

Міністерство освіти і науки України
Запорізька державна інженерна академія



Р.М. Воляр
І.Ф. Червоний
С.Г. Єгоров

ВИРОБНИЦТВО НАПІВПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

**Методичні вказівки
до курсової роботи**

*для студентів ЗДІА спеціальностей:
7.090402 «Металургія кольорових металів»*

Запоріжжя
2010

Міністерство освіти і науки України
Запорізька державна інженерна академія

ВИРОБНИЦТВО НАПІВПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

**Методичні вказівки
до курсової роботи**

*для студентів ЗДІА спеціальностей:
7.090402 «Металургія кольорових металів»*

*Рекомендовано до видання
на засіданні кафедри МКМ,
протокол №9 від 14.11. 2010 р.*

Виробництво напівпровідникових матеріалів. Методичні вказівки до курсової роботи для студентів ЗДІА спеціальностей: 7.090402«Металургія кольорових металів» / Укл.: Р.М. Воляр, І.Ф. Червоний, С.Г. Єгоров - Запоріжжя, 2010. – 39 с.

Методичні вказівки до курсової роботи складаються з завдань та прикладу їх розрахунку, які охоплюють основні методи виробництва кристалів напівпровідникових матеріалів.

Укладачі: *Р.М. Воляр, старший викладач*
І.Ф. Червоний, д.т.н., професор, академік АН ВШУ
С.Г. Єгоров, к.т.н., доцент

Відповідальний за випуск: *зав. кафедрою МКМ*
професор І.Ф. Червоний

ЗМІСТ

1 ЗАВДАННЯ.....	4
2 ПРИКЛАДИ РОЗРАХУНКІВ.....	6
2.1 Визначення граничної розчинності домішки.....	6
2.2 Розрахунок необхідної кількості легуючої домішки.....	9
2.2.1 Розрахунок концентрації домішки в кристалі.....	10
2.2.2 Визначення ефективного коефіцієнта розподілу легуючої домішки.....	11
2.2.3 Розрахунок концентрації й маси домішки, що вводиться в розплав.....	12
2.2.4 Розрахунок взаємодії розплаву з матеріалом контейнера.....	13
2.2.5 Визначення маси лігатури.....	14
2.3 Розрахунок розподілу летючої домішки по довжині монокристала.....	17
2.4 Розрахунок процесу нагріву тіл.....	25
3 Варіанти завдань для розрахунку.....	34
Рекомендована література.....	39

1 ЗАВДАННЯ

Курсова робота з дисципліни «Виробництво напівпровідникових матеріалів» складається з написання курсової роботи яка розділена на дві частини: перша – розрахункове завдання, друга – теоретичне питання, логічно і змістовно об'єднаної між собою. Виконання студентом курсової роботи дозволить йому оволодіти необхідним переліком знань та умінь, передбачених даною дисципліною, а також здобути відповідних навичок.

Курсова робота виконується машинописним способом обсягом не менш ніж 30 друкованих сторінок і повинна мати титульний аркуш, зміст, літературний огляд, основну частину, розрахункову частину, висновки та перелік використаних джерел. Оформлення курсової роботи відбувається згідно ДСТУ 3008-95.

Для виконання курсової роботи необхідно вирішити наступні питання:

1.1 Визначити граничну розчинність елементу A в монокристалі елементу B , що вирощується з розплаву, що містить елементу A (% ат.), в умовах, при яких $k_{эф}$ дорівнює .

1.2 Зробимо розрахунок процесу легування бором при вирощуванні монокристалів кремнію методом Чохральського, для виробництва напівпровідникового кремнію. Питомий електричний опір ρ Ом-см, діаметр вирощуваного кристала d мм., довжина кристала l см., тип провідності - р-тип або n-тип. Масу завантаження визначити самостійно.

1.3 Вирощується монокристал елементу A методом Чохральського у вакуумі. Легуюча домішка – елемент B . Коефіцієнт випаровування домішки з розплаву K_u см/с. Діаметр кристала d_k мм; діаметр тигля d_m мм. Швидкість кристалізації f мм/хв. Частота обертання кристала n об/хв.

Розрахувати відносну зміну концентрації домішки по довжині з урахуванням випаровування і без нього і побудувати графік.

1.4 Розрахувати процес нагріву графітного циліндрового блоку діаметром d , м і заввишки H , м. Тепло приймальної є циліндрова поверхня. T_0 , °С, T_∞ , °С.

Густина графіту ρ , кг/м^3 . Температурна залежність коефіцієнта теплопровідності має вигляд: $\lambda = 105,9 - 0,044T$, $\text{Дж}/(\text{м}\cdot\text{с}\cdot\text{К})$. Температурна залежність теплоємності описується рівнянням $c = 1098 + 0,17T$ $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$. Коефіцієнт тепловіддачі α , $\text{Дж}/(\text{м}^2\cdot\text{с}\cdot\text{К})$. Розрахувати процес двостороннього нагріву пластини кремнію діаметром d , мм і завтовшки h , мм. Коефіцієнт тепловіддачі α , $\text{Дж}/(\text{м}^2\cdot\text{с}\cdot\text{К})$, $T_0, ^\circ\text{C}$, $T_\infty, ^\circ\text{C}$.

1.5 Розглянути теоретичне питання таблиця 3.5.

2 ПРИКЛАДИ РОЗРАХУНКІВ

2.1 Визначення граничної розчинності домішки

Для виразу змісту або концентрації індивідуальних домішок в чистих речовинах користуються відсотками по масі - % (по масі). У зарубіжній літературі для цієї мети частіше користуються величинами: ppm (part per million) - одна частина на мільйон; $1 \text{ ppm} = 1 \cdot 10^{-4} \%$ (по масі) або ppb (part per billion) - одна частина на мільярд; $1 \text{ ppb} = 1 \cdot 10^{-7} \%$ (по масі).

Величини ppm і ppb можуть виражати також концентрацію домішки на тону основної речовини – $1 \text{ ppm} = 1 \text{ г/т}$, а $1 \text{ ppb} = 1 \text{ мг/т}$. У роботах по аналітиці часто застосовується вираз концентрації домішки у величинах ‰ – проміле (promille) – одна частина на тисячу; $1 \text{ ‰} = 1 \cdot 10^{-3} \%$ (по масі).

Концентрацію домішок в напівпровідникових матеріалах найчастіше виражають в кількості атомів домішки в кубічному сантиметрі напівпровідника – ат/см³. Ця величина прямо пов'язана з концентрацією носіїв зарядів **n** або **p** у тому випадку, коли один атом домішки створює один носій заряду.

Зв'язок між вмістом домішки **a** в напівпровіднику **b**, виражена % (по масі) (x_a) і в ат/см³ (N_a^b), здійснюється таким чином: вагова кількість домішки $a = G_a$ у одному кубічному сантиметрі напівпровідника **b** дорівнює:

$$G_a = \frac{x_a \cdot \gamma_b}{100}, \text{ г/см}^3 \quad (2.1)$$

де **b** – маса 1 см³ напівпровідника, г, або його щільність, г/см³.

Далі: 1 грам-атом домішки A_a містить $N = 6,023 \cdot 10^{23} = N_A$ атомів (число Авогадро). Вирішуючи пропорцію:

$$\begin{aligned} A_a &\rightarrow N_A \\ G_a &\rightarrow n_a \end{aligned}$$

одержимо

$$n_a = \frac{G_a \cdot N_A}{A_a}, \text{ ат} \quad (2.2)$$

Підставляючи в рівняння (2.2) вираз G_a з рівняння (2.1), одержимо кількість атомів домішки **a** в одному кубічному сантиметрі напівпровідника **b**:

$$N_a^b = \frac{x_a \cdot \gamma_b \cdot N_A}{100A_a} = \frac{x_a \cdot \gamma_b \cdot 6,023 \cdot 10^{21}}{100A_a}, \text{ ат/см}^3 \quad (2.3)$$

У роботах по фізико-хімічному аналізу і технології напівпровідникових матеріалів часто застосовується вираз концентрації домішки в атомних відсотках - % (ат.). Зв'язок між концентрацією домішки x_a у відсотках по масі і y_a – атомних відсотках здійснюється за допомогою рівняння

$$y_a^b = \frac{100x_a}{x_a + x_b \cdot (A_a / A_b)}, \% \text{ (ат)} \quad (2.4)$$

де A_a і A_b – атомні маси домішки **a** і напівпровідника **b**.

У разі розрахунків, пов'язаних з визначенням концентрації домішки в напівпровідникових з'єднаннях, замість A_b підставляється M – молекулярна маса з'єднання. Зв'язок між змістом домішки, вираженої ат/см³ (N_a^b) і атомних відсотках (y_a^b), описується рівнянням

$$y_a^b = \frac{N_a^b \cdot 100}{N_b}, \% \text{ (ат)} \quad (2.5)$$

де N_b – кількість атомів в кубічному сантиметрі напівпровідника **b**. У свою чергу

$$N_b = \frac{N_A \cdot \gamma_b}{A_b} = \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot \gamma_b}{A_b}. \quad (2.6)$$

Для кремнію ця величина складає $5 \cdot 10^{22}$ ат/см³, а для германію - $4,52 \cdot 10^{22}$ ат/см³.

Для виразу загальної чистоти в даний час указують число дев'яток в значенні вмісту основної речовини N. Так, позначення 3N показує, що в матеріалі міститься 99,9 % (по масі) основної речовини; 5N5 - 99,9995 % (по масі) і т.д. При цьому величина N виходить в результаті віднімання з 100 % суми аналізованих домішок. Такий спосіб виразу чистоти явно недостатній, оскільки не відображає кількості обмежуваних (що лімітуються) домішок в чистій речовині.

Приклад. Визначити граничну розчинність сурми в монокристалі германію, що вирощується з розплаву, що містить 1 % (ат.) Sb, в умовах, при яких $k_{эфф} = 1 \cdot 10^{-2}$.

По рівнянню (2.6) кількість атомів в кубічному сантиметрі розплавленого германію

$$N_{Ge} = \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 5,57}{72,59} = 4,63 \cdot 10^{22}, \text{ ат/см}^3$$

а по рівнянню (2.5) концентрація сурми в розплаві германію

$$N_{Ge}^{Sb} = \frac{4,63 \cdot 10^{22} \cdot 1}{100} = 4,63 \cdot 10^{20}, \text{ ат/см}^3$$

звідки гранична розчинність сурми в германії може бути прийнята рівною $4,63 \cdot 10^{20} \cdot 1 \cdot 10^{-2} = 4,63 \cdot 10^{18}$ ат/см³, що істотно нижче за граничну розчинність, дифузією, що досягається, при 820 °С - $1,4 \cdot 10^{19}$ ат/см³.

2.2 Розрахунок необхідної кількості легуючої домішки

Легуючу домішку найчастіше вводять у розплав кремнію у твердому вигляді. Звичайно концентрацію домішок у монокристалах виражають в атомах на кубічний сантиметр. Концентрацію найпоширеніших легуючих домішок – простих донорів і акцепторів – до так званої граничної концентрації вважають рівною концентрації носіїв зарядів в 1 см^3 . Монокристали утримуючу легуючу домішку в концентрації, що перевищує граничну, відносяться до сильно легованих.

Незважаючи на великий обсяг розплаву, маса легуючої домішки, особливо при малому рівні легування й великій величині ефективного коефіцієнта розподілу, може становити всього кілька десятків і навіть одиниць міліграм. Робота з такими малими кількостями викликає значні труднощі. Введення елементів, що мають високу летючість й спорідненість до кисню, у нагрітий до високої температури розплав сполучений зі значними втратами внаслідок випару й окислювання. Тому легуючу домішку в розплав кремнію найчастіше вводять за допомогою лігатури, що містить необхідну кількість цієї домішки.

Лігатури являють собою сильнолегований домішкою кремній у формі моно- або полікристалів. Іноді в якості лігатури використовують хімічні сполуки легуючої домішки з елементарним кремнієм. Монокристалічну лігатуру, використовують у виробництві монокристалів кремнію, готують для певних груп марок у відповідності з наступними значеннями питомого опору, Ом·см: 0,1...1,0; 1...10; 10...100 і т.д. Маса лігатури, що вводиться в розплав, не повинна перевищувати 3 % його розплаву.

Полікристалічну лігатуру, яку використовують у виробництві монокристалів кремнію, часто підготовляють у вигляді так званих мірних завантажень. Останні являють собою кубики, нарізані із сильнолегованого кремнію, їх одержують гранулюванням розплаву за допомогою механічного дозатора.

Маса мірних завантажень повинна дотримуватись відхилення $\sim 1\%$, а їхній склад - з відхиленням $\sim 3\%$, що не виходить за межі точності виміру електрофізичних параметрів монокристалів. Маючи гранульовану лігатуру з різним вмістом легуючої домішки в одній гранулі, можна здійснити набір будь-якої необхідної її маси.

Розрахунок маси легуючої домішки складається з визначення наступних величин:

- заданої концентрації домішки в кристалі;
- ефективного коефіцієнта розподілу;
- концентрації й маси домішки, що вводиться в розплав для одержання в монокристалі заданих електричних властивостей;
- маси легуючої домішки для компенсації носіїв заряду протилежного знака, що виникають у результаті переходу домішки з контейнера в розплав;
- маси летючої легуючої домішки, що вводиться в розплав для заповнення втрат домішки в результаті випару;
- маси лігатури.

2.2.1 Розрахунок концентрації домішки в кристалі

Якщо в складних напівпровідниках концентрацію носіїв зарядів задають безпосередньо як вихідний параметр, то в елементарних напівпровідниках звичайно задають величину П.Е.О. Для простих донорів і акцепторів переведення П.Е.О. у концентрацію носіїв зарядів у кристалі здійснюють аналітично, з використанням рівняння (2.7), а також за допомогою спеціально складених графіків. На практиці частіше застосовують другий метод.

Електропровідність напівпровідника σ ($\text{Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$) пов'язана з концентрацією носіїв зарядів n або p (см^{-3}) і рухливістю μ наступним рівнянням:

$$\sigma = e \cdot p \cdot \mu, \quad (2.7)$$

де e – заряд електрона, Кл, $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл;

μ_n – рухливість електронів, $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, $\mu_n = 1350 \pm 100 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$;

μ_p – рухливість дірок, $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, $\mu_p = 480 \pm 15 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

$$\rho = \frac{1}{e \cdot \mu \cdot \rho}, \quad (2.8)$$

де $\rho = \frac{1}{\sigma}$ – П.Е.О. напівпровідника, Ом·см.

2.2.2 Визначення ефективного коефіцієнта розподілу легуючої домішки

Цей розрахунок необхідний для переходу від концентрації домішки в кристалі до концентрації її в розплаві (див. рівняння 2.9). Звичайно це завдання вирішують із використанням графіків, такі графіки можна побудувати для будь-якої домішки в кремнії за допомогою рівняння (2.10), якщо відомо значення рівноважного k_0 й ефективного k коефіцієнтів розподілу для якої або однієї швидкості кристалізації.

$$k_0 = \frac{N}{C}, \quad (2.9)$$

де N і C – концентрація домішки в кристалі й розплаві, відповідно, атом/ см^3 .

$$k = \frac{k_0}{k_0 + (1 - k_0) \exp(-f \cdot \delta / D_{\text{жс}})} \quad (2.10)$$

де δ - товщина дифузійного шару;

$D_{\text{жс}}$ - коефіцієнт дифузії, $\text{см}^2/\text{с}$;

f - швидкість кристалізації, мм/хв.

Варто мати на увазі, що ефективний коефіцієнт розподілу домішок у розплаві кремнію дуже чутливий до змін умов перемішування розплаву. Останні істотно залежать від геометрії тигля, конструкції теплового вузла й інших факторів. Тому значення ефективного коефіцієнта розподілу однієї й тієї ж домішки, експериментально визначені на однотипних установках, при зміні перерахованих факторів можуть бути різними. У зв'язку із цим найкращі результати дає використання графіків швидкісної залежності k , отриманому на установках для вирощування певної конструкції.

Для даного розрахунку з довідкових даних приймаємо ефективний коефіцієнт розподілу домішки рівний $8 \cdot 10^{-1}$.

2.2.3 Розрахунок концентрації й маси домішки, що вводиться в розплав

Розрахунки електричних величин проводять у припущенні, що кожний атом легуючої донорної або акцепторної домішки дає на дозволеному рівні в забороненій зоні монокристалу кремнію тільки один носій заряду (електрон, дірку). Такі розрахунки виконують за допомогою наступних рівнянь:

$$m_{\text{дм}} = C \cdot V_p = \frac{N \cdot V_p}{k}, \quad (2.11)$$

$$V = \frac{M_p}{\rho_p}, \quad (2.12)$$

де $\mu_{\text{дом}}$ – маса домішки, що вводиться в розплав, атом;

N і X – концентрація домішки в кристалі й розплаві, відповідно, атом/см³;

ζ_p , M_p , ρ_p – об'єм (см³), маса (г) і щільність (г/см³) розплаву, відповідно.

Отримані значення кількості домішки в атомах можна перевести в одиниці маси $M_{\text{дом}}$ у грамах:

$$M_{\text{дм}} = \frac{A_{\text{дм}} \cdot m_{\text{дм}}}{6,022 \cdot 10^{23}},$$

де $A_{дом}$ – атомна маса домішки, у.о.

Це ж завдання можна вирішити відразу, підставляючи вихідні дані в рівняння:

$$M_{\dot{a}i\dot{i}} = \frac{\dot{A}_{\dot{a}i\dot{i}} NM_{\delta}}{6,022 \cdot 10^{23} \cdot k \cdot \rho_p \cdot (1 - \eta)}, \quad (2.13)$$

де η - частка втрат легуючої домішки через окислювання й випар від початкової її маси (визначається експериментально).

Розрахунок концентрації домішки, що створює в забороненій зоні монокристала кремнію глибокі рівні навіть для простих напівпровідників дуже важкий, а для складних напівпровідників найчастіше неможливий через відсутність необхідних для розрахунку даних. Концентрація носіїв заряду, створюваних такими домішками, не відповідає концентрації їхніх атомів. Це є результатом того, що частина введеної в кристал домішки витрачається на компенсацію рівнів, енергії іонізації яких менше енергії іонізації робочого рівня.

У даному розрахунку цей пункт не розраховується через недостачу практичних даних.

2.2.4 Розрахунок взаємодії розплаву з матеріалом контейнера

У процесі вирощування монокристалів кремнію розплав взаємодіє з матеріалом контейнера через що він забруднюється різними домішками. У розплав кремнію із кварцового тигля переходить кисень і інші домішки. Число й кількість домішок, що переходять у розплав напівпровідника з різних матеріалів контейнера, залежать від їхньої чистоти.

Аналітично можливо розрахувати кількість домішки, що переходить із матеріалу контейнера в розплав під час вирощування з нього монокристала.

Однак такий розрахунок громіздкий і складний. Тому на практиці рівень забруднення розплаву визначають експериментально. Для цього з максимально чистого вихідного напівпровідника вирощують монокристал і по даним електрофізичних змін визначають рівень його забруднення домішками з матеріалу контейнера.

2.2.5 Визначення маси лігатури

Після визначення мас домішок, що вводяться в монокристал для одержання необхідних електрофізичних властивостей, компенсації домішок протилежного знака, що містяться у вихідному матеріалі й надходять у розплав з матеріалу контейнера, а також для компенсації втрат летучої домішки, ці маси підсумовують, одержуючи загальну масу домішки.

Введення малих кількостей легуючої домішки у великий обсяг розплаву напівпровідника, особливо якщо він має високу температуру, сполучено зі значними втратами навішування легуючої домішки через випар і окислювання. Тому легування розплавів напівпровідників найчастіше здійснюють за допомогою лігатур, що містять відому кількість цієї домішки.

Лігатури - сильно леговані домішкою напівпровідники у формі моно- або полікристалів. У загальному випадку монокристалічну лігатуру застосовують для одержання слаболегованих, високоомних монокристалів напівпровідників, а полікристалічну для одержання сильнолегованих, низькоомних.

Приклад. Зробимо розрахунок процесу легування бором при вирощуванні монокристалів кремнію методом Чохральського, для виробництва напівпровідникового кремнію. Питомий електричний опір 10 Ом·см, діаметр вирощуваного кристала 100 мм., довжина кристала 100 см., тип провідності - р-тип (дірковий). Маса завантаження 45 кг.

Масу монокристалічної лігатури розраховують по рівнянню:

$$M_{\dot{\epsilon}^3\dot{a}} = \frac{\dot{I}_{\delta} \mu_{\dot{\epsilon}^3\dot{a}} \rho_{\dot{\epsilon}^3\dot{a}}}{k \mu_{\dot{\epsilon}\delta} \rho_{\dot{\epsilon}\delta} (1 - \eta)} \quad (2.14)$$

де $\rho_{ліг}$ і $\rho_{кр}$ – питомий електричний опір лігатури й кристала, відповідно, Ом·см;

$\mu_{ліг}$ і $\mu_{кр}$ – рухливості носіїв заряду в лігатурі й кристалі, см²/(В · с);

M_p - маса розплаву, м.

Тому що концентрація домішки в монокристалічній лігатурі визначається непрямым шляхом за даними електричних вимірів, це вносить певну помилку в результати легування. Більш надійні результати дає застосування полікристалічної лігатури, де концентрація домішки визначається хіміко-спектральним або мас-спектральним методами.

Розрахунок маси полікристалічної лігатури $M_{ліг}$ з відомою концентрацією легуючої домішки проводять по рівнянню:

$$M_{\dot{\epsilon}^3\dot{a}} = \frac{\dot{I}_{\delta} \cdot N_{\dot{\epsilon}\delta}}{k \cdot N_{\dot{\epsilon}^3\dot{a}} \cdot (1 - \eta)} \quad (2.15)$$

де $N_{ліг}$ і $N_{кр}$ – концентрація домішки в лігатурі й кристалі, відповідно, атом/см³.

Визначаємо концентрацію носіїв зарядів у шихті по рівнянню 2.8, (приймаємо П.Е.О. шихти рівним 100 Ом·см):

$$\rho_{\phi} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 480 \cdot 100} = 1,3021 \cdot 10^{14}$$

Визначаємо концентрацію носіїв зарядів у кристалі (при П.Е.О. рівним 10 Ом·см):

$$\rho_{\dot{\epsilon}} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 480 \cdot 10} = 1,3021 \cdot 10^{15}$$

Визначаємо різницю концентрацій носіїв зарядів:

$$\Delta\delta = \delta_e - \delta_\phi = 1.3021 \cdot 10^{15} - 1,3021 \cdot 10^{14} = 1.1719 \cdot 10^{15}$$

Знаючи щільність кремнію (2,33 г/см³) визначаємо об'єму розплаву кремнію:

$$V = \frac{45000}{2.33} = 19313(\tilde{n}\tilde{i}^3)$$

Визначаємо концентрацію носіїв зарядів у вирощуваному кристалі при даному об'ємі:

$$\delta = 19313 \cdot 1.1719 \cdot 10^{15} = 2.2632 \cdot 10^{19}$$

Визначаємо потрібний П.Е.О. лігатури:

$$\rho_{\tilde{e}\tilde{z}\tilde{a}} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 480 \cdot 2.2632 \cdot 10^{19}} = 5.8 \cdot 10^{-4}$$

Приймаємо що будемо робити легування лігатурою з П.Е.О. рівним $5,8 \cdot 10^{-4}$ і концентрацією носіїв зарядів $p = 2,08 \cdot 10^{19}$, такої лігатури буде необхідно:

$$V = \frac{2.2632 \cdot 10^{19}}{2.08 \cdot 10^{19}} = 1.088\tilde{n}\tilde{i}$$

$$G_{\tilde{e}\tilde{z}\tilde{a}} = 1.088 \cdot 2,33 = 2.535\tilde{a}$$

Для легування даного кристала знадобиться 2,535 г. лігатури.

2.3 Розрахунок розподілу летючої домішки по довжині монокристала

Розподіл летючої домішки в монокристалі при вирощуванні у вакуумі по методу Чохральського і у вертикальному варіанті нормальної направленої кристалізації (в цих випадках поверхня контакту розплаву з паровою фазою F_M залишається постійною) описується рівнянням:

$$N_{ТВ}(x) = K \cdot N_{ж}(t_0) \cdot (1-g)^{K+K_{\text{вип}}-1}; \quad g > 0 \quad (2.16)$$

де $N_{ж}(t_0)$ концентрація домішки у момент початку вирощування кристала ат/см³; K – ефективний коефіцієнт розподілу; $K_{\text{вип}}$ - коефіцієнт, що враховує внесок випаровування домішки з розплаву в процесі вирощування кристала; g - частка розплаву, що викристалізовувався.

У рівнянні (2.16) x - довжина монокристала, см, яка дорівнює $g \cdot V_0^{\text{ж}} / F$, де $V_0^{\text{ж}}$ - об'єм розплаву до початку вирощування монокристала, см³; F - площа поперечного перетину монокристала, см². Величини $N_{ж}(t_0)$ і $K_{\text{п}}$ розраховують по рівняннях:

$$N^{\text{ж}}(t_0) = N_0^{\text{ж}} \mp \cdot \exp\left(-\frac{k_{\text{вип}} F_{\text{вип}}}{V_0^{\text{ж}}} \cdot t_0\right), \quad (2.17)$$

$$K_{\text{п}} = k_{\text{вип}} \cdot F_{\text{вип}} / (f \cdot F), \quad (2.18)$$

де $k_{\text{вип}}$ - коефіцієнт випаровування, см/с; $F_{\text{вип}}$ - поверхня випаровування, см²; t_0 - час витримки розплаву у вакуумі, с; f - швидкість вирощування монокристала, см/с; $N_0^{\text{ж}}$ - початкова концентрація домішки в розплаві, ат/см³.

Очевидно, що враховувати випаровування доцільно тільки в тому випадку, якщо величина $K_{\text{вип}}$ не менше 0,01 K . Інакше можна нехтувати

випаровуванням домішки з поверхні розплаву ($k_{\text{вип}}=0$, $K_{\text{вип}}=0$), при цьому $N^{\text{ж}}(t_0) = N_0^{\text{ж}}$, а рівняння (2.16) перетвориться в рівняння розподілу нелетучої домішки по довжині монокристала:

$$N^{\text{ТВ}}(x) = K \cdot N_0^{\text{ж}} (1-g)^{k-1}. \quad (2.19)$$

У разі зонної перекристалізації у вакуумі (при $F_{\text{вип}}$ також залишається незмінною) рівняння розподілу домішки по довжині монокристала записується у вигляді:

$$N^{\text{ТВ}}(x) = \frac{K \cdot N_0}{K + K_{\text{п}}} \left\{ 1 - [1 - (K + K_{\text{п}})] \exp\left(-\frac{K + K_{\text{п}}}{\ell} \cdot x\right) \right\} \quad (2.20)$$

де N_0 - однакова по всій довжині початкового злитка концентрація домішки, ат/см³; l - довжина розплавленої зони, см; x - відстань пройдена фронтом кристалізації від початку злитка, см.

Якщо домішка нелетуча, то рівняння (2.20) приводиться до рівняння зонної перекристалізації

$$N^{\text{ТВ}}(x) = N_0 \left[1 - (1-K) \exp\left(-\frac{K}{\ell} \cdot x\right) \right]. \quad (2.21)$$

Для виявлення впливу випаровування домішки і зіставлення результатів розрахунку по рівняннях (2.16) і (2.19) або (2.20) і (2.21) потрібно, щоб величини $N^{\text{ТВ}}(t \geq t_0)/K \cdot N^{\text{ж}}(t_0)$ і $N^{\text{ТВ}}(\text{ж})/(K \cdot N_0^{\text{ж}})$ для процесів Чохральського або вертикальної нормальної направленої кристалізації або $N_{\text{ТВ}}(x)/N_0$ для процесів зонної перекристалізації були однаковими.

Величину $k_{\text{вип}}$, см/с, звичайно визначають обробкою результатів експерименту по рівнянню:

$$k_{\text{вип}} = \frac{V_0^{\text{ж}}}{F_{\text{вип}} \cdot t_0} \cdot \ln \frac{N_0^{\text{ж}}}{N^{\text{ж}}(t_0)}, \quad (2.22)$$

тобто по зміні концентрації домішки в розплаві під час t_0 (об'єм рідкої фази при випаровуванні домішки не змінюється).

При концентраціях легуючих домішок, що звичайно використовуються, коефіцієнт випаровування рівний: з розплаву кремнію у вакуумі для фосфору $5 \cdot 10^{-4}$ см/с, для сурми $3 \cdot 10^{-5}$ см/с, з розплаву кремнію в інертному газі для фосфору $1 \cdot 10^{-4}$ см/с, з розплаву германію, у вакуумі для фосфору $1,2 \cdot 10^{-4}$ см/с, для миш'яку $4,1 \cdot 10^{-6}$ см/с.

Аналітично величина $k_{\text{вип}}$ може бути розрахована по швидкості випаровування домішки у вакуумі при заміні тиску насиченої пари $p_{(B)\text{п}}^0$ на рівноважний парціальний тиск компоненту $V(p_B^0)$ і $T_{\text{вип}}$ на температуру плавлення напівпровідника. Швидкість випаровування атомів V при створенні в парі молекул V_m ($m=1, 2, 4$) дорівнює

$$j_{\text{вип}} = 3,16 \cdot 10^{-3} \sum_m \frac{m \cdot p_{V,m}^0 \cdot N_A}{(2\pi RT_{\text{пл},A} \cdot M_{V,m})}, \text{ ат}/(\text{см}^2 \cdot \text{с}): \quad (2.23)$$

де $p_{V,m}^0$ - рівноважний парціальний тиск компоненту V_m , Па; $M_{V,m}$ - молекулярна маса V_m , г/моль; $T_{\text{пл},A}$ - температура плавлення напівпровідника, К.

Величина $p_{V,m}^0$ пов'язана з концентрацією домішки в розплаві рівнянням:

$$p_{V,m}^0 = p_{(B,m)}^0 \cdot (x_B^{\text{ж}} \cdot \gamma_B^{\text{ж}})^m, \quad (2.24)$$

де $p_{(B,m)}^0$ - тиск насиченої пари компоненту V при знаходженні його в парі в молекулярній формі V_m , Па; $x_B^{\text{ж}}, \gamma_B^{\text{ж}}$ - атомна частка і коефіцієнт активності компоненту V в розплаві.

Замінюючи атомну частку компоненту V на концентрацію, виражену в атомах на кубічний сантиметр, одержуємо:

$$j_{\text{вип}} = 3,16 \cdot 10^{-3} \sum_m \frac{m \cdot p_{(Bm)}^0 \cdot (N_B^{\text{ж}} \cdot \gamma_B^{\text{ж}})^m}{(\rho_A^{\text{ж}} / M_A)^m \cdot (2\pi R \cdot T_{\text{плА}} \cdot M_{Bm})^{0,5} \cdot (N^A)^{m-1}}, \quad (2.25)$$

де $\rho_A^{\text{ж}}$ - густина розплаву напівпровідника, г/см³; M_A - молекулярна маса розплаву напівпровідника, г/моль.

Одиниці вимірювання величин, що входять в другий співмножник знаменника, такі ж, як в рівнянні (2.23).

Тепер коефіцієнт випаровування, см/с, можна розрахувати по рівнянню:

$$k_{\text{вип}} = 3,16 \cdot 10^{-3} \sum_m \frac{m \cdot p_{(Bm)}^0 \cdot (N_B^{\text{ж}})^{m-1} \cdot (\gamma_B^{\text{ж}})^m}{(\rho_A^{\text{ж}} / M_A)^m \cdot (2\pi R \cdot T_{\text{плА}} \cdot M_{Bm})^{0,5} \cdot (N^A)^{m-1}}. \quad (2.26)$$

З рівняння (2.26) видно, що $k_{\text{вип}}$ не залежить від концентрації [в такому припущенні виведені рівняння (2.16), (2.17) і (2.20)] тільки в тому випадку, якщо $m = 1$, тобто в паровій фазі компонент В знаходиться в атомарному вигляді. В той же час, самі летючі легуючі домішки відносяться до V групи періодичної системи Менделєєва і схильні до асоціацій в молекули в паровій фазі. Тому приведені значення $k_{\text{вип}}$, - деяка усереднена по концентрації величина в області найбільш широко концентрацій легуючих домішкових компонентів, що використовуються.

Приклад 1. Вирощується монокристал германію (кремнію) методом Чохральського у вакуумі [вирощується монокристал кремнію методом бестигельной зонної перекристалізації (БЗП) у вакуумі; проводиться зонна перекристалізація (ЗП) германію у вакуумі. Легуюча домішка - миш'як. Коефіцієнт випаровування домішки з розплаву германію (кремнію) $k_{\text{и}} = 4,1 \cdot 10^{-5}$ см/с. Діаметр кристала $d_k = 60$ мм; діаметр тигля $d_t = 80$ мм (для БЗП

діаметр кристала $d_k = 15$ мм, довжина розплавленої зони $l = 10$ мм., для ЗП довжина розплавленої зони $l = 20$ мм, ширина поверхні розплавленої зони $b = 15$ мм). Швидкість кристалізації $f = 1,5$ мм/хв. Частота обертання кристала $n = 40$ об/хв; при розрахунку товщини дифузійного шару умовно прийняти: для БЗП $n = 3$ об/хв, для ЗП $n = 0,5$ об/хв.

Розрахувати відносну зміну концентрації домішки по довжині з урахуванням випаровування і без нього і побудувати графік.

Рішення.

1. Із довідника знаходимо значення рівноважного коефіцієнта розподілу миш'яку для германію: $K_0 = 0,02$.

2. Розрахунок коефіцієнта динамічної в'язкості розплаву германію виконуємо по значеннях коефіцієнта кінематичної в'язкості $\nu = 1,35 \cdot 10^{-7}$ м²/с і густині розплавленого германію $\rho_{\text{Ge}}^{\text{ж}} = 5,62 \cdot 10^3$ кг/м³: $\eta = 7,59 \cdot 10^{-4}$ Н·с/м².

3. Розраховуємо коефіцієнт взаємодифузії. $D_i = 0,211$ нм.

Тоді

$$D = \frac{10^{13} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 1210}{14 \cdot 3,14 \cdot 7,59 \cdot 10^{-4} \cdot 0,211} = 2,37 \cdot 10^{-5}, \text{ см}^2/\text{с}.$$

4. Розраховуємо кутову швидкість обертання монокристала:

$$\omega = 2\pi n/60 = 2 \cdot 3,14 \cdot 40/60 = 4,19 \text{ с}^{-1}.$$

5. Розраховуємо товщину дифузійного шару:

$$\delta = 2,2(1,35 \cdot 10^{-7})^{0,17} \cdot (2,37 \cdot 10^{-5})^{0,33} \cdot (4,19)^{-0,5=2,2} \cdot 0,68 \cdot 0,001 \cdot 42 \cdot 0,489 = 1,04 \cdot 10^{-2} \text{ м}.$$

6. Розраховуємо ефективний коефіцієнт розподілу:

$$K = \frac{0,02}{0,02 + 0,98 \exp\left(-\frac{1,04 \cdot 10^{-2} \cdot 1,5 \cdot 10}{60 \cdot 2,37 \cdot 10^{-5}}\right)} = 0,059.$$

7. Розраховуємо площу поперечного перетину кристала:

$$F = 0,785 \cdot 52 = 19,63 \text{ см}^2.$$

8. Розраховуємо поверхню випаровування розплаву в тиглю:

$$F_{\text{и}} = 0,785(82 - 52) = 30,6 \text{ см}^2.$$

9 Розраховуємо величину $K_{\text{п}}$:

$$K_{\text{п}} = \frac{1,1 \cdot 10^{-5} \cdot 30,6 \cdot 60}{1,5 \cdot 0,1 \cdot 19,63} = 0,026.$$

10. Записуємо рівняння (2.16) у вигляді:

$$\frac{N^{\text{ТВ}}(x)}{KN^{\text{Ж}}(t_0)} = (1-g)^{0,052+0,016-1} = (1-g)^{-0,916}. \quad (2.27)$$

Записуємо рівняння (2.19) у вигляді:

$$\frac{N^{\text{ТВ}}(x)}{KN_0^{\text{Ж}}} = (1-g)^{-0,942}. \quad (2.28)$$

Результати розрахунку записуємо в наступному вигляді:

Номер рівняння	g - частка розплаву, що викристалізовувався				
	0	0,2	0,4	0,6	0,8
2.27	1	1,227	1,597	2,315	4,368
2.28	1	1,234	1,618	2,371	4,554

Будуємо графіки залежності за цими даними, з яких видно, що випаровування домішки при $K < 1$ сприяє дещо більш рівномірному розподілу легуючої домішки. Очевидно, що при $K > 1$ випаровування домішки даватиме протилежний ефект.

Приклад 2.

Розрахувати відносну зміну концентрації для сурми в розплаві кремнію.

$$N_{\text{Sb}}^{\text{ж}} = 5 \cdot 10^{18} \text{ ат/см}^3.$$

Рішення.

1. Розраховуємо $p_{(\text{Bm})}^0$ для різних значень m :

$$T_{\text{плSi}} = 1688 \text{ К};$$

$$\lg p^0(\text{Sb}_4) = 30,63224 - 8141,417/1688 + 0,0003062 \cdot 1688 -$$

$$- 6,932371 \cdot \lg 1688 = 3,9527; \quad p^0(\text{Sb}_4) = 8968,9 \text{ Па.}$$

$$\lg p^0(\text{Sb}_2) = 34,55655 - 12239,825/1688 + 0,00066724 \cdot 1688 -$$

$$- 7,46810 \cdot \lg 1688 = 4,32974; \quad p^0(\text{Sb}_2) = 21364,875 \text{ Па.}$$

2. Розраховуємо коефіцієнт активності:

$$a_{\text{ж}} = 13,77 \text{ кДж/моль};$$

$$Sb_{\text{ж}} = 6,73 \cdot 10^{-3} \text{ кДж/(моль} \cdot \text{К)};$$

$$\lg \gamma^{\text{ж}}(\text{Sb}) = (13,77 - 6,73 \cdot 10^{-3} \cdot 1688) / 8,314 \cdot 10^{-3} \cdot 1688 = 0,17;$$

$$\gamma^{\text{ж}}(\text{Sb}) = 1,18.$$

3. З відомих $\rho_{Si}^{\text{ж}} = 2,53 \text{ г/см}^3$ і $M_{Si} = 28,08 \text{ г/моль}$ розраховуємо κ_{H} по рівнянню (2.26):

$$\kappa_{\text{H}} = 3,16 \cdot 10^{-8} \cdot \left(\frac{2 \cdot 21364,875 \cdot 5 \cdot 10^{18} \cdot 1,18^2}{(2,53/28,08)^2 \cdot (2 \cdot 3,14 \cdot 8,314 \cdot 1688 \cdot 243,4)^{0,5} \cdot 6,023 \cdot 10^{23}} + \frac{4 \cdot 8968 \cdot (5 \cdot 10^{18})^3 \cdot 1,18^4}{(2,53/28,08)^4 \cdot (2 \cdot 3,14 \cdot 8,314 \cdot 1688 \cdot 486,8)^{0,5} \cdot 6,023 \cdot 10^{23}} \right) = 4,15 \cdot 10^{-5} + 2,93 \cdot 10^{-13} = 4,15 \cdot 10^{-5} \text{ см/с.}$$

Розбіжність розрахованого значення κ_{H} і приведеного вище за літературними даними ($3 \cdot 10^{-5} \text{ см/с}$) складає при вибраному значенні $N_{\text{Sb}}^{\text{ж}}$ всього 28 %. Розрахунок показав, що концентраційна залежність κ_{H} може бути записана у вигляді:

$$\kappa_{\text{H}} = [4,15 \cdot 10^{-4} / (5 \cdot 10^{18})] W_{\text{Sb}}^{\text{ж}} = 8,3 \cdot 10^{-24} \cdot N_{\text{Sb}}^{\text{ж}}.$$

2.4 Розрахунок процесу нагріву тіл

Процеси напівпровідникової технології звичайно проводять при підвищеній температурі. Розрахунок процесу нагріву виконують для визначення часу, необхідного для досягнення тілом необхідної температури, що нагрівається.

Розрізняють процеси нагріву «масивних» і «тонких» тіл. В першому випадку в процесі нагріву температура зовнішньої теплоприймальної поверхні тіла T_n випереджає температуру в центрі тіла T_c (рис. 7.2), в другому - відносна різниця температур $(T_n - T_c)/T_n$ менше 0,05. Тому їх молю вважати однаковими, що значно спрощує розрахунки.

Для визначення типу процесу нагріву у кожному конкретному випадку використовують безрозмірний комплекс - критерій Біо:

$$Bi = \alpha l / \lambda \quad (2.29)$$

де α - коефіцієнт тепловіддачі, Дж/(м²·с·К); l - характерний розмір, який звичайно береться у напрямі теплового потоку, м; λ - коефіцієнт теплопровідності (теплопровідність) матеріалу тіла, Дж/(м·с·К).

По фізичному значенню критерій Біо є відношенням внутрішнього теплового опору (l/λ) до зовнішнього ($1/\alpha$). При $Bi > 0,25$ має місце процес нагріву масивного тіла, при $Bi \leq 0,25$ - тонкого тіла.

Процес нагріву «масивного» тіла за часто спостережуваних в технологічних процесах граничних умов III роду.

$$q_n = \alpha(T_\infty - T_n) \quad (2.30)$$

де q_n - густина теплового потоку до поверхні тіла, Дж/(м²·с); T_∞ - температури робочого простору нагрівальної установки (температура

тепловіддаючій поверхні); T_n - температура поверхні тіла (тепло приймальній поверхні); описується критерійним рівнянням.

$$\Theta = \frac{T_\infty - T}{T_\infty - T_0} = f(\text{Bi}, \text{Fo}, z/\ell), \quad (2.31)$$

де Θ - відносна температура; T_0 - початкова температура тіла, звично однакова для будь-якої його точки; T - температура в даній точці тіла у будь-який момент часу t ; z - расстояние від центру тіла (при двосторонньому його нагріві) до даної точки; ℓ - відстань від центру тіла до поверхні.

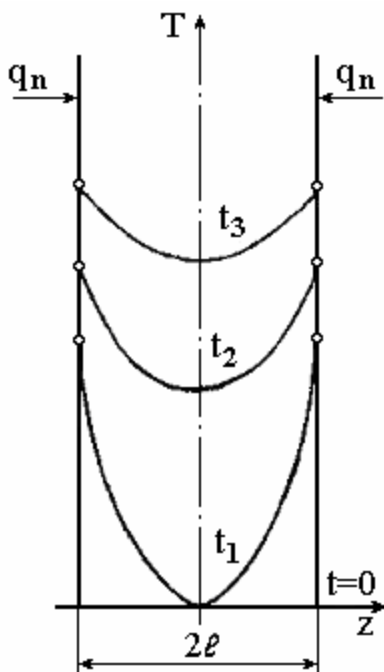


Рисунок 2.1 – Розподіл температури в різні моменти часу ($t_1 < t_2 < t_3$) в процесі двостороннього нагріву плоского масивного тіла завтовшки z

Вхідний в рівняння (2.31) критерій Фур'є Fo , званий також відносним часом, розраховується по рівнянню:

$$\text{Fo} = a \cdot t / \ell^2 = t / (\ell^2 / a) \quad (2.32)$$

де t - час з початку нагріву, с; a - коефіцієнт температуропроводності, $\text{м}^2/\text{с}$. визначуваний по формулі

$$a = \lambda / (c \cdot \rho) = 10^{-3} \cdot \lambda \cdot M / (c_v \cdot \rho) \quad (2.33)$$

де c - теплоємність одиниці маси при постійному об'ємі, Дж/кг·К); c_v - молярна теплоємність при постійному об'ємі, Дж/(моль·К); ρ - густина, $\text{кг}/\text{м}^3$; M - молекулярна маса, г/моль.

Молярна теплоємність при постійному об'ємі c_v пов'язана з молярною теплоємністю при постійному тиску c_p співвідношенням

$$c_v = c_p - R \quad (2.34)$$

де R - універсальна газова постійна ($R = 8,314$ Дж/(моль·К).

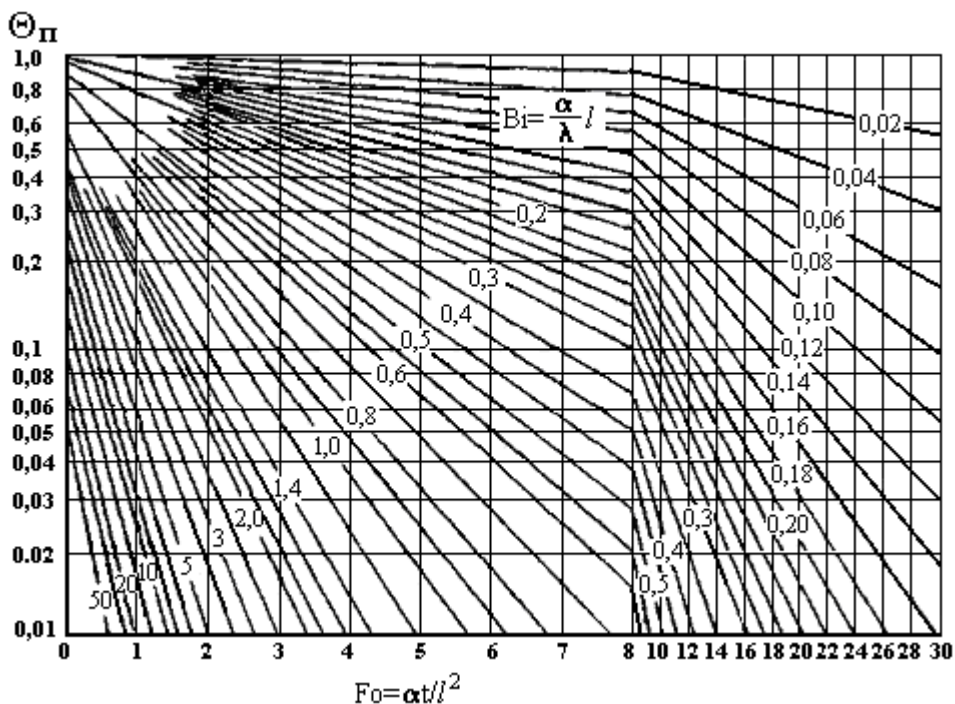


Рисунок 2.2 – Номограма для розрахунку процесу нагріву поверхні плоского тіла

Для зручності розрахунків функціональна залежність (2.31) Θ від критерію Fo при різних значеннях критерію Bi представляється у вигляді графіків - номограм окремо для поверхні Θ_n і центру Θ_c тіл різних форм. Такі номограми для розрахунку процесу двостороннього нагріву плоского тіла представлені на рис. 2.2 і рис. 2.3, а для розрахунку процесу двостороннього нагріву циліндрового тіла – на рис. 2.4 і рис. 2.5. В останньому випадку тепло приймальною є циліндрова поверхня. В першому випадку як характерний розмір береться половина товщини тіла, в другому – його радіус. Графіки дозволяють проводити технічні розрахунки з достатнім ступенем точності.

Для розрахунку процесу нагріву $(t,0)$ «тонкого» тіла ($Bi < 0,25$) використовують рівняння

$$t = \frac{c \cdot \rho \cdot V}{\alpha \cdot F} \ln \frac{T_{\infty} - T_0}{T_{\infty} - T}, \quad (2.35)$$

де t - час процесу, с; V - об'єм тіла, м³; F - площа тепло приймальної поверхні, м².

Оскільки в рівняння (2.31) і (2.35) входить різниця температур, то значення температури можна використовувати як в градусах за шкалою Цельсія, так і в градусах за шкалою Кельвіна.

У таблиці 2.1 необхідні для розрахунків фізичні властивості деяких напівпровідникових матеріалів. При розрахунку критерію Bi можна користуватися приведеними в табл. 2.1 значеннями для 300 К.

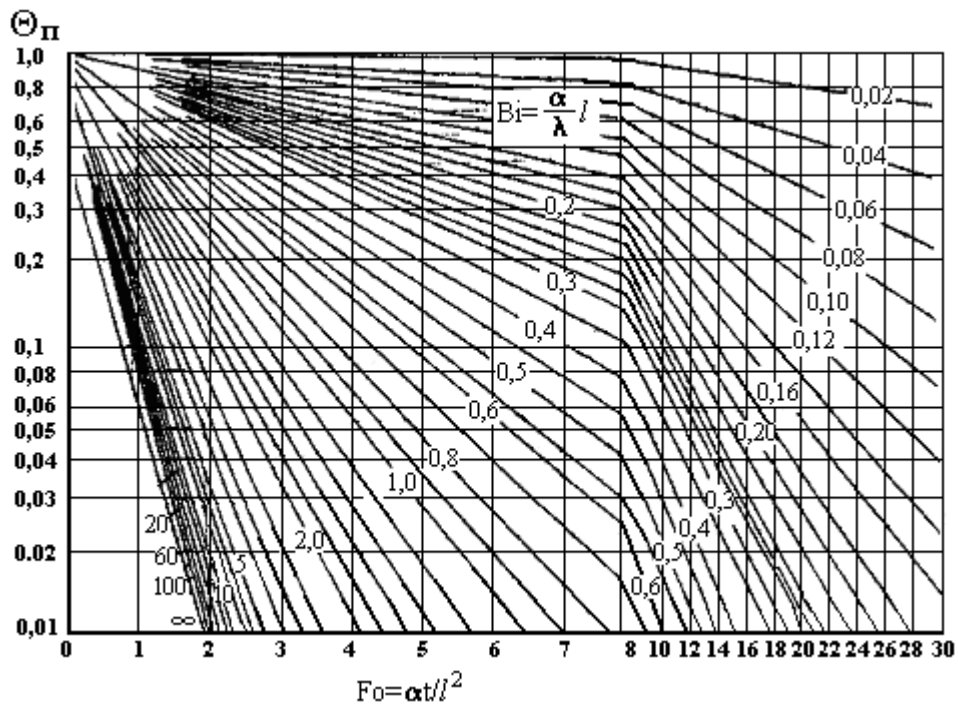


Рисунок 2.3 – Номограма для розрахунку процесу нагріву середини плоского тіла

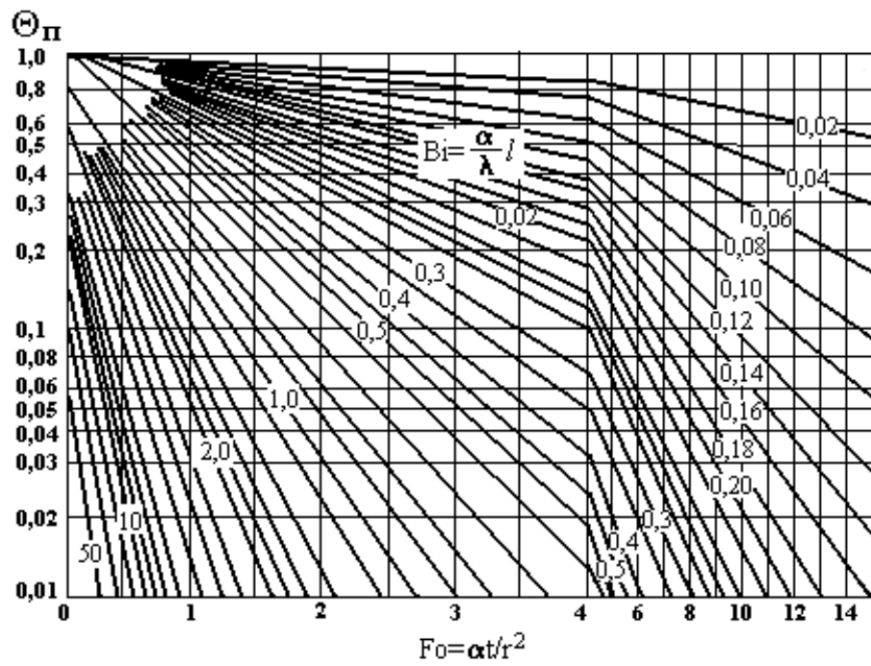


Рисунок 2.4 – Номограма для розрахунку процесу нагріву поверхні циліндрового тіла

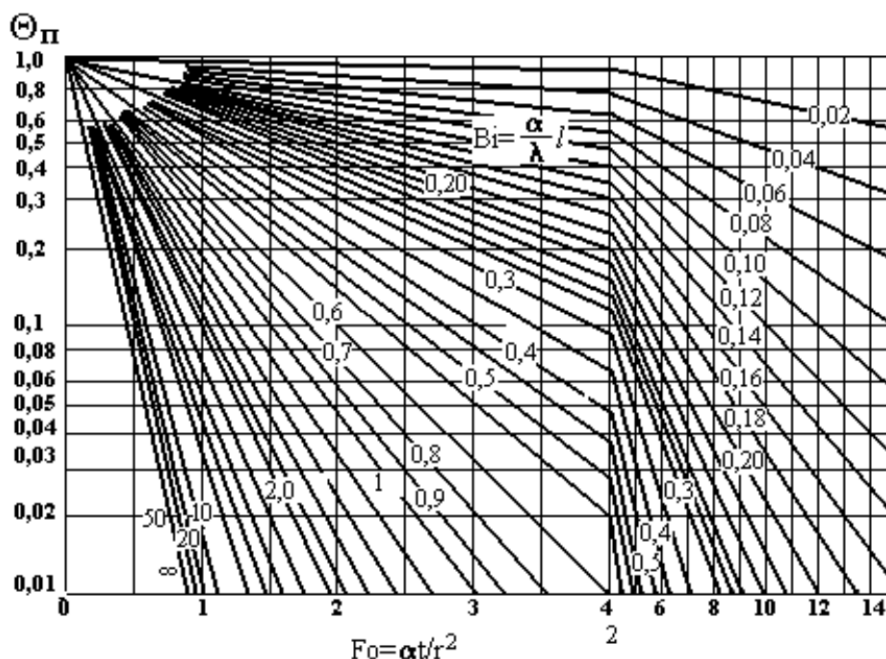


Рисунок 2.5 – Номограма для розрахунку процесу нагріву уздовж осі циліндрового тіла

Приклад 1. Розрахувати процес нагріву графітного циліндрового блоку діаметром $d = 0,1$ м і заввишки $H = 0,75$ м. Тепло приймальної є циліндрова поверхня. $T_0 = 20^\circ\text{C}$, $T_\infty = 1300^\circ\text{C}$. Густина графіту $\rho = 1,8 \cdot 10^3$ кг/м³. Температурна залежність коефіцієнта теплопровідності має вигляд: $\lambda = 105,9 - 0,044T$, Дж/(м·с·К). Температурна залежність теплоємності описується рівнянням $c = 1098 + 0,17T$ Дж/(кг·К). Коефіцієнт тепловіддачі $\alpha = 1500$ Дж/м²·с·К).

Рішення

Розрахунок проводять в наступній послідовності:

1. Задаємо дещо значення температури в поверхні в інтервалі $T_0 - T_\infty$;
2. Розраховуємо вхідну в критерій Bi величину λ для прийнятих значень температури поверхні;
3. Визначаємо значення критерію Bi по рівнянню (2.29). Якщо $Bi > 0,25$, то продовжуємо розрахунок процесу нагріву «масивного» виробу;
4. Розраховуємо по рівнянню (2.31) Θ_Π для заданих значень T_Π ;
5. По графіках на рис. 2.6 залежностей $\Theta = f(Bi, Fo)$ визначаємо значення Fo ;
6. Розраховуємо теплоємності для прийнятих значень T_Π ;

7. Розраховуємо по рівнянню (2.33) коефіцієнт теплопроводності;
8. По значеннях критерію Fo з використанням рівняння (2.32) розраховуємо час нагріву ($t=Fo \cdot r^2/a$) поверхні тіла для прийнятих значень температури;
9. По графіках на рис. 2.5 залежностей $\Theta_{ц}=f(Bi, Fo)$ і значенням критеріїв Bi і Fo визначаємо величини $\Theta_{ц}$;
10. Розраховуємо $T_{ц}$ по рівнянню $T_{ц} = T_{\infty} - (T_{\infty} - T_0) \cdot \Theta_{ц}$ [див. рівняння (2.31)];
11. Розраховуємо значення $\Delta T = T_{п} - T_{ц}$.

Результати розрахунку процесу нагріву «масивного» тіла доцільно представити у вигляді табл. 2.2.

Будуємо графіки залежності $T_{п}$ і $T_{ц}$ від часу нагріву і $\Delta T=f(t)$, рис. 2.7

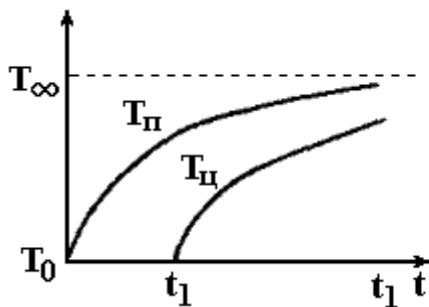


Рисунок 2.6 – Тимчасова залежність температури поверхні і центру в процесі нагріву масивного тіла

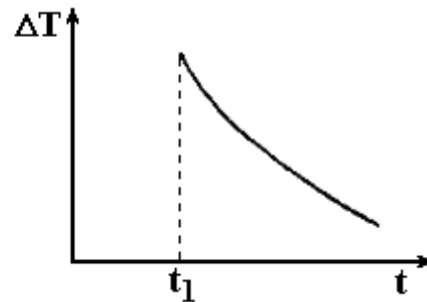


Рисунок 2.7 – Тимчасова залежність ΔT при нагріві масивного тіла

Приклад 2. Розрахувати процес двостороннього нагріву пластини кремнію діаметром $d = 80$ мм і завтовшки $h = 20$ мм. Коефіцієнт тепловіддачі $\alpha=1500$ Дж/м²·с·К), $T_0= 20^{\circ}$ С, $T_{\infty} = 700^{\circ}$ С.

Рішення

1. Розраховуємо значення критерію Bi по рівнянню (2.29). З табл. 2.1 знаходимо $\lambda = 109$ Дж/(м·с·К), $Bi = 1100 \cdot 1 \cdot 10^{-2} / 109 = 0,1$.

Отже, пластина нагріватиметься по типу «тонкого» тіла, і розрахунок далі проводимо по рівнянню (2.35).

2. Розраховуємо тепло приймальну поверхню: $F=2\pi r^2=2 \cdot 3,14(4 \cdot 10^{-2})^2= 1 \cdot 10^{-2}$ м².

3. Розраховуємо об'єм пластини: $V=h \cdot 0,5F=2 \cdot 10^{-2} \cdot 0,5 \cdot 1 \cdot 10^{-2} = 1 \cdot 10^{-4}$, м².
4. Розраховуємо середню температуру: $T=(700+20)/2=360^\circ \text{C}=633 \text{ K}$.
5. Розраховуємо теплоємність при середній температурі. Коефіцієнт рівняння температурної залежності теплоємності знаходимо в табл. 2.1:

$$c = 800 + 0,092 \cdot 633 - 0,15 \cdot 10^8 \cdot 633^{-2} = 881 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K}).$$

6. Записуємо рівняння (2.35) в розрахунковому вигляді. Значення густини кремнію знаходимо в табл. 2.1: $\rho = 2,33 \cdot 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$.

$$t = \frac{881 \cdot 2,33 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10^{-4}}{1100 \cdot 1 \cdot 10^{-2}} \ln \frac{700 - 20}{700 - T} = 18,66 \ln \frac{680}{700 - T}, \text{ с.}$$

Представимо результати розрахунку процесу нагріву «тонкого» тіла у вигляді таблиці

T° C	100	200	300	400	500	600	675
t, с	2,3	5,7	9,9	15,3	22,8	35,8	61,6

Будуємо графік залежності $T = f(t)$.

Таблиця 2.1 – Деякі фізичні властивості напівпровідників

Напівпро- відник	M, г/моль	ρ , г/см ³	λ (300 K), Дж/(м·с·K)	$c=a+bT+cT^{-2}$, Дж/(кг·K)		
				a	b	$c \cdot 10^{-2}$
Si	28,09	2,33	109	860	0,092	- 0,15
Ge	72,59	5,33	59	340	0,051	- 0,03
AlP	57,16	2,40	90	841	0,090	- 0,15
AlAs	101,89	3,60	8	370	0,123	-
AlSb	148,74	4,22	56	290	0,113	-
GaP	100,70	4,13	110	423	0,103	-
GaAs	144,64	5,32	54	290	0,087	-
GaSb	191,48	5,62	35	233	0,087	-
InP	145,80	4,79	67	292	0,114	-
InAs	189,74	5,67	28	232	0,088	-
InSb	236,68	5,78	18	209	0,035	-

Таблиця 2.2 – Розрахункові значення параметрів процесу нагріву «масивного»

тіла

Параметр	Значення параметру при $T_{пл}$,				
	600° C	800° C	1000° C	120° C	1270° C
λ , Дж/(м·с·К)	67,5	58,7	49,9	41,1	38,0
$Bi = \alpha \cdot r / \lambda$	$\frac{1500 \cdot 0,05}{67,5} = 1,11$	1,28	1,50	1,82	1,97
$\Theta = \frac{T_{\infty} - T_{п}}{T_{\infty} - T_0}$	$\frac{1300 - 600}{1300 - 20} = 0,55$	0,39	0,23	0,078	0,023
Fo	0,125	0,375	0,531	0,844	1,25
c , Дж/(кг·К)	1246,4	1280,4	1314,4	1348,4	1360,3
$a \cdot 10^5 =$ $= \lambda \cdot 10^5 / (c \cdot \rho)$, $м^3/с$	$\frac{67,5 \cdot 10^5}{1246,4 \cdot 1,8 \cdot 10^3} = 3,01$	2,55	2,11	1,69	1,55
$t = \frac{Fo \cdot r^2}{a}$, с	$\frac{0,125 \cdot 0,05^2}{3,01 \cdot 10^{-5}} = 10$	37	63	125	202
$\Theta_{ц}$	0,80	0,51	0,36	0,16	0,04
$T_{ц} = T_{\infty} - (T_{\infty} - T_0) \cdot \Theta_{ц}$, °C	$1300 - (1300 - 20) \cdot 0,80 = 276$	647	878	1095	1249
$\Delta T = T_{п} - T_{ц}$, °C	$600 - 276 = 324$	153	132	105	21

3 Варіанти завдань для розрахунку

Таблиця 3.1 – Варіанти для розрахунку завдання пункту 1.1

Варіант, №	Елемент <i>A</i>	Елемент <i>B</i>	Кількість елементу <i>A</i> (% ат.),	$k_{эф}$
1	Sb	Ge	1	$1, \cdot 10^{-2}$
2	P	Si	5	$3,5 \cdot 10^{-1}$
3	B	Ge	3	$5,0 \cdot 10^{-1}$
4	Ga	Si	7	$8,0 \cdot 10^{-3}$
5	Al	Ge	6	$2,0 \cdot 10^{-3}$
6	Sb	Si	12	$2,3 \cdot 10^{-2}$
7	Ga	Ge	4	$2,0 \cdot 10^{-4}$
8	Al	Si	9	$5,0 \cdot 10^{-2}$
9	P	Ge	10	$1,6 \cdot 10^{-2}$
10	B	Si	8	$8,0 \cdot 10^{-1}$
11	Sb	Ge	2	$1, \cdot 10^{-2}$
12	P	Si	7	$3,5 \cdot 10^{-1}$
13	B	Ge	5	$5,0 \cdot 10^{-1}$
14	Ga	Si	3	$8,0 \cdot 10^{-3}$
15	Al	Ge	8	$2,0 \cdot 10^{-3}$
16	Sb	Si	10	$2,3 \cdot 10^{-2}$
17	Ga	Ge	1	$2,0 \cdot 10^{-4}$
18	Al	Si	7	$5,0 \cdot 10^{-2}$
19	P	Ge	11	$1,6 \cdot 10^{-2}$
20	B	Si	6	$8,0 \cdot 10^{-1}$
21	Sb	Si	5	$2,3 \cdot 10^{-2}$
22	Ga	Ge	4	$2,0 \cdot 10^{-4}$
23	Al	Si	2	$5,0 \cdot 10^{-2}$
24	P	Ge	3	$1,6 \cdot 10^{-2}$
25	B	Si	1	$8,0 \cdot 10^{-1}$

Таблиця 3.2 – Варіанти для розрахунку завдання пункту 1.2

Варіант, №	Питомий електричний опір ρ Ом·см	Діаметр вирощуваного кристала d мм.	Довжина кристала l см.	Тип провідності
1	1	50	300	p-тип
2	5	75	350	n-тип
3	10	100	400	p-тип
4	15	125	450	n-тип
5	20	135	500	p-тип
6	25	150	550	n-тип
7	30	165	600	p-тип
8	35	180	650	n-тип
9	40	200	700	p-тип
10	45	50	750	n-тип
11	50	75	800	p-тип
12	55	100	850	n-тип
13	60	125	900	p-тип
14	65	135	950	n-тип
15	70	150	1000	p-тип
16	75	165	900	n-тип
17	80	180	800	p-тип
18	85	200	700	n-тип
19	90	50	600	p-тип
20	95	75	500	n-тип
21	100	100	400	p-тип
22	90	125	300	n-тип
23	80	150	250	p-тип
24	70	175	500	n-тип
25	60	200	600	p-тип

Таблиця 3.3 – Варіанти для розрахунку завдання пункту 1.3

№ варіанту	Кристалл	Домішка	d _к , мм	d _т , мм	n, об/хв	f, мм/хв	l, мм	b, мм
1	2	3	4	5	6	7	8	
1	Ge	P	40	120	40	0,5	70	35
2			45	130		1,0	75	38
3			50	140		1,5	80	40
4			55	150		2,0	85	42
5			60	160		2,5	90	50
6	Ge	As	40	120	40	0,5	10	–
7			45	130		1,0	12	–
8			50	140		1,5	14	–
9			55	150		2,0	12	–
10			60	160		2,5	14	–
11	Si	P	100	270	55	0,5	10	–
12			120	300		0,7	12	–
13			140	350		1,0	14	–
14			150	350		1,2	12	–
15			180	450		1,5	14	–
16	Si	Sb	100	270	55	1,5	70	35
17			120	300		1,2	75	38
18			140	350		1,0	80	40
19			150	350		0,7	85	42
20			180	450		0,5	90	50
21	Ge	P	–	–	–	3,0	70	35
22			–	–		3,5	75	38
23			–	–		4,0	80	40
24			–	–		4,5	85	42
25			–	–		5,0	90	45

Таблиця 3.4 – Варіанти для розрахунку завдання пункту 1.4

Варіант, №	Матеріал	α , Дж/(м ² ·с·К)	T_{∞} , °С	d, мм	h, м
1	Si	1000	700	120	0,7
2		1000	650	120	0,002
3		1000	700	100	0,5
4		1000	700	100	0,02
5	Ge	850	600	100	0,8
6		850	650	100	0,05
7		800	650	80	0,5
8		800	700	80	0,008
9	GaAs	1000	650	50	0,4
10		1000	550	50	0,008
11		1000	600	50	0,02
12		900	600	50	0,6
13	GaP	900	650	45	0,007
14		850	650	45	0,5
15		800	600	45	0,6
16		800	650	45	0,008
17	GaSb	950	500	50	0,4
18		950	500	45	0,3
19		950	400	45	0,003
20		900	600	40	0,4
21	InAs	900	550	38	0,35
22		900	550	38	0,6
23		800	600	50	0,45
24		800	550	45	0,5
25		800	500	45	0,005

Таблиця 3.5 – Варіанти для теоретичного питання пункту 1.5

Варіант, №	Назва теми
1	Класифікація напівпровідникових матеріалів
2	Розрахунки легування кремнію
3	Поведінка домішок в кристалі напівпровідника
4	Отримання товарного двоокису і чистого полікристалічного германію
5	Вплив домішок на кристалізацію розплавів
6	Антимоніди індію і галію
7	Кристалізаційні процеси очищення
8	Ефективний коефіцієнт розподілу
9	Особливості кристалізації розплавів напівпровідникових з'єднань
10	Кристалізаційні процеси для отримання кристалів напівпровідникових з'єднань, що розкладаються
11	Використання розплавів нестехіометричного складу для отримання кристалів напівпровідникових з'єднань, що розкладаються і тугоплавких
12	Методи вирощування напівпровідників з розплаву
13	Класифікація високочистих речовин
14	Арсенід галію
15	Зонна структура кристалів
16	Поводження з високочистими речовинами
17	Фізико-хімічні і хімічні властивості кремнію
18	Різка, шліфовка і поліровка напівпровідників
19	Фосфід галію
20	Основні і допоміжні матеріали
21	Компоненти напівпровідникових з'єднань і що легують елементи
22	Термоелектричні матеріали і тверді розчини напівпровідникових з'єднань, що не розкладаються
23	Контейнерні матеріали
24	Властивості селену
25	Витягання селену з відходів кольорової металургії

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Нашельский А.Я. Технология полупроводниковых материалов. М.: Металлургия.- 1972.- 432 С.
2. Червоний І.Ф. , Єгоров С.Г., Воляр Р. М. Виробництво напівпровідникових матеріалів. Конспект лекцій / Запоріжжя: Видавництво ЗДІА, 2006. – 100 с.
3. Фалькевич Э.С, Пульнер Э.О., Червоний И.Ф. и др. Технология полупроводникового кремния. М.: Металлургия.- 1992.- 408 с.
4. Таран Ю.Н., Куцова В.З., Червоний И.Ф., Швець Е.Я., Фалькевич Э.С. Полупроводниковый кремний: теория и практика производства. Монография. Запорожье, ЗГИА.- 2004.- 344 с., илл.
5. Сахаров Б.А., Вигдорович В.Н., Маслов В.Н. и др. Металлургия и технология полупроводниковых материалов. М.: Металлургия.- 1972.- 544 с.
6. Таиров Ю.М., Цветков В.Ф. Технология полупроводниковых и диэлектрических материалов: Учеб. для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Высш. шк.- 1990.- 423 с.
7. Марина Л.И., Нашельский А.Я., Колесник Л.И. Полупроводниковые фотоды $A^{III}B^V$ и твердые растворы на их основе. М.: Металлургия.- 1974.- 232 с.
8. Хилсум К., Роуз-Инс А. Полупроводники типа $A^{III}B^V$ (пер. англ.). М.: изд-во Иностранной литературы. 1963.- 323 с.
9. Червоний І.Ф., Куцова В.З., Пожуев В І., Швець Е.Я., Носко О А., Єгоров С Г., Воляр Р.М. Напівпровідниковий кремний: теорія і технологія виробництва. Монографія / Під ред. докт. техн. наук, професора Червоного І.Ф. - ЗДІА, Запорожжя, 2009 - 488 с.
10. Ежовский Ю.К., Денисова О.В. Физико-химические основы технологии полупроводниковых материалов: Учеб. пособие . С-Пб. : СЗТУ, 2005 - 80 с.

Підписано до друку .2010 р. Формат 60x84 1,32. Папір офсетний.
Умовн. друк. арк. 4,8. Наклад 50 прим.
Замовлення №К.

Віддруковано друкарнею
Запорізької державної інженерної академії
з комп'ютерного оригінал-макету

69006, м. Запоріжжя, пр. Леніна, 226
РВВ ЗДІА, тел. 22-38-240