

Quelques remarques sur le cours de 232 (partie difficile ie la physique des semi-conducteurs)

Rappel

On note N_a la densité volumique d'atomes accepteurs d'électron (colonne ≤ 3). Et N_a^- la densité volumique d'atomes accepteurs ionisés (c'est-à-dire ayant effectivement accepté un électron, et qui est donc par la même occasion devenu un anion, donc un ion).

De la même façon, on note N_d la densité volumique d'atomes donneurs d'électrons (colonne ≥ 5) et N_d^+ la densité volumique d'atomes donneurs d'électrons ionisés (c'est-à-dire ayant effectivement donné un électron, et qui est donc par la même occasion devenu un cation, donc un ion aussi).

Comment s'écrit la **neutralité électronique** dans le matériau semi-conducteur ?

Attention: on a envie d'écrire $n + N_d^+ = p + N_a^-$ parce qu'on se dit que les électrons en plus viennent des donneurs ionisés et que c'est donc le nombre de porteurs ionisés qu'il faut faire apparaître dans le terme concernant les charges négatives. **C'EST FAUX !**

Pour comprendre, il faut revenir à la base. Dans un semi-conducteur intrinsèque (c'est-à-dire non dopé), il n'y a pas d'atomes donneurs ou d'atomes accepteurs d'électron. Donc, à l'échelle **globale**, il y a autant de trous que d'électrons donc $n = p$, c'est la neutralité électronique en intrinsèque. En réalité, c'est une conséquence de notre modélisation avec des paires électron-trou, on pourrait tout aussi ne pas raisonner avec le concept de trou et ne voir que des échanges d'électrons entre la bande de valence (BV) et la bande de conduction (BC), et vu comme cela, il paraît alors évident qu'à l'échelle **globale**, le matériau ne peut que rester neutre.

REMARQUE: Je précise bien à l'échelle **globale** car dans le cas où il existerait un champ électrique fort dans le matériau, alors lors de la création d'une paire électron-trou (ie lorsqu'un électron passe de la BV à la BC), ce champ permettrait de séparer les paires. Imaginons une situation où les paires électrons trous sont toutes créées au même endroit, disons à l'abscisse $x = 0$ si on reste en 1D (c'est par exemple là que les photons viennent frapper la photodiode pour donner l'énergie nécessaire aux électrons pour traverser le gap). Lorsqu'un photon frappe un électron de la BV, ce dernier passe dans la BC, on peut voir ça comme la création d'une paire électron-trou. L'électron de la paire est séparé de son trou par le champ électrique et part dans un sens (disons $+x$) et le trou dans l'autre ($-x$). Puis, après une distance caractéristique L , le trou se recombina avec un autre électron et l'électron se recombina avec un autre trou. (En réalité, cette distance L qui correspond à une sorte de libre parcours moyen n'est probablement pas la même pour les trous et pour les électrons puisque, comme on le sait leurs mobilités sont différentes, $\mu_n \neq \mu_p$). Les deux zones à mi-parcours (en $+\frac{L}{2}$ et en $-\frac{L}{2}$) sont des zones où il n'y a pas (ou très peu) de recombinaison puisqu'en moyenne, les trous/électrons n'ont fait que la moitié du chemin avant de se recombina. De plus, si L n'est pas trop petit (on peut imaginer que le champ électrique soit suffisamment puissant), alors la distance $\frac{L}{2}$ est grande devant la taille caractéristique de la zone autour de $x = 0$ où a lieu le phénomène de création des paires électron-trou, on peut donc considérer qu'il n'y a pas de création de paires électron-trou dans ces zones (ou très peu). Ainsi, pour résumer, dans les zones $\pm \frac{L}{2}$, il y a beaucoup d'électrons (respectivement de trous) qui affluent à cause du champ électrique, il n'y a que peu de recombinaisons et enfin il y a peu de création de paires électron-trou. On en déduit que dans ces zones, $n \neq p$. **Localement**, il peut y avoir plus de trous dans la BV que d'électrons dans la BC et vis-versa. (vous pourriez me rétorquer que certes dans ces zones les électrons, respectivement les trous, affluent mais qu'ils repartent aussi, ce qui est vrai. Néanmoins le fait est qu'il y a en permanence des électrons, respectivement des trous, présents dans ces zones qui sont le produit d'une création de paire électron-trou délocalisée. Or on comprend bien que si on a l'électron sans le trou ou le trou sans l'électron, on a un déséquilibre)

En extrinsèque (c'est-à-dire pour un semi-conducteur dopé), on n'a plus $n = p$. Pour comprendre, il faut partir d'une solution contrôlée où on comprend tout: à $T = 0K$. À $T = 0K$, la BC est vide et la BV est pleine, donc il n'y a pas de création de paire électron-trou. De même, à $0K$, aucun atome donneur ou receveur d'électron n'est ionisé. En effet il nécessite toujours une certaine énergie (qui est égale à l'énergie de liaison, très faible certes) pour que l'électron en surplus d'un donneur ne se sépare de ce dernier. Et il nécessite aussi une énergie (égale à la barrière de potentiel) pour qu'un électron puisse s'arrimer à un atome accepteur (l'atome le repulse donc un petit peu avant de le capturer une fois cette barrière énergétique passée).

S'il n'y a pas de création de paire électron-trou et si les atomes dopant ne sont pas ionisés, alors $n = p = 0$ ie il n'y a ni trou dans la BV, ni électron dans la BC.

Maintenant, que se passe-t-il quand on augmente la température: 2 choses (au moins). L'énergie d'agitation thermique est suffisante pour ioniser les atomes dopants d'une part et pour créer des paires électron-trou d'autre part. Ainsi on comprend que la densité d'électron dans la BC n est alimentée par 2 contributions: la création de paires électron-trou et la ionisation des atomes donneurs d'électron. Même chose pour p .

C'est pour cela que **l'on ne peut pas écrire** $n + N_d^+ = p + N_a^-$. En effet, les électrons produits par la ionisation des atomes donneurs d'électron sont déjà pris en compte dans n , en écrivant cela, **on les compte deux fois**. Pareil pour p et N_a^- .

La vraie formule est $n + N_a^- = p + N_d^+$. En effet, lorsqu'un atome donneur d'électron s'ionise, on **doit** considérer cela aussi comme la création d'une paire électron-trou, (à la différence près que l'électron créé est libre tandis que le trou créé est lié). Or l'électron ainsi créé est déjà compté dans n puisqu'il va dans la BC tandis que le trou créé ne l'a pas, c'est pour cela que le terme N_d^+ intervient dans le terme "trou" de l'équation plutôt que dans l'autre. Même chose pour N_a^- .

REMARQUE: On notera que les notations marquent bien cette distinction importante. En effet, c'est la raison pour laquelle on note les atomes dopants ionisés N_a^- et N_d^+ plutôt que N_a^+ et N_d^- . On met l'accent sur le porteur lié qui n'est pas pris en compte plutôt que sur le porteur libre qui lui est déjà pris en compte. **C'est logique !**