

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до лабораторних робіт з дисципліни

**“ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА
НАПІВПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ”**

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

2020

Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни “Технологія виробництва напівпровідникових матеріалів” для студентів спеціальності 153 – “Мікро- та наносистемна техніка” денної і заочної форм навчання / Укл.: Г.В. Сніжної – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2020. – 63 с.

Укладач: Г.В. Сніжної, проф., д-р техн. 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

Вступ	4
1 Лабораторна робота №1 „Легування кристалів при вирощуванні методом Чохральського”	5
1.1 Метод Чохральського	5
1.2 Ефективний коефіцієнт розподілу	7
1.3 Розподіл домішки вздовж зливка при витягуванні кристалів із розплаву ..	12
1.4 Порядок виконання роботи	14
1.5 Зміст звіту	16
1.6 Контрольні запитання і завдання	16
2 Лабораторна робота №2 „Легування кристалів при вирощуванні методом Чохральського при наявності легкої домішки”	18
2.1. Розподіл домішки уздовж зливка з урахуванням її випаровування із розплаву	18
2.2 Марки напівпровідникових матеріалів	21
2.3 Порядок виконання роботи	22
2.4 Зміст звіту	24
2.5 Контрольні запитання й завдання	24
3 Лабораторна робота №3 „Визначення концентрації легуючих і залишкових домішок і розрахунок їх розподілу за довжиною кристала”	26
3.1 Розрахунок концентрації легуючої домішки	26
3.2 Розрахунок маси легуючої домішки	29
3.3 Визначення виходу придатного матеріалу при вирощування кристалів	31
3.4 Порядок виконання роботи	33
3.5 Вміст звіту	34
3.6 Контрольні питання і завдання	34
4 Лабораторна робота №4 „Метод подвійного капілярного тигля”	36
4.1 Загальні відомості	36
4.2 Вирощування кристалів методом подвійного капілярного тигля	37
4.3 Розподіл домішки вздовж зливку в методі подвійного капілярного тигля ...	38
4.4 Порядок виконання лабораторної роботи	42
4.5 Зміст звіту	43
4.6 Контрольні запитання і завдання	44
5 Лабораторна робота №5 „Зонна плавка”	45
5.1 Метод зонної плавки	45
5.2 Розподіл домішки вздовж зливка при зонній плавці	48
5.3 Зонне очищення	49
5.4 Прохід легуючої зони через чистий вихідний зразок	51
5.5 Метод цільового завантаження	51
5.6 Порядок виконання роботи	53
5.7 Зміст звіту	55
5.8. Контрольні запитання і завдання	55
Рекомендована література	57
Додаток А Нормативно-довідкові параметри матеріалів і процесів	58

ВСТУП

Завданням викладання дисципліни "Технологія виробництва напівпровідникових матеріалів" є освоєння студентами комплексу теоретичних і практичних знань, які дозволяють вільно орієнтуватися в сучасному виробництві напівпровідникових матеріалів. Вивчаючи дисципліну студенти мають засвоїти фізико-хімічні основи технологічних процесів виробництва напівпровідникових матеріалів; знати основні технологічні методи і прийоми; вміти встановлювати взаємозв'язок між параметрами технологічного процесу і властивостями напівпровідникових матеріалів. Формуванню таких навичок сприяють лабораторні заняття. Наведено основні положення технології вирощування монокристалів, знання яких необхідно для вирішення практичних і лабораторних завдань, представлені довідкові дані для проведення розрахунків. Основою практикуму є лабораторні роботи, в рамках яких моделюються умови вирощування напівпровідникових монокристалів. За основу обрані два методи промислового отримання монокристалів: метод Чохральського і метод зонного плавлення. Студентам пропонується провести моделювання умов росту монокристалів германію і кремнію, проаналізувати вплив технологічних умов вирощування на характер розподілу домішки в монокристалі, запропонувати умови отримання однорідно легованих монокристалів. Для розрахунку розподілу домішки необхідно вибрати матеріал вирощуваного кристала (германій або кремній) і задати вихідні дані: рівноважний коефіцієнт розподілу домішки у розтопі k_0 ; швидкість кристалізації f [мм / хв]; рівноважна концентрація домішки у розтопі C_p [см⁻³]; концентрація домішки в підживлювальному матеріалі C_{II} [см⁻³]; площа контакту рідкої фази з середовищем F [см²]; коефіцієнт випаровування α [см/с]; діаметр кристала $D_{кр}$ [мм]; параметр підживлення B ; початкова концентрація домішки в робочому розтопі C_0 [см⁻³]; швидкість обертання кристала щодо тигля ω [об/хв]; коефіцієнт дифузії домішки у розтопі D [см²/с].

Вибір і завдання необхідних параметрів мають стосуватися моделі вирощування кристала з відповідним їй законом розподілу домішки, що дозволяє проаналізувати вплив окремих параметрів на розподіл домішки вздовж зливку і визначити умови однорідного легування.

1 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1

„ЛЕГУВАННЯ КРИСТАЛІВ ПРИ ВИРОЩУВАННІ МЕТОДОМ ЧОХРАЛЬСЬКОГО”

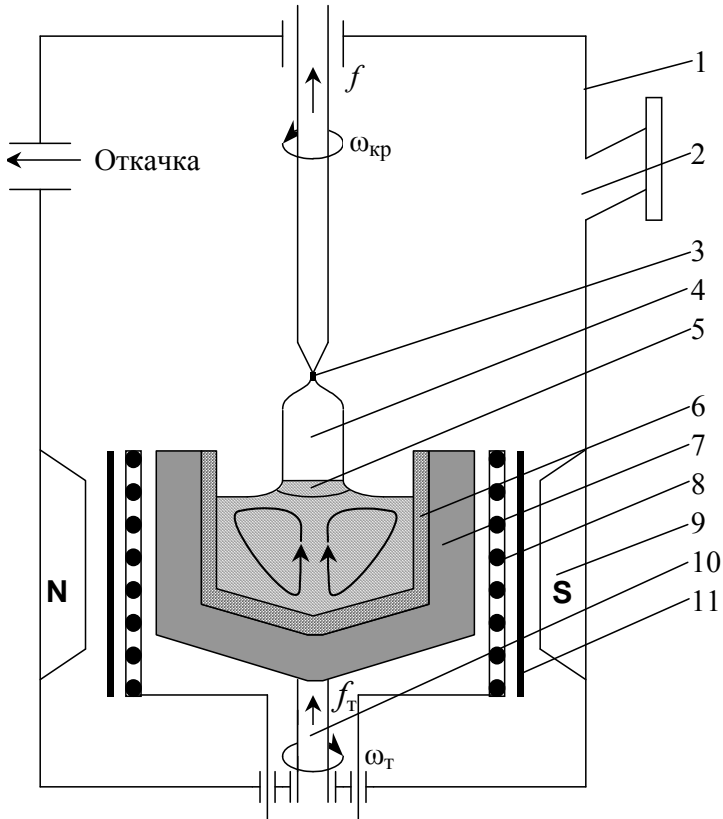
Мета роботи - проаналізувати характер розподілу домішки вздовж зливка в методі Чохральського при зміні технологічних умов вирощування; дослідити залежність ефективного коефіцієнта розподілу від параметрів технологічного процесу.

1.1 Метод Чохральського

Методи витягування кристалів із розплаву є найпоширенішими в промисловому виробництві великих монокристалів напівпровідникових і діелектричних матеріалів. Принцип витягування кристалів із розплаву вперше запропонував німецький вчений Дж. Чохральський у 1916 р. Наразі існують різні модифікації цього методу, які об'єднують під загальною назвою *метод Чохральського*.

Схему вирощування кристала методом витягування із розплаву наведено на рис.1.1. Суть методу полягає в наступному. Вихідний полікристалічний матеріал завантажують у тигель, потім розтоплюють у герметичній камері у вакуумі або інертній атмосфері. Безпосередньо перед початком вирощування кристала стоп витримують при температурі, дещо вищій за температуру плавлення для очищення від легких домішок, які, випаровуючись із розплаву, осідають на холодних частинах камери. Далі затравку прогрівають, витримуючи її над розплавом для запобігання термоудару в момент контакту холодної затравки з поверхнею розплаву. Затравкою є монокристал з високим ступенем структурної досконалості й мінімальною густиною дислокацій, який вирізають в строго визначених кристалографічних напрямках. Термоудар затравки може спричинити збільшення в ній густини дислокацій, які проростають у вирощуваний кристал і погіршують його структурну досконалість. Поверхневі порушення, які виникли під час вирізання затравки, видаляють хімічним травленням.

Після прогрівання затравку занурюють у стоп і оплавляють для видалення поверхневих забруднень. Процес витягування кристала починають з формування *шийки монокристала*, яка є тонким монокристалом. Діаметр шийки не має перевищувати лінійного розміру поперечного перерізу затравки, довжина має становити кілька її діаметрів.



1 – камера зростання; 2 – оглядове вікно; 3 – затравка; 4 – монокристал; 5 – перехо-
лоджений стовпчик розплаву; 6 – тигель з кварцового скла; 7 – графітовий стакан;
8 – резистивний нагрівач; 9 – джерело магнітного поля; 10 – пристрій підйому і обе-
рнання тигля; 11 – теплові екрани

Рисунок 1.1 – Схема установки для вирощування кристалів методом Чохральського

Шийку формують з одночасним зниженням температури роз-
плаву з великою лінійною швидкістю і при великих осьових градієн-
тах температури. Це спричинює перенасичення вакансіями зони мо-
нокристала поблизу фронту кристалізації, що при відповідній криста-
лографічній орієнтації затравки полегшує рух і вихід на поверхню
кристала дислокацій, які проросли із затравки. Для цього затравка має
бути зорієнтована так, щоб площини ковзання дислокацій розташову-

валися під якомога більшими кутами до напрямку росту кристалів. Такими площинами в ґратці є площини $\{111\}$.

Наступною операцією після формування шийки є розрощування монокристала від розмірів шийки до номінального діаметра зливка, тобто вихід на діаметр. Для запобігання збільшення густини дислокацій кут розрощування роблять невеликим. Після виходу на діаметр умови вирощування кристала стабілізують з метою отримання зливку постійного діаметру і високої структурної досконалості. На цьому етапі теплові умови процесу визначають градієнти температури в кристалі і розтопі, від яких, у свою чергу, залежать форма фронту кристалізації, розміри переохолодженої зони, діаметр і швидкість росту кристала.

Після вирощування кристала із заданими діаметром і довжиною, формують зворотний конус, плавно зменшуючи діаметр кристала, щоб при відриві кристала від розплаву запобігти тепловому удару, який спричинює розмноження дислокацій в його кінцевій частині. Далі кристал повільно охолоджують, для чого його піднімають на невелику відстань над розплавом і повільно знижують температуру нагрівача. Для забезпечення осьової симетрії теплового поля в розтопі протягом всього процесу вирощування тигель і кристал одночасно обертають у протилежних напрямках.

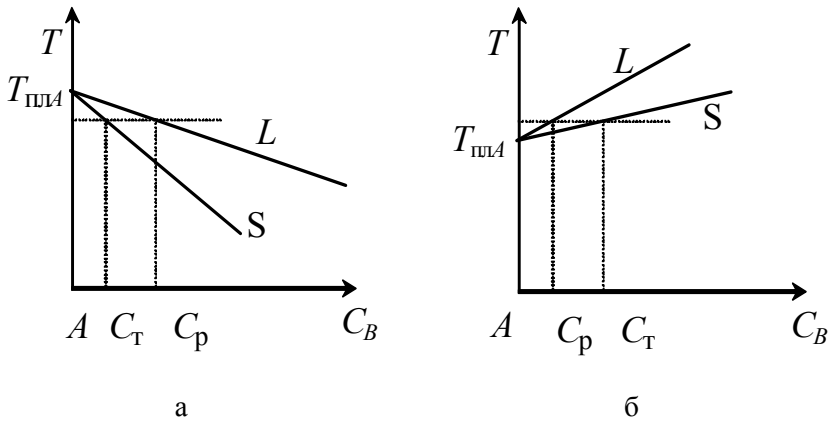
Щоб придушити рух потоків рідини в електропровідному розтопі і запобігти неоднорідному розподілу домішки в зростаючому кристалі, тигель із розплавом поміщають у магнітне поле, яке уповільнює рух провідного розплаву. Спостерігається ефект магнітної в'язкості, тобто збільшення в магнітному полі в'язкості розплаву до величини, більшої за його власну кінематичну в'язкість.

1.2 Ефективний коефіцієнт розподілу

Коефіцієнтом розподілу називають відношення концентрації домішки у твердій фазі до її концентрації у рідкій фазі. Це важливий параметр металургійного процесу, який визначає характер розподілу домішки вздовж вирощуваного кристала. Розрізняють *рівноважний* k_0 і *ефективний* k коефіцієнти розподілу. Рівноважний коефіцієнт розподілу домішки k_0 характеризує відношення концентрацій домішки в твердій і рідкій фазах за умов термодинамічної рівноваги

$$k_0 = \frac{C_{i\Gamma}}{C_{ip}}, \quad (1.1)$$

він тісно пов'язаний з бінарною діаграмою стану "напівпровідник - домішка". За малих концентрацій домішки (частки атомних %) і температурах, близьких до температури плавлення основного компонента, можна представити криві ліквідусу і солідусу у вигляді двох відрізків, дотичних до ліній ліквідусу і солідусу в точці плавлення основного компонента A (рис. 1.2).



а – домішка, яка знижує температуру плавлення ($k_0 < 1$);
б – домішка, яка підвищує температуру плавлення ($k_0 > 1$).

Рисунок 1.2 – Фазові діаграми поблизу точки плавлення основного компонента (A)

Домішки, які мають значення коефіцієнта розподілу менше одиниці, знижують температуру кристалізації основної речовини. Якщо коефіцієнт розподілу більше одиниці, то введення домішки збільшує температуру кристалізації.

У реальності термодинамічно рівноважні умови не можуть бути реалізовані. Це пов'язано в першу чергу з тим, що процес кристалізації має кінцеву швидкість, коефіцієнти дифузії домішок у твердій фазі досить малі, а дифузійні процеси у твердій фазі уповільнені, внаслідок чого стан термодинамічної рівноваги на межі "тверде - рідина" не встигає встановлюватися. При малих швидкостях направленої криста-

лізації рівноважний коефіцієнт розподілу може описувати умови рівноваги на межі розподілу рідкої і твердої фаз (рис. 1.3, а, в). У цьому разі концентрація домішки у всьому об'ємі розплаву буде однаковою, а її концентрація в закристалізованій частині $C_T = k_0 C_p$.

Якщо швидкість кристалізації має кінцеве значення, то перед фронтом кристалізації з ростом кристала утворюється шар розплаву з ефективною товщиною δ , збагачений домішкою, якщо $k_0 < 1$, і збіднений домішкою, якщо $k_0 > 1$ (рис.1.3, б, з). За цих умов вміст домішки в закристалізованій частині зливка C_T визначатиметься концентрацією домішки в розтопі біля фронту кристалізації $C_T = k_0 C_{p0}$. Значення C_{p0} , як правило, невідоме, тому в нерівноважних умовах зв'язок між концентраціями домішки у твердій C_T і рідкій C_p фазах здійснюють за допомогою ефективного коефіцієнту розподілу k . Під C_p тут слід розуміти концентрацію домішки в об'ємі розплаву.

Зв'язок між рівноважним k_0 і ефективним k коефіцієнтами розподілу визначають за допомогою рівнянням Бартона - Прима – Сліхтера:

$$k = \frac{k_0}{k_0 + (1 - k_0) \exp\left(-\frac{f\delta}{D}\right)}, \quad (1.2)$$

де f – швидкість кристалізації;

δ – товщина дифузійного шару;

D – коефіцієнт дифузії домішки у рідкій фазі.

Товщину дифузійного шару δ розраховують за формулою Сліхтера:

$$\delta = 1,6 D^{1/3} \nu^{1/6} \omega^{-1/2}, \quad (1.3)$$

де D – коефіцієнт дифузії домішки в рідкій фазі, $\text{см}^2 / \text{с}$;

ν – кінематична в'язкість розплаву, $\text{см}^2 / \text{с}$;

ω – швидкість обертання кристала щодо тигля, $\text{рад} / \text{с}$.

Значення δ може змінюватися від 1 до 10^{-3} см.

Рівноважний коефіцієнт розподілу розраховують з умови рівності хімічного потенціалу компоненту B у рівноважних твердій і рідкій фазах за виразом

$$\ln k_B = \frac{\Delta H_{\text{монл}B}}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\text{ТОПЛ}B}} \right) + \ln \frac{\gamma_B^p}{\gamma_B^T}, \quad (1.4)$$

де $\Delta H_{\text{топлВ}}$ – ентальпія плавлення чистого компонента B ;

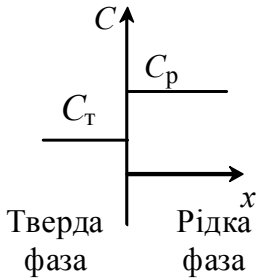
T – температура ліквідусу твердого розчину "напівпровідник - домішка", К;

$T_{\text{топлВ}}$ – температура плавлення чистого компонента B , К;

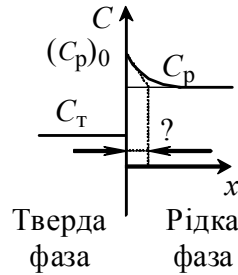
γ_B^T і γ_B^P – коефіцієнти активності компонента B у рівноважних твердій і рідкій фазах;

R – універсальна газова стала, $R = 8,31$ Дж / (моль·К).

$$k_0 < 1$$

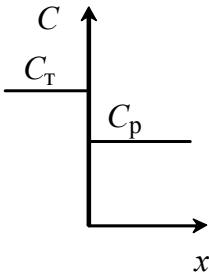


a

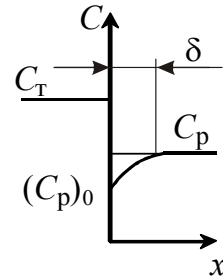


б

$$k_0 > 1$$



в



з

a, в – у рівноважних умовах (швидкість кристалізації нескінченно мала,); *б, з* – у нерівноважних умовах (швидкість зростання кристалізації має кінцеве значення)

Рисунок 1.3 – Розподіл домішок на межі розділу твердого і рідкого фаз

Оскільки роботу проводять з малими концентраціями домішки у твердій фазі ($T \approx T_A$), то рівняння (1.4) приймає наступний вигляд:

$$\ln k_B = \frac{\Delta H_{\text{монл}B}}{R} \left(\frac{1}{T_{\text{ТОПЛА}}} - \frac{1}{T_{\text{ТОПЛВ}}} \right) + \ln \frac{\gamma_B^{\text{Ж}}}{\gamma_B^{\text{Т}}}. \quad (1.5)$$

Розрахункові значення коефіцієнтів активності залежать від обраної моделі розчину. Якщо рідкий і твердий розчини ідеальні, і $\gamma_B^i = 1$, то рівняння для розрахунку рівноважного коефіцієнта розподілу таке:

$$\ln k_B = \frac{\Delta H_{\text{монл}B}}{R} \left(\frac{1}{T_{\text{ТОПЛА}}} - \frac{1}{T_{\text{ТОПЛВ}}} \right). \quad (1.6)$$

Однак це наближення здебільшого не є достатньо коректним. Значно більшу точність вдається отримати при використанні наближення регулярного розчину, яке враховує міжатомну взаємодію в суміші компонентів. Відповідно до цієї моделі, коефіцієнт активності γ компонентів у бінарній системі A - B визначається за формулою

$$RT \ln \gamma_B = \alpha_{AB} (1 - x_B)^2, \quad (1.7)$$

де α_{AB} - параметр міжатомної взаємодії у відповідній рідкій або твердій фазі; x_B - концентрація компонента B (в атомних частках) у відповідній фазі. У моделі регулярних розчинів параметр взаємодії α_{AB} беруть незалежним від температури і концентрації компонентів. У наближенні квазірегулярного розчину параметр взаємодії зазвичай розглядають як лінійну функцію температури

$$\alpha_{AB} = a - bT. \quad (1.8)$$

Вивчення поведінки домішок у кремнії і германії показало, що до твердої фази можна застосувати наближення регулярних розчинів, а до рідкої - переважно квазірегулярних. Тому в області нескінченно малих концентрацій компонента B коефіцієнт розподілу k_B можна визначити за допомогою наступного виразу:

$$\ln k_B = \frac{\Delta H_{\text{ТОПЛВ}}}{R} \left(\frac{I}{T_{\text{ТОПЛА}}} - \frac{I}{T_{\text{ТОПЛВ}}} \right) + \frac{\alpha_{AB}^P}{RT_{\text{ТОПЛА}}} - \frac{\alpha_{AB}^T}{RT_{\text{ТОПЛА}}} =$$

$$= \frac{\Delta H_{\text{ТОПЛВ}}}{R} \left(\frac{I}{T_{\text{ТОПЛА}}} - \frac{I}{T_{\text{ТОПЛВ}}} \right) + \frac{a^P - b^P T_{\text{ТОПЛА}} - \alpha_{AB}^T}{RT_{\text{ТОПЛА}}}. \quad (1.9)$$

У Додатку А (табл. 1.1, 1.2) наведено деякі термодинамічні характеристики напівпровідників і легуючих елементів, параметри між-атомної взаємодії в рідкій і твердій фазах для бінарних систем на основі германію і кремнію.

1.3 Розподіл домішки вздовж зливка при витягуванні кристалів із розплаву

Математичний опис розподілу концентрації домішки у кристалі виводиться за поширеними в напівпровідниковій металургії припущеннями, вперше чітко сформульованими Пфаном:

а) процесами дифузійного перерозподілу компонентів у твердій фазі можна знехтувати, тобто передбачається, що коефіцієнт дифузії компонентів у твердій фазі $D_T = 0$;

б) перерозподіл компонентів і, відповідно, вирівнювання складу в рідкій фазі відбуваються миттєво, тобто ефективний коефіцієнт дифузії в рідкій фазі $D_p = \infty$. Цю умову зазвичай називають умовою повного перемішування рідкої фази;

в) ефективний коефіцієнт розподілу k – стала величина. Це припущення справедливе для малих концентрацій домішки, коли значення ефективного коефіцієнту розподілу не залежить від концентрації домішки. Однак ефективний коефіцієнт розподілу залежить від умов проведення процесу (швидкість росту кристала і умови перемішування розплаву), тому йдеться про сталість протягом процесу вирощування;

г) об'єм матеріалу, який кристалізується, не змінюється при топленні і затвердінні, густина рідкої і твердої фаз рівні, тобто $d_m = d_p$;

д) немає обміну матеріалом між конденсованою (рідкою або твердою) і газовою фазами; в системі немає дисоціюючих і летких компонентів.

Для виведення рівняння розрахунку розподілу домішки вздовж зливку припускаємо, що за час dt об'єм закристалізованої твердої фази дорівнюватиме dV_T .

Запишемо рівняння матеріального балансу:

$$dQ_T + dQ = 0, \quad (1.10)$$

де dQ_T , dQ – зміна кількості атомів легуючої домішки відповідно в твердій і рідкій фазах у процесі кристалізації;

$Q_i = C_i V_i$, где C_i – концентрація домішки;

V_i – об'єм відповідної фази.

Рівняння балансу об'ємів можна представити у вигляді

$$dV_T + dV = 0, \quad (1.11)$$

де dV_T , dV – зміна об'ємів твердої і рідкої фаз у процесі кристалізації.

Враховуючи, що $Q_i = C_i V_i$, а також (1.1) і (1.11), перепишемо рівняння (1.10) у наступному вигляді:

$$-kCdV + CdV + VdC = 0. \quad (1.12)$$

Уведемо величину $g = 1 - \frac{V}{V_0}$, яка позначає частку закристалізованого розплаву, де V – поточний, а V_0 – початковий об'єм рідкої фази.

Коли підживлення немає $g = \frac{V}{V_0}$, де V_m – об'єм закристалізованої фази.

Тоді $1 - g = \frac{V}{V_0}$; $dg = -\frac{dV}{V_0}$. Підставимо ці вирази у (1.12) і, розді-

ляючи змінні, отримаємо рівняння матеріального балансу в наступному вигляді:

$$\frac{dC}{C} = -\frac{(k-1)}{1-g} dg. \quad (1.13)$$

Враховуючи, що при $g = 0$ концентрація домішки в розтопі C дорівнює її початковому значенню C_0 , після інтегрування (1.13) отримаємо наступний закон розподілу домішки вздовж зливку:

$$C_T = kC_0(1 - g)^{k-1}. \quad (1.14)$$

Вираз (1.14) називають рівнянням Галлівера. Криві, які ілюструють ці залежності при різних значеннях коефіцієнта розподілу, наведені на рис. 1.4.

Якщо кристал вирощують із розплаву з однаковим вмістом домішки і змінюються тільки умови вирощування, які змінюють коефіцієнт розподілу k (наприклад, швидкість кристалізації f або швидкість обертання кристала щодо тигля ω), то площі під кривими, відповідними коефіцієнтам розподілу k_1 і k_2 , мають бути однакові, оскільки площа під кривою визначає сумарну кількість домішки у розтопі.

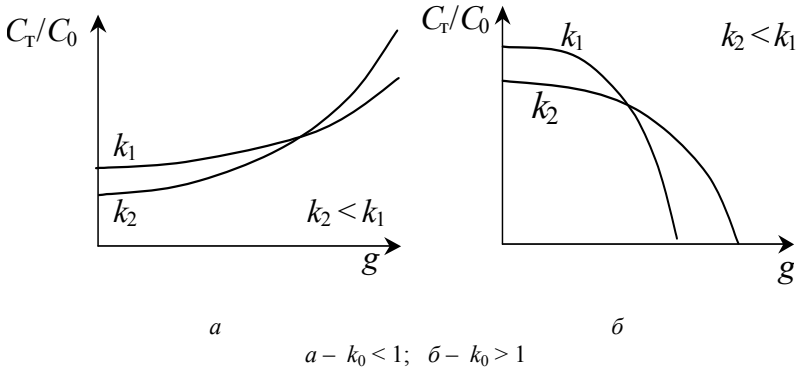


Рисунок 1.4 – Розподіл домішок з різними коефіцієнтами розподілу по довжині кристалів, вирощених нормальною спрямованою кристалізацією

Рівняння Галлівера справедливе також для опису процесів легування кристалів при вирощуванні іншими методами спрямованої кристалізації, наприклад, методами Бріджмена і Кіропулоса.

1.4 Порядок виконання роботи

1.4.1 Побудувати залежність $C_T = f(g)$ при різних швидкостях кристалізації, задаючи в розділі "Параметри" початкову концентрацію

домішки у розтопі $C_0=10^{15} \text{ см}^{-3}$, рівноважне значення концентрації $C_p=0$, значення концентрації в підживленні $C_n=0$, параметр підживлення $B=1$, коефіцієнт випаровування $\alpha=0$ (домішка нелетка), площа поверхні випаровування домішки $F=10 \text{ см}^2$, діаметр кристала $D_{кр}=100 \text{ мм}$.

Рівноважний коефіцієнт розподілу k_0 і коефіцієнт дифузії домішки D у рідкій фазі наведено в табл. А3 і А4 Додатку А.

Розрахувати значення k для різних значень швидкості кристалізації. Дані занести до табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Результати розрахунку завдання 1.4.1

Швидкість кристалізації f , см/с	f_1	f_2	f_3
Ефективний коефіцієнт розподілу k			

1.4.2 Побудувати залежність $C_r=f(g)$ при різних швидкостях обертання кристала щодо тигля, задаючи в розділі "Параметри" наступні величини: $C_0=10^{15} \text{ см}^{-3}$, $C_p=0$, $C_n=0$, $B=1$, $\alpha=0$ (домішка нелетка), $F=10 \text{ см}^2$, $D_{кр}=100 \text{ мм}$. Рівноважний коефіцієнт розподілу k_0 і коефіцієнт дифузії домішки D в рідкій фазі вибрати з табличних даних (табл. А3 і А4 Додатка А).

Розрахувати значення k і δ для різних значень швидкості обертання кристала щодо тигля. Дані занести до табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Результати розрахунку завдання 1.4.2

Швидкість обертання кристала щодо тигля ω , об/хв	ω_1	ω_2	ω_3
Ефективний коефіцієнт розподілу k			
Товщина дифузійного шару δ , см			

1.4.3 Розрахувати значення рівноважного коефіцієнта розподілу вказаної у завданні домішки в рамках моделі регулярних розчинів, використовуючи для розрахунків рівняння (1.9). Термодинамічні величини і параметри взаємодії компонентів в твердій і рідкій фазах наведено в табл. А1 і А2 Додатку А. Отримані значення коефіцієнта розподілу порівняти з даними табл. А3 Додатку А.

1.4.4 Побудувати залежність k від швидкості кристалізації (за даними табл. 1.1) і швидкості обертання (за даними табл. 1.2), а також залежність товщини дифузійного шару δ від швидкості обертання.

1.5 Зміст звіту

Звіт має містити:

- принципову схему установки для вирощування монокристалів методом Чохральського;
- графіки розподілу концентрації домішки у твердій фазі при різних швидкостях кристалізації;
- графіки розподілу концентрації домішки у твердій фазі при різних швидкостях обертання тигля;
- залежності ефективного коефіцієнта розподілу від швидкості кристалізації (за табл. 1.1) і швидкості обертання (за табл. 1.2);
- залежність товщини дифузійного шару від швидкості обертання (за даними табл. 1.2);
- висновки по роботі.

1.6 Контрольні запитання і завдання

1.6.1 Як вирощують кристали за методом Чохральського?

1.6.2 Які технологічні прийоми застосовують для зменшення густини дислокацій, які утворюються на початкових етапах отримання кристалів методом витягування із розплаву?

1.6.3 Діаметр шийки монокристала кремнію дорівнює 3 мм. Утворення шийки сприяє вирощуванню бездислокаційних кристалів. Обчисліть максимальну довжину зливку кремнію, яку може витримати така шийка, якщо критична напруга утворення дислокацій $\tau_{кр} = G/30$, модуль зсуву $G = 4,05 \cdot 10^{10}$ Па, діаметр кристала 100 мм.

1.6.4 Чому вводять поняття ефективного коефіцієнта розподілу при вирощуванні кристалів із розплаву?

1.6.5 Поясніть розподіл домішки в твердій і рідкій фазах біля фронту кристалізації для $k_0 > 1$ і $k_0 < 1$. Чому дорівнює k при $f \rightarrow 0$ і $f \rightarrow \infty$?

1.6.6 Поясніть, що таке "товщина дифузійного шару". Від яких параметрів технологічного процесу вона залежить?

1.6.7 Обчисліть товщину дифузійного шару при легуванні германію домішкою галію в наступних випадках: а) швидкість обертання кристала $\omega_{кр}=80$ об/хв, швидкість обертання тигля $\omega_t=10$ об/хв; б) $\omega_{кр}=5$ об/хв, $\omega_t=0$.

1.6.8 Як зміниться розподіл домішки в твердій і рідкій фазах біля фронту кристалізації, якщо збільшити швидкість обертання кристала відносно тигля? Нарисуйте ці залежності для випадків $k_0 > 1$ і $k_0 < 1$.

1.6.9 Назвіть основні допущення, які використовують при виведенні розподілу домішки при спрямованій кристалізації.

1.6.10 Побудуйте розподіл домішки вздовж зливка для методу Чохральського при $k_0 > 1$ і $k_0 < 1$. Як зміниться цей розподіл, якщо збільшити: а) швидкість кристалізації, б) швидкість обертання кристала щодо тигля?

1.6.11 У скільки разів зміниться концентрація домішки в початковій частині кристала германію, легованого галієм, якщо швидкість кристалізації збільшити з 0,5 до 2,5 мм/хв?

1.6.12 Обчисліть концентрацію індію у розтопі кремнію при вирощуванні монокристала методом Чохральського зі швидкістю кристалізації 1 мм/хв, якщо концентрація індію C_m у зливку при $g=0,2$ становить $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, швидкість обертання кристала щодо тигля 60 об/хв.

1.6.13 Визначте тип електропровідності і побудуйте залежність питомого опору по довжині зливку кремнію, вирощеного методом Чохральського, якщо у вихідному розтопі містилися домішки бору $C_{0B}=4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ і миш'яку $C_{0As}=4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, швидкість кристалізації 0,5 мм/хв, швидкість обертання кристала щодо тигля 100 об/хв.

1.6.14 Обчисліть, як зміниться концентрація олова в кристалі кремнію при $g=0,5$ від початку зливка при вирощуванні методом Чохральського, якщо швидкість кристалізації виросте від 0,5 до 5 мм/хв. Початкова концентрація домішки олова у розтопі складає 10^{-6} частки за масою. Швидкість обертання кристала 60 мм/хв, швидкість обертання тигля 10 об/хв.

1.6.15 Обчисліть значення рівноважного коефіцієнту розподілу індію і галію в германії при використанні моделі регулярних розчинів для твердої фази, і квазірегулярних - для рідкої фази.

2 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2 „ЛЕГУВАННЯ КРИСТАЛІВ ПРИ ВИРОЩУВАННІ МЕТОДОМ ЧОХРАЛЬСЬКОГО ПРИ НАЯВНОСТІ ЛЕТКОЇ ДОМІШКИ”

Мета роботи – дослідити вплив процесу випаровування домішки на її розподіл уздовж зливка при вирощуванні кристалів методом Чохральського; виявити умови отримання кристалів, однорідно легованих леткими домішками.

2.1 Розподіл домішки уздовж зливка з урахуванням її випаровування із розплаву

На практиці в деяких випадках необхідно легувати кристали леткими домішками (наприклад, для елементів IV групи - германію й кремнію - леткими домішками є елементи V групи - фосфор, сурма й миш'як), тому аналізуючи розподіл домішок у процесі вирощування кристала необхідно врахувати процес перерозподілу леткого компонента між розплавом і газовою фазою, що роблять за допомогою наближень Боомгардта, в яких зберігаються всі припущення пфаннівського наближення, крім останнього про нелетючість домішки.

Урахування леткої домішки проводять так:

- а) обміну домішкою між кристалом і газовою фазою немає;
- б) обмін домішкою відбувається між розплавом і газовою фазою; газова фаза є однорідною, тобто коефіцієнт дифузії леткої домішки в газовій фазі $D_{\text{газ}} = \infty$;
- в) швидкість обміну домішкою між розплавом і газовою фазою обмежується швидкістю поверхневої взаємодії, тобто кінетикою при з'єднання або від'єднання частинок, і пропорційна різниці між поточною C і рівноважною C_p концентраціями леткої домішки у розтопі.

Отже, якщо домішка летка, то процес кристалізації розплаву супроводжуватиметься не тільки перерозподілом домішки між рідкою й твердою фазами, але одночасно й її випаровуванням із розплаву. З урахуванням наближень Боомгардта рівняння матеріального балансу:

$$dQ_T + dQ_p + dQ_{\text{газ}} = 0, \quad (2.1)$$

де dQ_T , dQ_p , $dQ_{\text{газ}}$ – зміна кількості атомів легуючої домішки в процесі кристалізації відповідно у твердій, рідкій і газовій фазах.

Вважаючи, що за час dt об'єм твердої фази, яка закристалізувалася, складе dV_T , запишемо рівняння матеріального балансу у вигляді:

$$C_T dV_T + CdV + VdC + \alpha F(C - C_p)dt = 0, \quad (2.2)$$

де α – лінійний коефіцієнт випаровування (коефіцієнт міжфазної взаємодії); F – площа поверхні випаровування.

Рівняння балансу об'ємів можна представити у вигляді (1.11), оскільки процес випаровування домішки із розплаву істотно не впливатиме на зміну об'єму розплаву.

Враховуючи, що $dV_T = fSdt$, де f – швидкість кристалізації; S – поперечний перетин кристала, а також додаючи частку розплаву, який закристалізувався, $g = 1 - \frac{V}{V_0}$, визначимо dg так:

$$dg = -\frac{dV}{V_0} = \frac{dV_T}{V_0} = \frac{fSdt}{V_0}. \quad (2.3)$$

З (2.3) виразимо величини $dV = -V_0 dg$; $dV_T = V_0 dg$; $dg = \frac{V_0}{fS} dt$, а

також враховуючи, що $C_T = kC$, запишемо рівняння матеріального балансу (2.2) у наступному вигляді:

$$kCV_0 dg - CV_0 dg + (1 - g)dC + \frac{\alpha F}{fS} V_0(C - C_p)dg = 0. \quad (2.4)$$

Уведемо поняття наведеного коефіцієнта випаровування k_B :

$$k_B = \frac{\alpha F}{fS} \quad (2.5)$$

і узагальненого коефіцієнта розподілу $k_{\text{заг}}$, який у випадку вирощування кристалів у вакуумі визначається як

$$k_{\text{заг}} = k + k_B, \quad (2.6)$$

де k – ефективний коефіцієнт розподілу.

З урахуванням (2.5) і (2.6) перепишемо рівняння (2.3):

$$[kC - C + k_{\text{н}}(C - C_{\text{р}})]dg = -(1 - g) dC. \quad (2.7)$$

Беручи до уваги, що при $g = 0$ концентрація $C = C_0$, після розділу змінних і інтегрування одержимо наступний вираз для розподілу домішки по довжині кристала, легованого легкою домішкою:

$$C_{\text{т}} = \frac{k k_{\text{в}}}{k_{\text{заг}} - 1} C_{\text{р}} + \frac{k}{k_{\text{заг}} - 1} [(k_{\text{заг}} - 1)C_0 - k_{\text{в}} C_{\text{р}}] (1 - g)^{k_{\text{заг}} - 1}. \quad (2.8)$$

Практичний інтерес представляє вирощування кристала у вакуумі, коли $C_{\text{р}} = 0$. Для цього варіанта легування рівняння (2.8) таке:

$$C_{\text{т}} = k C_0 (1 - g)^{k_{\text{заг}} - 1}. \quad (2.9)$$

Якщо домішка є нелеткою, то вираз (2.9) перетвориться в рівняння Галлівера (1.14). Графічно розподіл легкої домішки уздовж зливка наведено на рис. 2.1 для різних значень узагальненого коефіцієнта розподілу. У випадку $k_0 < 1$ домішка звичайно накопичується у розтопі з ростом кристала. Через випаровування легкого компонента його концентрація в рідкій фазі зменшується, тому розподіл домішки уздовж зливка стає більш однорідним.

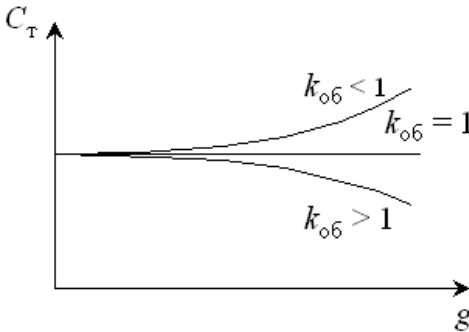


Рисунок 2.1 – Розподіл легкої домішки уздовж зливка при різних значеннях узагальненого коефіцієнта розподілу

При $k_{\text{заг}} > 1$ процес випаровування домішки із розплаву переважає, і концентрація домішки в кристалі починає убавати з його ростом.

Найцікавішим випадком отримання однорідно легованих кристалів є метод компенсаційного випаровування. Він реалізується коли

процес накопичення леткої домішки у розтопі компенсується її випаровуванням з рідкої фази. Математично цю умову записують як $k_{\text{заг}}=1$. Тоді $C_r=kC_0$, де C_0 – концентрація домішки у розтопі до початку росту кристала.

2.2 Марки напівпровідникових матеріалів

Відповідно до встановлених норм, марки напівпровідникового кремнію містять у собі позначення матеріалу - основи (наприклад, К - кремній); типу електропровідності (Е - електронний, Д - дірковий); легуючої домішки (Ф - фосфор, Б - бор, М - миш'як, С - сурма і т.д.); метод отримання; значення питомого опору ρ , Ом·см; іноді геометричні розміри й інші параметри. Наприклад, марка ЕКДБ-1,0 указує, що це кремній діркового типу електропровідності, легований бором, з питомим опором 1,0 Ом·см. Якщо перед умовною позначкою матеріалу літерного індексу немає, це вказує на те, що даний кристал отриманий методом Чохральського. Якщо ж стоїть літерний індекс Е, це означає, що кристал отриманий методом Чохральського й буде використаний як підкладинка для епітаксійного нарощування. Буква Б перед умовною позначкою марки говорить про те, що монокристали кремнію отримані методом безтигельного зонного плавлення. Маркування таких кристалів має вигляд БКДБ-40-80, це означає, що монокристал кремнію вирощений методом безтигельного зонного плавлення, має питомий опір $\rho = 40$ Ом·см і діаметр 80 мм. Якщо в умовному позначенні марки є буква Г, це вказує на те, що монокристали кремнію отримані методом гарнісажного плавлення. Інші позначення для цієї марки кристалів аналогічні методу безтигельного зонного плавлення, наприклад, ГКЕФ-10-30 або ГКДБ-1,0-40.

Для кремнію перерахування питомого опору в розрахункове значення концентрації легуючої домішки в кристалі проводять за допомогою спеціальних таблиць (табл. 5 Додатка А).

Германій, призначений для виготовлення напівпровідникових приладів і епітаксціальних структур, легують сурмою, фосфором і миш'яком з метою одержання кристалів *n*- типу електропровідності, та галієм або індієм з метою одержання матеріалу діркового типу. Умовні позначення марок германієвих кристалів такі: ГЕС (Г - германій, Е - електронний, С - сурма) або ГДГ (Г - германій, Д - дірковий, Г - галій).

Далі проставляються номінал питомого опору (від $5 \cdot 10^{-4}$ до 45 Ом·см). Наприклад, маркування ГЕС-5,6 означає: германій електронний, легований сурмою, питомий опір 5,6 Ом·см. Монокристали германію одержують тільки методом Чохральського.

Для германію електронного й діркового типу електропровідності в діапазоні номіналів ρ задають значення рухливості носіїв μ_p і μ_n (табл. 6 Додатку А). Концентрацію носіїв заряду, а отже, концентрацію домішки у твердій фазі (припускають однократну іонізацію атомів легуючої домішки, також передбачається, що інших домішок в кристалі немає) розраховують за формулами

$$n = \frac{1}{e\rho\mu_n}; \quad p = \frac{1}{e\rho\mu_p}. \quad (2.10)$$

У цьому разі $C_T = n$ для матеріалу з електронною провідністю й $C_T = p$ для матеріалу з дірковою провідністю.

У позначенні марки монокристалів арсеніду галію вказують: назву сполуки (АГ - арсенід галію); метод його отримання (Н - направлена кристалізація й Ч - вирощування по методу Чохральського з-під шару флюсу); легуючу домішку (Т - телур, О - олово, Ц - цинк). Після літерних індексів через тире проставляють номер марки й потім через тире цифри концентрації основних носіїв заряду. Наприклад, марка АГЧТ-1-5-17 означає, що це монокристал арсеніду галію, вирощений по методу Чохральського, легований телуrom, першої марки, з концентрацією основних носіїв заряду $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

2.3 Порядок виконання роботи

2.3.1 Побудувати залежності $C_T = f(g)$ у випадку легкої домішки при різних значеннях площі випаровування F . Розшифрувати марку матеріалу, визначивши матеріал кристала легуючої домішки, питомий опір ρ і геометричні параметри, якщо вони наводяться в марці.

За значенням питомого опору ρ визначте концентрацію легуючої домішки в кристалі C_T за допомогою табл. 5 або табл.6 Додатка А. Рівноважний коефіцієнт розподілу k_0 , коефіцієнт дифузії домішки k_0 у

рідкій фазі й коефіцієнт випаровування домішки α вибрати з табличних даних (табл. 3, 4 і 7 Додатка А).

Для побудови залежностей $C_T = f(g)$ у випадку легкої домішки в розділі "Параметри" необхідно ввести наступні вихідні дані: $C_p = 0$, $C_n = 0$, $B = 1$. Поверхню випаровування F розрахувати за формулою

$$F = \frac{\pi}{4} (D_{\text{тиг}}^2 - D_{\text{кр}}^2). \quad (2.11)$$

Початкову концентрацію домішки у розтопі C_0 визначити з відомого співвідношення $C_T = kC_0$. Значення ефективного коефіцієнта перерозподілу розраховують за рівнянням Бартона - Прима - Сліхтера (1.2) для швидкості кристалізації f і швидкості обертання кристала щодо тигля ω , зазначених у п. 1 завдання. Вихідні й розрахункові дані для легуючої домішки, зазначеної в завданні, представити у вигляді табл. 2.1 і 2.2.

Таблиця 2.1 – Розраховані дані завдання 2.3.1

k_0	α , см/с	D , см ² /с	$D_{\text{кр}}$, мм	f , см/с	ω , об/хв

Таблиця 2.2 – Розраховані дані завдання 2.3.1

D_T , см	F , см ²	k	k_u	$k_{об}$
D_{T1}				
D_{T2}				
D_{T3}				

2.3.2 Побудувати залежність $C_T = f(g)$ у випадку легкої домішки при різних значеннях швидкості кристалізації f при $C_p=0$, $C_n=0$, $B=1$. Поверхню випаровування F розрахувати за формулою (2.11). Значення початкової концентрації домішки у розтопі C_0 вибрати з п. 1. Розрахункові значення представити у вигляді табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Розраховані дані завдання 2.3.2

f , см/хв	K	k_u	$k_{об}$
f_1			
f_2			
f_3			

2.3.3 Розрахувати технологічний режим вирощування кристала, у якому реалізуються умови компенсаційного випаровування:

$$k_{\text{об}} = k + k_{\text{и}} = \frac{k_0}{k_0 + (1 - k_0) \exp\left(-\frac{f\delta}{D}\right)} + \frac{\alpha F}{fS} = 1.$$

Розрахунки проводити вибором наступних параметрів процесу: площа випаровування F , яку можна змінювати, обираючи діаметр робочого тигля: $D_{\text{т}} = (2 \div 3)D_{\text{кр}}$; швидкість кристалізації f , обираючи значення із допустимого діапазону $0,3 \div 2,5$ мм/хв; швидкість обертання кристала щодо тигля ($\omega = 10 \div 100$ об/хв).

2.4 Зміст звіту

Звіт має містити:

- принципovu схему установки для вирощування монокристалів методом Чохральського;
- розрахунки початкової концентрації домішки у розтопі відповідно до зазначеної марки матеріалу;
- таблиці вихідних і розрахункових даних;
- графіки розподілу леткої домішки уздовж зливка при будь-якій поверхні випаровування;
- графіки розподілу леткої домішки уздовж зливка при різних значеннях швидкості кристалізації;
- розрахунки режиму компенсаційного випаровування;
- висновки по роботі.

2.5 Контрольні запитання й завдання

2.5.1 Сформулюйте припущення Боомгардта, уведені для одержання виразу розподілу леткої домішки уздовж зливка.

2.5.2 Пояснить, що таке лінійний коефіцієнт випаровування, зведений коефіцієнт випаровування, узагальнений коефіцієнт розподілу?

2.5.3 Як впливає зміна площі поверхні випаровування на розподіл леткої домішки уздовж зливка?

2.5.4 У чому проявляється вплив швидкості кристалізації на розподіл леткої домішки уздовж зливка?

2.5.5 Як визначити концентрацію носіїв заряду в кристалах кремнію, знаючи його марку?

2.5.6 Розшифруйте марку матеріалу ГДГ-0,05-дд.2.

2.5.7 Побудуйте розподіл фосфору уздовж зливка кремнію, отриманого методом Чохральського у вакуумі, при врахуванні й без врахування випаровування домішки із розплаву, якщо $D_{кр}=100$ мм, швидкість кристалізації 1 мм/хв, швидкість обертання кристала щодо тигля 80 об/хв. Діаметр тигля $D_{т}=200$ і 250 мм.

2.5.8 Кристал кремнію вирощений за методом Чохральського, легований бором і на 20% компенсований фосфором. Запропонуйте умови вирощування монокристала з постійним питомим опором по довжині зливка.

2.5.9 Обчисліть, як зміниться концентрація сурми в зливку германію при вирощуванні методом Чохральського при $g = 0$ і при $g = 0,5$ від початку зливка, якщо швидкість кристалізації збільшити від 0,5 до 5 мм/хв, початкова концентрація сурми у розтопі германію становить $3 \cdot 10^{-6}$ частки по масі. Швидкість обертання кристала 40 мм/хв, швидкість обертання тигля 5 об/хв.

2.5.10 Що таке режим компенсаційного випаровування? Поясніть фізичну суть процесу, його математичне обґрунтування.

2.5.11 Обчисліть, як зміниться концентрація фосфору в зливку кремнію при $g=0,5$ і $g=0,9$, якщо вирощування провести з тиглів діаметром 200 і 250 мм. Швидкість кристалізації 1 мм/хв, швидкість обертання кристала щодо тигля 40 об/хв, діаметр кристала 125 мм. Початкова концентрація фосфору у розтопі становить $1 \cdot 10^{-6}$ частки по масі.

2.5.12 Обчисліть діаметр тигля, який необхідно використати для вирощування монокристала кремнію, однорідно легovanого сурмою, якщо швидкість кристалізації становить 0,2 мм/хв, а діаметр кристала 100 мм.

2.5.13 Розрахуйте швидкість кристалізації, яку слід вибрати для вирощування монокристала кремнію, однорідно легovanого фосфором, якщо діаметр кристала 90 мм, діаметр тигля 200 мм, швидкість обертання кристала 80 об/хв., швидкість обертання тигля 5 об/хв.

2.5.14 Запропонуйте умови вирощування монокристала германію, однорідно легovanого фосфором. Діаметр монокристала 80 мм.

3 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3 „ВИЗНАЧЕННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ЛЕГУЮЧИХ І ЗАЛИШКОВИХ ДОМІШОК І РОЗРАХУНОК ЇХ РОЗПОДІЛУ ПО ДОВЖИНІ КРИСТАЛА”

Мета роботи – розрахунок концентрації легуючої домішки, відповідної заданому в марці матеріалу значенню питомого опору за наявності у вихідному полікристалічному матеріалі залишкових домішок; оцінка виходу матеріалу із заданим значенням питомого опору.

3.1 Розрахунок концентрації легуючої домішки

Концентрацію домішок у матеріалі характеризують або кількістю атомів в одиниці об'єму C_i , або в частках, або відсотках за масою y_i . Перший спосіб вираження домішкового складу використовують при аналізі електрофізичних властивостей, другий - при визначенні маси легуючих домішок і для характеристики хімічної чистоти вихідних речовин і реагентів. При незначному вмісті домішок, коли можна знехтувати зміною густини основної речовини d , справедливе наступне співвідношення:

$$C_i = \frac{y_i N_A d}{M_i}, \quad (3.1)$$

де N_A – число Авогадро;

M_i – молярна маса домішкового компонента.

При вирощуванні монокристалів легуючу домішку вводять у стоп у вигляді твердофазної наважки. В окремих випадках, наприклад, в методі безтигельного зонного плавлення, домішку можна вводити в кристал з газової фази. Для розрахунку маси легуючої домішки, яка вводиться у стоп напівпровідника, необхідно знати умови вирощування монокристала, масу розплаву, вміст фонових (залишкових) домішок, умови взаємодії внаслідок взаємодії розплаву з атмосферою і тиглем.

У складних напівпровідників, наприклад, у сполуках $A^{III}B^V$, концентрацію носіїв заряду задають у марці в якості вихідного параметра. У марці кристала германію або кремнію вказують, як правило, значення питомого опору кристала (див. 2.2). Для германію питомий

опір переводять в концентрацію носіїв заряду аналітично (див. рівняння (2.10) і табл.6 Додатку А), для кремнію використовують спеціальні таблиці (див. табл. 5 Додатку А).

Якщо кожен атом легуючої домішки дає один носій заряду у відповідну зону і всі домішкові атоми повністю йонізовані, то концентрація легуючої домішки буде визначати концентрацію носіїв заряду, а отже, і питомий опір напівпровідника. При введенні у стоп двох однотипних повністю йонізованих домішок, питомий опір напівпровідника визначатиметься їх сумарним вмістом:

$$\rho = \frac{I}{e\mu_n(C_{TA_1} + C_{TA_2})}; \rho = \frac{I}{e\mu_p(C_{TD_1} + C_{TD_2})}, \quad (3.2)$$

де C_{TA_i} і C_{TD_i} - концентрації відповідно акцепторних і донорних домішок у кристалі.

Якщо кристал легують одночасно донорними і акцепторними домішками, то концентрація носіїв заряду, що визначає питомий опір, носитиме різницевий характер: для напівпровідника n -типу $n=C_{TD}-C_{TA}$; для напівпровідника p -типу $p=C_{TA}-C_{TD}$. У цьому разі задають ступінь компенсації $\varepsilon_n=C_{TA} / C_{TD}$ для напівпровідника n -типу електропровідності і $\varepsilon_p=C_{TD} / C_{TA}$ для p -типу. Концентрацію донорів або акцепторів можна розрахувати за допомогою рівнянь

$$C_{TD} = \frac{I}{e\mu_n\rho(1-\varepsilon_n)}; C_{TA} = \frac{I}{e\mu_p\rho(1-\varepsilon_p)}. \quad (3.3)$$

Взагалі необхідно враховувати наявність у вихідному полікристалічному матеріалі фонових або залишкових домішок. Їх концентрація задається, як правило, за допомогою частки або відсотку по масі y_i . За величиною y_i відповідно до (3.1) можна визначити концентрацію остаточних домішок C_i у розтопі. Для розрахунку концентрації легуючої домішки необхідно скласти рівняння електронейтральності, яке можна записати для напівпровідника відповідно n -і p -типу:

$$n + C_{TA} + \sum k_{A_{\text{фон}}} C_{A_{\text{фон}}} = C_{TD} + \sum k_{D_{\text{фон}}} C_{D_{\text{фон}}}, \quad (3.4.a)$$

$$C_{TA} + \sum k_{A \text{ фон}} C_{A \text{ фон}} = p + C_{TD} + \sum k_{D \text{ фон}} C_{TD \text{ фон}}, \quad (3.4б)$$

де $k_{i \text{ фон}}$ – ефективний коефіцієнт розподілу i -ї фонові домішки; C_{TA} , C_{TD} – концентрації легуючих відповідно акцепторних і донорних домішок в кристалі; $C_{A, D \text{ фон}}$ – концентрації фонових відповідно акцепторних і донорних домішок у розтопі до початку росту кристала.

Вирази (3.4а) і (3.4б) необхідно пояснити: оскільки у вихідному полікристалічному матеріалі містяться фонові домішки, то при його топленні вони потрапляють у рідку фазу (стоп), тому в твердій фазі (зростаючому монокристалі) їх концентрацію слід враховувати з використанням ефективного коефіцієнта розподілу.

У ході легування монокристалів леткими домішками їх концентрація зменшується внаслідок випаровування. Розрахуємо втрати легкої домішки на етапах, які передують вирощування монокристалу (плавлення вихідного завантаження, прогрів і оплавлення затравки, вирощування шийки і т. д.). Рівняння матеріального балансу для взаємодії рідкої і газової фаз коли росту монокристалу немає запишемо так:

$$dQ \, dQ_{\text{газ}} = 0, \quad (3.5)$$

де dQ , $dQ_{\text{газ}}$ – зміна кількості легуючої домішки відповідно в рідкій і газовій фазах. Вважаючи, що за час dt зміна концентрації домішки в рідкій фазі складе dC , а початковий об'єм розплаву V_0 не зміниться, запишемо рівняння матеріального балансу:

$$V_0 dC + \alpha F (C - C_p) dt = 0, \quad (3.6)$$

де α – лінійний коефіцієнт випаровування (коефіцієнт міжфазної взаємодії); F – площа поверхні випаровування; C – концентрація в даний момент часу t ; C_p – рівноважна концентрація домішки у розтопі. Враховуючи, що при $t = 0$ $C = C_0$, після розділення в рівнянні (3.6) змінних та інтегрування отримаємо його розв'язок:

$$\frac{C - C_p}{C_0 - C_p} = \exp\left(-\frac{\alpha F}{V_0} t\right). \quad (3.7)$$

Якщо процес вирощування відбувається у вакуумі або в атмосфері інертного газу, то $C_p = 0$, і вираз (3.7) набуває вигляду

$$C(t) = C_0 \exp\left(-\frac{\alpha F}{V_0} t\right). \quad (3.8)$$

Вираз (3.8) показує зміну концентрації домішки C_0 у вихідному завантаженні за час витримки t розплаву до початку кристалізації, тобто кристал починає рости із розплаву, концентрація легкої домішки в якому в $\exp\left(\frac{\alpha F}{V_0} t\right)$ разів менша за початкову концентрацію C_0 .

Отже, якщо легуюча або залишкова домішки є легкими, то при розрахунку легування для отримання кристала із заданим значенням питомого опору необхідно в рівняннях електронейтральності (3.4а) і (3.4б) врахувати випаровування домішки із розплаву у відповідності до (3.7) або (3.8) на початкових етапах вирощування монокристала.

Взаємозв'язок між концентрацією домішки і питомим опором суттєво ускладнюється, якщо домішки дають глибокі рівні, тобто рівень Фермі розташовується поблизу середини забороненої зони напівпровідників, а концентрація електронів чи дірок має значення, близьке до власної концентрації носіїв заряду. У цьому разі при розрахунку легування за значенням питомого опору визначають концентрацію носіїв заряду, знаходять положення рівня Фермі і ступінь йонізації домішок і, розв'язуючи рівняння електронейтральності, визначають повну концентрацію легуючої домішки.

3.2 Розрахунок маси легуючої домішки

Розрахуємо кількість домішки Q_{np} , яку має містити стоп з початковим об'ємом V_0 для вирощування монокристала з питомим опором ρ .

$$Q_{np} = C V_0 = \frac{C_T V_0}{k}, \quad (3.9)$$

де k – ефективний коефіцієнт розподілу домішки; $C_T = kC$.

Маса легуючої домішки m_{np} , яку необхідно ввести у стоп, розраховують так:

$$m_{np} = \frac{Q_{пр}}{N_A} M = \frac{C_T V_0}{k N_A} M, \quad (3.10)$$

де M – молярна маса домішки.

Взагалі, незважаючи на великий об'єм розплаву, маса домішки при малому рівні легування може становити десятки міліграмів. Уведення у стоп такої малої кількості речовини пов'язано з істотною помилкою, зумовленою похибкою зважування або втратою легуючої наважки через випаровування або окислення. Тому кристали напівпровідників найчастіше легують за допомогою лігатури. Лігатура представляє собою напівпровідниковий матеріал у вигляді полі- або монокристалу з високим рівнем легування, близьким до межі розчинності домішки.

Монокристалічну лігатуру отримують, розрізаючи сильнолегований монокристал на пластини завтовшки $1 \div 3$ мм і вимірюючи електричні параметри кожної пластини. Лігатуру для германію і кремнію калібрують для окремих груп марок, наприклад, $0,1 \div 1$; $1 \div 10$, $10 \div 100$ Ом·см. Оскільки концентрація домішки в монокристалічній лігатурі визначається непрямим шляхом, то більш точні результати дає використання полікристалічної лігатури, у якій концентрація домішки визначається прямими методами, наприклад, мас-спектральним аналізом. Полікристалічну лігатуру готують у вигляді гранул з різним вмістом легуючої домішки.

Кількість домішки Q_L , яке вводиться в розплав з допомогою лігатури, має відповідати тій кількості домішки Q_{np} , яке вводиться в розплав за допомогою навіски домішкового компонента,

$$Q_L = C_L V_L = \frac{C_L m_L}{d} = \frac{m_L}{d \mu_L \rho_L}, \quad (3.11)$$

де C_L , μ_L , ρ_L - концентрація, рухливість носіїв заряду, питомий опір лігатури відповідно; m_L , V_L - маса і об'єм лігатури, d - щільність напівпровідника.

З виразу (3.9) отримуємо:

$$Q_{\text{пр}} = \frac{C_{\text{T}}V_0}{k} = \frac{C_{\text{T}}m_{\text{р}}}{kd}, \quad (3.12)$$

де $m_{\text{р}}$ – маса розплаву.

Прирівнюючи (3.11) і (3.12), отримуємо масу лігатури:

$$m_{\text{л}} = \frac{m_{\text{р}}C_{\text{T}}e\mu_{\text{л}}\rho_{\text{л}}}{k} = \frac{m_{\text{р}}C_{\text{T}}}{kC_{\text{л}}} \quad (3.13)$$

Маса лігатури має становити 1-3% від маси вихідного завантаження.

3.3 Визначення виходу придатного матеріалу в пасивних методах вирощування кристалів

Сегрегаційні методи вирівнювання складу кристалів ділять на активні і пасивні. У пасивних методах монокристали із заданою однорідністю розподілу домішки отримують без внесення змін до кристалізаційного процесу, тобто використовують приблизно однорідну за електрофізичними властивостями частину монокристала. Критерієм ефективності процесу є величина, яку називають виходом придатного матеріалу, і яку визначають як відношення маси кристала з необхідними властивостями до його загальної маси.

Як правило, концентрація легуючої домішки C_m або питомий опір кристала ρ мають відрізнятися від необхідних значень концентрації $C_{\text{тр}}$ або питомого опору $\rho_{\text{тр}}$ не більше, ніж на деяку величину β , яку називають допустимим розкидом і відображують у відносних одиницях. Щоб монокристал відповідав заданим вимогам, його склад у будь-якій точці має задовольняти нерівності

$$\left| \frac{C_{\text{T}} - C_{\text{тр}}}{C_{\text{тр}}} \right| \leq \beta. \quad (3.14)$$

У методі Чохральського розподіл домішки вздовж зливку розраховують за рівнянням Галлівера (1.14). Підставляючи в (3.14) замість $C_{\text{T}}=f(g)$ його значення, розраховане за рівнянням Галлівера, маємо:

$$\left| \frac{kC_0(I-g)^{k-1} - C_{\text{тр}}}{C_{\text{тр}}} \right| \leq \beta. \quad (3.15)$$

Розв'язуючи рівняння (3.15) щодо g , отримаємо значення теоретичного виходу придатного монокристала g_β , в якому розкид концентрації носіїв заряду відповідає заданому значенню β :

$$g_\beta = 1 - (I + \beta)^{\frac{1}{k-1}}. \quad (3.16)$$

Вираз (3.16) дозволяє оцінити теоретичний вихід процесу із заданим розкидом β по довжині зливку при різних значеннях коефіцієнта розподілу k .

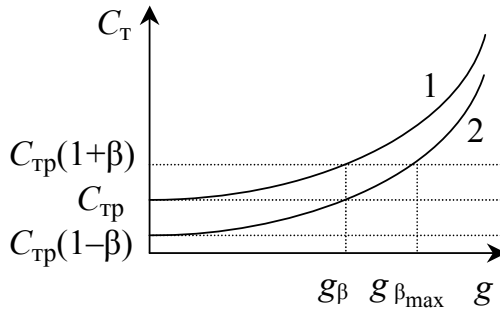
На рис. 3.1 (крива 1) графічно показано визначення величини виходу придатного матеріалу за значенням допустимого розкиду β .

У пасивних методах вирощування вихід матеріалу із заданим значенням розкиду β по довжині зливка невеликий. За малих значень коефіцієнта розподілу (наприклад, при $k=0,1$) і $\beta=10\%$ теоретичний вихід g_β складає всього 10,5%, а при $\beta=5\%$ знижується до 5,1%.

Збільшити вихід придатного матеріалу можна, якщо штучно знизити концентрацію в початковій частині зливка, вважаючи $C_{\text{т}}(g=0)=C_{\text{тр}}(1-\beta)$. Тоді, розв'язуючи рівняння (3.15) щодо g , отримаємо величину максимального теоретичного виходу матеріалу $g_{\beta\text{max}}$:

$$g_{\beta\text{max}} = 1 - \left(\frac{I + \beta}{I - \beta} \right)^{\frac{1}{k-1}}. \quad (3.17)$$

Графічно такий підхід до збільшення виходу придатного матеріалу зображує крива 2 на рис. 3.1.



$$1 - C_T(g=0) = C_{Tр}; \quad 2 - C_T(g=0) = C_{Tр}(1-\beta)$$

Рисунок 3.1 – Вплив концентрації в початковій частині зливка на величину теоретичного виходу

3.4 Порядок виконання роботи

3.4.1 Розшифрувати марку матеріалу, визначити геометричні параметри кристала і питомий опір, користуючись табл. 5 і 6 Додатка А.

За заданим значенням частки по масі y_i визначити концентрацію фонових домішок у розтопі $C_{фон}$.

Розрахувати ефективні коефіцієнти розподілу легуючих і залишкових домішок, відповідні вказаним в завданні умовам вирощування монокристала, використовуючи довідкові дані про рівноважні коефіцієнти розподілу і коефіцієнти дифузії домішки, наведені в табл.3 і 4 Додатка А. Якщо легуюча або фонові домішки є легкою, розрахувати зміну концентрації домішки у розтопі до початку росту кристала, використовуючи лінійні коефіцієнти випаровування домішки, наведені у табл. 7 Додатка А.

Вихідні і розрахункові дані для кожної домішки представити у вигляді таблиці. 3.1.

Таблиця 3.1 – Вихідні і розрахункові дані до завдання 3.4.1

Домішка	y_i (частка по масі)	k_0	D_3 $\text{см}^2/\text{с}$	δ , см	k	K_n	$k_{об}$	C_0 , см^{-3}

3.4.2 Скласти рівняння електронейтральності і розрахувати кон-

центрацію легуючої домішки у розтопі C_0 , яка забезпечує заданий в марці питомий опір матеріалу.

3.4.3 Розрахувати масу легуючої домішки або лігатури для заданої маси розплаву.

3.4.4 Побудувати залежності $C_T=f(g)$ для легуючих і фонових домішок для вказаних у завданні значень швидкості кристалізації f і швидкості обертання кристала щодо тигля. Для розрахунку використати розраховані значення C_0 і дані табл.3.1. Прийняти $C_p=0$, $C_n=0$, $B=1$. Поверхню випаровування F розрахувати за формулою (2.11).

3.4.5 Побудувати графік розподілу концентрації носіїв заряду і питомого опору по довжині кристала, використовуючи дані табл.5 і 6 Додатка А.

3.4.6 Розрахувати теоретичний вихід придатного матеріалу g_T і максимальний теоретичний вихід $g_{T \max}$ для вказаних у завданні умов проведення процесу.

3.5 Вміст звіту

Звіт має містити:

- розрахунок концентрації основних і фонових домішок у кристалі і розтопі вказаної марки матеріалу, формули і приклади розрахунку;
- таблиці вихідних і розрахункових даних;
- розподіл концентрації легуючої і фонові домішок уздовж зливка;
- розподіл концентрації носіїв заряду і питомого опору по довжині зливка;
- розрахунок маси легуючої домішки або лігатури;
- розрахунок теоретичного виходу придатного матеріалу;
- висновки по роботі.

3.6 Контрольні питання і завдання

3.6.1 Які способи визначення концентрації Ви знаєте?

3.6.2 У кремній уведено 10^{-7} частки за масою домішки фосфору. Розрахуйте концентрацію фосфору в атомах на кубічний сантиметр.

3.6.3 Що таке лігатура? У якому випадку для легування монокристалів доцільно використовувати лігатуру?

3.6.4 Що таке фонові домішки? Як врахувати концентрацію фонових домішок при розрахунку умов легування кристалів?

3.6.5 Розрахуйте концентрацію акцепторних і донорних домішок у монокристалі кремнію *p*-типу електропровідності з питомим опором $5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, якщо ступінь компенсації становить 40%.

3.6.6 Розрахуйте концентрацію бору у розтопі кремнію, необхідну для вирощування монокристалу КДБ-1,0, якщо швидкість кристалізації 1 мм/хв , швидкість обертання кристала щодо тигля 90 об/хв . Яку масу домішки або лігатури слід узяти, якщо маса розплаву складає 10 кг ?

3.6.7 Визначте концентрацію миш'яку на початковій ділянці кристала кремнію марки КЕМ-3,6, якщо у вихідний полікристалічний кремній увести фонові домішки бору в кількості $6 \cdot 10^{-9}$ частки за масою і алюмінію $8 \cdot 10^{-8}$ частки за масою. Швидкість кристалізації $1,5 \text{ мм/хв}$, швидкість обертання кристала щодо тигля 80 об/хв .

3.6.8 Розрахуйте масу домішки миш'яку або лігатури, яку необхідно ввести в стоп кремнію в попередньому завданні, якщо маса розплаву складає 8 кг .

3.6.9 Визначте концентрацію домішок у розтопі і масу домішок або лігатури, необхідних для вирощування кристала ГДГ-5,6, на 30% компенсованого сурмою. Маса розплаву 5 кг , швидкість кристалізації $0,5 \text{ мм/хв}$, швидкість обертання кристала щодо тигля 40 об/хв .

3.6.10 Як врахувати випаровування летких фонових і легуючих домішок із розплаву при розрахунку розподілу легуючих домішок по довжині зливка?

3.6.11 Як зміниться концентрація фосфору у розтопі кремнію на початкових етапах росту кристала, якщо плавлення початкового завантаження, прогрівання і оплавлення затравки становить 20 хв , вихід кристала на діаметр - 15 хв . Діаметр тигля 200 мм , діаметр кристала 80 мм . Лінійний коефіцієнт випаровування фосфору $\alpha = 5 \cdot 10^{-4} \text{ см} / \text{с}$.

3.6.12 Визначите ступінь компенсації кристала кремнію, легованого бором і миш'яком, на початку зливка і при $g=0,8$. Концентрація домішки бору у розтопі складає $C_{0B} = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, концентрація домішки миш'яку $C_{0As} = 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Швидкість кристалізації 1 мм/хв , швидкість обертання кристала щодо тигля 100 об/хв . Чи можлива в даному кристалі зміна типу електропровідності?

3.6.13 Поясніть поняття "вихід придатного матеріалу". Як залежить величина виходу придатного матеріалу від заданого значення розкиду параметрів і коефіцієнта розподілу домішки?

3.6.14 Розрахуйте вихід придатного матеріалу при вирощуванні кристала кремнію, легованого сурмою, якщо $\beta=10\%$, швидкість кристалізації 1,5 мм/хв, швидкість обертання кристала щодо тигля 50 об/хв. Чому дорівнює для цих умов вирощування максимально можливий вихід придатного $g_{\beta\max}$?

3.6.15 Як зміниться вихід придатного матеріалу при вирощуванні кристала германію, легованого галієм, якщо швидкість кристалізації збільшити від 0,5 до 5 мм/хв, а розкид параметрів складає $\beta=10\%$; 20%? Швидкість обертання кристала щодо тигля 80 об/хв.

4. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4 „МЕТОД ПОДВІЙНОГО КАПІЛЯРНОГО ТИГЛЯ”

Мета роботи - моделювання умов вирощування кристалів при підживленні з рідкої фази; розрахунок режимів вирощування однорідно легованих кристалів заданої марки при підживленні як чистим розплавом, так і розплавом, який містить легуючу домішку.

4.1 Загальні відомості

Для отримання кристалів з рівномірним розподілом домішки по їх довжині використовують методи підживлення. Підживлення розплаву полягає у рівномірній подачі в робочий об'єм основного компонента кристалізованої речовини або в уведенні в рідку фазу або видаленні з неї атомів легуючої домішки. З урахуванням цього підживлення може бути як позитивним (збільшення концентрації легуючої домішки в робочому розтопі), так і негативним (зменшення концентрації легуючої домішки).

Для збільшення концентрації домішки в робочому об'ємі її вводять у стоп з газової фази (з пари легуючого компонента чи його сполуки) або механічно (скиданням у стоп дозованих наважок лігатури чи розчиненням твердого стрижня). Для зменшення концентрації домішки її видаляють випаровуванням або розбавляють робочий стоп чистим основним компонентом (підживлення чистою речовиною) чи ос-

новною речовиною з меншим вмістом домішки. Обов'язковою умовою є незалежність складу підживлення від складу робочого розплаву.

4.2 Вирощування кристалів методом подвійного капілярного тигля

Метод подвійного капілярного тигля базується на підживленні робочого розплаву з рідкої фази. Використання методу дозволяє або істотно поліпшити однорідність розподілу домішки вздовж зливку або вирощувати однорідно леговані кристали.

Схему установки для вирощування кристалів методом подвійного капілярного тигля наведено на рис. 4.1.

Кристал росте з внутрішнього (робочого) тигля, розташованого усередині загального (підживлювального) тигля, сполученого з робочим тиглем капілярним каналом. У робочому режимі йде безперервний потік речовини через капіляр з підживлювального до робочого об'єму. Домішковий компонент в капілярному каналі переноситься двома потоками: потоком $j_{\text{ж}}$, викликаним механічним переміщенням розплаву між сполученими посудинами

$$j_{\text{ж}} = f_{\text{п}} \Delta C,$$

і потоком $j_{\text{д}}$, зумовленим молекулярної дифузією домішкового компонента,

$$j_{\text{д}} = - D \frac{\Delta C}{l_{\text{кап}}},$$

де $f_{\text{п}}$ – швидкість подачі підживлення;

ΔC – різниця між концентраціями домішки в підживлювальному і робочому об'ємах;

$l_{\text{кап}}$ – довжина капіляра;

D – коефіцієнт дифузії домішки в рідкій фазі.

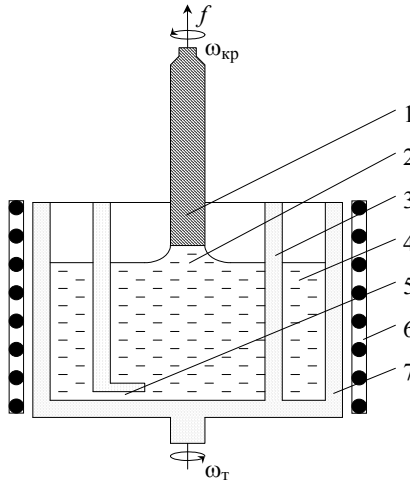
Щоб зберегти склад підживлювального розплаву незалежним від складу робочого розплаву, має виконуватися умова

$$j_{\text{ж}} \gg j_{\text{д}},$$

тобто речовина має переноситися тільки механічним потоком розплаву, а молекулярна дифузія, яка спричинює вирівнювання концентрацій домішки в робочому і підживлювальному тиглях, має бути пригнічена. Тоді для швидкості подачі підживлення $f_{\text{п}}$ буде справедливим вираз

$$f_{\text{п}} \gg \frac{D}{l_{\text{кан}}} .$$

Ця умова легко виконується у випадку довгих і тонких каналів.



1 – кристал; 2 – робочий стоп; 3 – внутрішній (робочий) тигель; 4 – підживлюючий стоп; 5 – капілярний канал; 6 – резистивний нагрівач; 7 – загальний (підживлюючий) тигель

Рисунок 4.1 – Схема установки для вирощування кристалів методом подвійного капілярного тигля

4.3 Розподіл домішки вздовж зливку в методі подвійного капілярного тигля

Для розрахунку розподілу домішки вздовж зливку при використанні підживлення з рідкої фази рівняння матеріального балансу

$$dQ_{\text{г}} + dQ + dQ_{\text{п}} + dQ_{\text{газ}} = 0, \quad (4.1)$$

де dQ_T , dQ , dQ_{II} , $dQ_{газ}$ - зміна в процесі росту кристала кількості атомів легуючої домішки відповідно в твердій, рідкій, підживлювальній і газовій фазах. Рівняння балансу об'ємів, на відміну від (1.11), має враховувати надходження в робочий об'єм підживлювальної речовини, тому воно має бути записане в наступному вигляді:

$$dV_T + dV + dV_{II} = 0, \quad (4.2)$$

де dV_T , dV , dV_{II} - зміна в процесі кристалізації об'єму відповідно твердої, рідкої і підживлювальної фаз.

Для характеристики об'ємних змін рідкої фази в процесі спрямованої кристалізації вводять параметр підживлення B :

$$B = - \frac{dV}{dV_T} = 1 + \frac{dV_{II}}{dV_T}. \quad (4.3)$$

Для консервативних процесів $dV = 0$, тому $B = 0$. Для неконсервативних процесів в загальному випадку $0 < B < 1$.

Визначимо параметр підживлення в методі подвійного капілярного тигля. Зміна об'єму твердої фази dV_T за час dt розрахуємо так:

$$dV_T = fSdt = S_{спільн} v_{оп} dt,$$

де f - швидкість кристалізації; S - поперечний переріз кристала; $S_{спільн}$ - перетин спільного тигля; $v_{оп}$ - швидкість опускання розплаву в тиглях. Зміну об'єму рідкої фази dV за час dt можна розрахувати так:

$$dV = -S_{роб} v_{оп} dt,$$

де $S_{роб}$ - поперечний переріз робочого тигля. Тоді параметр підживлення B обчислюється так:

$$B = - \frac{dV}{dV_T} = - \frac{-S_{роб} v_{оп} dt}{S_{спільн} v_{оп} dt} = \frac{S_{роб}}{S_{спільн}}.$$

Запишемо рівняння матеріального балансу (4.1) в наступному вигляді:

$$kCdV_{\tau} + CdV + VdC + C_{\Pi}dV_{\Pi} + \alpha F(C - C_p)dt = 0. \quad (4.4)$$

Оскільки частка розплаву, що закристалізувався, $g = 1 - \frac{V}{V_0}$, то dg можна виразити в наступному вигляді: $dg = -\frac{dV}{V_0}$. Тоді, враховуючи

(4.2) і (4.3), отримуємо:

$$dV_{\tau} = -\frac{dV}{B} = \frac{V_0}{B} dg;$$

$$dV_{\Pi} = -dV_{\tau} - dV = (B-1)dV_{\tau} = -\frac{1-B}{B}V_0 dg.$$

Оскільки $dV_{\tau} = fSdt = \frac{V_0}{B} dg$, запишемо $dt = \frac{V_0}{BfS} dg$. Підставимо отримані співвідношення в (4.4):

$$\begin{aligned} kC\frac{V_0}{B}dg - CV_0dg + (1-g)V_0dC - C_{\Pi}\frac{1-B}{B}V_0dg + \\ + \frac{\alpha F}{fS}V_0(C - C_p)dg = 0. \end{aligned} \quad (4.5)$$

Враховуючи, що $k_{\Pi} = \frac{\alpha F}{fS}$, $k_{\text{об}} = k_{\Pi} + k$, розділяємо в (4.5) змінні та інтегруємо, беручи до уваги, що при $g = 0$ концентрація домішки у розтопі $C = C_0$. За цих умов розподіл домішки вздовж зливку в методі подвійного капілярного тигля отримуємо в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} C_{\tau} = \frac{k[C_{\Pi}(1-B) + k_{\Pi}C_p]}{k_{\text{об}} - B} + \\ \frac{k[C_0(k_{\text{об}} - B) - C_{\Pi}(1-B) - k_{\Pi}C_p]}{k_{\text{об}} - B} (1-g)^{\frac{k_{\text{об}} - B}{B}}. \end{aligned} \quad (4.6)$$

Розглянемо випадки, коли можливе отримання зливка з однорідним розподілом домішки при використанні методу подвійного капілярного тигля.

Перший випадок: у разі вирощування кристала в вакуумі ($C_p = 0$) і підживлення чистою речовиною (у підживлювальному тиглі концентрація легуючої домішки C_n задають рівною нулю) розподіл домішки вздовж зливку відповідно до (4.6) приводять до наступного виразу:

$$C_T = kC_0(1-g) \frac{k_{об}-B}{B}.$$

Умови однорідного легування записуються так:

а) для легкої домішки ($\alpha \neq 0$) і $C_T = kC_0$, якщо $k_{об} = B$. У методі подвійного капілярного тигля параметр підживлення y_i має значення $0,2 \div 0,5$. Отже, умови однорідного легування можуть бути виконані для тих домішок, у яких

$$k_{об} = k + k_n = \frac{k_0}{k_0 + (1 - k_0) \exp\left(-\frac{f\delta}{D}\right)} + \frac{\alpha F}{fS}$$

відповідає тому ж діапазону значень.

Поверхню випаровування F в методі подвійного капілярного тигля розраховують за формулою $F = \frac{\pi}{4}(D_{раб}^2 - D_{кр}^2)$;

б) для нелегкої домішки ($\alpha = 0$) умова однорідного легування має вигляд: $C_T = kC_0$, якщо $k = B$. Рекомендований діапазон значень $k = 0,2 \div 0,5$.

Другий випадок: якщо підживлювальний стоп містить легувальну домішку, тобто $C_n \neq 0$, умови однорідного легування вибирають так:

а) домішка легка ($\alpha=0$). Якщо ми вибираємо співвідношення між C_0 і C_n з умови $C_0(k_{заг} - B) = C_n(1 - B)$, то тоді відповідно до (4.6) $C_T = \frac{kC_n(1-B)}{k_{заг} - B}$. Дані співвідношення можуть бути реалізовані у ра-

зі, якщо $k_{об} > B$, інакше домішка накопичуватиметься в рідкій фазі;

б) домішка нелегка ($\alpha = 0$). Якщо ми вибираємо співвідношення між C_0 і C_n з умови $C_0(k - B) = C_n(1 - B)$, $C_T = \frac{kC_n(1-B)}{k - B}$. Дані співвідношення також можуть бути реалізовані у разі, якщо $k > B$.

4.4 Порядок виконання лабораторної роботи

4.4.1 Легування монокристалів при вирощуванні у вакуумі ($C_p=0$) з подвійного капілярного тигля при підживленні чистою речовиною ($C_n = 0$).

Розшифрувати марку матеріалу, визначивши матеріал-основу кристала, легувальну домішку, питомий опір ρ і геометричні параметри, якщо вони наведені в марці.

Розрахувати ефективний коефіцієнт розподілу k для заданих швидкості кристалізації f і швидкості обертання кристала щодо тигля ω , використовуючи формулу Бартона-Прима-Сліхтера.

За значенням питомого опору ρ визначити концентрацію легуючої домішки в кристалі C_T . Визначити початкову концентрацію домішки в рідкій фазі $C_0 = C_T/k$. Розрахувати параметр $B = \frac{S_{роб}}{S_{спільн}}$ для

вказаних значень діаметра загального тигля. Отримані дані представити у вигляді табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Дані розрахунку завдання 4.4.1

k_0	k	B_1	B_2	B_3

Використовуючи отримані дані, розрахувати розподіл домішки вздовж зливку для трьох різних значень параметра підживлення B . Розрахувати режим однорідного легування в умовах підживлення чистою речовиною. Розрахункові дані навести у вигляді табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Розрахункові дані завдання 4.4.1

k	$D_{спільн}$	B	C_T	C_0	C_n

4.4.2 Легування монокристалів при вирощуванні у вакуумі з подвійного капілярного тигля при підживленні речовиною, що містить легувальну летючу домішка ($C_n \neq 0$).

Розшифрувати марку матеріалу, визначивши матеріал-основу кристала, легувальну домішку, питомий опір ρ і геометричні параметри,

ри, якщо вони наведені в марці. Розрахувати ефективний коефіцієнт розподілу легуючої домішки k для заданих швидкості кристалізації f і швидкості обертання кристала щодо тигля ω , приведений коефіцієнт випаровування $k_{и}$, узагальнений коефіцієнт розподілу $k_{узг}$. Визначити концентрацію легуючої домішки в кристалі C_T і початкову концентрацію домішки в рідкій фазі $C_0 = C_T/k$.

Розрахувати площу поверхні випаровування $F = \frac{\pi}{4}(D_{роб}^2 - D_{кр}^2)$ і параметр підживлення $B = \frac{S_{роб}}{S_{спільн}}$. Отримані дані представити у вигляді табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Розрахункові дані завдання 4.4.2

k_0	k	$k_{и}$	$k_{об}$	B

Використовуючи отримані дані, розрахувати розподіл домішки вздовж зливу для різних значень концентрації домішки в підживлювальному тиглі $C_{п}$.

Розрахувати режим однорідного легування при підживленні речовиною, яка містить легувальну домішку. Розрахункові дані навести у вигляді табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Розрахунок параметрів режиму однорідного легування

k	$k_{и}$	$k_{об}$	$D_{обш}$	B	C_T	C_0	$C_{п}$

4.5 Зміст звіту

Звіт має містити:

- схему установки для вирощування кристалів методом подвійного капілярного тигля;
- розшифровку марки матеріалу;
- розрахункові і табличні дані, необхідні для розрахунку розподілу домішки вздовж зливу;
- графіки розподілу домішки вздовж зливу при підживленні

- чистою речовиною для різних значень параметру підживлення B ;
- графіки розподілу домішки вздовж зливу при підживленні речовиною, що містить легувальну домішку, при різних значеннях концентрації домішки в підживленні C_{II} ;
- розрахунок умов однорідного легування кристала зазначеної марки при підживленні чистою речовиною ($C_{II} = 0$) і речовиною, що містить легувальну домішку ($C_{II} \neq 0$);
- навести формули, які використовують для розрахунків, вказати розмірності всіх розраховуваних величин;
- висновки по роботі.

4.6 Контрольні запитання і завдання

- 1 Для чого використовуються методи підживлення?
- 2 Які методи підживлення з рідкої фази ви знаєте?
- 3 Які вимоги висувають до розмірів капіляра, який забезпечує незалежність складу підживлення від складу робочого розплаву?
- 4 Що таке параметр підживлення? Як розраховують параметр підживлення у методі подвійного капілярного тигля?
- 5 Чому дорівнює параметр підживлення а) в консервативних методах вирощування кристалів, б) в класичному методі Чохральського?
- 6 Яке співвідношення між концентраціями домішки в робочому і підживлювальному тиглях має дотримуватися для отримання однорідно легованих кристалів при $k > 1$ і $k < 1$?
- 7 Як реалізувати режим однорідного легування в разі підживлення чистою речовиною?
- 8 Як розрахувати поверхню випаровування легкої домішки в методі подвійного капілярного тигля?
- 9 Чому при підживленні чистою речовиною для отримання однорідно легованих кристалів оптимальне значення коефіцієнта розподілу домішки k складає $0,2 \div 0,5$?
- 10 Як зміниться порівняно з методом Чохральського розподіл домішки вздовж зливу при підживленні чистою речовиною при легуванні домішками з малими значеннями коефіцієнта розподілу?
- 11 Розрахуйте діаметри загального і робочого тиглів для вирощування однорідно легованого монокристала при підживленні чистою

речовиною, якщо рівноважний коефіцієнт розподілу домішки $k_0=0,4$. Швидкість кристалізації складає 2 мм / хв, швидкість обертання кристала щодо тигля 50 об/хв, товщина дифузійного шару – 0,05 см. Діаметр кристала – 100 мм.

- 12 Напишіть умови однорідного легування при підживленні розплавом, який містить легуючу домішку.
- 13 Яка концентрація домішки в підживлювальному і робочому тиглях при вирощуванні однорідно легovanого монокристала з концентрацією домішки у твердій фазі $C_T = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$? Коефіцієнт розподілу $k = 0,45$, діаметр загального і робочого тиглів відповідно дорівнює 300 і 200 мм.
- 14 Розрахуйте, чому дорівнюють параметр підживлення і швидкість опускання розплаву в тиглях, якщо швидкість кристалізації складає
- 15 2 мм/хв, діаметр кристала дорівнює 100 мм, діаметр загального тигля - 350 мм, діаметр робочого тигля - 250 мм.
- 16 Розрахуйте концентрацію домішки в робочому і підживлювальному стопах при вирощуванні однорідно легovanого монокристала КЕМ 0,5, якщо діаметри загального і робочого тиглів 200 і 120 мм, швидкість кристалізації складає 1 мм/хв, швидкість обертання кристала щодо тигля - 50 об/хв.

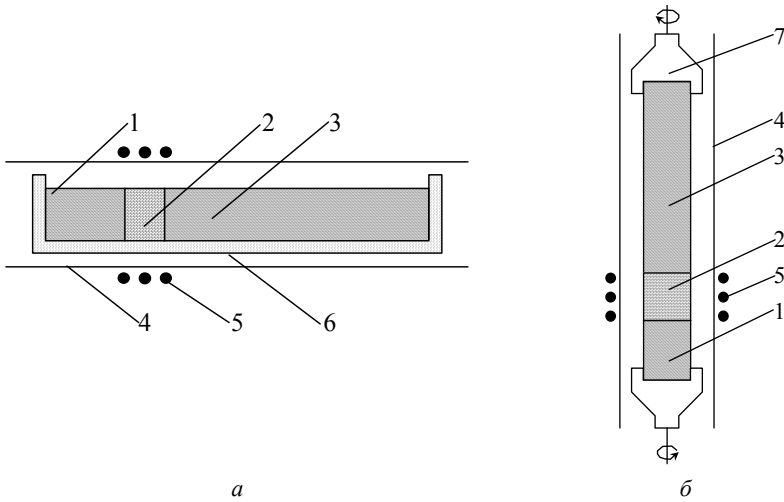
5. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5 „ЗОННА ПЛАВКА”

Мета роботи - моделювання умов очищення і вирощування кристалів методом зонної плавки; розрахунок режимів вирощування однорідно легovanих кристалів заданої марки.

5.1 Метод зонної плавки

Метод зонної плавки використовують для очищення матеріалів, а також для отримання однорідно легovanих зливків. Суть методу зонної плавки полягає в наступному. Очищений матеріал у формі дрібних шматків або заздалегідь підготовленого полікристалічного зливку поміщають у тигель, розташований у герметичній камері, яку наповню-

ють захисним газом. За допомогою високочастотного індуктора створюється вузька розтоплена зона шириною $30 \div 50$ мм, яку повільно переміщують вздовж зливку (рис. 5.1, а). При безконтейнерному (безтигельному) варіанті зонної плавки матеріал у формі стрижня поміщають вертикально (рис. 5.1, б). Вузька розплавлена зона утримується між твердими частинами зливку завдяки силам поверхневого натягу.



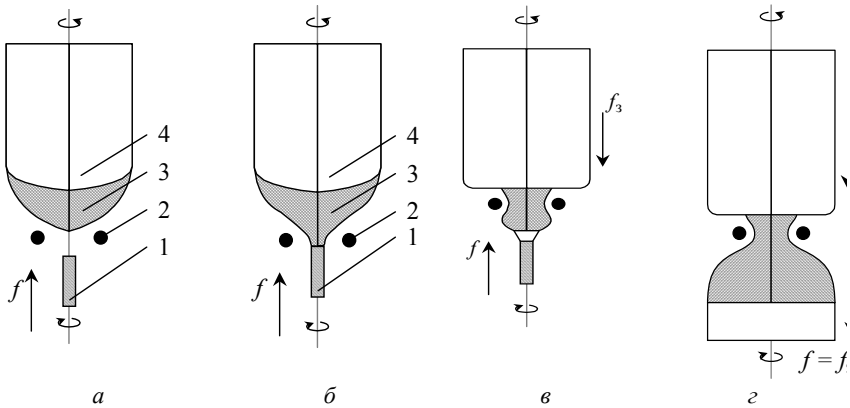
а – горизонтальне плавлення з використанням тигля; б – вертикальне безтигельне зонне плавлення; 1 – кристал; 2 – розтоплена зона; 3 – вихідний матеріал; 4 – стінки герметичної камери; 5 – високочастотний індуктор; 6 – тигель; 7 – тримач кристала
Рисунок 5.1 – Схема виробництва і очищення кристалів методом зонного плавлення

Максимальна довжина розплавленої зони визначається силами поверхневого натягу, які утримують стовпчик розплаву без розриву рідкої зони. Довжина зони, при якій вона залишається стабільною, тим більше, чим більше відношення поверхневого натягу розплаву до його густини. На стабільність розплавленої зони впливає і напрямок її руху щодо заготовки, яку очищують. Встановлено, що найбільша стабільність розплавленої зони забезпечується при її русі по кристалу знизу вгору.

Збільшити висоту і, відповідно, діаметр розплавленої зони можна збудженням у розтопі підтримуючої електродинамічної сили, зокрема, пропусканням струму через зразок, поміщений у магнітне поле.

Підтримуючі сили виникають також при використанні високочастотного електромагнітного поля з вихровими струмами у розтопі. Однак для речовин, які мають відносно високу густину, метод вертикального безтигельного плавлення має обмежене застосування.

Суттєво підвищити діаметр монокристала, вирощеного безтигельним зонним плавленням можна за допомогою індуктора, діаметр якого менше за діаметр стрижня, який перетоплюється (рис. 5.2). Цей метод більш поширений у виробництві монокристалів кремнію.



a – утворення краплі розтопленого кремнію на торці завантажувального стрижня;
б – змочування затравки; *в* – початкова стадія утворення розплавленої зони; *г* – вирощування кристала в усталеному режимі; 1 – монокристалічна затравка; 2 – високочастотний індуктор; 3 – розігріта область завантажувального стрижня, 4 – завантажувальний полікристалічний стрижень

Рисунок 5.2 – Вирощування монокристала кремнію методом безтигельної зонної плавлення з використанням високочастотного індуктора, діаметр якого менше за діаметр стрижня

При топленні у вакуумі крім витіснення домішки в рідку фазу відбувається її випаровування із розплаву. Відсутність кварцового тигля і графітового нагрівача дозволяють отримувати безтигельним зонним плавленням кристали більш високого ступеню чистоти, ніж методом Чохральського. Очищення від кисню відбувається навіть після одного проходу розплавленої зони. Плавлення у водні використовують у тих випадках, коли проводять легування з газової фази, газом-

носієм є водень. Застосування даного методу в технології виробництва монокристалів кремнію дозволило збільшити діаметр монокристалів від 25 мм до 100÷125 мм.

5.2 Розподіл домішки вздовж зливка при зонній плавці

Метод зонної плавки є консервативним методом, тобто методом, в якому об'єм рідкої фази не змінюється в процесі вирощування. Для розрахунку розподілу домішки вздовж зливку для цього процесу рівняння матеріального балансу можна записати аналогічно (4.1):

$$dQ_T + dQ + dQ_{\Pi} + dQ_{\text{газ}} = 0, \quad (5.1)$$

де dQ_T , dQ , dQ_{Π} , $dQ_{\text{газ}}$ - зміна кількості атомів легуючої домішки в процесі росту кристала відповідно у твердій, підживлювальній рідкій і газовій фазах.

Рівняння балансу об'ємів має враховувати надходження в робочий об'єм підживлювальної речовини і сталість об'єму рідкої фази ($V = \text{const}$, $dV = 0$), тому запишемо його в наступному вигляді:

$$dV_T + dV_{\Pi} = 0. \quad (5.2)$$

Беручи до уваги, що $C_T = kC$, $dV_T = fSdt$,

де f - швидкість кристалізації, S - поперечний переріз кристала, а також вираз (5.2), перепишемо рівняння матеріального балансу (5.1):

$$kCdV_T + V_0dC - C_{\Pi}dV_T + \frac{\alpha F}{fS} (C - C_p)dV_T = 0. \quad (5.3)$$

Відповідно до (2.5) і (2.6) представимо (5.3) в наступному вигляді:

$$V_0dC + (k_{об}C - C_{\Pi} - k_{и}C_p) dV_T = 0. \quad (5.4)$$

У результаті розділення змінних та інтегрування з урахуванням того, що при $V_T = 0$ $C = C_0$, отримаємо розв'язок (5.4):

$$C_{\tau} = \frac{k(C_{\Pi} + k_{\theta}C_p)}{k_{заг}} + \frac{k(k_{заг}C_0 - C_{\Pi} - k_{\theta}C_p)}{k_{заг}} \exp\left(-k_{заг} \frac{V_{\tau}}{V_0}\right), \quad (5.5)$$

де C_{Π} - концентрація домішки у перетоплюваній полікристалічній заготовці, яка має перетин S_{Π} .

За виразом (5.5) можна визначити розподіл домішки вздовж зливку в умовах консервативного процесу.

У методі зонного плавлення $V_{\tau} = Sx$ - об'єм закристалізованої твердої фази, де S - поперечний переріз кристала, x - довжина закристалізованого зливка; $V_0 = S_p L_0$ - об'єм рідкої фази, де S_p - перетин рідкої зони, L_0 - довжина розплавленої зони. Зазвичай при зонному нагріванні використовують тиглі і вихідні заготовки з постійним перерізом, тому вважатимемо $S = S_p = S_{\Pi}$ і, враховуючи, що C_0 - концентрація домішки в першій розтопленій зоні, запишемо рівняння (5.5) такі:

$$C_{\tau} = \frac{k(C_{\Pi} + k_{\theta}C_p)}{k_{заг}} + \frac{k(k_{заг}C_0 - C_{\Pi} - k_{\theta}C_p)}{k_{заг}} \exp\left(-k_{заг} \frac{x}{L_0}\right). \quad (5.6)$$

Розподіл концентрації домішки в кристалі можна виразити в наведених координатах, які є відстанню від початку зливку, яка виражена в одиницях довжини розплавленої зони: $a = x/L_0$ - зведена довжина кристала, $A = L/L_0$ - повна зведена довжина кристала.

5.3 Зонне очищення

Спосіб зонної плавки з проходженням розплавленої зони через однорідний в середньому зразок зазвичай реалізується при очищенні матеріалу. Однорідний розподіл домішки забезпечується при поміщенні подрібненого вихідного матеріалу в тигель чи човник. У цьому випадку $C_{\Pi} = C_0$, при проведенні процесу у вакуумі $C_p = 0$ і рівняння (5.6) можна записати в наступному вигляді:

а) для легкої домішки ($\alpha \neq 0$):

$$C_{\tau} = \frac{k}{k_{заг}} C_0 \left[1 + (k_{заг} - 1) \exp\left(-k_{заг} \frac{x}{L_0}\right) \right]. \quad (5.7)$$

При легуванні напівпровідника легкою домішкою зміна її концентрації в розплавленій зоні залежатиме від швидкості випаровування. Якщо швидкість випаровування дуже мала, то домішка в рідкій

фазі накопичуватиметься в основному за рахунок витиснення її у стоп відповідно до ефективного коефіцієнту розподілу. При збільшенні швидкості випаровування в атмосферу йтиме все більше і більше домішки. Нарешті, коли кількість домішки, яка випаровується, і кількість домішки, яка витісняється у стоп рухомим фронтом кристалізації зрівняються (це буде відповідати умові $k_{\text{зар}}=1$), концентрація домішки в розтопленій зоні має постійне значення C , що дозволить отримати постійну концентрацію домішки по довжині кристала $C_T = \frac{k}{k_{\text{зар}}} C_0$;

б) для нелеткої домішки ($\alpha = 0$):

$$C_T = C_0 \left[1 + (k - 1) \exp\left(-k \frac{x}{L_0}\right) \right]. \quad (5.8)$$

Як бачимо з (5.7) і (5.8), ефективність процесу очищення залежатиме від значення коефіцієнта розподілу k , швидкості руху зони f (впливає на k), а також від довжини розплавленої зони L_0 .

Для поліпшення процесу очищення проводять кілька послідовних проходів розплавленої зони без перезавантажування очищуваного кристала. Зі збільшенням кількості проходів початкова і кінцева ділянки кривої розподілу домішки стають більш крутими. При цьому кінцеві ділянки лягають на пряму лінію, яку називають лінією граничного, або кінцевого розподілу. При його досягненні подальше відтиснення домішки в кінцеву частину зливку припиняється.

Кількість проходів розплавленої зони n , при якій настає кінцевий розподіл, розраховують за допомогою наближеного рівняння

$$n_k = 2L/L_0 + (1 \dots 2), \quad (5.9)$$

де L і L_0 - довжина відповідно очищуваного кристала і розплавленої зони. Як випливає з рівняння (5.9), кількість проходів, при якій настає кінцевий розподіл, залежить від відношення L/L_0 , тобто від відповідної довжини розплавленої зони.

На практиці кількість проходів рідко доводять до кількості, при якій спостерігається кінцевий розподіл. Необхідного ступеню чистоти досягають після 5-8 послідовних проходів. При більшій кількості проходів очищення не поліпшується, оскільки ефект відтиснення домішок

перекривається їх надходженням у стоп із зовнішнього середовища (атмосфери і контейнера), який зростає пропорційно часу контакту.

5.4 Прохід легуючої зони через чистий вихідний зразок

Частка однорідної частини кристала, отриманої після проходження легуючої зони через нелегований вихідний зразок, в загальному випадку незначна, і вихід придатного матеріалу в цьому разі незначний. Тим не менш, за певних умов одноразовий прохід розплавленої зони може бути використаний для вирощування кристалів з приблизно однорідним розподілом домішки по довжині.

У стоп першої зони, яка створюється в початковій частині нелегованого кристала ($C_{\text{п}} = 0$), поміщають розраховану кількість домішки ($C_0 = 0$). Потім зону переміщують по кристалу, в результаті чого домішка розподіляється по довжині кристала. Якщо процес проводять у вакуумі, тобто $C_{\text{р}} = 0$, то з (5.6) можна отримати закон розподілу домішки при проходженні легуючої зони через чистий вихідний зразок:

а) для леткої домішки ($\alpha \neq 0$):

$$C_{\text{т}} = kC_0 \exp\left(-k_{\text{заг}} \frac{x}{L_0}\right); \quad (5.10)$$

б) для нелеткої домішки ($\alpha = 0$):

$$C_{\text{т}} = kC_0 \exp\left(-k \frac{x}{L_0}\right). \quad (5.11)$$

Концентрація домішки до кінця кристала змінюється тим менше, ніж менше значення має ефективний коефіцієнт розподілу. Тому даний метод застосовують тільки для легуючих домішок з $k \ll 1$.

5.5 Метод цільового завантаження

Суть методу цільового завантаження полягає в створенні необхідного співвідношення між концентраціями C_0 , $C_{\text{р}}$, $C_{\text{п}}$ (або C_0 і $C_{\text{п}}$, якщо процес проводять у вакуумі) для створення постійної концентрації домішки в твердій фазі.

Якщо домішка летка ($\alpha \neq 0$), то перепишемо (5.6) такі:

$$C_T = \frac{k}{k_{заг}} \left[C_{II} + k_{\epsilon} C_p + (k_{заг} C_0 - C_{II} - k_{\epsilon} C_p) \exp\left(-k_{заг} \frac{x}{L_0}\right) \right]. \quad (5.12)$$

Для досягнення стаціонарної концентрації леткої домішки необхідно виконати наступну умову:

$$k + \frac{\alpha F}{fS} \left(1 - \frac{C_p}{C_0} \right) = \frac{C_{II}}{C_0}. \quad (5.13)$$

При дотриманні умови (5.13) з виразу (5.12) отримаємо:

$$C_T = \frac{k}{k_{заг}} (C_{II} + k_{\epsilon} C_p) = k \frac{fS C_{II} + \alpha F C_p}{fS k + \alpha F} = k C_0. \quad (5.14)$$

У разі проведення процесу у вакуумі ($C_p = 0$) вираз (5.6) буде перетворено так:

$$C_T = \frac{k}{k_{заг}} C_{II} + \frac{k}{k_{заг}} (k_{заг} C_0 - C_{II}) \exp\left(-k_{заг} \frac{x}{L_0}\right). \quad (5.15)$$

Тоді умови однорідного легування спростуються: якщо $k_{заг} C_0 = C_{II}$, то

$$C_T = \frac{k}{k_{заг}} C_{II}.$$

Керувати складом твердої фази можна змінюючи швидкість кристалізації f або поверхню випаровування F . Зауважимо, що при безтигельному зонному топленні поверхню випаровування розраховують за формулою $F = \pi D_{кр} L_0$. У разі горизонтального варіанту тигля $F = D_{кр} L_0$.

Якщо при топленні у розтопі умова $k_{заг} C_0 = C_{II}$ не виконується і вихідна концентрація домішки у розтопі $C_{вих} > C_0 = C_{II} / k_{заг}$, то її вміст у зоні можна знизити випаровуванням; необхідний час витримки розраховують за допомогою співвідношення

$$t = \frac{V}{\alpha F} \ln \frac{C_{вих}}{C_0}. \quad (5.16)$$

Якщо ж спостерігається зворотна картина, тобто $C_{вих} < C_0 = C_{II} / k_{заг}$,

то для досягнення необхідної концентрації домішки у розтопі і, відповідно, в твердій фазі, процес вирошування необхідно провести із швидкістю вищою, ніж яка визначається критерієм $k_{\text{зар}}C_0 = C_{\text{п}}$. В результаті зменшуються втрати домішки із розплаву за рахунок випаровування і збільшується її потрапляння у стоп із заготівки, тобто поступово домішка накопичується в рідкій фазі.

Коли кристалізацію проводять в атмосфері пари легуючої домішки ($C_p \neq 0$) і початкова її концентрація $C_{\text{вих}}$ менше значення C_0 , що відповідає умові $k_{\text{зар}}C_0 = C_{\text{п}}$, стоп насичують домішкою з парової фази коли кристалізації немає, а час витримки зони розраховують за рівнянням

$$t = \frac{V}{\alpha F} \ln \frac{C_p - C_{\text{вих}}}{C_p - C_0}. \quad (5.17)$$

Якщо домішка нелетка ($\alpha = 0$), то в разі проведення процесу у вакуумі ($C_p = 0$) вираз (5.6) перетворюється так:

$$C_{\text{т}} = C_{\text{п}} + (kC_0 - C_{\text{п}}) \exp\left(-k \frac{x}{L_0}\right). \quad (5.18)$$

Умови однорідного легування записуються так: якщо концентрація домішки в початковій зоні $C_0 = C_{\text{п}}/k$, то $C_{\text{т}} = C_{\text{п}}$.

5.6 Порядок виконання роботи

5.6.1 Проаналізувати процес проходження зони через однорідний в середньому зразок ($C_0 = C_{\text{п}}$).

Побудувати розподіл легуючої домішки по довжині зливку для трьох домішок з різним значенням коефіцієнта розподілу в разі проведення процесу у вакуумі ($C_p = 0$). Вибрати спосіб зонного плавлення. Значення рівноважного коефіцієнта розподілу k_0 , коефіцієнта дифузії домішки в рідкій фазі D , лінійного коефіцієнта випаровування α обирають з баблиць табл. А.3, А.4, А.7.

Для нелетких домішок лінійний коефіцієнт випаровування α прийняти рівним нулю. Параметр B задати відповідно до його значення для консервативного процесу. Інші параметри технологічного процесу вказані в завданні. Для кожної домішки навести табличні значення k_0 , D , α , а також розрахункові значення k і δ .

Побудувати розподіл вказаної легуючої домішки в заданому матеріалі в разі різної довжини розплавленої зони L_0 . Параметри технологічного процесу і табличні дані узяти з 1 завдання.

Побудувати розподіл легуючої домішки в заданому матеріалі при різних швидкостях проходження зони f . Параметри процесу і табличні дані узяти з 1 завдання. Для всіх випадків вказати розрахункове значення k .

Проаналізувати вплив процесу випаровування домішки на процес очищення. Для вказаного матеріалу і легкої домішки провести два процеси: перший – у припущенні нелетючості домішки (лінійний коефіцієнт випаровування α прийняти рівним нулю); другий – при значенні α відповідно до даних табл. А.7. Поверхню випаровування розрахувати за формулою $F = \pi D_{\text{кр}} L_0$ для безтигельного зонного плавлення, в разі горизонтального варіанту тигля – за формулою $F = D_{\text{кр}} L_0$. Параметри технологічного процесу узяти з 1 завдання. Значення рівноважного коефіцієнта розподілу k_0 , коефіцієнта дифузії домішки в рідкій фазі D , лінійного коефіцієнта випаровування α узяти з табл. А.3, А.4, А.7. Побудувати розподіл домішки уздовж зливку для обох випадків. Навести розрахункові значення, k , $k_{\text{н}}$, $k_{\text{заг}}$ і F .

5.6.2 Проаналізувати проходження легуючої зони через чистий вихідний зразок. Для того щоб задати значення C_0 , необхідно розшифрувати марку матеріалу: визначити матеріал-основу, легуючу домішку, питомий опір ρ , діаметр кристала. За значенням ρ визначити $C_{\text{т}}$, потім розрахувати значення $C_0 = C_{\text{т}}/k$. $C_{\text{п}}$ прийняти рівним нулю. Параметри процесу f і ω , значення $D_{\text{кр}}$, L_0 узяти з 1 завдання.

Рівноважний коефіцієнт розподілу k_0 вказаної домішки, коефіцієнти дифузії D і випаровування α узяти з табличних даних (табл. 3, 4, 7 Додатка А). Процес провести у вакуумі.

Побудувати розподіл домішки уздовж зливку для вказаних марок матеріалів.

Графічно провести оцінку виходу придатного матеріалу для заданого значення розкиду питомого опору по довжині зливку.

5.6.3 Дослідження методу цільового завантаження. Потрібно запропонувати умови вирощування однорідно легованого матеріалу заданої марки методом цільового завантаження. Процес провести у вакуумі. Параметри процесу f і ω , значення $D_{\text{кр}}$ і L_0 узяти з 1 завдання.

Навести математичне обґрунтування даного методу, розрахункові значення концентрацій C_0 , C_{II} , k , k_B , $k_{зар}$ і F .

5.7 Зміст звіту

Звіт з лабораторної роботи має містити:

- схему обраного варіанту зонного плавлення ;
- отримані графіки, вихідні і розрахункові дані по кожному пункту завдання, а також формули, використані для розрахунку;
- висновки за результатами виконаної роботи.

5.8. Контрольні запитання і завдання

5.8.1 Як очищають матеріал методом зонного плавлення?

5.8.2 Як математично описати розподіл домішки уздовж зливку в методі зонного очищення? Як впливають на процес очищення швидкість руху і довжина розплавленої зони?

5.8.3 Фонові домішки бор і олово містяться у вихідному полікристалічному кремнії в однаковій концентрації. Від якої з них кремній легко очистити методом зонного плавлення?

5.8.4 Як розраховують кінцеву кількість проходів розплавленої зони? Чому кількість проходів обмежена?

5.8.5 Як вирощують монокристали кремнію великого діаметру методом зонного плавлення?

5.8.6. Порівняйте електрофізичні властивості кристалів кремнію, вирощених методом безтигельного зонного плавлення і методом Чохральського.

5.8.7 Чому метод зонного плавлення не використовують для вирощування монокристалів германію великого діаметру?

5.8.8 Розрахуйте зміну концентрації домішки галію в монокристалі кремнію при зонному очищенні на початку зливку і на відстані $4L_0$ від початку при збільшенні швидкості руху зони від 0,5 до 5 мм/хв. Концентрація галію у вихідній полікристалічній заготівці складає $5 \cdot 10^{-7}$ частки маси. Товщина дифузійного шару $\delta=0,001$ см, довжина розплавленої зони $L_0 = 3$ см, довжина зливку $L = 30$ см.

5.8.9 Порівняйте концентрацію алюмінію на відстані $0,3L$ і $0,8L$ від початку зливку після очищення кремнію методом безтигельного

зонного плавлення (одноразовий прохід розплавленої зони) і при вирощуванні монокристалів методом Чохральського. Вміст домішки у вихідному матеріалі складає $5 \cdot 10^{-6}$ частки маси, швидкість кристалізації $2,5$ мм/хв. Для зонного очищення товщину дифузійного шару δ прийняти рівною $0,001$ см, довжина розплавленої зони $L_0 = 2,5$ см, довжина зливку $L = 40$ см. Для методу Чохральського швидкість обертання кристала щодо тигля прийняти рівною 100 об/хв.

5.8.10 У якому випадку одноразовий прохід легуючої зони можна використати для отримання однорідно легуваних монокристалів? Поясніть принцип однорідного легування монокристалів методом зонного плавлення, якщо вихідний зразок не містить легуючої домішки. Наведіть вихідні умови і математичний вираз для розподілу домішки.

5.8.11 Розрахуйте розподіл питомого опору і визначите тип електропровідності германію, отриманого проходженням легуючої зони через чистий вихідний зразок. Легуюча зона містить 10^{-6} частки маси галію і $4 \cdot 10^{-6}$ частки маси сурми. Швидкість руху зони 1 мм/хв, товщина дифузійного шару $\delta = 0,1$ см, довжина розплавленої зони $L_0 = 3$ см, довжина зливку $L = 48$ см.

5.8.12 Як можна реалізувати метод цільового завантаження?

5.8.13 Розрахуйте масу домішки галію, яку необхідно ввести в першу розтоплену зону для отримання однорідно легуваного зливку германію в умовах цільового завантаження, якщо концентрація домішки в підживлювальній частині зливку $C_n = 10^{17}$ см $^{-3}$. Діаметр зливка 80 мм, швидкість руху зони $0,5$ мм/хв, товщина дифузійного шару $\delta = 0,1$ см, довжина розплавленої зони $L_0 = 4$ см.

5.8.14 Запропонуйте умови вирощування однорідно легуваного кристала кремнію марки БКЕФ-20-100 у вакуумі. Визначите концентрацію домішки у вихідній заготівці C_v , швидкість руху розплавленої зони, час витримки першої розплавленої зони t до початку вирощування для реалізації методу цільового завантаження. Довжину розплавленої зони прийняти рівною 3 см, швидкість руху зони $1,5$ мм/хв, товщина дифузійного шару $\delta = 0,001$ см.

5.8.15 Визначте концентрацію домішки фосфору в заготівці кремнію і в першій розтопленій зоні при вирощуванні методом цільового завантаження однорідно легуваного монокристалів з концентрацією фосфору $C_T = 1 \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$, якщо швидкість кристалізації 3 мм/хв, діаметр монокристалів 80 мм, довжина розплавленої зони $L_0 = 3$ см.

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. **Соколов, І. А.** Расчеты полупроводниковой технологии [Текст] / І. А. Соколов. – М.: Металлургия, 1994. – 176 с.
6. **Пичугин, І. Г.** Технология полупроводниковых приборов [Текст] / І. Г. Пичугин, Ю. М. Таиров. – М.: Высшая школа, 1984. – 288 с.
7. **Крапухин, В. В.** Физико-химические основы технологии полупроводниковых материалов [Текст] / В. В. Крапухин, І. А. Соколов, Г. Д. Кузнецов. – М.: Металлургия, 1982. – 352 с.
8. **Нашельский, А. Я.** Технология полупроводниковых материалов [Текст] / А. Я. Нашельский. – М.: Металлургия, 1987. – 336 с.
9. **Антипов, Б. Л.** Материалы электронной техники: Задачи и вопросы [Текст] / Б. Л. Антипов, В. С. Сорокин, В. А. Терехов. – СПб.: Лань, 2001. – 208 с.
10. **Горелик С. С.** Материаловедение полупроводников и диэлектриков [Текст] / С. С. Горелик, М. Я. Дашевский. – М.: МИСиС, 2003. – 483 с.
11. **Бурик, І. П.** Технологічні основи виготовлення елементів напівпровідникових інтегральних мікросхем [Текст] / І. П. Бурик. – Суми : Сумський державний університет, 2015. – 65 с.
12. **Пасынков, В. В.** Материалы электронной техники [Текст] / В. В. Пасынков, В. С. Сорокин. – СПб.: Издательство «Лань», 2001. – 368 с.

Додаток А

Нормативно-довідкові параметри матеріалів і технологічних процесів

Таблиця А.1 – Термодинамічні характеристики Si, Ge і деяких

домішок

Елемент	$T_{\text{Топль}}$, К	$\Delta H_{\text{Топль}}$, кДж/моль	Елемент	$T_{\text{Топль}}$, К	$\Delta H_{\text{Топль}}$, кДж/моль
Si	1685	50,61	Cu	1357	13,02
Ge	1210	33,83	Bi	544	11,02
Al	933	10,69	Ag	1234	11,95
Ga	303	5,66	Li	459	2,89
In	430	3,24	Sn	505	7,08
P	317	4,69	Zn	693	6,68
As	1090	27,686	Pb	600	4,78
Sb	904	20,38	Ni	1728	17,63
Au	1338	12,65	Fe	1808	13,02

Таблиця А.2 – Параметри міжатомної взаємодії в твердій і рідкій фазах для деяких бінарних систем на базі кремнію і германію

Елемент	Si		Ge	
	$\alpha^{\text{ТВ}}$, кДж/моль	$\alpha^{\text{Ж}}$, кДж/моль	$\alpha^{\text{ТВ}}$, кДж/моль	$\alpha^{\text{Ж}}$, кДж/моль
Al	63,16	$-17,33 + 5,1 \cdot 10^{-3}T$	16,61	$-22,19 + 13,2 \cdot 10^{-3}T$
Ga	49,13	$13,6 - 3,47 \cdot 10^{-3}T$	6,41	-0,62
In	123,44	$47,9 - 14,11 \cdot 10^{-3}T$	67,42	$6,57 - 2,34 \cdot 10^{-3}T$
P	8,0	-	16,5	-
As	24,9	$-210,0 + 135,8 \cdot 10^{-3}T$	32,36	$-23,46 + 17,43 \cdot 10^{-3}T$
Sb	58,0	$13,77 + 6,75 \cdot 10^{-3}T$	52,13	$11,05 - 8,29 \cdot 10^{-3}T$
Au	70,41	$-81,87 + 43,0 \cdot 10^{-3}T$	106,6	$-2,038 + 4,27 \cdot 10^{-3}T$
Cu	206,09	$49,86 + 30,09 \cdot 10^{-3}T$	120,66	$-30,8 + 32,1 \cdot 10^{-3}T$
Bi	125,47	$62,12 - 8,62 \cdot 10^{-3}T$	103,8	$23,02 - 6,24 \cdot 10^{-3}T$
Ag	154,14	$-33,11 + 31,94 \cdot 10^{-3}T$	126,63	$-23,02 + 29,8 \cdot 10^{-3}T$
Li	46,33	-9,72	52,72	-5,213
Sn	68,10	$34,09 - 6,28 \cdot 10^{-3}T$	44,62	$7,03 + 4,52 \cdot 10^{-3}T$
Zn	160,75	$17,91 + 2,77 \cdot 10^{-3}T$	71,76	-2,95
Pb	-	-	98,71	$36,75 - 17,08 \cdot 10^{-3}T$
Ni	-	-	131,4	-3,07

Таблиця А.3 – Рівноважні коефіцієнти розподілу k_0 домішок

Домішка	Si	Ge	GaAs	GaP	InP
Кремній	–	5,5	0,14	0,6	$5,5 \cdot 10^{-1}$
Германій	0,33	–	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	0,3
Вуглець	1,0	–	0,8	$3 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-1}$
Олово	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-2}$	–
Свинець	–	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$	–	–
Бор	0,8	17	–	–	–
Алюміній	$3 \cdot 10^{-3}$	$7,3 \cdot 10^{-2}$	3,0	–	–
Галій	$8 \cdot 10^{-3}$	$8,7 \cdot 10^{-2}$	–	–	–
Індій	$4 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-3}$	–	–
Фосфор	0,35	$8 \cdot 10^{-2}$	3,0	–	–
Миш'як	0,3	$2 \cdot 10^{-2}$	–	–	–
Сурма	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	–	–
Вісмут	$7 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-3}$	–	–
Літій	$1 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-3}$	–	–	–
Мідь	$4 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	–
Срібло	$10^{-4} - 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-3}$	–	–
Золото	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$	–	–	–
Берилій	–	–	3,0	1,25	–
Цинк	$1 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-4}$	0,42	0,25	–
Кисень	0,5	0,1	–	–	–
Сірка	$1 \cdot 10^{-5}$	–	0,5	$2,5 \cdot 10^{-1}$	0,47
Селен	$1 \cdot 10^{-8}$	–	0,4	$1,5 \cdot 10^{-1}$	–
Теллур	$8 \cdot 10^{-6}$	–	$4,6 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-2}$	0,4
Хром	$1 \cdot 10^{-8}$	–	$7,0 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-4}$
Марганець	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$
Залізо	$6 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-3}$

Таблиця А.4 – Коефіцієнти дифузії D [см²/с] основних легуючих домішок у розплавах германію і кремнію при температурі плавлення

Домішковий елемент	Германій	Кремній
Бор	$3 \cdot 10^{-4}$	$2,4 \cdot 10^{-4}$
Алюміній	–	$8,5 \cdot 10^{-5}$
Галій	$7,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$
Індій	$1,0 \cdot 10^{-4}$	–
Фосфор	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$
Миш'як	$1,26 \cdot 10^{-4}$	$2,4 \cdot 10^{-4}$
Сурма	$5,5 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$

Примітка. За відсутності надійних даних про коефіцієнти дифузії домішок в розплаві для розрахунку слід використати значення $D = 10^{-4}$ см²/с.

Таблиця А.5 – Співвідношення між питомим опором і концентрацією носіїв заряду в кремнії n - і p -типу електропровідності

n -тип				p -тип			
ρ , Ом·см	n , см ⁻³	ρ , Ом·см	n , см ⁻³	ρ , Ом·см	p , см ⁻³	ρ , Ом·см	p , см ⁻³
0,003	$2,41 \cdot 10^{19}$	7,2	$6,71 \cdot 10^{14}$	0,005	$2,08 \cdot 10^{19}$	7,0	$1,85 \cdot 10^{15}$
0,005	$1,27 \cdot 10^{19}$	7,4	$6,52 \cdot 10^{14}$	0,008	$1,17 \cdot 10^{19}$	7,2	$1,79 \cdot 10^{15}$
0,010	$4,76 \cdot 10^{18}$	7,6	$6,35 \cdot 10^{14}$	0,009	$1,01 \cdot 10^{19}$	7,4	$1,75 \cdot 10^{15}$
0,020	$1,51 \cdot 10^{18}$	7,8	$6,18 \cdot 10^{14}$	0,010	$8,84 \cdot 10^{18}$	7,6	$1,70 \cdot 10^{15}$
0,030	$7,22 \cdot 10^{17}$	8,0	$6,02 \cdot 10^{14}$	0,020	$3,35 \cdot 10^{18}$	7,8	$1,66 \cdot 10^{15}$
0,040	$4,25 \cdot 10^{17}$	8,2	$5,87 \cdot 10^{14}$	0,030	$1,78 \cdot 10^{18}$	8,0	$1,61 \cdot 10^{15}$
0,050	$2,85 \cdot 10^{17}$	8,4	$5,73 \cdot 10^{14}$	0,040	$1,11 \cdot 10^{18}$	8,2	$1,57 \cdot 10^{15}$
0,060	$2,08 \cdot 10^{17}$	8,6	$5,59 \cdot 10^{14}$	0,050	$7,76 \cdot 10^{17}$	8,4	$1,53 \cdot 10^{15}$
0,070	$1,61 \cdot 10^{17}$	8,8	$5,47 \cdot 10^{14}$	0,060	$5,67 \cdot 10^{17}$	8,6	$1,49 \cdot 10^{15}$
0,080	$1,29 \cdot 10^{17}$	9,0	$5,34 \cdot 10^{14}$	0,070	$4,41 \cdot 10^{17}$	8,8	$1,43 \cdot 10^{15}$

Продовження таблиці А.5

n-тип				p-тип			
ρ , Ом·см	n , см ⁻³	ρ , Ом·с м	n , см ⁻³	ρ , Ом·см	p , см ⁻³	ρ , Ом·с м	p , см ⁻³
0,090	$1,08 \cdot 10^{17}$	9,2	$5,22 \cdot 10^{14}$	0,080	$3,56 \cdot 10^{17}$	9,0	$1,42 \cdot 10^{15}$
0,100	$9,18 \cdot 10^{16}$	9,4	$5,11 \cdot 10^{14}$	0,090	$2,96 \cdot 10^{17}$	9,2	$1,40 \cdot 10^{15}$
0,200	$3,49 \cdot 10^{16}$	9,6	$5,00 \cdot 10^{14}$	0,100	$2,52 \cdot 10^{17}$	9,4	$1,37 \cdot 10^{15}$
0,300	$2,09 \cdot 10^{16}$	9,8	$4,89 \cdot 10^{14}$	0,200	$9,48 \cdot 10^{16}$	9,6	$1,34 \cdot 10^{15}$
0,400	$1,48 \cdot 10^{16}$	10	$4,80 \cdot 10^{14}$	0,300	$5,66 \cdot 10^{16}$	9,8	$1,31 \cdot 10^{15}$
0,500	$1,15 \cdot 10^{16}$	11	$4,36 \cdot 10^{14}$	0,400	$3,99 \cdot 10^{16}$	10	$1,28 \cdot 10^{15}$
0,600	$9,32 \cdot 10^{15}$	12	$3,99 \cdot 10^{14}$	0,500	$3,08 \cdot 10^{16}$	11	$1,17 \cdot 10^{15}$
0,700	$7,84 \cdot 10^{15}$	13	$3,68 \cdot 10^{14}$	0,600	$2,50 \cdot 10^{16}$	12	$1,07 \cdot 10^{15}$
0,800	$6,76 \cdot 10^{15}$	14	$3,41 \cdot 10^{14}$	0,700	$2,10 \cdot 10^{16}$	13	$9,86 \cdot 10^{14}$
0,900	$5,94 \cdot 10^{15}$	15	$3,18 \cdot 10^{14}$	0,800	$1,81 \cdot 10^{16}$	14	$9,15 \cdot 10^{14}$
1,00	$5,29 \cdot 10^{15}$	16	$2,98 \cdot 10^{14}$	0,900	$1,59 \cdot 10^{16}$	15	$8,53 \cdot 10^{14}$
2,0	$2,52 \cdot 10^{15}$	17	$2,80 \cdot 10^{14}$	1,00	$1,41 \cdot 10^{16}$	16	$7,99 \cdot 10^{14}$
3,0	$1,65 \cdot 10^{15}$	18	$2,64 \cdot 10^{14}$	2,00	$6,75 \cdot 10^{15}$	17	$7,52 \cdot 10^{14}$
3,2	$1,54 \cdot 10^{15}$	19	$2,50 \cdot 10^{14}$	3,00	$4,42 \cdot 10^{15}$	18	$7,09 \cdot 10^{14}$
3,4	$1,45 \cdot 10^{15}$	20	$2,38 \cdot 10^{14}$	3,2	$4,13 \cdot 10^{15}$	19	$6,71 \cdot 10^{14}$
3,6	$1,37 \cdot 10^{15}$	25	$1,89 \cdot 10^{14}$	3,4	$3,88 \cdot 10^{15}$	20	$6,38 \cdot 10^{14}$
3,8	$1,29 \cdot 10^{15}$	30	$1,58 \cdot 10^{14}$	3,6	$3,66 \cdot 10^{15}$	25	$5,09 \cdot 10^{14}$
4,0	$1,22 \cdot 10^{15}$	35	$1,35 \cdot 10^{14}$	3,8	$3,46 \cdot 10^{15}$	30	$4,24 \cdot 10^{14}$
4,2	$1,16 \cdot 10^{15}$	40	$1,18 \cdot 10^{14}$	4,0	$3,28 \cdot 10^{15}$	35	$3,63 \cdot 10^{14}$
4,4	$1,11 \cdot 10^{15}$	45	$1,05 \cdot 10^{14}$	4,2	$3,12 \cdot 10^{15}$	40	$3,17 \cdot 10^{14}$
4,6	$1,06 \cdot 10^{15}$	50	$9,45 \cdot 10^{13}$	4,4	$2,97 \cdot 10^{15}$	45	$2,82 \cdot 10^{14}$
4,8	$1,02 \cdot 10^{15}$	55	$8,59 \cdot 10^{13}$	4,6	$2,84 \cdot 10^{15}$	50	$2,54 \cdot 10^{14}$
5,0	$9,74 \cdot 10^{14}$	60	$7,86 \cdot 10^{13}$	4,8	$2,72 \cdot 10^{15}$	55	$2,30 \cdot 10^{14}$
5,2	$9,36 \cdot 10^{14}$	65	$7,26 \cdot 10^{13}$	5,0	$2,61 \cdot 10^{15}$	60	$2,11 \cdot 10^{14}$
5,4	$9,00 \cdot 10^{14}$	70	$6,74 \cdot 10^{13}$	5,2	$2,52 \cdot 10^{15}$	65	$1,95 \cdot 10^{14}$
5,6	$8,67 \cdot 10^{14}$	75	$6,29 \cdot 10^{13}$	5,4	$2,41 \cdot 10^{15}$	70	$1,81 \cdot 10^{14}$

Закінчення таблиці А.5

<i>n</i> -тип				<i>p</i> -тип			
ρ , Ом·см	n , см ⁻³	ρ , Ом·см	n , см ⁻³	ρ , Ом·см	p , см ⁻³	ρ , Ом·см	p , см ⁻³
5,8	$8,37 \cdot 10^{14}$	80	$5,89 \cdot 10^{13}$	5,6	$2,32 \cdot 10^{15}$	75	$1,69 \cdot 10^{14}$
6,0	$8,08 \cdot 10^{14}$	85	$5,54 \cdot 10^{13}$	5,8	$2,24 \cdot 10^{15}$	80	$1,58 \cdot 10^{14}$
6,2	$7,81 \cdot 10^{14}$	90	$5,24 \cdot 10^{13}$	6,0	$2,16 \cdot 10^{15}$	85	$1,49 \cdot 10^{14}$
6,4	$7,56 \cdot 10^{14}$	95	$4,96 \cdot 10^{13}$	6,2	$2,09 \cdot 10^{15}$	90	$1,41 \cdot 10^{14}$
6,6	$7,33 \cdot 10^{14}$	100	$4,71 \cdot 10^{13}$	6,4	$2,03 \cdot 10^{15}$	95	$1,33 \cdot 10^{14}$
6,8	$7,11 \cdot 10^{14}$			6,6	$1,96 \cdot 10^{15}$	100	$1,26 \cdot 10^{14}$
7,0	$6,90 \cdot 10^{14}$			6,8	$1,90 \cdot 10^{15}$		

Таблиця А.6 – Значення рухливості носіїв заряду в кристалах германію

Діапазон питомого опору ρ , Ом·см	Рухливість електронів μ_n , см ² /В·с	Рухливість дірок μ_p , см ² /В·с
0,1...0,23	1800	1300
0,24...0,49	2300	1400
0,50...0,89	2600	1500
0,90...2,40	3100	1600
2,50...5,90	3300	1760
6,00...15,9	3400	1760
16,0...45,0	3600	1760

Таблиця А.7 – Лінійні коефіцієнти випару α [см/с] домішок в германії і кремнії

Розплав	Умови випари	P	Sb	As
Кремній	Вакуум	$5 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-5}$	–
	Інертний газ	$1 \cdot 10^{-4}$	–	–
Германій	Вакуум	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$2,7 \cdot 10^{-4}$	$4,1 \cdot 10^{-5}$

Таблиця А.8 – Фізико-хімічні й електричні властивості напівпровідників

Властивість	Si	Ge	GaAs	GaP	InP
Тип структури	Алмаз	Алмаз	Сфалерит	Сфалерит	Сфалерит
Параметр ґратки, нм	0,5431	0,5658	0,5653	0,5451	0,5869
Щільність твердої фази, г/см ³	2,33	5,33	5,32	4,07	4,78
Щільність рідкої фази, г/см ³	2,53	5,62	5,71	4,60	5,15
Концентрація власних атомів, см ⁻³	$5 \cdot 10^{22}$	$4,4 \cdot 10^{22}$	$2,2 \cdot 10^{22}$	$2,5 \cdot 10^{22}$	$2,0 \cdot 10^{22}$
Атомна (молекулярна) маса, у. е.	28,08	72,59	144,64	100,69	145,79
Температура плавлення, °С	1417	936	1238	1467	1070
Тиск пари в точці плавлення, Па	–	–	$1,0 \cdot 10^5$ As	$35 \cdot 10^5$ P	$25 \cdot 10^5$ P
Кінематична в'язкість розплаву, см ² /с	$3,48 \cdot 10^{-3}$	$1,35 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$
Ширина забороненої зони (300 К), еВ	1,12	0,665	1,43	2,26	1,35
Власна концентрація носіїв заряду (300 К), см ⁻³	10^{10}	$2,5 \cdot 10^{13}$	$1,3 \cdot 10^6$		$6,9 \cdot 10^7$
Рухливість електронів в бездомішковому напівпровіднику (300 К), см ² /В·с	1400	3900	9500	190	4600
Рухливість дірок в бездомішковому напівпровіднику (300 К), см ² /В·с	480	1900	450	120	150