

TD Jonction PN

Objectifs

- Voir et mettre en pratique la méthode du diagramme de bandes pour analyser un composant.
- Expliquer le fonctionnement de la jonction PN

Rappels

- Dans un solide cristallin comme les semiconducteurs (SC) le niveau de Fermi :
 - est quasiment au milieu de la bande interdite dans un SC intrinsèque
 - se rapproche de E_c (niveau bas de la bande de conduction) dans un SC dopé N
 - se rapproche de E_v (niveau haut de la bande de valence) dans un SC dopé P
- Le lien entre la densité de porteurs et la distance au niveau de Fermi est donné par :

$$n = N_c \exp\left(\frac{E_F - E_c}{k_B T}\right) \quad p = N_v \exp\left(\frac{E_v - E_F}{k_B T}\right),$$

avec $N_c \approx N_v$

- Le produit np est indépendant du niveau de Fermi et du dopage, on a

$$np = n_i^2,$$

avec n_i la densité de porteur du SC intrinsèque.

I Équilibre thermodynamique d'un SC

Question 1 Quelles sont les conditions permettant de caractériser l'équilibre thermodynamique ?

Réponse 1 Les trois éléments principaux définissant l'équilibre sont :

- Les niveaux de Fermi des différents éléments sont alignés si l'échange de particules est possible.
- Le courant global est nul (il peut y avoir des courants d'origine différentes qui se compensent).
- Le matériau reste globalement neutre électriquement.

Question 2 Dans un SC dopé, quelles sont les différentes charges électriques à considérer en pratique ? Lesquelles sont dominantes dans un SC dopé N ? Qu'en est-il pour un SC dopé P ?

Réponse 2 Il y a trois types de charges dans un SC dopé : les électrons, les trous et les atomes de dopants ionisés. Dans un SC dopé N on a $N_D \approx n \gg p$ alors que dans un SC dopé P on a $N_A \approx p \gg n$

II Jonction PN à l'équilibre

On considère deux SC, l'un dopé N avec une densité de donneurs N_D et l'un dopé P avec une densité d'accepteurs N_A . On crée une jonction PN en venant juxtaposer ces deux SC.

Question 3 Tracer le diagramme de bandes de chaque SC avant la juxtaposition. Tracer ensuite celui de la jonction PN loin de la zone de juxtaposition. Nous verrons par la suite l'allure du diagramme au niveau de la jonction.

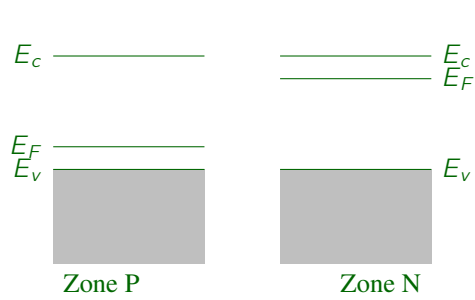


FIGURE 1 – Diagramme de bandes de zones dopées P et N d'un semi-conducteur, non reliées.

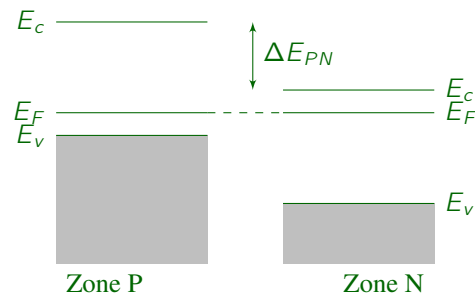


FIGURE 2 – Diagramme de bandes de zones dopées P et N d'un semi-conducteur, à l'équilibre entre elles.

Réponse 3 Les niveaux de Fermi de chaque côté doivent s'aligner. Il y a donc décalage des bandes de valence et de conduction d'un des deux côtés.

Question 4 Exprimer la différence entre les niveaux de la bande de valence/conduction de chaque côté de la jonction en fonction de N_A , N_D et n_i .

Réponse 4 On utilise les formules de la densité de porteurs en fonction du niveau de Fermi pour chaque SC et la loi d'action de masse. En raisonnant sur la bande de conduction on a :

$$n = N_c \exp\left(\frac{E_F - E_c}{k_B T}\right) \quad \text{et} \quad np = n_i^2$$

Pour le SC dopé N on a $n \approx N_D$ donc :

$$E_c(N) = E_F - k_B T \ln\left(\frac{N_D}{N_c}\right).$$

Pour le SC dopé P on a $p \approx N_A$ donc :

$$E_c(P) = E_F - k_B T \ln\left(\frac{n_i^2}{N_A N_c}\right).$$

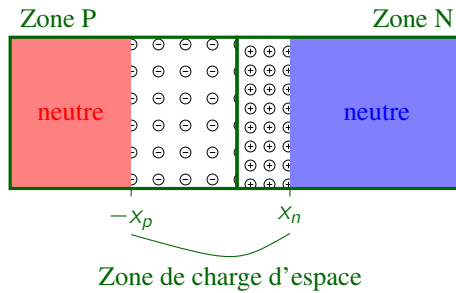
En faisant la différence on trouve :

$$\Delta E_{PN} = E_c(P) - E_c(N) = k_B T \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right)$$

Question 5 Comment évolue la densité de porteurs au niveau de la jonction (on raisonnera sur la distance entre le niveau de Fermi et les bandes de conduction/valence)? Quelle est l'allure de cette évolution (linéaire, quadratique, exponentielle)? Comment cela se traduit-il au niveau des charges présentes dans la zone?

Réponse 5 La densité de porteurs mobiles varie exponentiellement avec la distance de E_c et E_v au niveau de Fermi. On a donc une diminution très rapide du nombre de porteurs mobiles au niveau de la jonction. Il ne reste donc plus que les atomes de dopant ionisés dans la zone de la jonction. Il y a apparition d'une zone de charges d'espace.

Question 6 Faire un bilan des charges dans chaque zone. En déduire le lien entre les taux de dopage et la taille de la ZCE.



Réponse 6 Le bilan est le suivant :

| | Zone P | | Zone N | |
|-------------------|------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|------------|
| | $x < -x_p$ | $-x_p < x < 0$ | $0 < x < x_n$ | $x > x_n$ |
| Électrons | négligeables : $n \ll N_D$ | | | $n = N_D$ |
| Trous | $p = N_A$ | négligeables : $p \ll N_A$ | | |
| Dopants ionisés | N_A (accepteurs, charge -) | | N_D (donneurs, charge +) | |
| Charge électrique | $\rho = -qN_A$ | $\rho = qp - qn \simeq -qN_A$ | $\rho = +qN_D + qp - qn \simeq +qN_D$ | $\rho = 0$ |

Pour garantir la neutralité électrique du composant il faut que :

$$-qN_A x_p + qN_D x_n = 0$$

Question 7 Quelles équations de l'électrostatique permettent de faire le lien entre des zones électriquement chargées et le potentiel électrique ? En déduire l'allure du potentiel électrique en fonction de la distance à la jonction.

Réponse 7 On a les équations suivantes :

$$\nabla \cdot \vec{\mathcal{E}} = \frac{\rho}{\epsilon} \quad \text{et} \quad \vec{\mathcal{E}} = -\nabla \mathcal{V}$$

Ici nous sommes en 1D donc cela se résume en une simple intégration selon l'axe des x . On a donc les allures de la figure 3.

Question 8 Comment se traduit ce potentiel électrique au niveau de l'énergie des bandes ? En déduire la différence de tension électrique entre les zones P et N et le diagramme de bande complet. Quelle est la valeur du potentiel électrique de la jonction pour $N_D = 10^{22} \text{ m}^{-3}$, $N_A = 10^{22} \text{ m}^{-3}$, $n_i = 10^{16} \text{ m}^{-3}$, $k_B T = 25 \cdot 10^{-3} \text{ eV}$ et $q = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C} = 1 \text{ eV} \cdot \text{V}^{-1}$?

Réponse 8 Les particules chargées sont soumises à un potentiel électrique $\mathcal{V}(x)$, elles vont recevoir une énergie potentielle $q_p \mathcal{V}(x)$ avec q_p la charge de la particule. Donc pour la structure de bandes de l'énergie des électrons on va avoir un décalage de $-q \mathcal{V}(x)$ pour chaque niveau et donc un décalage de $-q \mathcal{V}(x)$ pour E_c et E_v . L'allure du diagramme de bandes est donc similaire à celui du potentiel électrique (cf. figure 4).

Comme on connaît la différence d'énergie des niveaux de E_c de chaque côté, on peut retrouver la valeur du potentiel électrique :

$$\mathcal{V}_{NP} = \frac{1}{q} \Delta E_{PN} = \frac{1}{q} k_B T \cdot \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) = 0.66 \text{ V}$$

Il s'est donc formé une barrière de potentiel au niveau de la jonction. Seuls les électrons ayant une énergie supérieure à $E_c(N) + q \mathcal{V}_{NP}$ pourront la franchir.

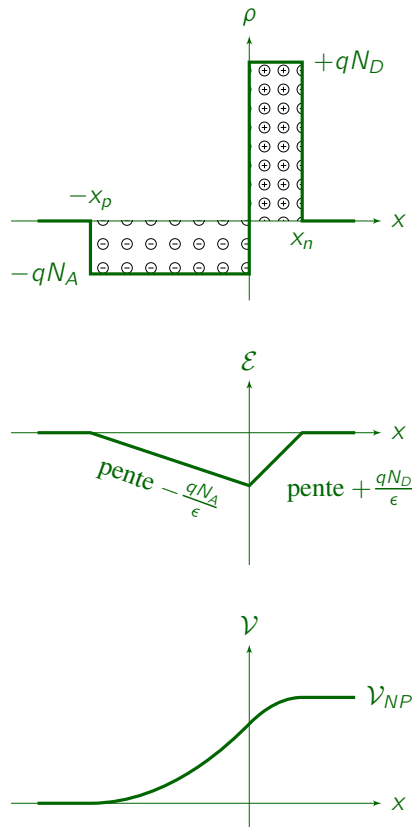


FIGURE 3 – Allure de la densité de charge électrique ρ , du champ électrique \mathcal{E} et du potentiel électrique \mathcal{V} .

III Pour aller plus loin : jonction PN hors équilibre

Question 9 Dans un matériau présentant des charges (porteurs) mobiles, quelles sont les phénomènes contribuant à leur mouvement ?

Réponse 9 Deux grands phénomènes contribuent au courant électrique :

- la **conduction** en présence d'un champ électrique, qui occasionne une densité de courant $\vec{j}_{c,n}$ pour les électrons et $\vec{j}_{c,p}$ pour les trous :

$$\vec{j}_{c,n} = -qn\mu_n\vec{\mathcal{E}}$$

$$\vec{j}_{c,p} = qp\mu_p\vec{\mathcal{E}} ;$$

- la **diffusion thermique** :

$$\vec{j}_{d,n} = qD_n\nabla n$$

$$\vec{j}_{d,p} = -qD_p\nabla p$$

où $D = \frac{k_B T}{q} \mu$.

Question 10 Faire un bilan complet (qualitatif) des déplacements des porteurs à l'équilibre.

Réponse 10 Raisonnons d'abord sur les électrons. Dans la ZCE, il n'y a pas de porteur donc pas de déplacement de porteur. Dans la zone P il y a très peu d'électrons, mais ces derniers se déplacent sous l'effet de l'agitation thermique. Les mouvements étant uniformes dans toutes les directions, le courant résultant est nul. Cependant si un électron atteint le point x_p avec une vitesse (même très

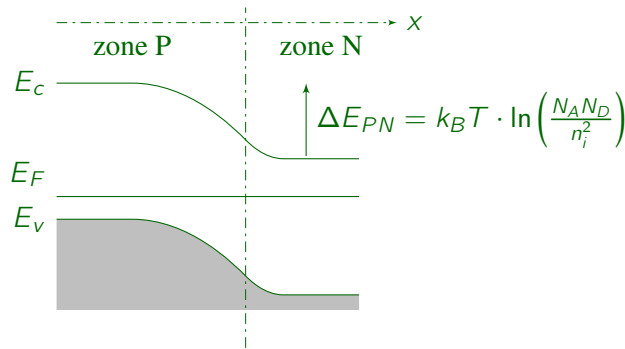


FIGURE 4 – Diagramme de bandes à l'équilibre de la jonction P-N. E_F est constant dans tout le composant, les bandes sont décalées et se raccordent par des branches de paraboles.

petite) dirigée vers la zone N, il sera entraîné par le champ électrique de la ZCE. Cela concerne tous les électrons dont l'énergie est supérieure à $E_c(P)$ et ayant une composante de vitesse vers la zone N. On parle alors de conduction de minoritaires.

Dans la zone N, il y a beaucoup d'électrons. Malgré la barrière de potentiel, certains électrons peuvent recevoir suffisamment d'énergie par agitation thermique pour franchir la barrière. On parle alors de courant de diffusion des majoritaires.

À l'équilibre ces deux courants se compensent. Le raisonnement est le même pour les trous.

On applique une tension \mathcal{V}_{app} entre la zone P et la zone N. On considère le potentiel positif du côté P et le négatif du côté N.

Question 11 Que se passe-t-il au niveau du diagramme de bande pour $\mathcal{V}_{app} \geq 0$? Et pour $\mathcal{V}_{app} \leq 0$? À quel composant électronique cela vous fait-il penser?

Réponse 11 On est dans une situation hors d'équilibre, on n'a donc plus égalité des niveaux de Fermi. Cependant on peut raisonner sur les bandes. Avec l'application de \mathcal{V}_{app} , les bandes de la zone P vont subir un décalage de $-q\mathcal{V}_{app}$ par rapport à celles de la zone N. Si $\mathcal{V}_{app} \geq 0$ alors les bandes en zone P diminuent, cela se traduit par la diminution de la barrière de potentiel voir son inversion ainsi que la diminution de la ZCE. Cela a pour effet de permettre à plus d'électrons de franchir cette barrière, et donc d'établir un courant électrique.

À l'inverse, si $\mathcal{V}_{app} \leq 0$, la barrière de potentiel et la ZCE deviennent plus importantes. Il n'est pas possible de faire passer un courant.

D'une manière générale suite à l'application de la tension \mathcal{V}_{app} , la hauteur de la barrière de potentiel devient $q(\mathcal{V}_{NP} - \mathcal{V}_{app})$. On a le comportement d'une diode.

Question 12 Comment évoluent les courants avec l'application de la tension \mathcal{V}_{app} ? En déduire l'expression du courant dans le composant en fonction de \mathcal{V}_{app} .

Réponse 12 Pour les courants de conduction de minoritaires, la situation ne change pas. On peut donc écrire que $j_{c,n}(\mathcal{V}_{app}) \approx j_{c,n}(0)$.

Pour le courant de diffusion de majoritaires il faut prendre en compte la modification de la barrière de potentiel. Le nombre d'électron ayant suffisamment d'énergie suit la distribution de Fermi-Dirac qui s'approxime par Maxwell-Boltzmann dans la bande de conduction. On a donc une évolution du type $\exp(-\frac{E}{k_B T})$. Comme on a modifié la barrière de potentiel de $-q\mathcal{V}_{app}$, on multiplie le nombre d'électron pouvant franchir la barrière par $\exp(\frac{q\mathcal{V}_{app}}{k_B T})$. Ainsi on écrit que $j_{d,n}(\mathcal{V}_{app}) \approx j_{d,n}(0) \exp(\frac{q\mathcal{V}_{app}}{k_B T})$.

Comme conduction et diffusion se compensent à l'équilibre on a aussi $j_{d,n}(0) = -j_{c,n}(0)$. La densité de courant totale est donc de la forme :

$$\begin{aligned} j_n(\mathcal{V}_{app}) &= j_{d,n}(\mathcal{V}_{app}) + j_{c,n}(\mathcal{V}_{app}) \\ &= j_{d,n}(0) \exp\left(\frac{q\mathcal{V}_{app}}{k_B T}\right) + j_{c,n}(0) = j_{d,n}(0) \exp\left(\frac{q\mathcal{V}_{app}}{k_B T}\right) - j_{d,n}(0) = j_{d,n}(0) \left(\exp\left(\frac{q\mathcal{V}_{app}}{k_B T}\right) - 1\right) \end{aligned}$$

Le courant peut donc s'exprimer sous la forme :

$$I(\mathcal{V}_{app}) = I_{sat} \left(\exp\left(\frac{q\mathcal{V}_{app}}{k_B T}\right) - 1 \right)$$

IV Pour aller plus loin : épaisseur de la ZCE

Revenons sur la zone de charge d'espace qui s'est créée au niveau de la jonction.

Question 13 Quels sont les valeurs de x_p et x_n délimitant la ZCE ? Application numérique pour $N_D = 10^{22} \text{ m}^{-3}$, $N_A = 10^{22} \text{ m}^{-3}$, $n_i = 10^{16} \text{ m}^{-3}$, $k_B T = 25 \cdot 10^{-3} \text{ eV}$, $\epsilon = 1.05 \cdot 10^{-10} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$ et $q = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C} = 1 \text{ eV} \cdot \text{V}^{-1}$.

Réponse 13 On commence par calculer l'expression du champ électrique :

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_P(x) &= \frac{-qN_A}{\epsilon} (x + x_p) & x \in [-x_p, 0] \\ \mathcal{E}_N(x) &= \frac{qN_D}{\epsilon} (x - x_n) & x \in [0, x_n] \end{aligned}$$

On intègre pour obtenir le potentiel électrique :

$$\begin{aligned} \mathcal{V}_P(x) &= \frac{-qN_A}{\epsilon} \left(\frac{1}{2} x^2 + x_p x \right) + C_1 & x \in [-x_p, 0] \\ \mathcal{V}_N(x) &= \frac{qN_D}{\epsilon} \left(\frac{1}{2} x^2 - x_n x \right) + C_2 & x \in [0, x_n] \end{aligned}$$

On cherche alors à déterminer les constantes d'intégration. Comme on est intéressé par la différence de potentiel on peut fixer $\mathcal{V}_P(-x_p) = 0$. On a alors :

$$C_1 = \frac{qN_A}{2\epsilon} x_p^2$$

De même on a $\mathcal{V}_P(0) = \mathcal{V}_N(0)$ donc

$$C_2 = \frac{qN_A}{2\epsilon} x_p^2$$

Ainsi on a :

$$\begin{aligned} \mathcal{V}_P(x) &= \frac{-qN_A}{2\epsilon} (x + x_p)^2 & x \in [-x_p, 0] \\ \mathcal{V}_N(x) &= \frac{qN_D}{\epsilon} \left(\frac{1}{2} x^2 - x_n x \right) + \frac{qN_A}{2\epsilon} x_p^2 & x \in [0, x_n] \end{aligned}$$

La différence de potentiel totale correspond alors à :

$$\mathcal{V}_{NP} = \mathcal{V}_N(x_n) = \frac{q}{2\epsilon} (N_D x_n^2 + N_A x_p^2)$$

En réutilisant la neutralité globale ($N_A x_p = N_D x_n$) on a :

$$\begin{aligned}\frac{q}{2\epsilon}(N_D x_n^2 + N_A \frac{N_D^2}{N_A^2} x_n^2) &= \mathcal{V}_{NP} \\ x_n^2 \frac{N_D(N_A + N_D)}{N_A} &= \frac{2\mathcal{V}_{NP}\epsilon}{q} \\ x_n &= \sqrt{\frac{2\mathcal{V}_{NP}\epsilon}{q} \frac{N_A}{N_D(N_A + N_D)}}\end{aligned}$$

On en déduit :

$$x_p = \sqrt{\frac{2\mathcal{V}_{NP}\epsilon}{q} \frac{N_D}{N_A(N_A + N_D)}}$$

Application numérique :

$$\mathcal{V}_{NP} = 0.66V \quad x_n = 0.11\mu m \quad x_p = 1.11\mu m$$