Chapitre II

Propriétés électroniques et optiques des semiconducteurs

II.1 Rappel sur les photons

Qu'est ce qu'un photon ?

En 1900, le physicien allemand Max Planck (1858-1947) postule que la lumière et la matière ne peuvent échanger de l'énergie que par "paquets" appelés quanta. L'énergie échangée entre la lumière et la matière est obligatoirement un multiple entier du quantum d'énergie.

$$E = h.\nu$$

- E : quantum d'énergie en J
- ν : fréquence de rayonnement électromagnétique en Hz
- h : constante de Planck (h=6,63 $10^{-34} J.s$).

En 1905, Albert Einstein (1879-1955) postule que ce quantum d'énergie est transporte par un photon. Particule dont la masse est nulle et se déplaçant a la vitesse de la lumière dans le vide. Il a supposé que l'énergie du rayonnement n'était pas étalée dans tout l'espace mais concentré dans certaines régions se propageant comme des particules qu'il a appelées des photons.

II.2 bandes d'énergie dans les semi-conducteurs

II.2.1 Notion sur les bandes d'energie

Dans un atome isolé, les niveaux d'énergie des électrons liés au noyau sont parfaitement quantifiés et régis par le principe de Pauli. Lorsque la distance entre les atomes diminue pour atteindre une valeur d'equilibre, comme cela se produit dans le solide. Linteraction des orbitales électroniques voisins entrainent un élargissement des niveaux d'énergie, qui forment alors une **bande d'énergie** constituée de niveaux discrets. Chacun de ces niveaux discrets correspond à une des énergies permises des électrons, et le nombre de niveaux est égal au nombre d'atomes du solides. Une bande d'énergie contient un tres grand nombre de niveaux d'énergie distincts mais peu différents les une des autres.

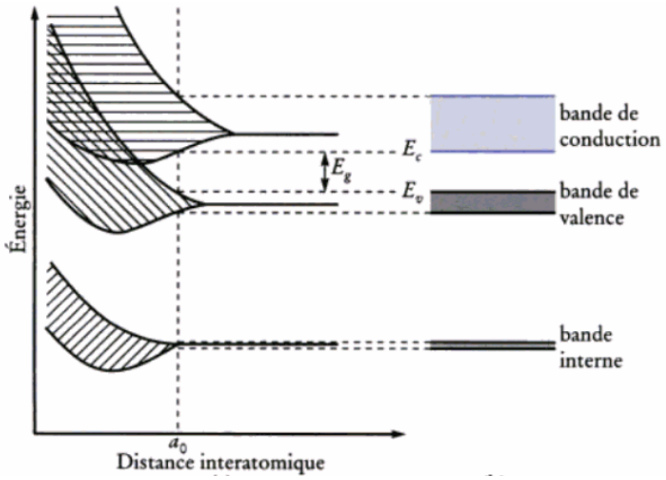

Figure II.1: Niveaux d'énergie des electrons en fonction de la distance interatomique

A la distance d'équilibre entre les atomes, la largeur des bandes dépend du niveau d'énergie initial des électrons et du degré de recouvrement de ces énergies. Dans les solides, les niveaux d'énergie des électrons des couches profondes forment des bandes étroites appelées *bandes internes*. Par contre, les niveaux d'énergie des électronsdes couches externes, ou couches de valence, forment des bandes plus larges appelées *bandes de valence*. Les bandes qui correspondent aux états exités des électrons des couches externes sont applelées *bandes de conduction*. On peut définir la largeur de la bande interdite E_g, comme la différence de l'énergie superieur de la bande de valence E_v et l'énergie inferieur de la bande de conduction E_c.

$$E_g = E_c - E_v$$

II.3 Structure de bandes d'énergie

Une condition nécessaire à l'obtention d'un rendement lumineux important concerne la structure de bandes d'énergie du matériau. On distingue deux types de semi-conducteurs selon la répartition géométrique des bandes de valence est de conduction en fonction du vecteur d'onde $\vec{k}$ (Cf.Figure II.2).

II.3.1 Semi-conducteurs à gap direct

Pour les semi-conducteur à gap direct les extremums des bandes de valance et de conduction sont situes en un même point de la zone de Brillouin c-à-d $k = \frac{\pi}{a}$ ou a, la maille du réseau cristallin. Le passage d'un électron de la bande de conduction vers la bande de valence pourrait se faire à la verticale et produire l'émission d'un photon avec une énergie importante et une quantité de mouvement négligeable.

II.3.2 Semi-conducteurs à gap indirect

Dans les semi-conducteurs à gap indirect le minimum de la bande de conduction est situe en bord de la zone de Brillouin. Le phonon traduit la notion de choc ou de vibration mécanique ou thermique avec une faible variation d'énergie.

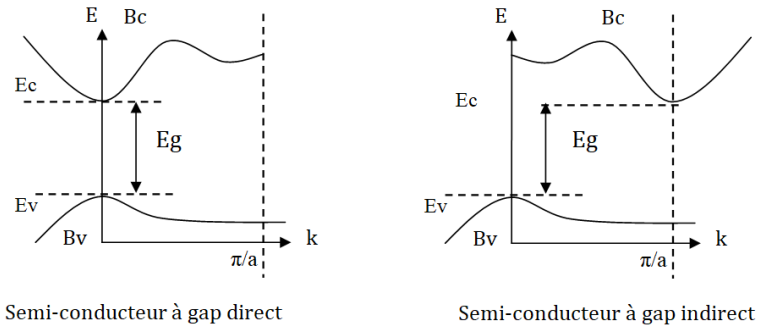

Figure II.2: Semi-conducteur à gap direct et indirect

II.4 Types de recombinaison dans les semi-conducteurs

Un électron de la bande de conduction peut retomber dans la bande de valence en en cédant un photon, C'est le phénomène de recombinaison de l paire électron-trou. Cette recombinaison peut se faire de facons differentes. On distingue deux types,

II.4.1 Recombinaisons radiatives

Dans cette recombinaison l'énergie est libérée sous forme de photons, nous citons,

- la recombinaison bande à bande entre un électron de la bande de conduction et un trou de la bande de valence. C'est la recombinaison radiative la plus dominante. Sa probabilité est proportionnelle à la concentration de dopants.

- Les recombinaisons dues aux excitons.

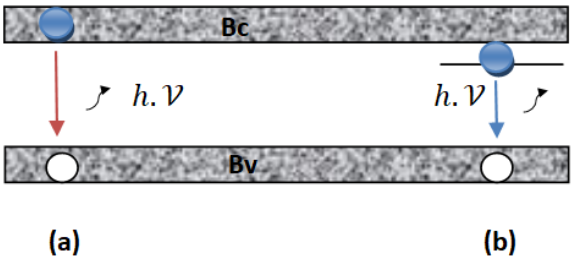

Figure II.3: Recombinaisons radiatives

II.4.2 Recombinaisons non radiatives

Dans cette recombinaison on trouve,

II.4.2.1 Recombinaison de type Auger

Elle se fait par transition directe bande à bande ou par l'intermédiaire d'un centre recombinant. L'énergie résiduelle est cédée à une troisième particule (électron ou trou) qui est excitée à un état d'énergie supérieur puis transférée de façon non radiative au réseau.

II.4.2.2 Recombination de type Shockley-Read -Hall

Cette recombinaison se fait, par l'intermédiaire d'un centre recombinant qui est un défaut ou une impureté qui introduit un niveau profond E_p dans la bande interdite, on trouve,

* capture d'un électron par un niveau piège(de Ec vers Ep)
* capture d'un trou par un niveau piège (de Ep vers Ev)
* émission d'un électron à partir d'un niveau piège (de Ep vers Ec).
* émission d'un trou à partir d'un niveau piège (de Ev vers Ep)

II.5 Interaction électron-photon

L'interaction du rayonnement avec les électrons du semi-conducteur se manifeste selon trois processus différents,

II.5.1 Absorption

Un photon peut induire le saut d'un électron, d'un état occupe de la bande de valence vers un état libre de la bande de conduction (ex : capteurs de rayonnement).

II.5.2 Emission spontanée

Un électron de la bande de conduction peut retomber spontanément sur un etat vide de la bande de valence avec émission d'un photon (ex : diode électroluminescence)

II.5.3 Emission stimulée

Un photon présent dans le semi-conducteur peut induire la transition d'un électron de la bande de conduction vers un état vide de la bande de valence avec émission d'un deuxième photon de même énergie, (ex : laser à semi-conducteur).

II.6 Rendement quantique interne

Par définition, le rendement quantique interne η_i est le rapport du taux de recombinaisons radiatives et le taux de recombinaisons total,

$$\eta_i = \frac{r_r}{r_T} = \frac{r_r}{r_r + r_{nr}}$$

* r_r : taux de recombinaisons radiatives.

* r_{nr} : taux de recombinaisons non radiatives.

On définie le taux net de recombinaisons comme la difference entre le taux total de recombinaisons et le taux de génération.

$$r_{net} = r_T - r_g$$

Le taux de recombinaison liés aux concentrations de porteurs minoritaires en exces par,

$$r_{(n,p)} = \frac{\Delta(n,p)}{\tau_{(n,p)}}$$

* n : Pour les électrons dans un semi-conducteur de type P.

* p : Pour les trous dans un semi-conducteur de type N

Avec,

* Δn,Δp, sont sont les excès de porteurs minoritaires.

* τ_n,τ_p, sont les durées de vie des porteurs minoritaires.

II.7 Durées de vie des porteurs

Dans les semi-conducteur de type P, les électrons en excès vont se recombiner, de façon radiative et non radiative. Leur durée de vie τ_n va donc représenter la contribution des différentes recombinaisons. C'est la durée de vie effective ,

$$\frac{1}{\tau_n} = \frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_{nr}}$$

Dans ce cas, le rendement quantique interne peut s'ecrire,

$$\eta_i = \frac{\tau_{nr}}{\tau_{nr} + \tau_r}$$

Dans le cas des semi-conducteurs à gap directe, nous avons $\tau_{nr} >> \tau_r$ donc,

$$\eta_i = \frac{\tau_{nr}}{\tau_{nr} + \tau_r} \simeq 1$$