

ТЕНЗОРЕАКТИВНИЙ ЕФЕКТ В БІПОЛЯРНИХ ТРАНЗИСТОРАХ

В роботі представлено розробку та дослідження елементів теорії тензореактивного ефекту в біполярних 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, які визначають залежність частоти генерації радіовимірювальних частотних перетворювачів від дії тиску. Теоретичні та експериментальні дослідження показали, що активна складова повного опору біполярного транзистора змінюється на $10 \text{ Ом}/10^5 \text{ Па}$, а реактивна складова змінюється на $20 \text{ Ом}/10^5 \text{ Па}$ при зміні тиску на $2 \cdot 10^5 \text{ Па}$, що є достатньо суттєвим для використання біполярних 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 біполярних тензочутливих транзисторів.

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

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

Vinnitsia National Technical University

TENZOREACTIVE EFFECT IN BIPOLAR TRANSISTORS

The paper presents the development and research of elements of the theory of the tenzoreactive effect in pressure-sensitive bipolar transistors. Under the action of pressure on a tenzo-sensitive bipolar transistor, which is formed by bending the membrane by ion implantation, the energy of electrons and holes in the conduction band and in the valence band changes, and this, in turn, leads to a change in all parameters of the bipolar transistor. As a result of the pressure, the impedance at the electrodes of the emitter-collector of the transistor changes, which causes a change in the resonant frequency of the radio measuring frequency pressure transducer. 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, which determine the dependence of the generation frequency of the radio frequency transducers on the effect of pressure. Theoretical and experimental studies have shown that the active component of the impedance of a bipolar transistor changes by $10 \text{ Ohm}/10^5 \text{ Pa}$, and the reactive component changes by $20 \text{ Ohm}/10^5 \text{ Pa}$ when the pressure changes by $2 \cdot 10^5 \text{ Pa}$, which is significant enough to use bipolar transistors as primary strain sensors elements in radiomeasuring frequency pressure transducers. As a result of mathematical modelling, analytical expressions are obtained that can be used for the engineering calculation of the conversion function, the sensitivity equation, and other characteristics of radio frequency measuring pressure transducers based on bipolar tenzo-sensitive transistors.

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

Вступ

Розвиток економіки базується на впровадженні сучасних нанотехнологій в таких галузях, як авіаційна та космічна техніка, машинобудування, металургія, енергетика, хімічна промисловість, ефективність яких значною мірою залежить від якості контролю і автоматизації виробничих процесів [1–3]. Тому важливим завданням сучасного приладобудування та контрольно-вимірювальної техніки є вибір надійних методів вимірювання фізичних величин, зокрема тиску в різних виробництвах, створення вимірювальних приладів необхідної точності, стабільності та швидкодії, а також дослідження впливів на результат вимірювань всієї сукупності факторів, які супроводжують вимірювальний процес [4–6].

На сучасному етапі використання та розробки 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 чутливість і точність вимірювання [7–10].

Розробка радіовимірювальних частотних перетворювачів тиску на основі напівпровідникових структур з від'ємним диференційним опором, в яких біполярний та польовий транзистори виступають як тензочутливі активні елементи, потребує розроблення математичних моделей тензореактивного ефекту в тензочутливих елементах [10]. На основі цих математичних моделей можна визначити залежності активної та реактивної складових повного опору 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

Під час дії тиску на тензочутливий біполярний транзистор, який методом іонної імплантації сформований на згині мембрани, відбувається зміна енергії електронів і дірок в зоні провідності і в валентній зоні, а це, в свою чергу, призводить до зміни усіх параметрів біполярного транзистора. Внаслідок дії тиску змінюється повний опір на електродах емітер-колектор, що викликає зміну резонансної частоти радіовимірювальних частотних перетворювачів тиску. Таким чином, необхідно визначити повний опір на електродах емітер-колектор біполярного транзистора і знайти залежність його складових від зміни тиску. Еквівалентна схема біполярного транзистора $p-n-p$ типу для малих сигналів змінного струму має вигляд [8].

Для спрощення розрахунків перетворимо еквівалентну схему транзистора (рис. 1) на більш зручну схему, зображену на рис. 2.

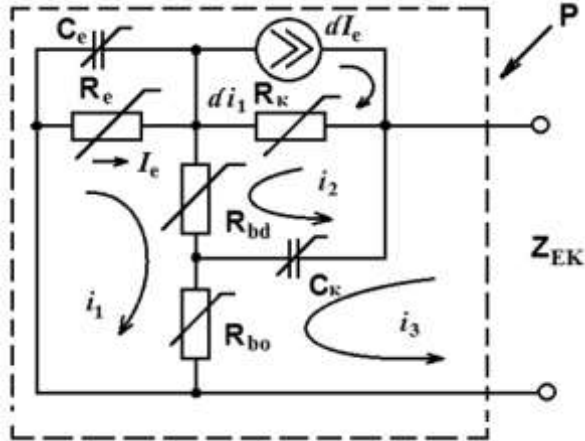


Рис. 1. Еквівалентна схема біполярного транзистора при дії тиску

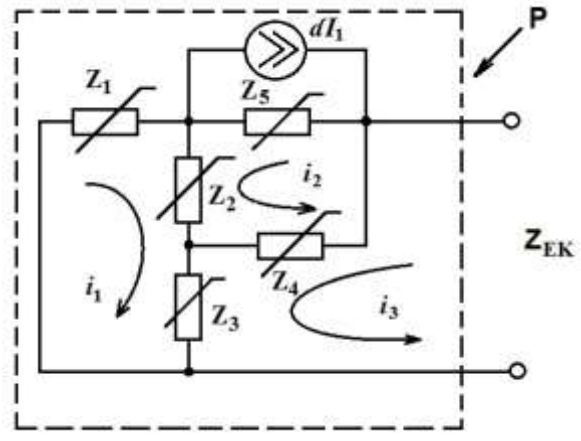


Рис. 2. Перетворена еквівалентна схема біполярного транзистора при дії тиску

На еквівалентній схемі, представлений на рис. 2, повні опори описуються нижче наведеними формулами:

$$Z_1 = \frac{R_e}{1 + (\omega C_e R_e)^2} - j \frac{\omega R_e^2 C_e}{1 + (\omega C_e R_e)^2}; \quad Z_2 = R_{bd}; \quad Z_3 = R_{b0}; \quad Z_4 = -j \frac{1}{\omega C_k}; \quad Z_5 = R_k.$$

Згідно з вибраними напрямкам контурних струмів рівняння Кірхгофа для еквівалентної схеми (див. рис. 2) мають вигляд:

$$\begin{cases} 0 = (Z_1 + Z_2 + Z_3)i_1 + Z_2 i_2 - Z_3 i_3, \\ 0 = (Z_2 + Z_4 + Z_5) \cdot i_2 + Z_2 i_1 - Z_4 i_3 + Z_5 h_{21b} i_1, \\ \dot{U}_{out} = (Z_3 + Z_4) \cdot i_3 + Z_3 i_1 - Z_4 i_2. \end{cases} \quad (1)$$

Із системи рівнянь (1) визначаємо струм i_1 з першого рівняння і підставимо в друге рівняння системи, з якого визначаємо струм i_2 . Підставляючи значення струмів i_1 та i_2 в третє рівняння системи (1), знаходимо аналітичний вираз повного вхідного опору біполярного транзистора Z_{EK} :

$$Z_{EK} = (Z_3 + Z_4) + \left[\frac{\frac{Z_3 Z_2}{(Z_1 + Z_2 + Z_3)(Z_2 + Z_4 + Z_5)} - \frac{Z_4}{Z_2 + Z_4 + Z_5} + \frac{Z_5 Z_3 h_{21b}}{(Z_1 + Z_2 + Z_3)(Z_2 + Z_4 + Z_5)}}{1 - \frac{Z_2^2}{(Z_1 + Z_2 + Z_3)(Z_2 + Z_4 + Z_5)} - \frac{Z_5 Z_3 h_{21b}}{(Z_1 + Z_2 + Z_3)(Z_2 + Z_4 + Z_5)}} \right] \times \frac{Z_2 Z_3}{(Z_1 + Z_2 + Z_3)} - \frac{Z_3^2}{(Z_1 + Z_2 + Z_3)}. \quad (2)$$

Визначивши вихідний опір біполярного транзистора, перейдемо до розрахунків залежності елементів еквівалентної схеми (рис. 1) від дії тиску, що дасть змогу знайти залежність повного вихідного опору від тиску.

Для біполярного транзистора $p-n-p$ типу при дії тиску зміна опору емітерного переходу R_e визначається, виходячи з його виразу [11]

$$R_e = \frac{kT}{qI_e}. \quad (3)$$

Прямий струм емітера біполярного транзистора визначається виразом [12]

$$I_e = \frac{AqD_p p_n}{L_p} e^{\frac{qU_e}{kT}}, \quad (4)$$

де D_p – коефіцієнт дифузії дірок; A – поперкова площа бази транзистора; p_n – концентрація інжектованих дірок у базову область транзистора; U_e – прикладена напруга до емітерного переходу біполярного транзистора; L_p – дифузійна довжина дірок; q – заряд електрона; k – стала Больцмана, T – температура. Підставляючи вираз (4) у вираз (3) з використанням співвідношення Ейнштейна $D_p = \mu_p kT / q$, отримаємо формулу

$$R_e = \frac{L_p}{Aq p_n \mu_p e^{\frac{qU_e}{kT}}}. \quad (5)$$

У зв'язку з тим, що площа перерізу бази біполярного транзистора визначається шириною бази W ,

зміна опору емітерного переходу R_e від дії тиску буде мати вигляд

$$\Delta R_e(P) = \frac{\partial R_e}{\partial W} \Delta W(P) + \frac{\partial R_e}{\partial p_n} \Delta p_n(P) + \frac{\partial R_e}{\partial \mu_p} \Delta \mu_p(P) + \frac{\partial R_e}{\partial U_e} \Delta U_e(P). \quad (6)$$

Складові приросту опору R_e визначаються за формулами

$$\frac{\partial R_e}{\partial W} \Delta W(P) = - \frac{L_p}{W^2 q p_n \mu_p e^{\frac{qU_e}{kT}}} \Delta W(P), \quad (7)$$

$$\frac{\partial R_e}{\partial p_n} \Delta p_n(P) = - \frac{L_p}{A q p_n^2 \mu_p e^{\frac{qU_e}{kT}}} \Delta p_n(P), \quad (8)$$

$$\frac{\partial R_e}{\partial \mu_p} \Delta \mu_p(P) = - \frac{L_p}{A q p_n \mu_p^2 e^{\frac{qU_e}{kT}}} \Delta \mu_p(P), \quad (9)$$

$$\frac{\partial R_e}{\partial U_e} \Delta U_e(P) = - \frac{L_p}{A k T p_n \mu_p e^{\frac{qU_e}{kT}}} \Delta U_e(P), \quad (10)$$

Опір базової області транзистора складається з дифузійного опору R_{bd} , який залежить від концентрації інжектованих дірок, а також омичного опору напівпровідникового матеріалу бази R_{bo} [13]

$$R_b = R_{bd} + R_{bo}. \quad (11)$$

Дифузійний опір базової області R_{bd} описується формулою [11], [13]

$$R_{bd} = \frac{kT}{q I_e (1 - h_{21b})}, \quad (12)$$

де h_{21b} – коефіцієнт передачі струму біполярного транзистора в схемі із загальною базою, який має вигляд [13]

$$h_{21b} = \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{W}{L_p} \right)^2 \right]. \quad (13)$$

При підстановці виразу (13) у вираз (12) отримуємо формулу

$$R_{bd} = \frac{2kTL_p^2}{q I_e W^2} = \frac{2(kT)^2 \tau_p \mu_p}{q^2 I_e W^2}. \quad (14)$$

На підставі вище наведених виразів, зміна дифузійного опору R_{bd} від дії тиску визначається формулою

$$\Delta R_{bd}(P) = \frac{\partial R_{bd}}{\partial I_e} \Delta I_e(P) + \frac{\partial R_{bd}}{\partial \mu_p} \Delta \mu_p(P) + \frac{\partial R_{bd}}{\partial W} \Delta W(P). \quad (15)$$

Складові виразу (15) мають вигляд

$$\frac{\partial R_{bd}}{\partial I_e} \Delta I_e(P) = - \frac{2(kT)^2 \tau_p \mu_p}{q^2 I_e^2 W^2} \Delta I_e(P), \quad (16)$$

$$\frac{\partial R_{bd}}{\partial \mu_p} \Delta \mu_p(P) = - \frac{2(kT)^2 \tau_p}{q^2 I_e W^2} \Delta \mu_p(P), \quad (17)$$

$$\frac{\partial R_{bd}}{\partial W} \Delta W(P) = - \frac{4(kT)^2 \tau_p \mu_p}{q^2 W^3 I_e^2} \Delta W(P), \quad (18)$$

Опір пасивної області бази описується виразом [13]

$$R_{bo} = \rho \left[\frac{1}{2W} + \frac{l}{aW_1} \right], \quad (19)$$

де W – активна ширина бази транзистора; l – відстань між емітерним і базовим контактами біполярного транзистора; a – ширина емітерної області транзистора; W_1 – пасивна ширина бази; ρ – питомий опір напівпровідникового матеріалу бази транзистора. Приріст опору пасивної області бази транзистора при дії тиску визначається формулою

$$\Delta R_{bo}(P) = \frac{\partial R_{bo}}{\partial \rho} \Delta \rho(P) + \frac{\partial R_{bo}}{\partial W} \Delta W(P) + \frac{\partial R_{bo}}{\partial W_1} \Delta W_1(P). \quad (20)$$

Складові виразу (20) мають вигляд

$$\frac{\partial R_{bo}}{\partial \rho} \Delta \rho(P) = \frac{1}{W} \Delta \rho(P) + \frac{l}{aW_1} \Delta \rho(P), \quad (21)$$

$$\frac{\partial R_{bo}}{\partial W} W(P) = -\frac{\rho}{2W^2} \Delta W(P), \quad (22)$$

$$\frac{\partial R_{bo}}{\partial W_1} W_1(P) = -\frac{\rho l}{2W_1^2} \Delta W_1(P), \quad (23)$$

Опір колекторного переходу біполярного транзистора визначається виразом [14]

$$R_k = \frac{WU_k}{d_k I_e (1 - h_{21b})}, \quad (24)$$

де U_k – зворотна напруга на колекторному переході транзистора; d_k – товщина шару об'ємного заряду колекторного переходу, яка дорівнює [14]

$$d_k = \left[\frac{2\varepsilon\varepsilon_0 U_k}{qN_d} \right]^{1/2}, \quad (25)$$

де ε – діелектрична стала напівпровідника; ε_0 – діелектрична стала вакууму; N_d – концентрація домішкових донорних атомів базової області біполярного транзистора. При підстановці виразів (13) і (25) у вираз (24) отримуємо формулу для опору колекторного переходу біполярного транзистора

$$R_k = \frac{\sqrt{2}U_k^{1/2} (qN_d)^{1/2} \mu_p kT \tau_p}{q(\varepsilon\varepsilon_0)^{1/2} I_e W}. \quad (26)$$

Приріст опору колектора R_k від дії тиску згідно (26) приймає вигляд

$$\Delta R_k(P) = \frac{\partial R_k}{\partial U_k} \Delta U_k(P) + \frac{\partial R_k}{\partial N_d} \Delta N_d(P) + \frac{\partial R_k}{\partial \mu_p} \Delta \mu_p(P) + \frac{\partial R_k}{\partial T} \Delta T(P) + \frac{\partial R_k}{\partial I_e} \Delta I_e(P) + \frac{\partial R_k}{\partial \varepsilon} \Delta \varepsilon(P) + \frac{\partial R_k}{\partial W} \Delta W(P) + \frac{\partial R_k}{\partial \tau_p} \Delta \tau_p(P). \quad (27)$$

Складові виразу (27) описуються формулами

$$\frac{\partial R_k}{\partial U_k} \Delta U_k(P) = \frac{\sqrt{2}(qN_d)^{1/2} \mu_p \tau_p \frac{kT}{q}}{2U_k^{1/2} I_e (\varepsilon\varepsilon_0)^{1/2} W} \Delta U_k(P), \quad (28)$$

$$\frac{\partial R_k}{\partial N_d} \Delta N_d(P) = \frac{\sqrt{2}q^{1/2} \mu_p \tau_p \frac{kT}{q}}{2N_d^{1/2} I_e (\varepsilon\varepsilon_0)^{1/2} W} \Delta N_d(P), \quad (29)$$

$$\frac{\partial R_k}{\partial \mu_p} \Delta \mu_p(P) = \frac{\sqrt{2}U_k^{1/2} (qN_d)^{1/2} \tau_p \frac{kT}{q}}{I_e (\varepsilon\varepsilon_0)^{1/2} W} \Delta \mu_p(P), \quad (30)$$

$$\frac{\partial R_k}{\partial \tau_p} \Delta \tau_p(P) = \frac{\sqrt{2}U_k^{1/2} (qN_d)^{1/2} \mu_p \frac{kT}{q}}{I_e (\varepsilon\varepsilon_0)^{1/2} W} \Delta \tau_p(P), \quad (31)$$

$$\frac{\partial R_k}{\partial I_e} \Delta I_e(P) = \frac{\sqrt{2}U_k^{1/2} (qN_d)^{1/2} \mu_p \tau_p \frac{kT}{q}}{I_e^2 (\varepsilon\varepsilon_0)^{1/2} W} \Delta I_e(P), \quad (32)$$

$$\frac{\partial R_k}{\partial \varepsilon} \Delta \varepsilon(P) = \frac{\sqrt{2}U_k^{1/2} (qN_d)^{1/2} \mu_p \tau_p \frac{kT}{q}}{2(\varepsilon_0)^{1/2} (\varepsilon)^{3/2} W} \Delta \varepsilon(P), \quad (33)$$

$$\frac{\partial R_k}{\partial W} \Delta W(P) = \frac{\sqrt{2}U_k^{1/2} (qN_d)^{1/2} \mu_p \tau_p \frac{kT}{q}}{(\varepsilon_0\varepsilon)^{1/2} W^2} \Delta W(P), \quad (34)$$

$$\frac{\partial R_k}{\partial T} \Delta T(P) = \frac{\sqrt{2}U_k^{1/2} (qN_d)^{1/2} \mu_p \tau_p \frac{k}{q}}{(\varepsilon_0\varepsilon)^{1/2}} \Delta T(P), \quad (35)$$

Перейдемо до розгляду залежностей ємностей малосигнальної еквівалентної схеми біполярного транзистора від дії тиску. Дифузійна ємність біполярного транзистора описується формулою [14]

$$C_e = \frac{Aq\mu_p p_n \tau_p \frac{qU_e}{kT}}{2W}. \quad (36)$$

Зміна дифузійної ємності C_e від дії тиску описується виразом

$$\Delta C_e(P) = \frac{\partial C_e}{\partial \mu_p} \Delta \mu_p(P) + \frac{\partial C_e}{\partial p_n} \Delta p_n(P) + \frac{\partial C_e}{\partial \tau_p} \Delta \tau_p(P) + \frac{\partial C_e}{\partial U_e} \Delta U_e(P) + \frac{\partial C_e}{\partial T} \Delta T(P) + \frac{\partial C_e}{\partial W} \Delta W(P). \quad (37)$$

Складові виразу (37) мають вигляд

$$\frac{\partial C_e}{\partial \mu_p} \Delta \mu_p(P) = \frac{Aq p_n \tau_p e^{\frac{qU_e}{kT}}}{2W} \Delta \mu_p(P), \quad (38)$$

$$\frac{\partial C_e}{\partial p_n} \Delta p_n(P) = \frac{Aq \mu_p \tau_p e^{\frac{qU_e}{kT}}}{2W} \Delta p_n(P), \quad (39)$$

$$\frac{\partial C_e}{\partial \tau_p} \Delta \tau_p(P) = \frac{Aq \mu_p p_n e^{\frac{qU_e}{kT}}}{2W} \Delta \tau_p(P), \quad (40)$$

$$\frac{\partial C_e}{\partial U_e} \Delta U_e(P) = \frac{Aq^2 \mu_p p_n \tau_p e^{\frac{qU_e}{kT}}}{2WkT} \Delta U_e(P), \quad (41)$$

$$\frac{\partial C_e}{\partial T} \Delta T(P) = -\frac{Aq^2 \mu_p p_n \tau_p e^{\frac{qU_e}{kT}} U_e}{2WkT^2} \Delta T(P), \quad (42)$$

$$\frac{\partial C_e}{\partial W} \Delta W(P) = -\frac{Aq \mu_p p_n \tau_p e^{\frac{qU_e}{kT}}}{2W^2} \Delta W(P). \quad (43)$$

Зарядна ємність колекторного переходу біполярного транзистора описується виразом [15]

$$C_k = A \left[\frac{\varepsilon \varepsilon_0 N_c N_v e^{-\frac{E_g}{kT}}}{2U_k p_n} \right]^{1/2}, \quad (44)$$

де N_v – ефективна щільність квантових станів на стелі валентної зони; N_c – ефективна щільність квантових станів на дні зони провідності; E_g – ширина забороненої зони напівпровідникового матеріалу базової області біполярного транзистора.

Приріст ємності C_k колекторного переходу біполярного транзистора від дії тиску описується виразом

$$\Delta C_k(P) = \frac{\partial C_k}{\partial A} \Delta A(P) + \frac{\partial C_k}{\partial \varepsilon} \Delta \varepsilon(P) + \frac{\partial C_k}{\partial N_c} \Delta N_c(P) + \frac{\partial C_k}{\partial N_v} \Delta N_v(P) + \frac{\partial C_k}{\partial E_g} \Delta E_g(P) + \frac{\partial C_k}{\partial p_n} \Delta p_n(P) + \frac{\partial C_k}{\partial U_k} \Delta U_k(P). \quad (45)$$

Складові виразу (45) мають вигляд

$$\frac{\partial C_k}{\partial A} \Delta A(P) = \left[\frac{\varepsilon \varepsilon_0 N_c N_v e^{-\frac{E_g}{kT}}}{2U_k p_n} \right]^{1/2} \Delta A(P), \quad (46)$$

$$\frac{\partial C_k}{\partial \varepsilon} \Delta \varepsilon(P) = \frac{1}{2\varepsilon^{1/2}} \left[\frac{\varepsilon_0 N_c N_v e^{-\frac{E_g}{kT}}}{2U_k p_n} \right]^{1/2} \Delta \varepsilon(P), \quad (47)$$

$$\frac{\partial C_k}{\partial N_c} \Delta N_c(P) = \frac{1}{2N_c^{1/2}} \left[\frac{\varepsilon \varepsilon_0 N_v e^{-\frac{E_g}{kT}}}{2U_k p_n} \right]^{1/2} \Delta N_c(P), \quad (48)$$

$$\frac{\partial C_k}{\partial N_v} \Delta N_v(P) = \frac{1}{2N_v^{1/2}} \left[\frac{\varepsilon \varepsilon_0 N_c e^{-\frac{E_g}{kT}}}{2U_k p_n} \right]^{1/2} \Delta N_v(P), \quad (49)$$

$$\frac{\partial C_k}{\partial E_g} \Delta E_g(P) = -\frac{1}{2kT} e^{-\frac{E_g}{2kT}} \left[\frac{\varepsilon \varepsilon_0 N_v N_c}{2U_k p_n} \right]^{1/2} \Delta E_g(P), \quad (50)$$

$$\frac{\partial C_k}{\partial p_n} \Delta p_n(P) = -\frac{1}{2p_n^{3/2}} \left[\frac{\varepsilon \varepsilon_0 N_v N_c}{2U_k} \right]^{1/2} \Delta p_n(P), \quad (51)$$

$$\frac{\partial C_k}{\partial U_k} \Delta U_k(P) = -\frac{1}{2U_k^{3/2}} \left[\frac{\varepsilon \varepsilon_0 N_v N_c}{2p_n} \right]^{1/2} \Delta U_k(P). \quad (52)$$

Розглянемо залежність коефіцієнта передачі по струму h_{21b} від дії тиску. Коефіцієнт h_{21b} описується виразом [13–15]

$$h_{21b} = \left[1 - \frac{1}{2} \frac{W^2 q}{\mu_p k T \tau_p} \right]. \quad (53)$$

Приріст коефіцієнта передачі по струму h_{21b} від дії тиску в загальному вигляді описується рівнянням

$$\Delta h_{21b}(P) = \frac{\partial h_{21b}}{\partial W} \Delta W(P) + \frac{\partial h_{21b}}{\partial \mu_p} \Delta \mu_p(P) + \frac{\partial h_{21b}}{\partial T} \Delta T(P) + \frac{\partial h_{21b}}{\partial \tau_p} \Delta \tau_p(P). \quad (54)$$

Складові виразу (54) описуються формулами

$$\frac{\partial h_{21b}}{\partial W} \Delta W(P) = - \frac{Wq}{\mu_p k T \tau_p} \Delta W(P), \quad (55)$$

$$\frac{\partial h_{21b}}{\partial \mu_p} \Delta \mu_p(P) = - \frac{W^2 q}{\mu_p^2 k T \tau_p} \Delta \mu_p(P), \quad (56)$$

$$\frac{\partial h_{21b}}{\partial T} \Delta T(P) = - \frac{W^2 q}{\mu_p k T^2 \tau_p} \Delta T(P), \quad (57)$$

$$\frac{\partial h_{21b}}{\partial \tau_p} \Delta \tau_p(P) = - \frac{W^2 q}{\tau_p^2 k T \mu_p} \Delta \tau_p(P), \quad (58)$$

Отримавши аналітичні вирази для визначення зміни елементів еквівалентної схеми біполярного транзистора від дії тиску (рис. 1) можна розрахувати і експериментально перевірити залежності дійсної і уявної складових повного вихідного опору біполярного транзистора, тобто тензореактивний ефект транзисторів. На рис. 3 і рис. 4 представлені теоретичні та експериментальні залежності складових повного опору біполярного транзистора від дії тиску.

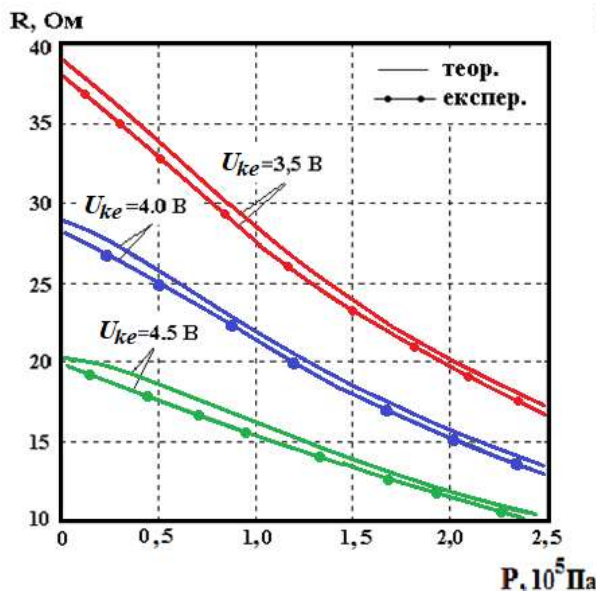


Рис. 3. Теоретичні та експериментальні залежності активної складової повного опору біполярного транзистора від дії тиску

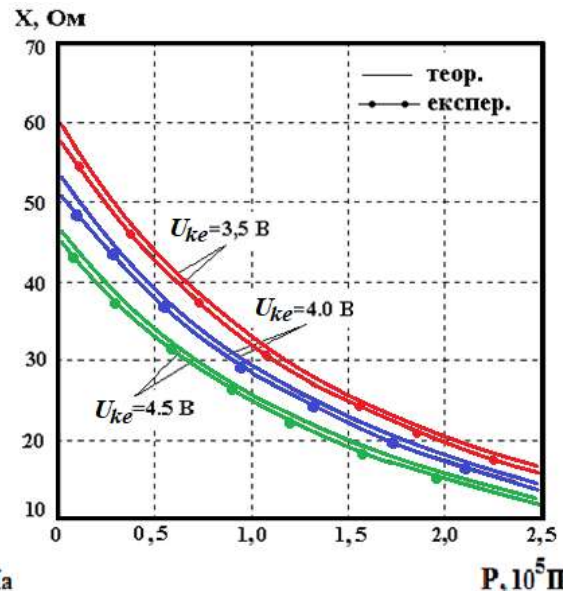


Рис. 4. Теоретичні та експериментальні залежності реактивної складової повного опору біполярного транзистора від дії тиску

Як видно з рис. 3 і рис. 4, активна складова змінюється на $10 \text{ Ом}/10^5 \text{ Па}$, а реактивна на $20 \text{ Ом}/10^5 \text{ Па}$ при зміні тиску на $2 \cdot 10^5 \text{ Па}$, що є достатньо суттєвим для використання біполярних тензотранзисторів як первинних тензочутливих елементів в радіовимірювальних частотних перетворювачах тиску. Необхідні значення параметрів для теоретичних розрахунків було отримано з робіт [13–16], а самі розрахунки проводилися за допомогою пакету прикладних програм "Matlab 9.3" [17].

Висновки

Розроблено математичні моделі тензореактивного ефекту в біполярних 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 показали, що активна складова повного опору біполярного транзистора змінюється на $10 \text{ Ом}/10^5 \text{ Па}$, а реактивна складова змінюється на $20 \text{ Ом}/10^5 \text{ Па}$ при зміні тиску на $2 \cdot 10^5 \text{ Па}$, що є достатньо суттєвим для використання біполярних 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 основі біполярних тензочутливих транзисторів.

Література

1. Джексон Р. Г. Новейшие датчики / Джексон Р. Г. – Москва : Техносфера, 2007. – 384 с.
2. Schaumburg H. Sensoren. Stuttgart: Teubner, 1992. 517 s.
3. Готра З. Ю. Мікроелектронні сенсори фізичних величин : в 3 т. Т. 2 / Готра З. Ю. – Львів : Ліга-Прес, 2003. – 367 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. Богущ М. В. Проектирование пьезоэлектрических датчиков на основе пространственных электротермоупругих моделей / Богущ М. В. – Москва : Техносфера, 2014. – 324 с.
7. Khutornenko, 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), pp. 1639–1648.
8. 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.
9. Osadchuk A. V., Osadchuk V. S., Osadchuk Ia. A., Seletskia O. O., Kisała P., Nurseitova K. 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. <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. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Т. 2 / Зи С. – Москва : Мир, 1984. – 486 с.
13. 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.
14. Тугов Н.М., Глебов Б.А., Чарыков Н.А. Полупроводниковые приборы / Тугов Н.М., Глебов Б.А., Чарыков Н.А. – Москва : Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.
15. Чахмахсаян Е. А., Мозговой Г. П., Силин В. Д. Математическое моделирование биполярных элементов электронных схем / Чахмахсаян Е. А., Мозговой Г. П., Силин В. Д. – Москва : Радио и связь, 1985. – 142 с.
16. User's Guide includes PSpice A/D, PSpice A/D Basics, and PSpice. Cadence Design Systems, Inc. All rights reserved, 2016. 898 p.
17. Дьяконов В. П. MATLAB. Полный самоучитель / Дьяконов В. П. – М. : ДМК Пресс, 2012. – 768 с.

References

1. Jackson R.G. Newest Sensors. Moscow: Technosphere, 2007. 384 p.
2. Schaumburg H. Sensoren. Stuttgart.: Teubner, 1992. 517 s.
3. Gothra Z.Y. Microelectronic sensors of physical quantities. In 3 volumes. Lviv: League-Press, 2003. Vol.2. 367 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. Khutornenko 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), pp. 1639-1648.
8. Osadchuk V.S., Osadchuk O.V., Osadchuk I.A. Microelectronic pressure transducer with frequency output based on tunneling resonance diode // Herald of the Khmelnytsky National University. Technical Sciences, 2015. № 1 (221), p. 97-101.
9. Alexander V. Osadchuk; Vladimir S. Osadchuk; Iaroslav A. Osadchuk; Olena O. Seletskia; 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) <https://doi.org/10.1117/12.2538264>
10. Osadchuk O.V., Osadchuk I.A. Deformation effects in semiconductor structures // Herald of the Khmelnytsky National University. Technical Sciences. № 2 (211), 2014. P. 146-150.
11. Vikulin I.M., Stafeyev V.I. Physics of semiconductor devices. Moscow: Radio and Communications, 1990. 264 p.
12. Zi S. Physics of semiconductor devices. Moscow: World, 1984. T. 2. 486 p.
13. Razevig V.D. Application of P-CAD and Pspice programs for PC circuit simulation. Issue 2. Models of component analogue devices / V.D. Razevig. M.: Radio and Communications, 1992. 64 p.
14. Tugov N.M., Glebov B.A., Charykov N.A. Semiconductor devices. Moscow: Energoatomizdat, 1990. 576 p.
15. Chakhmakhsazyan E. A., Mozgovoy G. P., Silin V. D. Mathematical modeling of bipolar elements of electronic circuits. Moscow: Radio and communications, 1985. 142 p.
16. User's Guide includes PSpice A/D, PSpice A/D Basics, and PSpice. Cadence Design Systems, Inc. All rights reserved, 2016. 898 p.
17. Dyakonov V.P. MATLAB. Complete tutorial. M.: DMK Press, 2012. 768 p.

Рецензія/Peer review : 25.1.2020 p.

Надрукована/Printed : 14.2.2020 p.
Рецензент: д.т.н., проф. Семенов А.О.