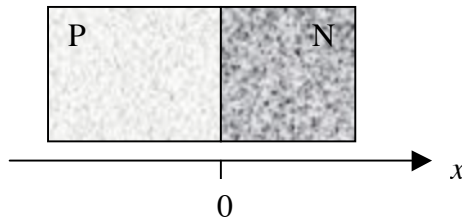


Exercice : La jonction PN

Un morceau de silicium mono-cristallin de forme parallélépipédique est dopé sélectivement avec des accepteurs (dopage P) sur sa partie gauche et des donneurs (dopage N) sur sa partie droite.

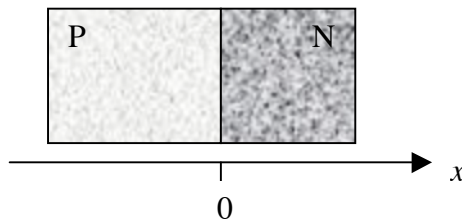


Le problème consiste à déterminer la densité des porteurs de charges (électrons et trous) dans les différentes régions du composant. L'équilibre thermodynamique sera caractérisé sous l'approximation de Maxwell-Boltzmann.

- 1- Que se passe-t-il lorsque l'on porte globalement un cristal homogène (ou une région d'un cristal) à un potentiel électrostatique V_0 ?
- 2- En une région quelconque du composant, retrouver la densité locale d'électrons de la bande de conduction en fonction du niveau bas de celle-ci E_c et d'une constante ne dépendant que du matériau.
- 3- Même question pour les trous.
- 4- Que peut-on dire du produit np ?
- 5- Rappeler la valeur de n dans un cristal dopé avec une densité N_D de donneurs et la valeur de p dans un cristal dopé avec une densité N_A d'accepteurs.
- 6- En déduire la différence de potentiel qui règne entre les régions P et N de notre cristal. On suppose que les effets de la juxtaposition d'une région N et d'une région P ne se font sentir qu'au voisinage de l'interface (jonction). Loin à l'intérieur des régions P et N, on supposera que cette jonction n'a pas d'influence directe.
- 7- Faire un schéma illustrant la position des niveaux d'énergie électroniques dans le cristal.
- 8- Faire le bilan des déplacements de charges (électrons et trous).
- 9- Une différence de potentiel externe est appliquée entre la zone P et la zone N, brisant ainsi l'équilibre. Déduire du bilan des courants de charge, le courant électrique passant dans le composant.

Exercice corrigé : La jonction PN

Un morceau de silicium mono-cristallin de forme parallélépipédique est dopé sélectivement avec des accepteurs (dopage P) sur sa partie gauche et des donneurs (dopage N) sur sa partie droite.



Le problème consiste à déterminer la densité des porteurs de charges (électrons et trous) dans les différentes régions du composant. L'équilibre thermodynamique sera caractérisé sous l'approximation de Maxwell-Boltzmann.

1- Que se passe-t-il lorsque l'on porte globalement un cristal homogène (ou une région d'un cristal) à un potentiel électrostatique V_0 ?

Une charge placée dans une région où règne une différence de potentiel est attirée vers le potentiel le plus bas si la charge est positive et vers le potentiel le plus haut si la charge est négative. Pour un électron par exemple, l'énergie potentielle sera donc plus basse dans la région de fort potentiel électrostatique que dans une région de faible potentiel. Donc porter un cristal à un potentiel V_0 revient à diminuer tous ses niveaux d'énergie électroniques, en particulier E_c et E_v , de qV_0 ($q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$).

2 – En une région quelconque du composant, retrouver la densité locale d'électrons de la bande de conduction en fonction du niveau bas de celle-ci E_c et d'une constante ne dépendant que du matériau.

L'approximation de MB donne pour les électrons :

$$f(E) = \exp\left(\frac{E_f - E}{kT}\right) \quad \text{soit} \quad f(E) = \exp\left(\frac{E_f - E_c}{kT}\right) \exp\left(\frac{E_c - E}{kT}\right)$$

Le paramètre E_f étant fixé par le décompte du nombre total N d'électrons dans le système :

$$N = \int_{E=0}^{+\infty} f(E)D(E)dE$$

Le nombre d'électrons dans la bande de conduction est donné par : $n = \int_{E=E_c}^{+\infty} f(E)D(E)dE$

On en déduit : $n = N_c \exp\left(\frac{E_f - E_c}{kT}\right)$

3- Même question pour les trous.

L'approximation de MB donne pour les trous :

$p = \int_{E=0}^{E_v} [1 - f(E)]D(E)dE$ avec

$1 - f(E) = \exp\left(\frac{E - E_f}{kT}\right) = \exp\left(\frac{E - E_v}{kT}\right) \exp\left(\frac{E_v - E_f}{kT}\right)$

$p = N_v \exp\left(\frac{E_v - E_f}{kT}\right)$

4- Que peut-on dire du produit np ?

np est constant. $np = N_c N_v \exp(-E_g / kT) = A$

5- Rappeler la valeur de n dans un cristal dopé avec une densité N_D de donneurs et la valeur de p dans un cristal dopé avec une densité N_A d'accepteurs.

À température ambiante $n = N_D$ et $p = N_A$

6- En déduire la différence de potentiel qui règne entre les régions P et N de notre cristal. On suppose que les effets de la juxtaposition d'une région N et d'une région P ne se font sentir qu'au voisinage de l'interface (jonction). Loin à l'intérieur des régions P et N, on supposera que cette jonction n'a pas d'influence directe.

$n = N_c \exp\left(\frac{E_f - E_c}{kT}\right)$

Dans la région P : $n = A / N_A$ donc $E_c^P = E_f - kT \log(A / N_c N_A)$

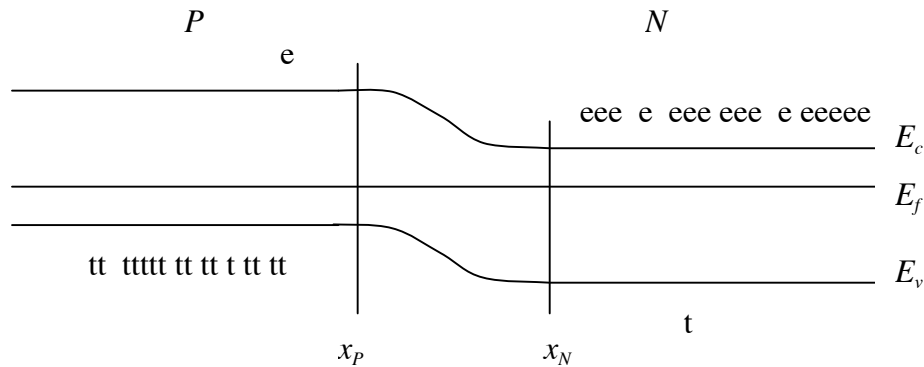
Dans la région N : $n = N_D$ donc $E_c^N = E_f - kT \log(N_D / N_c)$

On note que E_f est fixé pour l'ensemble du système qui pour nous est le cristal dans son ensemble.

Soit, en faisant la différence : $E_c^P - E_c^N = kT \log(N_A N_D / A) = qV_n$

On déduit qu'il se forme une barrière de potentiel entre les régions N et P.

7- Faire un schéma illustrant la position des niveaux d'énergie électronique dans le cristal.



On ne cherchera pas à déterminer la forme de la courbe qui permet de connecter les niveaux E_c et E_v entre les zones N et P.

8- Faire le bilan des déplacements de charges (électrons et trous).

Dans la zone centrale située entre x_p et x_N règne une différence de potentiel qui entraîne toutes les charges présentes. À l'équilibre cette zone ne contiendra donc pas de porteurs de charge. On l'appelle zone de charge d'espace ou zone dépeuplée ou désertée.

La zone P contient très peu d'électrons. Ces électrons sont en déplacement permanent sous l'effet de l'agitation thermique. Si un électron atteint le point x_p avec une vitesse strictement positive, il sera entraîné par le champ électrique de la ZCE et glissera vers la zone N. (conduction de minoritaires). Tous les électrons d'énergie supérieure à E_c^P ayant une composante de vitesse dans la direction x positive seront dans ce cas.

Les électrons de la Zone N sont nombreux. Par agitation thermique, statistiquement un certain nombre d'électrons auront tendance à aller vers la zone P. Mais seulement les électrons ayant une énergie cinétique suffisante dans la direction x négative pourront aller jusqu'à la zone P. Il s'agit des électrons ayant une énergie supérieure à $E_c^N + qV_n$ soit E_c^P . (courant de diffusion des majoritaires).

Globalement, ces deux courants se compensent à l'équilibre thermodynamique.

(Même raisonnement pour les trous).

9- Une différence de potentiel externe est appliquée entre la zone P et la zone N, brisant ainsi l'équilibre. Déduire du bilan des courants de charge, le courant électrique passant dans le composant.

Pour les courants de minoritaires, pas de changement dans le raisonnement pas de changement d'expression. Pour le courant des majoritaires, la barrière de potentiel est modifiée passant de qV_n à $q(V_n - V_{\text{appliqué}})$. ($V_{\text{appliqué}}$ est compté positivement pour une polarisation positive sur la zone P.) Le décompte des électrons susceptibles de passer de N vers P (ou de trous de P vers N) démarrera à $E_c^N + q(V_n - V_{\text{appliqué}})$, l'intégrale permettant de

calculer le nombre d'électrons concernés sera alors multiplié par $\exp\left(\frac{qV_{\text{appliqué}}}{kT}\right)$. (idem pour les trous). Le courant électrique total sera donc :

$$\begin{aligned} I(V_{\text{app.}}) &= I_{\text{diff}}(V_{\text{app.}}) + I_{\text{cond}}(V_{\text{app.}}) \\ &= I_{\text{diff}}(V_{\text{app.}}) + I_{\text{cond}}(0) \\ &= I_{\text{diff}}(V_{\text{app.}}) - I_{\text{diff}}(0) \\ &= I_{\text{diff}}(0) \left[\exp\left(\frac{qV_{\text{appl.}}}{kT}\right) - 1 \right] \\ &= I_{\text{sat}} \left[\exp\left(\frac{qV_{\text{appl.}}}{kT}\right) - 1 \right] \end{aligned}$$