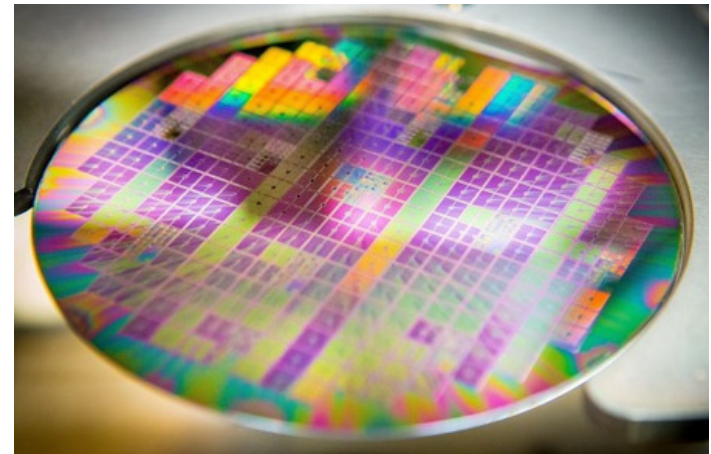


**С. М. Павлов, О. В. Войцеховська**

**ТЕХНОЛОГІЯ МІКРОЕЛЕКТРОННИХ  
ЗАСОБІВ**



Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

**С. М. Павлов, О. В. Войцеховська**

# **ТЕХНОЛОГІЯ МІКРОЕЛЕКТРОННИХ ЗАСОБІВ**

**ЗБІРНИК ЗАВДАНЬ**

Вінниця  
ВНТУ  
2017

УДК 621.382  
ББК 32.85я73  
П12

Рекомендовано до друку Вченою Радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 4 від 27.11.2014 р.)

Рецензенти:

**В. П. Манойлов**, доктор технічних наук, професор

**В. С. Осадчук**, доктор технічних наук, професор

**С. М. Злепко**, доктор технічних наук, професор

**Павлов, С. М.**

П12 Технологія мікроелектронних засобів : збірник завдань /  
С. М. Павлов, О. В. Войцеховська. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 77 с.

В збірнику задань розглянуто основні процеси технології мікроелектронних засобів, зокрема процеси механічної обробки та підготовки напівпровідникових пластин, а також такі методи отримання структур, як епітаксіальне нарощування, фотолітографія, дифузія, іонна імплантація, термічне випаровування та іонно-плазмове розпилювання. Крім того, викладено питання щодо радіаційної обробки пластин та складання мікроелектронних засобів.

**УДК 621.382**  
**ББК 32.85я73**

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 ОТРИМАННЯ СТРУКТУР МЕТОДОМ ДИФУЗІЇ .....	6
1.1 Методи розрахунків дифузійних структур.....	6
1.2 Розрахунок розподілу домішок при дифузії з шару скінченної товщини.....	9
1.3 Розрахунок розподілу домішок у випадку подвійної послідовної дифузії .....	12
1.4 Визначення режимів дифузії.....	16
1.4.1 Визначення режимів дифузії на основі заданих параметрів розподілу домішки .....	16
1.4.2 Визначення режимів послідовної дифузії .....	20
2 ОТРИМАННЯ СТРУКТУР МЕТОДОМ ІОННОЇ ІМПЛАНТАЦІЇ .....	25
2.1 Методи розрахунків іонно-імплантованих структур .....	25
2.1.1 Розрахунок профілів розподілу концентрації прониклих домішок в структурах з подвійною імплантацією.....	25
2.1.2 Розрахунок розподілу концентрації домішки в двошарових структурах.....	28
2.1.3 Розрахунок розподілу концентрації домішок у випадку розпилення частини іонно-імплантованого шару.....	31
2.2 Визначення режимів імплантації.....	32
2.2.1 Розрахунок енергії іонів, необхідної для отримання заданого пробігу.....	32
2.2.2 Розрахунок дози опромінення, необхідної для отримання заданої концентрації домішок .....	35
2.2.3 Розрахунок режимів імплантації для створення транзисторної структури .....	36
3 ОТРИМАННЯ СТРУКТУР МЕТОДАМИ ТЕРМІЧНОГО ВИПАРОВУВАННЯ ТА ІОННО-ПЛАЗМОВОГО РОЗПИЛЕННЯ .....	39
3.1 Співвідношення потоків газу та пари на підкладках .....	39

3.1.1 Випаровування елементів.....	41
3.2 Катодне розпилення матеріалів .....	42
3.2.1 Гліючий розряд .....	42
3.2.2 Механізм розпилення .....	42
3.2.3 Коефіцієнт розпилення .....	43
3.3 Розрахунок параметрів тонкоплівкових елементів .....	46
3.3.1 Конструкції та розрахунок плівкових резисторів.....	46
3.3.2 Конструкції та розрахунок плівкових конденсаторів .....	53
3.3.3 Конструкції та розрахунок плівкових індуктивностей.....	60
ЛІТЕРАТУРА.....	65
ДОДАТОК А .....	66

## ВСТУП

Виникнення напівпровідникової технології тісно пов'язане з появою транзистора. У 1947 р. був винайдений германієвий транзистор з точковими переходами. У 1950 р. методом вирощування злитка германію з розплаву був виготовлений перший площинний транзистор з *p-n-p*-структурою, а у 1952 р. були виготовлені перші промислові зразки таких транзисторів. Почав розвиватися метод сплавлення і в 1953 р. були виготовлені германієві сплавні транзистори з відносно тонкою (близько 5 мкм) базою, що одержується локальним струменевим електролітичним травленням пластин германію. У 1954 р. з'явилися перші кремнієві транзистори з вирощеним *p-n*-переходом.

Одночасно з розробкою нових приладів розвивалися і технологічні методи їх виготовлення. В першій половині 50-х років розроблено процес дифузії домішок в напівпровідникові матеріали та в 1956 р. почалося виробництво транзисторів з базою, що отримана методом дифузії. Метод дифузії відрізнявся від методів сплаву і вирощування злитка тим, що дозволяв на порядок збільшити точність задання потрібної товщини базової області і перейти до групового способу виробництва транзисторів.

На початку 60-х років був розроблений планарний процес. Вирощування ізолювального шару діоксида кремнію на поверхні кремнієвої підкладки та отримання в ньому топологічного рисунка за допомогою фотолітографії дали можливість здійснювати прецизійний контроль за розмірами елементів напівпровідникової структури. Також в 1960 р. було розроблено епітаксіальне нарощування шарів напівпровідників необхідних товщини та електричних властивостей на монокристалічній підкладці.

Збірник завдань містить три розділи, які присвячені питанням отримання структур методами дифузії, іонної імплантації, термічного випарування та іонно-плазмового розпилення, відповідно. Кожен розділ містить методики розрахунків, приклади розв'язання завдань та варіанти для самостійного виконання подібних завдань студентами.

Збірник завдань розрахований на студентів, що навчаються за навчальним планом підготовки спеціалістів та магістрів за спеціальністю «Телекомунікації та радіотехніка» спеціалізація «Радіоелектронні апарати та засоби».

Рисунок для оформлення обкладинки збірника завдань взято з [12].

# 1 ОТРИМАННЯ СТРУКТУР МЕТОДОМ ДИФУЗІЇ

## 1.1 Методи розрахунків дифузійних структур

При проведенні розрахунків дифузійних структур вирішують два основні типи задач: визначення профілю розподілу концентрації домішок на основі заданого технологічного режиму (пряма задача) і визначення режиму процесу дифузії на підставі параметрів кінцевого розподілу домішок в структурі (обернена задача). Розглянемо приклади розв'язання прямих задач.

**Розрахунок розподілу домішки в випадку дифузії, яка проводиться в дві стадії.** Як зазначалося, особливістю дифузії в планарній технології є розбиття її на дві стадії. Стадія загонки домішок відбувається протягом короткого часу  $t_1$  при незмінній поверхневій концентрації  $C_{01}$ . Введена при загонці певна кількість домішкових атомів  $N$  ( $at/cm^2$ ) слугує джерелом дифузанта при подальшій розгонці протягом часу  $t_2$  з поверхневою концентрацією домішки, яка постійно змінюється в часі:

$$C_{02} = N / \sqrt{\pi D_2 t_2},$$

де  $D$  – коефіцієнт дифузії домішки ( $cm^2/c$ ).

Для побудови профілю розподілу домішки в випадку дифузії, яка відбувається в дві стадії, необхідно знати температури і тривалості загонки і розгонки. Температура  $T_1$  задає коефіцієнт дифузії домішки  $D_1$  і поверхневу концентрацію  $C_{01}$ , обумовлену граничною розчинністю домішки.

Поверхнева щільність атомів домішки, введених на стадії загонки, визначається інтегруванням розподілу домішки за глибиною  $x$ :

$$N = \int_0^{\infty} C(x) dx = \int_0^{\infty} C_{01} \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{D_1 t_1}} dx = 2C_{01} \sqrt{\frac{D_1 t_1}{\pi}}. \quad (1.1)$$

Розподіл домішки після стадії розгонки визначається виразом

$$C(x, t) = \frac{2C_0}{\pi} \sqrt{\frac{D_1 t_1}{D_2 t_2}} \exp\left(-\frac{x^2}{4D_2 t_2}\right) = \frac{N}{\sqrt{\pi D_2 t_2}} \exp\left(-\frac{x^2}{4D_2 t_2}\right). \quad (1.2)$$

**Приклад 1.** Побудувати профіль розподілу домішок і визначити глибину залягання  $p$ - $n$ -переходу у випадку двостадійної дифузії фосфору в кремній з електропровідністю  $p$ -типу з питомим опором  $\rho_p$  ( $Om \cdot cm$ ), яка проводиться в режимі:  $T_1$  ( $^{\circ}C$ ),  $t_1$  ( $xв$ ),  $T_2$  ( $^{\circ}C$ ),  $t_2$  ( $год$ ).

Методика розрахунку

1. Визначаємо  $C_{01}$ . Використовуючи рис. 1.1, знайдемо значення граничної розчинності фосфора в кремнії при  $T_1$  ( $^{\circ}\text{C}$ ). Це і буде  $C_{01}$ .

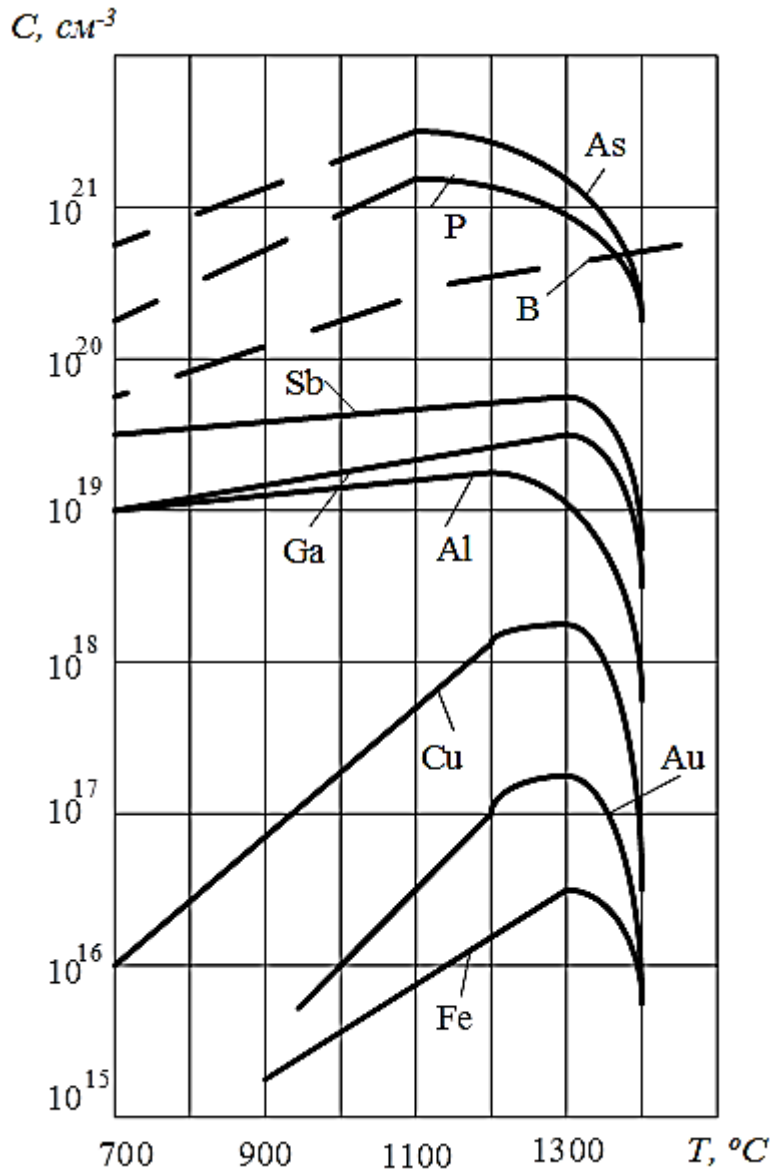


Рисунок 1.1 – Залежність граничної розчинності домішкових елементів в кремнії від температури

2. Визначаємо  $D_1$  ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ) за допомогою рис. А.1, а для  $T_1$  ( $^{\circ}\text{C}$ ).
3. Обчислимо  $N$ :

$$N = 2C_{01} \sqrt{\frac{D_1 t_1}{\pi}} \quad (\text{cm}^{-2}).$$

4. Визначаємо  $D_2$  ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ) за допомогою рис. А.1, а для  $T_2$  ( $^{\circ}\text{C}$ ).
5. Побудуємо криву розподілу:



$$C(x,t) = \frac{N}{\sqrt{\pi D_2 t_2}} \exp\left(-\frac{x^2}{4D_2 t_2}\right).$$

Профіль розподілу концентрації фосфору після розгонки показників подано на рис. 1.2. Для порівняння там же наведена крива розподілу фосфору після стадії загонки:

$$C(x,t) = C_{01} \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{D_1 t_1}}.$$

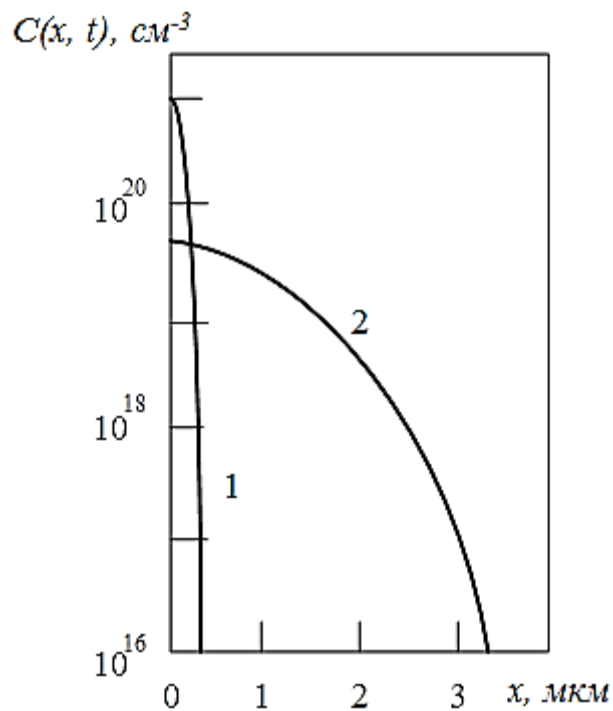


Рисунок 1.2 – Розрахункові профілі розподілу фосфору після загонки (1) і розгонки (2)

6. Визначаємо глибину залягання  $p$ - $n$ -переходу.

$$x_j = 2\sqrt{D_2 t_2} \sqrt{\ln(C_{02} / C_B)}.$$

Значення концентрації домішок у вихідній пластині  $C_B$  ( $\text{cm}^{-3}$ ) знайдемо за допомогою кривої  $\rho=f(c)$  на рис. А.2 для  $\rho_p$  (Ом·см).

7. Знайдемо  $x_j$  за спрощеною формулою:

$$x_j = 6\sqrt{D_2 t_2}.$$

Після отримання результату порівнюються значення  $x_j$ , робиться висновок про те, наскільки шукана величина близька до точного значення.

## Завдання для самостійного виконання

Таблиця 1.1 – Варіанти завдань та початкові дані для розрахунку

Початкові дані	Варіант		
	1	2	3
Питомий опір $\rho_{p_2}$ (Ом·м)	10	10	10
Температура $T_1$ , (°C)	1050	900	1150
Температура $T_2$ , (°C)	1150	1000	1350
Час $t_1$ , (хв)	10	20	5
Час $t_2$ , (год)	2	3	0,5

### 1.2 Розрахунок розподілу домішок при дифузії з шару скінченної товщини

Розглянутий приклад 1 показує, що при виконанні умови  $D_1 t_1 < D_2 t_2$ , форма профілю розподілу домішки на стадії загонки не впливає на профіль розподілу після розгонки, оскільки глибини залягання цих розподілів неможливо порівняти.

Якщо умова  $D_1 t_1 < D_2 t_2$  не виконується, то глибина дифузії на стадії розгонки порівнянна з глибиною дифузії на стадії загонки, тому не можна вважати, що розгонка здійснюється з нескінченно тонкого шару з обмеженим вмістом домішки. У цьому випадку отримуємо комбінований розподіл, який визначається розв'язанням рівняння Фіка для дифузії з шару скінченної товщини:

$$C(x, t_1, t_2) = \frac{2C_{01}}{\pi} \int_{\sqrt{z}}^{\infty} \exp(-y^2) \operatorname{erf}(\alpha y) dy, \quad (1.3)$$

де  $y$  – змінна інтегрування;

$$z = \frac{x^2}{4(D_1 t_1 + D_2 t_2)};$$

$$\alpha = \sqrt{D_1 t_1 / (D_2 t_2)}.$$

Поверхнева концентрація після стадії розгонки  $C_{02} = C(x = 0, t_1, t_2)$

$$C_{02} = \frac{2}{\pi} C_{01} \operatorname{arctg} \alpha.$$

Інтеграл (1.3) розрахований і занесений до таблиці для різних значень  $\alpha$  і  $z$  (табл. 1.2).

Таблиця 1.2 – Значення інтеграла для різних значень  $\alpha$  і  $z$ 

$\alpha$	$z$						
	0,1	0,3	0,5	1,0	2,0	3,0	5,0
0,1	0,09015	0,07376	0,06035	0,03655	0,01340	0,00491	0,00066
0,3	0,26295	0,21403	0,17422	0,10416	0,03725	0,01333	0,00174
0,5	0,41626	0,33557	0,27058	0,15812	0,05419	0,01866	0,00224
0,7	0,54464	0,43340	0,34515	0,19596	0,06398	0,02120	0,00242
0,9	0,64829	0,50812	0,39903	0,21979	0,06867	0,02213	0,00245
1,5	0,84509	0,63065	0,47586	0,24431	0,07141	0,02247	0,00246
3,0	0,99920	0,68698	0,49825	0,24708	0,07147	0,02247	0,00246
	1,02843	0,68892	0,49843	0,24709	0,07147	0,02247	0,00246

**Приклад 2.** Розрахувати розподіл домішки для дифузії в фосфор, яка проходить у дві стадії і проводиться в режимі:  $T_1$  ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $t_1$  (хв),  $T_2$  ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $t_2$  (год). Визначити глибину залягання  $p$ - $n$ -переходу.

*Методика розрахунку*

1. За допомогою рис. А.1,  $a$  визначаємо коефіцієнти дифузії фосфору в кремній:  $D_1$  ( $\text{см}^2/\text{с}$ ),  $D_2$  ( $\text{см}^2/\text{с}$ ).
2. Оскільки  $D_1 t_1 \approx D_2 t_2$  ( $\text{см}^2$ ), то потрібно використати формулу (1.3).
3. Визначимо  $\alpha$  та  $z$ .
4. Визначаємо поверхневу концентрацію після розгонки. Для цього згідно з кривою  $C=f(T)$  на рис. 1.1 при  $T_1$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) визначаємо  $C_{01}$  ( $\text{см}^{-3}$ ).
5. Поверхнева концентрація після розгонки

$$C_{02} = \frac{2}{\pi} C_{01} \arctg \alpha \left( \text{см}^{-3} \right).$$

6. Побудуємо розподіл. Використовуючи табл. 1.2, задамо значення  $z$  і визначимо для конкретного  $\alpha$  значення інтеграла. При побудові графіка знайдемо глибину ( $\text{см}$ ):

$$x = 2\sqrt{(D_1 t_1 + D_2 t_2)} z.$$

7. На стадії загонки розподіл домішки буде мати вигляд

$$C(x, t) = C_{01} \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{D_1 t_1}}.$$

На рис. 1.3 показано обидва профілі – після загонки 1 і після розгонки 2. Вже на стадії загонки глибина дифузії становить близько  $\frac{3}{4}$  повної глибини після розгонки.

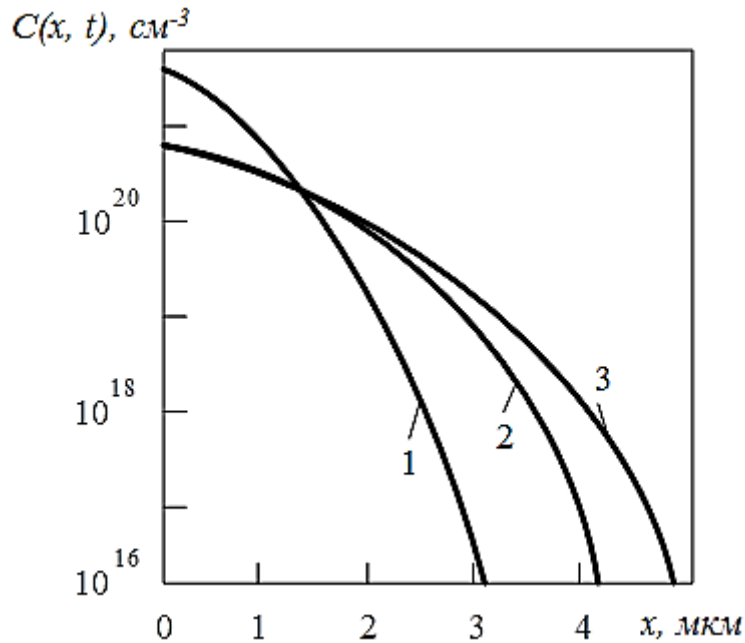


Рисунок 1.3 – Розрахункові профілі розподілу фосфору при дифузії, яка відбувається в дві стадії

8. Глибину залягання *p-n*-переходу визначаємо за наближеною формулою, в якій врахуємо наявність двох порівнянних за глибиною дифузії стадій:

$$x_j = 6\sqrt{D_1t_1 + D_2t_2} \text{ (мкм)}.$$

9. Для порівняння побудуємо профіль розподілу без урахування реального співвідношення між  $D_1t_1$  та  $D_2t_2$ , використовуючи криву Гауса при  $(Dt)_{ef} = D_1t_1 + D_2t_2$ :

$$C(x) = \frac{N}{\sqrt{\pi(Dt)_{ef}}} \exp\left(-\frac{x^2}{4(Dt)_{ef}}\right),$$

де

$$N = 2C_{01}\sqrt{\frac{D_1t_1}{\pi}} \text{ (см}^{-2}\text{)}.$$

Далі обраховується  $C(x)$ .

Цей розподіл подано на рис. 1.3 кривою 3, яка добре апроксимує криву 2 на малих глибинах, але при  $x > 4$  мкм завищує концентрацію майже на порядок.

## Завдання для самостійного виконання

Таблиця 1.3 – Варіанти завдань та початкові дані для розрахунку

Початкові дані	Варіант		
	1	2	3
Температура $T_1, (^{\circ}C)$	1250	950	1300
Температура $T_2, (^{\circ}C)$	1150	850	1200
Час $t_1, (xв)$	10	5	25
Час $t_2, (год)$	2	1	3

### 1.3 Розрахунок розподілу домішок у випадку подвійної послідовної дифузії

При виготовленні дифузійних транзисторів, тиристорів, варикапів і багатьох інших приладів та інтегральних мікросхем активну структуру отримують шляхом послідовної дифузії домішок, що створюють шари з різним типом електропровідності. Якщо проводиться подвійна послідовна дифузія акцепторної домішки з параметрами  $C_{0a}, D_a, t_a$ , а потім донорної домішки з параметрами  $C_{0d}, D_d, t_d$  у напівпровідник з електропровідністю  $n$ -типу, рівномірно легований домішкою з концентрацією  $C_B$ , то сумарний розподіл концентрації має вигляд

$$C(x, t) = C_{0a} \exp\left(-\frac{x^2}{4D_a t_a}\right) - C_{0d} \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{D_d t_d}} - C_B. \quad (1.4)$$

Оскільки атоми акцепторної та донорної домішок взаємно компенсують один одного, то при розрахунку профілю розподілу значенням концентрацій надають додатний (для акцепторів) і від'ємний (для донорів) знаки або навпаки. Перша дифузія є глибшою, наступна – більш поверхневою, але з вищою концентрацією, тому при подвійній послідовній дифузії будуть отримані структури  $n$ - $p$ - $n$  згідно з формулою (1.4) або  $p$ - $n$ - $p$ , якщо поміняти місцями типи домішок. Такий розподіл є типовим при отриманні структури дифузійного транзистора. Першу дифузію з низькою поверхневою концентрацією і великою глибиною називають базовою. Вона слугує для створення базової  $p$ -області. Другу дифузію з високою поверхневою концентрацією і малою глибиною називають емітерною. Вона призначена для одержання емітерної області з електропровідністю  $n$ -типу.

Базову дифузію здійснюють у дві стадії, тому її внесок у сумарний розподіл (1.4) відображено у вигляді кривої Гаусса, тоді як емітерну дифузію зазвичай проводять в одну стадію і розподіл домішки описується  $\operatorname{erfc}$ -функцією. Вираз (1.4) справедливий тільки в тому випадку, якщо під час емітерної дифузії не відбувається помітного переміщення акцепторної домішки. У більш загальному випадку

$$C(x,t) = C_{0a} \exp\left(-\frac{x^2}{4(D_a t_a + D_a^* t_\delta)}\right) - C_{0\delta} \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{D_\delta t_\delta}} - C_B, \quad (1.5)$$

де

$$C_{0a} = \frac{N_a}{\sqrt{\pi(D_a t_a + D_a^* t_\delta)}}; \quad (1.6)$$

$D_a^*$  – коефіцієнт дифузії акцепторів при температурі дифузії донорів.

Для визначення глибини залягання емітерного  $p$ - $n$ -переходу прирівнюємо сумарну концентрацію до 0 і враховуємо, що  $C_B$  в багато разів менша за концентрацію дифундувальних донорів і акцепторів. Тоді для розподілу (1.4)

$$C_{0\delta} \operatorname{erfc} \frac{x_{je}}{2\sqrt{D_\delta t_\delta}} = C_{0a} \exp\left(-\frac{x_{je}^2}{4D_a t_a}\right).$$

Скористаємося апроксимацією  $\operatorname{erfc}$ -функції:

$$C_{0\delta} \exp\left(-\left(\frac{x_{je}}{2\sqrt{D_\delta t_\delta}} + 0,3\right)^2\right) = C_{0a} \exp\left(-\frac{x_{je}^2}{4D_a t_a}\right). \quad (1.7)$$

Перетворюючи (1.7), отримаємо

$$x_{je} = \left[ \left( \frac{1}{2\sqrt{D_\delta t_\delta}} + \frac{0,3}{x_{je}} \right)^2 - \frac{1}{4D_a t_a} \right]^{-1/2} \sqrt{\ln\left(\frac{C_{0\delta}}{C_{0a}}\right)}. \quad (1.8)$$

Це рівняння розв'язується методом ітерацій, беручи за початкове значення

$$x_{je0} = 6\sqrt{D_\delta t_\delta}, \quad (1.9)$$

тоді

$$x_{je1} \approx \left( \frac{1}{4D_\delta t_\delta} - \frac{1}{4D_a t_a} \right)^{-1/2} \sqrt{\ln\left(\frac{C_{0\delta}}{C_{0a}}\right)}. \quad (1.10)$$

Уточнене значення глибини залягання емітерного  $p$ - $n$ -переходу

$$x_{je} = \left[ \left( \frac{1}{2\sqrt{D_\delta t_\delta}} + \frac{0,3}{x_{je1}} \right)^2 - \frac{1}{4D_a t_a} \right]^{-1/2} \sqrt{\ln\left(\frac{C_{0\delta}}{C_{0a}}\right)}. \quad (1.11)$$

При визначенні глибини залягання колекторного переходу необхідно врахувати його зміщення при емітерній дифузії, тому

$$x_{jk} = 2\sqrt{D_a t_a + D_a^* t_a} \sqrt{\ln\left(\frac{C_{0a}}{C_B}\right)},$$

де  $C_{0a}$  визначається за формулою (1.6).

**Приклад 3.** Розрахувати профіль розподілу концентрації домішки в  $p$ - $n$ -структурі, яка отримана послідовною дифузією бору і фосфору в кремній з електропровідністю  $n$ -типу і питомим опором  $\rho_p$  (Ом·см) та проводиться в режимах:  $T_a$  (°C),  $t_a$  (год),  $T_\delta$  (°C),  $t_\delta$  (год), поверхнева щільність атомів бору  $N_a$  (см<sup>-2</sup>), дифузія фосфору проводиться із необмеженого джерела домішки з поверхневою концентрацією, яка дорівнює граничній розчинності.

#### Методика розрахунку

1. За допомогою рис. А.2 знайдемо концентрацію донорної домішки у вихідній пластині кремнію  $C_B$  (см<sup>-3</sup>).

2. Визначаємо коефіцієнти дифузії. З рис. А.1,  $a$  знаходимо  $D_a$ , (см<sup>2</sup>/с);  $D_a^*$ , (см<sup>2</sup>/с);  $D_\delta$ , (см<sup>2</sup>/с). З рис. 1.1 –  $C_{0\delta}$ , (см<sup>-3</sup>).

Порівняємо добутки  $D_a \cdot t_a$  і  $D_a^* \cdot t_\delta$ .

Якщо  $D_a \cdot t_a \gg D_a^* \cdot t_\delta$ , то для побудови розподілень можна використати формулу (1.4):

$$C(x, t) = C_{0a} \exp\left(-\frac{x^2}{4D_a t_a}\right) - C_{0\delta} \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{D_\delta t_\delta}} - C_B,$$

де

$$C_{0a} = \frac{N_a}{\sqrt{\pi D_a t_a}}, \text{ (см}^{-3}\text{)}.$$

4. Для раціонального вибору кроку по осі  $x$  при побудові розподілу визначимо глибину залягання колекторного і емітерного переходів:

$$x_{jk} = 2\sqrt{D_a t_a} \sqrt{2,3 \lg\left(\frac{C_{0a}}{C_B}\right)}, \text{ (мкм).}$$

Для визначення глибини залягання емітерного переходу використовуємо формули (1.9) – (1.11).

Побудуємо розподіл  $C(x,t)$ . До глибини  $x = 1,2$  мкм використовуємо крок 0,3 мкм, на глибинах  $x = 1,5$ – 3,5 мкм використовуємо крок 0,5 мкм. Зазвичай такий розподіл прийнято подавати у вигляді окремих кривих (рис. 1.4). За допомогою кривих можна знайти глибину залягання емітерного і колекторного переходів за точками перетину. На рис. 1.4 також показано розподіл концентрації домішки в вихідній епітаксiальній структурі з товщиною епітаксiального шару 5,5 мкм та концентрацією домішки в підкладці  $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Товщина області бази  $p$ -типу:

$$\omega = x_{jk} - x_{je}, \text{ (мкм).}$$

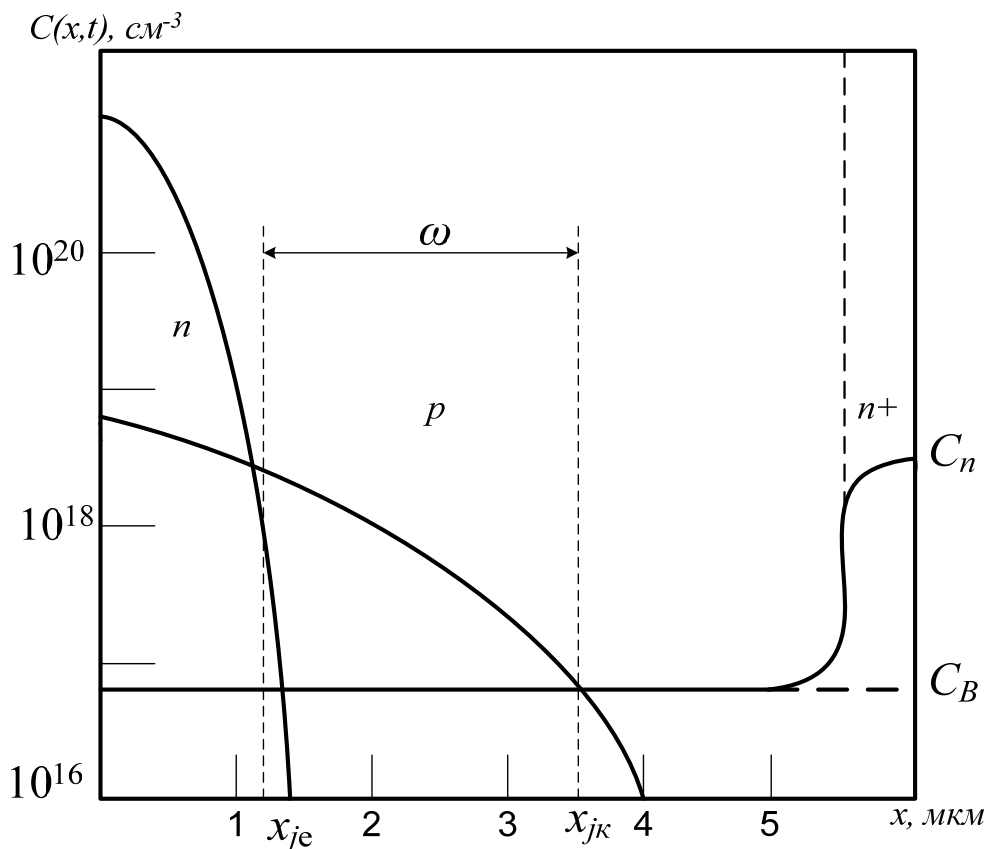


Рисунок 1.4 – Розрахункові профілі розподілу домішки в  $p$ - $n$ - $p$ -транзисторі, отриманому подвійною послідовною дифузією



## Завдання для самостійного виконання

Таблиця 1.4 – Варіанти завдань та початкові дані для розрахунку

Початкові дані	Варіант		
	1	2	3
Питомий опір $\rho_{p_2}$ (Ом м)	0,15	0,25	0,5
Температура $T_a$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	1200	1100	1300
Температура $T_{\delta}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	1100	1000	1200
Час $t_a$ (год)	1	1	1,5
Час $t_{\delta}$ (год)	2	1,5	2
Поверхнева щільність атомів бора $N_a$ ( $\text{см}^{-2}$ )	$5 \cdot 10^{14}$	$4 \cdot 10^{14}$	$6 \cdot 10^{14}$

### 1.4 Визначення режимів дифузії

Перейдемо до розв'язання обернених задач. Обернені задачі мають велике практичне значення. Вони не однозначні відносно вибору температури і тривалості процесу дифузії. Вибір цих параметрів визначає конкретні особливості технологічного процесу і можливості технологічного обладнання. Строге розв'язання обернених задач приводить до визначення добутоків  $Dt$ . Далі найчастіше задаються температурою  $T$  і за знайденим значенням коефіцієнта дифузії визначають тривалість дифузії  $t$ . Інколи у виборі режимів слід враховувати не лише температурну залежність коефіцієнта дифузії, а й граничну розчинність домішки.

#### 1.4.1 Визначення режимів дифузії на основі заданих параметрів розподілу домішки

Для розрахунку стадії розгонки або одноетапної дифузії обернена задача досить проста. Нехай дифузія проводиться із попередньо створеного за допомогою іонної імплантації шару з обмеженим вмістом домішки, тоді на основі формули

$$x_j = 2\sqrt{Dt} \sqrt{\ln(C_0 / C_B)}$$

запишемо

$$Dt = \frac{x_j^2}{4\ln(C_0 / C_B)}$$

Тепер необхідно вибрати або температуру, або час процесу. Якщо нас обмежує продуктивність або інші міркування, що потребують деякого мінімального часу  $t$ , то температуру процесу визначаємо на основі розрахованого коефіцієнта дифузії:

$$D = \frac{x_j^2}{4t \ln(C_0 / C_B)}$$

**Приклад 4.** Визначити температуру розгонки миш'яку, попередньо прониклого за допомогою іонної імплантації в кремній із електропровідністю  $p$ -типу і питомим опором  $\rho_p$  ( $\text{Ом}\cdot\text{см}$ ), якщо розподіл повинен мати глибину залягання  $p$ - $n$ -переходу  $x_j$  ( $\text{мкм}$ ), поверхневу концентрацію  $C_0$  ( $\text{см}^{-3}$ ), а тривалість процесу становить 1 годину. Визначити кількість атомів миш'яку  $N$ , які повинні бути прониклі в кремній.

*Методика розрахунку*

1. За допомогою рис. А.2 знайдемо  $C_B$ , ( $\text{см}^{-3}$ ).
2. Визначаємо коефіцієнт дифузії:

$$D = \frac{x_j^2}{4t \ln(C_0 / C_B)}, \left( \frac{\text{см}^2}{\text{с}} \right)$$

3. Визначаємо, яка температура відповідає знайденому коефіцієнту дифузії миш'яку в кремнії (рис. А.1, а).

4. Кількість атомів  $As$ , прониклих на одиницю площі, визначимо на основі виразу для поверхневої концентрації:

$$C_0 = \frac{N}{\sqrt{\pi Dt}}; \quad N = C_0 \sqrt{\pi Dt}, \quad (\text{см}^{-2}).$$

### Завдання для самостійного виконання

Таблиця 1.5 – Варіанти завдань та початкові дані для розрахунку

Початкові дані	Варіант		
	1	2	3
Питомий опір $\rho_p$ , ( $\text{Ом}\cdot\text{см}$ )	1	1	0,5
Глибина залягання $p$ - $n$ -переходу $x_j$ , ( $\text{мкм}$ )	0,5	0,75	0,25
Поверхнева концентрація $C_0$ , ( $\text{см}^{-3}$ )	$1,5 \cdot 10^{20}$	$2 \cdot 10^{20}$	$0,75 \cdot 10^{20}$
Тривалість процесу $t$ , ( $\text{год}$ )	1	1,5	1

**Приклад 5.** Визначити режим дифузії, яка проводиться в одну стадію, при незмінній поверхневій концентрації для умов прикладу 4.

### Методика розрахунку

1. Розподіл домішок описується *erfc*-функцією, тому скористаємося її апроксимацією (1.12) і формулою (1.13)

$$x_j = 2\sqrt{Dt} \left( \sqrt{\ln \frac{C_0}{C_B}} - 0,3 \right).$$

На основі (1.13) визначимо коефіцієнт дифузії:

$$D = \frac{x_j^2}{4t \left( \sqrt{\ln \left( \frac{C_0}{C_B} \right)} - 0,3 \right)^2}, \text{ (см}^2\text{/с)}.$$

2. Знайдемо температуру, яка відповідає знайденому коефіцієнту дифузії (рис. А.1, *a*) та граничну розчинність  $A_s$  в кремнії при цій температурі (див. рис. 1.1). Для дифузії слід використовувати збіднене джерело, щоб отримати задану концентрацію  $C_0$  (см<sup>-3</sup>).

Розв'язування оберненої задачі для дифузії, яка проходить у дві стадії, проводять в два етапи. Спочатку визначаємо режим розгонки, потім на основі отриманих даних – режим загонки. Режим розгонки знайдемо, використовуючи (1.1):

$$N = 2C_{01} \sqrt{D_1 t_1 / \pi}.$$

Звідси, після перетворення, розрахуємо добуток:

$$D_1 t_1 = \frac{\pi}{4} \left( \frac{N}{C_{01}} \right)^2 = D_2 t_2 \left( \frac{\pi}{2} \cdot \frac{C_{02}}{C_{01}} \right)^2.$$

Цей вираз показує, що для дифузії, яка проходить у дві стадії, необхідно регулювати поверхневу концентрацію при загонці  $C_{01}$ , або задавати температуру загонки  $T_1$ , яка визначає два параметри  $D_1$  та  $C_{01}$ , а час загонки розраховувати за відомими даними:

$$t_1 = \frac{D_2}{D_1} \left( \frac{\pi}{2} \cdot \frac{C_{02}}{C_{01}} \right)^2 t_2.$$

## Завдання для самостійного виконання

Таблиця 1.6 – Варіанти завдань та початкові дані для розрахунку

Початкові дані	Варіант		
	1	2	3
Питомий опір $\rho_p$ , (Ом·см)	1	1	0,5
Глибина залягання $p$ - $n$ переходу $x_j$ , (мкм)	0,5	0,75	0,25
Поверхнева концентрація $C_0$ , (см <sup>-3</sup> )	$1,5 \cdot 10^{20}$	$2 \cdot 10^{20}$	$0,75 \cdot 10^{20}$
Тривалість процесу $t$ , (год)	1	1,5	1

**Приклад 6.** Визначити температури і тривалості процесів загонки і розгонки у випадку дифузії бору в кремній, яка відбувається в дві стадії, з електропровідністю  $n$ -типу, з питомим опором  $\rho_p$ , (Ом·см), якщо шуканий розподіл домішки повинен мати такі параметри:  $C_{02}$ , (см<sup>-3</sup>),  $x_j$ , (мкм).

### Методика розрахунку

1. За графіком рис. А.2 знаходимо  $C_B$ , (см<sup>-3</sup>).
2. Розраховуємо добуток  $D_2 t_2$ :

$$D_2 t_2 = \frac{x_j^2}{4 \ln(C_{02} / C_B)}, \text{ (см}^2\text{)}.$$

3. Задамо температуру  $T_2$ , (°C) та визначимо  $D_2$ , (см<sup>2</sup>/с) з рис. А.1, тоді

$$t_2 = \frac{D_2 t_2}{D_2}, \text{ (с)}.$$

4. Задамо температуру загонки бору  $T_1$ , (°C), визначимо  $C_{01}$ , (см<sup>-3</sup>) (див. рис. 1.1) та  $D_1$ , (см<sup>2</sup>/с) (рис. А.1, а).

5. Тривалість загонки

$$t_1 = \frac{D_2}{D_1} \left( \frac{\pi}{2} \cdot \frac{C_{02}}{C_{01}} \right)^2 \cdot t_2, \text{ (с)}.$$

Якщо тривалість загонки мала (тобто не може бути витримана практично), то треба використовувати збіднене джерело бору або вводити домішки шляхом іонної імплантації. Тоді подальший розрахунок треба проводити так.

6. Визначаємо кількість атомів бору, яку необхідно ввести на стадії загонки,

$$N = C_{02} \sqrt{\pi D_2 t_2}, \quad (\text{см}^{-2}).$$

При використанні збідненого джерела дифузанта задають тривалість загонки  $t_1$  і визначають добуток:

$$D_1 C_{01}^2 = D_2 C_{02}^2 \left( \frac{\pi}{2} \right)^2 \frac{t_2}{t_1}, \quad (1 / \text{см}^4 \cdot \text{с}).$$

7. Задамо  $t_1$ , (хв), тоді визначимо  $D_1 C_{01}^2$ .

8. Задаємо  $T_1$  та визначаємо  $D_1$ , ( $\text{см}^2/\text{с}$ ) (рис. А.1, а) і далі визначаємо  $C_{01}$ , ( $\text{см}^{-3}$ ).

### Завдання для самостійного виконання

Таблиця 1.7 – Варіанти завдань та початкові дані для розрахунку

Початкові дані	Варіант		
	1	2	3
Питомий опір $\rho_p$ , (Ом·см)	10	5	8
Поверхнева концентрація $C_{02}$ , ( $\text{см}^{-3}$ )	$5 \cdot 10^{18}$	$6 \cdot 10^{18}$	$4 \cdot 10^{18}$
Глибина залягання $x_j$ , (мкм)	2,5	3	2

#### 1.4.2 Визначення режимів послідовної дифузії

У розглянутих прикладах домішка дифундує в однорідно легований напівпровідник. При подвійній послідовній дифузії емітерна дифузія переходить у неоднорідно леговану базову область, тому розрахунок технологічних режимів ускладнюється. Вихідними даними для розрахунку є глибина залягання колекторного та емітерного переходів  $x_{jk}$ ,  $x_{je}$ , концентрація домішки в епітаксійному шарі  $C_B$ , поверхневі концентрації дифундувальних акцепторної та донорної домішок  $C_{0a}$ ,  $C_{0д}$ . Параметри, що визначаються: режими загонки ( $T_{a1}$ ,  $t_{a1}$ ,  $N_a$ ) і розгонки ( $T_{a2}$ ,  $t_{a2}$ ) акцепторної домішки при базовій дифузії та режим розгонки ( $T_{д}$ ,  $t_{д}$ ) донорної домішки при емітерній дифузії.

Розрахунок режиму базової дифузії виконують аналогічно розрахунку режиму двостадійної дифузії в однорідно легований напівпровідник. Для спрощення розрахунків вважають, що в процесі емітерної дифузії не відбувається помітного зміщення розподілення концентрації акцепторної домішки, тобто

$$(Dt)_{ef} = D_{a2} t_{a2} + D_{a3} t_{д} \approx D_{a2} t_{a2},$$

де  $D_{a3}$  – коефіцієнт дифузії акцепторної домішки при емітерній дифузії.

Для розрахунку режиму емітерної дифузії використовують рівняння, яке отримане при визначенні глибини залягання емітерного переходу.

$$x_{je} = \left[ \left( \frac{1}{2\sqrt{D_d \cdot t_d}} + \frac{0,3}{x_{je}} \right)^2 - \frac{1}{4D_a \cdot t_a} \right]^{-1/2} \cdot \sqrt{\ln \left( \frac{C_{0d}}{C_{0a}} \right)}.$$

Розв'язавши його відносно  $D_d t_d$ , визначають температуру або тривалість дифузії:

$$D_d t_d = \frac{x_{je}^2}{4 \left[ \sqrt{\ln \left( \frac{C_{0d}}{C_{0a}} \right) + \frac{x_{je}^2}{4D_a t_a}} - 0,3 \right]^2}.$$

**Приклад 7.** Визначити режим загонки ( $T_{a1}$ ,  $t_{a1}$ ,  $N_a$ ) і розгонки ( $T_{a2}$ ,  $t_{a2}$ ) при базовій дифузії бору і режим загонки  $T_d$ ,  $t_d$  при емітерній дифузії фосфору в кремній, якщо задано:  $C_B$ , ( $\text{см}^{-3}$ );  $x_{je}$ , (мкм);  $x_{jk}$ , (мкм);  $C_{0a}$ , ( $\text{см}^{-3}$ );  $C_{0d}$ , ( $\text{см}^{-3}$ ).

#### Методика розрахунку

Спочатку визначаємо режими базової дифузії.

1. Знайдемо добуток:

$$D_{a2} t_{a2} = \frac{x_{jk}^2}{4 \ln \left( \frac{C_{0a}}{C_B} \right)}, (\text{см}^2).$$

2. Задаємо температуру розгонки  $T_{a2}$ , ( $^{\circ}\text{C}$ ) та визначимо  $D_{a2}$ , ( $\text{см}^2/\text{с}$ ) (рис. А.1, а). Отримуємо

$$t_{a2}, (\text{хв}).$$

3. Знайдемо поверхневу щільність атомів бору, необхідну для базової дифузії:

$$N_a = C_{0a} \sqrt{\pi D_{a2} t_{a2}}, (\text{см}^{-2}).$$

4. Режим загонки вибираємо на основі добутку

$$D_{a1} t_{a1} = \frac{\pi}{4} \left( \frac{N_a}{C_{0a1}} \right)^2 = D_{a1} t_{a2} \left( \frac{\pi}{4} \cdot \frac{C_{0a}}{C_{0a1}} \right)^2.$$

Задаємо температуру загонки бору  $T_{a1}$ , за якою визначаємо  $C_{0a1}$  (див. рис. 1.1), та  $D_{a1}$  (рис. А1, а).

5. Тоді тривалість загонки бору

$$t_{a1} = \frac{D_{a2}}{D_{a1}} \left( \frac{\pi}{2} \cdot \frac{C_{0a}}{C_{0a1}} \right)^2 \cdot t_{a2}.$$

Якщо отримаємо мале значення, яке означає, що тривалість практично складно реалізувати через великий період установаження стаціонарного потоку дифузанта в дифузійній печі, то, як і в прикладі 6, слід задати час  $t_{a1}$ , (хв) і виконати розрахунок:

$$D_{a1} C_{0a1}^2 = D_{a2} C_{0a}^2 \cdot \left( \frac{\pi}{2} \right)^2 \cdot t_{a2} / t_{a1}.$$

6. Задаємо  $C_{0a1}$ , тоді знайдемо  $D_{a1}$ , ( $см^2/с$ ), що відповідає температурі  $T_{a1}$  (рис. А.1, а).

7. Для визначення режиму емітерної дифузії знайдемо добуток:

$$D_d t_d = \frac{x_{je}^2}{4 \left[ \sqrt{2,3 \lg(C_{0d} / C_{0a}) + x_{je}^2 / (4D_{a2} t_{a2})} - 0,3 \right]^2}.$$

8. Задаємо тривалість емітерної дифузії  $t_d$  та визначаємо значення коефіцієнта дифузії фосфору  $D_d$ , що відповідає температурі  $T_d$  (рис. А.1, а).

9. Оцінюємо справедливність припущення про незмінність розподілу концентрації бору під час емітерної дифузії ( $D_{a2} t_{a2} \gg D_{a3} t_d$ ).

### Завдання для самостійного виконання

Таблиця 1.8 – Варіанти завдань та початкові дані для розрахунку

Початкові дані	Варіант		
	1	2	3
Поверхнева концентрація $C_B$ , ( $см^{-3}$ )	$5 \cdot 10^{16}$	$6 \cdot 10^{18}$	$4 \cdot 10^{18}$
Глибина залягання $x_{je}$ , (мкм)	1,2	1,6	1,8
Глибина залягання $x_{jk}$ , (мкм)	3,5	4,3	2,3
Поверхнева концентрація акцепторної домішки $C_{0a}$ , ( $см^{-3}$ )	$3,3 \cdot 10^{18}$	$2,1 \cdot 10^{19}$	$3,1 \cdot 10^{19}$
Поверхнева концентрація донорної домішки $C_{0d}$ , ( $см^{-3}$ )	$1,2 \cdot 10^{21}$	$1,6 \cdot 10^{21}$	$2,6 \cdot 10^{21}$

Тепер розглянемо розрахунок режимів дифузії у тому випадку, коли зміщенням колекторного переходу в процесі емітерної дифузії не можна знехтувати.

**Приклад 8.** Визначити кількість атомів бору, яку необхідно ввести в структуру методом іонної імплантації для створення області бази, і режим розгонки  $T_{a2}, t_{a2}$ , а також кількість атомів фосфору  $N_\delta$ , яку необхідно ввести за допомогою іонної імплантації для створення емітерної області, і режим розгонки  $T_d, t_d$ , якщо концентрація донорної домішки в вихідному епітаксіальному шарі кремнію з електропровідністю  $n$ -типу становить  $C_B$ . Також задано значення  $x_{je}, x_{jk}, C_{0a}, C_{0d}$ .

### Методика розрахунку

1. Розглянемо базову дифузію. Щоб врахувати вплив високої температури при емітерній дифузії, введемо величину

$$D_a t_a = D_{a2} t_{a2} + D_{a3} t_d,$$

де  $D_{a3}$  – коефіцієнт дифузії бору при температурі  $T_d$ .

Знайдемо добуток:

$$D_a t_a = \frac{x_{jk}^2}{4 \ln(C_{0a} / C_B)}.$$

2. Кількість атомів бору, яку необхідно ввести на одиниці поверхні,

$$N_a = C_{0a} \sqrt{\pi D_a t_a}.$$

3. Розглянемо емітерну дифузію. Оскільки атоми фосфору вводять методом іонної імплантації, то емітерна дифузія аналогічна стадії розгонки з шару з обмеженим вмістом домішки, тому глибина залягання емітерного переходу визначається з умови рівності двох розподілів, описаних кривими Гаусса:

$$C_{0d} \exp\left(-\frac{x_{je}^2}{4D_d t_d}\right) = C_{0d} \exp\left(-\frac{x_{je}^2}{4D_a t_a}\right).$$

Звідси знайдемо добуток:

$$D_d t_d = \left[ \frac{4 \ln(C_{0d} / C_{0a})}{x_{je}^2} + \frac{1}{D_a t_a} \right]^{-1}.$$

4. Визначимо кількість атомів фосфору, яку необхідно ввести на одиниці поверхні:

$$N_d = C_{0d} \sqrt{\pi D_d t_d} \quad (\text{см}^{-2}).$$



5. Задамо температуру емітерної дифузії  $T_d$ , при якій визначимо коефіцієнт дифузії фосфору  $D_a$ , ( $см^2/с$ ) (рис. А.1, а). Далі обчислимо тривалість емітерної дифузії:  $t_d$ , (хв).

6. Визначимо режим базової дифузії. При  $T_d$  визначимо коефіцієнт дифузії бору  $D_{a3}$ , ( $см^2/с$ ) (рис. А.1, а). Знайдемо:

$$D_{a2}t_{a2} = D_a t_a - D_{a3}t_d, (см^2).$$

7. Виберемо температуру базової дифузії  $T_{a2}$ , яка відповідає коефіцієнту дифузії бору  $D_{a2}$ , ( $см^2/с$ ) (рис. А.1, а). Визначимо тривалість базової дифузії:  $t_{a2}$ , (с).

8. Оцінимо параметри дифузійного базового шару після базової дифузії. Поверхнева концентрація бору:

$$C_{0a}^* = \frac{N_a}{\sqrt{\pi D_{a2} t_{a2}}}, (см^{-3}).$$

Глибина залягання колекторного переходу

$$x'_{jk} = 2\sqrt{D_{a2} t_{a2}} \sqrt{2,3 \lg(C'_{0a} / C_B)}, (мкм).$$

Таким чином, значення поверхневої концентрації бору і глибини колекторного переходу після базової дифузії значно відрізняються від потрібних значень, які досягаються лише після емітерної дифузії.

Приклади 7 і 8 показують, що залежно від співвідношення добутоків  $D_{a2}t_{a2}$  та  $D_{a3}t_d$  слід враховувати або нехтувати впливом емітерної дифузії на розподіл домішки, отриманий при базовій дифузії.

### Завдання для самостійного виконання

Таблиця 1.9 – Варіанти завдань та початкові дані для розрахунку

Початкові дані	Варіант		
	1	2	3
Концентрація донорної домішки $C_B$ , ( $см^{-3}$ )	$5 \cdot 10^{15}$	$8 \cdot 10^{15}$	$10 \cdot 10^{15}$
Глибина залягання емітерного переходу $x_{je}$ , (мкм)	1	3	5
Глибина залягання колекторного переходу $x_{jk}$ , (мкм)	2	4	6
Поверхнева концентрація акцепторної домішки $C_{0a}$ , ( $см^{-3}$ )	$3 \cdot 10^{18}$	$5 \cdot 10^{18}$	$1 \cdot 10^{18}$
Поверхнева концентрація донорної домішки $C_{0d}$ , ( $см^{-3}$ )	$5 \cdot 10^{20}$	$7 \cdot 10^{20}$	$2 \cdot 10^{20}$

## 2 ОТРИМАННЯ СТРУКТУР МЕТОДОМ ІОННОЇ ІМПЛАНТАЦІЇ

### 2.1 Методи розрахунків іонно-імпантованих структур

#### 2.1.1 Розрахунок профілів розподілу концентрації прониклих домішок в структурах з подвійною імпантациєю

При розрахунках іонно-імпантованих структур, як і у випадку дифузії, зустрічаються прямі і обернені задачі. Типовим прикладом прямої задачі є побудова профілю розподілу концентрації для заданих іонів, енергії і дози опромінення. Профіль розподілу описується виразом (2.1), і його побудова ґрунтується на визначенні  $R_p$  і  $\Delta R_p$  за таблицею або розрахунковим шляхом. Більш складною є побудова профілю для транзисторної структури, що потребує дворазової імпантациї.

$$C(x) = \frac{N}{\sqrt{2\pi}\Delta R_p} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x - R_p}{\Delta R_p}\right)^2\right]. \quad (2.1)$$

Для створення транзистора типу  $n-p-n$  в епітаксійний шар з електропровідністю  $n$ -типу проводять послідовну імпантацию іонів акцепторної домішки з енергією  $E_a$  і дозою  $N_a$  для формування базової області та іонів донорної домішки з енергією  $E_d$  і дозою  $N_d$  для формування емітера, причому  $R_{pa} > R_{pd}$ , а  $C_{max a} < C_{max d}$ . Сумарний розподіл домішки описується виразом:

$$C(x) = C_{max a} \exp\left[-\left(\frac{x - R_{pa}}{\sqrt{2}\Delta R_{pa}}\right)^2\right] - C_{max d} \exp\left[-\left(\frac{x - R_{pd}}{\sqrt{2}\Delta R_{pd}}\right)^2\right] - C_B. \quad (2.2)$$

Глибину залягання колекторного переходу визначаємо з умови:

$$C_{max a} \exp\left[-\left(\frac{x_{jk} - R_{pd}}{\sqrt{2}\Delta R_{pd}}\right)^2\right] - C_B = 0,$$

звідки:

$$x_{jk} = R_{pd} + \Delta R_{pd} \sqrt{2 \ln\left(\frac{C_{max a}}{C_B}\right)}, \quad (2.3)$$

$$\text{де } C_{\max a} = \frac{N_a}{\sqrt{2\pi\Delta R_{pa}}}.$$

Глибину залягання емітерного переходу з урахуванням того, що  $C(x_{je}) \gg C_B$ , визначаємо з умови:

$$C_{\max a} \exp\left[-\left(\frac{x_{je} - R_{pa}}{\sqrt{2\Delta R_{pa}}}\right)^2\right] = C_{\max d} \exp\left[-\left(\frac{x_{je} - R_{pd}}{\sqrt{2\Delta R_{pd}}}\right)^2\right],$$

звідки:

$$x_{je} = \frac{-m + \sqrt{m^2 - ac}}{a}, \quad (2.4)$$

де

$$a = \Delta R_{pd}^2 - \Delta R_{pda}^2; \quad m = -R_{pa} \Delta R_{pd}^2 + R_{pd} \Delta R_{pda}^2;$$

$$c = R_{pa}^2 \Delta R_{pd}^2 - R_{pd}^2 \Delta R_{pda}^2 - 2\Delta R_{pa} \Delta R_{pd}^2 \ln \frac{N_a \Delta R_{pd}}{N_d \Delta R_{pa}}.$$

Для орієнтовного розрахунку глибину залягання емітерного переходу можна оцінити простіше, виходячи із рівності  $C(x_{je})=C_B$ , тобто

$$x_{je} \approx R_{pd} + \Delta R_{pd} \sqrt{2 \ln \left( \frac{C_{\max d}}{C_B} \right)}. \quad (2.5)$$

Товщина базової області  $\omega \approx x_{jk} - x_{je}$ .

**Приклад 1.** Розрахувати профіль розподілу концентрації домішок в транзисторній структурі, яка утворена імплантацією  $^{11}B+$  і  $^{31}P+$  в кремній з електропровідністю  $n$ -типу, якщо дано  $C_B, E_a, N_a, E_d, N_d$ .

*Методика розрахунку:*

1. З табл. А.1 визначаємо  $R_{pa}$ , (мкм) та  $\Delta R_{pa}$ , (мкм) для іонів бору з енергією  $E_a$ , а для іонів фосфору з енергією  $E_d - R_{pd}$ , (мкм) та  $\Delta R_{pd}$ , (мкм).
2. Знайдемо максимальні концентрації бору і фосфору:

$$C_{\max a} = \frac{0,4N_a}{\Delta R_{pa}}, \quad (см^{-3}) \quad (2.6)$$

$$C_{max \delta} = \frac{0,4N_{\delta}}{\Delta R_{p\delta}}, (cm^{-3}). \quad (2.7)$$

3. Знайдемо глибину залягання колекторного і емітерного  $p$ - $n$ -переходів:

$$x_{jk} = R_{pa} + \Delta R_{pa} \sqrt{2 \ln \left( \frac{C_{max a}}{C_B} \right)}, (мкм) \quad (2.8)$$

$$x_{je} = R_{p\delta} + \Delta R_{p\delta} \sqrt{2 \ln \left( \frac{C_{max \delta}}{C_B} \right)}, (мкм). \quad (2.9)$$

4. Користуючись виразом (2.2), побудуємо сумарний розподіл акцепторної і донорної домішок в структурі  $n$ - $p$ - $n$ -транзистора, показаний суцільною лінією на рис. 2.1. Там же показані окремо розподіли прониклих атомів бору  $C_B(x)$  і фосфору  $C_{\Phi}(x)$ . Можна побачити, що проста формула для визначення положення емітерного переходу має достатню точність.

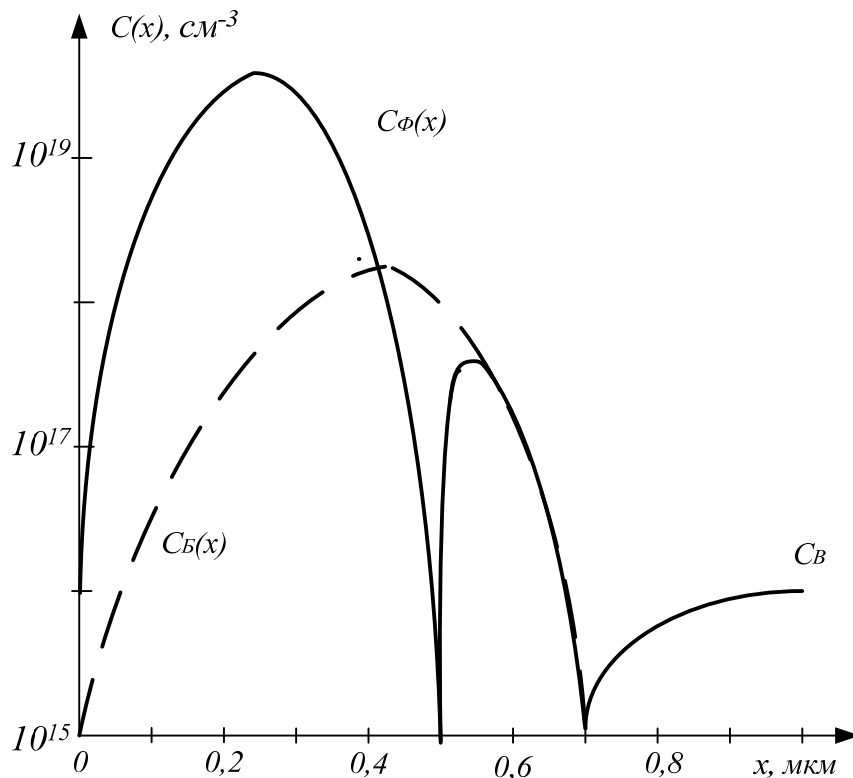


Рисунок 2.1 – Розподіл бору і фосфору в  $n$ - $p$ - $n$ -транзисторі

## Завдання для самостійного виконання

Таблиця 2.1 – Варіанти завдань та початкові дані для розрахунку

Початкові дані	Варіант				
	1	2	3	4	5
Домішки	$^{11}B+i$ $^{31}P+$	$^{11}B+i$ $^{31}P+$	$^{75}As+i$ $^{121}Sb+$	$^{27}Al+i$ $^{31}P+$	$^{27}Al+i$ $^{75}As+$
Електропровідність	<i>n</i> -типу	<i>n</i> -типу	<i>p</i> -типу	<i>p</i> -типу	<i>n</i> -типу
$C_B, (см^{-3})$	$10^{16}$	$10^{14}$	$10^{18}$	$10^{14}$	$10^{18}$
$E_a, (кеВ)$	100	100	140	80	140
$N_a, (см^{-2})$	$5 \cdot 10^{13}$	$8 \cdot 10^{12}$	$7 \cdot 10^{13}$	$2 \cdot 10^{13}$	$6 \cdot 10^{13}$
$E_d, (кеВ)$	200	200	180	180	200
$N_d, (см^{-2})$	$1 \cdot 10^{15}$	$9 \cdot 10^{14}$	$3 \cdot 10^{15}$	$5 \cdot 10^{14}$	$4 \cdot 10^{15}$

### 2.1.2 Розрахунок розподілу концентрації домішки в двошарових структурах

Для створення МОН-структур часто застосовують імплантацію домішок в кремній через плівку діоксиду. На границі розділу  $SiO_2-Si$  внаслідок відмінності в гальмівних здатностях кремнію та діоксиду концентрація домішки змінюється стрибком. Для теоретичної побудови профілів в двошарових структурах є порівняно простий прийом. Нехай нам відомі окремо профілі розподілу іонів в кожному з компонентів структури  $SiO_2$  і  $Si$ , опромінених з дозою  $N$ . На профілі в  $SiO_2$  проведемо переріз на глибині  $d_1$ , яка дорівнює необхідній товщині оксидної плівки. Позначимо кількість атомів, які лежать ліворуч і праворуч від цього перерізу,  $N_1$  і  $N_2$ , відповідно. На профілі в  $Si$  проведемо такий же переріз на глибині  $d_2$  так, щоб  $N'_1 = N_1$  і  $N'_2 = N_2$ . Склавши тепер частини профілів  $N_1$  і  $N'_2$ , отримаємо шуканий розподіл у двошаровій структурі  $Si-SiO_2$ .

Аналітичним шляхом цей розподіл може бути побудований, якщо відомі значення пробігів і їх стандартних відхилень  $R_{p1}$  і  $\Delta R_{p1}$  в  $SiO_2$ ,  $R_{p2}$  і  $\Delta R_{p2}$  в  $Si$ . Для побудови профілів розподілів концентрації прониклої домішки в кремній слід визначити дозу іонів  $N_1$ , які гальмуються в плівці діоксиду на ділянці від  $x = 0$  до  $x = d_1$ :

$$N_1 = \int_0^{d_1} C(x) dx = \frac{N}{\sqrt{2\pi}\Delta R_{p1}} \int_0^{d_1} \exp\left[-\left(\frac{x - R_{p1}}{\sqrt{2}\Delta R_{p1}}\right)^2\right] dx = \frac{N}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \frac{d_1 - R_{p1}}{\sqrt{2}\Delta R_{p1}}\right). \quad (2.10)$$

Очевидно, що доза іонів домішки, які пройшли через оксид в кремній,  $N_2 = N - N_1$ .

За відсутності плівки діоксиду доза іонів  $N'_1 = N_1$  буде міститись в кремнії на глибині від  $x = 0$  до  $x = d_2$ :

$$N'_1 = \frac{N}{\sqrt{2\pi}\Delta R_{p1}} \int_0^{d_2} \exp\left[-\left(\frac{x - R_{p2}}{\sqrt{2}\Delta R_{p2}}\right)^2\right] dx = \frac{N}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \frac{d_2 - R_{p2}}{\sqrt{2}\Delta R_{p2}}\right). \quad (2.11)$$

Порівнявши (2.10) і (2.11), отримаємо:

$$\operatorname{erf} \frac{d_1 - R_{p1}}{\sqrt{2}\Delta R_{p1}} = \operatorname{erf} \frac{d_2 - R_{p2}}{\sqrt{2}\Delta R_{p2}}.$$

Умовою рівності *erf*-функцій є рівність їх аргументів, тому:

$$\frac{d_1 - R_{p1}}{\sqrt{2}\Delta R_{p1}} = \frac{d_2 - R_{p2}}{\sqrt{2}\Delta R_{p2}}. \quad (2.12)$$

Звідси знаходимо товщину еквівалентного шару кремнію, в якому гальмується доза іонів  $N'_1 = N_I$ :

$$d_2 = R_{p2} + (d_1 - R_{p1}) \frac{\Delta R_{p2}}{\Delta R_{p1}}, \quad (\text{мкм}). \quad (2.13)$$

При побудові розподілу прониклої домішки в кремнії початок координат розміщують на поверхні кремнію, тому профіль розподілу описується кривою Гауса в вигляді:

$$C(x) = \frac{0,4 \cdot N}{\Delta R_{p2}} \exp\left[-\left(\frac{x + d_2 - R_{p2}}{\sqrt{2}\Delta R_{p2}}\right)^2\right]. \quad (2.14)$$

**Приклад 2.** Побудувати розподіл концентрації іонів бору в кремнії, прониклих з енергією  $E$ , (кеВ) і дозою опромінення  $N$ , ( $\text{см}^{-2}$ ) через плівку діоксиду товщиною  $d_1$ , (мкм).

#### Методика розрахунку

1. Із даних табл. А.1 для кремнію і табл. А.2 для діоксиду кремнію визначаємо  $R_{p1}$ , (мкм);  $\Delta R_{p1}$ , (мкм);  $R_{p2}$ , (мкм);  $\Delta R_{p2}$ , (мкм).
2. За формулою (2.13) знайдемо товщину еквівалентного шару кремнію  $d_2$ , (мкм).
3. Запишемо розрахункові формули  $C(x)$  для профілів розподілу бору в кремнії та в діоксиді кремнію, підставивши отримані значення.
4. Згідно з розрахунковими формулами побудуємо профілі розподілу бору в двошаровій структурі (рис. 2.2).

5. За допомогою формули (2.10) знайдемо дозу іонів бору  $N_1$ , ( $\text{см}^{-2}$ ) що залишається в плівці діоксиду, взявши  $\text{erf} = 0,77$ .
6. Визначаємо дозу іонів бору, що пройшов у кремній:

$$N_2 = N - N_1, (\text{см}^{-2}). \quad (2.15)$$

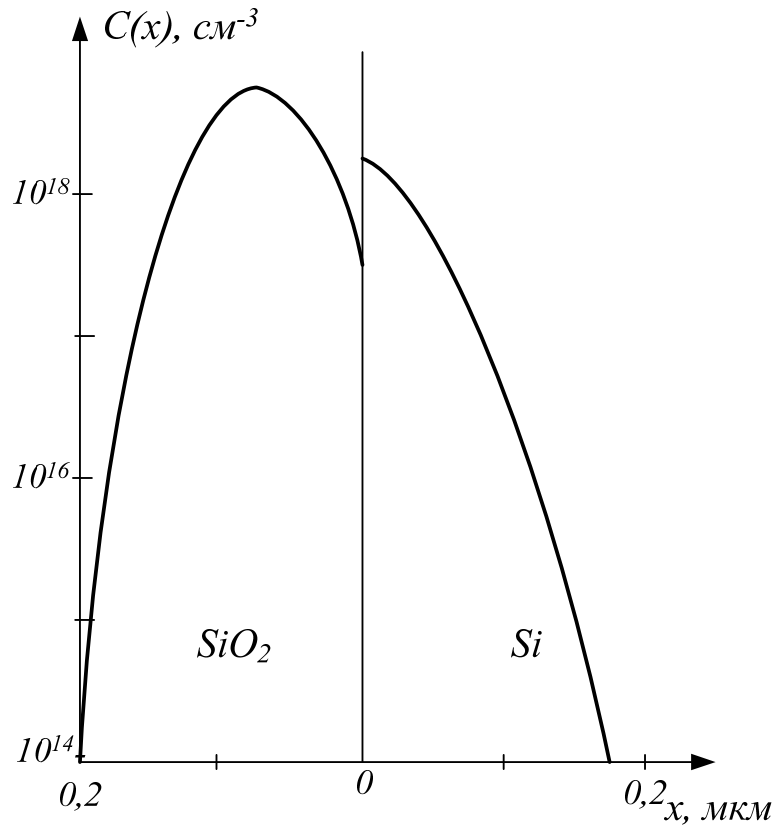


Рисунок 2.2 – Розподіл бору в структурі  $\text{SiO}_2 - \text{Si}$

### Завдання для самостійного виконання

Таблиця 2.2 – Варіанти завдань та початкові дані для розрахунку

Початкові дані	Варіант				
	1	2	3	4	5
Енергія проникнення $E$ , (кеВ)	40	40	140	20	100
Доза опромінення $N$ , ( $\text{см}^{-2}$ )	$6,2 \cdot 10^{13}$	$7,3 \cdot 10^{12}$	$8,5 \cdot 10^{13}$	$5,2 \cdot 10^{13}$	$9 \cdot 10^{12}$
Товщина плівки діоксиду $d_1$ , (мкм)	0,2	0,15	0,6	0,15	0,5
Матеріал домішки	Бор	Бор	Бор	Фосфор	Фосфор

### 2.1.3 Розрахунок розподілу концентрації домішки у випадку розпилення частини іонно-імплантованого шару

Розпилення напівпровідника, що опромінюється прискореними іонами, може призвести до того, що профілі розподілу будуть значно відрізнятися від кривої Гаусса, а загальна кількість іонів, які залишилися в кристалі, стане набагато меншою за дозу опромінення. Розподіл прониклих іонів в момент часу  $t$  в процесі імплантації виражається кривою Гаусса вигляду:

$$dC(x) = \frac{Idt}{\sqrt{2\pi}\Delta R_p} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x - R_p + vt}{\Delta R_p}\right)^2\right], \quad (2.16)$$

де  $I$  – інтенсивність потоку іонів,  $\text{іон}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ ;

$Idt = dN$  – доза, що набирається за період  $dt$ ,  $\text{іон}/\text{см}^2$ ;

$v = dx/dt$  – швидкість розпилення кристала,  $\text{см}/\text{с}$ .

Інтегруючи цей вираз за часом, знайдемо профіль розподілу іонів в момент  $t = T$ , до якого товщина розпиленого шару становитиме  $\Delta x = vT$ :

$$C(x) = \frac{N}{2\Delta x} \left( \frac{\text{erf}\left(\frac{x - R_p + \Delta x}{\sqrt{2}\Delta R_p}\right)}{\sqrt{2}\Delta R_p} - \text{erf}\left(\frac{x - R_p}{\sqrt{2}\Delta R_p}\right) \right). \quad (2.17)$$

Товщину розпиленого шару зручно виразити, використовуючи коефіцієнт розпилення  $K$ :

$$\Delta x = KN/N_2. \quad (2.18)$$

Тоді профіль розподілу іонів, що залишилися в кристалі:

$$C(x) = \frac{N_2}{2K} \left( \text{erf}\left(\frac{x - R_p + \Delta x}{\sqrt{2}\Delta R_p}\right) - \frac{N_2}{2K} \left( \text{erf}\left(\frac{x - R_p}{\sqrt{2}\Delta R_p}\right) \right) \right). \quad (2.19)$$

Явище розпилення призводить до насичення кількості атомів домішки, що залишилися в напівпровіднику на рівні  $N_{Rmax}$ , який розраховують за формулою:

$$N_{Rmax} \approx \frac{N_2 R_p}{K}. \quad (2.20)$$

Зі збільшенням енергії іонів зростає пробіг, що приводить до збільшення товщини легованого шару, меншого впливу розпилення і збільшен-



ня  $N_{Rmax}$ . Цьому ж сприяє зниження  $K$ . Таким чином, явище розпилення потрібно враховувати при малих  $R_p$  та великих  $K$ .

## 2.2 Визначення режимів імплантації

Складнішими, ніж розглянуті вище, є обернені задачі. Зазвичай вони полягають у визначенні енергії, необхідної для отримання заданого середнього нормального пробігу іонів, або у визначенні дози опромінення, яка необхідна для забезпечення заданої концентрації домішок.

### 2.2.1 Розрахунок енергії іонів, необхідної для отримання заданого пробігу

Співвідношення пробіг – енергія описується формулою

$$\rho = \frac{2}{k} \varepsilon^{1/2} \left( 1 + \frac{\varepsilon k}{3\beta} \right) - \frac{2c/k}{k\sqrt{c/k+d}} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{\varepsilon}{c/k+d}}. \quad (2.21)$$

Це рівняння не дозволяє шляхом простого перетворення виразити залежність енергії від пробігу.

Для багатьох випадків  $k\varepsilon \ll 3\beta$ , тому, використовуючи розкладення в ряд функції  $\operatorname{arctg} x$ , формулу (2.21) можна спростити:

$$\rho = \frac{2}{k} \varepsilon^{1/2} \left[ 1 + \frac{1}{1+(kd)/c} \left( 1 - \frac{1}{4} \cdot \frac{\varepsilon}{c/k+d} \right) \right], \quad (2.22)$$

$$f = \left( 1 + \frac{1}{3} \frac{M_2}{M_1} \sqrt{\frac{\varepsilon_n}{\varepsilon}} \right)^{-1}, \quad (2.23)$$

$$\varepsilon_n = \frac{c}{k} \ln \left( 1 + \frac{\varepsilon}{c/k+d} \right). \quad (2.24)$$

Якщо виконується умова  $\varepsilon \leq \frac{c}{k} + d$ , що справедливо для більшості практичних випадків, то  $\ln(1+x) \approx x$  та з формул (2.23) і (2.24) випливає:

$$f \approx \left( 1 + \frac{\mu}{3} \sqrt{\frac{c/k}{c/k+d}} \right)^{-1}. \quad (2.25)$$

Середній нормальний пробіг пов'язаний з повним пробігом співвідношенням:

$$\rho_p = f_\rho.$$

Підставивши в нього формули (2.21), (2.25) і розв'язавши отримане кубічне рівняння, знайдемо залежність енергії іона від його середнього нормального пробігу:

$$\varepsilon = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)^2, \quad (2.26)$$

де

$$\varepsilon_1 = \sqrt[3]{-q/2 + \sqrt{(q/2)^2 + (p/3)^3}},$$

$$\varepsilon_2 = \sqrt[3]{-q/2 - \sqrt{(q/2)^2 + (p/3)^3}},$$

$$q = -\frac{2k(c/k + d)^2}{c/k} \frac{\rho_p}{f},$$

$$p = \frac{4d(c/k + d)}{c/k}.$$

**Приклад 3.** Визначити енергію  $E$ , необхідну для того, щоб середній нормальний пробіг іонів фосфору в кремнії становив  $R_p = 0,1$  мкм.

#### *Методика розрахунку*

1. За довідником знаходимо атомні номери та маси фосфору та кремнію: для фосфору ( $Z_1 = 15$ ,  $M_1 = 31$ ), для кремнію ( $Z_2 = 14$ ,  $M_2 = 28,09$ ).

$$\mu = M_2 / M_1,$$

$$\alpha = \frac{4,7 \cdot 10^{-9}}{(z_1^{2/3} + z_2^{2/3})^{1/2}}, \quad (\text{см}),$$

$$\gamma = \frac{4M_1M_2}{(M_1 + M_2)^2},$$

$$F = \frac{6,9 \cdot 10^6 aM_2}{Z_1Z_2(M_1 + M_2)}, \quad \left( \frac{1}{\text{eB}} \right),$$

$$L = \pi a^2 \gamma N_2, \left( \frac{1}{\text{см}} \right),$$

$$k = 2,47 \cdot 10^{11} Z_1^{2/3} \sqrt{Z_2 / M_2} [a(1 + \mu)]^{3/2},$$

$$f = \left( 1 + \frac{\mu}{3} \sqrt{\frac{c/k}{c/k+d}} \right)^{-1},$$

$$\rho_p = R_p L.$$

2. Знайдемо значення  $p$  і  $q$ :

$$p = \frac{4d(c/k+d)}{c/k},$$

$$q = -\frac{2k(c/k+d)^2 \rho_p}{c/k f}.$$

3. Визначимо значення  $\varepsilon_1$  і  $\varepsilon_2$

$$\varepsilon_1 = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3}},$$

$$\varepsilon_2 = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3}}.$$

4. Визначимо значення безрозмірної приведенної енергії  $\varepsilon$ , що відповідає заданому пробігу за формулою (2.26).

Далі визначимо значення енергії:

$$E = \frac{\varepsilon}{F}.$$

Цю задачу можна розв'язати графічно за наявності табличних даних про середні нормальні пробіги іонів фосфору в кремнії в діапазоні енергії, що нас цікавить. Користуючись цими даними, побудувати залежність  $R_p(E)$  і за графіком для заданого  $R_p$  знайти  $E$ . Існує ряд видань, де дискретні значення пробігів табульовано через 10 – 20 кеВ для багатьох комбінацій іон – мішень.

## Завдання для самостійного виконання

Таблиця 2.6 – Варіанти завдань та початкові дані для розрахунку

Початкові дані	Варіант				
	1	2	3	4	5
Пробіг іонів $R_p$ , (мкм)	0,2	0,25	0,05	0,15	0,1
Порядковий номер елемента $Z_1$	52	23	5	33	15
Атомна маса $M_1$	126,76	26,98	10,81	74,9	31
Порядковий номер елемента $Z_2$	14	14	32	32	14
Атомна маса $M_2$	28,09	28,09	73,61	73,61	28,09

### 2.2.2 Розрахунок дози опромінення, необхідної для отримання заданої концентрації домішки

Оскільки профіль розподілу концентрації прониклої домішки описується кривою Гаусса, то для її побудови необхідно знати середній нормальний пробіг  $R_p$ , середньоквадратичне відхилення пробігу  $\Delta R_p$  і дозу опромінення  $N$ . Як правило, всі три параметри невідомі. Відомими є глибина залягання  $p$ - $n$ -переходу  $x_j$ , максимальна концентрація домішки  $C_{max}$  і концентрація домішки у вихідній пластині напівпровідника  $C_B$ .

Вираз для глибини залягання  $p$ - $n$ -переходу знайдемо з формули (2.1) при  $C(x) = 0$ :

$$x_j = R_p + \Delta R_p \sqrt{2 \ln(C_{max} / C_B)}. \quad (2.27)$$

Дозу опромінення розраховуємо із співвідношення:

$$C_{max} = \frac{0,4N}{\Delta R_p}, \text{ або } N = 2,5\Delta R_p C_{max}.$$

Для визначення стандартного відхилення пробігів  $\Delta R_p$  використовуємо графічний розв'язок. Задамо кілька значень енергії, знайдемо для них  $\Delta R_p$  і  $R_p$  та побудуємо залежність правої частини рівняння (2.27) від енергії. Потім паралельно осі енергій проведемо пряму на рівні заданого значення  $x_j$ , тобто побудуємо ліву частину рівняння (2.27). Точка перетину правої і лівої частин рівняння (2.27) визначає шукану енергію  $E$ . Для знайденої енергії розрахуємо стандартне відхилення пробігу  $\Delta R_p$  і обчислимо дозу опромінення.

**Приклад 4.** Визначити енергію іонів і дозу опромінення, необхідні для створення *p-n*-переходу на глибині  $x_j$ , (мкм) за допомогою імплантації фосфору в кремній з електропровідністю *p*-типу і з  $C_B$ , ( $\text{см}^{-3}$ ), якщо необхідно забезпечити  $C_{max}$ , ( $\text{см}^{-3}$ ).

#### Методика розрахунку

1. Згідно з рівнянням (2.27):

$$x_j = R_p + \Delta R_p \sqrt{2 \ln(C_{max} / C_B)}.$$

2. Побудуємо залежність  $R_p + x\Delta R_p$  від енергії (наприклад, для значень  $C_B = 10^{16} \text{ см}^{-3}$  та  $C_{max} = 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ) в діапазоні 80 – 160 кеВ, користуючись даними табл. А.1 (рис. 2.3). На тому ж рисунку проведемо лінію  $x_j$  (наприклад, для  $x_j = 0,3$  мкм) і за точкою перетину визначимо  $E$ . Для практичних цілей зручніше задавати енергію іонів кратною 5 або 10 кеВ.

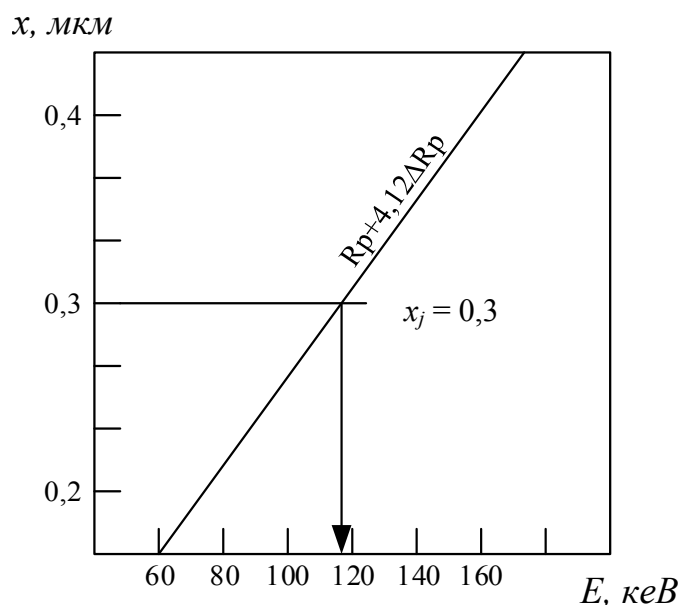


Рисунок 2.3 – Графічне визначення енергії іонів

3. Інтерполюючи дані табл. А.1, знайдемо  $\Delta R_p$  та  $R_p$  для визначеної  $E$ .

4. Знайдемо дозу опромінення:

$$N = 2,5 R_p C_{max}, (\text{см}^{-2}).$$

### 2.2.3 Розрахунок режимів імплантації для створення транзисторної структури

При проведенні даного розрахунку використовуються раніше розглянуті способи, тому розглянемо його на прикладі створення структури *n-p*-

$n$ -транзистора на кремнії з товщиною базової області  $\omega$ , глибиною залягання емітерного переходу  $x_{je}$ , (мкм) концентрацією донорів в епітаксiallyному шарі  $C_B$ , ( $\text{см}^{-3}$ ) і максимальними концентраціями акцепторної та донорної домішок  $C_{\text{max}a}$ , ( $\text{см}^{-3}$ ),  $C_{\text{max}d}$ , ( $\text{см}^{-3}$ ).

Створення емітерної та базової областей проводиться імплантацією фосфору і бору, відповідно. Режимми іонної імплантації визначаються дози  $N_a$ ,  $N_d$  і енергіями  $E_a$ ,  $E_d$ .

Дане завдання в загальному вигляді не розв'язується, тому введемо ряд спрощувальних співвідношень.

### Методика розрахунку

1. Запишемо вираз для глибини залягання колекторного  $p$ - $n$ -переходу

$$x_{jk} = R_{pa} + \Delta R_{pa} \sqrt{4,61 \lg(C_{\text{max}a} / C_B)}.$$

Для іонів з масами  $M_1 > M_2$  в діапазоні енергій 20 – 100 кеВ справедливе наближене співвідношення між пробігом і стандартним відхиленням пробігу

$$\Delta R_p / R_p \approx \frac{\gamma}{3} \text{ або } \Delta R_p = \gamma R_p / 3.$$

Тому

$$x_{jk} = R_{pa} + \frac{3,12\gamma R_{pa}}{3} \approx 2R_p.$$

Звідки

$$R_{pa} = \frac{x_{jk}}{2}.$$

Користуючись табл. А.1, визначаємо  $E_a$ ,  $R_{pa}$  та  $\Delta R_{pa}$ . Отже,

$$x_{jk} = R_{pa} + \Delta R_{pa} \sqrt{4,6 \ln(C_{\text{max}a} / C_B)}, \text{ (мкм)}$$

Різниця з необхідним значенням  $x_{jk}$  не перевищує 10%, що допустимо

2. Доза опромінення іонами бору

$$N_a = \sqrt{2\pi} \Delta R_{pa} C_{\text{max}a}, \text{ (см}^{-2}\text{)}.$$

3. Наближений вираз для глибини залягання емітерного  $p$ - $n$ -переходу

$$x_{je} \approx R_{pd} + \Delta R_{pd} \sqrt{4,61 \lg(C_{\text{max}a} / C_B)},$$

Звідки  $R_{pд} = x_{je} / 2,5$ , (мкм).

Використовуючи дані табл. А.1, виберемо  $E_{д}$ , та  $R_{pд}$ ,  $\Delta R_{pд}$  і  $x_{je}$ .

4. Доза опромінення іонами фосфору:

$$N_{д} = \sqrt{2\pi} \Delta R_{pд} C_{\max д}, (см^{-2}).$$

### Завдання для самостійного виконання

Таблиця 2.7 – Варіанти завдань та початкові дані для розрахунку

Початкові дані	Варіант				
	1	2	3	4	5
Глибина <i>p-n</i> -переходу $x_j$ , (мкм)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,3
Максимальна концентрація домішки $C_{\max}$ , (см <sup>-3</sup> )	$2 \cdot 10^{19}$	$3 \cdot 10^{19}$	$4 \cdot 10^{19}$	$3 \cdot 10^{19}$	$5 \cdot 10^{19}$
Глибина емітерного переходу $x_{je}$ , (мкм)	0,3	0,4	0,15	0,25	0,2
Концентрація донорів в епітаксiальному шарі $C_B$ , (см <sup>-3</sup> )	$3 \cdot 10^{16}$	$5 \cdot 10^{16}$	$4 \cdot 10^{16}$	$1 \cdot 10^{16}$	$2 \cdot 10^{16}$
Максимальна концентрація акцепторної домішки $C_{\max a}$ , (см <sup>-3</sup> )	$4 \cdot 10^{18}$	$4 \cdot 10^{18}$	$2 \cdot 10^{18}$	$2 \cdot 10^{18}$	$3 \cdot 10^{18}$
Максимальна концентрація донорної домішки $C_{\max д}$ , (см <sup>-3</sup> )	$2 \cdot 10^{20}$	$3 \cdot 10^{20}$	$3 \cdot 10^{20}$	$4 \cdot 10^{20}$	$1 \cdot 10^{20}$

### 3 ОТРИМАННЯ СТРУКТУР МЕТОДАМИ ТЕРМІЧНОГО ВИПАРОВУВАННЯ ТА ІОННО-ПЛАЗМОВОГО РОЗПИЛЕННЯ

Велике значення в напівпровідниковій технології мають процеси, пов'язані з нанесенням на поверхні структур тонкоплівкових покриттів та їх видаленням у вакуумі. Ці процеси базуються на молекулярно-кінетичних явищах в розріджених газах. Існує два основні методи осадження тонких плівок: термічним випаровуванням і катодним розпиленням. При термічному випаровуванні осаджується речовина нагрівається до температури випаровування і її пари конденсуються на підкладці. При катодному розпиленні осаджується речовина знаходиться при кімнатній температурі і бомбардується низькоенергетичними іонами з плазми газового розряду. Розпилені атоми досягають підкладки і конденсуються на ній. Обидва методи використовують для осадження провідних, резистивних і діелектричних плівок. Якість тонкоплівкових покриттів багато в чому залежить від глибини вакууму в робочій камері і співвідношення потоків молекул залишкового газу і випаровуваної речовини на поверхню підкладок. При термічному випаровуванні елементів і сплавів використовують одностигельні і багатостигельні способи. Удосконаленням катодного розпилення є метод іонно-плазмового розпилення і його модифікації, які становлять основу так званої технології «сухої» обробки напівпровідникових структур, що дозволяє виключити вживання рідких хімічних травильників і розчинників при обробленні фотолітографії тонкоплівкових покриттів. При виготовленні напівпровідникових приладів і інтегральних мікросхем термічне випаровування і іонно-плазмові процеси використовують для створення омичних переходів, пасивних елементів тонкоплівкових схем, міжелементної ізоляції та комутації. Для оцінювання якості тонкоплівкових покриттів контролюють їх товщину і структуру.

#### 3.1 Співвідношення потоків газу та пари на підкладках

При термічному напиленні тонкоплівкових покриттів між випарником і підкладкою створюється направлений потік пари. Аби він поширювався в технологічній камері безперешкодно, тиск в ній має бути достатньо малим. Концентрація молекул газу має бути така, аби зіткнення частинок пари з молекулами залишкового газу були відсутні. Середня довжина вільного пробігу молекул газу  $\lambda_r$  між двома зіткненнями при  $P = 10^{-2}$  Па становить близько 0,5 м. Для багатьох речовин приблизно така ж середня довжина вільного пробігу молекул пари в газі. Якщо при цьому підкладка віддалена від випарника на 10 см, то більше 80% молекул пари досягає підкладки без зіткнення з молекулами газу. Це визначається на підставі закону ослаблення потоку. Кількість частинок  $N$  потоку пари, що пройшли в газі шлях  $x$  без зіткнень,



$$N = N_0 \exp\left(-\frac{x}{\lambda}\right), \quad (3.1)$$

де  $N_0$  – кількість частинок потоку пари;  
 $\lambda = \lambda_r$  середня довжина вільного пробігу.

Тому за даних умов вплив газу на потік пари можна не враховувати. При високих тисках пари стає істотною взаємодія молекул пари одна з одною, зокрема при  $P \geq 10^{-1}$  Па.

У табл. 3.1 наведено кількості зіткнень молекул газу із стінкою камери  $v_r$ , кількості зіткнень молекул одна з одною в об'ємі камери  $v_v$  і середні довжини пробігу  $\lambda_r$  для різних тисків.

Таблиця 3.1 – Значення кількостей зіткнень молекул

$P, \text{Па}$	$\lambda_r$	$v_r, \left(\frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}\right)$	$v_v, \left(\frac{1}{\text{см}^3 \cdot \text{с}}\right)$
1	0,5 см	$2,8 \cdot 10^{18}$	$5,6 \cdot 10^{19}$
$10^{-2}$	50 см	$2,8 \cdot 10^{16}$	$5,6 \cdot 10^{15}$
$10^{-4}$	50 м	$2,8 \cdot 10^{14}$	$5,6 \cdot 10^{11}$
$10^{-6}$	5 км	$2,8 \cdot 10^{12}$	$5,6 \cdot 10^7$

При тисках нижче  $10^{-3}$  Па переважають зіткнення зі стінкою. Проте для аналізу впливу тиску газу на процес осадження речовини найважливішим параметром є не кількість зіткнень з поверхнею, а відношення кількості зіткнень  $v_r$  газу до зіткнень  $v_n$  пари з поверхнею підкладки. Відношення кількості зіткнень із стінкою молекул газу і пари знаходять за допомогою кінетичної теорії газів. Для газу (повітря) при  $T = 293$  К:

$$v_r/v_n = 55,5 M_n P_r / (\alpha_k d), \quad (3.2)$$

де  $M_n$  – масове число молекул пари;

$P_r$  – тиск газу, Па;

$\alpha_k$  – швидкість конденсації, виражена як швидкість наростання осаджуваного шару, нм/с;

$d$  – щільність випаровуваного матеріалу, г/см<sup>3</sup>.

Для алюмінію це співвідношення має вигляд:

$$v_r/v_{Al} = 5,6 \cdot 10^2 \cdot P_r / \alpha_k. \quad (3.3)$$

Швидкість конденсації при осадженні алюмінію зазвичай становить 1–100 нм/с. При тиску  $2 \cdot 10^{-2}$  Па  $v_r/v_{Al} = 10 \div 0,1$ . Цей приклад показує, що

вже при відносно низькому тиску залишкового газу частота зіткнень його молекул з підкладкою може бути одного порядку з частотою зіткнень з нею молекул пари. Судити про вплив газу на властивості осаджуваного шару лише за одним відношенням частот зіткнень з підкладкою не можна. Імовірність конденсації більшості хімічно пасивних компонентів газу мала, тому навіть при порівнянних  $\nu$  конденсація пари протікає без помітної адсорбції газу. Імовірність адсорбції і конденсації активних газових компонентів (кисню, водню, парів речовин, що проникають в камеру з вакуумних насосів) досить велика. В цьому випадку, аби уникнути впливу адсорбції газу, досягають дуже низького значення відношення  $\nu_r/\nu_n$ . Для цього значно знижують тиск залишкових газів і, в першу чергу, парціальний тиск небажаних компонентів або задають дуже високу швидкість конденсації пари. При осадженні алюмінію швидкість конденсації доводять до  $10 \text{ мкм/с}$ , тоді відношення  $\nu_r/\nu_n$  при тиску  $P_r = 10^{-1} \text{ Па}$  стає меншим  $10^{-2}$ .

### 3.1.1 Випаровування елементів

При випаровуванні речовини, що нагрівається у високому вакуумі, швидкість випаровування  $\nu$ , ( $\text{м}^{-2}/\text{с}^{-1}$ ), тобто кількість частинок, що покидають одиницю поверхні випаровуваної речовини за одиницю часу, визначається рівнянням Ленгмюра:

$$\nu = 2,63 \cdot 10^{24} \cdot \alpha \cdot P_s / \sqrt{\mu T}, \quad (3.4)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт випаровування, що дорівнює 1 для ідеального випарника;

$P_s$  – пружність пари речовини при температурі  $T$ , Па;

$\mu$  – молекулярна маса, кг/кмоль.

У одиницях маси речовини швидкість випаровування:

$$G = m\nu, \quad (3.5)$$

де  $m$  – маса молекули.

Підставляючи рівняння Ленгмюра, отримаємо:

$$G = 4,4 \cdot 10^{-4} \cdot \alpha \cdot P_s \sqrt{M_n/T}, \quad (3.6)$$

де  $M_n$  – масове число молекули пари, а розмірність  $G$  –  $\text{г}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ .

При великому тиску газу частина молекул, що випарувалися, може повертатися на випаровувану поверхню. В цьому випадку ефективна швидкість випаровування:

$$G_{\text{ef}} = \tau \cdot G, \quad (3.7)$$

де  $\tau = 0 \div 1$  – коефіцієнт передачі.

При випаровуванні  $Cu$  в умовах залишкового тиску аргону в камері  $P_r = 10^{-2}, 10^{-1}, 1, 10 \text{ Па}$ ,  $\tau = 1; 0,95; 0,8; 0,2$ , відповідно. Вже при тиску газу  $1 \text{ Па}$  його вплив на швидкість випаровування стає суттєвим.

Для розрахунку швидкості випаровування необхідно знати тиск насиченої пари при даній температурі.

На рис. А.3 показані експериментальні залежності тисків насиченої пари різних елементів і швидкості їх випаровування залежно від температури.

## 3.2 Катодне розпилення матеріалів

### 3.2.1 Тліючий розряд

Для утворення іонів, використовуваних при бомбардуванні поверхні розпилюваної мішені, між анодом і катодом у вакуумній камері створюють тліючий розряд. Він характеризується наявністю двох основних областей: невеликої за протяжністю прикатодної, в якій зосереджений основний спад потенціалу, що називають катодним спадом потенціалу, і області стовпа розряду, що являє собою сильно іонізований газ – плазму з високою провідністю і тому з малим спадом потенціалу. При зближенні електродів анода і катода в першу чергу зменшується протяжність позитивного стовпа розряду. Електрони можуть виходити з катода під дією фотоемісії. Для збільшення щільності емісії електронів застосовують термоемісійні катоди. У сильному електричному полі катодного спаду потенціалу електрони набирають енергію, яка визначається напруженістю електричного поля та їх рухливістю в даній області. Збудження молекул газу при зіткненні з електронами викликає появу світіння, а іонізація приводить до утворення позитивних іонів газу. Іони спрямовуються до мішені, на яку подано негативний потенціал відносно плазми розряду, та розпилюють її.

### 3.2.2 Механізм розпилення

Явище фізичного розпилення обумовлене передачею прискореним іоном атому мішені енергії, яка перевищує порогову енергію зсуву, подальшим переміщенням атома у напрямі до поверхні мішені і вильотом з неї. Основним механізмом катодного розпилення є процес передачі імпульсу або шляхом безпосереднього зіткнення прискореного іона з атомом мішені, або шляхом ряду вторинних зіткнень первинно зміщених атомів. Вочевидь, що при нормальному падінні іонного пучка на мішень розпилювання може відбуватися лише при послідовних вторинних зіткненнях. Фізичне розпилення речовини кількісно характеризується коефіцієнтом розпилення  $K$  ( $at/ион$ ) – кількістю атомів, що вибиваються з мішені одним падаючим на неї іоном. Коефіцієнт розпилення є величиною статистичною і визначається інтегральним співвідношенням:

$$K = N_p / N, \quad (3.8)$$

де  $N_p$  – кількість атомів мішені, розпилених з одиниці поверхні при опроміненні її потоком іонів з дозою  $N$ .

### 3.2.3 Коефіцієнт розпилення

Коефіцієнт розпилення визначається характером атомних зіткнень і структурою мішені. Вираз для коефіцієнта розпилення ізотропних мішеней має вигляд:

$$K = \frac{K_0 N_2 \sigma_a}{F E_s} \cdot \frac{2(E/E_M)^{1/2}}{1 + E/E_M}. \quad (3.9)$$

Коефіцієнт  $K_0$  (см) залежить від заряду ядра бомбардувального іона  $Z_1$  і атома мішені  $Z_2$  та періодично змінюється із зміною  $Z_2$ . При  $3 \leq Z_2 \leq 16$

$$K_0 = 1,3 \cdot 10^{-10} Z_2^{1/2} \left[ 1 + 0,25 \sin \left( 2\pi \left( \frac{Z_2}{8} \right) + \frac{\pi}{2} \right) \right] - 4,65 \cdot 10^{-12} (Z_1 - 18). \quad (3.10)$$

При  $Z_2 \geq 19$

$$K_0 = 1,3 \cdot 10^{-10} Z_2^{1/3} \left[ 1 + 0,25 \sin \left( 2\pi \left( \frac{Z_2 + 2}{18} \right) + \frac{\pi}{2} \right) \right] - 4,65 \cdot 10^{-12} (Z_1 - 18). \quad (3.11)$$

При розрахунках  $K_0$  у випадку  $Z_2 \geq 72$  чи  $Z_1 \geq 72$  варто використати ефективні заряди ядер:

$$Z_{1,2ef} = Z_{1,2} - 14. \quad (3.12)$$

Переріз екранування (см<sup>2</sup>):

$$\sigma_a = \pi a^2, \quad (3.13)$$

де  $a$  – радіус екранування, який розраховують за формулою:

$$a = \frac{4,7 \cdot 10^{-9}}{\left( Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3} \right)^{1/2}}. \quad (3.14)$$

Нормувальний коефіцієнт енергії  $Z$  визначають за формулою:

$$F = \frac{6,9 \cdot 10^6 \cdot a \cdot M_2}{Z_1 \cdot Z_2 \cdot (M_1 + M_2)}. \quad (3.15)$$

Енергія сублімації  $E_s$  (eB) для ряду елементів наведена в табл. А.3.

Із збільшенням енергії іонів коефіцієнт розпилення зростає, досягає максимуму, а потім зменшується. Енергія, що відповідає максимуму  $K$ ,

$$E_M = 0,3/F. \quad (3.16)$$

Максимальне значення коефіцієнта розпилення:

$$K_{\max} = \frac{K_0 N_2 \sigma_a}{FE_s}. \quad (3.17)$$

**Приклад 1.** Розрахувати коефіцієнт розпилення золота іонами крипто-ну з енергією 3 кеВ.

*Методика розрахунку*

1. Користуючись рис. А.4 запишемо табличні дані:  $Z_1, M_1, Z_2, M_2$ ; користуючись табл. А.3 запишемо значення  $E_s$  (eB).

2. Розрахуємо допоміжні величини.

Розрахуємо кількість молекул золота в  $1 \text{ см}^3$ , застосувавши формулу:

$$N = \frac{N_a}{V_m} \cdot 10^{12} \quad (\text{см}^{-3}), \quad (3.18)$$

де  $N_a$  – число Авогадро,  $N_a = 6,02 \cdot 10^{23}$ .

Розрахуємо молярний об'єм золота за формулою:

$$V_m = V_{m0} \frac{TP_0}{T_0P} \quad (\text{см}^3/\text{моль}), \quad (3.19)$$

де  $V_{m0}$  – молярний об'єм газу при нормальних умовах (22,4 л/моль);

$T_0, P_0, T, P$  – температура і тиск при нормальних та заданих умовах, відповідно.

При нормальних умовах  $T_0 = 300 \text{ К}$ ,  $P_0 = 10^5 \text{ Па}$ . Температура золота задана в умові задачі. Користуючись графіком залежності тиску насиченої пари від температури (рис. А.3, а), отримаємо тиск для золота  $P$ .

Розрахуємо значення  $V_m$  та  $N$  за допомогою формул (3.18) та (3.19).

3. Розрахуємо величини:

1) радіус екранування, використовуючи формулу (3.14):

$$a = \frac{4,7 \cdot 10^{-9}}{(Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})^{1/2}};$$

2) переріз екранування (формула 3.13):

$$\sigma_a = \pi a^2;$$

3) нормувальний коефіцієнт енергії (формула 3.15):

$$F = \frac{6,9 \cdot 10^6 \cdot a \cdot M_2}{Z_1 \cdot Z_2 \cdot (M_1 + M_2)}, \frac{1}{eB};$$

4) ефективний заряд ядра (формула 3.12):

$$Z_{2ef} = Z_2 - 14.$$

4. Визначимо значення коефіцієнта  $K_0$  (формула 3.10):

$$K_0 = 1,3 \cdot 10^{-10} Z_{2ef}^{1/2} \left[ 1 + 0,25 \cdot \sin \left( 2\pi \frac{Z_{2ef} + 2}{18} + \frac{\pi}{2} \right) \right] - 4,65 \cdot 10^{-12} (Z_1 - 18), \text{ (см)}.$$

5. Знайдемо максимальний коефіцієнт розпилення, користуючись формулою 3.17:

$$K_{max} = \frac{K_0 N_2 \sigma_a}{FE_s}, \text{ (ат. / іон)}.$$

6. Визначимо енергію, відповідну  $K_{max}$  (формула 3.16):

$$E_M = 0,3 / F, \text{ (eB)}.$$

7. Знаходимо значення  $K$  при  $E = 10^3 \text{ eB}$  (спрощена формула 3.9):

$$K = K_{max} \frac{2(E / E_M)^{1/2}}{1 + E / E_M}, \text{ (ат. / іон)}.$$

## Завдання для самостійного виконання

Таблиця 3.2 – Варіанти завдань та початкові дані для розрахунку

Початкові дані	Варіант								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Матеріал розпилення	Au (золото)	Au (золото)	Au (золото)	Al (алюміній)	Al (алюміній)	Al (алюміній)	Cu (мідь)	Cu (мідь)	Au (золото)
Якими іонами розпилюється	Ar (аргон)	Xe (ксенон)	Rn (радон)	Ar (аргон)	Kr (криптон)	Xe (ксенон)	Ar (аргон)	Rn (радон)	Kr (криптон)
Енергія розпилення, <i>keV</i>	4	3,5	5	6	5,5	7	6,5	2,5	3
Температура плавлення матеріалу розпилення <i>T<sub>пл</sub>, K</i>	1337	1337	1337	933	933	933	1356	1356	1337

### 3.3 Розрахунок параметрів тонкоплівкових елементів

#### 3.3.1 Конструкції та розрахунок плівкових резисторів

*Плівковий резистор (film-resistor)* конструктивно складається з резистивної плівки, що має задану конфігурацію, та контактних площадок. На рис. 3.1 зображено найбільш розповсюджені конфігурації таких резисторів: прямокутна (рис. 3.1, а), яка використовується для резисторів з малим опором; типу меандр (рис. 3.1, б) та послідовне з'єднання резистивних плівкових смужок (рис. 3.1, в), які використовуються для резисторів великого опору.

До плівкових резисторів висуваються такі вимоги: стабільність у часі; мала площа; низький температурний коефіцієнт опору (ТКО); необхідна потужність розсіювання; низький рівень шумів; малі значення паразитних параметрів.

При виборі матеріалу для резисторів необхідно прагнути, щоб усі резистори, розміщені на одній підкладці, мали однаковий питомий поверхневий опір  $\rho_0$ , який визначається з формули:

$$\rho_{onm} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n R_i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}}}, \quad (3.20)$$

де  $n$  – кількість резисторів;

$R_i$  – номінальне значення  $i$ -го резистора.

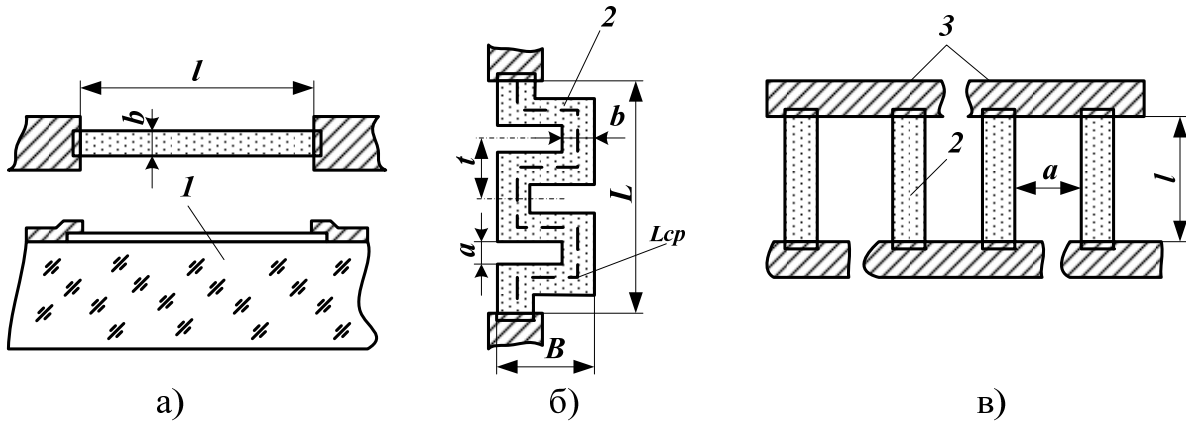


Рисунок 3.1 – Конфігурація плівкових резисторів: а) прямокутний; б) типу меандр; в) послідовне з'єднання смужок; 1 – підкладка; 2 – резистивна плівка; 3 – провідна плівка;  $l$ ,  $b$  – довжина, ширина резистивної плівки, відповідно;  $L$ ,  $B$  – довжина та ширина меандра;  $a$  – відстань між резистивними смужками;  $t$  – крок однієї ланки меандра

Конструктивний розрахунок плівкових резисторів полягає у встановленні форми, геометричних розмірів та мінімальної площі, яку займають резистори на підкладці. При цьому необхідно, щоб резистори забезпечували розсіювання заданої потужності при заданій точності  $\gamma_R$ .

Початковими даними для розрахунку є: номінал резистора  $R$ , Ом; допуск на номінал  $\gamma_R$ , потужність розсіювання резистора  $P$ , мВт; технологічні дані та обмеження (табл. А.4); діапазон робочих температур, тривалість роботи та інші.

Розрахунок плівкових резисторів починають з вибору матеріалу (табл. 3.3). Критеріями вибору матеріалу є: оптимальне значення опору квадрата резистивної плівки  $\rho_0$ , максимальне значення питомої потужності розсіювання резистивної плівки  $P_0$  та мінімальне значення ТКО. Далі проводять перевірку правильності вибору матеріалу з точки зору забезпечення точності виготовлення резисторів.

Загальна відносна похибка опору резистора визначається сумою похибок при виготовленні та конструюванні, а також похибок, зумовлених впливом умов використання:

$$\gamma_R = \Delta R/R = \gamma_{K_\phi} + \gamma_{\rho_0} + \gamma_{R_t} + \gamma_{R_{cm}} + \gamma_{R_k}, \quad (3.21)$$

де  $\gamma_{K_\phi}$  – похибка коефіцієнта форми;

$\gamma_{\rho_0}$  – відносна похибка відтворення опору квадрата резистивної плівки;

$\gamma_{R_t}$  – температурна похибка;

$\gamma_{R_{cm}}$  – похибка опору, зумовлена старінням плівки;

$\gamma_{R_k}$  – похибка перехідних опорів контактів.



Таблиця 3.3 – Параметри матеріалів тонкоплівкових резисторів

Матеріал резистора	Матеріал контактних площадок	Питомий поверхневий опір $\rho_0$ , Ом/□	Температурний коефіцієнт опору ТКО $\times 10^{-4}$ , °C <sup>-1</sup> при $T = -60 \div 125$ °C	Допустима питома потужність розсіювання $P_{0,2}$ , Вт/см <sup>2</sup>	Діапазон номінальних значень опорів, Ом
Хром	Золото	10–500	0,6	1	50–30 000
Ніхром	Мідь	300	±1	2	50–30 000
Сплав МЛТ-3М	Мідь з ніхромом	500	±2	2	50–50 000
Тантал	Алюміній з ванадієм	20–100	-2	3	100–10 000
	Тантал	10	-2		10–15 000
Сплав РС-3001	Золото з хромом	1000	-0,2	2	100–50 000
		2000			200–100 000
Сплав РС-3710	Те ж	3000	-3	2	1000–20 0000
Кермет К-50С	Те ж	3000	+3	2	1000–10 000
		5000	-4		500–200 000
		10000	-5		10 000–10 000 000

Похибка коефіцієнта форми  $\gamma_{K\phi}$  залежить від похибки геометричних розмірів резистора – довжини  $l$  та ширини  $b$ :

$$\gamma_{K\phi} = \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta b}{b}, \quad (3.22)$$

де  $\Delta l$ ,  $\Delta b$  – абсолютні похибки відтворення довжини та ширини резистора.

Похибка відтворення опору квадрата резистивної плівки  $\gamma_{\rho_0} = \Delta\rho_0/\rho_0$  залежить від матеріалу, способу та умов нанесення резистивної плівки. В умовах серійного виробництва її значення не перевищує 5%.

Температурна похибка залежить від ТКО матеріалу плівки та діапазонів робочих температур:

$$\gamma_{R_t} = \alpha_R \cdot (T_{\max} - 20^\circ \text{C}) \cdot 100\%, \quad (3.23)$$

де  $\alpha_R$  – температурний коефіцієнт опору матеріалу плівки, 1/°C.

Похибка  $\gamma_{R_{cm}}$  зумовлена старінням плівки, викликана повільною зміною структури плівки з часом, а також її окисненням. Вона залежить від матеріалу плівки та ефективності захисту, а також її умов зберігання та експлуатації. Вона не перевищує 3%.

Похибка перехідних опорів контактів  $\gamma_{R_x}$  залежить від технологічних вимог наплення плівок, питомого опору резистивної плівки та геометричних розмірів контактної переходи; величини перекриття контактуючих

плівок, ширини резистора. В більшості випадків  $\gamma_{R_k} = 1 - 2\%$ .

Допустима похибка коефіцієнта форми визначається з (3.21)

$$\gamma_{K_\phi \text{ доп}} = \gamma_R - \gamma_{\rho_0} - \gamma_{R_t} - \gamma_{R_{cm}} - \gamma_{R_k}. \quad (3.24)$$

Якщо значення  $\gamma_{K_\phi \text{ доп}}$  від'ємне або дорівнює 0, то це означає, що виготовлення резистора заданої точності з вибраного матеріалу неможливе. В цьому випадку необхідно вибрати інший матеріал з меншими значеннями  $\alpha_R$ ,  $\gamma_{R_{cm}}$  та  $\gamma_{\rho_0}$  або здійснювати пригонку резистора.

Коефіцієнт форми  $K_\phi$  при відомому опорі для обраного матеріалу визначається за формулою:

$$K_\phi = R / \rho_0. \quad (3.25)$$

При  $1 \leq K_\phi \leq 10$  рекомендується конструювати резистор прямокутної форми, при  $0,1 \leq K_\phi \leq 1$  – резистор прямокутної форми, у якого довжина менша за ширину, при  $10 < K_\phi \leq 50$  – меандр, смуговий або типу змійки. Якщо  $K_\phi > 50$ , то площа резистора дуже велика, тому в цьому випадку рекомендується використовувати дискретні резистори, сумісні з мікробіркою. Конструювати резистори з  $K_\phi < 0,1$  не рекомендується, тому що вони будуть мати великі контактні площадки та займати багато місця на підкладці. Порядок подальшого розрахунку залежить від форми резистора.

*Розрахунок резистора прямокутної форми.* Для резисторів з  $1 \leq K_\phi \leq 10$  спочатку розраховують ширину резистора з умови:

$$b_{\text{розр}} \geq \max \{b_{\text{техн}}; b_{\text{точн}}; b_p\}, \quad (3.26)$$

де  $b_{\text{техн}}$  – мінімальна ширина резистора, яка визначається можливостями технологічного процесу (табл. А.4);

$b_{\text{точн}}$  – мінімальна ширина резистора, зумовлена вимогами до його точності:

$$b_{\text{точн}} = \frac{\Delta b + \Delta l / K_\phi}{\gamma_{K_\phi \text{ доп}}}, \quad (3.27)$$

$b_p$  – мінімальна ширина резистора, при якій забезпечується розсіювання заданої потужності резистора:

$$b_p = \sqrt{\frac{P \rho_0}{P_0 R}} = \sqrt{\frac{P}{K_\phi P_0}}. \quad (3.28)$$

За ширину резистора  $b$  беруть найближче більше до  $b_{\text{розр}}$  значення, кратне кроку координатної сітки, прийнятому для рисунка топології з враху-

ванням масштабу. Для гібридних мікросхем крок координатної сітки часто становить 1 або 0,5 мм. Наприклад, якщо крок координатної сітки 0,5 мм, масштаб 10:1, то округлення проводять до величини, кратної 0,05 мм. Коefіцієнт навантаження за потужністю розсіювання визначається з співвідношення:

$$K = b_p^2 / b^2 \quad (3.29)$$

і не повинен перевищувати одиниці. Якщо виявилось, що  $K > 1$ , то розрахунок необхідно відкоригувати.

Далі визначають розрахункову довжину резистора

$$l_{розр} = b \cdot K_\phi. \quad (3.30)$$

За довжину резистора  $l$  беруть найближче більше до  $l_{розр}$  значення, кратне кроку координатної сітки, прийнятому для креслення топології.

Далі знаходять повну довжину резистора з урахуванням перекриття контактних площадок:

$$l_{заг} = l + 2 \cdot e, \quad (3.31)$$

де  $e$  – розмір перекриття резистора та контактних площадок (див. табл. А.4).

Площу, яку займає резистор на підкладці, розраховують з формули:

$$S = l_{заг} \cdot b. \quad (3.32)$$

Для резисторів, які мають  $K_\phi < 1$ , спочатку визначають довжину, а потім ширину резистора.

Розрахункова довжина резистора  $l_{розр}$  повинна бути не меншою найбільшого значення однієї з трьох величин:

$$l_{розр} \geq \max \{ l_{техн}; l_{точн}; l_p \}. \quad (3.33)$$

Величини  $l_{техн}$ ,  $l_{точн}$ ,  $l_p$ , визначаються аналогічно  $b_{техн}$ ,  $b_{точн}$ ,  $b_p$ :

$$l_{точн} = \frac{\Delta l + \Delta b \cdot K_\phi}{\gamma_{K_\phi \text{ доп}}}. \quad (3.16)$$

$$l_p = \sqrt{P \cdot K_\phi / P_0}. \quad (3.34)$$

За довжину резистора  $l$  беруть найближче до  $l_{розр}$  ціле значення, кратне кроку координатної сітки. Повну довжину резистора з урахуванням перекриття контактних площадок розраховують за формулою (3.31).

Розрахункове значення ширини резистора

$$b_{розр} = l / K_\phi. \quad (3.35)$$

За ширину  $b$  резистора беруть найближче більше до  $b_{розр}$  значення, кратне кроку координатної сітки.

Площу резистора розраховують за формулою (3.32).

Виконують перевірку проведених розрахунків. Резистор спроектовано правильно, якщо:

1. Питома потужність розсіювання  $P'_0$  не перевищує допустимого значення  $P_0$ :

$$P'_0 = P/S \leq P_0;$$

2. Похибка коефіцієнта форми  $\gamma'_{K_\phi}$  не перевищує допустимого значення  $\gamma_{K_\phi доп}$

$$\gamma'_{K_\phi} = \frac{\Delta l}{l_{заг}} + \frac{\Delta b}{b} \leq \gamma_{K_\phi доп};$$

3. Сумарна похибка  $\gamma'_R$  не перевищує допуску  $\gamma_R$

$$\gamma'_R = \gamma'_{K_\phi} + \gamma_{\rho_0} + \gamma_{R_l} + \gamma_{R_{cm}} + \gamma_{R_k} \leq \gamma_R.$$

*Розрахунок резистора типу меандр.* Резистори типу меандр розраховують з умови мінімальної площі, яку займає резистор. Розрахунок меандра починають з розрахунку ширини  $b$  за формулами (3.26)–(3.28). Далі знаходять довжину середньої лінії меандра

$$l_{серед} = b \cdot K_\phi. \quad (3.36)$$

Після цього задаються відстанню  $a$  між резистивними смугами, виходячи з технологічних обмежень, та знаходять крок однієї ланки меандра:

$$t = a + b. \quad (3.37)$$

Далі визначають оптимальну кількість ланок меандра  $n_{opt}$ . Якщо відношення  $l_{серед.}/b > 10$ , то оптимальна кількість ланок меандра може бути розрахована за наближеною формулою:

$$n_{opt} \approx \sqrt{(l_{серед.}/t) \cdot (B/L)}. \quad (3.38)$$

При  $L = B$  (меандр квадратної форми) та  $a = b$  вираз (3.21) спрощується:

$$n_{opt} = \sqrt{K_\phi/2}. \quad (3.39)$$

Значення  $n_{opt}$  округлюється до найближчого більшого цілого. Габаритні розміри меандра визначаються із співвідношень:

$$L = n \cdot (a + b); \quad (3.40)$$

$$B = (l_{серед.} - a \cdot n)/n, \quad (3.41)$$

де  $n$  – отримана кількість ланок меандра.

Площа, яку займає резистор типу меандр визначається як:

$$S_m = L \cdot B. \quad (3.42)$$

Квадратна або близька до неї форма резистора типу меандр часто виявляється незручною при компонованні плівкових елементів на підкладці (якщо площа, що виділена під резистор, відрізняється від квадрата). В цьому випадку, знаючи габаритну площу меандра  $S_m$ , задаються одним з його розмірів ( $L'$  або  $B'$ ), розраховують інший розмір ( $B' = S_m/L'$  або  $L' = S_m/B'$ ) та кількість ланок меандра  $n' = L'/t$ .

**Приклад розрахунку резистора.** Визначити конфігурацію і площу плівкового резистора з номінальним значенням  $R = 2,7 \text{ кОм}$ , потужністю розсіювання  $P = 30 \text{ мВт}$  і точністю отримання номіналу  $\gamma_R = 15\%$ , якщо технологія виготовлення забезпечує отримання  $\gamma_{\rho_0} = 5\%$ ,  $b_{\text{техн}} = 0,01 \text{ мм}$ ;  $\Delta b = \Delta l = 0,01 \text{ мм}$ . Діапазон робочих температур від  $-20$  до  $+120 \text{ }^\circ\text{C}$ .

#### Розв'язування

1. За матеріал резистивної плівки з табл. А.4 вибираємо хром з параметрами:  $\rho_0 = 500 \text{ Ом/}\square$ ,  $P_0 = 1 \text{ Вт/см}^2$ ,  $\alpha_R = 0,6 \cdot 10^{-4} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ .

2. З співвідношень (3.23) і (3.24) визначаємо  $\gamma_{R_t}$  і  $\gamma_{\text{Кф доп}}$ , беручи  $\gamma_{R_{\text{ст}}} = 1\%$ ,  $\gamma_{R_k} = 2\%$ :

$$\gamma_{R_t} = 0,6 \cdot 10^{-4} \cdot (120 - 20) \cdot 100\% = 0,6\%;$$

$$\gamma_{\text{Кф доп}} = 15 - 5 - 0,6 - 1 - 2 = 6,4\%.$$

3. Коефіцієнт форми обчислюємо за (3.25):

$$K_\phi = 2700/500 = 5,4.$$

Отже, резистор буде мати прямокутну форму.

4. Розрахункову ширину резистора визначаємо за (3.26)–(3.28):

$$b_{\text{точн}} = \frac{(0,01 + 0,01/5,4)}{0,64} = 0,185 \text{ мм},$$

$$b_p = \sqrt{30 \cdot 10^{-3} / 5,4 \cdot 1} = 0,0745 \text{ см} = 0,745 \text{ мм}.$$

З урахуванням округлення беремо  $b = 0,75 \text{ мм}$ .

5. Довжину резистора знаходимо за (3.30), (3.31):

$$l = 0,75 \cdot 5,4 = 4,05 \text{ мм};$$

$$l_{\text{заг}} = 4,05 + 2 \cdot 0,1 = 4,25 \text{ мм}.$$

6. Визначаємо площу резистора:  $S = 4,25 \cdot 0,75 = 3,18 \text{ мм}^2$ .

7. Виконуємо перевірку проведених розрахунків.

– питома потужність розсіювання  $P'_0$  не перевищує допустиму  $P_0$ :

$$\frac{30 \cdot 10^{-3}}{3,18} = 0,94 \frac{Bm}{cm^2} < 2 \frac{Bm}{cm^2};$$

– похибка коефіцієнта форми  $\gamma'_{K\phi}$  не перевищує допустиму  $\gamma_{K\phi доп}$  :

$$\frac{0,01}{4,25} + \frac{0,01}{0,75} = 0,015 \leq 0,64;$$

– сумарна похибка  $\gamma'_R$  не перевищує допуску  $\gamma_R$

$$1,5+5+0,6+1+2=10,1\% \leq 15\%.$$

Отже, резистор розраховано правильно.

Таблиця 3.4 – Варіанти завдань та початкові дані для розрахунку

Початкові дані	Варіант								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Номинальний опір, $k\Omega$	22	33	30	240	5	6	2	320	28
Точність отримання номіналу $\gamma_R$ , %	10	15	12	9	15	10	12	10	9
Потужність розсіювання $P$ , $mW$	10	15	10	12	10	15	10	12	10
Діапазон робочих температур, $^{\circ}C$	-20 ÷ +120	-20 ÷ +90	-20 ÷ +90	-20 ÷ +125	-20 ÷ +100	-20 ÷ +100	-20 ÷ +110	-20 ÷ +120	-20 ÷ +120
Технологія виготовлення	М	Ф	Ф	М	М	Ф	Ф	М	Ф

### 3.3.2 Конструкції та розрахунок плівкових конденсаторів

За конструкцією *плівковий конденсатор (film-capasitor)* в більшості випадків являє собою тришарову структуру (рис. 3.6). Він складається з нижньої обкладинки 1, діелектричної плівки 2 та верхньої обкладинки 3. Вся конструкція наноситься на підкладку 4. Площа нижньої обкладинки конденсатора перевищує площу верхньої обкладинки, а площа діелектричної плівки більша за площу нижньої обкладинки. Це запобігає можливості замикання обкладинок та виключає похибку від їх зміщення.

До матеріалу обкладинок плівкового конденсатора висуваються такі вимоги: висока електропровідність, яка забезпечує малі втрати енергії, добра адгезія, мала міграційна рухливість атомів. Остання з цих вимог не дозволяє використовувати як матеріал обкладинок золото або мідь, оскільки для них характерна висока рухливість атомів. Через їхню дифузію у діелектрик можливі короткі замикання обкладинок. Для виконання обкладинок не використовуються також матеріали з високою температурою випаровування, наприклад нікель або хром.

Найчастіше для виготовлення обкладинок тонкоплівкового конденсатора використовують алюміній. Він має порівняно невелику температуру випаровування, а це означає, що його атоми мають низьку енергію у процесі напilenня. Електричний опір обкладинок з алюмінію достатньо ма-

лий, що забезпечує високу добротність виготовлених конденсаторів. Конденсатори з алюмінієвими обкладинками надійні, оскільки атоми алюмінію мають низьку міграційну рухливість. Це обумовлюється тим, що на його поверхні утворюється оксидний шар  $Al_2O_3$ , який заважає дифузії атомів алюмінію у діелектрик. Для покращення адгезії алюмінію використовують підшар титану або хрому.

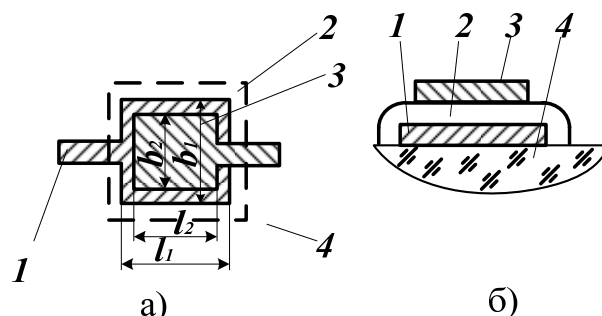


Рисунок 3.6 – Конструкція плівкового конденсатора: а) топологія, б) поперечний переріз, 1 – нижня обкладинка, 2 – діелектрична плівка, 3 – верхня обкладинка, 4 – підкладка

Конструкція плівкового конденсатора, зображена на рис. 3.6, використовується, коли площа верхньої обкладинки  $S$  більша  $5 \text{ мм}^2$ . При  $S = 1\text{--}5 \text{ мм}^2$  рекомендується конструювати плівковий конденсатор у вигляді двох плівкових провідників 1 і 3, що перетинаються під прямим кутом, розділених діелектричним шаром 2, як зображено на рис. 3.7, а. При активній площі плівкового конденсатора, меншій  $1 \text{ мм}^2$ , його потрібно виконувати у вигляді двох послідовно з'єднаних конденсаторів, як подано на рис. 3.7, б, або у вигляді двосторонньої конструкції (рис. 3.7, в), в якій як діелектричний шар 2 використано матеріал підкладки.

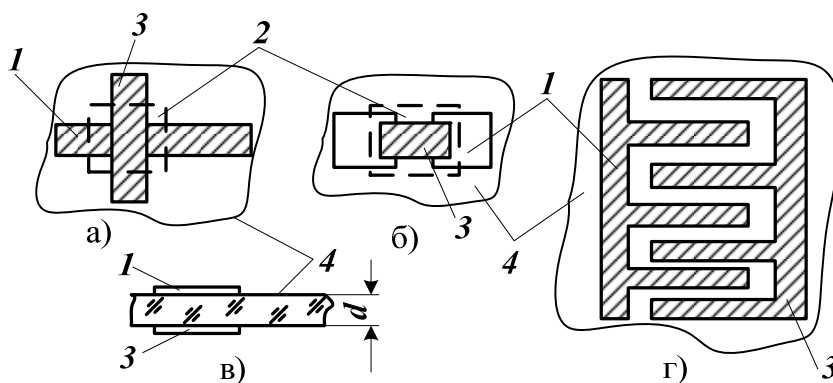


Рисунок 3.7 – Плівкові конденсатори малої ємності: а) з перехрещеними плівковими провідниками; б) послідовне з'єднання двох конденсаторів; в) з підкладкою як діелектричним шаром; г) гребінчаста конструкція; 1, 3 – плівкові провідники; 2 – діелектричне покриття; 4 – підкладка

При  $S = 1 \text{ мм}^2$  рекомендується конструювати гребінчастий плівковий конденсатор (рис. 3.7, г). Ємність такого конденсатора на 90% складається

з паразитної ємності, зумовленої крайовим ефектом. Точно розрахувати її неможливо, оскільки складно врахувати ступінь проникнення електричного поля в підкладку та в повітря або захисне покриття мікросхем.

Конденсатори, конструкцію яких виконано як показано на рис. 3.7, а, характеризуються вищою точністю отримання заданого номіналу ємності порівняно зі звичайними конденсаторами того ж самого номіналу.

Вихідними даними для визначення геометричних розмірів конденсаторів є:

– схемотехнічні дані (з принципової електричної схеми) – номінал конденсатора  $C$ ,  $n\Phi$ ; допуск на номінал  $\gamma_c$ , %; робоча напруга  $U_p$ ,  $B$ ; тангенс кута діелектричних втрат  $tg\delta$  або добротність  $Q$  ( $Q = 1/tg\delta$ ); технологічні дані та обмеження (табл. А.4);

– експлуатаційні дані – діапазон робочих температур, робоча частота  $f_p$  та інші.

Розрахунок плівкових конденсаторів починають з вибору матеріалу обкладинок та матеріалу діелектрика (табл. 3.5) з максимальною діелектричною проникністю  $\epsilon$ , з високою електричною міцністю  $E$ , а також з малими значеннями ТКЄ та  $tg\delta$ . Для забезпечення високої добротності необхідно, щоб матеріал обкладинки мав малий питомий поверхневий опір.

Таблиця 3.5 – Параметри матеріалів плівкових конденсаторів

Матеріал діелектрика	Матеріал обкладинок	Діелектрична проникність $\epsilon$ при $f=1$ кГц	Питома ємність $C_0$ , $n\Phi/cm^2$	Тангенс кута діелектричних втрат при $f=1$ кГц, $tg\delta$	Температурний коефіцієнт ємності ТКЄ $\times 10^{-4}$ , $^{\circ}C^{-1}$	Електрична міцність $E \times 10^6$ , $B/cm$	Максимальна робоча частота $f$ , МГц	Робоча напруга $U_{роб}$ , $B$
Монооксид кремнію	Алюміній А99	5–6	5 000–10 000	0,01–0,02	2	2–3	500	60 30
Монооксид германію	Те ж	11–12	5000 10000 15000	0,001 0,005	3	2	300	10 7 5
Боросилікатне скло	Те ж	4	2500 5000 10000	0,001–0,0015	0,35	3–4	300	24 15 10
Скло електровакуумне С41-1	Те ж	5,2	15000 20000 30000 400000	0,002–0,003	0,5–1,8	3–4	300	12,6 10–12,6 6,3–10 6,3
П'ятиоксид танталу	Тантал Алюміній А99	23	60 000 100 000 200 000	0,02	4	2	0,1	15 10 3



Ємність конденсаторів, що складаються з двох обкладинок, розділених діелектриком (див. рис. 3.6)

$$C = C_0 \cdot S, \quad (3.43)$$

де  $C_0$  – питома ємність;

$S$  – площа взаємного перекриття обкладинки (площа верхньої обкладинки конденсатора).

Питома ємність конденсатора визначається з умови електричної міцності:

$$C_{0U} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon / d, \quad (3.44)$$

де  $\varepsilon_0 = 0,0885 \text{ нФ/см}$  – відносна діелектрична проникність;

$\varepsilon$  – діелектрична проникність матеріалу діелектрика;

$d$  – товщина діелектрика.

Товщину діелектрика визначають з умови:

$$d > U_p \cdot K_s / E, \quad (3.45)$$

де  $K_s$  – коефіцієнт запасу за напругою ( $K_s = 2-3$ ).

Якщо необхідно забезпечити задану похибку ємності, то питома ємність конденсатора визначається з співвідношення

$$C_{\text{точн}} = C \left( \frac{\gamma_s}{\Delta L} \right)^2 \cdot \frac{K_\phi}{(1 + K_\phi)^2}, \quad (3.46)$$

де  $\gamma_s$  – відносна похибка площі конденсатора;

$\Delta L = \Delta B$  – відносні похибки розмірів обкладинки конденсатора (див. табл. А.4);

$K_\phi = L/B$  – коефіцієнт форми конденсатора.

Максимально допустима похибка активної площі конденсатора

$$\gamma_{s \text{ доп}} = \gamma_C - \gamma_{C0} - \gamma_{cm} - \gamma_{Ct}, \quad (3.47)$$

де  $\gamma_{C0}$  – відносна похибка питомої ємності, яка характеризує відтворюваність питомої ємності в умовах даного виробництва (залежить від матеріалу та похибки товщини діелектрика та становить 3–5%);

$\gamma_{cm}$  – відносна похибка, зумовлена старінням плівок конденсатора і залежить від матеріалу та способу захисту (не перевищує 2–3%);

$\gamma_{Ct}$  – відносна температурна похибка, яка визначається з рівняння

$$\gamma_{Ct} = \alpha_C \cdot (T_{\text{макс}} - 20^\circ \text{C}), \quad (3.48)$$

де  $\alpha_C$  – температурний коефіцієнт ємності (ТКЄ).

Після розрахунку питомої ємності конденсатора з (3.44) та (3.46) оби-

рають найменше з двох отриманих значень:

$$C_0 < \min \{C_{0U}, C_{0точн}\}. \quad (3.49)$$

Далі розраховують площу верхньої обкладинки конденсатора:

$$S_g = C/C_0. \quad (3.50)$$

Розміри верхньої обкладинки визначаються з співвідношень:

$$L_g = \sqrt{S_g \cdot K_\phi}; \quad (3.51)$$

$$B_g = L_g / K_\phi. \quad (3.52)$$

Розміри нижньої обкладинки:

$$L_n = L_g + 2 \cdot q; \quad (3.53)$$

$$B_n = B_g + 2 \cdot q, \quad (3.54)$$

де  $q$  – розмір перекриття нижньої та верхньої обкладинки конденсатора ( $q = 0,2$  мм – з табл. А.4). Розміри діелектричного шару:

$$L_d = L_n + 2 \cdot f, \quad (3.55)$$

$$B_d = B_n + 2 \cdot f, \quad (3.56)$$

де  $f$  – розмір перекриття нижньої обкладинки та діелектрика ( $f = 0,1$  мм – з табл. А.4).

Далі розраховують площу, яку займає конденсатор:

$$S_d = L_d \cdot B_d. \quad (3.57)$$

При розрахунку конденсаторів малої площі ( $S=1-5$  мм<sup>2</sup>) необхідно враховувати збільшення ємності конденсатора, яке обумовлено впливом крайового ефекту (збільшенням напруги електричного поля на краях обкладинок). Площа верхньої обкладинки конденсатора повинна бути змінена:

$$S_g = (C/C_0) \cdot K, \quad (3.58)$$

де  $K$  – коефіцієнт, що враховує крайовий ефект:

$$K = 1,3 - 0,06 \cdot C/C_0. \quad (3.59)$$

Виконують перевірку проведених розрахунків.

1. Конденсатор спроектовано правильно, якщо робочий тангенс кута втрат не перевищує заданого:

$$\operatorname{tg} \delta_{\text{роб}} \leq \operatorname{tg} \delta. \quad (3.60)$$

Втрати у конденсаторі складаються з втрат у діелектрику та обкладинках:

$$\operatorname{tg} \delta_{\text{роб}} = \operatorname{tg} \delta_{\text{діел}} + \operatorname{tg} \delta_{\text{обк}},$$

$$\operatorname{tg} \delta_{\text{обк}} = 2 \cdot \pi \cdot f_p \cdot R_{\text{обк}} \cdot C, \quad (3.61)$$

де  $R_{\text{обк}}$  – опір обкладинок конденсатора, Ом;

$C$  – ємність конденсатора, Ф;

$f_p$  – робоча частота, Гц.

Повний опір обох обкладинок розраховується за формулою

$$R_{\text{обк}} = (2/3) \cdot \rho_{0\text{обк}} \cdot K_\phi, \quad (3.62)$$

де  $\rho_{0\text{обк}}$  – питомий поверхневий опір матеріалу обкладинок.

2. Проводимо оцінювання забезпечення електричного режиму: робоча напруженість електричного поля не перевищує електричної міцності матеріалу діелектрика

$$E_{\text{роб}} \leq E, \quad (3.63)$$

де

$$E_{\text{роб}} = U_p / d', \quad (3.64)$$

$$d' = 0,0885 \cdot \varepsilon / C_0, \text{ см}. \quad (3.65)$$

3. Виконуємо перевірку точності конденсатора в заданих умовах експлуатації: похибка активної площі конденсатора не перевищує заданої

$$\gamma_{\text{Сроб}} \leq \gamma_S, \quad (3.66)$$

$$\gamma_{\text{Сроб}} = \Delta L \frac{1 + K_\phi}{\sqrt{K_\phi S}}. \quad (3.67)$$

Якщо будь-яка з нерівностей (3.60), (3.63) або (3.66) не виконується, то необхідно вибрати інший матеріал діелектрика або змінити конструкцію конденсатора.

Якщо у схемі є декілька конденсаторів, то для виготовлення їх в єдиному технологічному циклі доцільно вибирати для всіх конденсаторів однаковий діелектрик з однаковою товщиною та, відповідно, однаковою питомою ємністю  $C_0$ .

Для декількох конденсаторів на одній підкладці розрахунок починають з конденсатора, який має найменший номінал ємності. Після вибору номіналу та розрахунків за формулами (3.44)–(3.48) визначають значення питомої ємності, при якій конденсатор буде займати мінімальну площу на підкладці:

$$C_{0\text{min}} = C_{\text{min}} / S_{\text{min}}. \quad (3.68)$$

Остаточний вибір  $C_0$  виконують з формули

$$C_0 \leq \min \{C_{0U}, C_{0\text{точн}}, C_{0\text{min}}\}. \quad (3.69)$$

Розраховують товщину діелектрика, що відповідає питомій ємності, з (3.65). Якщо товщина діелектрика не виходить за межі можливостей тонкоплівкової технології (0,1–1мкм), то продовжують подальший розрахунок, в іншому випадку обирають інший матеріал.

**Приклад розрахунку конденсатора.** Визначити розміри плівкового конденсатора, виходячи з таких даних:  $C = 870 \text{ нФ}$ ,  $U_p = 15 \text{ В}$ ,  $\gamma_C = 15\%$ ,  $\text{tg}\delta = 0,04$ ; технологічні дані:  $\Delta B = \Delta L = 0,1 \text{ мм}$ ,  $q = 0,2 \text{ мм}$ ,  $f = 0,1 \text{ мм}$  (табл. А.4),  $\gamma_{C0} = 5\%$ ,  $\gamma_{Ccm} = 1\%$ ; експлуатаційні дані: максимальна робоча частота  $f_p = 300 \text{ кГц}$ , діапазон температур від  $-60 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $+120 \text{ }^\circ\text{C}$ .

#### Розв'язування

1. Вибираємо матеріал діелектрика – монооксид кремнію (табл. 3.6). Його параметри  $\varepsilon = 5$ ,  $\text{tg}\delta = 0,01$ ;  $E = 2 \cdot 10^6 \text{ В/см}$ ,  $\text{ТКЄ} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ .

2. Мінімальну товщину діелектрика і питому ємність  $C_0$  для забезпечення необхідної електричної міцності знайдемо з (3.44) і (3.45):

$$d = 2 \cdot 15 / 2 \cdot 10^6 = 15 \cdot 10^{-6} \text{ см},$$

$$C_{0U} = 0,0885 \cdot 5 / 15 \cdot 10^{-6} = 29500 \text{ пФ/см}^2 = 295 \text{ нФ/мм}^2.$$

3. Визначимо  $\gamma_{Ct}$ ,  $\gamma_S$  і  $C_{0mоч}$  згідно з (3.47) – (3.49):

$$\gamma_{Ct} = 2 \cdot 10^{-4} \cdot (120-20) \cdot 100 = 2\%, \quad \gamma_S = 15-5-1-2 = 7\%,$$

$$C_{0mоч} = 870 \cdot (0,07/2 \cdot 0,01)^2 = 10657,5 \text{ нФ/мм}^2.$$

Таким чином, отримано два значення питомої ємності. Згідно з (3.32) вибираємо менше значення  $C_0 = 295 \text{ нФ/мм}^2$ .

4. Визначаємо за (3.65), яка товщина діелектрика відповідає питомій ємності  $C_0$ :  $d' = 0,0885 \cdot 5 / 29500 = 0,15 \cdot 10^{-4} \text{ см}$  – відповідає тонкоплівковій технології.

5. Обчислюємо площу верхньої обкладинки за (3.50):

$$S_g = 870 / 295 = 2,949 \text{ мм}^2.$$

6. Знаходимо коефіцієнт, який враховує крайовий ефект за (3.59):

$$K = 1,3 - 0,06 \cdot 2,949 = 1,123.$$

7. Обчислюємо площу верхньої обкладинки за (3.51):

$$S_g = 2,949 / 1,123 = 3,304 \text{ мм}^2.$$

8. Знаходимо розміри верхньої обкладинки за (3.50), (3.52), оскільки  $K_\phi = 1$ , то  $L_g = B_g = \sqrt{3,304} = 1,82 \text{ мм}$ .

9. Обчислюємо розміри нижньої обкладинки

$$L_n = B_n = 1,82 + 2 \cdot 0,2 = 2,22 \text{ мм}.$$

10. Знаходимо розміри діелектрика  $L_d = B_d = 2,22 + 2 \cdot 0,1 = 2,42 \text{ мм}$ .

11. Визначаємо площу конденсатора  $S_d = 2,42 \cdot 2,42 = 5,856 \text{ мм}^2$ .

12. Проводимо перевірку за (3.60)–(3.67):

$$\text{tg}\delta_{обк} = 2/3 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 300 \cdot 10^3 \cdot 0,2 \cdot 870 \cdot 10^{-12} = 2,18 \cdot 10^{-4};$$

$$tg\delta_{oiel} = 0,02 \text{ (з табл. 3.5); } tg\delta_{pob} = 0,02 + 0,000218 < 0,04;$$

$$E_{pob} = 15 \cdot /15 \cdot 10^{-6} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ В/см} < 2 \cdot 10^6 \text{ В/см};$$

$$\gamma_{Spob} = 0,01 \cdot 2 / \sqrt{3,304} = 1,1\% < 7\%.$$

Отже, конденсатор розраховано правильно.

Таблиця 3.6 – Варіанти завдань та початкові дані для розрахунку

Початкові дані	Варіант								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Номінальна ємність, пФ	220	330	530	240	560	610	240	320	280
Точність отримання номіналу $\gamma_C$ , %	10	15	12	10	15	10	12	10	10
Робоча напруга, В	9	10	12	9	12	15	9	9	12
Діапазон робочих температур, °С	-20 ÷ +120	-20 ÷ +90	-20 ÷ +90	-20 ÷ +125	-20 ÷ +100	-20 ÷ +100	-20 ÷ +110	-20 ÷ +120	-20 ÷ +120
Технологія виготовлення	М	Ф	Ф	М	М	Ф	Ф	М	Ф

### 3.3.3 Конструкції та розрахунок плівкових індуктивностей

В деяких гібридних мікросхемах необхідно використання індуктивних елементів. Зокрема ці елементи входять до складу коливальних контурів автогенераторів, смугових фільтрів підсилювачів, до кіл корекції частотних характеристик та ін.

На рис. 3.8, а, б зображено типові конструкції *плівкових котушок індуктивності (film-inductance)*. Металеві провідники спіралей так само, як і провідники комутації та контактних площадок, мають дво- або тришарову структуру. Основним недоліком плівкових котушок є їх мала індуктивність, яка зазвичай не перевищує одиниць мікрогенрі. Обмеження діапазону індуктивностей пояснюється тим, що габаритні розміри котушок з номінальним значенням більше 5 мкГн стають непридатними для гібридних мікросхем. Реально на площі 1 см<sup>2</sup> можна виконати елемент з індуктивністю до 1 мкГн, що використовується на частотах не нижче 40–50 МГц.

Вихідними даними для розрахунку є: значення індуктивності  $L$ ; значення добротності  $Q$ ; робоча частота  $f$ ; орієнтовний розмір підкладки.

За ними вибираються: форма котушки, її внутрішній діаметр  $D_{вн}$ , який залежить від розмірів внутрішньої контактної площадки і, як правило, вибирається рівним 0,5 мм; матеріал провідника котушки; матеріал підкладки; спосіб виготовлення котушки.

В результаті розрахунків необхідно визначити: крок спіралі  $t$ ; ширину витка  $b$ ; товщину витка  $d$ ; зовнішній розмір спіралі  $D_{зов}$ , що визначається зі співвідношення  $D_{вн}/D_{зов} = 0,4$  для кола,  $D_{вн}/D_{зов} = 0,362$  для квадрата, кількість витків  $N$ .

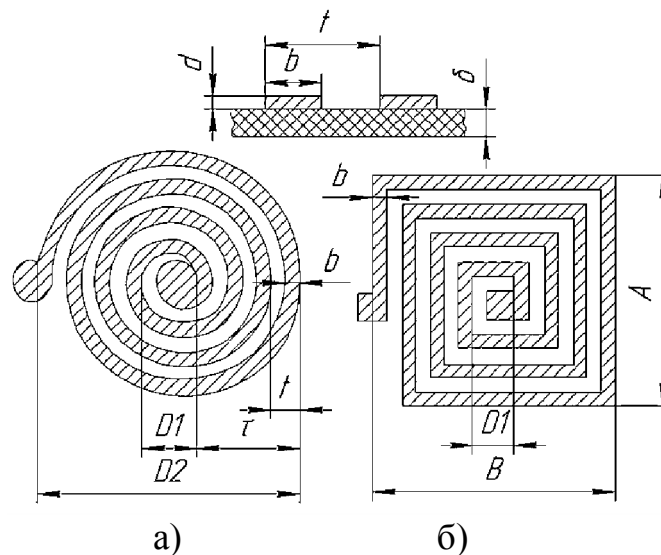


Рисунок 3.8 – Типові конструкції плівкових котушок індуктивності: кругла спіраль – а), квадратна спіраль – б)

При проектуванні плівкових котушок індуктивності потрібно врахувати такі положення.

1. Головним фактором, що визначає індуктивність однієї виткової петлі, є площа, яка знаходиться в площині петлі.
2. Для заданої площі кільцеподібна петля відповідає найменшій довжині провідника і, отже, найбільшій добротності.
3. За умови, що зв'язок між витками досить сильний, індуктивність котушки зростає пропорційно квадрату кількості витків.
4. Поперечні розміри провідника котушки слабо впливають на її індуктивність та суттєво впливають на добротність.
5. При габаритних однакових розмірах індуктивність квадратної котушки приблизно на 12% більша, ніж круглої, а добротність її на 10% нижча.

Розрахунок плівкових котушок індуктивності проводиться в такій послідовності.

1. Вибирається внутрішній розмір котушки  $D_{вн}$ . З технологічних поглядів його не слід брати меншим 2 мм.
2. Визначається крок спіралі за формулою

$$t = k \sqrt{\frac{D_{вн}^3}{L}}, \quad (3.70)$$

де  $L$  – індуктивність котушки, мкГн;

$D_{вн}$  – внутрішній діаметр котушки, мм;

$k$  – коефіцієнт, що залежить від відношення  $D_{вн}/D_{зов}$ , визначається за графіком на рис. 3.9.

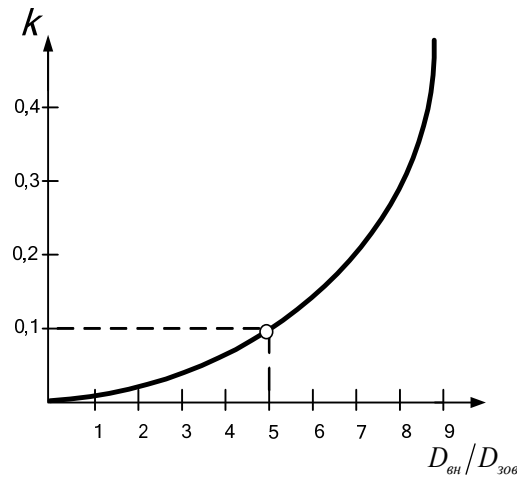


Рисунок 3.9 – Графік для визначення  $k = f(D_{\text{вн}}/D_{\text{зов}})$

3. Визначається товщина провідника котушки  $d$ :  $d \geq (2-4) \cdot d_C$ , де  $d_C$  – товщина шару скін-ефекту в мм, що розраховується за формулою:

$$d_C = K_1 \sqrt{\lambda}, \quad (3.71)$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі,  $\lambda = c/f$ ;

$c$  – швидкість світла у вакуумі;

$K_1$  – коефіцієнт, що враховує матеріал плівки (для срібла  $K_1 = 0,37$ ; для міді  $K_1 = 0,39$ ; для алюмінію  $K_1 = 0,51$ ).

4. Визначається ширина витка, при якій забезпечується задана добротність котушки:

$$b = \frac{\rho t \left( \frac{D_{\text{зов}}^2}{D_{\text{вн}}^2} - 1 \right) \cdot Q \cdot 10^4}{16 f D_{\text{вн}} K^2 d}, \quad (3.72)$$

де  $\rho$  – питомий об'ємний електричний опір матеріалу провідника, Ом·см;

$K$  – коефіцієнт, що визначається з графіка.

Оскільки формула (3.71) виведена без врахування впливу скін-ефекту, то ширину витка, розраховану за цією формулою, потрібно збільшити і вибирати рівною  $b' = (1,5-2)b$  для  $d = (2 \div 4) d_C$ .

Якщо нове значення ширини ( $b'$ ) вийде більшим за  $t$ , необхідно, залишаючи попередній внутрішній розмір спіралі  $D_{\text{вн}}$  і задаючись кроком спіралі  $t \geq b'$ , з формули (3.70) визначити зовнішній розмір спіралі  $D_{\text{зов}}$ , а потім за формулою (3.71) визначити ширину витків  $b$ .

Знаючи індуктивність котушки та її паразитну ємність, розраховують значення частоти її резонансу та за відношенням  $f_p/f$  (де  $f_p$  – робоча частота,  $f$  – частота власного резонансу котушки) встановлюють реальне значення індуктивності  $L_{\text{екв}}$  залежно від розрахованого значення  $L_0$ . На практиці для розрахунку індуктивності використовують також спрощені емпі-

ричні формули для квадратної та круглої однополярної котушок, відповідно:  $L_0 = 0,0241 \cdot a \cdot n^{5/3} \cdot \ln\left(\frac{8 \cdot a}{c}\right)$ ;  $L_0 = 0,0215 \cdot a \cdot n^{5/3} \cdot \ln\left(\frac{8 \cdot a}{c}\right)$ .

**Приклад розрахунку котушки індуктивності.** Визначити розміри плівкової котушки індуктивності, виходячи з таких даних:  $L = 0,03 \text{ мкГн}$ , робоча частота  $f = 50 \text{ МГц}$ .

1. Задаємось внутрішнім діаметром спіралі  $D_{\text{вн}} = 1 \text{ мм}$ , обираємо відношення  $D_{\text{зов}}/D_{\text{вн}} = 5$ , звідки  $D_{\text{зов}} = 5 \text{ мм}$ .

2. З графіка (рис. 3.9) визначаємо  $k = 0,1$ .

3. Визначаємо крок спіралі. Підставивши значення в (3.70) отримуємо:

$$t = 0,1 \cdot \sqrt{\frac{1^3}{0,03}}; \quad t = 0,58 \text{ мм.}$$

4. Кількість витків  $N$  визначаємо за формулою:

$$N = \frac{D_{\text{зов}} - D_{\text{вн}}}{2t},$$

$$N = \frac{5 - 1}{2 \cdot 0,58} = 3,45.$$

Кількість витків повинна бути цілим числом, тому обираємо  $N = 3$ .

Для виготовлення індуктивності будемо використовувати алюміній.

5. Для визначення товщини провідної плівки  $d$  скористаємось формулою (3.54), враховуючи швидкість світла у вакуумі,  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ :

$$d_c = 2 \cdot 0,51 \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot 10^8}{50 \cdot 10^6}} = 24,98 \text{ мкм.}$$

6. Визначаємо добротність котушки індуктивності:

$$Q = \frac{4 \cdot f \cdot L \cdot b \cdot t \cdot d}{\rho \cdot D_{\text{вн}}^2 \cdot \left(\frac{D_{\text{зов}}^2}{D_{\text{вн}}^2} - 1\right)},$$

де  $\rho$  – питомий опір матеріалу,  $\rho = 0,2 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ;

$b$  – попередньо обрана ширина провідника,  $b = 0,2 \text{ мм} = 0,02 \text{ см}$ .

$$Q = \frac{4 \cdot 50 \cdot 10^6 \cdot 0,03 \cdot 10^{-6} \cdot 0,02 \cdot 0,058 \cdot 24,98 \cdot 10^{-6}}{0,2 \cdot 10^{-5} \cdot 0,1^2 \cdot \left(\frac{5^2}{1^2} - 1\right)}; \quad Q = 36,22.$$

7. Розрахуємо ширину провідника без урахування скін-ефекту:

$$b_0 = \frac{\rho \cdot t \cdot \left(\frac{D_{\text{зов}}^2}{D_{\text{вн}}^2} - 1\right) \cdot Q \cdot 10^4}{16 \cdot f \cdot D_{\text{вн}} \cdot k^2 \cdot d}.$$

Отримуємо:



$$b_0 = \frac{0,2 \cdot 10^{-5} \cdot 0,58 \cdot \left(\frac{5^2}{1^2} - 1\right) \cdot 36,22 \cdot 10^4}{16 \cdot 50 \cdot 10^6 \cdot 0,1 \cdot 0,1^2 \cdot 24,98 \cdot 10^{-6}}; \quad b_0 = 0,05 \text{ мм.}$$

8. З урахуванням скін-ефекту  $b = 2b_0$ .

Отже:

$$b = 2 \cdot 0,05 = 0,1 \text{ (мм)}.$$

9. Тепер необхідно знайти відстань  $p$  між витками котушки:

$$t = b + p,$$

звідси:

$$p = 0,58 - 0,1; \quad p = 0,48 \text{ (мм)}.$$

10. Знаходимо площу котушки індуктивності:

$$S = 5^2 = 25 \text{ (мм}^2\text{)}.$$

Таким чином, розрахована індуктивність буде мати такі параметри:  $S = 25 \text{ (мм}^2\text{)}, b = 0,1 \text{ (мм)}, p = 0,48 \text{ (мм)}, N = 3$ .

### Завдання для самостійного виконання

Таблиця 3.2 – Варіанти завдань та початкові дані для розрахунку

Початкові дані	Варіант								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Номинальна індуктивність, мкГн	0,04	0,05	0,15	0,25	0,5	0,5	0,3	0,1	0,15
Робоча частота, МГц	50	50	30	80	20	60	40	50	50

## ЛІТЕРАТУРА

1. Курносков А. И. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем / А. И. Курносков, В. В. Юдин. – М. : Высшая школа, 1986. – 368 с.
2. Коледов Л. А. Технология и конструкции микросхем и микросборок / Коледов Л. А. – М. : Радио и связь, 1989. – 400 с.
3. Дубов Є. В. Проектування мікросборок та гібридних інтегральних схем / Дубов Є. В., Лободзінська Р. Ф., Мізерний В. М. – Вінниця : ВДТУ, 2000. – 137 с.
4. Невлюдов И. Ш. Визуальный мониторинг физико-химических процессов в производстве и эксплуатации электронной аппаратуры / Невлюдов И. Ш., Андрусевич А. А., Омаров М. А. – Харьков : Коллегиум, 2007. – 236 с.
5. Nikolaev I. Microelectronic devices and fundamentals of their design / I. Nikolaev, N. Filinyuk. – М. : MIR publishers, 1989. – 340 p.
6. Бушминский И. П. Технологическое проектирование микросхем СВЧ : учеб. пособие / И. П. Бушминский, Г. В. Морозов. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 354 с.
7. Рындин Е. А. Субмикронные интегральные схемы: элементная база и проектирование / Е. А. Рындин, Б. Г. Коноплев. – Таганрог : Изд-во ТГРУ, 2001. – 146 с.
8. Лебедев Б. К. Интеллектуальные процедуры синтеза топологии СБИС / Лебедев Б. К. – Таганрог : Изд-во ТГРУ, 2003. – 107 с.
9. Коледов Л. А. Технология и конструкции микросхем, микропроцессоров и микросборок : учеб. пособие для вузов / Коледов Л. А. – СПб. : Лань, 2008. – 399 с.
10. Marsh S. Practical MMIC Design / Marsh S. – Boston : Artech House, inc. – 2006. – 356 p.
11. Климачев И. И. СВЧ ГИС. Основы технологии и конструирования / И. И. Климачев, В. А. Иовдальский. – М. : Техносфера, 2006. – 352 с.
12. <http://gereports.ru/post/126512633745/tehnologija-izgotovlenija-mikroshem>.

## ДОДАТОК А

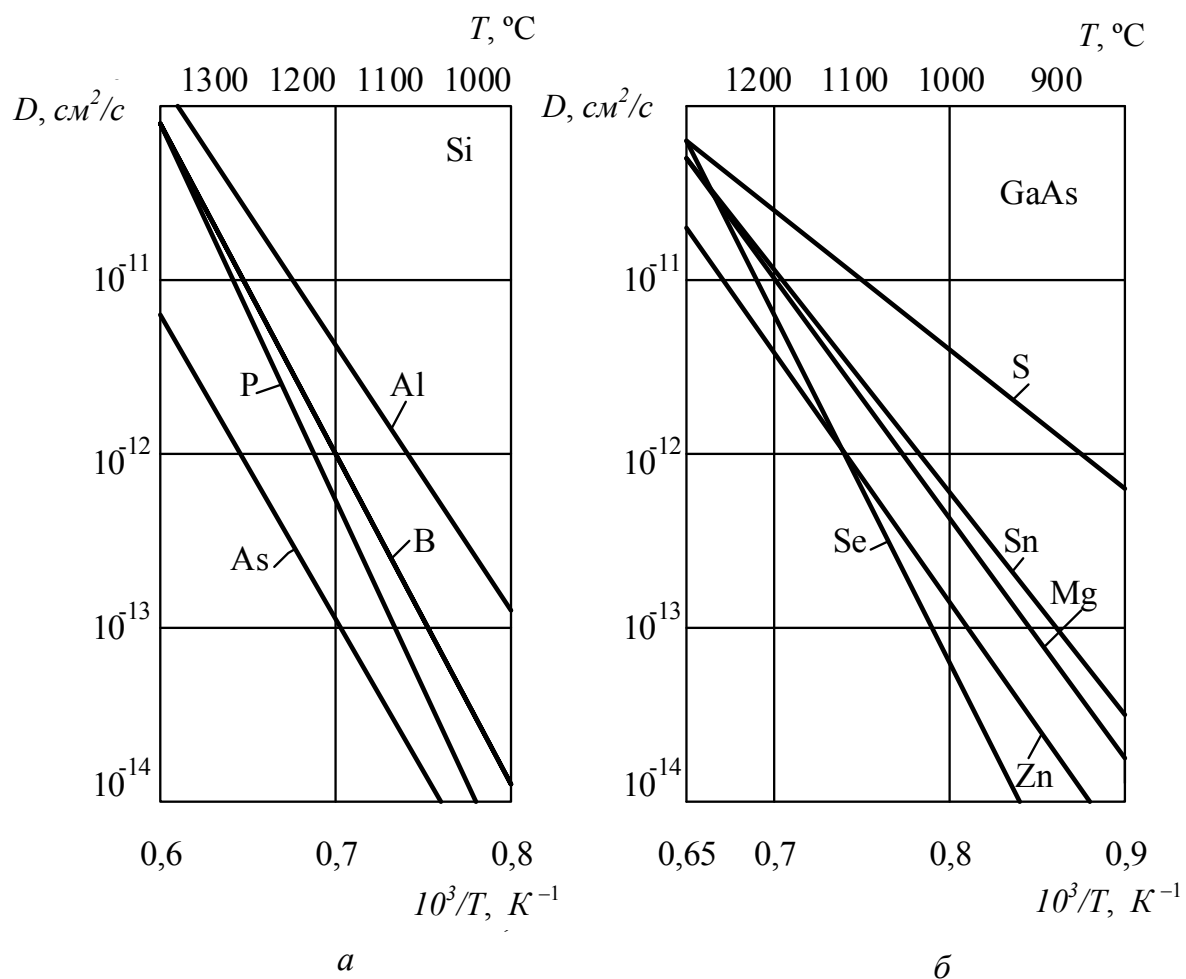


Рисунок А.1– Залежність коефіцієнтів дифузії домішок в кремнії (а) і арсеніді галію (б) від температури

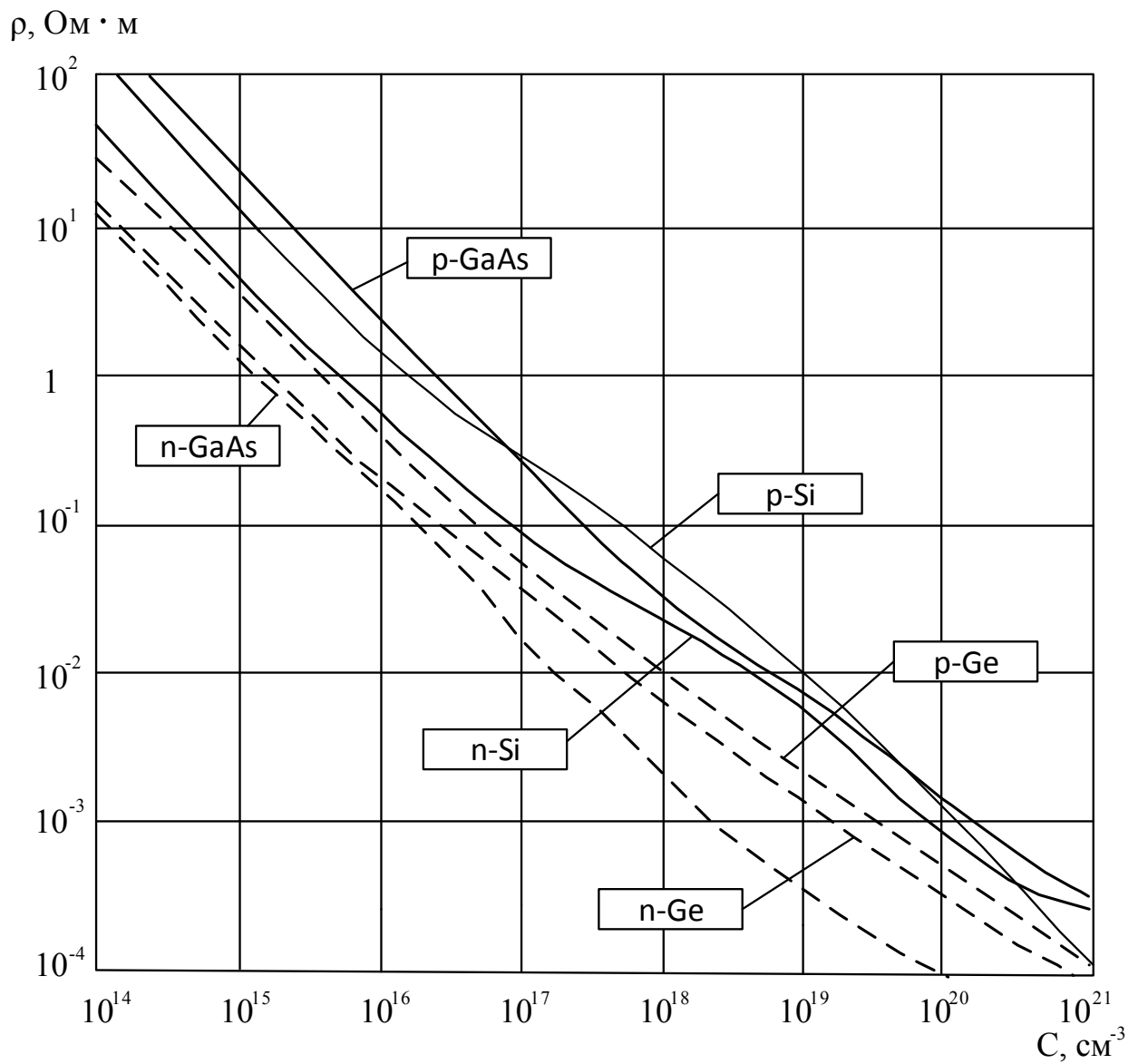


Рисунок А.2 – Залежність питомого опору Si, Ge, GaAs від концентрації домішок

Таблиця А.1 – Середній нормальний пробіг  $R_p$  та середньоквадратичне відхилення проекції пробігу  $\Delta R_p$  для іонів кремнію

$E, \text{keV}$		$^{11}\text{B}^+$	$^{27}\text{Al}^+$	$^{31}\text{P}^+$	$^{75}\text{As}^+$	$^{121}\text{Sb}^+$
20	$R_p$	78	29	26	16	14
	$\Delta R_p$	32	11	9,4	3,7	2,4
40	$R_p$	161	56	49	27	23
	$\Delta R_p$	54	19	16,4	6,2	3,8
60	$R_p$	244	85	73	38	31
	$\Delta R_p$	71	27	23	8,4	5,1
80	$R_p$	324	114	98	48	38
	$\Delta R_p$	84	35	30	10,5	6,3
100	$R_p$	398	144	123	58	46
	$\Delta R_p$	94	42	35	12,5	7,4
120	$R_p$	469	175	149	68	53
	$\Delta R_p$	102	48	41	14,5	8,4
140	$R_p$	537	205	175	79	60
	$\Delta R_p$	110	54	47	16	9,5
160	$R_p$	603	236	201	89	67
	$\Delta R_p$	116	60	52	18	10,5
180	$R_p$	665	266	228	99	74
	$\Delta R_p$	121	60	57	20	11,5
200	$R_p$	725	297	254	110	81
	$\Delta R_p$	126	70	61	22	12,5

Таблиця А.2 – Середній нормальний пробіг  $R_p$  та середньоквадратичне відхилення проекції пробігу  $\Delta R_p$  для іонів діоксиду кремнію

$M_1$	$E, \text{кеВ}$	$R_p, \text{нм}$	$\Delta R_p, \text{нм}$
$^{11}\text{B}$	20	69	24
	40	142	40
	100	339	67
	140	453	78
$^{75}\text{As}$	40	35	12,5
	80	52	18
	150	83	29

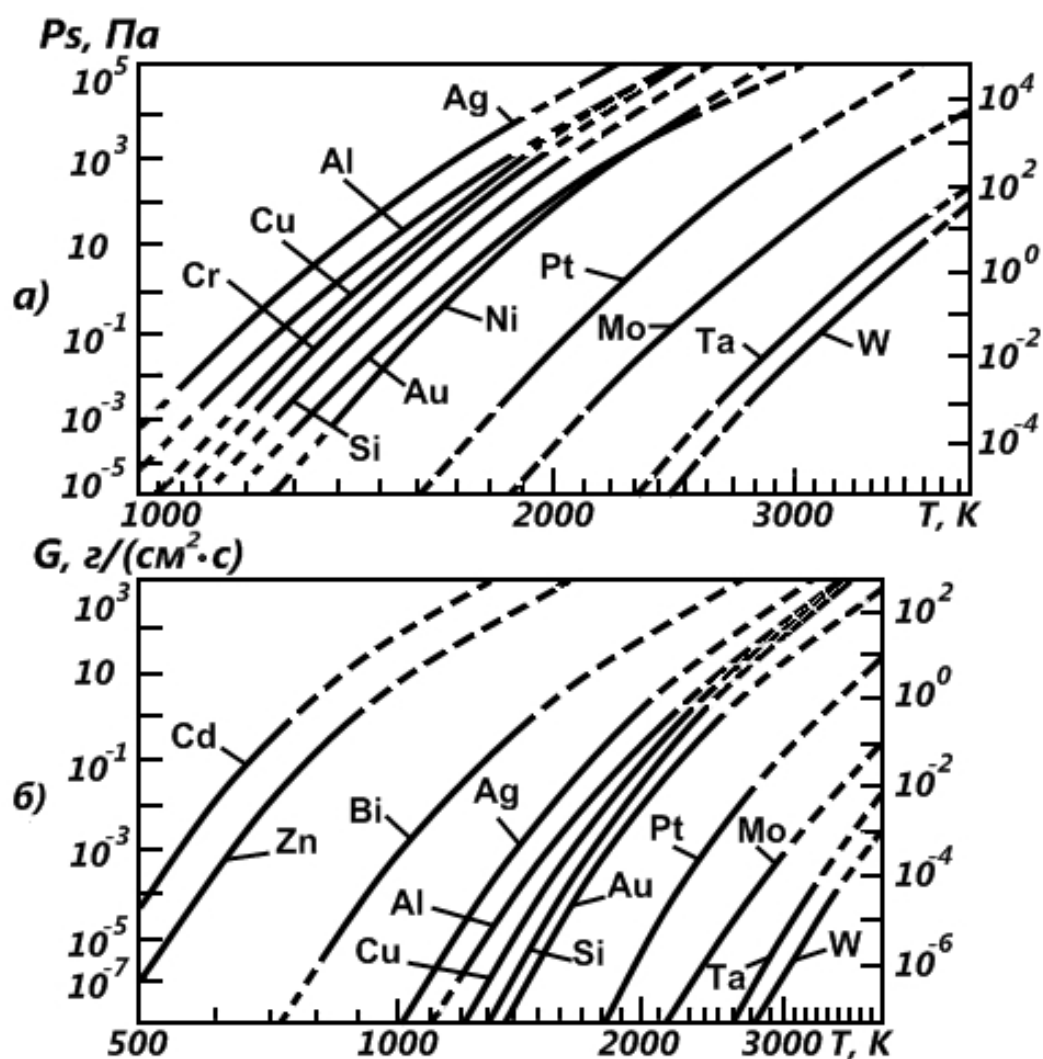


Рисунок А.3 – Залежність тиску насиченої пари (а) і швидкості випаровування (б) різних елементів від температури

Таблиця А.3 – Енергія сублімації для різних елементів

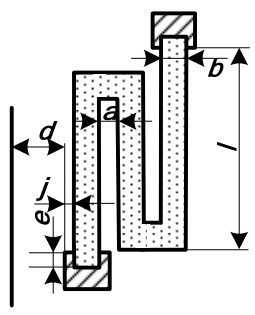
Елемент	Al	Si	Ti	Cr	Ni	Cu	Ta	W	Au
$E_s, eV$	3,26	3,91	4,34	3,68	4,42	3,56	8,7	8,76	3,92

**ПЕРІОДИЧНА СИСТЕМА ХІМІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ Д. І. МЕНДЕЛЄЄВА**

ПЕРІОДИ	ГРУПИ ЕЛЕМЕНТІВ								VIII					
	I	II	III	IV	V	VI	VII							
1	<b>H</b> 1,0079 Гідроген								<b>He</b> 4,0028 Гелій	Порядковий номер	Символ	Назва елемента систематична		
2	<b>Li</b> 6,941 Літій	<b>Be</b> 9,01218 Берилій	<b>B</b> 10,811 Бор	<b>C</b> 12,01 Карбон	<b>N</b> 14,007 Нітроген	<b>O</b> 15,999 Оксиген	<b>F</b> 18,998 Флуор	<b>Ne</b> 20,179 Неон	<b>Fe</b> 55,847 Ферум	Атомна маса	Електронна конфігурація			
3	<b>Na</b> 22,990 Натрій	<b>Mg</b> 24,305 Магній	<b>Al</b> 26,982 Алюміній	<b>Si</b> 28,085 Силіцій	<b>P</b> 30,974 Фосфор	<b>S</b> 32,066 Сульфур	<b>Cl</b> 35,453 Хлор	<b>Ar</b> 39,948 Аргон	<b>Co</b> 58,933 Кобальт	<b>Ni</b> 58,69 Нікел				
4	<b>K</b> 39,098 Калій	<b>Ca</b> 40,078 Кальцій	<b>Zn</b> 65,38 Цинк	<b>Ga</b> 69,723 Галій	<b>Ge</b> 72,59 Германій	<b>As</b> 74,922 Арсен	<b>Se</b> 78,96 Селен	<b>Br</b> 79,904 Бром	<b>Kr</b> 83,80 Криптон	<b>Ru</b> 101,07 Рутеній	<b>Rh</b> 102,91 Родій	<b>Pd</b> 106,42 Паладій		
5	<b>Rb</b> 85,468 Рубідій	<b>Sr</b> 87,62 Стронцій	<b>Y</b> 88,906 Ітрій	<b>Zr</b> 91,224 Цирконій	<b>Nb</b> 92,906 Ніобій	<b>Mo</b> 95,94 Молибден	<b>Tc</b> 98,906 Технецій	<b>Ru</b> 101,07 Рутеній	<b>Rh</b> 102,91 Родій	<b>Pd</b> 106,42 Паладій				
6	<b>Cs</b> 132,91 Цезій	<b>Ba</b> 137,33 Барій	<b>La</b> 138,91 Лантан	<b>Hf</b> 178,49 Гафній	<b>Ta</b> 180,95 Тантал	<b>W</b> 183,85 Вольфрам	<b>Re</b> 186,21 Реній	<b>Os</b> 190,2 Осмій	<b>Ir</b> 192,22 Ірідій	<b>Pt</b> 195,09 Платина				
7	<b>Fr</b> (223) Францій	<b>Ra</b> 226,02 Радій	<b>Ac</b> 227,03 Актиній	<b>Rf</b> (261) Резерфордій	<b>Db</b> (262) Дубній	<b>Sg</b> (263) Сиборгій	<b>Bh</b> (264) Борій	<b>Hs</b> (265) Гасій	<b>Mt</b> (266) Майтнерій	<b>Uun</b> (272) Унунлій				
	Висні оксиди		RO <sub>3</sub>		RO <sub>2</sub>		RO		RO <sub>2</sub>					
	Легкі водні сполуки		RO		RH <sub>4</sub>		RH <sub>3</sub>		H <sub>2</sub> R		HR			
*	<b>Ce</b> 140,12 Церій	<b>Pr</b> 140,91 Прозаксим	<b>Nd</b> 144,24 Неодим	<b>Pm</b> (147) Прометій	<b>Sm</b> 150,36 Самарій	<b>Eu</b> 151,96 Європій	<b>Gd</b> 157,25 Гадоліній	<b>Tb</b> 158,93 Тербій	<b>Dy</b> 162,5 Диспрозій	<b>Ho</b> 164,93 Гольмій	<b>Er</b> 167,26 Ербій	<b>Tm</b> 168,93 Тулій	<b>Yb</b> 173,04 Йттербій	<b>Lu</b> 174,97 Лютецій
**	<b>Th</b> 232,04 Торій	<b>Pa</b> (231) Протактиній	<b>U</b> 238,03 Уран	<b>Np</b> (237) Нептуній	<b>Pu</b> (244) Плутоній	<b>Am</b> (243) Америцій	<b>Cm</b> (247) Кюріум	<b>Bk</b> (247) Берклій	<b>Cf</b> (251) Каліфорній	<b>Es</b> (254) Ейнштейній	<b>Fm</b> (257) Фермій	<b>Md</b> (258) Менделєєв	<b>No</b> (259) Нобелій	<b>Lr</b> (260) Лоуренсій

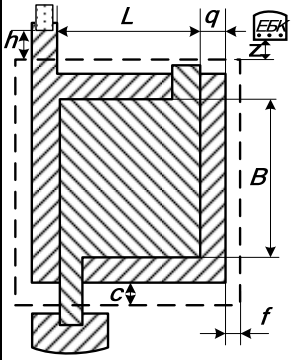
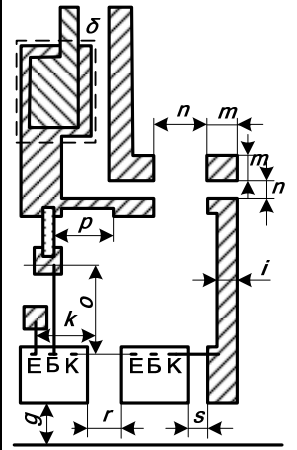
Рисунок А.4 – Періодична система Д. І. Менделєєва

Таблиця А.4 – Конструктивні та технологічні обмеження при проектуванні тонкоплівкових гібридних мікросхем

Елемент топології	Зміст обмеження	Розмір обмеження, мм				
		М	Ф	МФ	ЕІ	ТА
1	2	3	4	5	6	7
	Точність виготовлення лінійних розмірів плівкових елементів та розмірів між ними $\Delta l$ , $\Delta b$ , $\Delta a$ , $\Delta L$ , $\Delta B$ при розміщенні плівкових елементів в одному шарі, мм	$\pm 0,01$	$\pm 0,01$	$\pm 0,01$	$\pm 0,01$	$\pm 0,01$
	Мінімально допустимий розмір резистора, мм $b$ $l$	0,1 0,3	0,1 0,1	0,1 0,3	0,15 0,3	0,05 0,1
	Мінімально допустимі розміри між плівковими елементами, розміщеними в одному шарі $a$ , мм	0,3	0,1	0,3	0,1	0,05
	Максимально допустиме співвідношення розмірів $l/a$	10	100	30	100	100
	Максимально допустимий розмір між плівковими елементами, розміщеними в різних шарах $c$ , мм	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1
	Перекриття для суміщення плівкових елементів, що розміщені в різних шарах $e$ , мм	$\geq 0,2$	$\geq 0,1$	$\geq 0,2$	$\geq 0,1$	$\geq 0,1$
	мін відстань від плівкових елементів до краю плати $d$ , мм	0,5	0,2	0,5	0,4	0,2
	мін ширина плівкових провідників $i$ , мм	0,1	0,05	0,1	0,1	0,05
	мін допустима відстань між краями плівкового резистора та краєм його контактної площадки $j$ , мм	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1



Продовження таблиці А.4

1	2	3	4	5	6	7
	<p>мінімум допустимі відстані, мм: між краями діелектрика та нижньою обкладинкою конденсатора <math>f</math></p>	0,1	0,1	0,1	0,1	—
	<p>між краями верхньої та нижньої обкладинок конденсатора <math>q</math></p>	0,2				
	<p>між краями діелектрика та з'єднанням виводів конденсатора у місці виводу верхньої обкладинки <math>c</math></p>	0,3				
	<p>від плівкового конденсатора до приклеюваних навісних компонентів <math>z</math></p>	0,5				
	<p>мінімум площа перекриття обкладинок <math>L \times B</math>, мм<sup>2</sup></p>	0,5×0,5				
	<p>тах відхилення ємності конденсатора від номінального значення, %</p>	± 12				
	<p>мінімум відстань від дротяного провідника або виводу до краю контактної площадки або до краю плівкового провідника, незахищеного ізоляцією <math>k</math>, мм</p>	0,2				
	<p>мінімум розміри контактних площадок для монтажу навісних компонентів з кульковими виводами <math>m</math>, мм <math>n</math>, мм</p>	0,2 0,1				
	<p>мінімум відстань між контактними площадками для монтажу навісних компонентів з кульковими або стовпчиковими виводами, плівковим резистором <math>p</math>, діелектриком конденсатора <math>\delta</math>, мм</p>	0,6 0,35				

Продовження таблиці А.4

1	2	3	4	5	6	7
	<p>міні відстань, мм, від краю навісного компонента до:</p> <p>краю плати <math>g</math></p> <p>краю іншого компонента <math>r</math></p> <p>краю навісного пасивного компонента</p> <p>краю контактної площадки, що використовується для приварювання дротяних виводів <math>s</math></p> <p>дротяного провідника лудженого плівкового елемента</p>			0,4		
				0,4		
				0,6		
				0,4		
				0,3		
				0,2		
	міні розміри контактних площадок для контролю електричних параметрів, мм			0,2×0,2		
	міні відстань між контактними площадками для приварювання та припаювання дротяних провідників, мм			0,2		
	макс довжина гнучкого виводу без додаткового кріплення $o$ , мм			3,0		
	міні розміри контактних площадок для приварювання дротяних виводів навісних компонентів при діаметрі дроту, мм:					
	<p>∅ 0,03</p> <p>для одного провідника</p> <p>для двох провідників</p> <p>для трьох провідників</p>			0,15×0,1		
				0,2×0,2		
				0,2×0,3		
	<p>∅ 0,04</p> <p>Те ж саме</p>			0,2×0,15		
				0,25×0,25		
				0,25×0,40		
	<p>∅ 0,05</p> <p>Те ж саме</p>			0,25×0,2		
				0,3×0,3		
				0,3×0,5		

## ГЛОСАРІЙ

Абразив – abrasive

Абразивний матеріал – abrasive

Анізотропія – anisotropy

Герметизація – sealing

Дефект – defect

Діелектрик – dielectric

Дисперсія – dispersion

Дрейф електронів – electrons drift

Домішка – admixture

Домішкові атоми – admixture atoms

Дифузія – diffusion

Електроніка – electronic

Електрод – electrode

Електронно-дірковий перехід – electron-hole junction

Елемент – element

Енергія – energy

Епітаксія – epitaxy

Забруднення – contamination

Інтегральна мікросхема – integrated circuit

Іонна імплантація – ion implantation

Іонне легування – ion alloying

Іонно-плазмове розпилювання – ion-plasma dispersion

Катодне розпилювання – cathode dispersion

Компонент – component

Контактна різниця потенціалів – contact difference of potentials

Концентрація – concentration

Кристал – crystal  
Кристалічна ґратка – crystalline grating  
Лазер – laser  
Літографія – lithography  
Магнітні матеріали – magnetic materials  
Мезаструктура – mesostructure  
Мікроелектроніка – microelectronic  
Надпровідність – superconductivity  
Напівпровідник – semiconductor  
Напівпровідникова інтегральна схема – semiconductor integrated circuit  
Напруга – voltage  
Оже-електрон – auger electron  
Осадження – precipitation  
Підкладка – substrate  
Піроліз – pyrolysis  
Питома електропровідність – specific electroconductivity  
Питомий опір – specific resistance  
Прилад – device  
Пристрій – device  
Полірування – polish  
Потенціальна енергія – potential energy  
Потенціальна крива – potential curve  
Різання пластин – cutting of plates  
Робота виходу – electron work function  
Розламування пластин – breaking of plates  
Рухливість носіїв – carrier mobility  
Сила взаємодії – strength of the interaction  
Скрайбування – scribing

Спін – spin  
Структура – structure  
Струм – current  
Теплоємність – heat capacity  
Теплопровідність – heat conductivity  
Термічне випаровування – thermal evaporation  
Технологічний маршрут – technology route  
Технологія – technology  
Тонка плівка – thin film  
Точка роси – dew point  
Транзистор – transistor  
Фотолітографія – photolithography  
Фотон – photon  
Фоторезист – photoresist  
Фотошаблон – photomask  
Хлорид – chloride  
Шліфування – grinding  
Щільність – density

*Навчальне видання*

**Павлов Сергій Миколайович  
Войцеховська Олена Валеріївна**

# **ТЕХНОЛОГІЯ МІКРОЕЛЕКТРОННИХ ЗАСОБІВ**

Збірник завдань

Редактор В. Дружиніна

Оригінал-макет підготовлено С. Павловим

Підписано до друку 28.04.2017 р.  
Форма 29,7 × 42¼. Папір офсетний.  
Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 9,24.  
Наклад 50 (1-й запуск 1-21) пр. Зам. № 2017-074.

Видавець та виготовлювач  
Вінницький національний технічний університет,  
інформаційний редакційно-видавничий центр.

ВНТУ, ГНК, к. 114.  
Хмельницьке шосе, 95,  
м. Вінниця, 21021.  
Тел. (0432) 59-85-32, 59-81-59,  
**press.vntu.edu.ua,**  
*E-mail: kivc.vntu@gmail.com.*

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.