Supélec - Dispositifs à semiconducteurs
2004-2005

Correction de l'exercice 5 - TD1

L'exercice 3 nous a permis de comprendre comment le semiconducteur réagissait "spatialement" à un excès de porteurs minoritaires. Nous avons ainsi vu que les porteurs minoritaires diffusaient vers les zones où leur densité était plus faible . Cette diffusion se réalise sur une longueur caractéristique appelée longueur de diffusion (cette longueur est dûe à la recombinaison des porteurs minoritaires).
Il s'agit dans cet exercice d'étudier le comportement vis à vis de la neutralité électrique au cours du temps d'un semiconducteur dans lequel on injecte des porteurs minoritaires.
Des trous sont ainsi injectés dans un petit volume de SC de type n. Il est nécessaire que le semiconducteur soit relié à la masse (afin qu'il puisse échanger des porteurs, sinon, il ne se passera rien !).
Les faibles dimensions du semiconducteur considéré permettent de négliger les processus de diffusion et de recombinaison.

La solution consistant à appliquer l'équation d'évolution relative aux électrons (et à remplacer le courant par son expression en fonction des deux types de courant : conduction et diffusion) aboubit à une équation différentielle faisant intervenir des dérivées temporelles et spatiales. Cette équation n'est pas facilement résolvable.
La méthode consiste à appliquer les deux équations de continuité :

$$\left\{\begin{array}{lcl} \frac{\partial p}{\partial t} & = & -\frac{1}{q} \quad div\overrightarrow{j_p} \\ \frac{\partial n}{\partial t} & = & \frac{1}{q} \quad div\overrightarrow{j_n} \end{array}\right.$$

En soustrayant ces deux équations : $\frac{\partial n}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{q} \quad div(\overrightarrow{j_p} + \overrightarrow{j_n}) = \frac{1}{q} \quad div\overrightarrow{j_{total}}$, avec : $\overrightarrow{j_{total}} = \sigma\overrightarrow{E} = (n\mu_n q + p\mu_p q)\overrightarrow{E} \approx n\mu_n q\overrightarrow{E}$.
D'où :

$$\frac{\partial n}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\sigma}{q} \quad div\overrightarrow{E} = \frac{\sigma\rho}{q\epsilon_{sc}}$$

où ρ est la densité de charge et ϵ_{sc} la permittivité du semiconducteur considéré. Or, avant injection des charges : $p = p_0$ et $n = n_0$ et la conservation de la charge s'écrit : $n_0 = p_0 + N_D \approx N_D$ où N_D est la densité d'atomes dopants.
Lors de l'injection des trous : $p = p_0 + \Delta p$ et $n = n_0 + \Delta n$. La densité de charge vaut alors :

$$\rho = q(\underbrace{p + N_D}_{\text{charges }>0} - \underbrace{n}_{\text{charges }<0}) = q(p_0 + \Delta p + N_D - n_0 - \Delta n) = q(\Delta p - \Delta n)$$

Si on suppose l'injection de trous constante dans le temps : $\frac{\partial p}{\partial t} = 0$. L'équation différentielle devient alors :

$$\begin{array}{rcl} \frac{\partial n}{\partial t} & = & \frac{\sigma}{\epsilon_{sc}}(\Delta p - \Delta n) \\ \text{Soit : } \quad \frac{\partial \Delta n}{\partial t} + \frac{\sigma}{\epsilon_{sc}}\Delta n & = & \frac{\sigma}{\epsilon_{sc}}\Delta p \\ \text{d'où : } \quad \Delta n(t) & = & Ae^{-\frac{\sigma}{\epsilon_{sc}}t} + \Delta p \end{array}$$

à $t = 0$, on n'a pas encore de variation de porteurs majoritaires : $\Delta n(0) = 0$. Donc :

$$\Delta n(t) = \Delta p \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

avec $\tau = \frac{\epsilon_{sc}}{\sigma}$

Ordres de grandeurs pour $N_D = 10^{16} cm^{-3}$ dans le Silicium :

$$\begin{aligned}
\sigma &\approx qn\mu_n \\
&= qN_D\mu_n \\
&= 1.6 \quad 10^{-19} \times 10^{22} \times 120 \quad 10^{-4} \\
&\approx 10 \quad SI
\end{aligned}$$

Or, dans le silicium : $\epsilon_{sc} = 11 \times \epsilon_0 \approx 10^{-10} \quad SI$. D'où $\tau \approx 10 \quad$ ps.

Lorsque l'on perturbe un semiconducteur, initialement à l'équilibre, en rajoutant des porteurs minoritaires en excès, le semiconducteur réagit en quelques 10 ps pour rétablir la neutralité électrique. On pourra donc considérer que la neutralité électrique est réalisée constamment et ainsi négliger ce temps transistoire.