Examen final de composants et capteurs

Documents autorisés : polycopiés de cours - Durée : 1h30

Les deux parties de ce problème sont indépendantes. On se placera dans tout le problème en régime stationnaire, et sous l'hypothèse de faible injection. Pour les applications numériques, on consultera les données matériaux en fin de l'énoncé, et on se placera à température ambiante ($T = 300\ K$). N'oubliez pas de préciser les unités lors des applications numériques ...

Question préliminaire

Calculer les coefficients de diffusion D_n et D_p des électrons et des trous, puis les longueurs de diffusion L_n et L_p associées.

1 Etude d'une jonction N^+P

On considère une jonction N^+P, représentée sur la figure 1, considérée comme une jonction longue côté N et courte côté P, et ayant les caractéristiques suivantes :

$X_n = 300\mu m$	:	longueur de la zone N
$X_p = 5\mu m$	:	longueur de la zone P
$N_d = 10^{18}\ cm^{-3}$	:	densité de donneurs
$N_a = 10^{15}\ cm^{-3}$	:	densité d'accepteurs

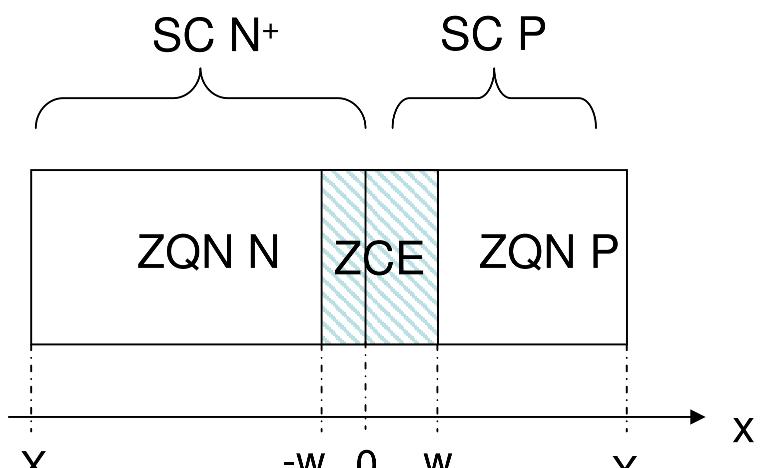

Fig. 1

1.1 Etude de l'équilibre thermodynamique

1. Représenter la densité de charges dans la jonction, en précisant la nature de ces charges. En traduisant la neutralité électrique de la zone de charge d'espace (ZCE), que peut-on dire sur la largeur de cette zone ?
2. En prenant en compte la remarque précédente, rappeler l'allure du diagramme des bandes à l'équilibre. On précisera sur le graphique les grandeurs suivantes : énergie de gap, écarts d'énergies entre le niveau de Fermi et la bande de valence côté P et la bande de conduction côté N.
3. Rappeler la formule générale reliant la largeur W de la ZCE à la barrière de potentiel V_d. Comment se simplifie cette expression dans le cas du problème ?
4. Calculer la barrière de potentiel V_d.
5. En déduire la largeur W de la ZCE.

1.2 Etude hors équilibre

On se place dans cette partie en polarisation directe.

1. Rappeler sur un schéma les conventions qu'il faut prendre pour que la polarisation directe corresponde à une tension appliquée $V > 0$ (on fera apparaitre sur ce schéma le symbole de la diode et les semiconducteurs P et N).
2. Ecrire les équations de continuité pour les électrons côté P et pour les trous côté N, dans les zones quasi-neutres (ZQN).
3. En utilisant toutes les hypothèses, écrire alors les équations différentielles satisfaites par l'excès d'électrons Δn dans la zone quasi-neutre P, et par l'excès de trous Δp dans la ZQN N.
4. Donner la forme générale des solutions des équations différentielles.
5. Ecrire les conditions aux limites concernant les excès de porteurs minoritaires, en supposant que l'on retrouve l'équilibre thermodynamique au niveau des contacts.
6. En tenant compte des hypothèses faites sur la jonction (longue et courte), montrer que les densités de porteurs minoritaires en excès se mettent sous les formes suivantes :

$$\Delta n = \alpha x + \beta \text{ et } \Delta p = \Delta p_0 e^{x/a} \tag{1}$$

   Rem : pour Δp, on fera attention au signe de x.

7. A l'aide des conditions aux limites, identifiez les coefficients $\alpha, \beta, \Delta p_0$ et a.

   Une telle jonction est en réalité intégrée dans un transistor bipolaire. On souhaite maximiser le courant d'électrons, et minimiser le courant de trous. Pour ce faire, on étudie un facteur appelé efficacité d'injection, définit par : $\gamma = J_n/(J_n + J_p)$, que l'on cherche à faire tendre vers 1.

8. D'après les expressions précédentes, en déduire les densités de courant de minoritaires en tout point x : $J_n(x)$ et $J_p(x)$
9. Ecrire alors leurs expressions de part et d'autre de la ZCE.
10. Donner l'expression de γ.
11. Faire l'application numérique.

2 Jonction N$^+$P à dopage non uniforme

On considère une jonction N^+P dont le dopage de la zone P est non uniforme et a les caractéristiques suivantes :

$X_n = 300\mu m$	:	*longueur de la zone N (jonction longue)*
$X_p = 5\mu m$	:	*longueur de la zone P (jonction courte)*
$N_d = 10^{18}\ cm^{-3}$	:	*densité de donneurs*
$N_a(x) = N_a\ e^{-x/x_0}$	:	*densité d'accepteurs*
$N_a = 10^{15}\ cm^{-3}$		
$x_0 = 25\ \mu m$		

On admettra que cette inhomogénéité crée un champ dans la zone quasi-neutre P et que la jonction est caractérisée par une zone de charge d'espace de largeur $W_p = 1\ \mu m$ côté P. On ne s'intéressera dans cette partie qu'à la zone quasi-neutre P.

2.1 Etude de l'équilibre

1. Ecrire l'expression de la densité de courant de trous, en fonction du champ électrique $\vec{E}(x)$ et de la densité de trous.
2. En supposant la densité de courant de trous nulle dans la zone quasi-neutre P, en déduire l'expression du champ $\vec{E}(x)$ (on simplifiera cette expression à l'aide de la relation d'Einstein).

2.2 Etude hors équilibre

On suppose qu'on applique une tension $V > 0$ définissant la polarisation directe.

1. Ecrire la densité de courant d'électrons $\vec{J_n}$, en fonction de $\vec{E}(x)$, et de $n(x)$ (densité d'électrons).
2. En projetant l'équation précédente sur l'axe x, montrer que la densité d'électrons vérifie(côté P) une équation différentielle du premier ordre, se mettant sous la forme :

$$\frac{dn}{dx} - \frac{n}{z} = \frac{J_n}{\alpha} \tag{2}$$

   On identifiera les coefficients z et α, en précisant leurs unités.
3. En supposant que la densité de courant d'électrons J_n est constante (indépendante de x), donner la forme générale des solutions de cette équation.
4. Que vaut le dopage en $x = W_p$ (expression et valeur) ? Ecrire alors la condition limite en $x = W_p$ pour la densité d'électrons n sous tension V.
   On admettra pour la suite qu'au niveau du contact : $n(X_p) = 0$.
5. En appliquant la condition limite en $x = X_p$ déterminer la constante d'intégration
6. En appliquant la condition limite en $x = W_p$, en déduire la densité de courant J_n.
   On montrera qu'elle peut se mettre sous la forme :

$$J_n = -\frac{qD_n n_i^2}{N_a L}\ e^{qV/k_BT} \tag{3}$$

   et on identifiera L.
7. Comparer la valeur numérique de L avec la longueur de diffusion des électrons L_n

Données :

$n_i = 10^{10}\ cm^{-3}$	:	densité intrinsèque
$N_c = N_v = 10^{19}\ cm^{-3}$	:	densité effective d'état
$k_B = 1.38\ 10^{-23}\ J.K^{-1}$	:	constante de Boltzmann
$\varepsilon_{SC} = 11.9$	:	permittivité relative du semiconducteur considéré
$\varepsilon_0 = 8.85\ 10^{-12}\ F.m^{-1}$	:	permittivité du vide
$\mu_n = 1450\ cm^2.V^{-1}.s^{-1}$	:	mobilité des électrons
$\mu_p = 450\ cm^2.V^{-1}.s^{-1}$	:	mobilité des trous
$\tau_n = 1\ \mu s$	:	durée de vie des électrons
$\tau_p = 1\ \mu s$	:	durée de vie des trous
$E_g = 1.12\ eV$	:	gap du semiconducteur