Chapitre 9 – Propriétés physiques

EXERCICE 9-17

a) Température à laquelle il faut porter le silicium :

La variation de la conductivité du silicium en fonction de la température est donnée par l'équation 9.62 où les termes N_e, N_t , μ_e et μ_t sont des constantes pour un semi-conducteur intrinsèque :

$$\sigma_T = (N_e N_t)^{\frac{1}{2}}(\mu_e + \mu_t)\exp\left[\frac{-E_g}{2kT}\right] \qquad (1)$$

À la température ambiante T_a = 293 K, on a une conductivité σ_a = 4,3x10^{-4} S/m

À la température T_x recherchée, la conductivité σ_x doit être égale à 200 S/m.

Faisons le rapport de ces conductivités en tenant compte de l'équation (1) :

$$\frac{\sigma_x}{\sigma_a} = \frac{\exp\left(-E_g/2kT_x\right)}{\exp\left(-E_g/2kT_a\right)} = \exp\left[\frac{E_g}{2k}\left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_x}\right)\right] \qquad (2)$$

En prenant le logarithme naturel des deux membres de l'égalité (2) et en réarrangeant l'expression, on obtient :

$$\frac{1}{T_x} = \frac{1}{T_a} - \frac{2k}{E_g}\ln\left(\frac{\sigma_x}{\sigma_a}\right) \qquad (3)$$

Avec les valeurs numériques de **k**, E_g , σ_x et σ_a données, on obtient ainsi :

$$\frac{1}{T_x} = \frac{1}{293} - \frac{2x1{,}381x10^{-23}}{1{,}1x1{,}6x10^{-19}}\ln\left(\frac{200}{4{,}3x10^{-4}}\right) = 1{,}357x10^{-3}\ K^{-1}$$

La température recherchée T_x est donc égale à 736,8 K ≈ 464 °C

$$\boxed{T \approx 464\ ºC}$$

b) Élément(s) dopant pour obtenir un semi-conducteur de type p :

Un semi-conducteur extrinsèque de type **p** a des porteurs de charge positifs, donc des **trous** (ou lacunes électroniques). Il est obtenu en dopant du silicium pur par des **éléments appartenant à la colonne III du tableau périodique**, puisque ces éléments n'ont que trois électrons de valence, et, en solution solide dans le silicium, créeront un trou (lacune électronique) pour chaque atome d'élément dopant.

$$\boxed{\textbf{B, Al, Ga}\ \text{ou}\ \textbf{In}}$$

c) Concentration C_A en élément dopant « p » pour obtenir une conductivité de 200 S/m à l'ambiante:

Selon les données de l'exercice, la conductivité à la température ambiante est assurée par les porteurs de charge de l'élément dopant, donc les trous (lacunes électroniques). En négligeant la contribution des électrons et des trous du silicium intrinsèque à la conductivité – puisque cette contribution est très faible – et grâce à l'équation 9.57, on en déduit le nombre $\mathbf{n_t}$ de trous par unité de volume (en m^3) que doit contenir le silicium extrinsèque pour avoir une conductivité de 200 S/m , :

$$n_t = \frac{\sigma_T}{e\mu_t} = \frac{200\ \text{S/m}}{\left(1{,}6\text{x}10^{-19}\ \text{C}\right)\left(4\text{x}10^{-2}\ \text{m}^2/\text{V.s}\right)} = 3{,}13\text{x}10^{22}\ \text{atomes/m}^3 \qquad (4)$$

Dans 1 m^3 de silicium, il ya $\mathbf{n_{Si}}$ atomes de silicium, nombre obtenu aisément si l'on connaît la masse volumique ρ du silicium (2,33 g/cm^3 = 2,33x10^6 g/m^3) et la masse $\mathbf{m_{Si}}$ d'un atome de silicium, qui est égale au rapport de la masse molaire $\mathbf{A_{Si}}$ au nombre d'Avogadro $\mathbf{N_A}$. On obtient ainsi :

$$n_{Si} = \frac{\rho_{Si}}{m_{Si}} = \frac{\rho_{Si}}{A_{Si}/N_A} = \frac{\left(2{,}33\text{x}10^6\ \text{g/m}^3\right)\left(6{,}02\text{x}10^{23}\ \text{atomes/mole}\right)}{28{,}09\ \text{g/mole}} = 4{,}99\text{x}10^{28}\ \text{atomes/m}^3$$

La concentration atomique $\mathbf{C_A}$ en élément dopant de type « **p** » est donc égale à :

$$C_A = \frac{n_t}{n_{Si}} = \frac{3{,}13\text{x}10^{22}}{4{,}99\text{x}10^{28}} = 6{,}27\text{x}10^{-7} = 0{,}627\ \text{ppm} = 6{,}27\text{x}10^{-5}\ \% \qquad (5)$$

$$\boxed{\mathbf{(C_A)_p = 0{,}627\ ppm\ at.}}$$

Remarque : on constate qu'il faut un niveau très faible de dopage (moins de 1 ppm atomique !) pour multiplier par environ 500 000 fois (200/4,3x10^{-4}) la conductivité du silicium à la température ambiante.

d) Concentration C_A en élément dopant « n » pour obtenir une conductivité de 200 S/m à l'ambiante:

En utilisant un élément dopant de type « **n** », on modifie simplement la mobilité μ des porteurs de charge majoritaires, cette fois des électrons. Donc, d'après les équations (4) et (5), on en déduit que la concentration $(\mathbf{C_A})_\mathbf{n}$ en élément dopant de type « **n** » est liée à la concentration $(\mathbf{C_A})_\mathbf{p}$ en élément dopant de type « **p** » par la relation suivante :

$$\frac{(C_A)_n}{(C_A)_p} = \frac{\mu_t}{\mu_e}$$

$$(C_A)_n = \frac{\mu_t}{\mu_e}(C_A)_p = \frac{0{,}04}{0{,}14}\text{x}6{,}027\text{x}10^{-7} = 1{,}72\text{x}10^{-7} = 0{,}172\ \ \text{ppm atomique}$$

$$\boxed{\mathbf{(C_A)_n = 0{,}172\ ppm\ at.}}$$