Travaux Dirigés de Physique des Semi-conducteurs

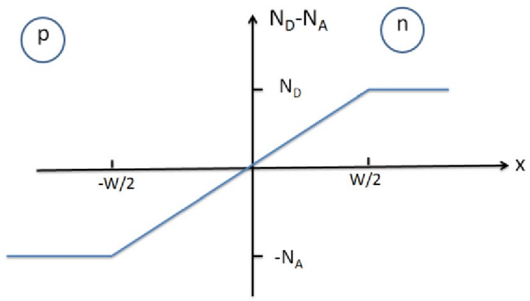
Exercice 1 : Jonction PN abrupte à l'équilibre thermodynamique

On considère une jonction PN formée par un semi-conducteur type P de concentration en accepteurs N_A et un semi-conducteur type N de concentration en donneurs N_D.

1. Définir une jonction PN et expliquer le modèle de la jonction abrupte.
2. Tracer le profil N_D-N_A en fonction de x (la position dans la jonction PN).
3. Lors de la réalisation de jonction, expliquer la formation d'une zone désertée en porteurs libres appelée zone de charge d'espace ZCE.
4. Justifier l'établissement d'un équilibre thermodynamique.
5. Présenter la jonction montrant la zone ZCE ainsi que les zones neutres N et P.
6. Donner les densités de porteurs ainsi que la charge d'espace dans chaque région.
7. La jonction étant à l'équilibre,
7.1. Tracer sa structure de bandes en y rapportant le potentiel de diffusion Vd.
7.2. Déterminer l'expression de Vd.
7.3. Calculer Vd pour une jonction en silicium. A.N : $N_A=5.10^{16}$ cm^{-3}, $N_D=1.10^{15}$ cm^{-3}, Eg=1.12 eV à 300k.
8. Déterminer l'expression du champ et potentiel électriques dans la ZCE.
9. En déduire l'expression de la largeur de la ZCE. Faire l'application numérique.
On donne la permittivité de silicium :$\varepsilon=1.10^{-12}$ F/cm.
10. Réécrire les expressions des densités de porteurs en fonction de N_A,N_D, Vd.

Exercice 2 : Jonction PN graduelle

On considère une jonction PN formée par un semi-conducteur type n de dopage N_D et un semi-conducteur type p de dopage N_A. La différence de dopage N_D-N_A varie linéairement au niveau de l'interface dans une région de largeur W autour de l'interface selon le profil ci-dessous :



On prendra NA=ND=N et a le gradient de dopage au niveau de l'interface (pente de la droite dessinée). On supposera qu'il apparait une zone de charge d'espace (ZCE) à l'interface dont les extrémités sont –W/2 dans la région p et +W/2 dans la région n.

1. Ecrire la relation entre a,W et N.
2. Rapeler l'expression de la densité d'électrons n dans un semi-conducteur de type n et la densité des trous p dans un semi-conducteur de type p.
3. Montrer que le potentiel de diffusion V_d qui apparait aux bornes de la jonction est :
$V_d = 2\frac{kT}{q}\ln(\frac{aW}{2n_i})$ relation I , n_i est la densité intrinsèque de porteurs.
4. Donner l'expression de la densité de charges $\rho(x)$. On se placera dans la condition de complète désertion (expliquer cette hypothèse). Tracer la densité de charges $\rho(x)$.

5. Déterminer l'expression du champ électrique et le tracer schématiquement. Donner le champ électrique maximal Em.
6. Déterminer l'évolution du potentiel V(x) avec x. On prendra l'origine des potentiels dans la région p neutre.
7. En déduire que $W = \left(\frac{12\varepsilon V_d}{qa}\right)^{1/3}$: relation II

8. Applications numériques : on donne Vd=0.7V

a) Calculer W en utilisant la relation I ou II.

b) En utilisant la relation non utilisée, calculer la valeur de Vd : est-elle très différente de 0.7V ? les deux relations sont-elles compatibles ? sinon, quelle hypothèse faudrait remettre en question pour expliquer cet écart ?

c) Calculer la densité de dopage N dans les régions neutres du semi-conducteur.

d) Calculer le champ électrique maximal.

On donne : $a=4.10^{20}$ cm^{-4}, ni=1010 cm-3, la constante diélectrique relative de Si=12.5

Correction Travaux Dirigés de Physique des Semi-conducteurs
Série N° 4

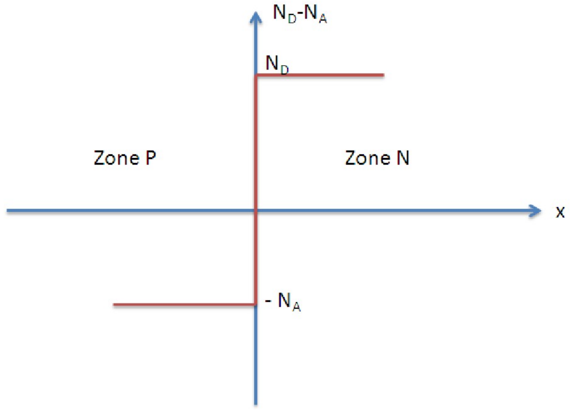
Exercice 1 :

1. La jonction PN est la juxtaposition de deux semi-conducteurs de dopage différent.

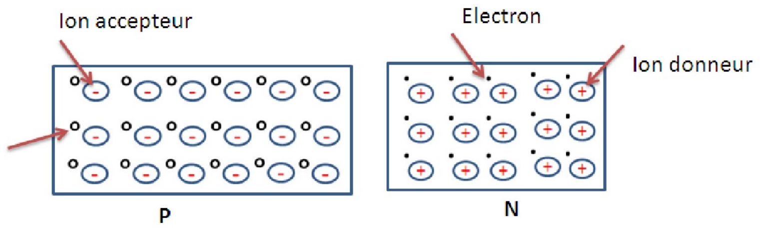
Elle consiste en un seul cristal au sein duquel on crée un dopage inhomogène : une zone dopée P succédée par une zone dopée N. la jonction PN est une structure de base dans les composants électroniques: diode, transistor, cellule photovoltaique etc…

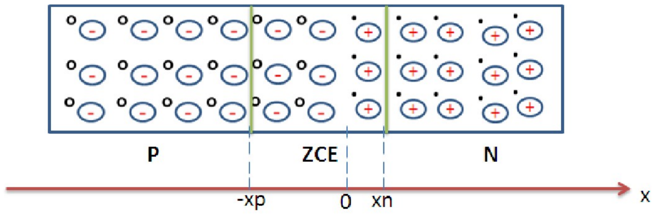
Dans une jonction PN, la différence des des densités des atomes donneurs(N_D) et accepteurs (N_A) N_D-N_A passe d'une valeur négative dans la région P vers une valeur positive dans la région N. la loi de variation de cette grandeur dépend de la technique de dopage. Le modèle de la jonction abrupte consiste à considérer que la concentration de dopage passe brutalement dans le plan x=0 (interface entre les régions N et P) d'une valeur N_D à une valeur N_A.

2. On considère que l'interface entre les zones N et P se situe à x=0.



3. Lorsqu'on réalise la jonction PN, il existe un gradient de concentration des porteurs majoritaires de part et d'autre du plan x=0. Sous l'effet de ce gradient, les trous majoritaires dans la zone P diffusent vers la zone N où ils sont minoritaires, de même pour les électrons majoritaires dans la zone N qui diffusent vers la zone P. cette diffusion de part et d'autre de la jonction fait apparaitre une charge d'espace résultant de la présence des atomes donneurs et accepteurs ionisés dont les charges ne sont plus intégralement compensés par celles des porteurs libres.
4. Au voisinage de la jonction, il s'établit un champ électrique s'opposant à la diffusion des porteurs majoritaires. L'équilibre s'établit quand la force électrique équilibre la force de diffusion.
5.



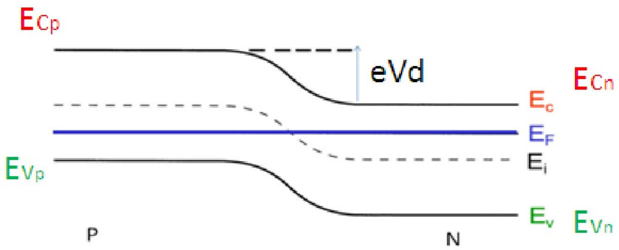


6. Dans une jonction PN, on a trois régions :

- Zone P : la densité des trous $p_p = N_A$, la densité des électrons $n_p = \frac{n_i^2}{N_A}$. C'est une zone neutre donc la charge est $\rho(x) = 0$
- Zone N : la densité des électrons $n_n = N_D$, la densité des électrons $p_n = \frac{n_i^2}{N_D}$. C'est une zone neutre donc la charge est $\rho(x) = 0$
- ZCE : En raison de la présence de champ électrique intense dans la ZCE, la densité des porteurs libres est négligeable. La ZCE s'étend de x=-x_p vers x=0 dans la zone P et de x=0 vers x=x_n dans la zone N.
  - $\rho(x) = -eN_A$ pour $-x_p \prec x \prec 0$
  - $\rho(x) = eN_D$ pour $0 \prec x \prec x_n$

7. La jonction est e équilibre donc le niveau de Fermi est le même dans toute la structure.

7.1. La structure de bande de la structure :



7.2. Le potentiel Vd traduit la variation de l'énergie potentielle des électrons de conduction en traversant la jonction. Vd constitue une barrière vde potentiel qui équilibre les forces de diffusion. V_d varie d'une valeur V_p dans la région neutre P vers une valeur V_n dans la région neutre N.

Le potentiel V_d est défini par: $V_d = \frac{1}{e}(E_{cp} - E_{cn})$

Or les densités des électrons n_n et n_p dans les zones neutres N et P s'écrivent respectivement:

$$n_n = N_c \exp(-\frac{E_{cn} - E_F}{kT}) \text{ et } n_p = N_c \exp(-\frac{E_{cp} - E_F}{kT})$$

$$\rightarrow \frac{n_n}{n_p} = \exp(\frac{E_{cp} - E_{cn}}{kT}) \text{ d'où } V_d = \frac{kT}{e} \ln(\frac{n_n}{n_p})$$

Or $n_n = N_D$ et $n_p = \frac{n_i^2}{N_A}$ Donc $V_d = \frac{kT}{e} \ln(\frac{N_D N_A}{n_i^2})$

7.3. A.N: $V_d = 0.7$ V

8. L'équation de poisson relie le potentiel électrique V et le champ électrique E à la charge ρ : $\frac{d^2V}{d^2x} = -\frac{\rho(x)}{\varepsilon}$ (*) Avec ε la constante diélectrique du semi-conducteur.

Et $-\frac{dV}{dx} = E(x)$

Dans la ZCE :

- Côté P : $\rho(x) = -eN_A$ pour $-x_p \prec x \prec 0$,

On intègre l'équation de poisson selon x avec les conditions : E=0 dans la zone neutre, en particulier en x=-xp,

$\Rightarrow$ $\frac{dV}{dx} = \frac{eN_A}{\varepsilon}(x + x_p)$ +cte , pour x=-xp : E=0 donc cte =0

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

On intègre une 2ème fois avec la condition $V=V_p$ dans la zone neutre, en particulier en $x=-x_p$,

$$V(x) = \frac{eN_A}{2\varepsilon}(x + x_p)^2 + V_p$$

- Côté N : $\rho(x) = eN_D$ pour $0 \prec x \prec x_n$

On fait le même calcul avec les conditions : $E(x_n)=0$ et $V(x_n)=V_n$. On obtient :

$$E(x) = -\frac{dV}{dx} = \frac{eN_D}{\varepsilon}(x - x_n) \text{ et } V(x) = -\frac{eN_D}{2\varepsilon}(x - x_n)^2 + V_n$$

9. La largeur de la ZCE est donnée par : $W_{ZCE} = |x_n| + |x_p|$

La continuité en x=0 de la composante normale du vecteur déplacement $D=\varepsilon.E$ permet d'obtenir une relation entre x_n et x_p. On a en x=0: $\varepsilon.E_{0^-}=\varepsilon.E_{0^+}$, soit : $e.N_Ax_p=e.N_Dx_n$

→ $N_Ax_p=N_Dx_n$: Relation montrant que le total des charges négatives développées dans la zone P est égal au total es charges positives développées dans la zone N. la charge d'espace s'étend principalement dans la région la moins dopée.

On écrit la continuité de potentiel en x=0 :

$$-\frac{eN_D}{2\varepsilon}x_n^{\ 2}+V_n=\frac{eN_A}{2\varepsilon}x_p^{\ 2}+V_p \text{ Soit } V_d=V_n-V_p=\frac{e}{2\varepsilon}(N_Dx_n^{\ 2}+N_Ax_p^{\ 2})$$

En faisant le calcul, on obtient :

$$x_n=\sqrt{\frac{2\varepsilon}{e}V_d}.\sqrt{\frac{\frac{N_A}{N_D}}{N_A+N_D}} \text{ Et } x_p=\sqrt{\frac{2\varepsilon}{e}V_d}.\sqrt{\frac{\frac{N_D}{N_A}}{N_A+N_D}}$$

$$w_{zce}=\sqrt{\frac{2\varepsilon}{e}V_d(\frac{1}{N_D}+\frac{1}{N_A})}$$

A.N : $w_{zce}=0.918\mu m$

10. <u>**Zone P**</u> : la densité des trous $p_p=N_A$, la densité des électrons $n_p=\frac{n_i^2}{N_A}$.

<u>**Zone N**</u> : la densité des électrons $n_n=N_D$, la densité des électrons $p_n=\frac{n_i^2}{N_D}$.

Or $V_d=\frac{kT}{e}\ln(\frac{N_DN_A}{n_i^{\ 2}})$ → $\frac{N_DN_A}{n_i^{\ 2}}=\exp(\frac{e}{kT}V_d)$ → $\frac{p_p}{p_n}=\frac{N_DN_A}{n_i^{\ 2}}=\exp(\frac{e}{kT}V_d)$

→ $p_n=p_p\exp(-\frac{e}{kT}V_d)=N_A\exp(-\frac{e}{kT}V_d)$

De même, on obtient : $n_p=n_n\exp(-\frac{e}{kT}V_d)=N_D\exp(-\frac{e}{kT}V_d)$

Exercice 2 :

1. Selon la courbe, (N_D-N_A)= f(x) est une droite de pente a dans la région $\left[-\frac{w}{2},\frac{w}{2}\right]$.

(N_D-N_A)= y=a.x+cte , $\begin{cases} x=\frac{w}{2}, y=N_D=a.\frac{w}{2}+cte \\ x=0, y=0=cte \end{cases}$

Donc $N_D=a.\frac{w}{2}=N$

2. Dans un semi-conducteur type N, $n_n=N_c\exp(-\frac{E_{cn}-E_F}{kT})$

Dans un semi-conducteur type P, $p_p=N_v\exp(\frac{E_{vp}-E_F}{kT})$

3. Le potentiel de diffusion V_d a pour expression : $V_d=\frac{kT}{e}\ln(\frac{N_DN_A}{n_i^2})$ (voir demonstration faite dans l'exercice 1). Or

$N_D=N_A=a.\frac{w}{2}=N \rightarrow V_d=\frac{kT}{e}\ln(\frac{a^2w^2}{4n_i^2})=2\frac{kT}{e}\ln(\frac{aw}{2n_i})$: relation I

4. La densité de charge a pour expression : $\rho(x)=e(N_D-N_A+p(x)-n(x))$

Loin de la jonction, les régions N et P sont neutres donc $\begin{cases} x\prec-\frac{w}{2}, \rho(x)=0 \\ x\succ+\frac{w}{2}, \rho(x)=0 \end{cases}$

Dans la ZCE, $-\frac{w}{2}\prec x\prec+\frac{w}{2}, \rho(x)=e(N_D-N_A)$