

УДК: 621.382

О. В. Осадчук, д. т. н., проф.;

А. Ю. Савицький, асп.

## ВОЛОГОЧУТЛИВИЙ ДВОЗАТВОРНИЙ МДН-ТРАНЗИСТОР

Розроблено структуру і проведено математичне моделювання двозатворного вологочутливого МДН-транзистора з чутливим шаром з пористого кремнію, на основі якої отримано аналітичну залежність повного опору структури, а також графічні залежності активної, реактивної складових повного опору та ємності структури від зміни вологості навколишнього середовища. В діапазоні відносної вологості від 10 до 90 % ємність структури змінюється від 200 до 700 мкФ.

На теперішньому етапі розвитку науки і техніки досить гостро стоїть проблема підвищення якості та ефективності виробництва промислової, сільськогосподарської продукції, дотримання санітарно-гігієнічних норм та параметрів виробничого, складського і побутового мікроклімату.

Для виготовлення сучасних напівпровідникових сенсорів вологості використовують МДН-структури, робота яких ґрунтується на використанні ефекту поля у приповерхневій області напівпровідника, особливо чутливий до енергетичних характеристик поверхні, міжфазних границь і перехідних областей, зокрема концентрації і параметрів електрично-активних точкових дефектів. Зміна цих параметрів під дією зовнішніх факторів, наприклад, адсорбційно-десорбційних процесів у газових сумішах лежить в основі використання вологочутливих МДН-структур [1]. Широке вивчення різноманітних властивостей пористого кремнію (por-Si) відкрило перспективу його застосування у сонячних елементах, біотехнологіях, різноманітних сенсорах. Розробка мікроелектронних сенсорів є перспективним науково-технічним напрямком у створенні елементної бази для вимірювально-інформаційних і керувальних систем. Інтерес до цієї галузі пояснюється тим, що ефективність сучасних систем автоматичного керування обмежується не стільки апаратно-програмним забезпеченням обробки даних, скільки якістю збору і обробки первинної інформації.

Фізична адсорбція парів води в мікропорах і капілярна конденсація в мезопорах викликають ефективне збільшення діелектричної проникності пористого шару, що може бути використано для створення сенсора вологості, чутливого в діапазоні 0—100 % відносної вологості.

Типова конструкція ємнісного вологочутливого сенсора зображена на рис. 1 [2].

Через пористий золотий електрод 1 волога потрапляє на шар пористого кремнію. Внаслідок фізичної адсорбції волога закріплюється в об'ємі матеріалу, що змінює його діелектричну проникність, а отже, і ємність. Шар пористого кремнію 2 сформовано на кремнієвій підкладці 3.

Типова залежність ємності від вологості показана на рис. 2.

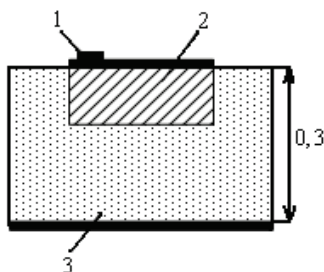


Рис. 1. Сенсор вологості ємнісного типу на основі пористого кремнію

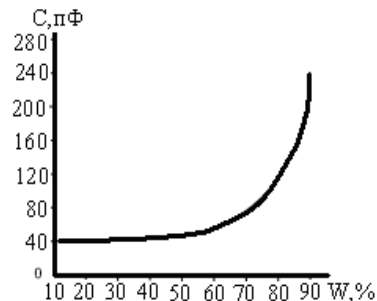


Рис. 2. Залежність ємності від відносної вологості для сенсора на основі пористого кремнію

Подальші дослідження показали, що чим вище значення відносної вологості, тим швидше зростає ємність.

Пористим може бути не тільки кремній, а й окис кремнію. Такий матеріал є кращим з огляду на хімічну інертність і відсутність реакції з водою. Тому було запропоновано виготовлення вологочутливого елемента на основі МДН-структури з чутливим шаром з пористого кремнію, як одного з шарів підзатворного діелектрика [3].

Використання активного елемента як первинний перетворювач має деякі переваги: активні елементи змінюють свої параметри залежно від рівня зовнішнього подразника, підвищення технологічності виготовлення, усунення додаткових паразитних характеристик (опір додаткових контактних площадок, розподілені активний і реактивний опори струмоведучих доріжок та інші). З огляду на це запропоновано конструкцію первинного перетворювача, яка показана на рис. 3 [4].

З поданням на керувальні електроди напруги, яка відповідає відкриттю каналів проходження струму, між стоковими і витоковими областями, через польовий транзистор протікає струм, параметри якого залежать від конструктивних характеристик польового транзистора. Серед таких параметрів є його реактивний опір. Його величина залежить від властивості матеріалу, на основі якого сформований польовий транзистор, і властивостей плівкових затворів.

В процесі адсорбції і десорбції молекул води чутливий елемент змінює свою ємність і тим самим змінює ємність, яку утворює керувальний електрод і польовий транзистор, що збільшує реактивний опір польового транзистора і тим самим впливає на параметри струму, який проходить між стоковими і витоковими областями польового транзистора.

Тому, для побудови математичної моделі запропонованого транзистора, розріз якого показано на рис. 3, необхідно розглянути його еквівалентну схему (рис. 4).

Елементи схеми описуються такими характеристиками:  $SU_{cb1}$ ,  $SU_{cb2}$  — струми, які протікають через канали двозатворного МДН-транзистора, фактично є добутками напруг  $U_{cb1}$ ,  $U_{cb2}$ , які падають на каналах транзистора, на крутизну характеристики транзистора;  $R_{cb}$  — опір стік-витік;  $R_{zv}$  — опір затвор-витік;  $R_{cc}$  — загальний опір стоку-витоку другого затвора двозатворного польового транзистора;  $C_{пор}$  — ємність стінок пор чутливого елемента;  $C_{бш}$  — опір бар'єрного шару;  $C_{пов}$  — ємність повітря в порах чутливого елемента;  $R_{пор}$  — опір стінок пор;  $R_{пов}$  — опір повітря в порах чутливого шару;  $R_{бш}$  — опір бар'єрного шару;  $R_{c1}$ ,  $R_{b1}$  — опори стоку і витоку відповідно.

Ця математична модель описує реакцію двозатворного МДН-транзистора на вологість навко-

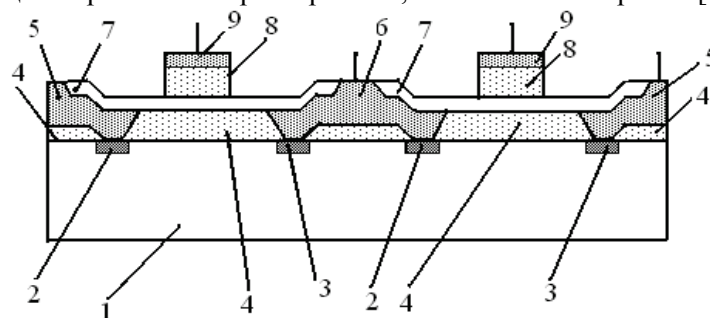


Рис. 3. Гігрометричний сенсор на основі МДН-транзистора:

- 1 — підкладка; 2 — області витоку; 3 — область стоку;  
4 — плівка  $SiO_2$ ; 5 — провідні плівки; 6 — суміщена стоково-витокова плівка; 7 — плівкові затвори; 8 — чутливі шари з пористого  $SiO_2$ ; 9 — керувальні електроди

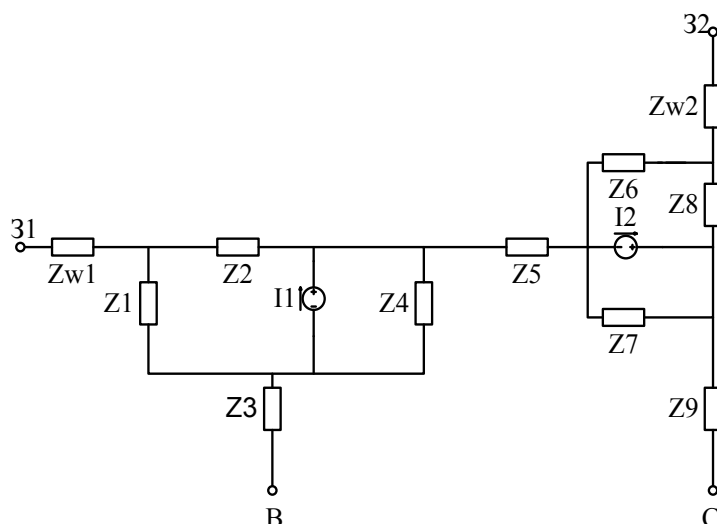


Рис. 4. Еквівалентна схема двозатворного вологочутливого МДН-транзистора

лишнього повітряного середовища. Внаслідок фізичної і хімічної адсорбції водяної пари в об'єм підзатворної плівки пористого окису кремнію, пори останньої частково або повністю заповнюються конденсованою парою, тим самим змінюючи загальну діелектричну проникність цієї плівки. Таким чином, реакцією МДН-транзистора на вологість навколишнього середовища є зміна величини паразитних ємностей, які виникли у зв'язку з використанням цього шару пористого окису кремнію.

Ємності чутливого елемента визначаються з формул

$$C_{\text{пор}}(W) = \frac{\varepsilon_{a\text{SiO}_2}(W) \varepsilon_0 S (1 - \alpha)}{b}; \quad (1)$$

$$C_{\text{пов}}(W) = \frac{\varepsilon_{a\text{SiO}_2}(W) \varepsilon_0 S \alpha}{l}; \quad (2)$$

$$C_{\text{бш}}(W) = \frac{\varepsilon_{a\text{SiO}_2}(W) \varepsilon_0 S}{b}, \quad (3)$$

де  $\varepsilon_0$  — діелектрична проникність вакууму;  $\varepsilon_{a\text{SiO}_2}(W)$  — діелектрична проникність аморфного двоокису кремнію;  $\alpha$  — пористість матеріалу;  $b$  — товщина бар'єрного шару;  $l$  — довжина пор, на яких осідає конденсат;  $S$  — площа чутливого елемента;  $W$  — величина відносної вологості повітря.

Увівши в схему опір навантаження  $R$ , попередню еквівалентну схему можна перетворити так, як показано на рис. 5.

Загальний опір цієї схеми визначається таким чином:

$$Z_{\Sigma} = Z_{k1} + \frac{\left( \frac{Z_{W2}R}{Z_{W2} + R} + Z_{W1} \right)}{Z_{k2} + Z_{W1} + \frac{Z_{W2}R}{Z_{W2} + R}}. \quad (4)$$

Для постійної напруги (напруги відкриття транзистора) зі зміною рівня вологості залежності дійсної і уявної складових повного опору транзистора показані на рис. 6—8.

З графіків випливає, що чутливий елемент на основі МДН-транзисторної структури на основі пористого кремнію характеризується залежністю від вологості навколишнього середовища як активної, так реактивної складових повного опору. З графіка на рис. 8 видно, що зміною рівня відносної вологості від 40 до 90 % величина прохідної ємності структури змінюється від 200 до 700 мкФ, що показує більшу чутливість такого сенсора вологості у порівнянні з ємнісним елементом з діелектричним шаром з пористого кремнію. Крім того, чутливий елемент, що має транзисторну структуру, є перспективним з погляду використання в якості активного елемента транзисторних коливальних кіл.

### Висновки

Аналіз фізико-хімічних властивостей пористого окису кремнію показує переваги його використання в якості

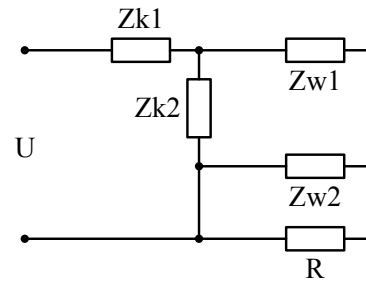


Рис. 5. Спрощена еквівалентна схема вологочутливої МДН-структури

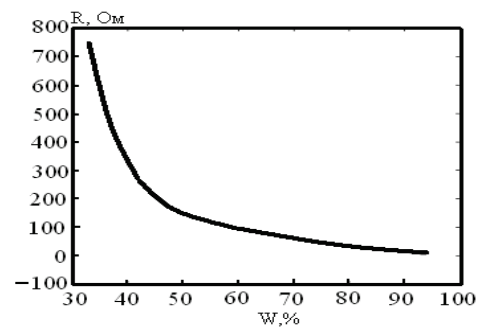


Рис. 6. Залежність активної складової повного опору двозатворного вологочутливого МДН-транзистора від вологості

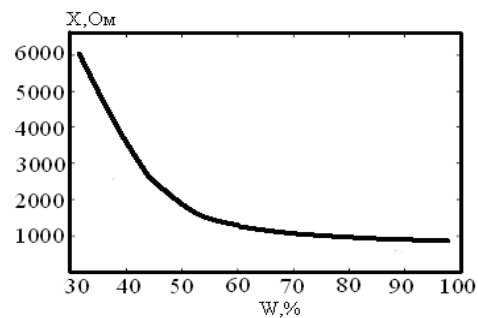


Рис. 7. Залежність реактивної складової повного опору двозатворного вологочутливого МДН-транзистора від вологості

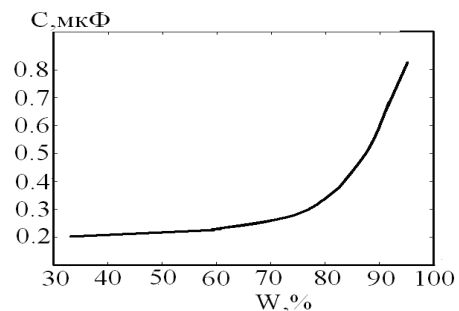


Рис. 8. Залежність прохідної ємності двозатворного вологочутливого МДН-транзистора від вологості

чутливого шару первинних перетворювачів вологості. Запропоновано конструкцію і проведено математичне моделювання двозатворного вологочутливого МДН-транзистора, в результаті якого отримано рівняння повного опору структури, а також графічні залежності активної, реактивної складових повного опору та ємності структури від зміни вологості навколишнього середовища. В діапазоні відносної вологості від 10 до 90 % ємність структури змінюється від 200 до 700 мкФ.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Равновесные и неравновесные электродные процессы на пористом кремнии / [Е. А. Тутов, М. Н. Павленко, Е. Е. Тутов и др.] // Письма в ЖТФ. — 2006. — № 13. — С. 6—11.
2. Мікроелектронні сенсори фізичних величин / [З. Ю. Готра, О. М. Мельник, В. Вуйцік та ін.]. — Львів : Ліга-Прес, 2002. — 422 с.
3. 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.
4. Патент України № 40955, кл. G01N 21/53. Гігрометричний сенсор на польовому транзисторі / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Л. В. Крилик, А. Ю. Савицький; опубл. 27.04.09, Бюл. № 8.

Рекомендована кафедрою радіотехніки

Надійшла до редакції 25.05.10  
Рекомендована до друку 4.10.10

**Осадчук Олександр Володимирович** — завідувач кафедри, **Савицький Антон Юрійович** — аспірант.  
Кафедра радіотехніки, Вінницький національний технічний університет