УДК 621.382

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДЕФОРМАЦІЙНОГО ЕФЕКТУ В МДН-ТРАНЗИСТОРНИХ СТРУКТУРАХ

О.В. Осадчук, Я.О. Осадчук.
Вінницький національний університет.

The paper presents a mathematical model of deformation effects in MOS transistor that is used as an element in tenzosensitive of pressure transducer with a frequency output . On the basis of a mathematical model designed dependence of the threshold voltage, saturation voltage, gate-source voltage of the pressure action. Most dependence of these parameters on the pressure observed at work MOS transistor in saturation at high pressures greater than 10^8 Pa.

Keywords: *deformation effect, frequency sensator, tensor sensible element.*

Вступ

Створення перетворювача тиску з частотним вихідним сигналом, в якому тензочутливим елементом виступає МДН-транзистор [1], потребує розробки його математичної моделі, на основі якої можна визначити функцію перетворення та рівняння чутливості, однак для цього потрібно визначити деформаційні прирости електронних характеристик МДН-транзистора. Вирішенню цієї задачі присвячена дана робота.

Математична модель деформаційного ефекту в МДН-транзисторах

На основі визначених деформаційних приростів електрофізичних параметрів напівпровідникового матеріалу від тиску знаходяться деформаційні прирости електричних параметрів та характеристик МДН-транзистора.

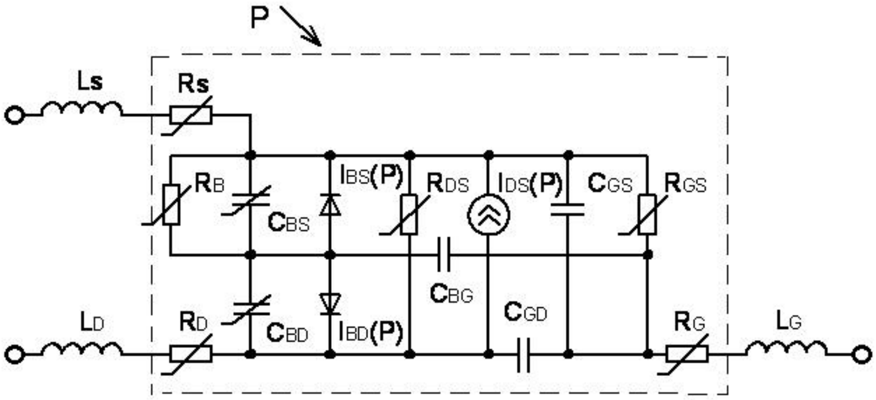

Рис. 1. Еквівалентна схема МДН-транзистора з врахуванням впливу тиску

Деформаційні прирости електричних параметрів $G_i = f\left(F_i\left(P\right)\right)$ еквівалентної схеми МДН-транзистора, зображеної на рис. 1, визначаються на основі загального виразу

$$\Delta G_i(P) = \frac{\partial G_i}{\partial F_i} \Delta F_i(P) , \tag{1}$$

де F_i – електрофізичні параметри напівпровідникового матеріалу, або електричні параметри напівпровідникової структури.

В якості параметрів G_i у виразі (1) виступають наступні елементи еквівалентної схеми МДН-транзистора: R_D – опір стоку, R_S – опір витоку, R_G – опір затвору, R_B – опір підкладки, R_{DS} – опір стік-витік, R_{GS} – опір затвор-витік, $C_{BS} = C_{BD}$ – ємності стік (витік)-підкладка.

Струм переходу підкладка-стік визначається за виразом [2]

$$I_{BD} = I_{DS}\left[\exp\left(\frac{V_{BD}}{V_t}\right) - 1\right], \tag{2}$$

де I_{DS} – струм насичення p-n переходу підкладки; V_{BD} – напруга підкладка-стік; V_t – температурний потенціал.

Струм насичення p-n переходу підкладки I_{DS} має вигляд

$$I_{DS} = A_D J_s + P_D J_{ssw}, \quad (3)$$

де A_D – площа дифузійної області стоку; P_D – периметр дифузійної області стоку; J_s – щільність струму насичення; J_{ssw} – питома щільність струму насичення.

Вираз для щільності струму насичення J_s записується у вигляді [3]:

$$J_s = qZN_{A(D)} / \tau, \quad (4)$$

де q – заряд електрону; Z – дифузійна довжина електронів або дірок; $N_{A(D)}$ – рівноважна концентрація неосновних носіїв заряду в областях; ² – їх час життя.

Дифузійна довжина носіїв заряду може бути визначена з виразу [4]

$$Z^2 = D\tau, \quad (5)$$

де D – коефіцієнт дифузії електронів або дірок

$$D = kT\mu / q. \quad (6)$$

k – константа Больцмана; T – температура; « – рухливість носіїв заряду.

Тоді вирази для щільності струму насичення та питомої щільності струму насичення матимуть вигляд:

$$J_s = N_{A(D)} \left(\frac{qkT\mu}{\tau} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (7)$$

$$J_{ssw} = P_{LD} N_{A(D)} \left(\frac{qkT\mu}{\tau} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (8)$$

де P_{LD} – довжина периметру дифузійної області стоку.

Отже, деформаційний приріст струму стік-витік буде описуватися виразом:

$$\frac{dI_{DS}}{dP} = I_{DS} \left(\frac{\Delta N_{A(D)}(P)}{N_{A(D)}} + \frac{\Delta\mu(P)}{\mu} \right). \quad (9)$$

Тоді деформаційний приріст струму переходу підкладка-стік визначається за виразом:

$$\frac{dI_{BD}}{dP} = I_{BD} \left(\frac{\Delta N_{A(D)}(P)}{N_{A(D)}} + \frac{\Delta\mu(P)}{\mu} \right). \quad (10)$$

Струм переходу підкладка-виток визначається за виразом [3]

$$I_{BS} = I_{SS} \left[\exp\left(\frac{V_{BS}}{V_t} \right) - 1 \right]. \quad (11)$$

де V_{BS} – напруга підкладка-виток; I_{SS} - струм насичення p-n переходу підкладки

$$I_{SS} = A_S J_s + P_S J_{ssw}, \quad (12)$$

A_S – площа дифузійної області витоку, P_S – периметр дифузійної області витоку.

Деформаційний приріст струму переходу підкладка-виток визначається за рівнянням:

$$\frac{dI_{BS}}{dP} = I_{BS} \left(\frac{\Delta N_{A(D)}(P)}{N_{A(D)}} + \frac{\Delta\mu(P)}{\mu} \right). \quad (13)$$

Струм стоку містить дві складові [3] і визначається виразом

$$I_D = I_{drain} - I_{BD}. \quad (14)$$

Отже, деформаційний приріст струму стоку описується виразом

$$\frac{dI_D}{dP} = \frac{dI_{drain}}{dP} - \frac{dI_{BD}}{dP}. \quad (15)$$

Струм витоку також містить дві складові [2]

$$I_S = -I_{drain} - I_{BS}. \tag{16}$$

Тоді, деформаційний приріст струму витоку матиме вигляд

$$\frac{dI_S}{dP} = -\frac{dI_{drain}}{dP} - \frac{dI_{BS}}{dP}. \tag{17}$$

Струм I_{drain} в області відсічки дорівнює 0 ($V_{GS} - V_{to} < 0$), а в лінійній області ($V_{DS} < V_{GS} - V_{to}$) та в області насичення ($0 < V_{GS} - V_{to} < V_{DS}$) описується виразом [5]:

$$I_{drain} = \frac{\beta V_{DS}\left[V_{GS} - V_{to} - 0,5(1+F_b)V_{DS}\right]}{\left[1 + V_{DS}\mu_{eff} \big/ \left(L_{eff}V_{\max}\right)\right]}. \tag{18}$$

Його деформаційний приріст, в свою чергу визначається за загальним виразом

$$\Delta I_{drain}(P) = \frac{\partial I_{drain}}{\partial V_{to}}\Delta V_{to}(P) + \frac{\partial I_{drain}}{\partial F_b}\Delta F_b(P) + \frac{\partial I_{drain}}{\partial V_{GS}}\Delta V_{GS}(P) + \\ + \frac{\partial I_{drain}}{\partial \mu_{eff}}\Delta\mu_{eff}(P) + \frac{\partial I_{drain}}{\partial \beta}\Delta\beta(P) + \frac{\partial I_{drain}}{\partial L_{eff}}\Delta L_{eff}(P), \tag{19}$$

де

$$\frac{\partial I_{drain}}{\partial V_{to}}\Delta V_{to}(P) = -\frac{\beta V_{DS}}{\left[1 + V_{DS}\mu_{eff} \big/ \left(L_{eff}V_{\max}\right)\right]}\Delta V_{to}(P); \tag{20}$$

$$\frac{\partial I_{drain}}{\partial F_b}\Delta F_b(P) = -\frac{0,5\beta V_{DS}{}^2}{\left[1 + V_{DS}\mu_{eff} \big/ \left(L_{eff}V_{\max}\right)\right]}\Delta F_b(P); \tag{21}$$

$$\frac{\partial I_{drain}}{\partial V_{gs}}\Delta V_{GS}(P) = \frac{\beta V_{DS}}{\left[1 + V_{DS}\mu_{eff} \big/ \left(L_{eff}V_{\max}\right)\right]}\Delta V_{GS}(P); \tag{22}$$

$$\frac{\partial I_{drain}}{\partial \mu_{eff}}\Delta\mu_{eff}(P) = -\frac{\beta V_{DS}{}^2 L_{eff}V_{\max}}{\left[1 + V_{DS}\mu_{eff}\right]^2}\Delta\mu_{eff}(P); \tag{23}$$

$$\frac{\partial I_{drain}}{\partial \beta}\Delta\beta(P) = \frac{V_{DS}\left[V_{GS} - V_{to} - 0,5(1+F_b)V_{DS}\right]}{\left[1 + V_{DS}\mu_{eff} \big/ \left(L_{eff}V_{\max}\right)\right]}\Delta\beta(P); \tag{24}$$

$$\frac{\partial I_{drain}}{\partial L_{eff}}\Delta L_{eff}(P) = \frac{«_{eff}V_{DS}{}^2\left[V_{GS} - V_{to} - 0,5(1+F_b)V_{DS}\right]}{L_{eff}{}^2V_{\max}\left[1 + V_{DS}\mu_{eff} \big/ \left(L_{eff}V_{\max}\right)\right]^2}\Delta L_{eff}(P), \tag{25}$$

де – крутизна прохідної характеристики МДН-транзистора; V_{to} – порогова напруга; F_b – параметр; $«_{eff}$ – ефективна рухливість носіїв заряду; L_{eff} – ефективна довжина каналу транзистора; $V_{\max}$ – обмеження швидкості руху носіїв заряду.

Крутизна прохідної характеристики МДН-транзистора β описується виразом [2]:

$$\beta = \frac{0,5K_pW}{L}, \tag{26}$$

де W – ширина каналу МДН-транзистора; L – довжина каналу МДН-транзистора; K_p – крутизна керування по затвору

$$K_p = u_0C_{ox}, \tag{27}$$

u_0 – поверхнева рухливість носіїв заряду; C_{ox} – питома ємність окису

$$C_{ox} = e_{ox}/T_{ox}, \tag{28}$$

e_{ox} – діелектрична проникливість окису; T_{ox} – товщина окису.

Отже:

$$\beta = \frac{0,5u_0 e_{ox} W}{T_{ox} L}. \tag{29}$$

Тоді деформаційний приріст крутизни прохідної характеристики транзистора визначається за виразом:

$$\Delta\beta(P) = \frac{0,5e_{ox} W}{T_{ox} L} \cdot \Delta u_0(P), \tag{30}$$

де $\Delta u_0(P)$ – деформаційний приріст поверхневої рухливості носіїв заряду.

Напруга затвор-витік V_{GS} містить дві складові [5]:

$$V_{GS} = ¤_{GS} + V_{GS0}, \tag{31}$$

де $¤_{GS}$ – контактна різниця потенціалів p-n переходу затвор-витік; V_{GS} – напруга, що подається на затвор від зовнішнього джерела.

Тоді деформаційний приріст напруги V_{GS} буде мати вигляд:

$$\frac{dV_{GS}}{dP} = \frac{d¤_{GS}}{dP}. \tag{32}$$

Оскільки

$$¤_{GS} = V_t \ln \frac{p_p n_n}{n_i^2}, \tag{33}$$

де $V_t = kT/q$ – температурний потенціал, то вираз (32) прийме вигляд:

$$\Delta V_{GS}(P) = ¤_{GS} \left(\frac{\Delta p_p(P)}{p_p} + \frac{\Delta n_n(P)}{n_n} - \frac{2\Delta n_i(P)}{n_i} \right). \tag{34}$$

Величина порогової напруги V_{to} визначається виразом [2]:

$$V_{to} = V_{to0} - ¢V_{DS} + ¥F_s \left(¤ - V_{BS} \right)^{1/2} + F_n \left(¤ - V_{BS} \right) + V_t x_N, \tag{35}$$

де V_{to0} – порогова напруга при нульовому зміщенні; ¢ – коефіцієнт статичного зворотного зв’язку; V_{DS} – напруга між стоком та витоком; ¥ – коефіцієнт впливу підкладки на порогову напругу; F_s – коефіцієнт, який враховує вплив геометрії приладу на вкорочення каналу; ¨ – контактна різниця потенціалів переходу діелектрик-напівпровідник; V_{BS} – напруга підкладка-стік; F_n – коефіцієнт, який враховує вплив ширини каналу на порогову напругу; x_N – коефіцієнт, який визначає температурну залежність напруги порогу.

Порогова напруга при нульовому зміщенні визначається за виразом [3]:

$$V_{to0} = V_{bi} \pm ¥¤^{1/2}, \tag{36}$$

де знак “+” відповідає підкладці n-типу, а знак “-” відповідає підкладці p-типу; V_{Bi} – ширина забороненої зони підкладки

$$V_{bi} = W_s - 10^4 qN_{ss} / C_{ox}, \tag{37}$$

де N_{ss} – ефективна щільність заряду; W_s – ширина забороненої зони неметалічного окису

$$W_s = W_g - \left(F_p + 0,5E_g + 3,25 \right), \tag{38}$$

де $W_s = 3,2B$ для металічного затвору, $W_s = 3,25 + E_g$ для кремнієвих затворів з матеріалом, ідентичним до матеріалу підкладки, $W_s = 3,25B$ – відповідно з матеріалом протилежного типу до матеріалу підкладки. $F_p = \pm$¨/2 – нормований рівень Фермі (електростатичний потенціал); E_g – нормована ширина забороненої зони.

Вираз для коефіцієнту статичного зворотного зв’язку ¢, що впливає на порогову напругу [3] має вигляд:

$$¢ = \frac{8{,}15 \cdot 10^{-22} ¦}{C_{ox} L_{eff}{}^{3}}, \tag{39}$$

де L_{eff} – ефективна ширина каналу; ¦ – коефіцієнт впливу ширини каналу

$$¦ = 1 + \frac{0{,}25 ® d e_{sil} T_{ox}}{e_{ox} W}, \tag{40}$$

де d – коефіцієнт впливу ширини каналу на порогову напругу; e_{sil} – діелектрична проникливість кремнію; W – ширина каналу.

Коефіцієнт впливу підкладки на порогову напругу ¥ описується виразом [3]:

$$¥ = \frac{\left(2 \cdot 10^{6} e_{sil} q N_{sub}\right)^{\frac{1}{2}}}{C_{ox}}, \tag{41}$$

де N_{sub} – рівень легування підкладки.

Контактна різниця потенціалу переходу діелектрик-напівпровідник визначається за виразом [4]:

$$¤ = 2V_t \ln\left(\frac{10^{4} N_{ss}}{n_i}\right), \tag{42}$$

де N_{ss} – ефективна щільність заряду; n_i – рівноважна концентрація носіїв заряду в напівпровіднику.

Коефіцієнт F_n, який враховує вплив ширини каналу на порогову напругу [2] описується виразом:

$$F_n = \frac{® d e_{sil}}{2 C_{ox} W}. \tag{43}$$

Коефіцієнт x_N, що описує температурну залежність напруги порогу, визначається за виразом [3]:

$$x_N = 1 + \frac{10^{4} q N_{fs}}{C_{ox}} + \frac{¥ F_s \left(¤ - V_{BS}\right)^{1/2} + F_n \left(¤ - V_{BS}\right)}{2\left(¤ - V_{BS}\right)}, \tag{44}$$

де N_{fs} – ефективна щільність швидких поверхневих станів.

З врахуванням рівняння (35) деформаційний приріст порогової напруги V_{to} описується виразом:

$$\Delta V_{to}(P) = \frac{\partial V_{to}}{\partial E_g} \Delta E_g(P) + \frac{\partial V_{to}}{\partial F_p} \Delta F_p(P) + \frac{\partial V_{to}}{\partial N_{sub}} \Delta N_{sub}(P) + \frac{\partial V_{to}}{\partial e_{sil}} \Delta e_{sil}(P) + \frac{\partial V_{to}}{\partial n_i} \Delta n_i(P) + \frac{\partial V_{to}}{\partial N_{ss}} \Delta N_{ss}(P), \tag{45}$$

де складові деформаційного приросту порогової напруги мають вигляд:

$$\frac{\partial V_{to}}{\partial E_g} \Delta E_g(P) = -\frac{1}{2} \Delta E_g(P); \tag{46}$$

$$\frac{\partial V_{to}}{\partial F_p} \Delta F_p(P) = -\Delta F_p(P); \tag{47}$$

$$\frac{\partial V_{to}}{\partial N_{sub}} \Delta N_{sub} = \frac{¥}{2 N_{sub}} \left[F_s \left(¤ - V_{BS}\right)^{1/2} \left(1 + \frac{V_t}{2\left(¤ - V_{BS}\right)}\right) \pm ¤^{1/2} \right] \Delta N_{sub}(P); \tag{48}$$

$$\frac{\partial V_{to}}{\partial n_i} \Delta n_i(P) = -\frac{V_t}{n_i} \left(\frac{¥ F_s}{\left(¤ - V_{BS}\right)^{1/2}} + 2F_n \pm \frac{¥}{¤^{1/2}} - \frac{¥ F_s V_t}{2\left(¤ - V_{BS}\right)^{3/2}} \right) \Delta n_i(P); \tag{49}$$

$$\frac{\partial V_{to}}{\partial e_{sil}}\Delta e_{sil}(P)=\frac{1}{e_{sil}}\left(\frac{¥F_s}{2(¨-V_{BS})^{1/2}}-\frac{¢(¦-e_{sil})}{¦}+F_n(¨-V_{BS})+\frac{V_t}{2}\left(\frac{¥F_sV_t}{2(¨-V_{BS})}+F_n\right)\right)\Delta e_{sil}(P)\cdot \quad (50)$$

$$\frac{\partial V_{to}}{\partial N_{ss}}\Delta N_{ss}=\left(\frac{V_t}{N_{ss}}\left[\begin{array}{l}\dfrac{¥F_s}{(¤-V_{BS})^{1/2}}\pm\dfrac{¥}{¤^{1/2}}+2F_n+\dfrac{V_t}{(¤-V_{BS})^2}\times\\ \times\left[\begin{array}{l}\left(\dfrac{¥F_s}{2(¤-V_{BS})^{1/2}}+F_n\right)(¤-V_{BS})-\\ -¥F_s(¤-V_{BS})^{1/2}-F_n(¤-V_{DS})\end{array}\right]\end{array}\right]-\frac{10^4q}{C_{ox}}\right)\Delta N_{ss}(P); \quad (51)$$

Параметр F_b визначається за виразом [2]:

$$F_b=F_n+\frac{\gamma F_s}{2(¤-V_{BS})^{\frac{1}{2}}}, \quad (52)$$

а його деформаційний приріст:

$$\Delta F_b(P)=\frac{\partial F_b}{\partial e_{sil}}\Delta e_{sil}(P)+\frac{\partial F_b}{\partial N_{sub}}\Delta N_{sub}(P)+\frac{\partial F_b}{\partial n_i}\Delta n_i(P)+\frac{\partial F_b}{\partial N_{ss}}\Delta N_{ss}(P)\cdot \quad (53)$$

Складові виразу (53) визначаються наступним чином:

$$\frac{\partial F_b}{\partial e_{sil}}\Delta e_{sil}(P)=\frac{1}{e_{sil}}\left(F_n+\frac{\gamma F_s}{4(¤-V_{BS})^{\frac{1}{2}}}\right)\Delta e_{sil}(P); \quad (54)$$

$$\frac{\partial F_b}{\partial N_{sub}}\Delta N_{sub}(P)=\frac{\gamma F_s}{4N_{sub}(¤_{BS}-V_{BS})^{\frac{1}{2}}}\Delta N_{sub}(P); \quad (55)$$

$$\frac{\partial F_b}{\partial n_i}\Delta n_i(P)=\frac{\gamma F_sV_t}{2n_i(¤-V_{BS})^{\frac{3}{2}}}\Delta n_i(P); \quad (56)$$

$$\frac{\partial F_b}{\partial N_{ss}}\Delta N_{ss}(P)=-\frac{\gamma F_sV_t}{2N_{ss}(¤-V_{BS})^{\frac{3}{2}}}\Delta N_{ss}(P)\cdot \quad (57)$$

Ефективна рухливість носіїв з врахуванням напруженості поля в каналі МДН-транзистору дорівнює [2]:

$$\mu_{eff}=u_0\mu_{fact}, \quad (58)$$

де u_0 – поверхнева рухливість носіїв струму; μ_{fact} – фактична рухливість носіїв

$$\mu_{fact}=\frac{1}{(1+\theta(V_{GS}-V_{to}))}, \quad (59)$$

де ¯ – коефіцієнт модуляції рухливості носіїв струму.

Тоді, з врахуванням (58), вираз для ефективної рухливості носіїв заряду матиме вигляд

$$\mu_{eff}=u_0/(1+\theta(V_{GS}-V_{to})). \quad (60)$$

Деформаційний приріст ефективної рухливості носіїв заряду $\Delta\mu_{eff}(P)$ визначається виразом:

$$\Delta\mu_{eff}(P)=\mu_{eff}\left(\frac{\Delta u_0(P)}{u_0}-\frac{\theta\Delta V_{GS}(P)}{(1+\theta(V_{GS}-V_{to}))}+\frac{\theta\Delta V_{to}(P)}{(1+\theta(V_{GS}-V_{to}))}\right). \quad (61)$$

При $V_{DS} \le V_{DSsat}$ ефективна довжина каналу транзистору L_{eff} має значення $L_{eff} = L$, отже $\Delta L_{eff}(P) = 0$ [2]. При $V_{DS} > V_{DSsat}$ [2]:

$$L_{eff} = L - L_{\Delta}, \tag{62}$$

де L_{Δ} при $L_1 = \sqrt{A + B^2} < 0,5L$ набуває вигляду:

$$L_{\Delta} = x_d \left[A + B^2 \right]^{1/2}, \tag{63}$$

де x_d – нормована глибина збідненого шару (індукованого шару)

$$x_d = \left(\frac{2e_{sil}}{10^6 q N_{sub}} \right)^{1/2}; \qquad A = \text{¡} \left(V_{DS} - V_{DSsat} \right), \tag{64}$$

χ – коефіцієнт насичення поля; V_{DSsat} – напруга насичення;

$$B = 0,5 V_{\max} x_d \left(1 + L V_{\max} \big/ \left(V_{DS} \text{«}_{eff}{}^2 \right) \right). \tag{65}$$

Тоді вираз для L_{eff} набуває вигляду:

$$L_{eff} = L - x_d \left[\text{¡} \left(V_{DS} - V_{DSsat} \right) + 0,25 V_{\max}{}^2 x_d{}^2 \left(1 + L V_{\max} \big/ \left(V_{DS} \text{«}_{eff}{}^2 \right) \right)^2 \right]^{1/2}. \tag{66}$$

Деформаційний приріст параметру L_{eff} матиме вигляд:

$$\Delta L_{eff}(P) = \frac{1}{2} \left[L_{\Delta} + \frac{x_d^2 B^2}{L_{\Delta}} \right] \cdot \left[\frac{\Delta N_{sub}(P)}{N_{sub}} - \frac{\Delta \text{£}_{sil}(P)}{\text{£}_{sil}} \right] + \frac{x_d^2}{2L_{\Delta}} \left[\text{¡} \Delta V_{DSsat}(P) + \frac{x_d L B V_{\max}^2}{V_{ds} \text{«}_{eff}^3} \Delta \text{«}_{eff}(P) \right]. \tag{67}$$

При $L_1 > 0,5L$ величина L_{Δ} дорівнюватиме:

$$L_{\Delta} = L - x_L \left(1 - 0,25 x_L \Big/ x_d \left[A + B^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right), \tag{68}$$

або з врахуванням (64) та (65):

$$L_{\Delta} = L - x_L \left(1 - \frac{0,25 x_L}{x_d \left[\text{¡} \left(V_{DS} - V_{DSsat} \right) + 0,25 V_{\max}{}^2 x_d{}^2 \left(1 + L V_{\max} \big/ \left(V_{DS} \text{«}_{eff}{}^2 \right) \right)^2 \right]} \right). \tag{69}$$

Тоді деформаційний приріст параметру L_{eff} матиме вигляд:

$$\Delta L_{eff}(P) = \frac{x_L^2}{8L_{\Delta}^2} \cdot \left(\left[L_{\Delta} + \frac{x_d^2 B^2}{L_{\Delta}} \right] \cdot \left[\frac{\Delta N_{sub}(P)}{N_{sub}} - \frac{\Delta \text{£}_{sil}(P)}{\text{£}_{sil}} \right] + \frac{x_d^2}{L_{\Delta}} \left[\text{¡} \Delta V_{DSsat}(P) + \frac{x_d L B V_{\max}^2}{V_{DS} \text{«}_{eff}^3} \Delta \text{«}_{eff}(P) \right] \right). \tag{70}$$

Напруга насичення V_{DSsat} [1] визначається за формулою:

$$V_{DSsat} = V_a + V_b - \left(V_a{}^2 + V_b{}^2 \right)^{1/2}, \tag{71}$$

де V_a – параметр, який враховує збільшення напруженості поля в каналі [3]: $V_a = \left(V_{GS} - V_{to}\right) / \left(1 + F_b\right)$; V_b – параметр, який враховує обмеження швидкості руху носіїв заряду V_{max} в каналі [3]: $V_b = L_{eff} V_{\max} / «_{eff}$.

Деформаційний приріст напруги насичення V_{dsat} визначається за виразом:

$$\Delta V_{DSsat}(P) = \frac{\left(V_a \Delta F_b(P) + \Delta V_{to}(P) - \Delta V_{GS}(P)\right)}{\left(1 + F_b\right)} \left(\frac{V_a}{\left(V_a^{\,2} + V_b^{\,2}\right)^{1/2}} - 1 \right) + + V_b \left(\frac{\Delta «_{eff}(P)}{«_{eff}} - \frac{\Delta L_{eff}(P)}{L_{eff}} \right) \left(\frac{V_b}{\left(V_a^{\,2} + V_b^{\,2}\right)^{1/2}} - 1 \right). \qquad (72)$$

Розрахунок вихідної характеристики МДН-тензотранзистору проводився на основі математичного пакету "MatLab 7.1" за загальним виразом для струму стоку I_D в умовах дії тиску P=10^8 Па:

$$I_D\left(P\right) = I_{BD}\left(P\right) - I_{drain}\left(P\right). \qquad (73)$$

Результати проведених розрахунків наведені на рис. 2.

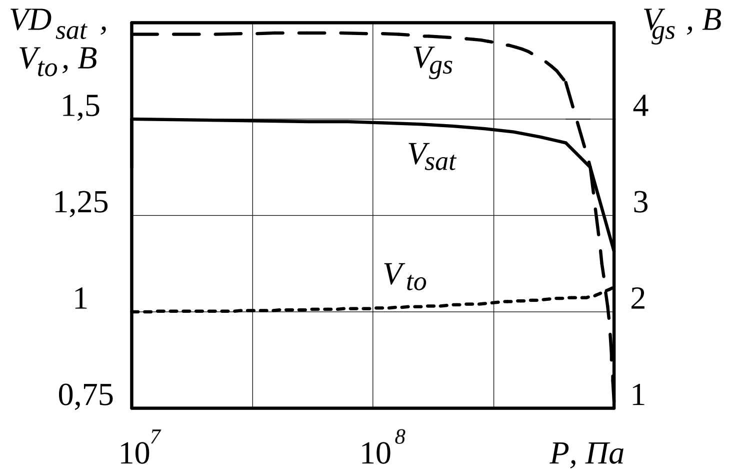

Рис. 2. Залежності напруги насичення V_{DSsat}, порогової напруги V_{to}, та напруги затвор-виток V_{GS} від тиску

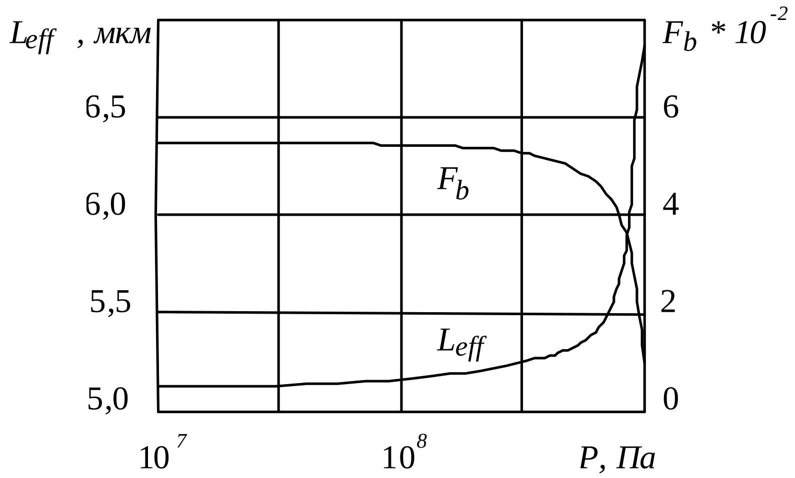

Рис. 3. Залежності ефективної довжини каналу L_{eff}, та коефіцієнту F_b від тиску

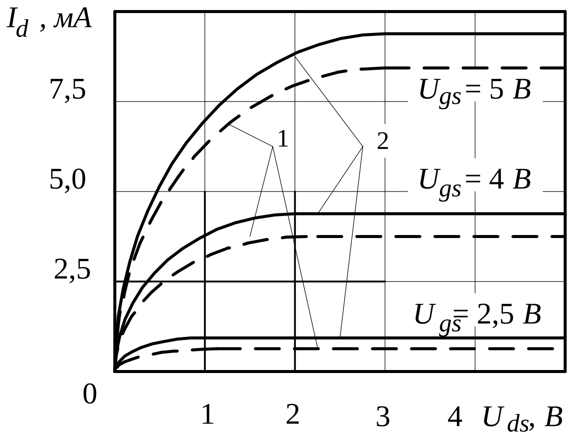

Рис. 4. Теоретичні вихідні характеристики МДН-тензотранзистора за відсутність деформації (1) та при її наявності (2)

Висновки

1. На основі розробленої математичної моделі деформаційних ефектів у МДН-транзисторі показано, що порогова напруга, напруга насичення, напруга затвор-витік, вихідні характеристики залежать від тиску при його високих значеннях, починаючи з 10^8 Па.

2. Найбільша залежність цих параметрів від дії тиску має місце при роботі МДН-транзистора у режимі насичення.

3. Використання МДН-транзистора як тензочутливого елемента є ефективним при високих тисках (10^8 Па) при його роботі у режимі насичення.

ЛІТУРАТУРА:

1. Пат. № 83354 України, МПК H01R 19/00. Сенсор тиску з активним індуктивним елементом / Осадчук В. С., Осадчук О. В., Осадчук Я. О. Вінницький національний технічний університет. Заявка № u201300303; Заяв. 09.01.2013; Опубл.10.09.13. Бюл.17.
2. Зи, С. Физика полупроводниковых приборов : в 2-х книгах, кн. 1 / С Зи. – М. : Мир, 1984. – 456 с.
3. Разевиг, В. Д. Применение програм P-CAD и P-Spice для схемотехнического моделирования на ПЭВМ : в 4-х выпусках. – Вып. 2. Модели компонентов аналоговых устройств / В. Д. Разевиг. – М. : Радио и связь, 1992. – 72 с.
4. Полякова, А. Л. Деформация полупроводников и полупроводниковых приборов / Л. А. Полякова. – М. : Энергия, 1979. – 168 с.
5. Викулин, И. М. Физика полупроводниковых приборов / И. М. Викулин, В. И. Стафеев. – М. : Радио и связь, 1990. – 264 с.

Отримано редакцією 20.07.2013 р.

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

Осадчук Ярослав Олександрович, студент кафедри радіотехніки. Вінницький національний технічний університет.