

## ОПТИМІЗАЦІЯ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ МОН-ТРАНЗИСТОРІВ З ПОДВІЙНОЮ ДИФУЗИЄЮ

Досліджено вплив нерівномірного розподілу домішок бору і фосфору вздовж каналу в  $p$ -канальній області МОН-транзисторів, сформованих методом подвійної дифузії (ПМОН-транзистори) на його порогову напругу і напругу змикання стоку з витокком. Профіль нерівномірного розподілу домішок апроксимований експоненціальними залежностями від координати в  $p$ -канальній області структури.

**Ключові слова:** ПМОН-транзистор, порогова напруга, легування,  $p$ - $n$  перехід.

Исследовано влияние неравномерного распределения примесей бора и фосфора вдоль канала в  $p$ -канальной области ДМОП-транзисторов, сформированных методом двойной диффузии (ДМОП-транзисторы) на его пороговое напряжение и напряжение смыкания стока с истоком. Профиль неравномерного распределения примесей аппроксимирован экспоненциальными зависимостями от координаты в  $p$ -канальной области структуры.

**Ключевые слова:** ДМОП-транзистор, пороговое напряжение, легирование,  $p$ - $n$  переход.

There has been studied influence of maldistribution of boron and phosphate impurities along the channel length in  $p$ -channel region of MOS-transistors formed by means of double diffusion (DMOS-transistors) on its threshold voltage and drain and source pinch-off voltage. The impurities maldistribution profile is approximated by exponential dependence on the coordinate of  $p$ -channel region structure.

**Keywords:** DMOS-transistors, threshold voltage, doping,  $p$ - $n$  transition.

Особливістю ПМОН-структур (рис.1) є нерівномірне легування  $p$ -канальної області, що слугує підкладкою, як в глибепітаксійному шару, так і вздовж поверхні (рис.2).

Загальний вигляд значення порогової напруги МОН-транзистора відомий [1]:

$$U_{\text{пор}} = U_{\text{пл.з}} + \phi_{\text{пов}} + \frac{q}{C_{\text{ок}}} \int N(x, y, z) dx dy dz, \quad (1)$$

де  $U_{\text{пл.з}}$  – напруга плоских зон,  $\phi_{\text{пов}}$  – вигин зон на поверхні, що відповідає сильній інверсії,  $C_{\text{ок}}$  – питома ємність підзатворного окислу,  $q$  – заряд електрона,  $N(x, y, z)$  – функція розподілу домішок у підкладці.

Нерівномірний розподіл акцепторних домішок у  $p$ -канальній області структури приводить до того, що напруга інверсії типу провідності вздовж її каналу є величиною, що залежить від координати локальної ділянки каналу. Тому значення порогової напруги структури, що визначається окрім інших чинників її опором у відкритому стані, буде відрізнятись від напруги відпирання тран-

зистора [2].

Очевидно, що напруга відпирання ПМОН-транзистора визначається локальною ділянкою  $p$ -канальної області структури з максимальним значенням поверхневої концентрації результуючої домішки. Визначимо це значення припустивши, що розподіл донорної і акцепторної домішок вздовж границі розподілу  $\text{Si-SiO}_2$  у  $p$ -канальній області структури носить експоненціальний характер.

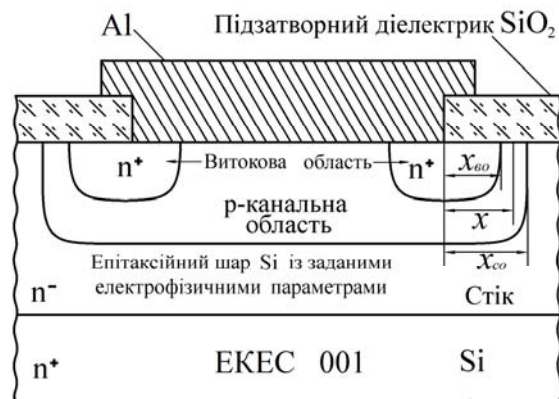


Рис. 1 Поперечний переріз ПМОН-структури.

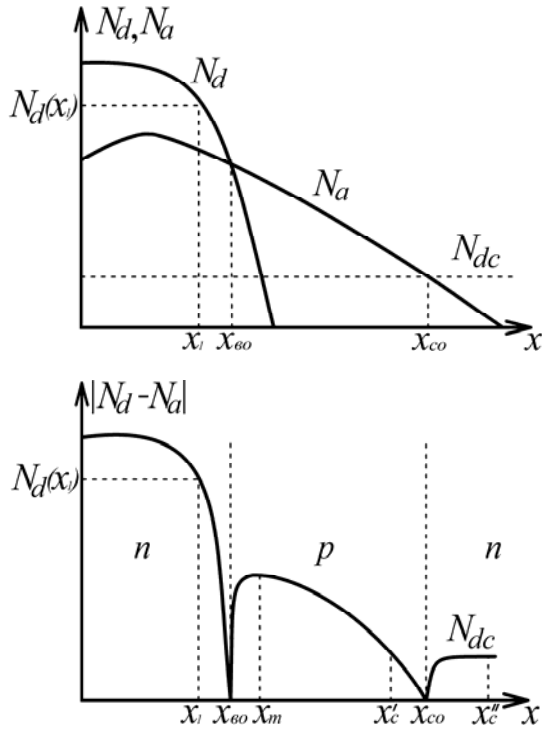


Рис. 2 Розподіл донорної, акцепторної і результуючої домішки у транзисторній структурі, сформованої методом подвійної дифузії.

Згідно [3] дифузійні профілі іонів фосфору  $N_d^+$ , що утворюють витік  $n$ -канального ПМОН-транзистора містять дві ділянки:

- майже плоска ділянка з концентрацією

$$N_d^+ = N_d^+(x) \leq N_d(x_1) \cong 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}, \quad (2)$$

де  $x_1 \approx 0,8$  мкм;

- ділянку з майже експоненційним спадом концентрації

$$N_d(x) = N_d(x_1) \exp[-(x - x_1)L_d], \quad (3)$$

де характеристична довжина в розподілі донорів виражена співвідношенням:

$$L_d = \frac{x_{\text{bo}} - x_1}{\ln[N_d(x_1)/N_d(x_{\text{bo}})]}. \quad (4)$$

Розподіл домішок у  $p$ -канальній області структури сформованої перерозподілом бору з кінцевого джерела, утвореного іонним легуванням, також можна апроксимувати експонентою при  $N_a(x) \leq 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Для реальних структур в точках металургійного витокового  $p$ - $n$  переходу  $x_{\text{bo}}$  концентрація акцепторної домішки  $N_a(x_{\text{bo}})$  складає  $10^{17} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Тому для профілю від'ємно заряджених іонів бору у  $p$ -канальній області структури можна записати:

$$N_a(x) = N_a(x_{\text{bo}}) \exp[-(x - x_{\text{bo}})/L_a], \quad (5)$$

де  $L_a = \frac{L_k}{\ln[N_a(x_{\text{bo}})/N_{dc}]}$  – характеристична довжина в розподілі акцепторів,

$$L_k = x_{\text{co}} - x_{\text{bo}} \quad (6)$$

– довжина каналу ПМОН-транзистора.

Отже, результуючий розподіл домішок у  $p$ -канальній області ПМОН-транзистора матиме вигляд:

$$N_p(x) = N_a(x_{\text{bo}}) \exp\left(-\frac{x - x_{\text{bo}}}{L_a}\right) - N_d(x_1) \exp\left(-\frac{x - x_1}{L_d}\right). \quad (7)$$

Положення точки  $x_m$ , що відповідає максимальному значенню результуючої концентрації домішок  $N_p(x_m)$ , можна визначити із умови:

$$\left. \frac{dN_a(x)}{dx} \right|_{x=x_m} = 0. \quad (8)$$

Значення  $x_m$  і  $N_p(x_m)$  дорівнюють:

$$x_m = L_k \frac{\ln(L_a/L_d)}{\left(\frac{L_a}{L_d} - 1\right) \ln(N_a(x_{\text{bo}})/N_{dc})} + x_{\text{bo}}, \quad (9)$$

$$N_p(x_m) = N_a(x_{\text{bo}}) \exp\left(-\frac{x_m - x_{\text{bo}}}{L_a}\right) - N_d(x_1) \exp\left(-\frac{x_m - x_1}{L_d}\right). \quad (10)$$

На рис.3 наведені залежності розподілу результуючої домішки у  $p$ -канальній області ПМОН-структури від координат і концентрації домішок у вихідному епітаксійному шарі. Із отриманих результатів слідує, що максимальним значенням концентрації результуючої домішки у  $p$ -канальній області структури при заданій довжині каналу можна керувати підбором профілів її легування.

Латеральний розподіл результуючої домішки у  $p$ -канальній області ПМОН-структури при різних значеннях довжини каналу, концентрації домішок у вихідній кремнієвій підкладці і на металургійній границі витокового  $p$ - $n$  переходу наведений на рис.4.

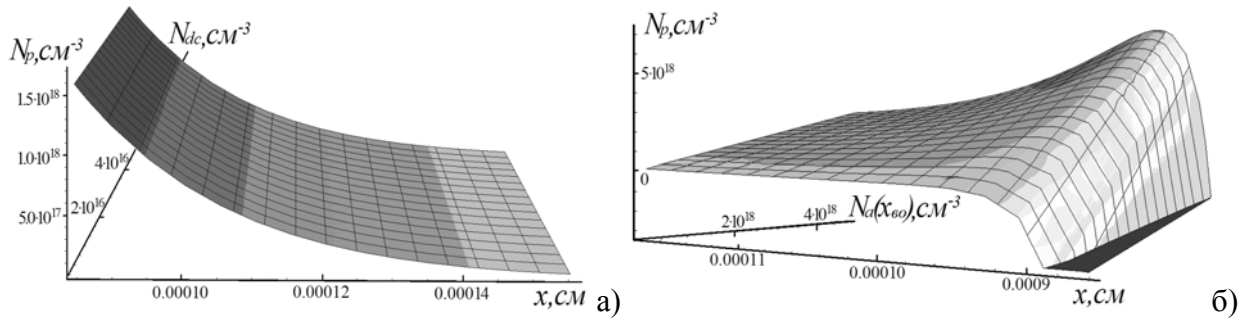


Рис. 3. Залежності розподілу результуючої домішки у *p*-канальній області ПМОН-структури від координат і концентрації домішок у вихідному епітаксійному шарі (а) і на металургійній границі витокового *p-n* переходу (б).

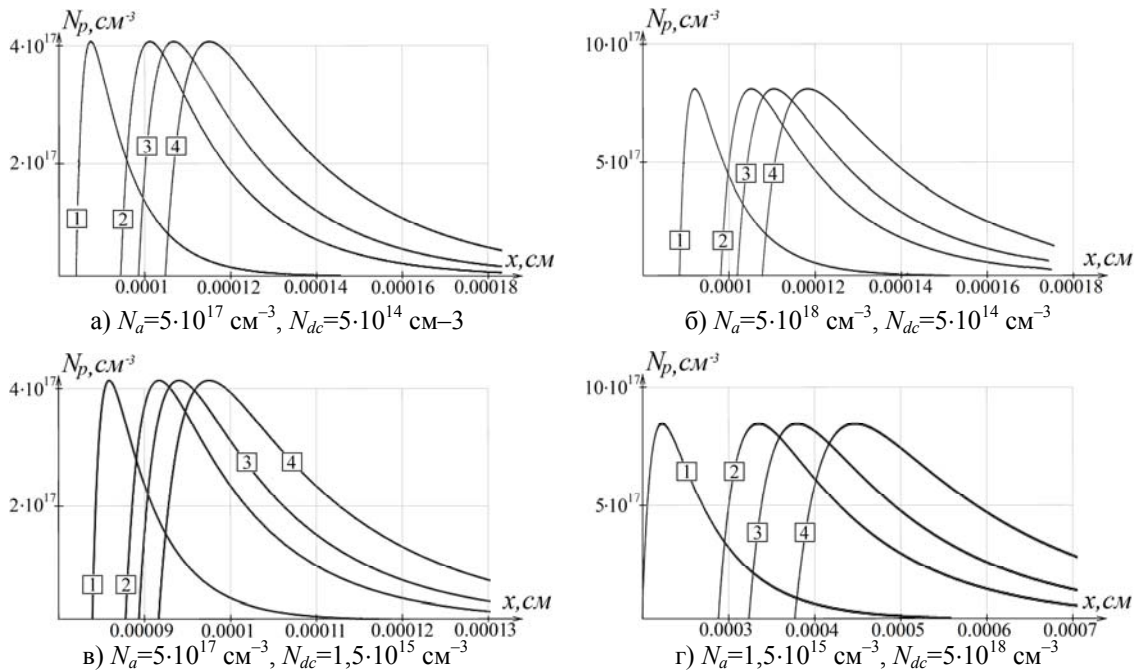


Рис. 4. Латеральний розподіл результуючої концентрації у *p*-канальній області ПМОН-структури при довжині каналу: [1] – 0,5 мкм, [2] – 1 мкм, [3] – 1,2 мкм, [4] – 1,5 мкм.

Для напруги інверсії типу провідності в точці *x* *p*-канальної області структури можна записати [4]:

$$U_{\text{інв.пр.}}(x) = \varphi_{\text{МДП}} + 2 \frac{kT}{q} \ln \frac{N_p(x)}{n_i} - \frac{Q_{\text{ок}}}{C_{\text{ок}}} + \frac{2}{C_{\text{ок}}} \sqrt{\epsilon_{\text{Si}} \epsilon_0 N_p \left| \frac{kT}{q} \ln \frac{N_p(x)}{n_i} \right|}, \quad (11)$$

де  $Q_{\text{ок}}$  – густина заряду на границі розділу Si–SiO<sub>2</sub>,  $\varphi_{\text{МДП}}$  – різниця робіт виходу електронів із затвору і підкладки,  $\epsilon_{\text{Si}}$  – діелектрична проникність кремнію,  $\epsilon_0$  – діелектрична стала,  $C_{\text{ок}}$  – питома ємність підзатворного діелектрика,  $kT/q$  – температурний потенціал,  $N_p(x)$  – максимальне значення концентрації домішок бору в *p*-канальній області,  $n_i$  –

концентрація власних носіїв в Si.

На рис.5 наведені залежності напруги інверсії типу провідності від координати *x* *p*-канальної області для ПМОН-транзисторів, виготовлених на епітаксійних структурах з орієнтацією поверхні (111) і (100).

На наведених залежностях видно, що однакові значення напруги відпирання транзисторів, виготовлених на епітаксійних структурах з орієнтацією поверхні (111) можна отримати при більш високих концентраціях домішок у металургійних точках витокового *p-n* переходу, ніж для транзисторів, виготовлених на епітаксійних структурах з орієнтацією поверхні (100). Це обумовлено більш високою щільністю позитивного заряду в оксиді кремнію на межі розділу Si–SiO<sub>2</sub>.

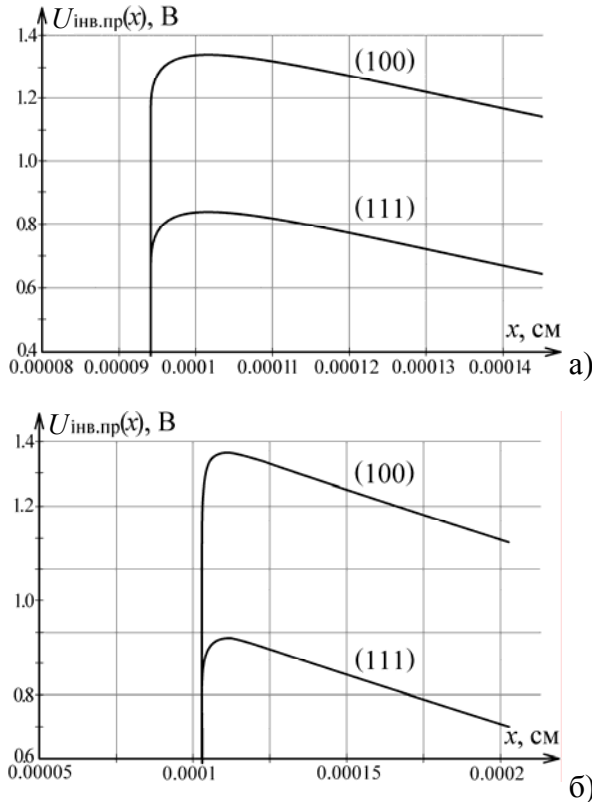


Рис. 5. Залежності напруги інверсії типу провідності локальної ділянки  $p$ -канальної області структури від координати для вихідних кремнієвих підкладок з орієнтацією поверхні (100) і (111) при  $N_a(x_{во})=5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ,  $N_{dc}=1,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  для  $L_k=0,5 \text{ мкм}$  (а) і  $1 \text{ мкм}$  (б).

Отже, транзистори виготовлені на епітаксійних структурах з орієнтацією поверхні (111) матимуть більш високі напруги змикання стоку і виток у порівнянні з транзисторами, виготовленими на епітаксійних структурах з орієнтацією поверхні (100), при однакових значеннях довжини їх каналів і порогових напруг.

Зробимо оцінку величини напруги змикання стоку і виток ПМОН-структури з урахуванням експоненційного розподілу домішок фосфору і бору у  $p$ -канальній області структури.

Умову рівності нулеві повного об'ємного заряду в стоковому  $p-n$  переході, а також співвідношення між зовнішнім оберненим зміщенням і щільністю збідненого заряду можна записати так:

$$\int_{y'_c}^{y''_c} \rho(y) dy = 0, \quad (12)$$

$$\int_{y'_c}^{y''_c} y \rho(y) dy = \epsilon_0 \epsilon_{Si} \left( \varphi_{kc} + |U_{c\ p-n}| \right), \quad (13)$$

де  $y=x-x_{co}$  – координата, що відраховується від металургійної границі стокового  $p-n$  переходу,  $y'_c = x'_c - x_{co}$ ,  $y''_c = x''_c - x_{co}$  – межі збіднених шарів стокового  $p-n$  переходу у  $p$ -канальній і стоковій областях структури (рис.1),  $\rho(y) = q[N_d(y + x_{co}) - N_a(y + x_{co}) + N_{dk}]$  – густина об'ємного заряду,  $U_{c\ p-n}$  – напруга обернено зміщеного стокового  $p-n$  переходу,  $\varphi_{kc}$  – контактна різниця потенціалів у стоковому  $p-n$  переході.

З врахуванням (4) і (6) можна записати

$$N_d(y) = N_{dk} \exp\left\{ \left( \frac{1}{L_a} - \frac{1}{L_d} \right) - \frac{y}{L_d} \right\}, \quad (14)$$

$$N_a(y) = N_{dk} \exp\left( -\frac{y}{L_d} \right). \quad (15)$$

Тобто для густини об'ємного заряду можна записати:

$$\rho(y) = qN_{dc} \left\{ \exp\left[ L_k \left( \frac{1}{L_a} - \frac{1}{L_d} \right) - \frac{y}{L_d} \right] - \exp\left( -\frac{y}{L_d} \right) + 1 \right\}. \quad (16)$$

Інтегруючи (12) і (13) з врахуванням

$$\exp\left( -\frac{y''_c}{L_d} \right) \ll \exp\left( -\frac{y'_c}{L_d} \right),$$

$$\exp\left( -\frac{y''_c}{L_a} \right) \ll \exp\left( -\frac{y'_c}{L_a} \right)$$

отримуємо:

$$L_d \exp\left\{ W_k \left( \frac{1}{L_a} - \frac{1}{L_d} \right) \right\} \exp\left( -\frac{y'_c}{L_a} \right) - L_a \exp\left( -\frac{y'_c}{L_a} \right) + y''_c - y'_c = 0, \quad (17)$$

$$L_d(L_d + y'_c) \exp\left\{ W_k \left( \frac{1}{L_d} - \frac{1}{L_a} \right) \right\} \exp\left( -\frac{y'_c}{L_d} \right) + L_a(-y'_c - L_a) \exp\left( -\frac{y'_c}{L_a} \right) +$$

$$+\frac{1}{2}(y_c''^2 - y_c'^2) = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon (\varphi_{kc} + U_{c\ p-n})}{qN_d}$$

При змиканні стокового і витокового  $p-n$  переходів  $-x_c' = L_k + x_{BO}$  (витік замкнутий з  $p$ -каналньою областю), тому:

$$L_d^2 \exp \frac{L_k}{L_a} + \frac{1}{2} \exp \left( \frac{2L_k}{L_a} \right) L_a^2 \left( 1 - \frac{L_d}{L_a} \right) = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{Si} (\varphi_{kc} + |U_{c\ B3}|)}{qN_{dc}}, \quad (18)$$

або

$$L_d^2 \frac{N_a(x_{BO})}{N_{dc}} + \frac{1}{2} L_a^2 \left( \frac{N_a(x_{BO})}{N_{dc}} \right)^2 \left( 1 - \frac{L_d}{L_a} \right) = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{Si} (\varphi_{kc} + |U_{c\ B3}|)}{qN_{dc}}. \quad (19)$$

Оскільки для реальних структур

$$\frac{N_a(x_{BO})}{N_{dc}} \ll \left( \frac{N_a(x_{BO})}{N_{dc}} \right)^2, \quad \frac{N_a(x_{BO})}{N_{dc}} \gg 100$$

і  $|U_{c\ B3}| \gg \varphi_{kc}$ , то першим доданком в лівій частині рівняння та значенням  $\varphi_{kc}$  в правій частині можна знехтувати. В результаті отримуємо:

$$\frac{1}{2} L_a^2 \left[ \frac{N_a(x_{BO})}{N_{dc}} \right]^2 \left( 1 - \frac{L_d}{L_a} \right) = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{Si} |U_{c\ B3}|}{qN_{dc}},$$

$$|U_{c\ B3}| = \frac{q}{2\varepsilon_0 \varepsilon_{Si}} \frac{N_a^2(x_{BO})}{N_{dc} \left[ \ln \frac{N_a(x_{BO})}{N_{dc}} \right]^2} \left( 1 - \frac{L_d}{L_a} \right)^2.$$

На рис.6 наведені залежності напруги змикання стокових та витокових  $p-n$  переходів ПМОН-транзисторів від концентрації  $N_a(x_{BO})$  при різних довжинах каналу.

### Висновки

Розроблена математична модель для напруги відпирання і напруги змикання стокового і витокового  $p-n$  переходів ПМОН-структури у наближенні експоненційного розподілу домішок фосфору і бору у витоковій і  $p$ -каналній областях структури.

Показано, що значеннями напруги відпирання ПМОН-транзистора і змикання його стокового і витокового  $p-n$  переходів можна

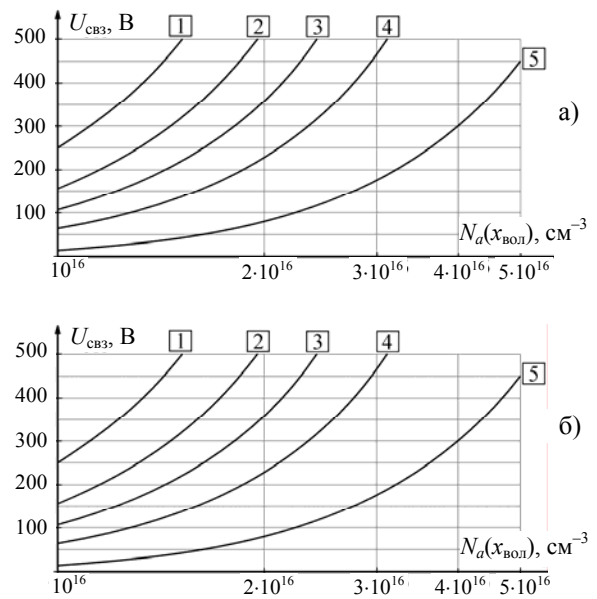


Рис. 6. Залежності напруги змикання стокових і витокових  $p-n$  переходів ПМОН-транзисторів від концентрації  $N_a(x_{BO})$  при довжині каналу: [1] – 1,5 мкм, [2] – 1,2 мкм, [3] – 1,0 мкм, [4] – 0,8 мкм, [5] – 0,5 мкм і співвідношеннях  $L_d/L_a=1/6$  (а) і  $L_d/L_a=1/4$  (б). Концентрація  $N_d=5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ .

керувати шляхом задання профілів легування структури.

Розроблена модель для напруги змикання стокового і витокового  $p-n$  переходів дозволяє здійснити оптимальний вибір електрофізичних і конструктивних параметрів епітаксійних шарів для виготовлення потужних високовольтних ПМОН-транзисторів із заданими параметрами.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Крупкина Т.Ю., Романов С.Н. Оптимизация параметров МОП-транзистора по пороговому напряжению. // Электронная техника. Сер. Микроэлектроника. –1985. – Вып.4. – С. 47-54.
2. Политанский Л. Ф., Лихобабин Н.П. Эффективное пороговое напряжение ДМОП-транзисторов // Электронная техника. Сер. Полупроводниковые приборы. – 1985. – Вып. 3. – С. 54-56.
3. Колесников В.Г., Никишин В.И., Сынов В.Н. и др. Кремниевые планарные транзисторы: научное издание / Под ред. Я.А. Федотова. – М.: Советское радио, 1973.
4. Валиев К.А., Кармазинский А.Н., Королев М.Р. Цифровые схемы на МДП- транзисторах. – М.: Советское радио, 1971.