dC_{ds}(W)}{dW}}{R_{ds}^2C_{ds}^3(W)C_dC_s} + \frac{\frac{1}{2}\left(2A_{32}\left(4R_{ds}^2C_sC_d\frac{dC_{ds}(W)}{dW} + 2(C_d + C_s)R_{ds}C_{ds}(W)\frac{dC_{ds}(W)}{dW}\right)\right)}{\sqrt{A_{32}^2 + 2LR_{ds}^3C_{ds}^4(W)C_d^2C_s^2(C_d + C_s)}} + \frac{4LR_{ds}^3C_{ds}^3(W)C_d^2C_s^2(C_d + C_s)\frac{dC_{ds}(W)}{dW}}{\sqrt{A_{32}^2 + 2LR_{ds}^3C_{ds}^4(W)C_d^2C_s^2(C_d + C_s)}} \quad (4)$$

де $A_{32} = 4R_{ds}^2C_sC_dC_{ds}(W) + (C_d + C_s)R_{ds}^2C_{ds}^2(W) - LC_dC_s$

На основі отриманого виразу рівняння чутливості (4) зобразимо графічно чутливість сенсора вологості до дії вимірюваного параметру у вимірювальному діапазоні при різних напругах керування:

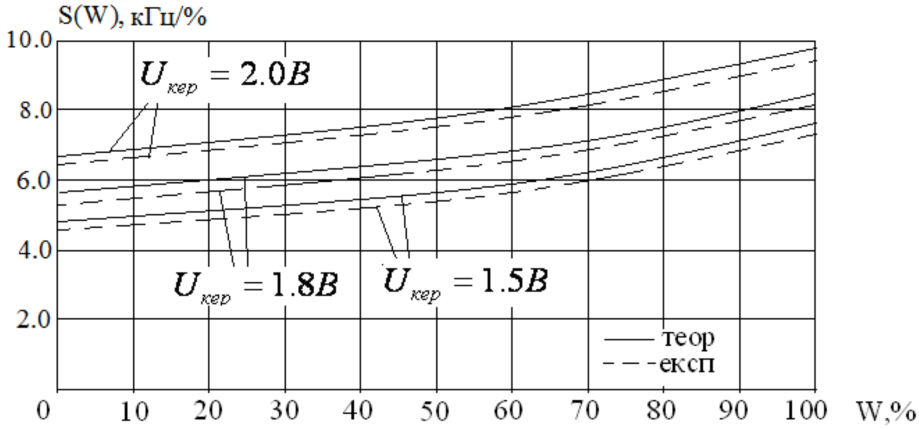

Рис. 5. Графік чутливості сенсора вологості з частотним виходом в діапазоні вимірювання при різних значеннях напруги керування

З графіка на рис. 5 видно, що розроблений сенсор вологості з частотним виходом має зростаючу чутливість в області значень відносної вологості газу 60-100%, що пояснюється домінуванням в даній області фізичного механізму адсорбції пари у шар пористого окису кремнію і більшого ступеня заповнення пор адсорбованою вологою.

Висновки

1. Необхідність розробки і створення високоточних і високочутливих сенсорів вологості пов‘язана з тим, що вологість як невід‘ємний параметр будь-якого газового середовища впливає на перебіг багатьох технологічних процесів, тим самим впливаючи на якість готової продукції.

2. Пористий кремній та його окис є перспективними матеріалами з огляду на перспективи їх застосування в якості чутливого шару різноманітних газових сенсорів.

3. Використання сенсорів вологості з частотним виходом дозволяє створювати високоточні високочутливі сенсори вологості, застосовні у промислових цілях і в побуті.

***ЛІТЕРАТУРА*:**

1. Равновесные и неравновесные электодные процессы на пористом кремнии / [Е. А. Тутов, М. Н. Павленко, Е. Е. Тутов и др.] // Письма в ЖТФ. – 2006. – № 13. – С. 6-11.
2. Влияние процессов адсорбции воды на вольт-фарадные характеристики гетероструктур с пористым кремнием // [Е. А. Тутов, М. Н. Павленко, Е. Е. Тутов и др.] // Письма в ЖТФ. – 2003. – № 11. – С. 83-89.
3. Юзова, В. А. Получение и исследование кремниевых структур / В. А. Юзова, О. В. Семенова // Вестник КрасГУ. – 2003. – № 5. – С. 128-134.
4. Тутов, Е. А. Гетерофазные процессы при взаимодействии пористого кремния с водой / Е. А. Тутов / **С**орбционные и хроматографические процессы. – 2009. – Т. 9. – С. 131-136.
5. Осадчук, В. С. Сенсори вологості. / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Л. В. Крилик. – Вінниця : Універсум-Вінниця, 2003. – С. 208.
6. Берлинер, М. А. Измерения влажности / М. А. Берлинер. – М. : Энергия, 1973. – 400 с.
7. Патент України № 40955, кл. G01N 21/53. Гігрометричний сенсор на польовому транзисторі / В.С. Осадчук, О.В. Осадчук, Л.В. Крилик, А.Ю. Савицький. – 27.04.09. – Бюл. № 8.

Отримано редакцією 06.06.2011 р.

Осадчук Олександр Володимирович, доктор технічних наук, професор кафедри електроніки. Вінницький національний технічний університет.

Савицький Антон Юрійович, аспірант кафедри радіотехніки. Вінницький національний технічний університет. E-mail: Sav-ant@mail.ru