

ТЕНЗОРЕАКТИВНИЙ ЕФЕКТ У ПОЛЬОВИХ ТРАНЗИСТОРАХ

В статті представлено розробку та дослідження елементів теорії тензореактивного ефекту в польових тензочутливих транзисторах. Розроблено математичні моделі тензореактивного ефекту, які відрізняються від існуючих тим, що в них враховано вплив тиску на активну і реактивну складові повного опору тензочутливих польових транзисторів, які визначають залежність частоти генерації радіовимірювальних частотних перетворювачів від дії тиску. Проведені теоретичні та експериментальні дослідження показали, що активна складова повного опору польового транзистора змінюється на $8,86 \text{ Ом}/10^5 \text{ Па}$, а реактивна складова повного опору змінюється на $8,52 \text{ Ом}/10^5 \text{ Па}$ при зміні тиску на $2,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Отримані зміни повного опору від дії тиску є достатньо суттєвими для використання польових транзисторів як первинних тензочутливих елементів в радіовимірювальних частотних перетворювачах тиску. В результаті математичного моделювання отримано аналітичні вирази, які можна використати для інженерного розрахунку функції перетворення, рівняння чутливості та інших характеристик радіовимірювальних частотних перетворювачів тиску на основі польових тензочутливих транзисторів.

Ключові слова: тензореактивний ефект, тензочутливий польовий транзистор, радіовимірювальні частотні перетворювачі, тиск, від'ємний диференційний опір.

A.V. OSADCHUK, V.S. OSADCHUK, I.A. OSADCHUK

Vinnitsa National Technical University

TENZOREACTIVE EFFECT IN FIELD-EFFECT TRANSISTORS

The article presents the development and research of elements of the theory of the tenzoreactive effect in field tenzo-sensitive transistors. Mathematical models of the tenzoreactive effect have been developed, which differ from the existing ones in that they take into account the effect of pressure on the active and reactive components of the impedance of the tenzo-sensitive field-effect transistors, which determine the dependence of the generation frequency of the radiomeasuring frequency transducers on the effect of pressure. Theoretical and experimental studies showed that the active component of the field-effect transistor impedance changes by $8.86 \text{ Ohm}/10^5 \text{ Pa}$, and the reactive component of the impedance changes by $8.52 \text{ Ohm}/10^5 \text{ Pa}$ with a pressure change of $2.5 \cdot 10^5 \text{ Pa}$. The obtained changes in the impedance from the action of pressure are significant enough to use field-effect transistors as primary tenzo-sensitive elements in radiomeasuring frequency pressure transducers. As a result of mathematical modeling, analytical expressions are obtained that can be used for the engineering calculation of the conversion function, the sensitivity equation, and other characteristics of the radiomeasuring frequency pressure transducers based on field-effect transistors.

Keywords: tenzoreactive effect, tenzo-sensitive field-effect transistor, radiomeasuring frequency pressure transducers, pressure, negative differential resistance.

Вступ

Тиск потрібно вимірювати в космічних дослідженнях, при моніторингу навколишнього середовища, в автомобільній промисловості, комп'ютерній техніці, будівництві, хімічній промисловості, нафтогазовій промисловості, військовій техніці тощо [1–3]. Тому є нагальна потреба розширення наукових досліджень в галузі вітчизняного виробництва радіовимірювальних мікроелектронних параметричних перетворювачів тиску з огляду їх подальшого розвитку в напрямках: висока точність і чутливість, малі масогабаритні показники, надійність, відтворюваність, низька вартість, широка номенклатура та інтеграція з мікропроцесорними пристроями обробки інформації [4–6]. Все це примушує проводити пошук і розробку нових методів вимірювання, які б дозволили вирішити задачі, що з'являються у зв'язку з потребами практики.

На ринку сенсорів фізичних величин представлені прилади та засоби вимірювання та контролю тиску різних типів та конструкцій, проте більша частина перетворювачів тиску є аналоговими. У даних перетворювачах зміна тиску перетворюється в електричний вихідний сигнал у вигляді напруги або струму. Радіовимірювальні перетворювачі тиску з частотним вихідним сигналом мають ряд переваг перед аналоговими перетворювачами, які полягають у можливості одержання великих вихідних сигналів, а також у значному підвищенні завадостійкості, що дозволяє збільшити точність і чутливість вимірювання [7–10].

Розробка радіовимірювальних частотних перетворювачів тиску на основі напівпровідникових структур з від'ємним диференційним опором, в яких польові транзистори виступають як тензочутливі активні елементи, потребує розроблення математичних моделей тензореактивного ефекту в чутливих до тиску польових елементах [10]. На основі цих математичних моделей можна визначити залежності активної та реактивної складових повного опору польового транзисторної структури, зміни резонансної частоти перетворювачів від дії тиску, отримати рівняння чутливості та дослідити основні параметри і характеристики перетворювачів тиску. Розгляду цих питань присвячено дану статтю.

Теоретичні та експериментальні дослідження

Тензореактивний ефект у польових транзисторах, тобто залежність його повного вихідного опору від дії тиску, визначаємо на основі залежності елементів еквівалентної схеми від тиску, які є складовими повного опору. Залежність реактивної складової повного опору від тиску визначає зміну резонансної частоти радіовимірювального частотного перетворювача тиску. Еквівалентна схема польового транзистора,

який виступає первинним перетворювачем тиску, представлена на рис. 1 [11]. Перетворимо її на більш зручну для розрахунків вихідного повного опору тензочутливого польового транзистора (рис. 2).

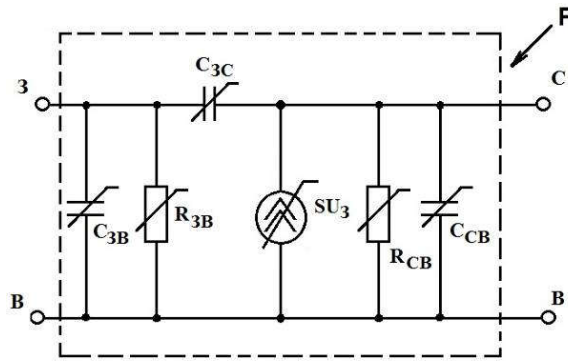


Рис. 1. Еквівалентна схема польового транзистора при дії тиску

Повні опори елементів еквівалентної схеми на рис. 2 описуються виразами:

$$Z_1 = \frac{R_{3B}}{1 + (j\omega R_{3B} C_{3B})^2} - j \frac{\omega R_{3B}^2 C_{3B}}{1 + (\omega R_{3B} C_{3B})^2}, \quad Z_2 = -j \frac{1}{\omega C_{3C}}, \quad Z_3 = \frac{R_{CB}}{1 + (\omega R_{CB} C_{CB})^2} - j \frac{\omega R_{CB}^2 C_{CB}}{1 + (\omega R_{CB} C_{CB})^2}.$$

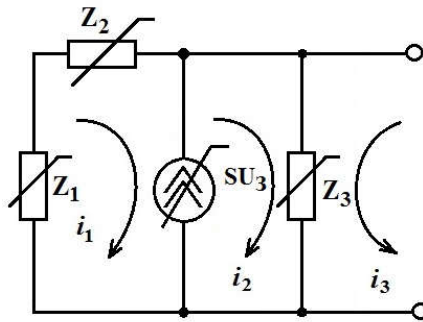


Рис. 2. Перетворена еквівалентна схема польового транзистора при дії тиску

Система рівнянь Кірхгофа для схеми (див. рис. 2) згідно з напрямками контурних струмів має вигляд

$$\begin{cases} 0 = (Z_1 + Z_2 + Z_3)i_1 + Z_3i_2 + Z_3i_3, \\ U = Z_3i_1 + Z_3i_2 + Z_3i_3. \end{cases} \quad (1)$$

Струм i_1 визначаємо з першого рівняння системи (1)

$$i_1 = \frac{Z_3i_3}{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_3i_2}. \quad (2)$$

Струм i_2 визначаємо на основі схеми (рис. 2)

$$i_2 = SU_3 = S \cdot Z_1 i_1. \quad (3)$$

Таким чином, підставивши значення струмів i_1 і i_2 в друге рівняння системи (1), отримаємо повний опір тензочутливого польового транзистора Z_{CB} від дії тиску

$$Z_{CB} = Z_3 - \frac{Z_3^2}{(Z_1 + Z_2 + Z_3) + Z_3 S Z_1} - \frac{Z_3 S Z_1}{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_3 S Z_1}. \quad (4)$$

Розділивши вираз (4) на дійсну і уявну складові, отримаємо формулу

$$Z_{CB} = (a_4 - a_{14} - a_{10}) - j(a_5 - a_{15} - a_{11}), \quad (5)$$

де $Z_1 = a_1 - ja_2$, $Z_2 = -ja_3$, $Z_3 = a_4 - ja_5$, $a_1 = \frac{R_{3B}}{1 + (\omega R_{3B} C_{3B})^2}$,

$$a_2 = \frac{\omega R_{3B}^2 C_{3B}}{1 + (\omega R_{3B} C_{3B})^2}, \quad a_3 = \frac{1}{\omega C_{3C}}, \quad a_4 = \frac{R_{CB}}{1 + (\omega R_{CB} C_{CB})^2}, \quad a_5 = \frac{\omega R_{CB}^2 C_{CB}}{1 + (\omega R_{CB} C_{CB})^2},$$

$$a_6 = S(a_4^2 a_1 - a_5^2 a_1 - 2a_4 a_5 a_2), \quad a_7 = S(2a_4 a_5 a_1 + a_2 a_4^2 - a_2 a_5^2), \quad a_8 = (a_1 + a_4) + S(a_4 a_1 - a_2 a_5),$$

$$a_9 = (a_1 + a_3 + a_5) + S(a_2 a_4 + a_1 a_5), \quad a_{10} = \frac{a_6 a_8 + a_7 a_9}{a_8^2 + a_9^2}, \quad a_{11} = \frac{a_7 a_8 - a_6 a_9}{a_8^2 + a_9^2}, \quad a_{12} = (a_4^2 - a_5^2), \quad a_{13} = 2a_4 a_5,$$

$$a_{14} = \frac{a_8 a_{12} + a_9 a_{13}}{a_8^2 + a_9^2}, \quad a_{15} = \frac{a_8 a_{13} - a_9 a_{12}}{a_8^2 + a_9^2}.$$

Визначивши активну і реактивну складові повного опору польового транзистора, перейдемо до визначення залежності елементів еквівалентної схеми (рис. 1) від дії тиску. Оскільки польовий транзистор працює в лінійному режимі, коли $U_{CB} < U_{3B}$, і нелінійному режимі, тобто в режимі насичення, коли $U_{CB} > U_{3B}$, то нам потрібно розглянути ці два режими роботи. Основну роль на зміну параметрів польового транзистора відіграють опір каналу і крутість, тому в першу чергу будемо розглядати їх залежність від дії тиску. В лінійному режимі опір каналу описується виразом [11, 12]

$$R_{CB} = \frac{L}{Z \mu_n C_0 \left(U_{3B} - U_{nop} - \frac{1}{2} U_{CB} \right)}, \quad (6)$$

де U_{nop} – порогова напруга; L – довжина каналу польового транзистора; Z – ширина каналу; μ_n – рухливість електронів у каналі польового транзистора; U_{3B} – напруга затвор-витік польового транзистора; C_0 – сміність підзатворного діелектрика на одиницю площі; U_{CB} – напруга стік-витік.

При дії тиску зміна опору каналу в загальному вигляді описується виразом

$$\Delta R_{CB}(P) = \frac{\partial R_{CB}}{\partial L} \Delta L(P) + \frac{\partial R_{CB}}{\partial Z} \Delta Z(P) + \frac{\partial R_{CB}}{\partial \mu_n} \Delta \mu_n(P) + \frac{\partial R_{CB}}{\partial C_0} \Delta C_0(P) + \frac{\partial R_{CB}}{\partial U_{3B}} \Delta U_{3B}(P) + \frac{\partial R_{CB}}{\partial U_{nop}} \Delta U_{nop}(P) + \frac{\partial R_{CB}}{\partial U_{CB}} \Delta U_{CB}(P). \quad (7)$$

Складові виразу (7) мають вигляд

$$\frac{\partial R_{CB}}{\partial L} \Delta L(P) = \frac{1}{Z \mu_n C_0 \left[U_{3B} - U_{nop} - \frac{1}{2} U_{CB} \right]} \Delta L(P), \quad (8)$$

$$\frac{\partial R_{CB}}{\partial Z} \Delta Z(P) = - \frac{L}{Z^2 \mu_n C_0 \left[U_{3B} - U_{nop} - \frac{1}{2} U_{CB} \right]} \Delta Z(P), \quad (9)$$

$$\frac{\partial R_{CB}}{\partial \mu_n} \Delta \mu_n(P) = - \frac{L}{Z \mu_n^2 C_0 \left[U_{3B} - U_{nop} - \frac{1}{2} U_{CB} \right]} \Delta \mu_n(P), \quad (10)$$

$$\frac{\partial R_{CB}}{\partial C_0} \Delta C_0(P) = - \frac{L}{Z \mu_n C_0^2 \left[U_{3B} - U_{nop} - \frac{1}{2} U_{CB} \right]} \Delta C_0(P), \quad (11)$$

$$\frac{\partial R_{CB}}{\partial U_{3B}} \Delta U_{3B}(P) = - \frac{L}{Z \mu_n C_0 U_{3B}^2} \Delta U_{3B}(P), \quad (12)$$

$$\frac{\partial R_{CB}}{\partial U_{nop}} \Delta U_{nop}(P) = \frac{L}{Z \mu_n C_0 U_{nop}^2} \Delta U_{nop}(P), \quad (13)$$

$$\frac{\partial R_{CB}}{\partial U_{CB}} \Delta U_{CB}(P) = \frac{2L}{Z \mu_n C_0 U_{CB}^2} \Delta U_{CB}(P), \quad (14)$$

Крутість польового транзистора S в лінійному режимі описується формулою [11]

$$S = \frac{Z \mu_n C_0}{L} U_{CB}. \quad (15)$$

Приріст крутості від дії тиску описується виразом

$$\Delta S(P) = \frac{\partial S}{\partial Z} \Delta Z(P) + \frac{\partial S}{\partial \mu_n} \Delta \mu_n(P) + \frac{\partial S}{\partial C_0} \Delta C_0(P) + \frac{\partial S}{\partial L} \Delta L(P) + \frac{\partial S}{\partial U_{CB}} \Delta U_{CB}(P). \quad (16)$$

Складові виразу (3.76) описуються рівняннями

$$\frac{\partial S}{\partial Z} \Delta Z(P) = \frac{\mu_n C_0 U_{CB}}{L} \Delta Z(P), \quad (17)$$

$$\frac{\partial S}{\partial \mu_n} \Delta \mu_n(P) = \frac{Z C_0 U_{CB}}{L} \Delta \mu_n(P), \quad (18)$$

$$\frac{\partial S}{\partial C_0} \Delta C_0(P) = \frac{Z \mu_n U_{CB}}{L} \Delta C_0(P), \quad (19)$$

$$\frac{\partial S}{\partial U_{CB}} \Delta U_{CB}(P) = \frac{Z \mu_n C_0}{L} \Delta U_{CB}(P), \quad (20)$$

$$\frac{\partial S}{\partial L} \Delta L(P) = -\frac{Z \mu_n C_0 U_{CB}}{L^2} \Delta L(P), \quad (21)$$

Перейдемо до розгляду роботи польового транзистора в режимі насичення та дії тиску, коли $U_{CB} > U_{3B}$. В цьому випадку опір каналу має вигляд [12]

$$R_{CB} = \frac{2L}{Z \mu_n C_0 U_{CBH}}, \quad (22)$$

де U_{CBH} – напруга на електродах стік-витік в режимі насичення. Опір каналу при дії тиску описується виразом

$$\Delta R_{CBH}(P) = \frac{\partial R_{CBH}}{\partial L} \Delta L(P) + \frac{\partial R_{CBH}}{\partial Z} \Delta Z(P) + \frac{\partial R_{CBH}}{\partial \mu_n} \Delta \mu_n(P) + \frac{\partial R_{CBH}}{\partial C_0} \Delta C_0(P) + \frac{\partial R_{CBH}}{\partial U_{CB}} \Delta U_{CB}(P). \quad (23)$$

Складові виразу (23) описуються формулами

$$\frac{\partial R_{CBH}}{\partial L} \Delta L(P) = \frac{2}{Z \mu_n C_0 U_{CBH}} \Delta L(P), \quad (24)$$

$$\frac{\partial R_{CBH}}{\partial Z} \Delta Z(P) = -\frac{2L}{Z^2 \mu_n C_0 U_{CBH}} \Delta Z(P), \quad (25)$$

$$\frac{\partial R_{CBH}}{\partial \mu_n} \Delta \mu_n(P) = -\frac{2L}{Z \mu_n^2 C_0 U_{CBH}} \Delta \mu_n(P), \quad (26)$$

$$\frac{\partial R_{CBH}}{\partial C_0} \Delta C_0(P) = -\frac{2L}{Z \mu_n C_0^2 U_{CBH}} \Delta C_0(P), \quad (27)$$

$$\frac{\partial R_{CBH}}{\partial U_{CBH}} \Delta U_{CBH}(P) = -\frac{2L}{Z \mu_n C_0 U_{CBH}^2} \Delta U_{CBH}(P), \quad (28)$$

Крутість польового транзистора в режимі насичення має вигляд [12]

$$S = \frac{Z \mu_n C_0}{L} (U_{3B} - U_{nop}). \quad (29)$$

Приріст крутості при дії тиску визначається виразом

$$\Delta S(P) = \frac{\partial S}{\partial Z} \Delta Z(P) + \frac{\partial S}{\partial \mu_n} \Delta \mu_n(P) + \frac{\partial S}{\partial C_0} \Delta C_0(P) + \frac{\partial S}{\partial L} \Delta L(P) + \frac{\partial S}{\partial U_{3B}} \Delta U_{3B}(P) + \frac{\partial S}{\partial U_{nop}} \Delta U_{nop}(P). \quad (30)$$

Складові виразу (30) описуються формулами

$$\frac{\partial S}{\partial Z} \Delta Z(P) = \frac{\mu_n C_0}{L} (U_{3B} - U_{nop}) \Delta Z(P), \quad (31)$$

$$\frac{\partial S}{\partial \mu_n} \Delta \mu_n(P) = \frac{Z C_0 (U_{3B} - U_{nop})}{L} \Delta \mu_n(P), \quad (32)$$

$$\frac{\partial S}{\partial C_0} \Delta C_0(P) = \frac{Z \mu_n (U_{3B} - U_{nop})}{L} \Delta C_0(P), \quad (33)$$

$$\frac{\partial S}{\partial L} \Delta L(P) = -\frac{Z \mu_n C_0 (U_{3B} - U_{nop})}{L^2} \Delta L(P), \quad (34)$$

$$\frac{\partial S}{\partial U_{3B}} \Delta U_{3B}(P) = \frac{Z \mu_n C_0}{L} \Delta U_{3B}(P), \quad (35)$$

$$\frac{\partial S}{\partial U_{nop}} \Delta U_{nop}(P) = -\frac{Z \mu_n C_0}{L} \Delta U_{nop}(P), \quad (36)$$

Розглянемо зміну параметрів польового транзистора при врахуванні зміни рухливості носіїв заряду від напруженості електричного поля у каналі. Як показано у роботі [12], в області насичення ($U_{CB} > U_{3B}$) опір каналу описується виразом

$$R_{CBH} = \frac{\sqrt{3L}}{\mu_0 C_0 E_C^{1/2} Z U_{CBH}^{1/2}}, \quad (37)$$

де μ_0 – рухливість електронів без врахування електричного поля в каналі польового транзистора; E_C – напруженість дрейфового електричного поля, при якому приріст енергії електронів точно дорівнює $3/2kT$, при цьому напруженість електричного поля в каналі $E(x) > E_C$. Виходячи з виразу (37) визначимо зміну опору каналу польового транзистора від дії тиску

$$\Delta R_{CBH}(P) = \frac{\partial R_{CBH}}{\partial L} \Delta L(P) + \frac{\partial R_{CBH}}{\partial \mu_0} \Delta \mu_0(P) + \frac{\partial R_{CBH}}{\partial C_0} \Delta C_0(P) + \frac{\partial R_{CBH}}{\partial E_C} \Delta E_C(P) + \frac{\partial R_{CBH}}{\partial Z} \Delta Z(P) + \frac{\partial R_{CBH}}{\partial U_{CBH}} \Delta U_{CBH}(P). \quad (38)$$

Складові виразу (38) описуються рівняннями

$$\frac{\partial R_{CBH}}{\partial L} \Delta L(P) = \frac{1/2\sqrt{3}L^{-1/2}}{\mu_0 C_0 E_C^{1/2} Z U_{CBH}^{1/2}} \Delta L(P), \quad (39)$$

$$\frac{\partial R_{CBH}}{\partial \mu_0} \Delta \mu_0(P) = -\frac{\sqrt{3}L}{\mu_0^2 C_0 E_C^{1/2} Z U_{CBH}^{1/2}} \Delta \mu_0(P), \quad (40)$$

$$\frac{\partial R_{CBH}}{\partial C_0} \Delta C_0(P) = -\frac{\sqrt{3}L}{C_0^2 \mu_0 E_C^{1/2} Z U_{CBH}^{1/2}} \Delta C_0(P), \quad (41)$$

$$\frac{\partial R_{CBH}}{\partial E_C} \Delta E_C(P) = -\frac{\sqrt{3}L}{2\mu_0 C_0 E_C^{3/2} Z U_{CBH}^{1/2}} \Delta E_C(P), \quad (42)$$

$$\frac{\partial R_{CBH}}{\partial Z} \Delta Z(P) = -\frac{\sqrt{3}L}{\mu_0 C_0 E_C^{1/2} Z^2 U_{CBH}^{1/2}} \Delta Z(P), \quad (43)$$

$$\frac{\partial R_{CBH}}{\partial U_{CBH}} \Delta U_{CBH}(P) = -\frac{\sqrt{3}L}{\mu_0 C_0 E_C^{1/2} Z U_{CBH}^{3/2}} \Delta U_{CBH}(P), \quad (44)$$

Кругість в режимі насичення при дії електричного поля в каналі, коли $E(x) > E_C$, описується формулою [12]

$$S_H = \frac{\sqrt{3}\mu_0 C_0 E_C^{1/2} Z U_{3BH}^{1/2}}{2L^{1/2}}. \quad (45)$$

Визначимо на основі виразу (45) зміну кругості польового транзистора від дії тиску

$$\Delta S_H(P) = \frac{\partial S_H}{\partial \mu_0} \Delta \mu_0(P) + \frac{\partial S_H}{\partial C_0} \Delta C_0(P) + \frac{\partial S_H}{\partial E_C} \Delta E_C(P) + \frac{\partial S_H}{\partial Z} \Delta Z(P) + \frac{\partial S_H}{\partial L} \Delta L(P) + \frac{\partial S_H}{\partial U_{3BH}} \Delta U_{3BH}(P). \quad (46)$$

Складові виразу (46) мають вигляд

$$\frac{\partial S_H}{\partial \mu_0} \Delta \mu_0(P) = \frac{\sqrt{3}C_0 E_C^{1/2} Z U_{3BH}^{1/2}}{2L^{1/2}} \Delta \mu_0(P), \quad (47)$$

$$\frac{\partial S_H}{\partial C_0} \Delta C_0(P) = \frac{\sqrt{3}\mu_0 E_C^{1/2} Z U_{3BH}^{1/2}}{2L^{1/2}} \Delta C_0(P), \quad (48)$$

$$\frac{\partial S_H}{\partial E_C} \Delta E_C(P) = \frac{\sqrt{3}\mu_0 C_0 Z U_{3BH}^{1/2}}{4E_C^{1/2} L^{1/2}} \Delta E_C(P), \quad (49)$$

$$\frac{\partial S_H}{\partial Z} \Delta Z(P) = \frac{\sqrt{3}\mu_0 C_0 E_C^{1/2} U_{3BH}^{1/2}}{2L^{1/2}} \Delta Z(P), \quad (50)$$

$$\frac{\partial S_H}{\partial L} \Delta L(P) = -\frac{\sqrt{3}\mu_0 C_0 E_C^{1/2} Z U_{3BH}^{1/2}}{4L^{3/2}} \Delta L(P), \quad (51)$$

$$\frac{\partial S_H}{\partial U_{3BH}} \Delta U_{3BH}(P) = \frac{\sqrt{3}\mu_0 C_0 E_C^{1/2}}{2L^{1/2} U_{3BH}^{1/2}} \Delta U_{3BH}(P), \quad (52)$$

Оскільки порогова напруга U_{nop} суттєво впливає на параметри польового транзистора, то необхідно визначити її залежність від дії тиску. З врахуванням існування зарядів в діелектричному шарі окислу і різниці робіт виходу електронів із металу і напівпровідника U_{nop} описується виразом [11]

$$U_{nop} = U_{FP} + 2\Psi_p + \sqrt{2\varepsilon_s q N_a (2\Psi_p + U_{PB})} / C_0, \quad (53)$$

де Ψ_p – поверхневий потенціал у режимі сильної інверсії; U_{FP} – напруга зсуву плоских зон МДН-структури; N_a – концентрація домішкових акцепторних атомів у напівпровідниковій підкладці; ε_s – діелектрична стала напівпровідникової підкладки; U_{PB} – напруга зворотного зміщення підкладки; C_0 – ємність підзатворного діелектрика на одиницю площі. Залежність порогової напруги польового транзистора від дії тиску має вигляд

$$\Delta U_{nop}(P) = \frac{\partial U_{nop}(P)}{\partial U_{FP}} \Delta U_{FP}(P) + \frac{\partial U_{nop}(P)}{\partial \Psi_p} \Delta \Psi_p(P) + \frac{\partial U_{nop}(P)}{\partial \varepsilon_s} \Delta \varepsilon_s(P) + \frac{\partial U_{nop}(P)}{\partial N_a} \Delta N_a(P) + \frac{\partial U_{nop}(P)}{\partial C_0} \Delta C_0(P). \quad (54)$$

Складові виразу (54) описуються рівняннями

$$\frac{\partial U_{nop}(P)}{\partial U_{FP}} \Delta U_{FP}(P) = \Delta U_{FP}(P), \quad (55)$$

$$\frac{\partial U_{nop}(P)}{\partial \Psi_p} \Delta \Psi_p(P) = \left[2 + \frac{(2\varepsilon_s q N_a)^{1/2}}{2C_0 (2\Psi_p + U_{PB})^{1/2}} \right] \Delta \Psi_p(P), \quad (56)$$

$$\frac{\partial U_{nop}(P)}{\partial \varepsilon_s} \Delta \varepsilon_s(P) = \frac{[2qN_a(2\Psi_p + U_{пв})]^{1/2}}{2\varepsilon_s^{1/2}C_0} \Delta \varepsilon_s(P), \quad (57)$$

$$\frac{\partial U_{nop}(P)}{\partial N_a} \Delta N_a(P) = \frac{[2q\varepsilon_s(2\Psi_p + U_{пв})]^{1/2}}{2N_a^{1/2}C_0} \Delta N_a(P), \quad (58)$$

$$\frac{\partial U_{nop}(P)}{\partial C_0} \Delta C_0(P) = -\frac{[2\varepsilon_s q N_a (2\Psi_p + U_{пв})]^{1/2}}{C_0^2} \Delta C_0(P), \quad (59)$$

Визначимо залежність напруги відсічки U_{CBH} , при якій наступає режим насичення, тобто $U_{CB} > U_{CBH}$, коли діє тиск на польовий транзистор. В цьому випадку напруга відсічки має вигляд [12]

$$U_{CBH} = U_{3B} - 2\Psi_p + \varepsilon_s q N_a / C_0^2 \left(\sqrt{1 + \frac{2U_{3B} C_0^2}{\varepsilon_s q N_a}} \right). \quad (60)$$

Загальний вираз залежності напруги відсічки U_{CBH} від дії тиску описується формулою

$$\Delta U_{CBH}(P) = \frac{\partial U_{CBH}(P)}{\partial U_{3B}} \Delta U_{3B}(P) + \frac{\partial U_{CBH}(P)}{\partial \Psi_p} \Delta \Psi_p(P) + \frac{\partial U_{CBH}(P)}{\partial \varepsilon_s} \Delta \varepsilon_s(P) + \frac{\partial U_{CBH}(P)}{\partial N_a} \Delta N_a(P) + \frac{\partial U_{CBH}(P)}{\partial C_0} \Delta C_0(P). \quad (61)$$

Складові формули (61) описуються виразами

$$\frac{\partial U_{CBH}(P)}{\partial U_{3B}} \Delta U_{3B}(P) = \Delta U_{3B}(P), \quad (62)$$

$$\frac{\partial U_{CBH}(P)}{\partial \Psi_p} \Delta \Psi_p(P) = -2\Delta \Psi_p(P), \quad (63)$$

$$\frac{\partial U_{CBH}(P)}{\partial \varepsilon_s} \Delta \varepsilon_s(P) = \left\{ \left[1 - \sqrt{1 + \frac{2U_{3B} C_0^2}{\varepsilon_s q N_a}} \right] \frac{q N_a}{C_0^2} - \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_s q N_a}{C_0^2} \left(1 + \frac{2U_{3B} C_0^2}{\varepsilon_s q N_a} \right)^{-1/2} \times \left(\frac{2U_{3B} C_0^2}{\varepsilon_s q N_a} \right) \right\} \Delta \varepsilon_s(P), \quad (64)$$

$$\frac{\partial U_{CBH}(P)}{\partial N_a} \Delta N_a(P) = \left\{ \left[1 - \sqrt{1 + \frac{2U_{3B} C_0^2}{\varepsilon_s q N_a}} \right] \frac{q \varepsilon_s}{C_0^2} - \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_s q N_a}{C_0^2} \left(1 + \frac{2U_{3B} C_0^2}{\varepsilon_s q N_a} \right)^{-1/2} \times \left(\frac{2U_{3B} C_0^2}{\varepsilon_s q N_a} \right) \right\} \Delta N_a(P), \quad (65)$$

$$\frac{\partial U_{CBH}(P)}{\partial C_0} \Delta C_0(P) = \left\{ - \left[1 - \sqrt{1 + \frac{2U_{3B} C_0^2}{\varepsilon_s q N_a}} \right] \frac{2q \varepsilon_s N_a}{C_0^3} + \frac{\varepsilon_s q N_a}{C_0^2} \left(1 + \frac{2U_{3B} C_0^2}{\varepsilon_s q N_a} \right)^{-1/2} \times \left(\frac{4U_{3B} C_0}{\varepsilon_s q N_a} \right) \right\} \Delta C_0(P). \quad (66)$$

Перейдемо до розгляду залежності від дії тиску наступних елементів еквівалентної схеми польового транзистора з ізольованим затвором (рис. 1). Опір R_{3B} являє собою опір витoku ємності C_{3B} , яка визначається ємністю підзатворного діелектрика на ділянці затвор-витік. У загальному вигляді опір R_{3B} визначається законом Ома

$$R_{3B} = \frac{U_{3B}}{I_{3B}}, \quad (67)$$

де I_{3B} – струм витoku діелектрика на ділянці затвор-витік польового транзистора; U_{3B} – напруга затвор-витік. Залежність опору R_{3B} від тиску описується формулою

$$\Delta R_{3B}(P) = \frac{\partial R_{3B}}{\partial U_{3B}} \Delta U_{3B}(P) + \frac{\partial R_{3B}}{\partial I_{3B}} \Delta I_{3B}(P). \quad (68)$$

Складові виразу (68) мають вигляд

$$\frac{\partial R_{3B}}{\partial U_{3B}} \Delta U_{3B}(P) = \frac{1}{I_{3B}} \Delta U_{3B}(P). \quad (69)$$

$$\frac{\partial R_{3B}}{\partial I_{3B}} \Delta I_{3B}(P) = -\frac{U_{3B}}{I_{3B}^2} \Delta I_{3B}(P). \quad (70)$$

Визначимо залежність ємності C_{3C} від дії тиску. Її величина визначається товщиною підзатворного діелектрика на відстані від витoku до стоку і описується виразом [11]

$$C_{3C} = A \frac{\varepsilon_i \varepsilon_0}{d_i}, \quad (71)$$

де ε_i – діелектрична стала підзатворного діелектрика; A – площа омичних електродів підзатворного діелектрика; d_i – товщина підзатворного діелектрика польового транзистора. Загальна формула приросту ємності C_{3C} польового транзистора від дії тиску має вигляд

$$\Delta C_{3C}(P) = \frac{\partial C_{3C}}{\partial A} \Delta A(P) + \frac{\partial C_{3C}}{\partial \varepsilon_i} \Delta \varepsilon_i(P) + \frac{\partial C_{3C}}{\partial \varepsilon_0} \Delta \varepsilon_0(P) + \frac{\partial C_{3C}}{\partial d_i} \Delta d_i(P). \quad (72)$$

Складові виразу (72) описуються рівняннями

$$\frac{\partial C_{3C}}{\partial A} \Delta A(P) = \frac{\varepsilon_i \varepsilon_0}{d_i} \Delta A(P), \quad (73)$$

$$\frac{\partial C_{3C}}{\partial \varepsilon_i} \Delta \varepsilon_i(P) = A \frac{\varepsilon_0}{d_i} \Delta \varepsilon_i(P), \quad (74)$$

$$\frac{\partial C_{3C}}{\partial \varepsilon_0} \Delta \varepsilon_0(P) = A \frac{\varepsilon_i}{d_i} \Delta \varepsilon_0(P), \quad (75)$$

$$\frac{\partial C_{3C}}{\partial d_i} \Delta d_i(P) = -A \frac{\varepsilon_i \varepsilon_0}{d_i^2} \Delta d_i(P), \quad (76)$$

Залежність ємності C_{3B} польового транзистора від дії тиску визначається виразами (72–76), в яких замість площі A необхідно підставити площу A_1 , яка відповідає площі омичних електродів підзатворного діелектрика затвор-витік. Ємність C_{CB} складається з ємності підзатворного діелектрика стік-витік і ємності зворотно зміщеного р-п переходу стік-підкладка, які підключено паралельно. Залежність частини ємності C_{CB} , яка залежить від підзатворного діелектрика стік-витік, також визначається при дії тиску за формулами (72–76) з врахуванням величини її площі A_2 . Ємність стокового р-п переходу в закритому режимі описується зарядною ємністю, яка залежить від дії тиску.

Визначивши деформаційні прирости елементів еквівалентної схеми польового транзистора з індукованим каналом, можна розрахувати і експериментально перевірити залежності активної і реактивної складових вихідного опору від тиску, тобто дослідити тензореактивний ефект. На рис. 3 представлено теоретичні та експериментальні залежності активної складової повного вихідного опору польового тензотранзистора від тиску, а на рис. 4 представлено теоретичні та експериментальні залежності реактивної складової від тиску. Розрахунки активної та реактивної складових повного опору МДН-тензотранзистора від дії тиску проводилися за допомогою пакету прикладних програм "Matlab 9.3" [13], необхідні значення параметрів нелінійної еквівалентної схеми для теоретичних розрахунків були отримані з робіт [14–17].

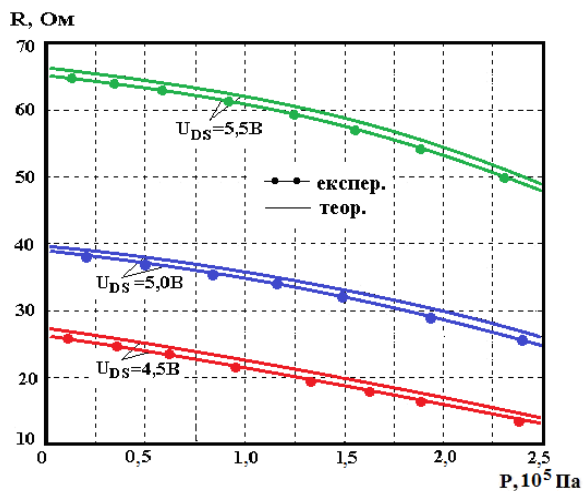


Рис. 3. Теоретичні та експериментальні залежності активної складової повного опору МДН-тензотранзистора від тиску

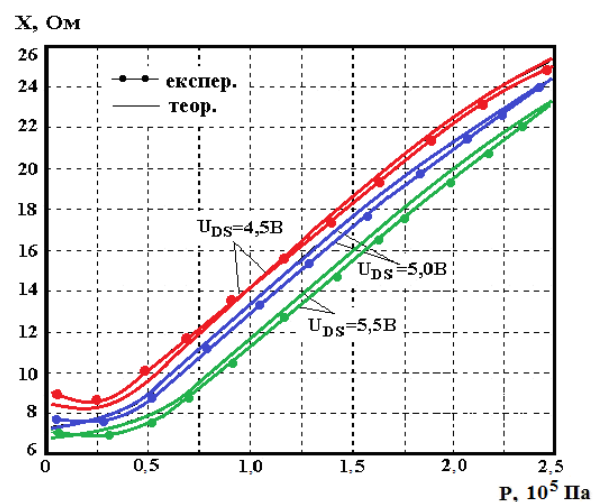


Рис. 4. Теоретичні та експериментальні залежності реактивної складової повного опору МДН-тензотранзистора від тиску

Як видно з графіків представлених на рис. 3 і рис. 4, зміна активної складової повного опору МДН-тензотранзистора від дії тиску складає $8,86 \text{ Ом}/10^5 \text{ Па}$, а реактивної складової $8,52 \text{ Ом}/10^5 \text{ Па}$ в діапазоні тисків від $0,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$ до $2,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$, що показує досить значну зміну і доводить можливість їхнього використання в первинних перетворювачах тиску з частотним вихідним сигналом.

Висновки

Розроблено математичну модель тензореактивного ефекту в польових транзисторах, які відрізняються від існуючих тим, що в них враховано вплив тиску на активну і реактивну складові повного опору, які визначають залежність частоти генерації радіовимірювальних частотних перетворювачів від дії тиску. Теоретичні та експериментальні дослідження тензочутливих польових транзисторів показали, що активна складова повного опору польового транзистора змінюється на $8,86 \text{ Ом}/10^5 \text{ Па}$, а реактивна складова змінюється на $8,52 \text{ Ом}/10^5 \text{ Па}$ в діапазоні тисків від $0,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$ до $2,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$, що є достатньо суттєвим для використання польових транзисторів як первинних тензочутливих елементів в радіовимірювальних частотних перетворювачах тиску. В результаті математичного моделювання отримано аналітичні вирази, які можна використати для інженерного розрахунку функції перетворення, рівняння чутливості радіовимірювальних частотних перетворювачів тиску на

Література

1. Готра З. Ю. Мікроелектронні сенсори фізичних величин : в 3 т. Т. 2 / Готра З. Ю. – Львів : Ліга-Прес, 2003. – 367 с.
2. Schaumburg H. Sensoren. Stuttgart: Teubner, 1992. 517 p.
3. Джексон Р. Г. Новейшие датчики / Джексон Р. Г. – Москва : Техносфера, 2007. – 384 с.
4. Шарапов В. М. Датчики : справочное пособие / Шарапов В. М., Полищук Е. С. – Москва : Техносфера, 2012. – 624 с.
5. Осадчук В. С. Реактивные свойства транзисторов и транзисторных схем / Осадчук В. С., Осадчук А. В. – Винница : «Универсум-Винница», 1999. – 275 с.
6. Богуш М. В. Проектирование пьезоэлектрических датчиков на основе пространственных электротермоупругих моделей / Богуш М. В. – Москва : Техносфера, 2014. – 324 с.
7. Осадчук В.С. Мікроелектронний перетворювач тиску з частотним виходом на основі тунельно-резонансного діода / В.С. Осадчук, О.В. Осадчук, Я.О. Осадчук // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2015. – № 1 (221). – С. 97–101.
8. Khutorenko, S., Osadchuk, O., Osadchuk, I., Vasilchuk, D., Semenets, D., and Lukin, V. (2017) Mathematical model of piezoelectric oscillating system with electrodes of variable nonlinear and constant linear air gap, Telecommunications and Radio Engineering, 76(18), P. 1639–1648.
9. Alexander V. Osadchuk; Vladimir S. Osadchuk; Iaroslav A. Osadchuk; Olena O. Seletska; Piotr Kisała; Karlygash Nurseitova. Theory of photoreactive effect in bipolar and MOSFET transistors. Proceedings Volume 11176, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2019; 111761I. URL: <https://doi.org/10.1117/12.2538264>
10. Осадчук О.В. Деформаційні ефекти у напівпровідникових структурах / О.В. Осадчук, Я.О. Осадчук // Вісник Хмельницького національного університету. – 2014. – № 2 (211). – С. 146–150.
11. Викулин И.М. Физика полупроводниковых приборов / Викулин И.М., Стафеев В.И. – Москва : Радио и связь, 1990. – 264 с.
12. Sze S. M., Kwok K. Ng. Physics of Semiconductor Devices. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. 2007. 763 p.
13. Дьяконов В. П. MATLAB. Полный самоучитель / Дьяконов В. П. – М. : ДМК Пресс, 2012. – 768 с.
14. User's Guide includes PSpice A/D, PSpice A/D Basics, and PSpice. Cadence Design Systems, Inc. All rights reserved, 2016. 898 p.
15. Разевиг В.Д. Применение программ P-CAD и Pspice для схемотехнического моделирования на ПЭВМ. Выпуск 2. Модели компонент аналоговых устройств / В.Д. Разевиг. – М. : Радио и связь, 1992. – 64 с.
16. Тугов Н.М. Полупроводниковые приборы / Тугов Н.М., Глебов Б.А., Чарыков Н.А. – Москва : Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.
17. Антипенский Р.В. Схемотехническое проектирование и моделирование радиоэлектронных устройств / Антипенский Р.В., Фадин А.Г. – Москва : Техносфера, 2007. – 128 с.

References

1. Gotra Z.Y. Microelectronic sensors of physical quantities. In 3 volumes. Lviv: League-Press, 2003. Vol.2. 367 p.
2. Schaumburg H. Sensoren. Stuttgart.: Teubner, 1992. 517 p.
3. Jackson R.G. Newest Sensors. Moscow: Technosphere, 2007. 384 p.
4. Sharapov V. M., Polishchuk E. S. Sensors: Reference manual. Moscow: Technosphere, 2012. 624 p.
5. Osadchuk V. S., Osadchuk A. V. Reactive properties of transistors and transistor circuits. Vinnitsa: Universum-Vinnitsa, 1999. 275 p.
6. Bogush M.V. Design of piezoelectric sensors based on spatial electro-thermoelastic models. Moscow: Technosphere, 2014. 324 p.
7. Osadchuk V.S., Osadchuk O.V., Osadchuk I.A. Microelectronic pressure transducer with frequency output based on tunneling resonance diode // Herald of Khmelnytskyi National University. Engineering Sciences, 2015. №1, 2015 (221), P. 97-101.
8. Khutorenko, S., Osadchuk, O., Osadchuk, I., Vasilchuk, D., Semenets, D., and Lukin, V., (2017) Mathematical model of piezoelectric oscillating system with electrodes of variable nonlinear and constant linear air gap, Telecommunications and Radio Engineering, 76(18), P. 1639-1648.
9. Alexander V. Osadchuk; Vladimir S. Osadchuk; Iaroslav A. Osadchuk; Olena O. Seletska; Piotr Kisała; Karlygash Nurseitova. Theory of photoreactive effect in bipolar and MOSFET transistors. Proceedings Volume 11176, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2019; 111761I (2019) URL: <https://doi.org/10.1117/12.2538264>
10. Osadchuk O.V., Osadchuk I.A. Deformation effects in semiconductor structures. Herald of Khmelnytskyi National University, №2 (211), 2014. P.146-150.
11. Vikulin I.M., Stafeev V.I. Physics of semiconductor devices. Moscow: Radio and Communications, 1990. 264 p.
12. Sze S. M., Kwok K. Ng. Physics of Semiconductor Devices. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. 2007. 763 p.
13. Dyakonov V.P. MATLAB. Complete tutorial. M.: DMK Press, 2012. 768 p.
14. User's Guide includes PSpice A/D, PSpice A/D Basics, and PSpice. Cadence Design Systems, Inc. All rights reserved, 2016. 898 p.
15. Razevig V.D. Application of P-CAD and Pspice programs for PC circuit simulation. Issue 2. Models of component analog devices / V.D. Razevig. M.: Radio and Communications, 1992. 64 p.
16. Tugov N.M., Glebov B.A., Charykov N.A. Semiconductor devices. Moscow: Energoatomizdat, 1990. 576 p.
17. Antipensky R.V., Fadin A.G. Circuit Design and Modeling of Radio-Electronic Devices. Moscow: Technosphere, 2007. 128 p.