

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до практичних робіт з дисципліни

**«ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА
НАПІВПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ»**

для студентів спеціальностей
G5 «Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіо-
техніка», G6 «Інформаційно-вимірювальні технології»
денної й заочної форм навчання

Методичні вказівки до практичних робіт з дисципліни «Технологія виробництва напівпровідникових матеріалів» для студентів спеціальностей G5 «Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка», G6 «Інформаційно-вимірювальні технології» денної й заочної форм навчання / Укл.: Г.В. Сніжної, А.В. Коротун. – НУ «Запорізька політехніка», 2026. – 21 с.

Укладачі: Геннадій СНИЖНОЙ, проф., д-р техн. наук
Андрій КОРОТУН, доц., канд. фіз.-матем. наук,

Рецензент: Валентин ПОГОСОВ, проф., д-р фіз.-матем. наук

Відповідальний за випуск: Андрій КОРОТУН, доц., канд. фіз.-матем. наук,
зав. кафедри ІБІН

Затверджено
на засіданні кафедри
«Інформаційна безпека
та наноелектроніка»

Протокол № 4
від «04» «лютого» 2026 р.

Рекомендовано до видання
НМК ФІБЕК
Протокол № 6
від «04» «березня» 2026 р.

ЗМІСТ

1	Нагрівання твердих тіл	с.	4
1.1	Основні формули теплових процесів		4
1.2	Завдання		6
2	Основи газодинаміки		7
2.1	Основні формули і визначення газодинаміки		7
2.2	Завдання		9
3	Кристалізаційні методи очищення й отримання матеріалів ...		11
3.1	Вирощування з розчину в стопі		11
3.2	Метод Вернейля		12
3.3	Метод Бріджмена		13
3.4	Метод Чохральського		15
3.5	Метод зонної плавки		17
3.8	Завдання		18
	Перелік джерел посилання		21

1 НАГРІВАННЯ ТВЕРДИХ ТІЛ

1.1 Основні формули теплових процесів

Теплові процеси належать до базових технологічних операцій у виробництві матеріалів електронної техніки. Рухливою силою теплоперенесення в будь-якій системі є температурний градієнт між більш та менш нагрітими областями чи тілами. Залежно від фізичного механізму перенесення енергії, виділяють три фундаментальні способи теплообміну: теплопровідність (кондукцію), конвекцію та теплове випромінювання [1].

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, $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$.

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

Температурне поле в технологічній системі за умов кондуктивного теплообміну визначається розв'язком диференціального рівняння теплопровідності з урахуванням відповідних початкових та граничних умов. У рухомих середовищах (рідинах і газах) перенесення теплоти

нерозривно пов'язане з макроскопічним перемішуванням частинок речовини: зростання інтенсивності турбулізації чи швидкості потоку пропорційно підвищує ефективність теплообміну

Внаслідок складності точного розрахунку конвективну тепло-віддачу 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

$$dQ = \alpha (T_{\text{ст}} - T_{\text{рід}}) dS dt . \quad (1.3)$$

Коефіцієнт пропорційності α , який визначається дослідним шляхом, називають коефіцієнтом тепловіддачі. Розподіл температур у системах із рідиною, що рухається, визначається рівнянням:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial T}{\partial x} u_x + \frac{\partial T}{\partial y} u_y + \frac{\partial T}{\partial z} u_z = a \Delta T . \quad (1.4)$$

При $u_x = u_y = u_z = 0$ (тверді тіла) рівняння (1.4) перетворюється в диференціальне рівняння теплопровідності. У теплофізичних розрахунках процеси нагрівання (або охолодження) класифікують залежно від геометричних та теплофізичних характеристик об'єктів, виділяючи термічно „масивні“ та „тонкі“ тіла. У першому випадку в процесі нагрівання температура зовнішньої теплосприймаючої поверхні тіла $T_{\text{п}}$ випереджає температуру в центрі тіла $T_{\text{ц}}$, у другому – відносна різниця температур $\frac{T_{\text{п}} - T_{\text{ц}}}{T_{\text{п}}}$ менше 0,05, тому їх можна вважати однаковими, що значно спрощує розрахунки. Для визначення типу процесу нагрівання в кожному конкретному випадку використовують безрозмірний комплекс (критерій Біо):

$$Bi = \frac{\alpha l}{\lambda} , \quad (1.5)$$

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

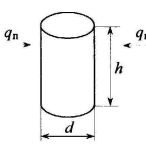
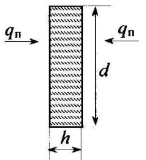
l – характерний розмір, який зазвичай обирають у напрямку теплового потоку, м.

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.

1.2 Завдання

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

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 газодинаміки

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 [1-2].

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, $\frac{\Gamma}{\text{моль}}$;

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

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

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: $\frac{\varepsilon}{k_B} = 0,77 \cdot T_{кр}$;

$\frac{\varepsilon}{k_B} = 1,15 \cdot T_{кип}$; $\frac{\varepsilon}{k_B} = 1,92 \cdot T_{пл}$, де $T_{кр}$, $T_{кип}$, $T_{пл}$ – 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

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

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:

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

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

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.

2.2 Завдання

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 .

Таблиця 2.1 – Вихідні данні до завдання 1

№	газ А	x	газ В	p , Па	T , °С
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
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. Розрахуйте газодинаміку для ділянки проточного реактора вертикального типу при усталеному в ньому русі газу. Діаметр реак-

тора d , висота l . Температура зверху $T_{\text{в}}$, знизу $T_{\text{н}}$. Витрати газу Q_0 . Тиск у реакторі 1 атм.

Таблиця 2.2 – Вихідні данні до завдання 2

№	Газ	$d, \text{мм}$	$l, \text{м}$	$Q_0, \frac{\text{дм}^3}{\text{с}}$	$T_{\text{в}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{н}}, ^\circ\text{C}$
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

3 КРИСТАЛІЗАЦІЙНІ МЕТОДИ ОЧИЩЕННЯ Й ОТРИМАННЯ МАТЕРІАЛІВ

3.1 Вирощування з розчину в стопі

Монокристали вирощують або з використанням монокристалічних затравок, або спонтанно. Вирощування кристалів на затравках однойменного матеріалу називають гомоепітаксією, на інших відповідних за кристалографічними параметрами поверхнях – гетероепітаксією. Розглянемо основні методи вирощування кристалів [1-3].

Як легкоплавкі флюси зазвичай використовують PbO (886 °C), PbF_2 (824 °C), V_2O_3 (450 °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).

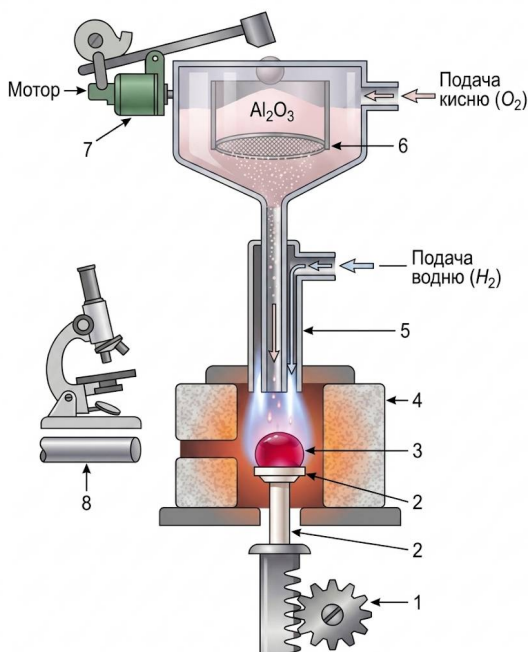
До флюсів висувають наступні вимоги: вони не мають бути леткими і токсичними, по можливості мінімально входити до складу монокристалів (якщо не є їх компонентами), також має бути помірна в'язкість стопів.

Наприклад, для вирощування кристалів залізо-ітрієвого гранату (ЗІГ) беруть шихту, яка містить в мольних процентах: $10\text{Y}_2\text{O}_3$, $20,4\text{Fe}_2\text{O}_3$, $36,8\text{PbO}$, $27,1\text{PbF}_2$, $5,5\text{V}_2\text{O}_3$. 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

3.2 Метод Вернейля

Метод Вернейля є класичним безтигельним методом спрямованої кристалізації з розплаву, який застосовують для синтезу високочистих монокристалів тугоплавких оксидів (насамперед корунду Al_2O_3 та його різновидів). Суть методу полягає в дозованому подаванні дрібнодисперсного вихідного порошку через киснево-водневе полум'я, де він плавиться і кристалізується на рухомій керамічній підставці (затравці). Оскільки процес відбувається без контакту розплаву зі стінками тигля, метод дозволяє мінімізувати дифузію сторонніх домішок у структуру ростучого кристала. [1, 4]

Технологічна суть та схема процесу наведена на рис. 2.1.



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

Вихідний матеріал у вигляді тонкого порошку міститься у бункері та через сито за допомогою періодичного струшування подається в кисневий потік. Порошок потрапляє в зону горіння киснево-водневого пальника (температура сягає понад 2000 °С). Частинки порошку миттєво плавляться, перетворюючись на мікрокраплі. Краплі падають на верхній торець затравки, утворюючи тонку плівку розплаву. По мірі нарощування кристала (який називають булею), підставку повільно опускають донизу за допомогою механічного приводу, щоб фронт кристалізації постійно перебував в одній температурній зоні.

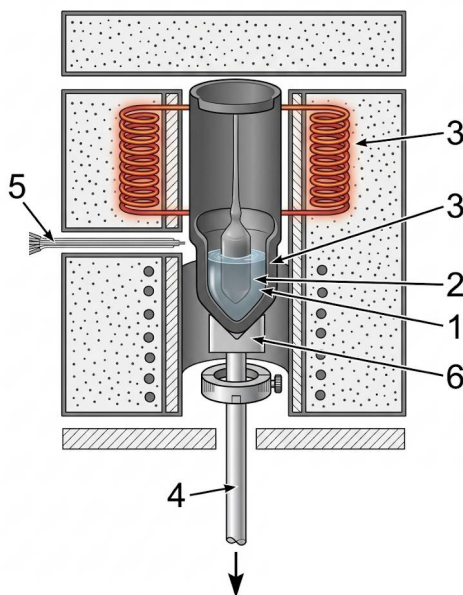
3.3 Метод Бріджмена

Метод Бріджмена (або метод Бріджмена-Стокбаргера) – це один із класичних методів спрямованої кристалізації, який масово використовується в промисловості та лабораторіях для вирощування високоякісних монокристалів напівпровідників, діелектриків, оптичних матеріалів та металів. На відміну від методу Чохральського, де кристал витягують із вільної поверхні рідини, у методі Бріджмена процес кристалізації відбувається всередині спеціального контейнера (ампули або тигля) під час його переміщення через температурне поле з певним градієнтом. Основна ідея полягає у створенні умов, за яких один кінець ампули з розплавленою речовиною стає холоднішим за інший, що провокує зародження і контрольований ріст лише одного кристала (монокристала) [1, 5].

Вихідну речовину (полікристал або шихту) поміщають у тугоплавку ампулу (із кварцу, графіту, платини тощо). Нижній кінець ампули зазвичай роблять конічним або капілярним – це виконує роль геометричного відбору, щоб із багатьох випадкових зародків далі вздовж ампули зміг рости лише один, найбільш правильно зорієнтований. Плавлення: Ампулу поміщають у двозонну печку. Верхня зона підтримується за температури $T_1 > T_{пл}$ (де речовина повністю рідка), а нижня зона – за температури $T_2 < T_{пл}$ (де речовина твердне). Між ними створюється чітка зона температурного градієнта. Ампулу починають дуже повільно (від кількох міліметрів до кількох сантиметрів на добу) опускати вниз із гарячої зони в холодну (або навпаки – переміщують саму піч вгору). Коли конічний кінчик перетинає лінію температури

плавлення, там починається кристалізація, яка плавно поширюється вгору по всьому об'єму речовини.

Залежно від просторової орієнтації обладнання та особливостей конструкції виділяють вертикальний метод Бріджмена. Амбула рухається суворо вертикально. Найчастіше використовується для кристалів, чутливих до гравітаційних дефектів, та оптичних матеріалів (фторидів, лазерних кристалів). У горизонтальному методі Бріджмена човник із речовиною переміщується горизонтально всередині трубчастій печі. Цей варіант популярний для вирощування напівпровідників типу $A^{III}B^V$ (наприклад, арсеніду галію GaAs), оскільки дозволяє легко контролювати тиск пари летких компонентів (миш'яку, фосфору) у герметичному об'ємі.

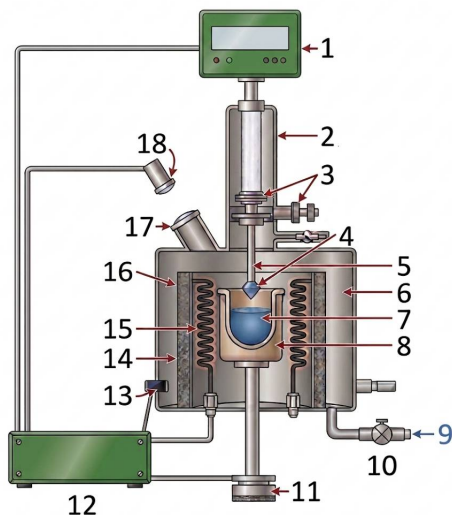


1 – тигель із стопом; 2 – кристал; 3 – піч; 4 – тепловідведення;
5 – термопара; 6 – тепловий екран

Рисунок 3.2 – Схема установки для вирощування монокристалів за методом Стокаберга-Бріджмена

3.4 Метод Чохральського

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 [1, 2, 4]. Стосовно кремнію цей процес можна охарактеризувати як однокомпонентну ростову систему рідина – тверде тіло. Установка наведена на рис. 3.1.



- 1 – механізм обертання, 2 – кожух, 3 – затискач, 4 – затравка, 5 стрижень,
 6 – теплоізоляція, 7 – кристал, 8 – тигель, 9 – газовий отвір, 10 – вакуумний насос,
 11 – пристрій обертання і підйому тигля, 12 – джерело живлення,
 13 – датчик температури, 14 – контейнер для фіксації тигля, 15 – нагрівач,
 16 – охолоджена зона, 17 – оглядове вікно

Рисунок 3.4 – Установка для вирощування монокристалів за методом Чохральського

Технологія процесу наступна. Монокристал затравки високої якості опускається у стоп кремнію і одночасно обертається. Полікремній 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 ступу і зведення до мінімуму неоднорідності розподілу температури. Фрагменти росту наведено на рис.3.5.

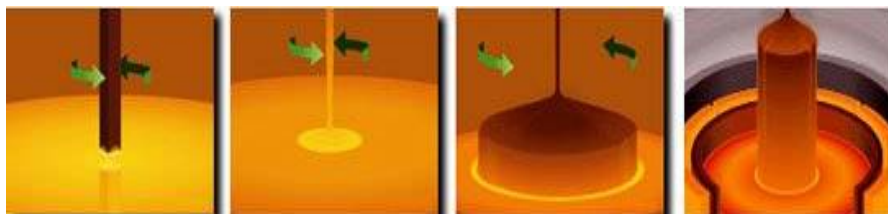


Рисунок 3.5 – Ріст монокристалу

Метод дозволяє отримувати монокристали практично без дислокацій (внутрішніх дефектів решітки). У розплав можна заздалегідь додати точну кількість необхідних елементів (наприклад, бор або фосфор для кремнію), щоб надати напівпровіднику потрібних електричних властивостей. Розплавлений кремній є хімічно агресивним і може розчиняти стінки кварцового тигля, через що в кристал потрапляє кисень. Найменші коливання температури або мікропоштовхи механізму витягування можуть зіпсувати внутрішню структуру всього злитка. Процес зазвичай проводять в атмосфері надчистого інертного газу (аргону), щоб уникнути окислення матеріалу.

Під час кристалізації більшість небажаних домішок прагнуть залишитися в рідкій фазі (ефект сегрегації), тому вирощений кристал виходить значно чистішим за вихідний розплав. Домішка має певну розчинність у кристалі. Для розбавлених розчинів рівноважний коефіцієнт сегрегації k_0 можна записати як:

$$k_0 = C_s / C_l, \quad (3.1)$$

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

Розподіл домішки в зростаючому кристалі може бути описаний співвідношенням:

$$C_s = k_0 C_0 (1-X)^{k_0 - 1}, \quad (3.2)$$

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 :

$$k_e = \frac{k_0}{k_0 + (1 - k_0) \exp(-VB/D)}, \quad (3.3)$$

де V – швидкість росту (витягування);

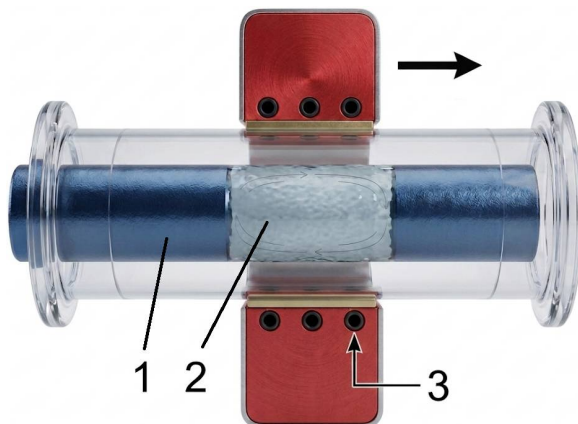
D – коефіцієнт дифузії домішки в стопі;

B – товщина граничного шару.

3.5 Метод зонної плавки

Метод зонної плавки (або зонне очищення) – це високоефективний фізико-хімічний метод рафінування (очищення) металів, напівпровідників та інших кристалічних речовин від небажаних домішок. Його винайшов американський інженер Вільям Пфанн у 1951 році. Якщо метод Чохральського використовується для вирощування великих монокристалів із розплаву, то зонна плавка частіше застосовується саме для екстремального очищення матеріалів (наприклад, кремнію, германію чи металів) до стану «надчистих», коли вміст домішок становить менше ніж одну мільярдну частину (10^{-9} %). В основі методу лежить явище сегрегації – різної розчинності домішок у рідкій (розплавленій) та твердій фазах речовини при температурі кристалізації.

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, 6].



1 – тверда фаза; 2 – рідка фаза;
3 – нагрівач (стрілкою показаний напрям руху нагрівача)

Рисунок 3.6 – Схема пристрою для методу зонної плавки

3.8 Завдання

1. 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)).

2. 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. 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?

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

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

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

7. Яка принципова відмінність зонного топлення германію і кремнію?

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

9. Чому для формування областей p -типу в кремнієвих планарних приладах в якості дифундууючої акцепторної домішки переважно використовують бор, хоча алюміній і галій мають більш високі коефіцієнти дифузії в кремнії?

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

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

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

13. 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 $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$?

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

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

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

17. Визначте густина 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 $0,587$.

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

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

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

21. 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?

22. 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 $0,12 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

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

Перелік джерел посилання

1. Курило І. В., Губа С. К. Основи технології напівпровідникових матеріалів : навчальний посібник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012. 240 с.
2. Спосіб отримання знебарвлених кристалів $PbMoO_4$: пат. 22634 Україна : С30В 15/00 С30В 29/32 (2006.01) : № а 2019 05585; заявл. 23.05.2019; опубл. 10.12.2019. Бюл. № 23. 6 с.
3. Mukhachev A., Yelatontsev D., Kharytonova O., Snizhnoi H. Functional materials based on high-purity zirconium compounds for applications in alternative energy // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2024. Vol. 1348. 012024.
4. Панченко Т. В., Трубіцин М. П., Бочкова Т. М., Крузіна Т. В. Функціональні та інтелектуальні матеріали. Дніпропетровськ : ДНУ, 2014. 85 с.
5. Прокопів, В. В. Матеріали електронної техніки. Івано-Франківськ : Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, 2009. 288 с.
6. Бурик, І. П. Технологічні основи виготовлення елементів напівпровідникових інтегральних мікросхем. – Суми : Сумський державний університет, 2015. 65 с.