

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до практичних робіт з дисципліни

**“ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА
НАПІВПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ”**

для студентів спеціальності

153 – “Мікро- та наносистемна техніка”
денної і заочної форм навчання

Методичні вказівки до практичних робіт з дисципліни “Технологія виробництва напівпровідникових матеріалів” для студентів спеціальності 153 – “Мікро- та наносистемна техніка” денної і заочної форм навчання / Укл.: Г.В. Сніжної, А.В. Коротун. – НУ «Запорізька політехніка», 2020. – 53 с.

Укладачі: Г.В. Сніжної, проф., д-р техн. наук,
А.В. Коротун, доц., канд. фіз.-матем. наук

Рецензент: В.В. Погосов, проф., д-р фіз.-матем. наук

Відповідальний
за випуск: А.В. Коротун, доц., канд. фіз.-матем. наук

Затверджено
на засіданні кафедри
мікро- та наноелектроніки

Протокол №7
від “22” 01 2020 р.

Рекомендовано до видання
НМК ФРЕТ
Протокол № 6
від “23” 01 2020 р.

ЗМІСТ

1 Нагрівання твердих тіл	4
1.1 Основні формули і визначення	4
1.1.1 Теплове випромінювання	5
1.1.2 Конвекція	5
1.2 Приклади розв'язування задач	9
1.3 Задачі для самостійного розв'язування	11
2 Основи газодинаміки	12
2.1 Основні формули і визначення	11
2.2 Приклади розв'язування задач	26
2.3 Задачі для самостійного розв'язування	31
3 Кристалізаційні методи очищення й отримання матеріалів	34
3.1 Вирощування із розчину в стопі (спонтанна кристалізація)	31
3.2 Метод Вернейля	35
3.3 Метод Бріджмена	36
3.4 Метод Чохральського	37
3.4.1 Основи теорії росту монокристалів	34
3.5 Вплив домішок на дефектність кристалів	39
3.6 Метод зонної плавки	39
3.7 Приклади розв'язування задач	40
3.8 Задачі для самостійного розв'язування	43
Рекомендована література	48
Додаток А Фізичні властивості напівпровідникових матеріалів	49
Додаток Б Номограми для розрахунку процесу нагрівання	50
Додаток В Газодинамічні характеристики газів	53

1 НАГРІВАННЯ ТВЕРДИХ ТІЛ

1.1 Основні формули і визначення

Теплові процеси є одними з основних у технології матеріалів електронної техніки. Рушійною силою процесів перенесення теплоти між тілами є різниця температур більш нагрітого і менш нагрітого тіл. Виділяють три способи поширення теплоти: теплопровідність, теплове випромінювання і конвекція.

Основним законом передачі теплоти за рахунок теплопровідності є *закон Фур'є*, за яким елементарна кількість теплоти dQ , що передається через елемент поверхні ds , перпендикулярний тепловому потоку, за час dt , прямо пропорційна температурному градієнту $\frac{dT}{dx}$, площі елемента поверхні ds і часу dt :

$$dQ = -\lambda \frac{dT}{dx} ds dt, \quad (1.1)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$.

Розподіл температур у нерухомому середовищі в найбільш загальному випадку описує диференціальне рівнянням теплопровідності:

$$\frac{dT}{dt} = a \Delta T, \quad (1.2)$$

де a – коефіцієнт температуропровідності, $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$.

При усталеному процесі передачі теплоти рівняння (1.2) набуває вигляду:

$$a \Delta T = 0.$$

Оскільки коефіцієнт теплопровідності a не дорівнює нулю, то

$$\Delta T = 0. \quad (1.3)$$

Рівняння (1.3) є диференціальним рівнянням теплопровідності у нерухомому середовищі при усталеному тепловому режимі.

Розподіл температури в технологічній системі при передачі теплоти через теплопровідність визначають розв'язком диференційного рівняння теплопровідності при заданих граничних і початкових умовах.

1.1.1 Теплове випромінювання

Усі тіла здатні випромінювати теплову енергію. Конденсовані тіла мають суцільний спектр випромінювання, інтенсивність якого збільшується з підвищенням температури тіла. Потік променів, які випромінюються нагрітим тілом, потрапляючи на поверхню іншого тіла, частково відбивається, частково поглинається і частково проходить крізь нього. Отже, запишемо повний потік випромінювання Q :

$$Q = Q_{\text{погл}} + Q_{\text{відб}} + Q_{\text{пр}}.$$

У технології матеріалів електронної техніки цей метод передачі теплоти реалізують в спеціальних печах, які працюють в інфрачервоному діапазоні випромінювання.

1.1.2 Конвекція

Перенесення теплоти у середовищах, що рухаються (рідини, гази), пов'язано із перемішуванням частинок у самій речовині, яка рухається. Чим сильніше перемішуються частинки, тим інтенсивніше йде передача теплоти. В основній масі рідини теплота передається одночасно з теплопровідністю і конвекцією. Такий процес називають конвективним теплообміном. Конвективний теплообмін призводить до вирівнювання температури в основній масі рідини до деякої температури $T_{\text{рід}}$. З наближенням до стінки твердого тіла інтенсивність хаотичного (турбулентного) руху зменшується і все більшого значення набуває теплопровідність, завдяки чому інтенсивність тепловіддачі падає. Пристінний шар, в якому вплив турбулентного руху на передачу теплоти стає нехтовно малим, а основну роль відіграє теплопровідність, називають тепловим примежовим шаром (рис. 1.1).

Швидкість конвективного теплообміну в системах з твердим тілом визначається швидкістю перенесення теплоти в межах примежо-

вого шару, тому для підсилення конвективного теплообміну зменшують товщину цього шару через збільшення турбулентності потоку.

Внаслідок складності точного розрахунку конвективну тепловіддачу визначають за спрощеним законом – *законом охолодження Ньютона*. За цим законом кількість теплоти dQ , яка віддається стінкою твердого тіла з температурою $T_{\text{ст}}$ рідині з температурою $T_{\text{рід}}$ визначається як

$$dQ = \alpha (T_{\text{ст}} - T_{\text{рід}}) dS dt . \quad (1.4)$$

Коефіцієнт пропорційності α , який визначається дослідним шляхом, називають коефіцієнтом тепловіддачі.

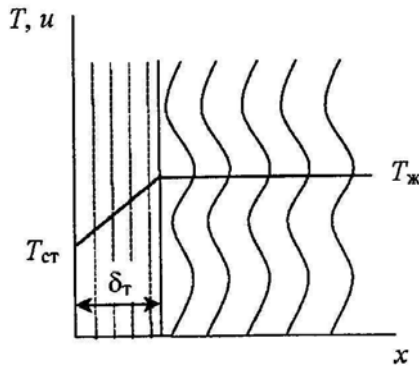


Рисунок 1.1 – Структура теплового примежового шару

Розподіл температур у системах із рідиною, що рухається, визначається диференціальним рівнянням конвективного теплообміну

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial T}{\partial x} u_x + \frac{\partial T}{\partial y} u_y + \frac{\partial T}{\partial z} u_z = a \Delta T . \quad (1.5)$$

При $u_x = u_y = u_z = 0$ (тверді тіла) рівняння (1.5) перетворюється в диференціальне рівняння теплопровідності.

На процес конвективного теплообміну впливають також швидкість і густина рідини, тому для повного опису процесу необхідно розглядати також рівняння руху рідини і рівняння неперервності потоку.

Помітимо, що розділення теплопередачі на елементарні процеси проводиться переважно за методологічними причинами. Здебільшого теплопередача здійснюється через одночасну дію декількох процесів.

Для процесу нагрівання розраховують час, необхідний для досягнення тілом, що нагрівається, потрібної температури.

Розрізняють процеси нагрівання „масивних“ і „тонких“ тіл. У першому випадку в процесі нагрівання температура зовнішньої теплосприймаючої поверхні тіла T_n випереджає температуру в центрі тіла

$T_{\text{ц}}$ (рис. 1.2), у другому – відносна різниця температур $\frac{T_n - T_{\text{ц}}}{T_n}$ менше 0,05, тому їх можна вважати однаковими, що значно спрощує розрахунки.

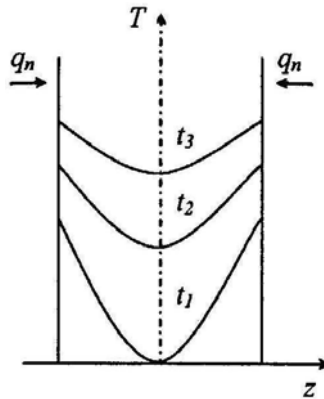


Рисунок 1.2 – Розподіл температури в різні моменти часу ($t_1 < t_2 < t_3$) у процесі двобічного нагрівання плоского масивного тіла

Для визначення типу процесу нагрівання в кожному конкретному випадку використовують безрозмірний комплекс – *критерій Біо*:

$$Bi = \frac{\alpha l}{\lambda}, \quad (1.6)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$;

l – характерний розмір, який зазвичай обирають у напрямку теплового потоку, м.

За фізичним сенсом критерій Біо є відношенням внутрішнього теплового опору $\frac{l}{\lambda}$ до зовнішнього $\frac{1}{\alpha}$. При $Bi > 0,25$ має місце процес нагрівання масивного тіла, при $Bi \leq 0,25$ – тонкого тіла.

Нагрівання „масивного“ тіла в технологічних процесах часто описують граничними умовами III роду:

$$q_n = \alpha(T_\infty - T_n), \quad (1.7)$$

де q_n – густина теплового потоку до поверхні тіла, $\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$;

T_∞ – температура робочого простору нагрівної установки (температура тепловіддаючої поверхні);

T_n – температура поверхні тіла (теплосприймаючої поверхні).

У цьому випадку користуються *критеріальним рівнянням*:

$$\theta = \frac{T_\infty - T}{T_\infty - T_0} = f\left(Bi, Fo, \frac{z}{l}\right), \quad (1.8)$$

де θ – відносна температура;

T_0 – початкова температура тіла, зазвичай однакова для будь-якої його точки;

T – температура у точці тіла, яка розглядається, у будь-який момент часу t ;

z – відстань від центра тіла (при двобічному його нагріванні) до точки, що розглядається;

l – відстань від центра тіла до поверхні.

Критерій Фур'є, який входить у рівняння (1.8) і який називають також відносним часом, розраховують за рівнянням:

$$Fo = \frac{at}{l^2} = \frac{t}{\left(\frac{l^2}{a}\right)}, \quad (1.9)$$

де t – час від початку нагрівання;
 a – коефіцієнт температуропровідності:

$$a = \frac{\lambda}{c\rho}, \quad (1.10)$$

де c – теплоємність одиниці маси за сталого об'єму, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$;

ρ – густина.

Для зручності розрахунків функціональна залежність (1.8) θ від критерію Fo за різних значень критерію Bi представляють у вигляді графіків – номограм окремо для поверхні θ_p і центру θ_c тіл різних форм. Такі номограми дозволяють проводити технічні розрахунки з достатньою мірою точності.

Для розрахунку процесу нагрівання „тонкого“ тіла ($Bi \leq 0,25$) використовують рівняння

$$t = \frac{c\rho V}{\alpha S} \ln \frac{T_{\infty} - T_0}{T_{\infty} - T}, \quad (1.11)$$

де t – час процесу;

V – об'єм тіла;

S – площа теплосприймаючої поверхні.

1.2 Приклади розв'язування задач

1.2.1 Розрахуйте процес двобічного нагріву пластини діаметром $d = 100$ мм і товщиною $h = 20$ мм (рис. 1.3). Коефіцієнт тепловіддачі

$\alpha = 10^3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$, $T_0 = 20^\circ \text{C}$, $T_{\infty} = 800^\circ \text{C}$. Параметри матеріалу пласти-

ни: коефіцієнт теплопровідності $\lambda = 100 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$; теплоємність

$c = 900 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$, густина $\rho = 2800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. Значення параметрів у процесі нагріву вважайте сталими.

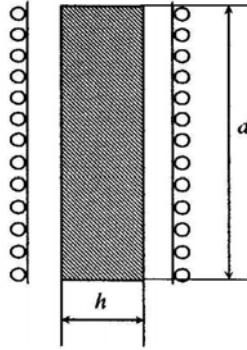


Рисунок 1.3 – Схема нагрівання пластины

Розв'язання

Розрахуємо критерій Біо за рівнянням (1.6). Оскільки процес нагріву двобічний, то за l прийемо половину товщини пластины:

$$Bi = \frac{\alpha l}{\lambda} = \frac{10^3 \cdot 0,01}{100} = 0,1.$$

Оскільки $Bi < 0,25$, пластина буде нагріватися за типом „тонкого“ тіла і розрахунок проведемо за рівнянням (1.11).

Обчислимо тепло сприймаючу поверхню пластины (з урахуванням двобічного нагріву):

$$S = \frac{2\pi d^2}{4} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,1^2}{4} = 0,0157 \text{ м}^2.$$

Розрахуємо об'єм пластины:

$$V = h \frac{1}{2} S = 0,02 \cdot \frac{1}{2} \cdot 0,0157 = 0,000157 \text{ м}^3.$$

Задамося значеннями температур нагріву в інтервалі від 100°C до 700°C з кроком 100°C . Знаходимо час нагріву для кожного значення температури за рівнянням (1.11):

$$t_{100} = \frac{900 \cdot 2800 \cdot 1,57 \cdot 10^{-4}}{10^3 \cdot 0,0157} \ln \frac{800 - 20}{800 - 100} = 2,7 \text{ с}.$$

Аналогічно знаходимо:

$$t_{200} = 6,6 \text{ с}; t_{300} = 11,2 \text{ с}; t_{400} = 16,8 \text{ с};$$

$$t_{500} = 24,1 \text{ с}; t_{600} = 34,3 \text{ с}; t_{700} = 51,8 \text{ с}.$$

Відповідь представимо у вигляді графіка (рис.1.4).

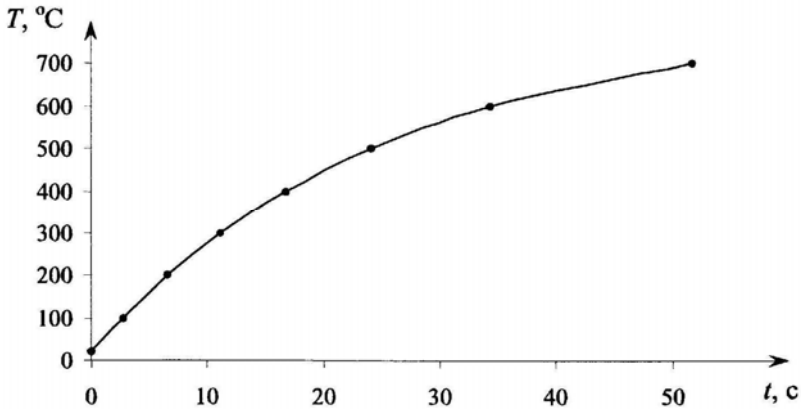


Рисунок 1.4 – Структура теплового примежового шару

1.3 Задачі для самостійного розв'язування

1.3.1 Розрахуйте процес нагріву твердого тіла, дані для розрахунку візьміть з табл. 1.1. Побудуйте графік.

Таблиця 1.1 – Дані для розрахунку

№	Матеріал	$\alpha, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	$T_{\infty}, ^\circ\text{C}$	$d, \text{мм}$	$h, \text{м}$	Теплова схема
1	Si	1 000	1 000	120	0,5	
2	Ge	800	700	100	0,5	
3	GaAs	800	600	120	0,4	
4	GaP	1 050	650	90	0,4	
5	GaSb	900	500	100	0,3	
6	Si	1 000	800	80	0,02	
7	Ge	850	700	60	0,01	
8	GaAs	950	600	80	0,02	
9	GaP	900	650	60	0,015	
10	GaSb	1 050	500	80	0,03	

2 ОСНОВИ ГАЗОДИНАМІКИ

2.1 Основні формули і визначення

Для більшості розрахунків процесів технології матеріалів електронної техніки необхідно знання низки параметрів, що характеризують речовини, які беруть участь в тому чи іншому технологічному процесі. До таких параметрів, перш за все, належать коефіцієнти динамічної і кінематичної в'язкості і коефіцієнт взаємодії дифузії. Часто табличних даних цих величин немає, і виникає необхідність проведення розрахунків.

Коефіцієнт динамічної в'язкості η , Па·с *неполярного газу*, що складається з атомів або неполярних молекул, розраховують за рівнянням:

$$\eta = 2,669 \cdot 10^{-8} \frac{\sqrt{MT}}{\sigma^2 \omega_1}, \quad (2.1)$$

де M – молярна маса газу, $\frac{\text{г}}{\text{моль}}$;

σ – діаметр сфери молекули (атому), нм;

ω_1 – інтеграл зіткнень; T – температура, К.

Коефіцієнт динамічної в'язкості газів при середній довжині вільного пробігу молекул, меншої від розмірів реактора, не залежить від тиску.

Інтеграл зіткнень розраховують за рівнянням

$$\omega_1 = \frac{1,16145}{(T^*)^{0,14874}} + \frac{0,52487}{e^{0,7732T^*}}, \quad (2.2)$$

$$\text{де } T^* \equiv \frac{T}{\left(\frac{\varepsilon}{k_B}\right)}.$$

В останньому рівнянні ε – параметр потенціалу Леннарда-Джона; k_B – стала Больцмана.

Величину $\frac{\varepsilon}{k_B}$ визначають з довідникових даних. Коли даних

немає, можна скористатися однією із залежностей:

$$\frac{\varepsilon}{k_B} = 0,77T_{\text{ëð}}; \quad \frac{\varepsilon}{k_B} = 1,15T_{\text{ëë}}; \quad \frac{\varepsilon}{k_B} = 1,92T_{\text{тë}},$$

де $T_{\text{кр}}$, $T_{\text{кип}}$, $T_{\text{пл}}$ – відповідно критична температура, температура кипіння і топлення при тиску $1,01325 \cdot 10^5$ Па (1 атм).

Коефіцієнт динамічної в'язкості η , Па·с *газових сумішей* наближено розраховують за рівнянням

$$\eta_{\text{нòì}} = \frac{\sum_i M_i x_i}{\sum_i \frac{M_i x_i}{\eta_i}}, \quad (2.3)$$

де η_i – коефіцієнт динамічної в'язкості i -го компонента;

M_i – молярна маса i -го компонента;

x_i – молярна частка i -го компонента.

Коефіцієнт кінематичної в'язкості ν , $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$, розраховують за рівнянням

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}, \quad (2.4)$$

де ρ – густина газу або суміші газів:

$$\rho = \rho_0 \frac{T_0 p}{T p_0}; \quad (2.5)$$

$$\rho_{\text{нòì}} = \frac{\sum_i M_i x_i}{V_0}. \quad (2.6)$$

У цих рівняннях $T_0 = 273,16 \text{ К}$, $p_0 = 1,01325 \cdot 10^5 \text{ Па}$ – нормальні температура і тиск; $V_0 = 22,4 \frac{\text{м}^3}{\text{кмоль}}$; ρ_0 – густина газу за нормальних умов.

На відміну від коефіцієнта динамічної в'язкості газів коефіцієнт кінематичної в'язкості залежить від тиску.

Якщо відомий коефіцієнт динамічної в'язкості при T_0 , то коефіцієнт динамічної в'язкості газу за температури T може бути розрахований за рівнянням

$$\eta = \eta_0 \frac{T_0 + C}{T + C} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}}, \quad (2.7)$$

де C – величина, що залежить від роду газу.

Тоді з урахуванням виразів (2.4) і (2.5) для коефіцієнту кінематичної в'язкості маємо

$$\nu = \nu_0 \frac{T_0 + C}{T + C} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{5}{2}} \frac{p_0}{p}. \quad (2.8)$$

Для розрахунку коефіцієнта динамічної в'язкості полярного газу також можна скористатися рівнянням (2.1) із заміною ω_1 на ω_2 :

$$\omega_2 = \omega_1 + \frac{0,2\delta_1^2}{T^*}, \quad (2.9)$$

де δ_1 – безрозмірна величина.

Величини σ , δ_1 і $\frac{\varepsilon}{k_B}$ для низки полярних газів наводяться у довідниках.

Коефіцієнт взаємодифузії двокомпонентної газової суміші $D, \frac{\text{см}^2}{\text{с}}$, який практично не залежить від концентрації компонентів, розраховують за формулою:

$$D = 1,833 \sqrt{\frac{M_A + M_B}{M_A M_B}} \frac{T^{\frac{3}{2}}}{p \sigma_{AB}^2 \omega_3}, \quad (2.10)$$

де M – молярна маса, $\frac{\tilde{a}}{\text{л} \cdot \text{моль}}$;

p – тиск, Па;

σ_{AB} – характеристична відстань, м;

ω_3 – інтеграл зіткнень.

Величину σ_{AB} розраховують за табличними даними через діаметри сфер молекул (атомів) компонентів А і В:

$$\sigma_{AB} = \frac{\sigma_A + \sigma_B}{2}. \quad (2.11)$$

Інтеграл зіткнень ω_3 розраховують за рівнянням

$$\omega_3 = \frac{1,06036}{(T^*)^{0,1561}} + \frac{0,193}{e^{0,47635T^*}} + \frac{1,03587}{e^{1,52996T^*}}. \quad (2.12)$$

$$\frac{\varepsilon}{k_B} = \sqrt{\frac{\varepsilon_A}{k_B} \frac{\varepsilon_B}{k_B}}. \quad (2.13)$$

Коефіцієнт взаємодифузії двокомпонентної газової суміші при заданих температурі і тиску може бути розрахований через його значення D_0 при $T_0 = 273,16 \text{ К}$, $p_0 = 1,01325 \cdot 10^5 \text{ Па}$:

$$D = D_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1,75} \frac{p_0}{p}. \quad (2.14)$$

Проточні реактори трубчатого типу широко використовують у технології епітаксійних шарів елементарних напівпровідників і напівпровідникових сполук. Для розрахунку багатьох технологічних процесів необхідно мати дані зі швидкості руху парогазової суміші, розподілу швидкості за перерізом реактора, впливу природної конвекції, тобто вміти розраховувати газодинаміку в трубчатому реакторі.

При середній швидкості руху парогазової суміші (газу) менш $100 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ (у напівпровідниковій технології використовуються значно менші середні швидкості) відносна змінена густини середовища внаслідок перепаду тиску за довжиною реактора (рух середовища відбувається із зони більш високого тиску в зону більш низького тиску) не перевищує 5%. Таке середовище відносять до нестисного.

У випадку нестисного середовища *рівняння для потоку* при стаціонарній течії має вигляд:

$$Q = \bar{v}S, \quad (2.15)$$

де Q – об'ємні витрати парогазової суміші, $\frac{\text{м}^3}{\text{с}}$;

S – площа поперечного перерізу реактора діаметром d , м^2 ;

$\bar{v}$ – середня по перерізу швидкість руху газу, $\frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Зазвичай задають витрати газу (парогазової суміші) $Q_0 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$, за нормальних умов ($T_0 = 273,16 \text{ К}$, $p_0 = 1,01325 \cdot 10^5 \text{ Па}$). Для розрахунку витрат Q за температури T і тиску p використовують формулу:

$$Q = Q_0 \frac{Tp_0}{T_0p}. \quad (2.16)$$

При достатньо повільному русі рідини в прямолінійному напрямку шляхи окремих її частинок є паралельними прямими. Такий рух, коли частинки рідини рухаються прямолінійно і паралельно одна одній, у гідродинаміці називають струменистим, або ламіна́рним.

Навпаки, за великих швидкостей окремі частинки рідини, навіть у випадку загального прямолінійно направлено руху всієї маси рідини, будуть рухатися хаотично, за складними траєкторіями у різних напрямках, причому ці шляхи постійно змінюватимуться. Такий рух називають вихровим або турбулентним.

У турбулентному потоці відбувається пульсація швидкостей, які носять хаотичний характер у часі. Частинки рідини, що рухаються в головному (осьовому) напрямку, отримують також поперечні переміщення, що спричинює інтенсивне перемішування потоку по перерізу і вимагає відповідно більших витрат енергії на рух рідини, ніж у разі ламінарного потоку.

Досвід показує, що перехід від ламінарної течії до турбулентної (наприклад, у трубі) відбувається тим легше, чим більше середня швидкість рідини, її густина ρ і діаметр труби d , і чим менше в'язкість рідини η . Було встановлено, що вказані величини можна поєднати у безрозмірний комплекс, числове значення якого дозволяє робити висновки про режим руху рідини. Цей комплекс носить назву *критерію Рейнольдса* (Re):

$$Re = \frac{v\rho d}{\eta}. \quad (2.17)$$

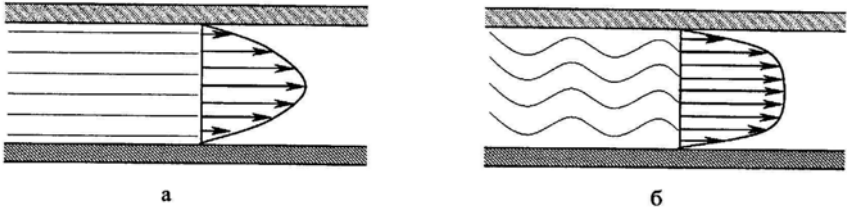
Перехід від ламінарного до турбулентного руху характеризується критичним значенням $Re_{кр}$. Дослідним шляхом встановлено, що при русі рідин по прямим гладким трубам $Re_{кр} \approx 2300$. При $Re < 2100$ течія зазвичай є ламінарною, тому дану область значень Re називають областю стійкого ламінарного режиму течії. При $Re > 2300$ частіше за все спостерігається турбулентний характер руху. Проте при $2300 < Re < 10000$ режим течії нестійко турбулентний, або перехідний (змішаний).

У реальних технологічних процесах температура парогазової суміші при русі її по реактору зазвичай неоднакова (наприклад, парогазова суміш поступово нагрівається). Це значно ускладнює розрахунки газодинаміки, оскільки змінюються фізичні властивості середовища, що рухається. Як спрощуючий прийом можна використати середнє значення температури

$$T_{сер} = \frac{T_1 + T_2}{2}.$$

Наявність сил в'язкості спричинює неоднакову швидкість газу в поперечному перерізі реактора: на стінках реактора вона дорівнює

нулю, а на осі досягає максимального значення $v_{\max}$. Епюри розподілу швидкості при ламінарному і турбулентному режимах течії наведені на рис. 2.1.



а – ламінарний режим; б – турбулентний режим
Рисунок 2.1 – Розподіл швидкості по перерізу реактора

Для усталеної ламінарної течії між середньою і максимальною швидкостями в перерізі справедливе співвідношення:

$$v_{\max} = 2\bar{v}; \quad (2.18)$$

для усталеної турбулентної течії

$$v_{\max} = 1,22\bar{v}. \quad (2.19)$$

Для усталеної ламінарної течії величина максимальної швидкості залежить від низки величин:

$$v_{\max} = \frac{\Delta p}{4\eta l} R^2 = AR^2, \quad (2.20)$$

де Δp – перепад (втрати) тиску на довжині реактора l ; R – радіус реактора; а розподіл швидкості за перерізом реактора описується параболічним законом:

$$v = \frac{\Delta p}{4\eta l} (R^2 - r^2) = A(R^2 - r^2), \quad (2.21)$$

де r – відстань від осі реактора.

При усталеній турбулентній течії розподіл швидкості за перерізом реактора з достатнім для технічних розрахунків ступенем точності розраховують за допомогою виразу:

$$v = v_{\max} \sqrt[7]{1 - \frac{r}{R}}. \quad (2.22)$$

Наявність сил в'язкості спричинює втрати тиску Δp . Величину *втрат тиску на тертя* розраховують за рівнянням

$$\Delta p = \lambda_{\text{тер}} \frac{\rho v^2}{2} \frac{l}{d}, \quad (2.23)$$

де $\lambda_{\text{тер}}$ – коефіцієнт втрат тиску на тертя (безрозмірна величина), що залежить від режиму течії. Для *ламінарної течії*:

$$\lambda_{\text{тер}} = \frac{64}{\text{Re}}, \quad (2.24)$$

для *турбулентної течії*:

$$\lambda_{\text{тер}} = \frac{0,32}{\text{Re}^{0,25}}. \quad (2.25)$$

Якщо в реакторі у вертикальному напрямку існує різниця температур ΔT , причому знизу температура більша, ніж зверху, то на штучно створюваний рух газу накладається додатково рух за рахунок природної конвекції.

Умову, за якої виникає природна конвекція, записують у вигляді:

$$\text{Gr} \geq 0,3 \text{Re}^2, \quad (2.26)$$

де Gr – критерій Грасгоффа:

$$\text{Gr} = \frac{g l^3}{\nu^2} \beta_0 \Delta T, \quad (2.27)$$

де g – прискорення вільного падіння;

l – відстань (висота або довжина реактора), на якій температура змінюється на величину ΔT ;

β_0 – температурний коефіцієнт об'ємного розширення газу ($\beta = \frac{1}{273}$).

Якщо в реакторі виникає природна конвекція, то профіль розподілу швидкості, що описується рівнянням (2.21) для ламінарної і рівнянням (2.22) для турбулентної течії, порушується.

Розміщення всередині трубчатого реактора різного технологічного оснащення зумовлює більш складний профіль розподілу швидкості внаслідок обтікання цього оснащення парогазовою сумішшю. Газодинамічні розрахунки при цьому істотно ускладнюються і не завжди можуть бути виконані.

Динамічний, дифузійний і тепловий примежові шари спостерігаються у більшості процесів напівпровідникової технології. Врахування цих шарів необхідно для розрахунків конкретних процесів – швидкості росту епітаксійних шарів і кристалів, розподілу домішки за довжиною монокристалів тощо.

При русі середовища всередині циліндричного реактора біля його стінок виникає динамічний примежовий шар $\delta_0(x)$, де x – відстань від початку реактора. У межах цього шару через наявність сил в'язкості у середовищі, що рухається, швидкість зростає від нульового значення для частинок, які контактують зі стінками реактора, до значення v_∞ на зовнішній стінці примежового шару.

У системі координат $x-r$ (вісь x суміщена з віссю реактора) маємо $v_{r=R} = 0$, де R – радіус реактора, і $v = v_\infty$ при $r < R - \delta_0(x)$, тобто за межами динамічного примежового шару швидкість постійна і дорівнює v_∞ (рис. 2.2).

У першому наближенні можна вважати, що в межах динамічного примежового шару швидкість змінюється за лінійним законом:

$$v = v_\infty \frac{R-r}{\delta_0(x)}, \quad R - \delta_0(x) \leq r \leq R. \quad (2.28)$$

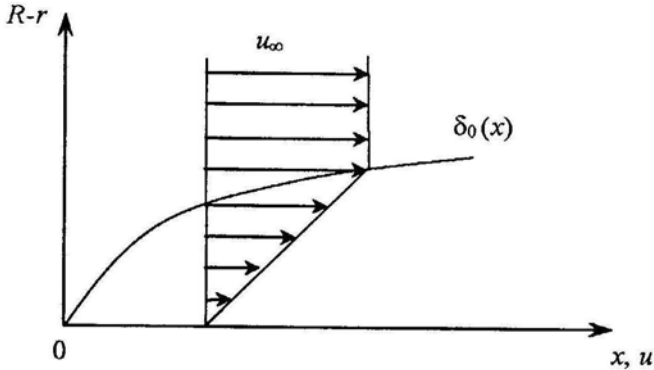


Рисунок 2.2 – Схема розвитку динамічного примежового шару при ламінарній течії середовища

Зі збільшенням x товщина динамічного примежового шару зростає при ламінарній течії за параболічним законом:

$$\delta_0(x) = 2,44 \sqrt{\frac{\nu}{v_\infty}} \sqrt{x}, \quad (2.29)$$

де ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості;

v_∞ – швидкість за межами динамічного примежового шару.

При розрахунках величина v_∞ може бути прийнята рівною середній швидкості $\bar{v}$, яка визначається з рівняння (2.15).

При досягненні величиною $\delta_0(x)$ значення, рівного радіусу реактора, формується стабілізований профіль розподілу швидкості за перерізом реактора (усталена течія) (рис. 2.3), який описують рівнянням (2.21) для ламінарного і рівнянням (2.22) для турбулентного режимів течії. При цьому наближення динамічного примежового шару стає незастосовним. Відстань від початку реактора, на якій профіль швидкості не стабілізований, називають гідродинамічною початковою ділянкою. При цьому виникає так звана зовнішня гідродинамічна задача.

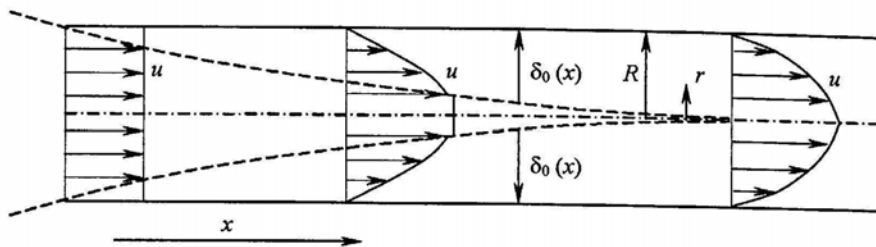


Рисунок 2.3 – Схема утворення стабілізованого профілю розподілу швидкості за перерізом реактора

При обтіканні плоскої пластини (зовнішня гідродинамічна задача) для розрахунку товщини динамічного прилежового шару використовують рівняння:

$$\delta_0 = 5,6 \sqrt{\frac{\nu}{v_\infty}} \sqrt{x} . \quad (2.30)$$

Це рівняння може бути використане і для циліндричного реактора, якщо радіус реактора на порядок перевищує величину δ_0 , розраховану за рівнянням (2.30) для кінця реактора.

У поверхні плоского диска, який обертається з кутовою швидкістю ω_δ в рідині, яка міститься в посудині (тиглі), також виникає динамічний прилежовий шар, який розраховують за рівнянням:

$$\delta_0 = A \sqrt{\frac{\nu}{\omega_\delta}} . \quad (2.31)$$

При нерухомій посудині величина A в рівнянні (2.31) дорівнює 3,6.

Якщо посудина (тигель), в якому перебуває рідина (стоп), обертається з кутовою швидкістю ω_δ , то товщину прилежового шару у поверхні плоского диска також розраховують за рівнянням (2.31), а величину A визначають за графіком на рис. 2.4. На цьому графіку $\chi = \frac{\omega_\delta}{\omega_\delta}$. При однаковому напрямку обертання тигля і диска $\chi > 0$, при

різному - $\chi < 0$, при $\chi = 0$ маємо $A = 3,6$. Для процесу Чохральського ($\chi < 0$) величину A можна прийняти рівною 5.

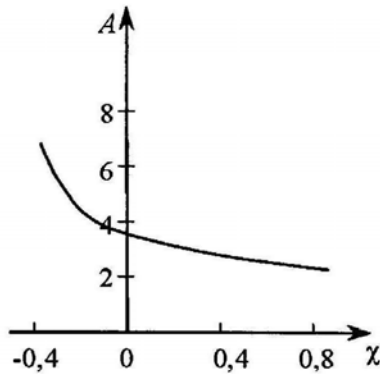


Рисунок 2.4 – Схема до визначення величини коефіцієнта A

При проходженні парогазової суміші вздовж поверхні підкладки, на якій протікає хімічна реакція і витрачається компонент j , формується дифузійний примежовий шар $\delta_j(x)$ (рис. 2.5). Якщо $C_j(0)$ – концентрація компонента на поверхні підкладки, $\frac{1}{3}$, то з віддаленням від неї (зі збільшенням z) концентрація C_j зростає, досягаючи величини $C_{j\infty}$ на зовнішній межі дифузійного шару ($z = \delta$). При $z \geq \delta_j(x)$ концентрація залишається незмінною і рівною $C_{j\infty}$. З достатнім ступенем точності можна вважати, що в межах дифузійного шару величина C_j змінюється лінійно:

$$C_j = C_j(0) + [C_{j\infty} - C_j(0)] \frac{z}{\delta_j(x)}, \quad 0 \leq z \leq \delta_j, \quad (2.32)$$

де z – відстань за нормаллю від поверхні підкладки.

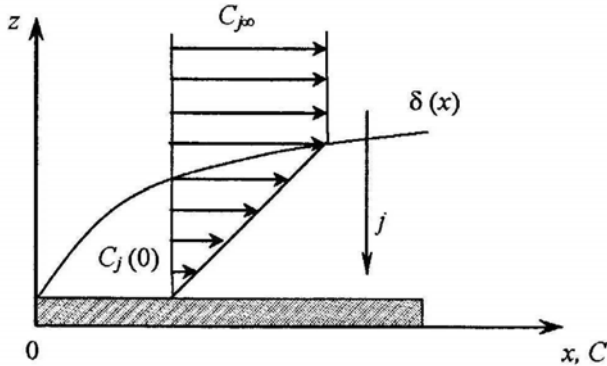


Рисунок 2.5 – Схема розвитку дифузійного шару біля поверхні підкладки

Товщина дифузійного шару при зовнішній гідродинамічній задачі (на гідродинамічній початковій ділянці) залежить від відстані x початку набігання парогазової суміші:

$$\delta_j(x) = 3 \sqrt{\frac{\nu}{\nu_\infty}} \sqrt{x} Sc_j^{-0,33}. \quad (2.33)$$

Рівняння (2.33) справедливе при ламінарній течії парогазової суміші. В останньому рівнянні Sc_j – критерій Шмідта:

$$Sc_j = \frac{\nu}{D_j}, \quad (2.34)$$

де D_j – коефіцієнт взаємодифузії j -го компонента.

При стабілізованому профілі швидкості і ламінарній течії середовища в циліндричному реакторі товщину дифузійного шару розраховують за виразом:

$$\delta_j(x) = 0,94 \left(\frac{\nu h x}{\nu_\infty} \right)^{0,33} Sc_j^{-0,33}, \quad (2.35)$$

де h – відстань за нормаллю до протилежної стінки.

Наближення дифузійного примежового шару широко використовують при розрахунку швидкості протікання гетерогенного процесу

в дифузійному режимі. При цьому $C_j(0) = C_j^0$ – рівноважній концентрації, величину якої можна розрахувати через константу рівноваги. Наближення дифузійного шару справедливе лише в тому разі, якщо $\delta_j(x)$ менше відстані до поверхні (стінки реактора), протилежної поверхні підкладинки, тобто дифузійна задача – зовнішня.

У плоского диску, що обертається, товщина дифузійного прилежового шару для j -го компонента визначається за формулою:

$$\delta_j = 0,44A \sqrt{\frac{\nu}{\omega_\varepsilon}} Sc_j^{-0,33}. \quad (2.36)$$

Величину A , яка входить у рівняння (2.36), визначають за графіком на рис. 2.4. При $\omega_\varepsilon = 0$ ($\chi = 0$) $A = 3,6$ і маємо рівняння для розрахунку товщини дифузійного прилежового шару:

$$\delta_j = 1,6 \sqrt{\frac{\nu}{\omega_\varepsilon}} Sc_j^{-0,33} = 1,6 \nu^{0,17} D_j^{0,33} \omega_\varepsilon^{-0,5}. \quad (2.37)$$

Товщину теплового прилежового шару δ_θ при обтіканні парогазовою сумішшю пластини розраховують за виразом, аналогічним (2.33):

$$\delta_\theta(x) = 3 \sqrt{\frac{\nu}{\nu_\infty}} \sqrt{x} Pr^{-0,33}, \quad (2.38)$$

де Pr – критерій Прандтля:

$$Pr = \frac{\nu}{a}, \quad (2.39)$$

де a – коефіцієнт температуропровідності.

2.2 Приклади розв'язування задач

2.2.1 Розрахуйте коефіцієнти динамічної, кінематичної в'язкості і взаємодифузії суміші фтору (0,2 молярних частки) і азоту за температури $T = 273 \text{ K}$ і тиску $p = 101325 \text{ Па}$.

Розв'язання

З довідкових даних (додаток В, табл. В.1) знаходимо:

$$\sigma = 0,3357 \text{ Па} \cdot \text{с}, \frac{\varepsilon}{k_B} = 112,6; \quad M = 38.$$

$$\sigma = 0,3798 \text{ Па} \cdot \text{с}, \frac{\varepsilon}{k_B} = 71,4; \quad M = 28.$$

Розраховуємо значення T^* для фтору:

$$T^* = \frac{T}{\left(\frac{\varepsilon}{k_B}\right)} = \frac{273}{112,6} = 2,42 \text{ K}.$$

Інтеграл зіткнень для фтору (2.2):

$$\omega_1 = \frac{1,16145}{(2,42)^{0,14874}} + \frac{0,52487}{e^{0,7732 \cdot 2,42}} = 1,02 + 0,08 = 1,1.$$

Коефіцієнт динамічної в'язкості фтору (2.1):

$$\eta = 2,669 \cdot 10^{-8} \frac{\sqrt{MT}}{\sigma^2 \omega_1} = 2,669 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{\sqrt{38 \cdot 273}}{0,3357^2 \cdot 1,1} = 2,2 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

Аналогічно розраховуємо значення T^* для азоту:

$$T^* = \frac{T}{\left(\frac{\varepsilon}{k_B}\right)} = \frac{273}{71,4} = 3,82 \text{ K}.$$

Інтеграл зіткнень для азоту:

$$\omega_1 = \frac{1,16145}{(3,82)^{0,14874}} + \frac{0,52487}{e^{0,7732 \cdot 3,82}} = 0,98.$$

Коефіцієнт динамічної в'язкості азоту:

$$\eta = 2,669 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{\sqrt{28 \cdot 273}}{0,3798^2 \cdot 0,98} = 1,65 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

Коефіцієнт динамічної в'язкості суміші (2.3):

$$\eta_{\text{н\ddot{o}i}} = \frac{\sum_i M_i x_i}{\sum_i \frac{M_i x_i}{\eta_i}} = \frac{38 \cdot 0,2 + 28 \cdot 0,8}{\frac{38 \cdot 0,2}{2,2 \cdot 10^{-5}} + \frac{28 \cdot 0,8}{1,65 \cdot 10^{-5}}} = 1,76 \cdot 10^{-5} \text{ Ї} \cdot \text{с}.$$

Густина суміші газів ()

$$\rho_{\text{н\ddot{o}i}} = \frac{\sum_i M_i x_i}{V_0} = \frac{38 \cdot 0,2 + 28 \cdot 0,8}{22,4} = 1,34 \frac{\text{ê} \ddot{\text{a}}}{\text{ì}^3}.$$

Тоді коефіцієнт кінематичної в'язкості газів (2.4):

$$\nu_{\text{н\ddot{o}i}} = \frac{\eta_{\text{н\ddot{o}i}}}{\rho_{\text{н\ddot{o}i}}} = \frac{1,76 \cdot 10^{-5}}{1,34} = 1,31 \cdot 10^{-5} \frac{\text{ì}^2}{\text{ñ}.$$

Відповідь: $\eta_{\text{н\ddot{o}i}} = 1,76 \cdot 10^{-5} \text{ Ї} \cdot \text{с}; \quad \nu_{\text{н\ddot{o}i}} = 1,31 \cdot 10^{-5} \frac{\text{ì}^2}{\text{ñ}.$

2.2.2 Визначте режим течії газоподібного хлору для ділянки проточного реактора. Діаметр реактора $d = 80 \text{ ì}$, висота – $1,2 \text{ ì}$. Температура на вході реактора 820°C , на виході 830°C . Витрати хлору $Q_0 = 12 \frac{\text{дм}^3}{\text{с}}$, тиск $p = 101325 \text{ Па}$.

Розв'язання

З довідкових даних (додаток В, табл. В.3) знаходимо для хлору:

$$\rho_0 = 3,217 \frac{\text{ê} \ddot{\text{a}}}{\text{ì}^3}, \quad \eta_0 = 1,29 \cdot 10^{-5} \text{ Ї} \cdot \text{с}; \quad C = 351 \text{ К}.$$

Розрахуємо площу поперечного перерізу реактора:

$$S = 3,14 \cdot (4 \cdot 10^{-2})^2 = 5 \cdot 10^{-3} \text{ ì}^2.$$

Середня температура в реакторі:

$$T_{\text{сер}} = \frac{820 + 830}{2} + 273 = 1098 \text{ К}.$$

Витрати газу при робочій температурі (2.16):

$$Q = Q_0 \frac{T p_0}{T_0 p} = \frac{12 \cdot 1098}{273} = 4,8 \cdot 10^{-2} \frac{\text{ì}^3}{\text{ñ}.$$

Середня швидкість течії газу (2.15):

$$\bar{v} = \frac{Q}{S} = \frac{4,8 \cdot 10^{-2}}{5 \cdot 10^{-3}} = 9,6 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Коефіцієнт динамічної в'язкості за робочої температури (2.7):

$$\eta = \eta_0 \frac{T_0 + C}{T + C} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}} = 1,29 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{273 + 351}{1098 + 351} \cdot \left(\frac{1098}{273} \right)^{\frac{3}{2}} = 4,48 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

Густина хлору за робочої температури (2.5):

$$\rho = 3,217 \cdot \frac{273}{1098} = 0,8 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Коефіцієнт кінематичної в'язкості (2.4):

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} = \frac{4,48 \cdot 10^{-5}}{0,8} = 5,6 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}.$$

Критерій Рейнольдса (2.17):

$$\text{Re} = \frac{\bar{v} \rho d}{\eta} = \frac{\bar{v} d}{\nu} = \frac{9,6 \cdot 80 \cdot 10^{-3}}{5,6 \cdot 10^{-5}} = 13174.$$

Оскільки обчислене значення $\text{Re} > 2300$, отже, режим течії хлору турбулентний.

Відповідь: $\text{Re} = 13174$, режим течії хлору турбулентний.

2.2.3 Розрахуйте перепад тиску і розподіл швидкості за перерізом реактора довжиною $l = 1 \text{ м}$ і діаметром $d = 100 \text{ мм}$ при русі в ньому водню. Середня температура в реакторі 803°C . Середня швидкість течії газу $\bar{v} = 5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, кінематична в'язкість $\nu = 8,7 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$, густина газу $\rho = 2,3 \cdot 10^{-2} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. Побудуйте профіль розподілу.

Розв'язання

Розраховуємо критерій Рейнольдса (2.17):

$$\text{Re} = \frac{\bar{v} d}{\nu} = \frac{5 \cdot 100 \cdot 10^{-3}}{8,7 \cdot 10^{-4}} = 575,$$

отже, режим течії водню ламінарний.

Максимальна швидкість течії газу (2.18)

$$v_{\max} = 2\bar{v} = 2 \cdot 5 = 10 \frac{\text{і}}{\text{ñ}}.$$

З рівняння (2.20) знайдемо величину

$$A = \frac{v_{\max}}{R^2} = \frac{10}{50 \cdot 10^{-3}} = 4000 \frac{1}{\text{і} \cdot \text{ñ}}.$$

Використовуючи отримане значення A , розрахуємо розподіл швидкості за перерізом реактора за формулою (2.21), взявши за початок відліку осьову лінію.

$R, \text{і і}$	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50
$v, \frac{\text{і}}{\text{с}}$	0	3,6	6,4	8,4	9,6	10	9,6	8,4	6,4	3,6	0

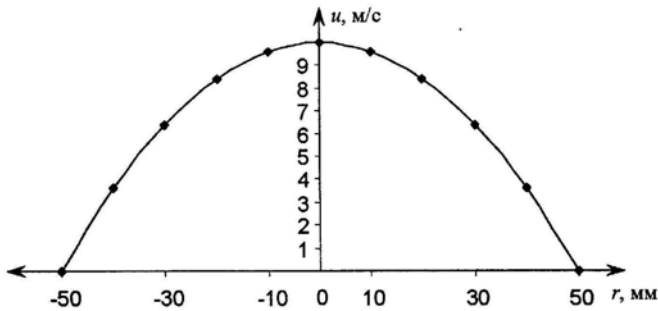


Рисунок 2.6 – Профіль розподілу швидкості течії водню за перерізом реактора

Коефіцієнт втрат на тертя (2.24):

$$\lambda_{\text{тер}} = \frac{64}{\text{Re}} = \frac{64}{575} = 0,11,$$

тоді втрати тиску складатимуть (2.23)

$$\Delta p = \lambda_{\text{тер}} \frac{\rho v^2}{2} \frac{l}{d} = 0,11 \cdot \frac{2,3 \cdot 10^{-2} \cdot 5^2}{2} \cdot \frac{1}{0,1} = 0,316 \text{ Па}.$$

Відповідь: $\Delta p = 0,316 \text{ Па}$.

2.2.4 Розрахуйте товщину динамічного, дифузійного і теплового примежового шарів, що виникають у поверхні підкладки в процесі її взаємодії з парогазовою сумішшю, що містить речовини А і В. Температура процесу 1000°C . Швидкість руху парогазової суміші за робочої температури $v_\infty = 4 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, коефіцієнт кінематичної в'язкості $\nu_{\text{сум}} = 3 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$, коефіцієнт взаємодифузії $D_j = 7 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$, коефіцієнт теплопровідності $a = 2 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$. Довжина ділянки 2 м. Розглядається зовнішня гідродинамічна задача.

Розв'язання

Обчислимо товщину динамічного шару $\delta_0(x)$ за виразом (2.30):

$$\delta_0 = 5,6 \sqrt{\frac{\nu}{v_\infty}} \sqrt{x} = 5,6 \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot 10^{-4}}{4}} \sqrt{x} = 4,85 \cdot 10^{-2} \sqrt{x} \text{ м.}$$

Результати розрахунків:

$x, \text{ м}$	0	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,5
$\delta_0, \text{ мм}$	0	15,3	21,7	30,7	37,6	43,4	48,5	53,1	57,4	59,4

Розраховуємо критерій Шмідта (2.34):

$$\text{Sc}_j = \frac{\nu}{D_j} = \frac{3 \cdot 10^{-4}}{7 \cdot 10^{-4}} = 0,429.$$

Тоді товщина дифузійного шару (2.33):

$$\delta_j(x) = 3 \sqrt{\frac{\nu}{v_\infty}} \sqrt{x} \text{Sc}_j^{-0,33} = 3 \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot 10^{-4}}{4}} \cdot 0,429^{-0,33} \cdot \sqrt{x} = 3,44 \cdot 10^{-2} \sqrt{x} \text{ м.}$$

Результати розрахунків:

$x, \text{ м}$	0	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,5
$\delta_j, \text{ мм}$	0	10,9	15,4	21,8	26,6	30,8	34,4	37,7	40,7	42,1

Для розрахунку товщини теплового примежового шару визначимо критерій Прандтля (2.39):

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{3 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 10^{-4}} = 1,5.$$

Тоді товщина теплового прилежового шару (2.38):

$$\delta_0(x) = 3 \sqrt{\frac{\nu}{\nu_\infty}} \sqrt{x} Pr^{-0,33} = 3 \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot 10^{-4}}{4}} \cdot 1,5^{-0,33} \cdot \sqrt{x} = 2,27 \cdot 10^{-2} \sqrt{x} \text{ м}.$$

Результати розрахунків:

$x, \text{ м}$	0	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,5
$\delta_T, \text{ мм}$	0	7,2	10,2	14,4	17,6	20,3	22,7	24,9	26,9	27,8

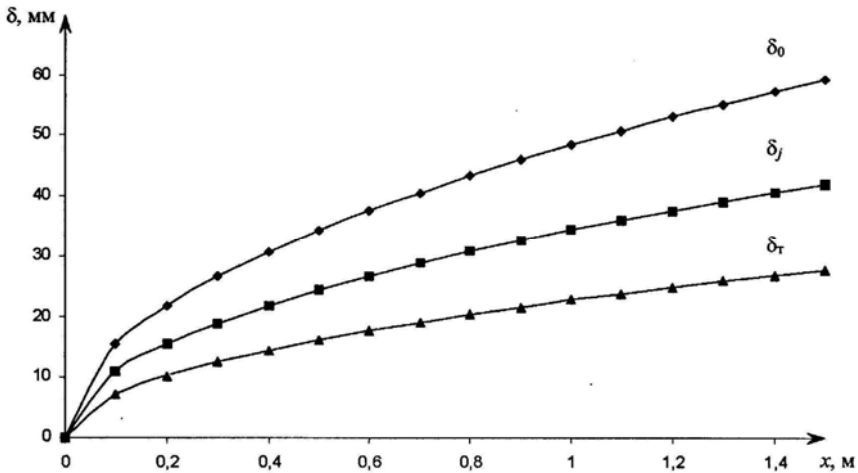


Рисунок 2.7 – Залежність товщини динамічного, дифузійного і теплового прилежових шарів від відстані

2.3 Задачі для самостійного розв'язування

2.3.1 Розрахуйте коефіцієнти динамічної, кінематичної в'язкості і взаємодифузії суміші речовини А з молярною часткою x і речовини В за температури T і тиску p .

Вихідні данні до завдання 2.3.1:

№	газ А	x	газ В	p , Па	T , °C
1	Cl ₂	0,1	N ₂	101325	800
2	Br ₂	0,15	Ar	101325	700
3	NH ₃	0,1	H ₂	101325	650
4	SO ₂	0,15	N ₂	101325	750
№	газ А	x	газ В	p , Па	T , °C
5	H ₂ S	0,1	Ar	101325	500
6	F ₂	0,15	H ₂	101325	550
7	HBr	0,1	N ₂	101325	720
8	SiH ₄	0,15	Ar	101325	820
9	CCl ₄	0,1	H ₂	101325	680
10	HI	0,15	N ₂	101325	600

2.3.2 Розрахуйте газодинаміку для ділянки проточного реактора вертикального типу при усталеному в ньому русі газу. Діаметр реактора d , висота l . Температура зверху T_a , знизу T_i . Витрати газу Q_0 . Тиск у реакторі 1 атм.

Вихідні данні до завдання 2.3.2:

№	Газ	d , мм	l , м	Q_0 , $\frac{\text{дм}^3}{\text{с}}$	T_a , °C	T_i , °C
1.	H ₂	100	1	10	900	905
2.	He	120	1,2	12	870	877
3.	N ₂	80	1,4	5	926	930
4.	Ar	100	1	7	780	782
5.	Ne	90	0,8	4	750	756
6.	Cl ₂	110	1,3	8	810	814
7.	CO	120	1,4	14	860	865
8.	SO ₂	90	1,2	3	690	698
9.	CH ₄	80	0,7	10	720	723
10.	O ₂	110	0,9	15	580	585

2.3.3 Розрахуйте товщину динамічного і теплового примежового шарів, що виникають у поверхні підкладки в процесі її взаємодії з газом. Температура процесу $T, ^\circ\text{C}$. Швидкість руху газу за робочої температури $v_\infty, \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Довжина ділянки реактора $l, \text{м}$. Тиск $p = 1 \text{ атм}$. Розглядається зовнішня гідродинамічна задача. побудуйте графік.

Вихідні данні до завдання 2.3.3:

№	газ	$T, ^\circ\text{C}$	$v_\infty, \frac{\text{м}}{\text{с}}$	$l, \text{м}$
1.	H_2	800	5	1,5
2.	He	850	6	2
3.	N_2	770	7	1,5
4.	Ar	720	3	2
5.	Ne	900	4	1,8
6.	Cl_2	910	7	1,7
7.	CO	830	2	2
8.	SO_2	660	5	1,6
9.	CH_4	750	6	1,8
10.	O_2	810	7	2

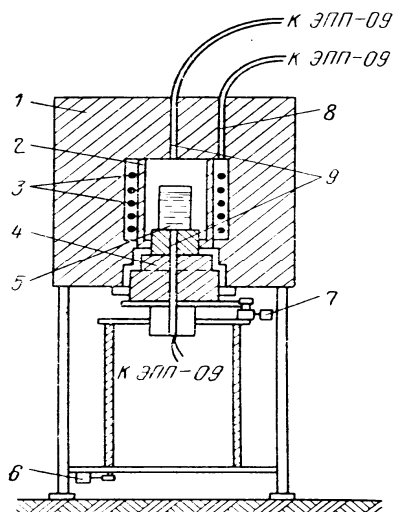
3 КРИСТАЛІЗАЦІЙНІ МЕТОДИ ОЧИЩЕННЯ Й ОТРИМАННЯ МАТЕРІАЛІВ

Монокристали вирощують або з використанням монокристалічних затравок, або спонтанно. Вирощування кристалів на затравках одноїменного матеріалу називають гомоепітаксією, на інших відповідних за кристалографічними параметрами поверхнях – гетероепітаксією. Розглянемо основні методи вирощування кристалів.

3.1 Вирощування з розчину в стопі (спонтанна кристалізація)

Як легкоплавкі флюси зазвичай використовують PbO (886 °C), PbF_2 (824 °C), V_2O_3 (450 °C), Bi_2O_3 (817 °C), V_2O_5 (670 °C) й ін. Кристалізація відбувається при охолодженні нижче точки насичення. Основними перевагами методу є те, що кристалізацію можна проводити при температурі, значно нижчій за температуру топлення отриманого матеріалу. Недоліки: забруднення елементами флюсу, необхідність в точному регулюванні температури, дорогий матеріалів тиглів (платина тощо).

Принципову схему установки для вирощування кристалів із стопу в розчині наведено на рис.3.1.



1 – кристалізаційна піч; 2 – циліндричний карборундовий екран; 3 – нагрівальні силіконові стрижні; 4 – низ печі; 5 – тигель; 6 – пристрій для вертикального переміщення; 7 – пристрій для реверсивного обертання; 8 – термодатчик; 9 – контрольні термодатчики

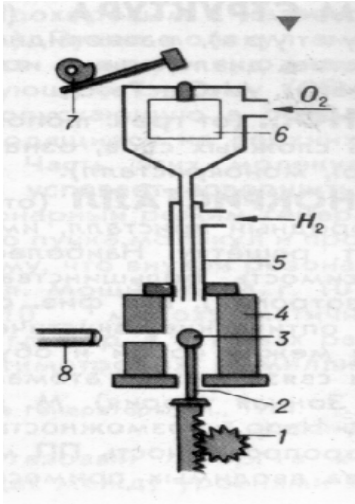
Рисунок 3.1 – Принципова схема установки для вирощування кристалів із стопу в розчині

До флюсів висувають наступні вимоги: вони не мають бути леткими і токсичними, по можливості мінімально входити до складу монокристалів (якщо не є їх компонентами), також має бути помірна в'язкість стопів.

Наприклад, для вирощування кристалів залізо-ітрієвого гранату (ЗІГ) беруть шихту, яка містить в мольних процентах: $10\text{Y}_2\text{O}_3$, $20,4\text{Fe}_2\text{O}_3$, $36,8\text{PbO}$, $27,1\text{PbF}_2$, $5,5\text{B}_2\text{O}_3$. Склад цільового продукту $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, який кристалізується, не відповідає за співвідношенням концентрації основних компонентів складу стопу, як і в разі кристалізації феритових кристалів із розчину. Процеси росту монокристалів при реалізації їх технології підкоряються, власне кажучи, тим же основним термодинамічним і кінетичним закономірностям, що і синтез порошкових і плівкових матеріалів. Так, найважливішим чинником процесу є високотемпературна фазова діаграма компонентів шихти в області ліквідуса і солідуса. Ріст кристалів починається з виникнення зародків, які можуть залежно від температури і хімічних потенціалів компонентів розчинятися або зростати далі, тобто можуть мати критичні розміри. Температура витримки стопу $1250\div 1300^\circ\text{C}$ (15 годин), швидкість охолодження до кристалізації - $0,3\div 0,5$ град/год. Кристалізацію припиняють при $950\div 1000^\circ\text{C}$ і видаляють стоп, що залишився. Отримані кристали очищають кип'ятінням в азотній кислоті. Швидкість обертання тигля при вирощуванні 20 об/хв, обертання здійснюють 15 с в один бік і 15 с в інший з 5-секундною паузою.

3.2 Метод Вернейля

Метод Вернейля (рис.3.2) реалізується зсипанням невеликих порцій порошкової шихти в трубчасту піч, де ця шихта розтоплюється під час падіння в киснево-водневому полум'ї і живить краплю стопу на поверхні затравки. Затравка при цьому витягується поступово вниз, а крапля перебуває на одному і тому ж рівні по висоті печі.

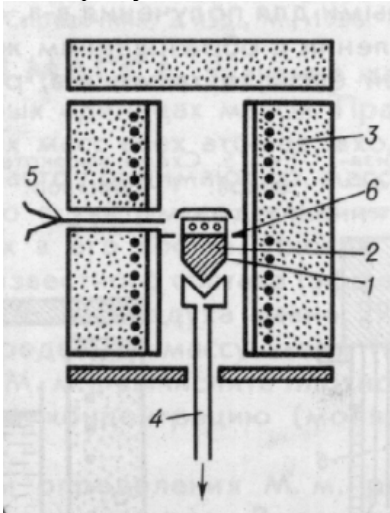


- 1 – механізм опускання кристала;
 2 – кристалотримач; 3 – зростаючий кристал;
 4 – муфель; 5 – пальник;
 6 – бункер; 7 – механізм струшування;
 8 – катетометр

Рисунок 3.2 – Схема установки для вирощування монокристалів за методом Вернейля

3.3 Метод Бріджмена

Метод Бріджмена полягає в наступному. Монокристали, які зароджуються в нижній частині тигля із стопу, є затравкою. Тигель опускають в холоднішу зону печі. Нижня частина тигля – конічна. Швидкість вирощування – також декілька мм/год.



- 1 – тигель із стопом; 2 – кристал; 3 – піч;
 4 – холодильник; 5 – термопара;
 6 – тепловий екран

Рисунок 3.3 – Схема установки для вирощування монокристалів за методом Стокаберга-Бріджмена

3.4 Метод Чохральського

3.4.1 Основи теорії росту монокристалів

Більшість кремнієвих кристалів вирощують за методом Чохральського. Ідея методу полягає у вирощуванні монокристала за рахунок переходу атомів з рідкої або газоподібної фази речовини в тверду фазу на межі їх розділу (рис. 3.4). Стосовно кремнію цей процес можна охарактеризувати як однокомпонентну ростову систему рідина - тверде тіло.

Установка складається з наступних частин: піч, в якій є тигель (8), контейнер для підтримки тигля (14), нагрівач (15), джерело живлення (12), камера високотемпературної зони (6) та ізоляція (3, 16); механізм витягування кристала, стрижень із затравкою (5), механізм обертання затравки (1) і пристрій для її затискання, пристрій обертання і підйому тигля (11); пристрій для управління складом атмосфери (4 – газовий вхід, 9 – вихлоп, 10 – вакуумний насос); блок управління, який складається з мікропроцесора, датчиків температури і діаметра зростаючого зливка (13, 19), та пристрою введення; додаткові пристрої: оглядове вікно – 17, кожух – 2.

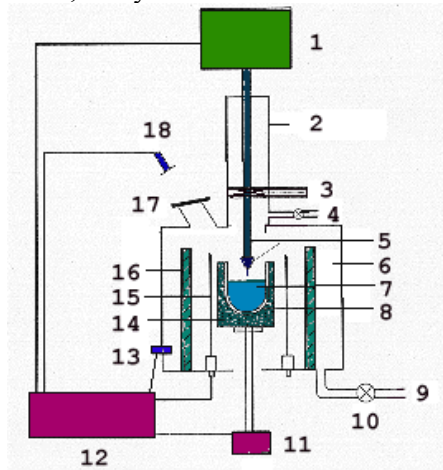


Рисунок 3.4 – Установка для вирощування монокристалів за методом Чохральського

Технологія процесу наступна. Монокристал затравки високої якості опускається у стоп кремнію і одночасно обертається. Полікремний розтоплюється в тиглі в інертній атмосфері при температурі, трохи вищій за точку топлення кремнію $T=1415\text{ }^{\circ}\text{C}$. Тигель обертається в напрямі, протилежному до обертання монокристала для кращого перемішування стопу і зведення до мінімуму неоднорідності розподілу температури. Фрагменти росту наведено на рис.3.5.

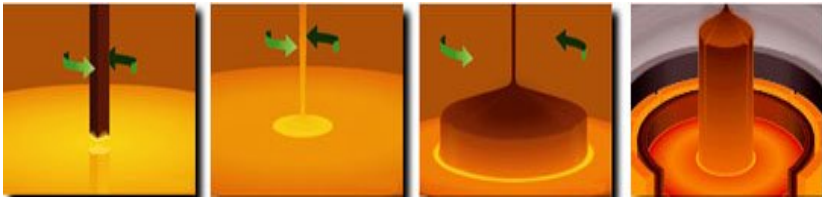


Рисунок 3.5 – Ріст монокристала

3.5 Вплив домішок на дефектність кристалів

Домішка має певну розчинність у кристалі. Для розбавлених розчинів рівноважний коефіцієнт сегрегації k_0 можна записати як:

$$k_0 = C_s / C_l,$$

де C_s , C_l - рівноважна концентрація домішок відповідно у твердій і рідкій фазах.

Розподіл домішки в зростаючому кристалі може бути описаний співвідношенням:

$$C_s = k_0 C_0 (1 - X)^{k_0 - 1},$$

де X - частка затверділого стопу;

C_0 - початкова концентрація домішки в стопі;

C_s - концентрація домішки в твердій фазі;

k_0 - рівноважний коефіцієнт сегрегації.

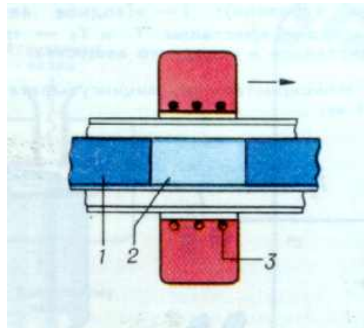
Експериментально було встановлено, що в реальних умовах необхідно користуватися ефективним коефіцієнтом сегрегації k_e :

$$k_e \frac{k_0}{k_0 + (1 - k_0) \exp(-VB/D)},$$

де V - швидкість росту (витягування);
 D - коефіцієнт дифузії домішки в стопі;
 B - товщина граничного шару.

3.6 Метод зонної плавки

Зонна плавка полягає в прогоні зони стопу по довжині заготовки монокристала, одночасно в зоні стопу концентруються домішки і кристал очищується, кінцеву частину якого потім видаляють (рис.3.6). Нагрів здійснюють індукційним, радіаційно-оптичним або іншими методами.



1 – тверда фаза; 2 – стоп; 3 – нагрівач (стрілкою показаний напрям руху нагрівача)
 Рисунок 3.6 – Схема пристрою для зонного топлення

3.7 Приклади розв'язування задач

3.7.1 Розрахувати кількість сурми, необхідну для вирощування кристала германію n -типу з питомим опором $\rho = 0,01$ Ом·м із стопу масою $m = 4$ кг у припущенні рівномірного розподілу легуючої домішки по об'єму кристала. Коефіцієнт розподілу сурми між твердою і рідкою фазами $k_{sb} = N_s/N_l = 3 \cdot 10^{-3}$ (N_s , N_l – концентрація домішок відповідно у

твердій і рідкій фазах). Густина стопу $d_l = 5600 \text{ кг/м}^3$, рухливість електронів $\mu_n = 0,38 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

Розв'язок

Заданому питомому опору відповідає концентрація електронів

$$n = (e\mu_n\rho)^{-1} = \left(1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{-2,0,38}\right)^{-1} = 1,64 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}.$$

При кімнатній температурі всі атоми сурми в германії повністю йонізовані, тому концентрація електронів дорівнює концентрації донорів: $n = N_D = N_{Sb} = N_s$.

Потрібна концентрація сурми у рідкій фазі

$$N_t = N_s / k_{Sb} = 1,64 \cdot 10^{21} / (3 \cdot 10^{-3}) = 5,47 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-1}.$$

Визначивши об'єм вихідного стопу

$$V_l = m_l / d_l = 4 / 5600 = 7,14 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3,$$

обчислимо сумарну кількість атомів сурми в рідкій фазі:

$$Q_l = N_l V_l = 5,47 \cdot 10^{23} \cdot 7,14 \cdot 10^{-4} = 3,9 \cdot 10^{20}.$$

Маса легуючої наважки

$$m_{Sb} = \frac{Q_l}{N_0} A_{Sb} = \frac{3,9 \cdot 10^{20}}{6,02 \cdot 10^{23}} \cdot 121,75 \cdot 10^{-3} = 7,9 \cdot 10^{-5} \text{ кг}.$$

3.7.2 Відомо, що при температурі 800°C розчинність миш'яку x_{As}^I у рідкому галії дорівнює 2,0 ат.%. Розрахувати, яку кількість арсеніду галію m_{GaAs} необхідно розчинити в 10 г галію, щоб отримати насичений розчин-стоп при даній температурі.

Розв'язок

За визначенням атомної частки

$$x_{As}^I = \frac{N_{As}}{N_{Ga} + N_{As}} = \frac{N_{As}}{N'_{Ga} + N''_{Ga} + N_{As}} = \frac{N_{As}}{N'_{Ga} + 2N_{As}},$$

де N'_{Ga} - кількість атомів галію у вихідній наважці; $N''_{Ga} = N_{As}$ - кількість атомів галію, які уведені у стоп при розчиненні GaAs. Тоді

$$N_{As} = \frac{N'_{Ga} x_{As}^l}{1 - 2x_{As}^l} = N_{GaAs} = \frac{m_{GaAs} N_0}{M_{GaAs}},$$

де N_0 - число Авогадро. Необхідна кількість арсеніду галію

$$m_{GaAs} = \frac{m_{Ga} M_{GaAs} x_{As}^l}{A_{Ga} (1 - 2x_{As}^l)} = \frac{10 \cdot 144,63 \cdot 0,02}{69,72(1 - 2 \cdot 0,02)} = 0,432 \text{ г}.$$

3.7.3 Розрахувати масу елементарних компонентів, які використовуються для утворення 1 мм^3 твердого розчину $\text{Al}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As}$. Вважаючи, що в твердих розчинах $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ виконується закон Вегарда. Необхідні відомості про бінарні сполуки, які утворюють твердий розчин, узяти із довідника.

Розв'язок

За законом Вегарда період ґратки

$$a = 0,4a_{AlAs} + 0,6a_{GaAs} = 0,4 \cdot 0,5661 + 0,6 \cdot 0,5653 = 0,5656 \text{ нм}.$$

Густина твердого розчину

$$\rho = \frac{4M_{Al_{0,4}Ga_{0,6}As}}{N_0 a^3} = \frac{4 \cdot 127,55 \cdot 10^{-3}}{6,02 \cdot 10^{23} (0,5656 \cdot 10^{-9})^3} = 4683 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

з урахуванням того, що в склад елементарної комірки кристалічної ґратки зі структурою сфалериту входить в середньому чотири формульні одиниці $\text{Al}_{0,64}\text{Ga}_{0,6}\text{As}$. Маса матеріалу, який синтезують,

$$m = dV = 4683 \cdot 10^{-9} = 4,683 \text{ мг}.$$

Аналогічно визначаємо маси інших компонентів:

$$m_{Ga} = 1,535 \text{ мг}, \quad m_{As} = 2,75 \text{ мг}.$$

3.7.4 Визначити, при яких значеннях x і y період кристалічної ґратки твердих розчинів $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}_y\text{As}_{1-y}$ співпадає з періодом ґратки фосфіду індію. Як властивість ізоперіодичності твердих розчинів використовують в матеріалах електронної техніки?

Розв'язок

Твердий розчин $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}_y\text{As}_{1-y}$ можна уявити таким, який складається із чотирьох бінарних сполук: GaP , InP , GaAs і InAs , при цьому

молярну частку бінарної сполуки у складі твердого розчину визначають добутком мольних індексів при відповідних компонентах. Тоді відповідно до закону Вегарда період ґратки твердого розчину можна представити рівнянням

$$a(x, y) = xu_{aP} + (1 - x)u_{InP} + x(1 - y)a_{GaAs} + (1 - x)(1 - y)a_{InSb}.$$

За умовою задачі $a(x, y) = a_{InP}$. Звідси отримаємо рівняння ізоперіодичного заміщення:

$$xu_{GaP} + (y - xu - 1)a_{InP} + x(1 - y)a_{GaAs} + (1 - x)(1 - y)a_{InSb} = 0$$

Використовуючи довідкові дані, маємо $a_{GaP} = 0,5451 \text{ нм}$; $a_{InP} = 0,5869 \text{ нм}$; $a_{GaAs} = 0,5653 \text{ нм}$; $a_{InAs} = 0,6058 \text{ нм}$.

Після підстановки числових значень і перетворень отримаємо умову ізоперіодичного заміщення стосовно InP:

$$y = \frac{0,0189 - 0,0405x}{0,0189 + 0,013x}.$$

3.8 Задачі для самостійного розв'язування

3.8.1 Чому для виготовлення більшості напівпровідникових приладів потрібні монокристалічні матеріали і не можуть бути використані полікристалічні зразки?

3.8.2 Як проводять кристалізаційне очищення кремнію і германію? Який метод отримав найбільше поширення для вирощування крупних монокристалів цих напівпровідників?

3.8.3 Назвіть основні операції технологічного циклу отримання кремнію напівпровідникової чистоти. Що є вихідною сировиною при отриманні напівпровідникових кристалів кремнію і германію?

3.8.4 Яка принципова відмінність зонного топлення германію і кремнію?

3.8.5 З якою метою проводять вирощування епітаксійних шарів кремнію на монокристалічних підкладках при виготовленні інтегральних схем?

3.8.6 Який взаємозв'язок між коефіцієнтом дифузії і розчинністю домішок в кремнії і германії?

3.8.7 Чому для формування областей p -типу в кремнієвих планарних приладах в якості дифундуючої акцепторної домішки переважно

використовують бор, хоча алюміній і галій мають більш високі коефіцієнти дифузії в кремнії?

3.8.8 Які переваги кремнію зумовили його широке використання при виготовленні транзисторів та інтегральних схем?

3.8.9 Назвіть домішки в германії, легування якими забезпечує малий час життя нерівноважних носіїв заряду в ньому. Наведіть приклади практичного застосування таких матеріалів в напівпровідникових приладах.

3.8.10 У 1 кг Ge міститься 23,4 г миш'яку (As). Вважаючи, що домішка розподілена рівномірно, визначити концентрацію основних носіїв заряду і питомий опір матеріалу при температурі $T=300$ К. Недостатні для розрахунку дані узяти з довідника (густина Ge $d=5,43$ мг/м³, рухливість електронів $\mu_n=0,39$ м²/(В·с)).

3.8.11 У кристалі кремнію масою 1,5 кг рівномірно за об'ємом розподілено 0,3 мг фосфору і 0,4 мг галію. Вважаючи, що атоми домішки повністю іонізовані, обчислити концентрації основних і неосновних носіїв заряду при $T=300$ К, а також питомий опір Si. Залежність рухливості носіїв заряду від міри і характеру легування матеріалу узяти з довідника. ($n=0,14$ м²/В·с, $p=0,05$ м²/В·с).

3.8.12 Максимальна розчинність алюмінію в кремнії досягається при $T=1200$ °С і складає $2 \cdot 10^{25}$ ат/м³. Скільки алюмінію може розчинитися в зливку кремнію масою 1 кг?

3.8.13 Який тип хімічного зв'язку характерний для отримання напівпровідникових сполук типу $A^{III}B^V$? Які закономірності зміни електрофізичних властивостей цих напівпровідників?

3.8.14 Як розміщені атоми галію і миш'яку в структурі GaAs вздовж кристалографічного напрямку $[111]$? Чому площини (111) і $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ складені із різнойменних атомів? У чому проявляється анізотропія властивостей кристалів арсеніду галію вздовж кристалографічних напрямків $[111]$ і $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$?

3.8.15 Як проводять синтез і вирощування крупних монокристалів напівпровідникових сполук, які розпадаються?

3.8.16 Сформулюйте основні умови повної взаємної розчинності компонентів при утворенні твердих розчинів на базі напівпровідникових хімічних сполук.

3.8.17 Визначте найменшу міжатомну відстань у кристалі арсеніду галію, якщо рентгенівська густина кристала при кімнатній температурі дорівнює $5,32 \text{ мг/м}^3$.

3.8.18 Визначте густину твердого розчину $\text{Ga}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{P}$ у припущенні справедливості закону Вегарда. Періоди ґратки вихідних бінарних сполук, які утворюють твердий розчин, прийняти рівними $0,545$ і $0,587$.

3.8.19 Визначте період ґратки твердого розчину $\text{GaAs}_{0,6}\text{P}_{0,4}$, якщо густина матеріалу $d=4,89 \text{ мг/м}^3$.

3.8.20 Визначте період кристалічної ґратки твердого розчину $\text{Ga}_{0,2}\text{In}_{0,8}\text{As}_{0,85}\text{Sb}_{0,15}$ за відомими параметрами ґраток вихідних бінарних сполук: $a_{\text{GaAs}} = 0,5653 \text{ нм}$; $a_{\text{InAs}} = 0,6058 \text{ нм}$; $a_{\text{GaSb}} = 0,6096 \text{ нм}$; $a_{\text{InSb}} = 0,6479 \text{ нм}$ у припущенні справедливості закону Вегарда.

3.8.21 Який тип електропровідності мають напівпровідники типу $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$, леговані атомами елементів IV групи Періодичної таблиці елементів?

3.8.22 Чим принципово відрізняються залежності рухливості носіїв заряду від складу матеріалу для напівпровідникових і металевих твердих розчинів?

3.8.23 Чим можна пояснити, що численні напівпровідникові сполуки групи $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$ проявляють електропровідність лише одного типу, незалежно від характеру легування?

3.8.24 Обчисліть масу легуючої добавки миш'яку, яку необхідно увести в пластину кремнію об'ємом 100 мм^3 , щоб при рівномірному розподілі домішки питомий опір кристала дорівнював би $0,01 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Рухливість електронів прийняти рівною $0,12 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

3.8.25 На скільки відрізняється глибина дифузії фосфору і міді в кремній при $T=1000 \text{ }^\circ\text{C}$ за однаковий проміжок часу?

3.8.26 Поясніть, чому при однаковому вмісті легуючих домішок полікристалічний кремній має набагато більш високий питомий опір, ніж монокристалічний матеріал?

3.8.27 Назвіть основні фактори, що впливають на зовнішній квантовий вихід люмінесценції напівпровідників типу $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$. Чому світловипромінювальні структури створюють тільки на базі епітаксійних шарів?

3.8.28 Визначте потік випромінювання світлодіодної структури із фосфіду галію з люмінесценцією в зеленій зоні спектра ($\lambda=0,565$ мкм), якщо відомо, що при струмі $I=50$ мА зовнішній квантовий вихід електролюмінесценції складає 0,2%.

Примітка. Зовнішнім квантовим виходом електролюмінесценції називають відношення кількості випромінених фотонів до кількості носіїв заряду, які проминули в електричному ланцюгу за цей самий проміжок часу.

3.8.29 Визначте ККД напівпровідникової структури із фосфіду галію, яка випромінює на довжині хвилі 700 нм, якщо при напрузі $U=2,2$ В квантовий вихід електролюмінесценції дорівнює 5%.

3.8.30 Чим відрізняються властивості політипів карбіду кремнію? Як ці відмінності можна використати на практиці?

3.8.31 Зобразити елементарну комірку карбіду кремнію політипу 3С. Визначити густину цього політипу, якщо період ґратки $a=0,357$ нм. Наведіть приклади інших напівпровідникових сполук, які мають аналогічну кристалічну структуру.

3.8.32 Чому чисті кристали карбіду кремнію гексагональної модифікації не мають кольору? Який колір має бути у чистих кристалів кубічної β -модифікації, якщо ширина їх забороненої зони $\Delta W=2,4$ еВ?

3.8.33 Сформулюйте основні закономірності, яким підкоряються домішки заміщення в напівпровідниках типу $A^{II}B^{VI}$. Наведіть приклади типових донорів і акцепторів. Вкажіть, яким способом можна підвищити розчинність цих домішок в кристалічній ґратці халькогенідних сполук.

3.8.34 Що розуміють під активатором і співактиватором люмінесценції? Наведіть приклади найбільш розповсюджених активаторів люмінесценції в електролюмінофорах на базі сульфіду цинку.

3.8.35 Обчисліть питомий опір чистого кристала сульфіду кадмію. В якому 10^{-6} % металодних вузлів є вакантними (не зайнятими атомами сірки). Густина кристалів CdS дорівнює $4,82$ г/см³, а рухливість електронів $\mu_n=0,035$ м²/(В·с).

3.8.36 Назвіть основну особливість залежності ширини забороненої зони твердих розчинів $Pb_{1-x}Sn_xTe$ від їх складу. Як цю особливість використовують на практиці при створенні фотоелектричних приладів?

3.8.37 На пластину фосфіду індію товщиною 0,5 мм з питомим опором $\rho=1,25 \cdot 10^{-3}$ Ом·м нанесено металеві електроди з обох її боків. При якій напрузі на електродах спостерігатиметься ефект Ганна, якщо

порогова напруга поля для фосфіду індію дорівнює 0,6 мВ/м? Визначте густину струму через пластину в момент появи коливань НВЧ.

3.8.38 Які напівпровідникові матеріали використовують в якості люмінофорів? Які люмінофори застосовують в електронній техніці?

3.8.39 Чи можна підбором складу твердого розчину на базі двох напівпровідникових хімічних сполук отримати матеріал з нульовою шириною забороненої зони?

3.8.40 Визначте склад твердого розчину $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$, осадженого у вигляді епітаксійного шару на підкладинці InP , якщо відомо, що при температурі 650 °C періоди ґраток шару і підкладинки співпадають. Температурні коефіцієнти лінійного розширення GaAs , InAs та InP відповідно дорівнюють $6,4 \cdot 10^{-6}$, $5,3 \cdot 10^{-6}$ і $4,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Уточнені періоди ґраток цих сполук при $T=300 \text{ K}$ такі: $a_{\text{GaAs}}=0,56532$, $a_{\text{InAs}}=0,60586$, $a_{\text{InP}}=0,58688 \text{ нм}$.

3.8.41 Запропонуйте спосіб отримання із зразка телуриду кадмію GdTe з концентрацією дірок 10^{23} м^{-3} , не використовуючи при цьому легування третім компонентом.

3.8.42 Зобразіть якісно розподіл густини електронних станів за енергіями для плівок аморфного кремнію, отриманого вакуумним напыленням, і гідрогенізованого аморфного кремнію ($\alpha\text{-Si:H}$), отриманого розкладенням силану в плазмі тліючого розряду. Поясніть причини, які зумовили принципові відмінності в характері енергетичних спектрів цих матеріалів.

3.8.43 У чому відмінність у впливі легуючих домішок на електрофізичні властивості аморфного ($\alpha\text{-Si}$) і гідрогенізованого аморфного ($\alpha\text{-Si:H}$) кремнію? Назвіть основні області застосування останнього.

3.8.44 Як впливає наявність водню в аморфному кремнії на його оптичні властивості?

3.8.45 Охарактеризуйте деформований стан тонкого епітаксійного шару твердого розчину $\text{Ga}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{P}$, осадженого на монокристалічній підкладинці GaAs . Необхідні для аналізу дані наведено у Додатку А.

3.8.46 Запропонуйте ідею, реалізація якої дозволила б отримати на базі напівпровідників типу $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ матеріал з шириною забороненої зони менше 0,17 еВ.

3.8.47 Визначте склад твердого розчину $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, який використовують в якості активної зони напівпровідникового інжекційного гетеролазера, якщо відомо, що випромінювання виникає з довжиною хвилі $\lambda=850 \text{ нм}$.

3.8.48 Для поліпшення відношення сигнал-шум напівпровідникового фотоприймача доцільно використовувати напівпровідниковий фільтр, який відіграє роль оптичного вікна. Відомі показники поглинання матеріалу фільтра за кімнатної температури: $\alpha=0,2 \text{ см}^{-1}$ для випромінювання з $\lambda=900 \text{ нм}$ і $\alpha=10^3 \text{ см}^{-1}$ для випромінювання з $\lambda=700 \text{ нм}$. Якою має бути товщина фільтра для придушення у 10^4 рази фонового шуму на довжині хвилі 700 нм ? На скільки зменшиться потужність випромінювання на довжині хвилі 900 нм при проходженні через фільтр такої товщини? Відбиттям від поверхонь знехтувати.

3.8.49 Вкажіть, які із трикомпонентних твердих розчинів принципово можна використовувати для створення детекторів випромінювання, яке збуджується в лазері із арсеніду галію: $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$, $\text{GaP}_x\text{As}_{1-x}$, $\text{GaAs}_x\text{Sb}_{1-x}$, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

- 1 **Курило, І. В.** Основи технології напівпровідникових матеріалів: навчальний посібник / І. В. Курило, С. К. Губа. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012. – 240 с.
- 2 **Панченко, Т. В.** Функціональні та інтелектуальні матеріали [Текст] / Т. В. Панченко, М. П. Трубіцин, Т. М. Бочкова, Т. В. Крузіна. – Дніпропетровськ: ДНУ, 2014. – 85 с.
- 3 **Прокопів, В. В.** Матеріали електронної техніки [Текст] / В. В. Прокопів. – Івано-Франківськ : Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, 2009. – 288 с.
- 4 **Таиров, Ю. М.** Технология полупроводниковых и диэлектрических материалов [Текст] / Ю. М. Таиров, В. Ф. Цветков. – "Лань" С-Петербург, 2002. – 418 с.
- 5 **Пасынков, В. В.** Материалы электронной техники [Текст] / В. В. Пасынков, В. С. Сорокин. – СПб.: Издательство «Лань», 2001. – 368 с.
- 6 **Соколов, И. А.** Расчеты полупроводниковой технологии [Текст] / И. А. Соколов. – М.: Металлургия, 1994. – 176 с.
- 7 **Пичугин, И. Г.** Технология полупроводниковых приборов [Текст] / И. Г. Пичугин, Ю. М. Таиров. – М.: Высшая школа, 1984. – 288 с.
- 8 **Крапухин, В. В.** Физико-химические основы технологии полупроводниковых материалов [Текст] / В. В. Крапухин, И. А. Соколов, Г. Д. Кузнецов. – М.: Металлургия, 1982. – 352 с.
- 9 **Нашельский, А. Я.** Технология полупроводниковых материалов [Текст] / А. Я. Нашельский. – М.: Металлургия, 1987. – 336 с.
- 10 **Антипов, Б. Л.** Материалы электронной техники: Задачи и вопросы [Текст] / Б. Л. Антипов, В. С. Сорокин, В. А. Терехов. – СПб.: Лань, 2001. – 208 с.
- 11 **Горелик С. С.** Материаловедение полупроводников и диэлектриков [Текст] / С. С. Горелик, М. Я. Дашевский. – М.: МИСиС, 2003. – 483 с.
- 12 **Бурик, І. П.** Технологічні основи виготовлення елементів напівпровідникових інтегральних мікросхем [Текст] / І. П. Бурик. – Суми : Сумський державний університет, 2015. – 65 с.

Додаток А
Фізичні властивості напівпровідникових матеріалів

Таблиця А.1 – Деякі фізичні властивості напівпровідникових матеріалів

Матеріал	$M, \frac{\text{г}}{\text{моль}}$	$\rho, \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	$\lambda, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ ¹	$c = a + bT + \frac{f}{T^2}, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$		
				a	b	f
Si	28	2,33	109	860	0,092	-0,15
Ge	72,6	5,33	59	340	0,051	-0,03
AlP	57,16	2,4	90	841	0,09	-0,15
AlAs	101,9	3,6	8	370	0,123	—
AlSb	148,74	4,22	56	290	0,113	—
GaP	100,7	4,13	110	423	0,103	—
GaAs	144,64	5,32	54	290	0,087	—
GaSb	191,5	5,62	35	233	0,087	—
InP	145,8	4,79	67	292	0,114	—
InAs	189,74	5,67	26	232	0,088	—
InSb	236,6	5,78	18	209	0,035	—

¹ Значення λ наведені за температури $T = 300 \text{ К}$

Додаток Б
Номограми для розрахунку процесу нагрівання

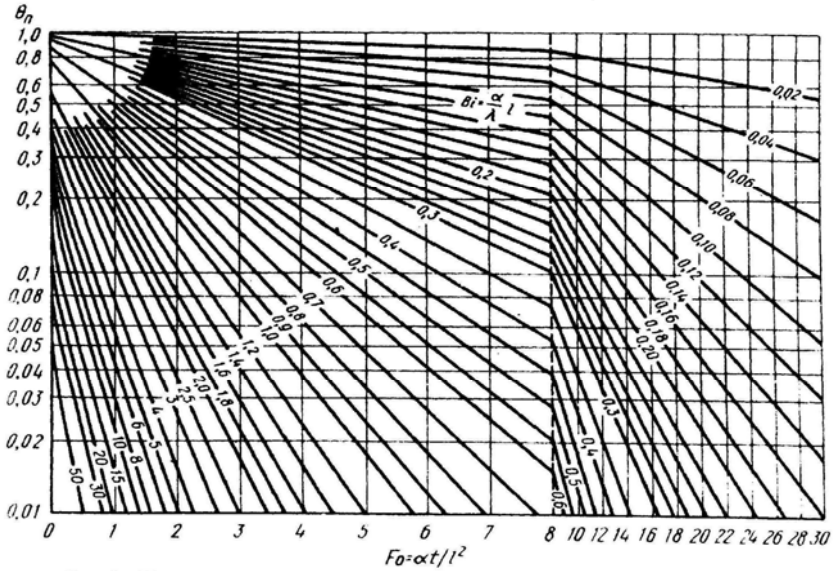


Рисунок Б.1 – Номограма для розрахунку процесу нагрівання поверхні плоского тіла

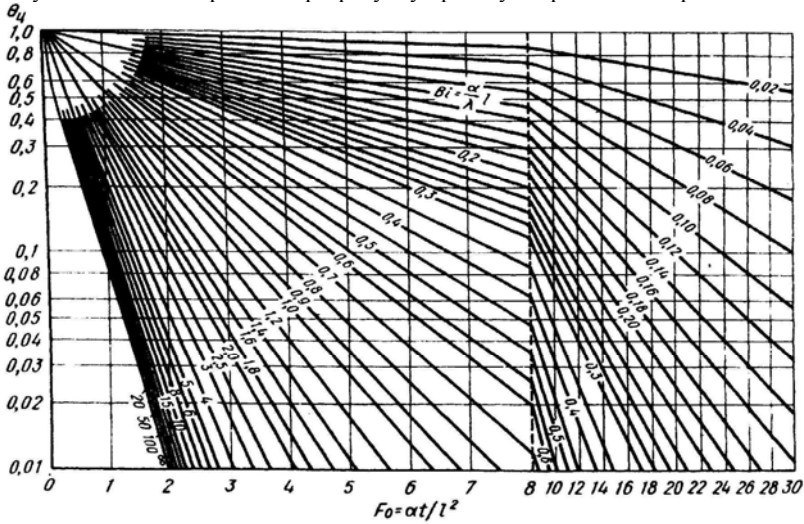


Рисунок Б.2 – Номограма для розрахунку процесу нагрівання середини плоского тіла

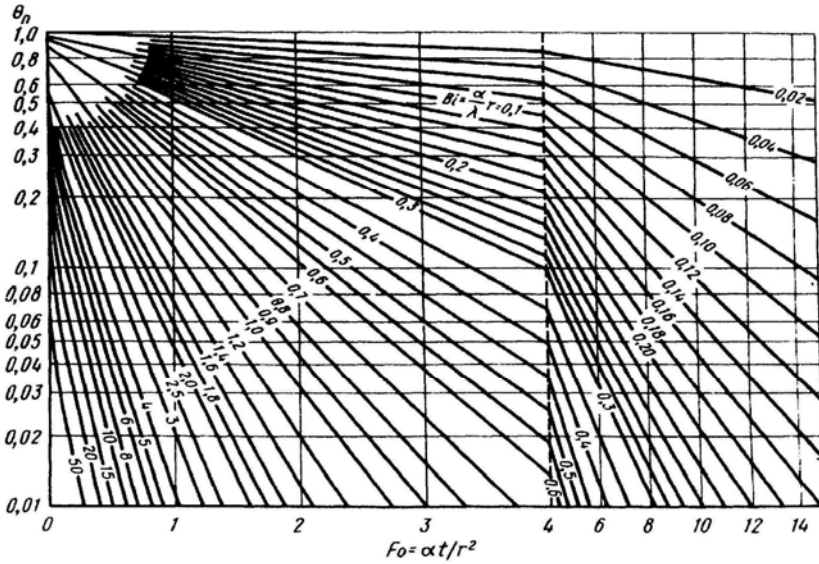


Рисунок Б.3 – Номограма для розрахунку процесу нагрівання поверхні циліндричного тіла

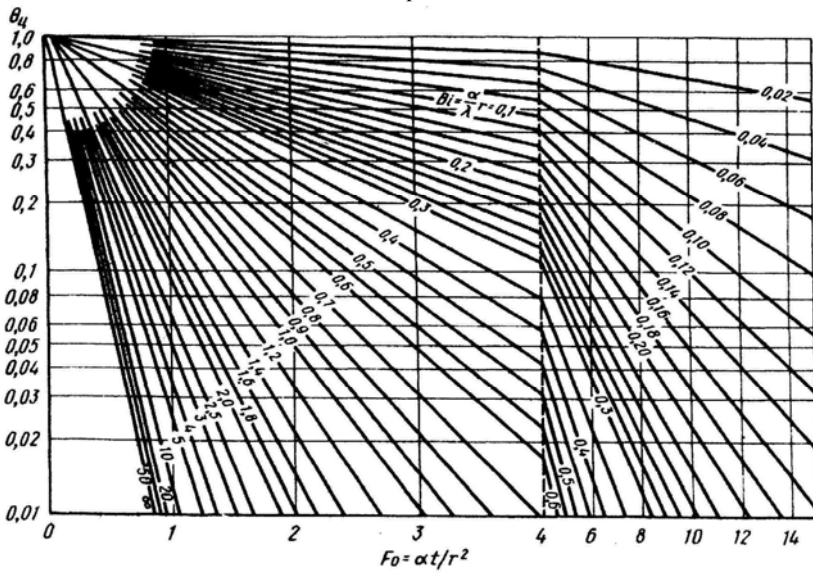


Рисунок Б.4 – Номограма для розрахунку процесу нагрівання середини циліндричного тіла

Додаток В

Газодинамічні характеристики газів

Таблиця В.1 – Дані для розрахунку інтеграла зіткнень неполярних газів

газ	σ , нм	$\frac{\varepsilon}{k_B}$, К	M , $\frac{\text{г}}{\text{моль}}$	газ	σ , нм	$\frac{\varepsilon}{k_B}$, К	M , $\frac{\text{г}}{\text{моль}}$
Ar	0,3542	93,3	39,9	C ₃ H ₈	0,5118	237,1	44,0
He	0,2551	10,2	4,0	Cl ₂	0,4217	316,0	70,9
Kr	0,3655	178,9	83,8	F ₂	0,3357	112,6	38,0
Ne	0,2820	32,8	20,2	Повітря	0,3700	71,4	29,0
Xe	0,4047	231,0	131,3	H ₂	0,2827	59,7	2,0
AsH ₃	0,4145	259,8	77,9	NO	0,3492	116,7	30,0
BCl ₃	0,5127	337,7	117,3	N ₂	0,3798	71,4	28,0
BF ₃	0,4198	186,3	67,8	N ₂ O	0,3828	232,4	44,0
Br ₂	0,4296	507,9	159,8	O ₂	0,3467	106,7	32,0
CCl ₄	0,5947	322,7	154,8	PH ₃	0,3981	257,5	34,0
CH ₄	0,3758	148,6	16,0	SiF ₄	0,4880	171,9	104,0
CO	0,3690	91,7	28,0	SiH ₄	0,4084	207,6	32,0
CO ₂	0,3941	195,2	44,0	SnBr ₄	0,6388	563,7	438,3
CS ₂	0,4483	467,0	76,0	I ₂	0,5160	474,2	253,8

Таблиця В.2 – Дані для розрахунку інтеграла зіткнень полярних газів

Газ	σ , іі	$\frac{\varepsilon}{k_B}$, К	M , $\frac{\text{г}}{\text{моль}}$	δ_1	$t_{\text{кип}}$, °C
HCl	0,336	328	36,5	0,34	138,1
HBr	0,341	417	80,9	0,14	206,1
HI	0,413	313	127,9	0,03	237,6
H ₂ O	0,252	775	18,0	1,00	373,2
H ₂ S	0,349	343	34,0	0,21	212,8
NH ₃	0,315	358	17,0	0,70	239,7
SO ₂	0,404	347	64,0	0,42	263,0

Таблиця В.3 – Фізичні властивості деяких газів при $T_0 = 273 \text{ K}$,
 $p_0 = 101325 \text{ Па}$

газ	$\rho_0, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\eta_0, 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$	$C, \text{ K}$	$D_0, \frac{\text{см}}{\text{с}}$	$\lambda_0, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{K}}$	$c_{p0}, \frac{\text{Дж}}{\text{г} \cdot \text{K}}$
H ₂	0,090	8,42	73	0,65	0,163	14,266
He	0,178	18,8	78	0,57	0,144	5,274
CH ₄	0,717	10,3	162	0,19	0,030	2,223
H ₂ O	0,803	85,0	—	0,20	0,025	2,100
Ne	0,900	30,0	—	0,27	0,043	—
N ₂	1,250	17,0	144	0,18	0,022	1,047
CO	1,250	16,6	100	—	0,013	1,047
O ₂	1,430	20,3	131	0,18	0,024	0,913
Ar	1,780	20,9	142	0,16	0,0173	0,532
CO ₂	1,976	13,7	254	0,14	0,0137	0,837
C ₃ H ₈	2,020	79,5	278	—	0,0148	1,863
Cl ₂	3,217	12,9	351	—	0,007	0,482
SO ₂	2,927	11,7	396	—	0,008	0,632
NH ₃	0,759	10,0	—	0,20	0,022	2,219