# [1]DIFFERENCE DE POTENTIEL DANS UN SEMI-CONDUCTEUR GRADUEL

*A la température T de 300 K, on considère un barreau de silicium dopé N (figure1) de longueur L (1cm) et de section S (1cm$^2$ ). On donne : $x_1$ = 0,4 cm et $x_2$ = 0,6 cm.*

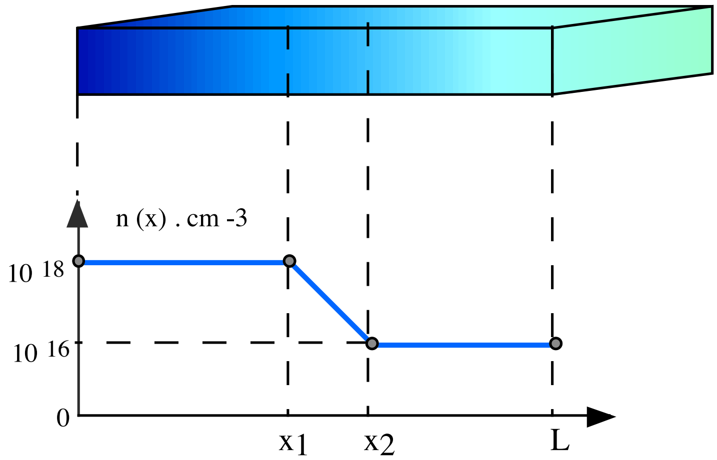



Figure 1

Comme indiqué en figure 1, le dopage du silicium est localement non homogène. La concentration en atomes donneurs est telle que la population des électrons libres n(x) s'établit de la manière suivante :

- $0 < x < x_1 : n(x) = n_1 = 10^{18}\ cm^{-3}$
- $x_2 < x < L : n(x) = n_2 = 10^{16}\ cm^{-3}$
- $x_1 < x < x_2$ *: n(x) varie graduellement.*

1) Entre $x_1$ et $x_2$, la population des électrons libres est telle que : n (x) = a x + b. Donner l'expression des coefficients a et b. Faire l'application numérique.

2) Déterminer et représenter la population n (x) et p (x) des électrons et des trous libres dans le barreau. (concentration intrinsèque : $n_i = 10^{10}$ /cm3)

*Considérons dans un premier temps, la population des électrons. Entre $x_1$ et $x_2$, la population n (x) des électrons varie, provoquant alors une densité de courant de diffusion $J_{Dn}$ (x) due au déplacement des électrons libres de la région à forte concentration vers la région à faible concentration donc de $x_1$ vers $x_2$.*

3) Trouver l'expression de la densité de courant de diffusion $J_{Dn}$ (x). Faire l'application numérique. On donne la constante de diffusion des électrons dans Si : $D_n = 34\ cm^2\ s^{-1}$ à 300K.

*Un microampèremètre connecté entre les deux extrémités du barreau de silicium indique un courant nul. Pour que la densité de courant totale des électrons soit nulle, il doit apparaître dans le S.C. une densité de courant de conduction $J_{Cn}(x)$ qui s'oppose à la densité de courant de diffusion $J_{Dn}$ (x). Puisqu'une densité de courant de conduction nécessite un champ électrique E (x), le barreau de silicium doit engendrer localement ce champ électrique par l'intermédiaire d'une différence de potentiel interne.*

[1] Ph. ROUX © 2006

4) Déterminer l'expression du champ électrique interne E (x) et le représenter graphiquement.

*On donne :* $\frac{D_n}{\mu_n} = U_T \approx 25mV$ *à 300 K (*$\mu_n$ *représente la mobilité des électrons).*

5) Déterminer la différence de potentiel interne V qui s'établit entre $x_1$ et $x_2$.

Pour cela on rappelle que : $E(x) = -\frac{dV(x)}{dx}$ entraînant : $V = -\int_{x1}^{x2} E(x)dx$

Montrer que cette différence de potentiel interne ne dépend que de $n_1$ et $n_2$. Faire l'A.N.

6) Est-il nécessaire de refaire l'analyse complète avec les trous ? On montrera par exemple que :

E(x) a la même expression pour les trous en utilisant notamment les relations :

$p(x)\, n(x) = n_i^2$ et $\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = U_T$ .

# CORRECTION

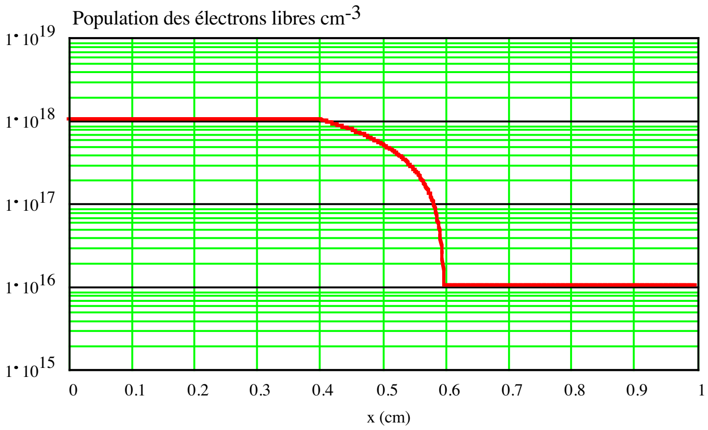
1) La population des électrons dans la zone graduelle est telle que : $\boxed{n(x)=\frac{n_1-n_2}{x_2-x_1}(x_1-x)+n_1}$.

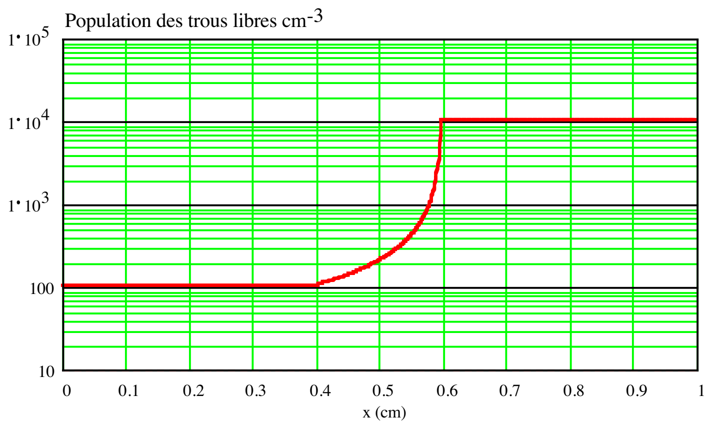
   On en déduit les coefficients de l'expression : n (x) = a x + b

   $a=-\frac{n_1-n_2}{x_2-x_1}=-4{,}95.10^{18}$ et $b=\frac{n_1-n_2}{x_2-x_1}x_1+n_1=2{,}98.10^{18}$

2) La population des trous et des électrons obéit à la loi d'action de masse : $p(x)=\frac{n_i^2}{n(x)}$.

   Les figures suivantes indiquent répartition de la population de porteurs libres électrons et trous dans le barreau.




3) Dans la zone graduelle, où la population des électrons varie, se manifeste une densité de courant de diffusion des électrons telle que :

$$\boxed{J_{Dn}(x)=qDn\frac{dn(x)}{dx}} \quad (1)$$

   $D_n$ représente le coefficient de diffusion des électrons dans le silicium. Dans ces conditions :

   - $J_{Dn}$ (x) est nul pour x < $x_1$ et x > $x_2$.
   - pour $x_1$ < x < $x_2$ : $J_{Dn}(x)=-qDn\frac{n_1-n_2}{x_2-x_1}$ (2)

Dans la zone graduelle, se développe une densité de courant de diffusion de –26,9 A.cm$^{-2}$.

4) Nous avons défini une densité de courant de diffusion dans la zone non homogène du S.C. Une densité de courant de conduction générée par une différence de potentiel créant un champ électrique doit s'opposer au phénomène de diffusion.
Expression de la densité de courant de conduction :

$$\boxed{J_{Cn} = q\mu_n n(x).E(x)} \quad (3)$$

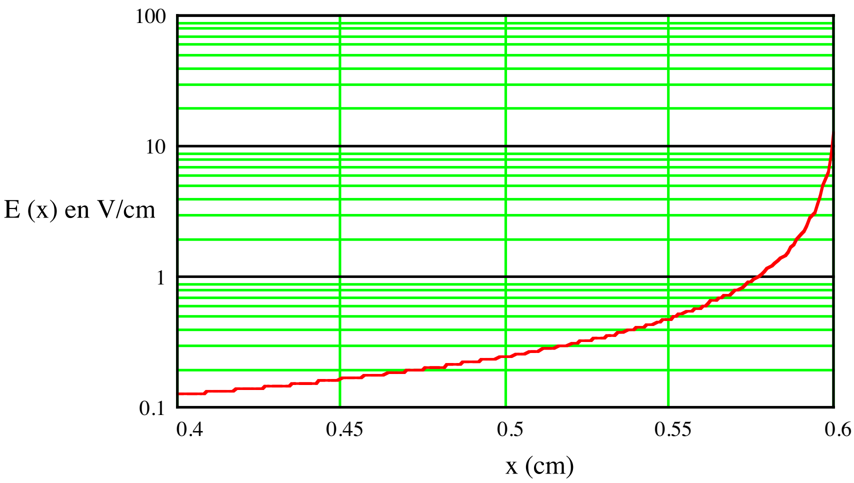
Ce champ électrique E (x), est orienté de gauche à droite. Pour déterminer son module, on va donc écrire que la somme ($J_{Dn}$ + $J_{Cn}$) doit être nulle puisque aucun courant ne se manifeste à l'extérieur du barreau.

$$q\mu_n n(x).E(x) - qD_n \frac{dn(x)}{dx} = 0$$

On en déduit : $E(x) = \frac{U_T}{n(x)} \frac{dn(x)}{dx}$ (4) et en remplaçant :

$$\boxed{E(x) = U_T \frac{n_1 - n_2}{x(n_2 - n_1) + n_1 x_2 - n_2 x_1}} \quad (5)$$

Graphe du module du vecteur champ électrique :




$\|E(x)\|$ varie de 0,12 à 12,37 V.cm$^{-1}$ entre $x_1$ et $x_2$.
$\|E(x)\|$ est nul en dehors de cette zone.

5) Détermination la différence de potentiel interne V, responsable du champ électrique.
Nous utilisons la relation (4) : $E(x) = U_T \frac{1}{n(x)} \frac{dn(x)}{dx}$ pour calculer la différence de potentiel interne V :

$$V = -\int_{x1}^{x2} E(x)dx = -U_T \int_{x1}^{x2} \frac{1}{n(x)} \frac{dn(x)}{dx} dx$$

$$\boxed{V = -U_T \int_{x1}^{x2} \frac{dn(x)}{n(x)} = U_T \ln\left[\frac{n_2}{n_1}\right] = 115{,}1mV}$$

6) Dans la zone de dopage graduel du semi-conducteur, la population des trous minoritaires varie. Une densité de courant de diffusion $J_{Dp}$ prend alors naissance :

$$\boxed{J_{Dp}(x) = -qD_p \frac{dp(x)}{dx}}$$

Ce courant est contrecarré par un courant de conduction : $J_{Cp} = q.\mu_p.p(x).E(x)$

La somme de ces deux densité de courant étant nulle, on obtient l'expression du champ électrique : $E(x) = -U_T \frac{1}{p(x)} \frac{dp(x)}{dx}$

Ce champ est évidemment le même que celui qui a été trouvé précédemment.

En effet, utilisons la loi d'action de masse : $n(x).p(x) = n_i^2$.

Soit en dérivant :

$$p(x)\frac{dn(x)}{dx} + n(x)\frac{dp(x)}{dx} = 0 \qquad \frac{dp(x)}{dx} = -\frac{p(x)}{n(x)}\frac{dn(x)}{dx}$$

En remplaçant, dans l'expression de E (x) précédente, on retrouve l'expression du champ électrique responsable de la conduction des électrons de la question 4 :

$$\boxed{E(x) = U_T \frac{1}{n(x)} \frac{dn(x)}{dx}}$$