Chapitre 5

Génération et recombinaison dans les semi-conducteurs

5.1. Notions de génération et de recombinaison

Lorsqu'un électron de valence passe à la bande de conduction (émission), il ne reste dans celle-ci qu'un temps fini, car dans son mouvement à travers le réseau, il perdra de l'énergie et finira par être capturé par un ion positif qu'il neutralisera. Cet ion peut être un centre donneur, qui sera rapidement ionisé, ou bien un ion normal du réseau : il y aura alors recombinaison électron-trou.

Le processus de génération et de recombinaison peut se faire :

- soit d'une façon directe, bande de valence - bande de conduction pour la génération et bande de conduction - bande de valence pour la recombinaison.
- Soit d'une façon indirecte, c'est-à-dire par centres intermédiaires. Dans ce cas, les centres d'impuretés de la bande interdite vont servir de lieux de transit dans les opérations de génération - recombinaison.

A l'équilibre, dans un semi-conducteur, il se produit à chaque instant, et selon la valeur de la température, une génération de paires électron-trou : un électron quittant la bande de valence y laisse un trou. Mais en même temps des recombinaisons de paires électron-trou se réalisent. Si G_{th} est le taux de génération thermique et si R_{th} est le taux de recombinaison thermique, on a à l'équilibre thermique : $R_{th}=G_{th}$ nombre de paires par unité de temps et de volume.

Dans ces conditions, la concentration des électrons et des trous est donnée par : $n_o p_o = n_i^2$

L'indice zéro indique l'état d'équilibre.

A l'équilibre, la génération et la recombinaison se compensent, et les concentrations d'équilibre en électrons et en trous restent constantes. On peut, cependant, par une influence extérieure telle que l'illumination par la lumière, accentuer le phénomène de génération, et atteindre des situations hors équilibre.

5.2. Déséquilibre

La plupart des dispositifs fonctionnent en dehors des conditions d'équilibre thermodynamique.

Certaines excitations (lumineuses par exemple) peuvent générer l'apparition de paires supplémentaires électron-trou, localement ou de façon homogène dans le cristal, créant un déséquilibre. On aura alors dans la région concernée : $n.p \neq n_i^2$

Ce déséquilibre peut s'obtenir soit par injection ou par extraction de porteurs.

Si $n.p \rangle n_i^2$ on dit qu'il y a injection de porteurs ;

Et si $n.p \langle n_i^2$ on dit qu'il y a extraction de porteurs.

5.2.1. Injection

Soit un semi-conducteur de type N.

S'il y a injection de porteurs dans le semi-conducteur, on se trouve en présence d'un plus grand nombre de porteurs libres qu'à l'équilibre.

Soit, $n_N.p_N \rangle n_i^2 = n_{No}.p_{No}$

Lors d'une injection, on ajoute aux concentrations d'équilibre des paires électron-trou en concentration $\Delta n_N = \Delta p_N$

Soit, $n_N = n_{No} + \Delta n_N$

Et, $p_N = p_{No} + \Delta p_N$

Où,
- n_{No} : concentration des électrons à l'équilibre,
- p_{No} : concentration des trous à l'équilibre,
- Δn_N : concentration des électrons en excès,
- Δp_N : concentration des trous en excès.

Par suite, $(n_{No} + \Delta n_N).(p_{No} + \Delta p_N) \rangle n_i^2$

L'injection peut être faible ou forte.

- On dit qu'il y a faible injection, si la concentration des porteurs injectés est faible devant la concentration des porteurs majoritaires à l'équilibre.

  Soit : $\Delta n_N \langle n_{No}$ et $\Delta p_N \rangle \rangle p_{No}$

  A faible injection, seule la concentration des porteurs minoritaires est fortement perturbée.

- On dit qu'il y a forte injection, si la concentration des porteurs injectés est grande devant la concentration des porteurs majoritaires à l'équilibre.

  Soit : $\Delta n_N \rangle n_{No}$

  A forte injection, les nouvelles concentrations des électrons et des trous deviennent les mêmes et égales à la concentration des porteurs injectés.

Dans la pratique, c'est la faible injection qui se produit en général.

5.2.2. Extraction

Soit un semi-conducteur de type N.

S'il y a extraction de porteurs dans le semi-conducteur, on se trouve en présence d'un plus petit nombre de porteurs libres qu'à l'équilibre.

Soit, $n_N.p_N \langle n_i^2 = n_{No}.p_{No}$

Lors de l'extraction, on soustrait aux concentrations d'équilibre des paires électron-trou en concentration $\Delta n_N = \Delta p_N$

Soit, $n_N = n_{No} - \Delta n_N$

Et $p = p_o - p_N$

Par suite, $(n_{No} - \Delta n_N).(p_{No} - \Delta p_N) \langle n_i^2$

5.3. Retour à l'équilibre

Le retour à l'équilibre se fait par l'arrêt du phénomène perturbateur qui crée l'inégalité $n.p \neq n_i^2$. En effet, dès que ce phénomène est supprimé, les concentrations tendent à retrouver leurs valeurs d'équilibre n_o et p_o.

Dans le cas où c'est une injection qui est stoppée, les porteurs en excès Δn et Δp tendent à disparaître par recombinaisons.

Au contraire, si l'on arrête un processus d'extraction, les conditions d'équilibre seront retrouvées par générations d'électrons et de trous.

Les performances d'un semi-conducteur sont conditionnées par le retour plus ou moins rapide de celui ci à l'équilibre

Le déséquilibre le plus courant est obtenu par injection de porteurs, c'est-à-dire lorsque : $n.p \rangle n_i^2$

Dans la pratique, c'est la faible injection qui se produit en général. Par suite, l'étude du retour à l'équilibre ne considérera donc que la dynamique des porteurs minoritaires appelés à se recombiner (ou à se générer dans le cas de l'extraction) pendant le régime transitoire.

Dans la plupart des cas, la neutralité électrique demeure respectée hors équilibre.

5.4. Equations de génération et de recombinaison des porteurs minoritaires en excès

Soit un semi-conducteur de type N, soumis à une injection uniforme (excitation lumineuse), de taux de génération G, assurant une distribution spatiale homogène des porteurs minoritaires p_N.

La concentration des porteurs minoritaires, ne peut croître indéfiniment. Il s'exerce en même temps un processus de recombinaison de taux R, qui conduit, après un certain temps, à une situation stationnaire ***(Figure 5.1)***: le taux de génération et le taux de recombinaison sont alors égaux.

En supprimant l'excitation lumineuse, la concentration des porteurs minoritaires tend à retrouver sa valeur d'équilibre p_{No}. Les porteurs minoritaires en excès Δp_N tend à disparaître par recombinaisons.

5.4.1. Equation de génération des porteurs minoritaires en excès

Considérons le taux d'accroissement dans le temps des porteurs minoritaires qui est égal à la différence des taux de génération cumulés et du taux total de recombinaison, soit :

$$\frac{dp_N}{dt} = \left(G + G_{th}\right) - \left(R + R_{th}\right)$$

Et comme, $G_{th}=R_{th}$

Donc, $\frac{dp_N}{dt} = G - R$

A l'état stationnaire, c'est-à-dire lorsqu'il n'y a pas de variation de la concentration dans le temps : $\frac{dp_N}{dt} = 0$ donc G=R

Pour des excitations suffisamment faibles, les taux de génération et de recombinaison sont proportionnels à l'excitation, et que, par conséquent, R et G sont de la forme $\frac{\Delta p_N}{\tau_p}$,

soit : $R = \dfrac{p_N - p_{No}}{\tau_p}$

avec, τ_p la durée de vie des porteurs minoritaires.

La durée de vie des porteurs minoritaires, représente le temps moyen que passe un porteur minoritaire dans la bande d'origine avant de se recombiner avec un porteur de type différent. Autrement dit, c'est le temps nécessaire au retour à l'état d'équilibre.

En remplaçant R par son expression dans celle de $\dfrac{dp_N}{dt}$, on obtient :

$$\frac{dp_N}{dt} = G - \frac{p_N - p_{No}}{\tau_p} = \frac{G\tau_p - (p_N - p_{No})}{\tau_p}$$

Et comme p_{No} est constant, donc,

$$\frac{dp_N}{G\tau_p - (p_N - p_{No})} = \frac{d(p_N - p_{No})}{G\tau_p - (p_N - p_{No})} = \frac{dt}{\tau_p}$$

$$\Longrightarrow \quad \int \frac{d(p_N - p_{No})}{G\tau_p - (p_N - p_{No})} = \int \frac{dt}{\tau_p}$$

$$\Longrightarrow \quad -\ln\left(G\tau_p - (p_N - p_{No})\right) + C = \frac{t}{\tau_p}$$

A t=0, $p_N = p_{No}$ $\Longrightarrow$ $-\ln(G\tau_p) + C = 0$ $\Longrightarrow$ $C = \ln(G\tau_p)$

$$\Longrightarrow \quad -\ln\left(G\tau_p - (p_N - p_{No})\right) + \ln(G\tau_p) = \frac{t}{\tau_p}$$

$$\Longrightarrow \ln\left(\frac{G\tau_p - (p_N - p_{No})}{G\tau_p}\right) = -\frac{t}{\tau_p}$$

$$\Longrightarrow G\tau_p - (p_N - p_{No}) = G\tau_p \exp\left(-\frac{t}{\tau_p}\right)$$

$$\Longrightarrow p_N - p_{No} = G\tau_p\left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_p}\right)\right)$$

Finalement, on obtient : $p_N = p_{No} + G\tau_p\left(1 - \exp\left(-\dfrac{t}{\tau_p}\right)\right)$

Et comme, $p_N = p_{No} + \Delta p_N$

Donc l'équation donnant la génération des porteurs minoritaires en excès en fonction du temps s'écrit: $\Delta p_N = G\tau_p\left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_p}\right)\right)$

En régime stationnaire, $\frac{dp_N}{dt} = 0$

Dans ce cas, le régime stationnaire correspond à un maximum, car, c'est une injection.

Donc, $\frac{dp_N}{dt} = G - R = G - \frac{p_{N\max} - p_{No}}{\tau_p} = \frac{G\tau_p - (p_{N\max} - p_{No})}{\tau_p} = 0$

$\Longrightarrow \quad p_{N\max} - p_{No} = G\tau_p \quad \Longrightarrow \quad p_{N\max} = p_{No} + G\tau_p$

5.4.2. Equation de recombinaison des porteurs minoritaires en excès

Lorsqu'on supprime l'injection G=0, donc : $\frac{dp_N}{dt} = -R = -\frac{p_N - p_{No}}{\tau_p}$

Avec, à t=0 : $p_N = p_{N\max}$

Et à $t \longrightarrow +\infty$: $p_N = p_{No}$

$$\Longrightarrow \frac{d(p_N - p_{No})}{(p_N - p_{No})} = -\frac{dt}{\tau_p} \quad \Longrightarrow \quad \int \frac{d(p_N - p_{No})}{(p_N - p_{No})} = \int -\frac{dt}{\tau_p}$$

$$\Longrightarrow \ln(p_N - p_{No}) + C = -\frac{t}{\tau_p}$$

A t=0, $p_N = p_{N\max} \Longrightarrow \ln(p_{N\max} - p_{No}) + C = 0$

$$\Longrightarrow C = -\ln(p_{N\max} - p_{No}) \quad \Longrightarrow \quad \ln(p_N - p_{No}) - \ln(p_{N\max} - p_{No}) = -\frac{t}{\tau_p}$$

$$\Longrightarrow \ln\frac{p_N - p_{No}}{p_{N\max} - p_{No}} = -\frac{t}{\tau_p}$$

$$\Longrightarrow p_N = p_{No} + (p_{N\max} - p_{No})\exp\left(-\frac{t}{\tau_p}\right)$$

Finalement, on obtient : $p_N = p_{No} + G\tau_p \exp\left(-\frac{t}{\tau_p}\right)$

Et comme, $p_N = p_{No} + \Delta p_N$

Donc l'équation donnant la recombinaison des porteurs minoritaires en excès en fonction du temps s'écrit: $\Delta p_N = G\tau_p \exp\left(-\frac{t}{\tau_p}\right)$

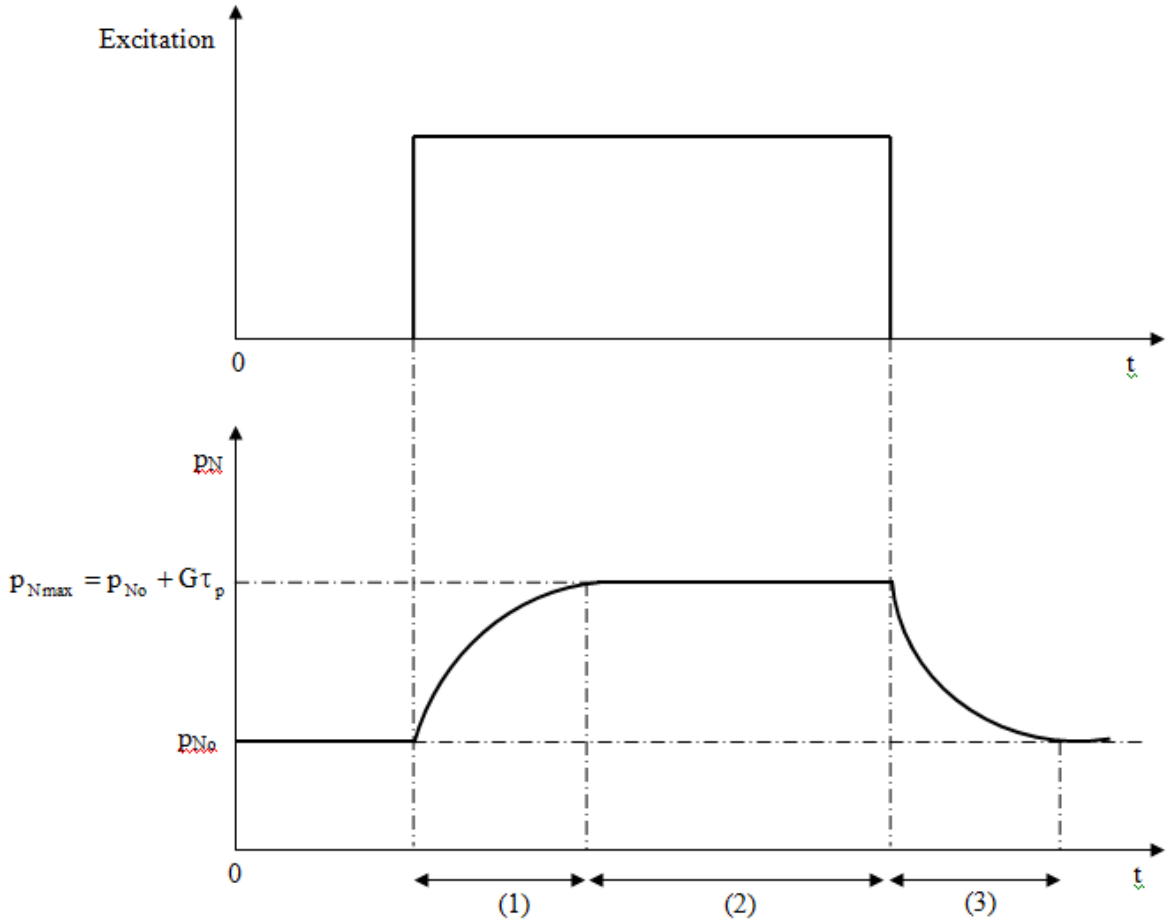

Figure 5.1 : *Génération et recombinaison des porteurs minoritaires en excès dans un semi-conducteur de type N soumis à une excitation lumineuse.*
(1) Domaine de génération des porteurs minoritaires en excès ;
(2) Domaine du régime stationnaire ;
(3) Domaine de recombinaison des porteurs minoritaires en excès.