

1. Годунов С.К., Рябенкий В.С. Разностные схемы. М., 1973. 2. Самарский А.А. Теория разностных схем. М., 1983. 3. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М., 1966. 4. Норри Д., Ж де Фриз. Введение в метод конечных элементов. М., 1981. 5. Молчанов И.Н. Машинные методы решения прикладных задач. Дифференциальные уравнения. К., 1988. 6. Броддай И., Мерей Дж. Физические основы микротехнологии. Пер. с англ. М., 1985.

**УДК 658.512.2**

**Теслюк В.М., Корбецький О.Р., Гранат П.П.**  
 НУ «Львівська політехніка», кафедра САПР

## **МОДЕЛЬ ПЕРЕРОЗПОДІЛУ ДОМІШОК У СТРУКТУРІ «КРЕМНІЙ-ДСС»**

© Теслюк В.М., Корбецький О.Р., Гранат П.П., 2000

**Запропоновано математичну модель для аналізу перерозподілу домішок у структурі «кремній – домішково-силікатне скло», яка містить модель росту плівки ДСС і дозволяє підвищити точність моделювання дифузійних процесів при аналізі першої стадії дифузії та дослідити основні фізичні процеси на межі розділу двох середовищ ДСС-кремній. Дана модель реалізована в програмі ПроМІС-Т.**

### **Вступ**

Домінуюче місце при виготовлення інтегральних схем (ІС) займають технологічні операції (ТО) формування легованих областей інтегральних приладів. До цих ТО належать дифузія та інне легування [1,2]. Кожна з цих технологічних операцій має певні переваги та недоліки і займає своє місце в технологічному процесі виготовлення ВІС та ЗВІС. Дифузійні процеси, як правило, використовують при формуванні біполярних інтегральних приладів, «кишень» в техпроцесах виготовлення КМОН-структур, дифузійних резисторів та конденсаторів тощо.

Щоб забезпечити конкурентоздатність своїх виробів, мікроелектронні підприємства змушені зменшувати терміни проектування виробів, які коливаються в межах 1–3 місяців. Особливого значення в цих умовах набувають засоби математичного моделювання технологічних процесів виготовлення ІС, які дозволяють значно прискорити процес проектування мікросхем.

### **Формалізація задачі**

Відомо, що дифузійні процеси описуються другим законом Фіка [1,2,3]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\nabla(D\nabla J), \quad (1)$$

де  $C$  – концентрація легуючих домішок;  $\nabla$  – оператор градієнта;  $t$  – час проведення термічної дифузії;  $J$  – потік домішкових атомів.

Оскільки нам доведеться використовувати вищезазначене диференціальне рівняння в часткових похідних, то надалі для зручності його модифікуємо, а саме: перетворимо до безрозмірного вигляду.

### Приведення рівняння дифузії до безрозмірного вигляду

Щоби привести рівняння (1) до безрозмірного вигляду, необхідно вибрати такі масштаби (проведемо перетворення для одно- та двовимірних варіантів рівняння (1)): для поточного значення концентрації легуючої домішки  $C(x,y,t)$  за масштаб приймемо поверхневу концентрацію легуючої домішки  $C_0$ ; для значення часу  $t$  – час дифузії  $T$ ; для координат  $x$  та  $y$  – максимальний розмір області моделювання за координатою  $x$  –  $L_x$ , а для коефіцієнта дифузії  $D$  – власний коефіцієнт дифузії  $D_0$ .

Безрозмірні параметри рівняння дифузії позначимо аналогічними знаками із зірочками нагорі. Тоді безрозмірні параметри концентраційного профілю можна записати:

$$C^* = C/C_0; D^* = D/D_0; t^* = t/t_0; x^* = x/L_x; y^* = y/L_x. \quad (2)$$

Виразимо параметри рівняння дифузії через безрозмірні величини:

$$C = C^* C_0; D = D^* D_0; t = t^* t_0; x = x^* L_x; y = y^* L_x. \quad (3)$$

Отримані вирази підставимо в одновимірне рівняння дифузії:

$$\frac{\partial C^*(x^*, t^*) C_0}{\partial t^* t_0} = \frac{\partial}{\partial (x^* L_x)} (D^* D_0 \frac{\partial (C^*(x^*, t^*) C_0)}{\partial (x^* L_x)}). \quad (4)$$

Винесемо константи в рівнянні (4) за знак диференціала:

$$\frac{C_0}{t_0} \frac{\partial C^*(x^*, t^*)}{\partial t^*} = \frac{D_0 C_0}{L_x^2} \frac{\partial}{\partial (x^*)} (D^* \frac{\partial C^*(x^*, t^*)}{\partial x^*}). \quad (5)$$

Перенесемо константи у праву частину рівняння (5) і позначимо через  $H_x = \frac{D_0 t_0}{L_x^2}$ .

Отриманий вираз для  $H_x$  підставимо у рівняння (5). Після проведених модифікацій рівняння (5) набуде такого вигляду:

$$\frac{\partial C^*(x^*, t^*)}{\partial t^*} = H_x \frac{\partial}{\partial (x^*)} \left( D^* \frac{\partial C^*(x^*, t^*)}{\partial x^*} \right) \quad (6)$$

Отримане рівняння дифузії (6) записане в безрозмірному вигляді, а коефіцієнт  $H_x$  називається критерієм Фур'є.

Для двовимірного випадку рівняння дифузії в безрозмірному вигляді після аналогічних перетворень набуде такого вигляду:

$$\frac{\partial C^*(x^*, y^*, t^*)}{\partial t^*} = H_x \frac{\partial}{\partial (x^*)} \left( D^* \frac{\partial C^*(x^*, y^*, t^*)}{\partial x^*} \right) + H_x \frac{\partial}{\partial (y^*)} \left( D^* \frac{\partial C^*(x^*, y^*, t^*)}{\partial y^*} \right). \quad (7)$$

### Формалізація дифузійної задачі «загонки» з одночасним ростом ДСС

Під час першої стадії дифузії на поверхні кремнієвої пластини в результаті взаємодії оксидної плівки з оксидом домішки утворюється плівка домішково-силікатного скла (ДСС). У випадку легування бором – це боросилікатне скло (БСС), а фосфором – фосфоросилікатне скло (ФСС).

Для аналізу перерозподілу домішок у такій структурі з одночасним ростом плівки ДСС математична модель містить систему диференціальних рівнянь в часткових похідних

у нормованому вигляді. Перше диференціальне рівняння описує перерозподіл домішки в ДСС, а друге – в кремнії:

$$\frac{\partial C^*(x^*, y^*, t^*)}{\partial t^*} = H_x \frac{\partial}{\partial x^*} \left\{ D_{\text{ДСС}} \left[ h \frac{\partial C^*(x^*, y^*, t^*)}{\partial x^*} \right] \right\} + H_x \frac{\partial}{\partial y^*} \left\{ D_{\text{ДСС}} \left[ h \frac{\partial C^*(x^*, y^*, t^*)}{\partial y^*} \right] \right\}, \text{ при } x^*, y^* \in \text{ДСС}, \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial C^*(x^*, y^*, t^*)}{\partial t^*} = H_x \frac{\partial}{\partial x^*} \left\{ D_{\text{Si}_2} \left[ h \frac{\partial C^*(x^*, y^*, t^*)}{\partial x^*} - (h-1) \frac{\partial N^*(x^*, y^*)}{\partial x^*} \right] \right\} + \\ + H_x \frac{\partial}{\partial y^*} \left\{ D_{\text{Si}} \left[ h \frac{\partial C^*(x^*, y^*, t^*)}{\partial y^*} - (h-1) \frac{\partial N^*(x^*, y^*)}{\partial y^*} \right] \right\}, \text{ при } x^*, y^* \in \text{Si}, \end{aligned}$$

з початковою умовою:

$$C^*(x^*, y^*, 0) = C^*(x^*, y^*), \quad (9)$$

та крайовими умовами (рис.1):

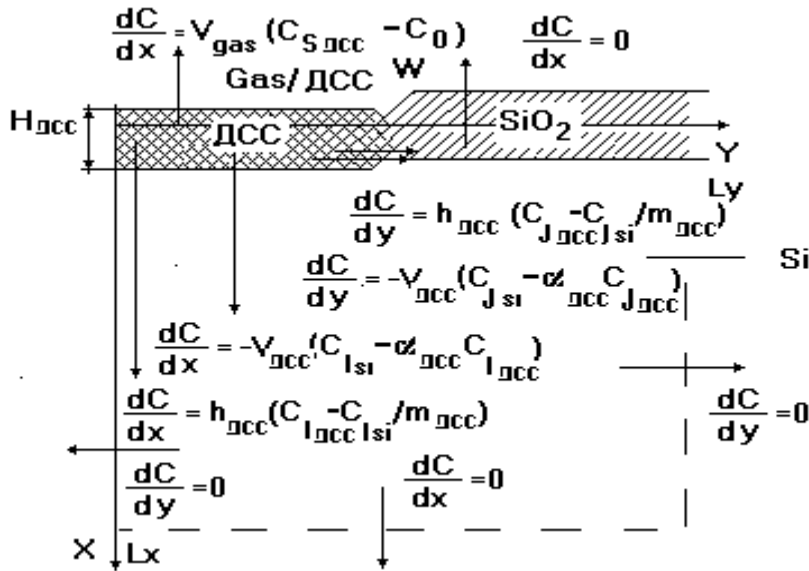


Рис.1. Область розв'язку двовимірної задачі загонки із ростом ДСС та постановка крайових умов

$$\frac{\partial C^*(x^*, y^*, t^*)}{\partial x^*} = V_{\text{GAS-ДСС}} (C_{\text{SДСС}}^* - C_1^*), \quad \text{при } C(x^*, y^*, t^*) \in \text{ДСС/Gas i} \quad (10a)$$

$$\frac{\partial C^*(x^*, y^*, t^*)}{\partial x^*} = 0, \quad \text{при } C(x^*, y^*, t^*) \in \text{Si/Gas i} \quad (10б)$$

$$\frac{\partial C^*(x^*, y^*, t^*)}{\partial x^*} = k_{\text{ДСС}} (C_{\text{ДСС}}^* - C_{\text{Si}}^* / m_{\text{ДСС}}), \quad \text{при } C(x^*, y^*, t^*) \in \text{ДСС/Si}; \quad (10c)$$

$$\frac{\partial C^*(x^*, y^*, t^*)}{\partial x^*} = -V_{\text{ДСС}} (C_{\text{Si}}^* - \alpha_{\text{ДСС}} C_{\text{ДСС}}^*), \quad \text{при } C(x^*, y^*, t^*) \in \text{ДСС/Si}; \quad (10д)$$

$$\frac{\partial C^*(x^*, y^*, t^*)}{\partial x^*} = k_{\text{ДСС}} (C_{\text{ДСС}}^* - C_{\text{Si}}^* / m_{\text{ДСС}}), \quad \text{при } C(x^*, y^*, t^*) \in \text{ДСС/Si}; \quad (10e)$$

$$\frac{\partial C^*(x^*, y^*, t^*)}{\partial x^*} = -V_{\text{ДСС}} (C_{\text{Si}}^* - \alpha_{\text{ДСС}} C_{\text{ДСС}}^*), \quad \text{при } C(x^*, y^*, t^*) \in \text{ДСС/Si}; \quad (10e)$$

$$\frac{\partial C^*(1, y^*, t^*)}{\partial x^*} = 0, \quad \text{при } 0 \leq y^* \leq 1; \quad (10ж)$$

$$\frac{\partial C^*(x^*, 0, t^*)}{\partial y^*} = 0, \quad \text{при } 0 \leq x^* \leq 1; \quad (10з)$$

$$\frac{\partial C^*(x^*, 1, t^*)}{\partial y^*} = 0, \quad \text{при } 0 \leq x^* \leq 1, \quad (10и)$$

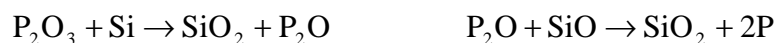
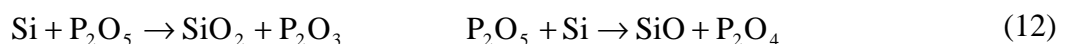
де  $C_{S_{DCC}}^*$  – нормоване значення поверхневої концентрації легуючої домішки на поверхні ДСС;  $V_{GAS-DCC}$  – константа випаровування на межі ДСС/Si;  $k_{DCC}$  – коефіцієнт масоперенесення на межі розділу ДСС/Si;  $m_{дсс}$  – коефіцієнт сегрегації на межі розділу ДСС/Si;  $V_{дсс}$  – швидкість росту плівки ДСС;  $\alpha_{дсс}$  – витрати кремнію на утворення одиниці об'єму ДСС;  $C_{I_{дсс}}^*$  – концентрація легуючої домішки на границі ДСС/Si в плівці ДСС;  $C_{ISi}^*$  – концентрація легуючої домішки на границі ДСС/Si в кремнії;  $h$  – коефіцієнт, який враховує вплив електричного поля на перерозподіл домішок;  $D_{Si_2}$  – коефіцієнт дифузії домішки в кремнії;  $D_{дсс}$  – коефіцієнт дифузії домішки в ДСС;  $N$  – сумарна електрично-активна концентрація домішок протилежного типу провідності відносно основної легуючої домішки.

### Модель росту плівки ДСС

Молекули джерела легуючої домішки проникають до поверхні напівпровідникової пластини через шар рідкого домішково-силікатного скла. На поверхні пластини проходять складні багатостадійні хімічні реакції з вивільненням елементарної легуючої домішки, яка і дифундує у напівпровідникову пластину [4]. Сумарна реакція має такий вигляд :



Для того, щоб уявити складність зазначених реакцій, наведемо для прикладу окремі стадії взаємодії  $P_2O_5$  з поверхнею кремнієвої пластини [5] :



Як зазначають автори роботи [5], через незавершеність хімічних реакцій склоподібний шар на поверхні кремнію утворений із суміші нижчих оксидів фосфору та кремнію. Аналогічний висновок зроблено відносно БСС [6]. Враховуючи складність проходження хімічних реакцій та відсутність інформації про їх константи швидкості, нами зроблено аналітичну модель для обчислення поверхневої концентрації домішкових атомів на основі товщини та складу плівки ДСС.

Під час дифузії в проточному горизонтальному реакторі нарощення плівки товщиною  $G_{tot}$  на кремнієвій пластині за час  $t$  відбувається у результаті двох паралельних процесів: окислення та осадження (рис.2). Це можна записати:

$$G_{tot} = (G_{ox} + G_{dep}) \cdot t, \quad (13)$$



Рис.2. Схематичне зображення плівки на поверхні кремнієвої пластини

де  $G_{\text{ox}}$  – товщина оксидної плівки, яка утворилась внаслідок окислення кремнію (мкм), та  $G_{\text{dep}}$  – товщина плівки ДСС, яка утворилась внаслідок процесу осадження оксиду домішки (мкм). Для обчислення товщини термічно окисленого кремнію  $G_{\text{ox}}$  використовується загальновідома модель Діла-Гроува [1,2,3].

Для розрахунку швидкості осадження плівки  $G_{\text{dep}}$  із врахуванням хімічної взаємодії в газовій фазі в роботі [7] пропонується аналітичний вираз:

$$G_{\text{dep}}(x,y) = AK_s \sqrt{\left[ \frac{1}{\sqrt{C_1(0)C_2(0)}} + \frac{xK_s}{u} \sqrt{a_1 a_2} \frac{R + (R_d^2/d)}{R^2 - R_d^2} + \frac{K_s}{d} \sqrt{\frac{a_1 a_2}{D_1 D_2}} (R_d^2 - y^2) \right]^2}, \quad (14)$$

де  $C_1(0)$ ,  $C_2(0)$  – концентрації вихідних реагентів 1 ( $\text{BBr}_3$ ) та 2 ( $\text{O}_2$ ) в реакційній суміші на вході в зону осадження;  $K_s$  – константа швидкості реакції (2.3.4.11);  $R$ ,  $R_d$  – внутрішній радіус дифузійного реактора і радіус напівпровідникової пластини;  $a_1$ ,  $a_2$  – стехіометричні коефіцієнти в рівнянні хімічної реакції для реагентів 1 та 2;  $D_1$ ,  $D_2$  – коефіцієнти дифузії реагентів 1 та 2 в газовій фазі;  $d$  – відстань між напівпровідниковими пластинами;  $u$  – середня швидкість газового потоку в реакційній зоні між стінкою реактора та краями пластин;  $A = \gamma M / \rho$ ;  $\gamma$  – безрозмірний коефіцієнт, більший за одиницю, який враховує можливість проходження паралельних реакцій на поверхні кремнієвої пластини;  $M$  та  $\rho$  – грам-молекулярна вага та густина плівко-утворюючої речовини;  $x$  – поточна координата вздовж осі дифузійного реактора;  $y$  – відстань від центра напівпровідникової пластини до краю.

Швидкість росту плівки  $G_{\text{dep}}$  (м/с)  $k$ -ої речовини в твердій фазі може бути визначена як [8, 9]:

$$G_{\text{dep}} = \frac{M_k}{\rho_k} \sum_{l=1}^L g_{kl} R_{kl}, \quad (15)$$

де  $M_k$  – молярна маса  $k$ -ої речовини в твердій фазі в кг/моль;  $\rho_k$  – її густина в твердій фазі, кг/м<sup>3</sup>;  $R_{kl}$  – швидкість поверхневої реакції, моль/(м<sup>2</sup> с).

Концентрація атомів домішки в плівці  $N_{10}$  (м<sup>-3</sup>) залежить від товщини плівки ДСС [10]:

$$N_{10} = \frac{2N_A \rho_{\text{dep}} G_{\text{dep}}}{M_{\text{dep}} G_{\text{tot}}}, \quad (16)$$

де  $N_A$  – стала Авогадро,  $\rho_{\text{dep}}$ ,  $M_{\text{dep}}$  – густина (кг/м<sup>3</sup>) та молярна маса (кг/кмоль) оксиду легуючої домішки.

Беручи до уваги, що нарощування склоподібної плівки на поверхні напівпровідникової пластини може відбуватися як при незмінній витраті кисню, коли ДСС зростає за рахунок осадження оксиду домішки, так і в умовах збільшеного парціального тиску  $O_2$ , коли ріст плівки відбувається в основному за рахунок  $SiO_2$ , нами був обчислений і введений в рівняння (16) [10] поправочний коефіцієнт  $\alpha$ , який враховує вміст кисню в газовій суміші. У результаті було отримане модифіковане рівняння для визначення поверхневої концентрації атомів домішки в напівпровіднику  $N_s$  ( $m^{-3}$ ):

$$N_s = \alpha \cdot N_{10} \frac{m\delta}{\delta + 1}, \quad (17)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт, що враховує вміст кисню в газовій суміші (для бору  $\alpha = 1.25 \cdot 10^{-2} / P_{ox}$ , а для фосфору  $\alpha = 1$ );  $m$  – коефіцієнт сегрегації;  $\delta = \sqrt{D_{ox}/D_{si}}/m$ ;  $D_{ox}$  і  $D_{si}$ , відповідно, коефіцієнти дифузії атомів домішки в плівці оксиду та кремнію ( $cm^2/c$ ).

Для бору, згідно з роботою [11], коефіцієнт сегрегації дорівнює:

$$m = A_{seg} \exp(-E_{seg}/kT), \quad (18)$$

де  $T$  – температура технологічного процесу, ( $^{\circ}K$ );  $A_{seg}$  і  $E_{seg}$  – постійна для коефіцієнта сегрегації та енергія активації, відповідно. Їх значення наведені в таблиці.

#### Коефіцієнти для обчислення рівняння (12)

Умови проведення процесу	$A_{seg}$	$E_{seg}$ , eV
Сухе окислення	13.4	0.33
Вологе окислення :		
<100>	65.2	0.66
<111>	104	0.66

Коефіцієнт сегрегації для донорних домішок (фосфор), як правило, приймають дуже великим – (порядку 2000) [12]. Це дозволяє розглядати донорну домішку як таку, що повністю розподілена в кремнії, на відміну від акцепторної домішки (бор), яка перерозподіляється між оксидом та кремнієм, суттєво впливаючи на значення поверхневого опору напівпровідникової області  $R_s$ .

Для обчислення значень коефіцієнта дифузії атомів бору в оксидній плівці використовують емпіричні залежності [13]:

$$\text{для } T < 1100 \text{ } ^{\circ}C \quad D_{ox} = 2.8 \cdot 10^{-4} \exp(-3.06/kT), \quad (19)$$

$$\text{для } T > 1100 \text{ } ^{\circ}C \quad D_{ox} = 5.8 \cdot 10^{-11} \exp(-1.25/kT). \quad (20)$$

Для обчислення значення коефіцієнта дифузії фосфору в плівці  $SiO_2$  залежно від температури застосовують вираз [4]:

$$D_{ox} = 1.86 \cdot 10^{-1} \exp(-4.03/kT). \quad (21)$$

Вираз для обчислення коефіцієнтів дифузії бору та фосфору в кремнії для діапазону температур 900–1275  $^{\circ}C$  є однаковим [14]:

$$D_{si} = 10.5 \exp(-3.69/kT). \quad (22)$$

### Метод розв'язання дифузійної задачі

Для розв'язання задачі (8)–(10и) використано метод змінних напрямків [15,16], який потребує дискретизації двовимірної області моделювання (рис.1), заміни двовимірних диференціальних рівнянь на їх скінченно-різницеві аналоги та розбиття отриманих скінченно-різницевих аналогів рівнянь на два одновимірні скінченно-різницеві апроксимаційні рівняння. Перше апроксимаційне рівняння описує перерозподіл домішки в напрямку осі ОХ, а друге – в напрямку осі ОУ відповідно:

$$-A_i C_{i-1,k}^{*j+1/2} + B_i C_{i,k}^{*j+1/2} - D_i C_{i+1,k}^{*j+1/2} = F_{i,k}^j, \quad (23)$$

де

$$A_i = \frac{D^* \left( C_{i-1/2,k}^{*j} \right) h \left( C_{i-1/2,k}^{*j} \right)}{l_{i-1/2}}, \quad D_i = \frac{D^* \left( C_{i+1/2,k}^{*j} \right) h \left( C_{i+1/2,k}^{*j} \right)}{l_{i+1/2}}, \quad B_i = A_i + D_i + E_i,$$

$$F_i = C_i^j E_i - A_i N_{i-1,k} + (A_i + D_i) N_{i,k} - D_i N_{i+1,k}, \quad E_i = \left[ \frac{(x_{i+1}^* - x_{i-1}^*)}{2\Delta t H_x} \right],$$

$$A_{1i} = \frac{D^* \left( C_{i-1/2,k}^{*j} \right) \left( h \left( C_{i-1/2,k}^{*j} \right) - 1 \right)}{l_{i-1/2}}, \quad D_{1i} = \frac{D^* \left( C_{i+1/2,k}^{*j} \right) \left( h \left( C_{i+1/2,k}^{*j} \right) - 1 \right)}{l_{i+1/2}},$$

при кожному фіксованому  $k=1,2,\dots,N_y-1$  та всіх  $i=1,2,\dots,N_x-1$  і

$$-A_k C_{i,k-1}^{*j+1} + B_k C_{i,k}^{*j+1} - D_i C_{i,k+1}^{*j+1} = F_{i,k}^{j+1/2}, \quad (24)$$

де

$$A_k = \frac{D^* \left( C_{i,k-1/2}^{*j+1/2} \right) h \left( C_{i,k-1/2}^{*j+1/2} \right)}{l_{k-1/2}}, \quad D_k = \frac{D^* \left( C_{i,k+1/2}^{*j+1/2} \right) h \left( C_{i,k+1/2}^{*j+1/2} \right)}{l_{k+1/2}}, \quad B_k = A_k + D_k + E_k,$$

$$F_{i,k}^{j+1/2} = C_i^{j+1/2} E_k - A_{1k} N_{i,k-1} + (A_{1k} + D_{1k}) N_{i,k} - D_{1k} N_{i,k+1},$$

$$A_{1k} = \frac{D^* \left( C_{i,k-1/2}^{*j+1/2} \right) \left( h \left( C_{i,k-1/2}^{*j+1/2} \right) - 1 \right)}{l_{k-1/2}}, \quad E_k = \left[ \frac{(y_{k+1}^* - y_{k-1}^*)}{2\Delta t H_x} \right],$$

$$D_{1k} = \frac{D^* \left( C_{i,k+1/2}^{*j+1/2} \right) \left( h \left( C_{i,k+1/2}^{*j+1/2} \right) - 1 \right)}{l_{k+1/2}},$$

при кожному фіксованому  $i=1,2,\dots,N_x-1$  та всіх  $k=1,2,\dots,N_y-1$ .

У виразах (23) та (24):  $N_x$  – кількість вузлів за координатою  $x$ ;  $N_y$  – кількість вузлів за координатою  $y$ ;  $\Delta t$  – крок за часом;  $y_k$  – значення координати  $y$  у вузлі з номером  $k$ ;  $x_i$  – значення координати  $x$  у вузлі з номером  $i$ ;  $C_{i,k}^{j+1/2}$  – значення концентрації домішки у вузлі з номерами  $(i,k)$  на  $j+1/2$ -у кроці по часу;  $C_{i,k}^{j+1}$  – значення концентрації домішки в вузлі з номерами  $(i,k)$  на  $j+1$ -у кроці за часом;  $D \left( C_{i+1/2,k}^j \right)$  – коефіцієнт дифузії як функція від

концентрації  $C_{i+1/2,k}^j$ ;  $H_{i+1/2} = (x_{i+1} - x_i)/2$ ;  $H_{k+1/2} = (y_{k+1} - y_k)/2$ ;  $h(C_{i,k-1/2}^{j+1/2})$  – коефіцієнт, який враховує вплив електричного поля на процес перерозподілу домішок.

У результаті при обчисленні як по осі X, так і по осі Y ми отримуємо систему лінійних алгебраїчних рівнянь, для розв'язання якої використовується метод прогонки [15].

### Основні результати

Запропонована математична модель дозволяє підвищити точність моделювання вихідних параметрів першої стадії дифузії та дослідити залежність поверхневого опору від складу ДСС.

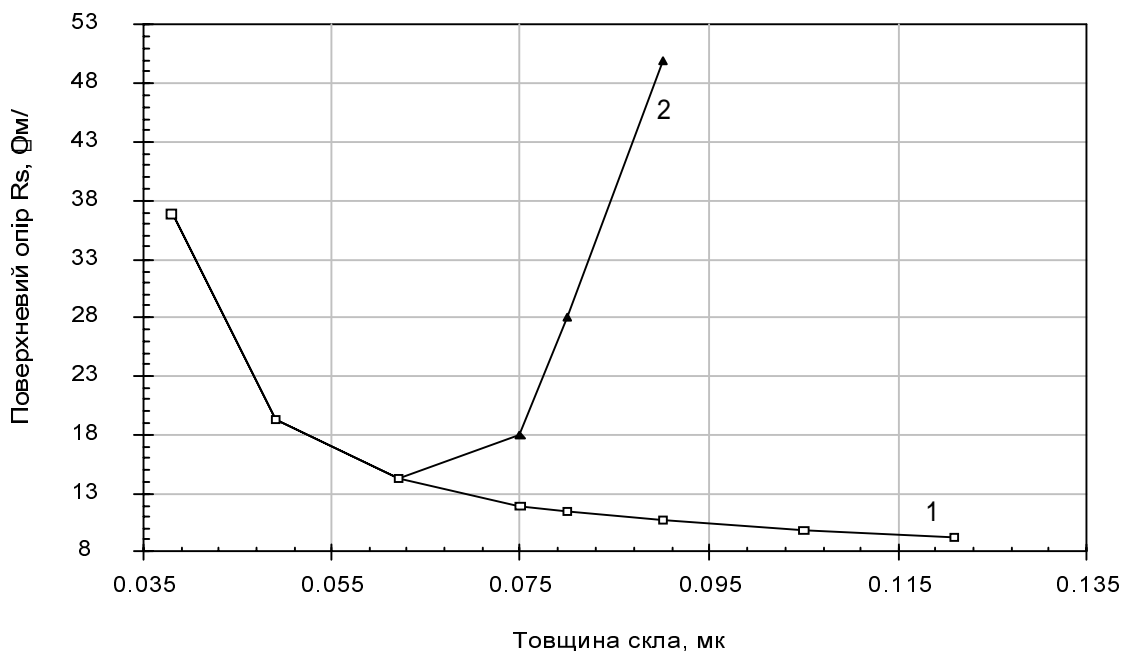


Рис. 3. Залежність поверхневого опору легованої області від товщини та складу ДССЖ:  
 1 –  $G_{Ox} = const$ ,  $G_{dep}$  – змінне значення, яке характеризує зміну концентрації легуючої домішки в ДСС; 2 –  $G_{dep} = const$ ,  $G_{Ox}$  – змінне значення, яке визначає ріст плівки, в основному, за рахунок термічного окислення кремнію

Загальна залежність поверхневого опору від товщини скла наведена на рис.3. Залежно від механізму утворення плівки скла на поверхні напівпровідникової пластини спостерігається її різний вплив на  $R_s$ . Із ростом товщини плівки скла за рахунок осадження оксиду домішки  $R_s$  зменшується, а внаслідок окислення кремнієвої пластини при постійній кількості оксиду домішки  $R_s$  зростає.

1. Бубенников А.Н. Моделирование интегральных микротехнологий, приборов и схем. М., 1989. 2. Dutton R.W., Yu Z. Technology CAD. Computer simulation of IC processes and devices. Boston / Dordrecht / London, Kluwer Academic Publishers, 1993. 3. Антонетти П., Антониадиса Д., Даттона Р., Оулдхема У. МОП - СБИС. Моделирование элементов и технологических процессов: Пер. с англ. М., 1988. 4. Мальшева И.А. Технология производства интегральных микросхем. М., 1991. 5. Дягилев В.Н., Егоров Г.А., Мишуровская М.И. и др. Особенности взаимодействия фосфорносиликатного стекла и кремния // Электронная техника. Сер.3. Микроэлектроника. Вып. 5(77). 1978. С.93–96. 6. Гапеева Т.П., Дягилев В.Н., Коледов Л.А. и др. Влияния взаимодействия боросиликатного стекла с кремнием на



характеристики диффузионних слоев // Сб. научн. трудов по проблемам микроэлектроники. Хим. серия. Вып. XIX. 1974. С.22–30. 7. Дягилев В.Н., Коледов Л.А., Ганеева Т.П. Условия получения равномерных по толщине и концентрации диффузанта слоев боросиликатного стекла // Сб. научн. трудов по проблемам микроэлектроники. Хим. Серия. Вып. XIX. 1974. С.17–21. 8. Kleijn C.R. A mathematical model of the hydrodynamics and gas-phase reactions in silicon LPCVD in a single-wafer reactor // J. Electrochem. Soc. 1991. Vol.138. No 7. P. 2190–2200. 9. Kuijlaars K.J., Kleijn C.R., van den Akker H.E.A. Modeling of gas-phase and surface chemistry in Phoenix-CVD // The PHOENICS journal of computational fluid dynamics and its applications. 1995. Vol.8. № 4. P.439–454. 10. Борисенко А.И., Новиков В.В., Прихидько Н.Е. и др. Тонкие неорганические пленки в микроэлектронике. Л., 1972. 11. MicroTec Software Package for Two-Dimensional Process and Device Simulation, Version 3. 03 for Windows. - User's Manual, Siborg Systems Inc, 1998. 12. Бубенников А.Н, Садовников А.Д. Физико-технологическое проектирование биполярных элементов кремниевых БИС. М., 1991. 13. Курносов А.И. Материалы для полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. М., 1980. С.128–151. 14. Основы технологии кремниевых интегральных схем: Окисление, диффузия, эпитаксия: Пер. с англ. / Под ред. Р. Бургера и Р. Донована. М., 1969. 15. Тихонов А.Я., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М., 1966. 16. Молчанов И.Н. Машинные методы решения прикладных задач. Дифференциальные уравнения. К., 1988.

УДК621.376+681.513

Дунець Р.Б.

Українська академія друкарства

## МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ БЛОКІВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЛІНІЙ, ЩО УТВОРЮЮТЬ КРИТИЧНІ ШЛЯХИ

© Дунець Р.Б., 2000

**Запропоновано метод визначення блоків технологічних ліній, що утворюють критичні шляхи, який враховує можливі взаємозв'язки між різними критичними шляхами. Як модель технологічних ліній застосовано матриці суміжностей.**

Все частіше в поліграфії ставиться вимога – випуск продукції за визначений замовником строк. Цю вимогу може задовольнити оперативна поліграфія, технологічні лінії якої комплектуються відносно дешевим обладнанням, що є на ринку в достатньо широкому асортименті [1]. Для забезпечення таких вимог виникає потреба аналізу можливостей технологічної лінії, пошуку найбільш трудомістких технологічних операцій та їх розвантаження паралелізацією виконання. У роботі [2] запропоновано метод оптимізації, що базується на понятті критичного шляху як множини взаємозв'язаних блоків технологічних операцій, що утворює послідовне з'єднання і має максимальний сумарний час їх роботи. Проте цей метод, з одного боку, не враховує можливу появу нових критичних шляхів після паралелізації найбільш трудомістких технологічних операцій, а з другого боку, не завжди дозволяє коректно виявляти блоки при наявності декількох взаємозв'язаних критичних шляхів в технологічній лінії. Запропоновано метод, що не має вказаних недоліків.