

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №2

2 РОЗРАХУНОК ЗАДАНОЇ КІЛЬКОСТІ ЛЕГУЮЧОЇ ДОМІШКИ

У реальних умовах неможливо виготовити кристал напівпровідника, що не містить яких-небудь домішок. Також неможливо приготувати кристал з тільки однією певною домішкою. Звичайно в напівпровідниках завжди присутні одночасно як донорні, так і акцепторні домішки. Кожна з них вносить свій внесок в електропровідність:

$$\sigma = en\mu_n + ep\mu_p, \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1} \quad (2.1)$$

де n і p - концентрації електронів і дірок, відповідно, μ_n , μ_p - їх рухливість.

Якщо концентрація донорної домішки N_D набагато перевищує концентрацію акцепторної, тобто

$$N_D \gg N_A, \text{ ат/см}^3,$$

то внеском дірок в електропровідність можна нехтувати і вона визначатиметься тільки електронами:

$$\sigma = en\mu_n, \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}, \quad (2.2)$$

де $n = N_D - N_A$.

Навпаки, якщо

$$N_A \gg N_D, \text{ ат/см}^3,$$

то електропровідність визначається тільки дірками і

$$\sigma = ep\mu_p, \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1} \quad (2.3)$$

де $p = N_A - N_D$.

Може опинитися, що

$$N_D = N_A.$$

В цьому випадку надмірні електрони донорних домішок заповнюють всі вільні зв'язки (дірки) акцепторів.

Таке явище носить назву компенсація. Відрізнити такий компенсований напівпровідник від абсолютно чистого власного напівпровідника можна тільки по температурній залежності електропровідності і коефіцієнта Холу.

На практиці найчастіше зустрічається випадок, коли концентрації донорів або акцепторів трохи перевищують один одного:

$$N_D > N_A \text{ або } N_A > N_D .$$

Тоді відношення

$$\varepsilon = \frac{N_A}{N_D} \cdot 100 \% \quad (2.4)$$

для напівпровідника електронного типу електропровідності або

$$\varepsilon = \frac{N_D}{N_A} \cdot 100 \% \quad (2.5)$$

для напівпровідника діркового типу електропровідності, називається ступенем компенсації. Якщо вона складає величину менше 15 %, то напівпровідник вважається практично некомпенсованим.

Приклад.

Розрахувати кількість легуючої домішки фосфору, необхідної для введення в розплав кремнію масою 0,8 кг, з якого повинен бути вирощений монокристал n-типу електропровідності з питомим опором 150 Ом·см, масою 0,5 кг і діаметром 40 мм. Процес проводиться у вакуумі в тиглі з природного кварцу; швидкість росту монокристала 1,5 мм/хв.

Спочатку визначимо концентрацію електронів в кремнії з необхідним питомим опором з урахуванням компенсації залишкової домішки бору в початковому полікристалічному матеріалі. Вміст домішки бору в початковому полікристалічному кремнії, одержаний водневим відновленням тетрахлориду кремнію, приймається рівним $1 \cdot 10^{13}$ ат/см³ ($N_{кр}^{A1}$), (що відповідає питомому опору контрольних зразків, рівному 1000 Ом·см).

По рівнянню (2.2) для $\rho = 150$ Ом·см і $\mu_n = 1450$ см²/(В·с) одержимо

$$N_{кр}^{D0} = 3 \cdot 10^{13} \text{ ат/см}^3 .$$

Тоді

$$N_{\text{кр}}^{D_1} = N_{\text{кр}}^{D_0} + N_{\text{кр}}^{A_1} = 3 \cdot 10^{13} + 1 \cdot 10^{13} = 4 \cdot 10^{13}, \text{ ат/см}^3.$$

Ефективний коефіцієнт розподілу фосфору для швидкості вирощування кремнію 1,5 мм/хв приймаємо рівним 0,52

Тоді концентрація фосфору $N_{\text{р}}^{D_1}$ $N_{\text{р}}^{D_1}$ в розплаві

$$N_{\text{р}}^{D_1} = \frac{4 \cdot 10^{13}}{0,52} = 7,7 \cdot 10^{13}, \text{ ат/см}^3.$$

Наступною дією розрахуємо кількість легуючої домішки, необхідної для компенсації домішки бору, перехідної в розплав в результаті розчинення в ньому кварцового тигля.

Поверхня контакту розплаву з кварцом в стандартному кварцовому тиглі, що має циліндрову частину діаметром 111 мм і заввишки 34 мм і сферичну частину з радіусом сфери 82 мм і заввишки 31 мм, рівна

$$S_{\text{тигля}} = 23,14 \cdot (5,553,4 + 8,23,1) = 276 \text{ см}^2.$$

Монокристал діаметром 40 мм, масою 500 г має довжину

$$L_{\text{кр}} = \frac{500 \cdot 4}{2,32 \cdot 3,14 \cdot 4^2} = 17,2 \text{ см} = 172 \text{ мм},$$

а час його вирощування складає

$$t = 172/1,5 = 104 \text{ хв.}$$

Час від моменту розплавлення завантаження початкового кремнію в тиглі до виходу монокристала на заданий діаметр прийmemo рівним 20 хв. Тоді загальний час контакту розплаву кремнію з кварцом тигля складе 124 хв.

Прийнявши розчинність кварцу в кремнії у вакуумі $6,65 \cdot 10^{-2}$ мг/(см²·хв), визначимо спочатку кількість кварцу, що розчинився в кремнієвому розплаві:

$$G_{\text{кв}} = 6,65 \cdot 10^{-2} \cdot 276 \cdot 124 = 2270, \text{ мг},$$

а потім, прийнявши вміст бору в природному кварці рівним $5 \cdot 10^{-5}$ % (по масі), кількість бору, що перейшов в розплав, складе

$$G_B = 2279 \frac{5 \cdot 10^{-5}}{100} = 1,13 \cdot 10^{-2} \text{ мг} = \frac{1,13 \cdot 10^{-3} \cdot 6,023 \cdot 10^{23}}{10,81 \cdot 10^3} = 6,3 \cdot 10^{16}, \text{ атомів.}$$

Для компенсації домішки бору, що перейшов в розплав в концентрації

$$N_P^B = N_P^{D2} = \frac{6,3 \cdot 10^{16} \cdot 2,32}{800} = 1,83 \cdot 10^{14} \text{ ат/см}^3$$

необхідна така ж кількість легуючої домішки фосфору N_P . В результаті, концентрація фосфору в розплаві складе

$$N_P^{D1} + N_P^{D2} = 7,7 \cdot 10^{13} + 1,83 \cdot 10^{14} = 2,6 \cdot 10^{14}, \text{ ат/см}^3.$$

Розрахуємо кількість фосфору, що випаровується протягом часу від моменту розплавлення завантаження кремнію до виходу монокристала на заданий діаметр. Втрати летючої домішки з тигля з розплавом, об'ємність електронів. Рухливість дірок ϵ_m якого не змінюється, можуть бути визначені за допомогою рівняння

$$\frac{C}{C_0} = \exp\left(-\frac{\alpha_{\text{вип}} \cdot t \cdot F_{\text{вип}}}{V_p}\right),$$

де $\alpha_{\text{вип}}$ – коефіцієнт випаровування, см/сек, $\alpha_{\text{вип}} = 7,2 \cdot 10^{-4}$; t – час, с; $F_{\text{вип}}$ – поверхня випаровування, см²; V_p – об'єм розплаву, см³.

Поверхня випаровування для розплаву, що знаходиться в тиглі діаметром 111 мм, складає

$$F_{\text{вип}} = 0,785 \cdot 11,1^2 = 95 \text{ см}^2,$$

при цьому зменшенням поверхні за рахунок розрощуваного кристала нехтуємо. Об'єм розплаву рівний

$$V_p = 800/2,53 = 316 \text{ см}^3.$$

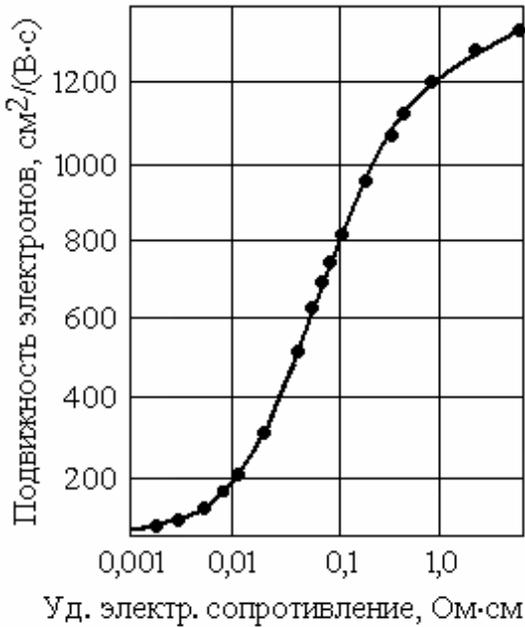
Тоді

$$\frac{C}{C_0} = \exp\left(-\frac{7,2 \cdot 10^{-4} \cdot 20 \cdot 60 \cdot 95}{316}\right) = 0,771.$$

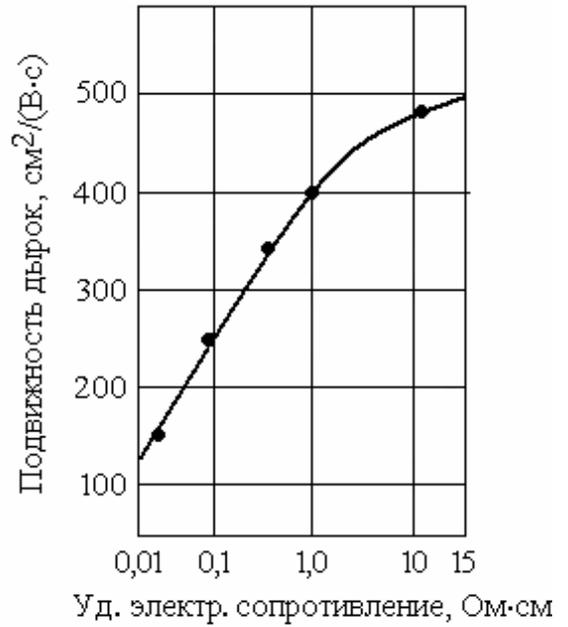
Остаточню

$$N_P^D = \frac{N_P^{D1} + N_P^{D2}}{C/C_0} = \frac{2,6 \cdot 10^{14}}{0,771} = 3,37 \cdot 10^{14}, \text{ ат/см}^3$$

Далі розрахунок кількості монокристалічної лігатури кремній-фосфор проводиться з урахуванням питомого електричного опору лігатури (з урахуванням концентрації фосфору в кремнії) і рухливості носіїв заряду. При цьому рухливість носіїв заряду для сильно легovanого кремнію визначається по графіку на рис.2.1.



а



б

а – кремній електронного типу електропровідності, б – кремній діркового типу електропровідності

Рисунок 2.1 – Залежність рухливості носіїв зарядів в сильно легovanому кремнії від питомого електричного опору