

**ЧАСТОТНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ТИСКУ З АКТИВНИМ ІНДУКТИВНИМ  
ЕЛЕМЕНТОМ НА ОСНОВІ ДВОСТОКОВОГО МДН ТЕНЗОТРАНЗИСТОРА**

*В статті розглянуто вплив тиску на електрофізичні параметри двостокового МДН тензотранзистора. Розглянуто автогенераторний сенсор тиску, в якому первинним перетворювачем виступає двостоковий МДН транзистор, а пасивна індуктивність коливального контуру замінена на активний індуктивний елемент, що дозволяє виконати схему автогенератора за інтегральною технологією. Отримано аналітичні вирази функції перетворення і рівняння чутливості. Чутливість пристрою складає від 1,6 кГц/кПа до 3,0 кГц/кПа.*

*Ключові слова: частотний перетворювач тиску, напівпровідникові структури, тиск, двостоковий МДН тензотранзистор.*

V.S. OSADCHYK, A.V. OSADCHYK, Y.A. OSADCHYK  
Vinnytsia National Technical University

**FREQUENCY PRESSURE TRANSDUCER WITH ACTIVE INDUCTIVE ELEMENT BASED MOSFET TWO  
DRAINS TENZOTRANSISTOR**

*Abstract. The paper considers the effect of pressure on the electrical parameters of two drains MOSFET tenzotransistor. Considered autogenerating pressure sensor in which the primary transducer acts two drains MOSFET tenzotransistor and passive oscillatory circuit inductance is replaced by an active inductive element, allowing for the integrated circuit oscillator technology. Field effect transistors act as a strain-sensing element in pressure sensors, so you need more detail to determine the dependence of electrophysical characteristics of semiconductor material of pressure because it is the foundation upon which generated strain-sensing element. Strain dependence of semiconductors serve as a foundation for further development of the mathematical model of pressure transducers with a frequency output signal, based on which we can determine the dependence of current-voltage characteristics of the active and reactive components of the impedance transducer oscillation frequency and sensitivity of the pressure equation. Analytical expressions conversion functions and equations of sensitivity. The sensitivity of the device is 1.6 kHz / kPa to 3.0 kHz / kPa.*

*Keywords: frequency pressure sensors, semiconductor structures, pressure, two drains MOSFET tenzotransistor.*

**Вступ**

Преваги мікроелектронних перетворювачів тиску перед традиційними обумовлені, насамперед, застосуванням у них як чутливого елемента напівпровідникового матеріалу, групових методів його обробки і формування в ньому вимірювальних, схем підсилення й обробки сигналу методами мікроелектронної технології.

Сенсори тиску з чутливим елементом на основі біполярних тензотранзисторів мають високий рівень вихідного сигналу, високу відносну чутливість, однак мають значно більше у порівнянні з "монополярними" сенсорами енергоспоживання. Низький рівень енергоспоживання при досить високому рівні вихідного сигналу може бути отримано у тензосенсорах з чутливим елементом на основі польового ефекту [1].

**Теоретичні та експериментальні дослідження**

У даній роботі розглянемо принцип роботи польових двостокових тензотранзисторів типу: МДН (метал-діелектрик-напівпровідник) та побудови на їх основі мікроелектронного частотного перетворювача тиску з частотним виходом. У даному перетворювачі в якості чутливого елемента використано двостоковий тензочутливий МДН транзистор, який розміщений на кремнієвій мембрані, що перетворює рівномірно розподілене по поверхні мембрани навантаження в одноосову пружну деформацію розтягнення (стиску) її центральної частини в кристалографічному напрямку  $\langle 110 \rangle$ .

Подібно польовим магнітотранзисторам [2, 3], польові тензотранзистори повинні мати ряд важливих переваг перед біполярними тензотранзисторами, серед них порівняно мала залежність параметрів транзистора від температури, малий рівень шуму, а також більш висока радіаційна стійкість.

За аналогією з польовими магнітотранзисторами чутливий елемент інтегрального тензосенсора на основі польового тензотранзистора можна охарактеризувати двома параметрами: абсолютною чутливістю  $S_A$  і ефективністю перетворення, чи відносною чутливістю,  $S_R$  [3]

$$S_A = R_D \left| \frac{\partial(I_{D1} - I_{D2})}{\partial\sigma} \right|_{\sigma=0}, \quad (1)$$

$$S_R = (I_{D1} + I_{D2})^{-1} \left| \frac{\partial(I_{D1} - I_{D2})}{\partial\sigma} \right|_{\sigma=0}, \quad (2)$$

де  $\sigma$  – механічна напруга в області розташування тензотранзистора;  $I_{D1(D2)}$  – струми стоків D1 і D2 відповідно, величини навантажувальних опорів у стокових ланцюгах транзисторів будемо вважати однаковими  $R_{D1} = R_{D2} = R_D$ .

На рис.1 показані топологія (а) і схема (б) включення польового двостокового тензотранзистора. Будемо вважати, що польовий тензотранзистор розташовується в центрі профільованої кремнієвої

мембрани, що перетворює рівномірно розподілене по поверхні мембрани навантаження в одноосьову пружну деформацію розтягнення (стиску) її центральної частини в кристалографічному напрямку  $\langle 110 \rangle$  [3].

Розглянемо принцип роботи польових тензотранзисторів. При подачі відповідних напруг зсуву ( $U_{DS}$ ,  $U_G$ ) дірки дрейфують уздовж каналу в подовжньому тягнучому полі. За відсутності деформації в силу дзеркальної симетрії топології тензотранзисторів щодо площини, що проходить через середину каналу  $y = L_y / 2$  перпендикулярно  $x$ -площині, струми стоків рівні між собою  $I_{D1} = I_{D2} = I_D^0$  і величина вихідного сигналу  $V_0$  (рис. 1) при рівності опорів навантаження  $R_{D1} = R_{D2} = R_D$  дорівнює нулю [3].

При рівномірному навантаженні кремнієвої мембрани рухливість основних носіїв заряду – дірок стає анізотропною в  $x$ - $y$ -площині й у каналі польового тензотранзистора виникають додаткові, пропорційні деформації, поперечне і подовжнє електричні поля (в  $y$ - і  $x$ -напрямах відповідно).

У стаціонарному випадку обумовлена анізотропією рухливості поперечна різниця потенціалів перешкоджає перерозподілу щільності струму поперек каналу. Тому практично значимий поперечний перерозподіл щільності струму буде мати місце тільки поблизу стоків, де поперечна різниця потенціалів закорочується  $p^+$  областями стоків. Отже, наведена деформацією анізотропія рухливості дірок в умовах закорочування поперечної різниці потенціалів буде приводити до перерозподілу щільності струму поперек каналу, розбалансу струмів стоків і появи вихідного сигналу.

Принцип дії описаних польових тензотранзисторів формально еквівалентний принципу дії багатостокових польових магнітотранзисторів, у яких холлівське поле зумовлює перерозподіл струму між стоками [3]. Якщо обмежити канал польового транзистора координатами  $0 \leq x \leq L_x$ ,  $0 \leq y \leq L_y$ ,  $0 \leq z \leq L_z$ , тоді величини струму стоків  $D1$  і  $D2$  польового МДН тензотранзистора (рис. 1, а) можна записати у вигляді [3]

$$I_{D1(D2)} = C \mu_p \int_{0(L_y-L_x)}^{L_D(L_y)} \frac{\partial U}{\partial x}(x=L_x, y) [U_C - U_G - U(x=L_x, y)] dy, \quad (3)$$

де  $C$  – ємність одиниці площі системи польовий електрод-напівпровідник;  $U_C$  – напруга відсічки (напруга на затворі, при якій провідність каналу дорівнює нулю);  $U_G$  – потенціал затвора;  $U(x, y)$  – потенціал каналу в точці з координатами  $x, y$ .

У виразі (3) вважається, що стоки  $D1$  і  $D2$  мають однакову ширину  $L_D$  і відділені один від одного проміжком  $W = L_y - 2L_D$ . За наявності деформації величину потенціалу  $U(x, y)$  можна представити в такий спосіб [3]:

$$U(x, y) = U_0(x) + a\Phi(x, y), \quad (4)$$

де  $U_0(x)$  – потенціал каналу в точці  $x$  при відсутності деформації,  $\Phi(x, y)$  – зміна потенціалу в каналі, зумовлена пружною деформацією,  $a$  – параметр анізотропії.

У розглянутому випадку параметр анізотропії  $a$  лінійно зв'язаний з величиною пружної одноосьової механічної напруги в області розташування польового тензотранзистора співвідношенням

$$a = \Pi_{44} \sigma / 2, \quad (5)$$

де  $\Pi_{44}$  – зсувовий п'єзореzystивний коефіцієнт для p-Si.

Для практично досяжних значень пружної деформації величина  $a$  мала  $|a| \ll 1$  і справедлива нерівність [3]

$$U_0(x) \gg |a\Phi(x, y)|. \quad (6)$$

Підставляючи вирази (3), (4) і (5) у вирази (1), (2), одержуємо такі вирази для величин абсолютної чутливості  $S_A$  і ефективності перетворення  $S_R$  МДН тензотранзистора [3]:

$$S_A = \Pi_{44} C \mu_p R_D (U_C - U_G - U_{DS}) \int_0^{L_D} \frac{\partial \Phi}{\partial x}(x=L_x, y) dy, \quad (7)$$

$$S_R = \Pi_{44} C \mu_p \frac{(U_C - U_G - U_{DS})}{2I_D^0} \int_0^{L_D} \frac{\partial \Phi}{\partial x}(x=L_x, y) dy, \quad (8)$$

$$I_D^0 = \mu_p \frac{C}{2} \frac{L_y}{L_x} (U_C - U_G - \frac{U_{DS}}{2}) U_{DS}, \quad (9)$$

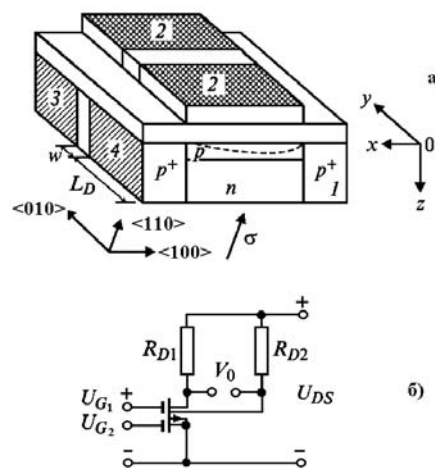


Рис. 1. Топологія, схема включення і кристалографічна орієнтація двостокового польового МДН тензотранзистора: 1 – витік; 2 – затвори 31, 32; 3, 4 – стоки С1, С2

де  $I_{D1}^0 = I_{D2}^0 = I_D^0$  – струми стоків у відсутності деформації. Слід зазначити, що формули (7)-(9) також справедливі для МДН тензотранзистора з інверсним р-каналом при зміні знаків напруг  $U_C$  і  $U_G$ .

Отже, задача знаходження значень абсолютної чутливості  $S_A$  і ефективності перетворення  $S_R$  польових тензотранзисторів зводиться до знаходження величини зміни просторового розподілу потенціалу  $a\Phi(x, y)$  у каналі польового тензотранзистора під час накладення деформуючих зусиль.

Перейдемо до опису роботи автогенераторного сенсора тиску, в якому первинним перетворювачем виступає двостоковий МДН транзистор, а пасивна індуктивність коливального контуру замінена на активний індуктивний елемент, що дозволяє виконати схему автогенератора за інтегральною технологією. Схема перетворювача складається з двостокового МДН тензотранзистора, двозатворного МДН транзистора та МДН транзистора. Активна складова повного опору на електродах стік-стік транзисторів VT1 і VT2 має від'ємне значення, а реактивна складова має ємнісний характер [4]. Підключення активної індуктивності до електродів стік-стік транзисторів VT1 і VT2 на основі транзистора VT3 та послідовного  $R_3C_2$  кола дозволяє створити генератор електричних коливань, частота генерації якого залежить від зміни тиску (рис.2) [5].

З чутливим елементом на основі двостокового тензочутливого МДН транзистора було проведено експериментальні дослідження, що дали можливість отримати залежність частоти генерації перетворювача від зміни тиску.

Функція перетворення, тобто залежність частоти генерації від зміни тиску, визначається на основі нелінійної еквівалентної схеми радіовимірювального перетворювача. Спочатку визначається реактивна складова повного опору на електродах стік-стік транзисторної структури, а потім з реактивної складової визначається еквівалентна ємність, яка залежить від зміни тиску. Зміна еквівалентної ємності визначає залежність частоти генерації від тиску. Аналітичний вираз функції перетворення має вигляд

$$F_0 = \frac{\sqrt{2} \sqrt{A_1 - \sqrt{A_1^2 + 4L_1 C_{GD}(P) R_{DS}^2(P) C_{GS}^2(P)}}}{4\pi L_{EKV} C_{GD}(P) R_{DS}^2(P) C_{GS}^2(P)}, \quad (10)$$

де  $A_1 = R_{DS}^2(P) C_{GD}(P) C_{GS}(P) + R_{DS}^2(P) C_{GS}^2(P) - L_{EKV} C_{GD}(P)$ ,

$L_{EKV}$  – еквівалентна індуктивність коливального контуру;  $C_{GD}$  – ємність затвор-стік тензочутливого транзистора VT1;  $C_{GS}$  – ємність затвор-витік тензочутливого транзистора VT1;  $R_{DS}$  – опір витік-стік тензочутливого транзистора VT1;  $P$  – тиск.

Числові розрахунки на персональному комп'ютері дозволили отримати функцію перетворення радіовимірювального мікроелектронного перетворювача тиску у вигляді графіка (рис.3). Функція чутливості описується рівнянням:

$$\begin{aligned} S_{F_0}^P = & -\frac{\sqrt{2}}{8} \left( R_{DS}^5(P) C_{GS}^5(P) \left( \frac{\partial C_{GD}(P)}{\partial P} \right) + R_{DS}^3(P) C_{GD}^2(P) C_{GS}(P) \left( \frac{\partial C_{GS}(P)}{\partial P} \right) \sqrt{A_2} + C_{GD}^3(P) R_{DS}^5(P) \times \right. \\ & \times C_{GS}^2(P) \left( \frac{\partial C_{GS}(P)}{\partial P} \right) + C_{GD}^2(P) R_{DS}^5(P) C_{GS}^3(P) \left( \frac{\partial C_{GS}(P)}{\partial P} \right) + C_{GD}(P) R_{DS}^5(P) C_{GS}^4(P) \left( \frac{\partial C_{GD}(P)}{\partial P} \right) + \\ & + C_{GD}(P) R_{DS}^3(P) C_{GS}^3(P) L_{EKV} \left( \frac{\partial C_{GD}(P)}{\partial P} \right) - 2C_{GD}^3(P) R_{DS}^2(P) C_{GS}^2(P) L_{EKV} \left( \frac{\partial R_{DS}(P)}{\partial P} \right) - 3C_{GD}^3(P) R_{DS}^2(P) \times \\ & \times C_{GS}(P) L_{EKV} \left( \frac{\partial C_{GS}(P)}{\partial P} \right) + 2C_{GD}^2(P) R_{DS}^2(P) C_{GS}^3(P) L_{EKV} \left( \frac{\partial R_{DS}(P)}{\partial P} \right) + 2C_{GD}^2(P) R_{DS}^3(P) C_{GS}^2(P) L_{EKV} \left( \frac{\partial C_{GS}(P)}{\partial P} \right) + \\ & + R_{DS}^3(P) C_{GS}^3(P) \sqrt{A_2} \left( \frac{\partial C_{GD}(P)}{\partial P} \right) - 2 \left( \frac{\partial R_{DS}(P)}{\partial P} \right) \sqrt{A_2} C_{GD}^2(P) C_{GS}(P) L_{EKV} - 2 \left( \frac{\partial C_{GS}(P)}{\partial P} \right) R_{DS}(P) C_{GD}^2(P) \sqrt{A_2} + \\ & \left. + 2 \left( \frac{\partial R_{DS}(P)}{\partial P} \right) \sqrt{A_2} C_{GD}^3(P) C_{GS}(P) L_{EKV}^2 + 2 \left( \frac{\partial C_{GS}(P)}{\partial P} \right) C_{GD}^3(P) C_{DS}(P) L_{EKV}^2 \right) \left/ \left( \pi \sqrt{A_2} L_{EKV} \times \right. \right. \\ & \left. \left. \times C_{GD}^2(P) R_{DS}^3(P) C_{GS}^3(P) \sqrt{\frac{-R_{DS}^2(P) C_{GS}(P) C_{GD}(P) - R_{DS}^2(P) C_{GS}^2(P) + L_{EKV} C_{GD}(P) - \sqrt{A_2}}{L_{EKV} C_{GD}(P) R_{DS}^2(P) C_{GS}^2(P)}}} \right), \end{aligned} \quad (11)$$

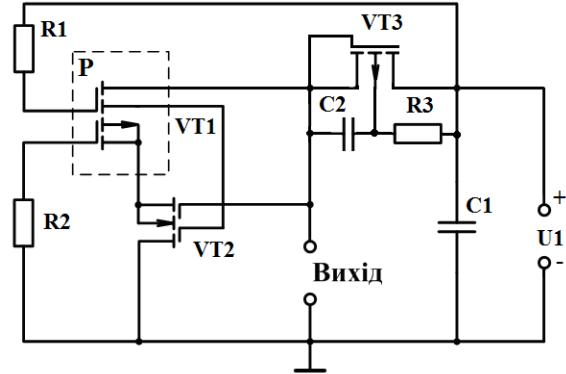


Рис. 2. Схема мікроелектронного перетворювача тиску з частотним виходом

$$A_2 = R_{DS}^4(P)C_{GS}^2(P)C_{GD}^2(P) + 2R_{DS}^4(P)C_{GS}^3(P)C_{GD}(P) - 2R_{DS}^2(P) \times \\ \times C_{GS}(P)C_{GD}^2(P)L_{EKV} + R_{DS}^4(P)C_{GS}^4(P) + 2L_{EKV}R_{DS}^2(P)C_{GS}^2(P) + L_{EKV}^2C_{GD}^2(P).$$

де

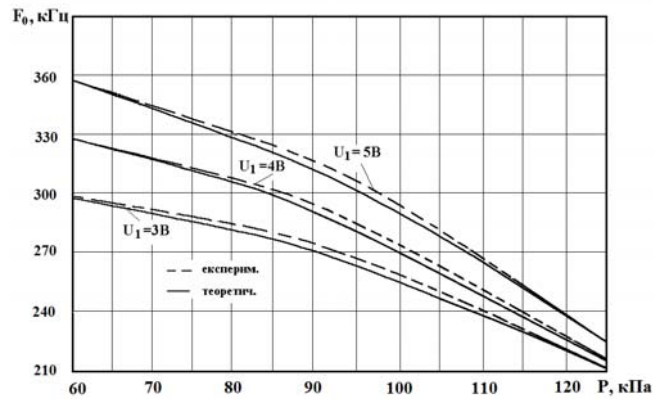


Рис. 3. Теоретичні і експериментальні залежності частоти генерації від зміни тиску

Як видно з графіка, чутливість і лінійність функції перетворення зростають з підвищенням напруги живлення. Існують оптимальна величина напруги живлення, яка складає 5 В. Адекватність розробленої моделі в порівнянні з експериментом визначається у вигляді відносної похибки і не перевищує  $\pm 2,5\%$ . Чутливість перетворювача на частоті 270 кГц при напрузі живлення 5 В складає 2,75 кГц/кПа.

На основі експериментальних досліджень встановлено, що частота генерації змінювалась від 360 кГц до 320 кГц при зміні тиску від 60 кПа до 125 кПа. Чутливість перетворювача складає 1,6...3,0 кГц/кПа.

### Висновки

Запропоновано автогенераторний перетворювач тиску на основі двох польових транзисторів, одним з яких чутливим до тиску виступає двостоковий польовий транзистор. Отримано аналітичні вирази функції перетворення і рівняння чутливості. Чутливість пристрою складає від 1,6 кГц/кПа до 3,0 кГц/кПа.

Sp, кГц/кПа

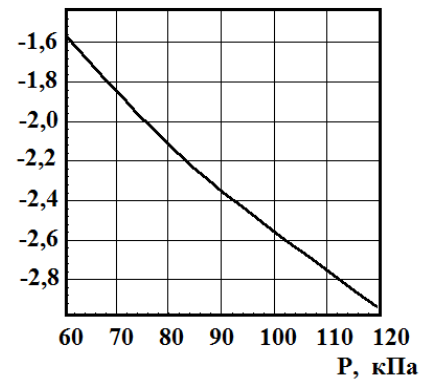


Рис. 4. Залежність чутливості від тиску

### Література

1. Викулин И.М. Физика полупроводниковых приборов / И.М. Викулин, В.И. Стафеев. – М. : Радио и связь, 1990. – 264 с.
2. Викулина Л.Ф. Физика сенсоров температуры и магнитного поля / Л.Ф. Викулина, М.А. Глауберман // – Одесса : Маяк, 2000. – 156 с.
3. Бабичев Г.Г. Кремниевые двухстоковые полевые тензотранзисторы / Г.Г. Бабичев, С.И. Козловский, В.А. Романов, Н.Н. Шаран // Журнал технической физики. – 2000. – Т.70. – № 10. – С. 45–49.
4. Осадчук О.В. Микроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором / О.В. Осадчук. – Вінниця : «Універсум-Вінниця», 2000. – 303 с.
5. Патент на корисну модель № 83356 України, МПК G01R 31/315. Вимірювач тиску з активним індуктивним елементом / Осадчук В.С., Осадчук О.В., Осадчук Я.О. – № u201300303 ; заяв. 09.01.2013 ; пр. 18.04.13 ; опубл. 10.09.13, Бюл.17.

### References

1. Vikulin I.M., Stafeyev V.I. Physics of semiconductor devices / I.M. Vikulin, V.I. Stafeyev // –M.: Radio and communication, 1990. - 264 P.
2. Vikulina L.F. Physics temperature sensors and magnetic field / L.F. Vikulina, M.A. Glauberman // – Odessa: Mayak, 2000. -156 P.
3. Babichev G.G. Silicon two drains field tenzotransistor / G.G. Babichev, S.I. Kozlowski, V.A. Romanov, N.N. Sharan // Technical Physics. –2000. –T.70. –№ 10. –P.45-49.
4. Osadchuk O.V. Microelectronic frequency transducers based on the transistor structures with negative resistance / O.V. Osadchuk / Vinnitsa, "Universum-Vinnitsa", 2000. – 303 P.
5. Patent for useful model № 83356 Ukraine, IPC G01R 31/315. Pressure meter with active inductive element / Osadchuk V.S., Osadchuk O.V., Osadchuk I.A. Application № u201300303; Statement. 09.01.2013; Tr. 18/04/13. Opubl.10.09.13 Byul.17.

Рецензія/Peer review : 15.5.2014 р.

Надрукована/Printed :29.11.2014 р.  
Рецензент: д.т.н., проф., В.Г. Петрук