

© 1999р. Л.Ф. Політанський, В.В. Герасим, Є.Л. Горда,  
І.В. Пшегорницька, І.П.Бурмич

Чернівецький державний університет ім. Ю. Федьковича, Чернівці

## ОСОБЛИВОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ ПОРОГОВОЇ НАПРУГИ МОН–ТРАНЗИСТОРІВ З КОРОТКИМ КАНАЛОМ

Наведені визначення порогової напруги, які найбільш часто використовуються для аналітичного моделювання, а також вирази для експериментальної оцінки величини порогової напруги. Розглянуті питання моделювання порогової напруги польових МОН–транзисторів і фізичні обмеження, пов'язані зі зменшенням довжини каналу структури.

Determinations of threshold voltage, which are the most frequently used for analytical simulation are indicated as well as ratio for experimental estimation of threshold voltage value. Questions of threshold voltage simulation of field-effect MOS transistors and physical restrictions due to reduction of structure channel length are considered.

Різні фізико-технологічні моделі МОН-транзистора базуються на розв'язку системи фундаментальних рівнянь. Для одержання рівнянь необхідно оцінити рівень їх наближення. Найбільш часто використовується дифузійно-дрейфове наближення, справедливе для певних геометричних розмірів досліджуваної структури. Граничні значення цих розмірів неоднакові для різних приладів на основі МОН-структур.

Результати вимірів електричних характеристик МОН-транзисторів, параметри яких змінювались у широких межах, узагальнені емпіричним співвідношенням, яке визначає критерій короткоканальності [1]:

$$L_{\min} = 0,4 \left[ r_j \cdot t_{0x} (W_S + W_D)^2 \right]^{1/3}, \quad (1)$$

де  $L_{\min}$  – мінімальна ефективна довжина каналу,  $r_j$  – глибина переходів;  $t_{0x}$  – товщина підзатворного окислу;  $W_D + W_S$  – сума товщин областей просторового заряду стоку і витоку.

Величина  $W_D$  може бути обчислена у наближенні одномірного різкого  $p$ - $n$ -переходу:

$$W_D = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_{Si}}{qN_A} (U_{BS} + U_{BI} + U_{DS})}, \quad (2)$$

де  $\epsilon_0$ ,  $\epsilon_{Si}$  – діелектрична проникливість вакууму і кремнію,  $q$  – заряд електрона,  $N_A$  – концентрація носіїв у підкладці,  $U_{DS}$ ,  $U_{BS}$  – напруги, прикладені до стоку та підкладки,  $U_{BI}$  – контактна різниця потенціалів. При нульовому зміщенні стоку ( $U_{DS} = 0$ ) товщина  $W_D = W_S$ . Як показує практика, у

сучасних МОН-транзисторах, виготовлених за МОН і КМОН технологіям, довжина каналу яких менша за 4 мкм, мають місце короткоканальні ефекти.

Як правило, при розробці фізико-технологічних моделей для МОН-структури з великими геометричними розмірами, використовуються наступні наближення:

- 1) рухливість носіїв заряду у приповерхневій області каналу постійна;
- 2) концентрація несучої динаміки у підкладці однорідна;
- 3) товщина шару діелектрика значно більша від товщини каналу;
- 4) ефективний заряд у затворному окислі постійний;
- 5) підпороговою провідністю можна знехтувати;
- 6) струм стоку зумовлений тільки дрейфовою складовою;
- 7) опір підзатворного діелектрика безмежно великий;
- 8) градієнт поздовжнього електричного поля набагато менший за градієнт поперечного електричного поля.

Розроблена велика кількість довгоканальних моделей МОН-транзистора. Проте, при переході до малих геометричних розмірів МОН-транзистора, деякі з наближень не виконуються. Тому для адекватного опису процесів, що протікають у короткоканальних МОН-структурах, необхідно враховувати дво- та тримірні ефекти.

Порогова напруга МОН-транзистора – це напруга на затворі, необхідна для створення каналу провідності поблизу границі розділу Si-SiO<sub>2</sub> [2]. Найбільш часто використовуються наступні визначення порогової напруги (ПН), як напруги на затворі, при якій:

- 1) густина заряду інверсного шару дорівнює нулю;
- 2) струм стоку лінійної ділянки затворної ВАХ (при малій напрузі стоку) екстрапольований до нуля;
- 3) струм стоку для затворної ВАХ квадратично екстрапольований до нуля;
- 4) струм стоку дорівнює деякій фіксовано малій величині;
- 5) поверхневий потенціал дорівнює двом потенціалам Фермі в об'ємі напівпровідника.

Визначення ПН (1), (4,5) найбільш часто використовуються при аналітичному моделюванні, тоді як (2,3) – для експериментальної оцінки величини порогової напруги. Встановлено, що із зменшенням довжини каналу ПН МОН-транзистора зменшується і є функцією довжини каналу, глибини дифузійних областей та напруги стоку. Така залежність ПН від довжини каналу дістала назву короткоканальності.

При моделюванні ПН МОН-транзистора з коротким каналом використовуються принцип електронейтральності МОН-структури та розв'язок одно-, дво- або тримірного рівняння Пуассона для одержання розподілу потенціалу вздовж каналу. Для ПН МОН-транзистора з коротким каналом і однорідно-легованою підкладкою даний розподіл має вигляд:

$$U_T = U_{FB} + 2\Phi_F + \frac{qN_A(WLW_C - WW_C^2)}{C_{0x}LW}, \quad (3)$$

$U_{FB}$  – напруга плоских зон,  $W$  – ширина каналу,  $C_{0x}$  – питома ємність підзатворного діелектрика,  $W_C$  – ширина збідненого шару під затвором.

При цьому  $W_D = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_{Si}}{qN_A}(2\Phi_F - F_{BS})}$ .

У сучасних МОН-транзисторах для регулювання величини і корекції їх вихідних характеристик застосовують подвійну імплантацію приповерхневої області каналу. При цьому глибина залягання імплантованого шару  $x$  може бути як більшою так і меншою глибини залягання дифузійних областей стоку і витоку  $r_j$ . У другому випадку виникає необхідність врахування нерівномірності розподілу домішки у приповерхневій

області каналу у виразі для порогової напруги.

Геометрична апроксимація профілю домішки у підкладці МОН-транзистора з імплантованим каналом базується на використанні триступінчатого профілю і умов рівності швидкостей, зміни густини заряду збідненого шару і густини заряду інверсійного шару у режимі сильної інверсії [3]. Виходячи з цих припущень вираз для ПН можна записати

$$U_T = U_{FB} + \Phi_S + \frac{Q_{Bmax}}{C_{0x}}, \quad (4)$$

де  $\Phi_S$  – поверхневий потенціал,  $Q_{Bmax}$  – максимальне значення заряду збідненої області під затвором. Нелінійні ефекти, пов'язані з малою довжиною каналу, враховуються у цій моделі шляхом множення  $Q_{Bmax}$  на коефіцієнт форми, значення якого визначається для фіксованої концентрації у підкладці.

Вплив крайових ефектів і повздовжнього електричного поля на величину ПН враховує модель, що базується на апроксимації розподілу поверхневого потенціалу квадратичною функцією [4]:

$$U_x(y) = \Phi_{min} + (\Phi_0 - \Phi_{min}) \left(1 - \frac{2y}{L^*}\right)^2, \quad (5)$$

де  $\Phi_0$  і  $\Phi_{min}$  – поверхневий потенціал поблизу витоку і у середині каналу,  $L^*$  – ефективна довжина каналу. Профіль домішки у підкладці апроксимований розподілом Гауса:

$$N(x) = N_B + \sum_{i=1}^n N_{Si} \exp\left(-\frac{(x - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2}\right), \quad (6)$$

де  $N_B$  – концентрація в об'ємі підкладки,  $N_{Si}$  – концентрація у приповерхневій області під затвором,  $\mu_i$  відповідає максимуму функції розподілу,  $\sigma_i$  – відстань від максимуму до перегину даної функції.

Для порогової напруги одержано вираз:

$$U_T = U_{FB} + \Phi_C + \frac{\epsilon_0\epsilon_{Si}E_{Smax}}{C_{0x}}, \quad (7)$$

де  $\Phi_C$  – критичний поверхневий потенціал, значення якого знаходять із розв'язку двомірного рівняння Пуассона,  $E_{Smax}$  – нормальна компонента електричного поля приповерхневої області каналу, що є функцією концентрації  $N(x)$ , ефективної довжини каналу напруги на стоці.

Найбільш зручними для інженерних розрахунків порогової напруги МОН-транзистора є напівемпіричні моделі, що базуються на аналітичному розв'язанні рівнянь Пуассона для заданої

апроксимації профілю домішки у підкладці. У цьому випадку ефекти малих розмірів враховуються за допомогою емпіричних і поправочних коефіцієнтів, які визначаються з експериментальних даних.

Проте, при подальшому зменшенні топологічних розмірів каналу МОН-структур, необхідно враховувати фізичні явища, якими можна було б знехтувати для довгоканальних приладів. Це значно ускладнює саму модель. Слід мати на увазі, що досягнення граничних мінімальних розмірів, при яких ще можлива нормальна робота субмікронних МОН-транзисторів, дифузійно-дрей-фове наближення стає некоректним. У даному випадку важливу роль починають відігравати квантові ефекти. Для їх врахування необхідна розробка нових підходів до моделювання.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Ward D.E., Dutton R.W.* An analytical model of Short-channel MOSFET // IEEE. - 1980. - No2. - P.233-236.
2. *Akers L.* Threshold voltage models of short and small geometry MOSFETs // Solid State Electron. - 1982. - No.7. - P.621-640.
3. *Salama C.* Threshold voltage characteristics of ion implanted depletion MOSFETs // Solid State Electron. - 1986. - No.4. - P.385-388.
4. *Wada D., Ajiki T.* Electromigration in small – geometry MOSFETs // Solid-State Electron. - 1986. - No.11. - P.1114-1117.