Correction

Questions du cours :

1- L'effet Peltier : quand un courant I va circule dans une d'une jonction de type sandwich A-B-A formée de deux métaux A et B, que la température d'une des deux jonctions augmente tandis que celle de l'autre jonction diminue.

2- La caractéristique I-V réelle d'une diode bipolaire ou Schottky est différente de l'idéale à cause de la présence des états d'interface, de la résistance des régions neutres, les défauts, l'inhomogénéité du dopage et d'autres défauts.

3- Le principe de base de l'effet transistor c'est de moduler le courant inverse de la jonction BC polarisée en inverse par une injection des porteurs minoritaires dans la base à partir de la jonction EC polarisée dans le sens direct.

4- La capacité de la structure MOS diminue avec l'augmentation de la fréquence parceque le temps de relaxation de charges dans le métal est très faible (quelques ps), par contre la variation de la charge d'inversion est un mécanisme lent. Donc, dans le cas des basses fréquences (BF), la variation de la charge du métal (grille) ΔQ_m est lente et elle peut être compensée par la variation de la charge d'inversion ΔQ_i. Dans le cas des hautes fréquences (HF), la variation de la charge du métal ΔQ_m est très rapide et ne peut pas être compensé par une variation de la charge d'inversion ΔQ_i, mais plutôt, par une variation de la charge de la ZCE ΔQ_{sc}.

5- Les transitions électroniques de base dans un semiconducteur dopé sont : B2B, excitonique, EA°, hD°, et DAP.

6- Les différentes techniques de dopage qui peuvent être utilisées pour le dopage des monocristaux de Si sont : dopage au cours de la croissance, par diffusion, par plasma, et par implantation ionique.

Exercice 1 :

1. La concentration des dopants :

Dans le cas d'un diode Schottky, on a : $V_0 = \Phi_m - \Phi_{Sc}$

D'autre part, $\Phi_{Sc} = \chi + E_c - E_F$

Le semiconducteur est de type n et dans le cadre de l'approximation $n = N_d^+ \approx N_d$, on sait que :

$$n = N_C \, exp\left(-\frac{E_c - E_F}{kT}\right)$$

Donc ; $E_c - E_F = kT \, ln\left(\frac{N_C}{n}\right) = kT \, ln\left(\frac{N_C}{N_d}\right)$

$$V_0 = \Phi_m - \Phi_{Sc} = \Phi_m - \chi - (E_c - E_F)$$

$$E_c - E_F = \Phi_m - \chi - V_0 = 4.5 - 4 - 0.335 = 0.165 \, eV$$

Donc ;

$$n = N_d = N_C \, exp\left(-\frac{E_c - E_F}{kT}\right) = 2.8 \, 10^{19} \exp\left(-\frac{0.165}{0.026}\right) \approx 4.91 \, 10^{16} \, cm^{-3}$$

2. La valeur de la capacité de cette diode à l'équilibre :

A l'équilibre thermodynamique, on a : $C = \frac{\varepsilon}{W}$ avec $W = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{eN_D} V_0}$

AN : $W = 9.23 \, 10^{-6} \, cm = 92.3 \, nm$

$$C = 1.0828 \, 10^{-7} \frac{F}{cm^2} = 108.28 \, nF/cm^2$$

La valeur de la capacité de cette diode pour $V_a = -1 \, V$:

Sous polarisation par une tension V_a, on a : $C' = \frac{\varepsilon}{W'}$ avec :

$$W' = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{eN_D}(V_0 - V_a)} = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{eN_D} V_0 \frac{(V_0 - V_a)}{V_0}} = W \sqrt{\frac{(V_0 - V_a)}{V_0}}$$

AN : $W' = 1.996 \, W = 18.425 \, 10^{-6} \, cm = 184.25 \, nm$

$$C' = 0.5425 \, 10^{-7} \frac{F}{cm^2} = 54.25 \, nF/cm^2$$

Exercice 2 :

1. la concentration des dopants dans la région type p :

$$V_0 = \frac{k_B T}{e} ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right) \rightarrow ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right) = \frac{e \, V_0}{k_B T}$$

$$\frac{N_A N_D}{n_i^2} = exp\left(\frac{e \, V_0}{k_B T}\right)$$

Ce qui nous donne :

$$N_A = \frac{n_i^2}{N_D}\ exp\left(\frac{e\,V_0}{k_B T}\right)$$

AN :

$$N_A = \frac{(1.87\ 10^{13})^2}{10^{17}}\ exp\left(\frac{368.5}{26}\right) = 3.4969\ 10^9 exp\left(\frac{368.5}{26}\right) = \ 5\ 10^{15}\ cm^{-3}$$

2. La largeur de la ZCE à l'équilibre thermodynamique W :

A l'équilibre thermodynamique, on a :

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{e}\left(\frac{N_A + \ N_D}{N_A\, N_D}\right) V_0}$$

AN :

$$W = 0.3693\ 10^{-4}\ cm = 369.3\ nm$$

3. L'expression du champ électrique $E(x)$ dans la ZCE et sa valeur maximale E_m :

Dans le cas d'une jonction p-n abrupte :

$$\rho(x) = \begin{cases} -eN_A & x_p < x < 0 \\ eN_D & 0 < x < x_n \\ 0 \quad x_n < x\ et\ x < x_p \end{cases}$$

Dans la région $x_p < x < 0$:

En intégrant une fois l'équation du poisson avec les conditions aux limites : $E(x_p) = 0$

$$\frac{d^2V}{dx^2} = \frac{eN_A}{\varepsilon}$$

$$\frac{dV}{dx} = \frac{eN_A}{\varepsilon}(x - x_p) = -E(x)$$

Dans la région $0 < x < x_n$:

En intégrant une fois l'équation du poisson avec les conditions aux limites : $E(x_n) = 0$

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{eN_D}{\varepsilon}$$

$$\frac{dV}{dx} = -\frac{eN_D}{\varepsilon}(x - x_n) = \ -E(x)$$

La valeur maximale est obtenue pour $x = 0$:

$$E_m = |E(0)| = \frac{eN_D}{\varepsilon} x_n = -\frac{eN_A}{\varepsilon} x_p = \frac{2V_0}{W}$$

AN :

$$E_m = 1.996\ 10^4\ V/cm$$

4. Les concentrations des porteurs de charge dans les régions neutres à l'équilibre thermodynamique :

Pour $x = x_n$: $n_n \approx N_D = 10^{17}\ cm^{-3}$

$$n\,p = n_i^2 \rightarrow p = \frac{n_i^2}{n}$$

Donc ; $p_n = \frac{n_i^2}{N_D} = \frac{(1.87\ \ 10^{13})^2}{10^{17}} = 3.497\ 10^9\ \ cm^{-3}$

Pour $x = x_p$: $p_p \approx N_A = 5\ 10^{15}\ cm^{-3}$

$$n\,p = n_i^2 \rightarrow p = \frac{n_i^2}{n}$$

Donc ; $n_p = \frac{n_i^2}{N_A} = \frac{(1.87\ \ 10^{13})^2}{5\ 10^{15}} = 6.994\ 10^{10}\ \ cm^{-3}$

5. Les concentrations des porteurs de charge minoritaires aux points $x = x_n$ et $x = x_p$ lorsqu'une tension direct de 0.3 V est appliquée :

Pour $x = x_n$:

$$p_n' = p_n\, e^{\frac{eV_a}{k_B T}} = \frac{n_i^2}{N_D} e^{\frac{eV_a}{k_B T}} = 3.857\ 10^{14}\ cm^{-3}$$

Pour $x = x_p$:

$$n_p' = n_p\, e^{\frac{eV_a}{k_B T}} = \frac{n_i^2}{N_A} e^{\frac{eV_a}{k_B T}} = 7.175\ 10^{15}\ cm^{-3}$$

6. La valeur de la capacité de cette diode pour $V_a = -1.5\ V$:

Sous polarisation par une tension V_a, on a : $C' = \frac{\varepsilon}{W'}$ avec :

$$W' = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{e}\left(\frac{N_A + N_D}{N_A\, N_D}\right) V_0} = W\sqrt{\frac{(V_0 - V_a)}{V_0}}$$

AN : $W' = 2.2518\, W = 831.586\, nm$

$$C' = 16.95\ nF/cm^2$$