

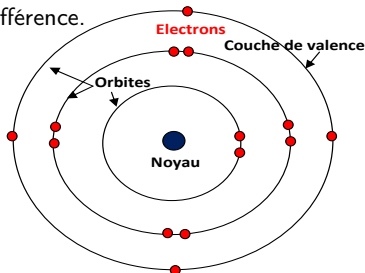
Chapitre III: Semi-conducteurs

23 mars 2017

1- Rappel : Atome

Les atomes sont formés d'un noyau entouré d'un nuage électronique. Les électrons sont des particules chargées électriquement à la valeur $-e$. Ils tournent autour du noyau sur des orbites définies et ont une masse négligeable vis à vis des neutrons et protons (qui ont eux environ la même masse). Les électrons se répartissent sur des orbites différentes qui forment des couches. Les couches sont remplies par les électrons dans un ordre bien déterminé. Quand l'atome possède plusieurs couches d'électrons, les couches profondes contiennent un nombre d'électrons indépendant de l'atome considéré. C'est la couche périphérique ou la couche de valence qui fait la différence.

Structure d'un atome (silicium). Le silicium ($z=14$) de structure électronique $(K)^2(L)^8(M)^4$, possède 4 électrons dans la couche de valence (4 électrons de valence).



2- Milieux matériels :

Selon les propriétés électriques, les matériaux sont classés en trois catégories :

2-1 Les conducteurs :

Les métaux tels que le cuivre (Cu), l'or (Au) et l'argent (Ag)... sont des conducteurs de courant électrique. La présence d'électrons libres dans la couche périphérique est à l'origine de la conductivité électrique. A température ambiante la résistivité ρ des conducteurs est très faible $\rho \leq 10^{-5} \Omega cm$.

2-2 Les isolants :

Les matériaux qui ont une résistivité ρ très forte ($\rho \geq 10^{10} \Omega cm$) sont des isolants (matériaux non conducteurs de courant électrique). Les électrons de valence sont solidement rattachés aux atomes, laissant très peu d'électrons libres de se déplacer dans un isolant. Parmi ces matériaux ; le verre, le bois et les matières plastiques

2-3 Les semi-conducteurs :

Entre les métaux et les isolants se trouvent les semi-conducteurs (SC) dont la résistivité varie 10^{-3} à $10^5 \Omega cm$. Un semi-conducteur peut être soit pur auquel cas il est dit "intrinsèque", soit dopé par des impuretés auquel cas il est dit "extrinsèque".

Remarque :

- Dans le cas des métaux : ρ augmente si T augmente.
- Dans le cas des semi-conducteurs : ρ diminue si T augmente. ρ peut varier considérablement en présence d'impuretés (dopage).

Exemple : - Semi-conducteur intrinsèque : la résistivité du silicium pur est de l'ordre de $10^3 \Omega cm$.

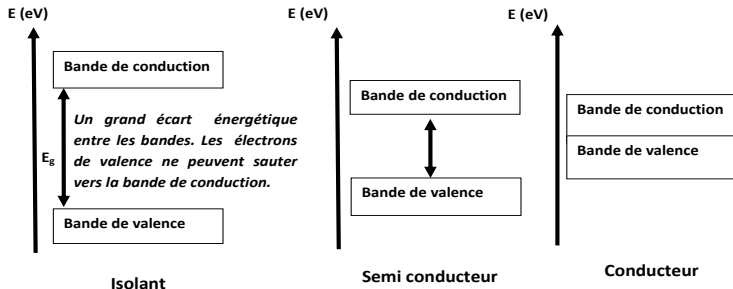
- Semi-conducteur extrinsèque : la résistivité du silicium dopé par le Bore ou le phosphore est de l'ordre de $10^{-2} \Omega cm$.

3- Cristal :

Lorsque des atomes ayant 4 électrons périphériques s'assemblent sous la forme d'un solide, ils peuvent s'ordonner selon un motif régulier appelé cristal. Dans ce cristal, chaque atome partage ses électrons avec ses voisins.

4- Notion de bande d'énergie :

La couche de valence d'un atome représente une bande d'un certain niveau énergétique et que les électrons de valence sont confinés à cette bande. Lorsqu'un électron acquiert assez d'énergie additionnelle d'une source externe, il peut quitter la couche de valence, devenir un électron libre et exister dans ce que l'on désigne comme étant la bande de conduction. Les bandes sont séparées par une région inoccupée appelée bande interdite, dont la largeur correspond à l'énergie du gap E_g (ou un écart énergétique).



Un semi-conducteur possède un écart énergétique plus restreint, permettant à quelques électrons de sauter vers la bande de conduction et devenir des électrons libres.

Largeur de la bande interdite pour quelques semiconducteurs.

Matériau	E_g (eV)	Remarque
C	5,5	isolant à T=300 K
Si	1,12	semi-conducteur à T=300 K
Ge	0,67	semi-conducteur à T=300 K

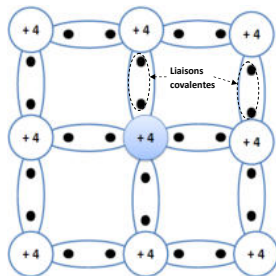
II- Semiconducteur non dopé et dopé

1- Semiconducteurs intrinsèques

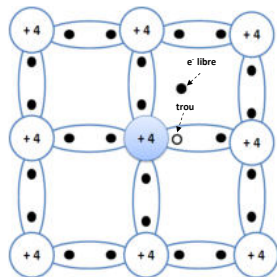
Un semi-conducteur intrinsèque est un SC pur qui ne possède aucun atome étranger. Les éléments uniques les plus utilisés pour les semi-conducteurs sont le Silicium et le Germanium (colonne IV), qui se cristallisent en engageant des liaisons covalentes.

Grâce à l'organisation cristalline, chaque atome est entouré de quatre atomes voisins qui vont combiner leurs électrons de valence de fait que chaque atome se trouve entourer de huit électrons périphériques donc la liaison très stable. 📖 Remarque : A très basse température ($T \approx 0$ K) : Les liaisons covalentes sont faiblement brisées. Le semi-conducteur est alors isolant.

	III	IV	V	
	5 B (Bore)	6 C (Carbone)	7 N (Azote)	
	13 Al (Aluminium)	14 Si (Silicium)	15 P (Phosphore)	16 S (Soufre)
30 Zn (Zinc)	31 Ga (Gallium)	32 Ge (Germanium)	33 As (Arsenic)	34 Se (Sélénium)
48 Cd (Cadmium)	49 In (Indium)	50 Sn (Étain)	51 Sb (Antimoine)	



Dès que la température augmente, l'agitation des atomes entre eux va bousculer l'ordre établi et des électrons périphériques peuvent se retrouver arrachés à la liaison cristalline des atomes. Ces électrons se retrouvent à une distance des noyaux qui leur permet de se déplacer dans la plaquette de silicium. Le semi-conducteur est alors conducteur.



L'ordre de grandeur de l'énergie d'agitation thermique, liée à la température T (en K), est $k_B T$, avec k_B , la constante de Boltzmann, qui vaut :

$$k_B = 8,6 * 10^{-5} \text{ eV} \cdot \text{K}^{-1}.$$

2- Electrons de conduction

Un cristal de silicium intrinsèque (pur) à la température ambiante tire de l'énergie thermique de l'air environnant. Quelques électrons de valence absorbent alors l'énergie suffisante pour traverser l'écart entre la bande de valence et la bande de conduction, devenant ainsi des électrons libres. Les électrons libres sont aussi appelés électrons de conduction, où leur densité est noté n .

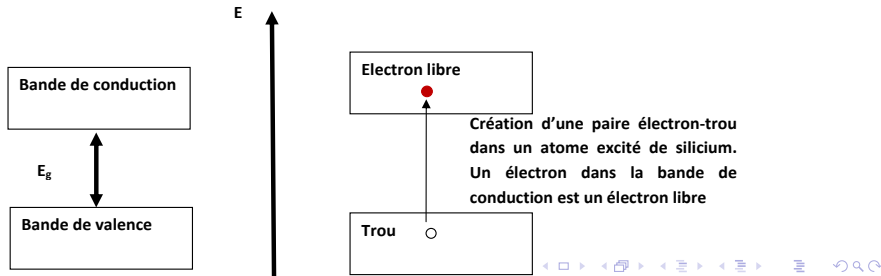
3- Notion de trous

Donc l'augmentation de la température fait croître l'énergie de l'électron et le libère de la bande de valence, mais en quittant cette dernière, il laisse un vide qui se manifeste comme une absence d'une charge négative. Cette absence est interprétée comme la présence d'une charge positive appelée trou, où leur densité est noté p . Donc l'agitation thermique crée des paires "électron - trou" dont le nombre est qualifié par la densité intrinsèque n_i :

$$n_i(T) = n = p = AT^{3/2} \exp\left(\frac{-E_g}{2k_B T}\right)$$

n_i : La densité de porteurs intrinsèque.

Exemple : pour le silicium : $n_i(T) \approx 1,5 * 10^{10} \text{cm}^{-3}$. pour le germanium : $n_i(T) \approx 2,4 * 10^{13} \text{cm}^{-3}$.



4- Conductivité électrique d'un semiconducteur

Pour un semi-conducteur elle s'exprime en fonction des densités de porteurs et de leurs mobilités. La conductivité a donc pour expression :

$$\sigma = \sigma_n + \sigma_p = e(\mu_n n + \mu_p p)$$

qui, dans le cas d'un semiconducteur intrinsèque se réduit à

$$\sigma = en_i(\mu_n + \mu_p)$$

Avec μ_n la mobilité pour les électrons, μ_p la mobilité pour les trous, n la densité pour les porteurs électrons et p la densité pour les porteurs trous et n_i est la densité intrinsèque de chaque type de porteurs libres.

Exemple : Pour le Si pur à température ambiante on a : $\mu_n \approx 0,12m^2/V.s$, $\mu_p \approx 0,05m^2/V.s$ et $n_n = n_p = n_i = 1,5 * 10^{16}m^{-3}$. Calculer la conductivité.

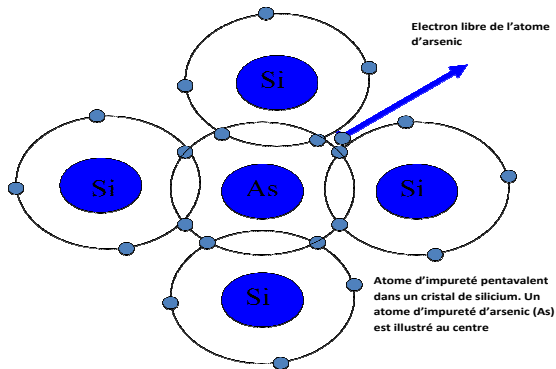
5- Semiconducteur extrinsèque : Dopage

Afin d'améliorer la conduction d'un semi-conducteur, les fabricants injectent dans une plaquette semi-conductrice des matériaux étrangers, ou impuretés, qui possèdent un nombre d'électrons périphériques juste inférieur ou juste supérieur aux 4 électrons du semi-conducteur.

Ce procédé, appelé dopage, augmente le nombre de porteurs de courant (électrons et trous). Les catégories de dopage sont de type N et de type P.

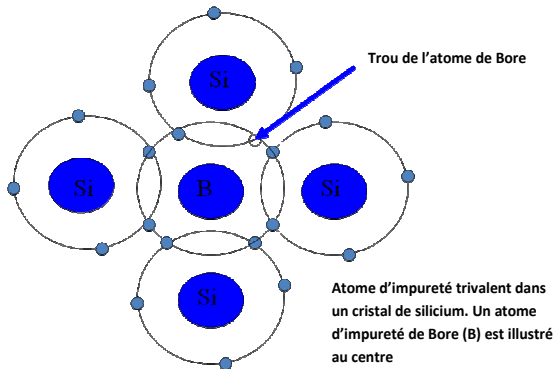
5-1 Dopage par donneurs :

Pour augmenter le nombre d'électrons de la bande de conduction dans un silicium intrinsèque, on ajoute des atomes d'impureté pentavalents. Ce sont des atomes possédants cinq électrons périphériques, tels l'arsenic (As), le phosphore (P), le bismuth (Bi) et l'antimoine (Sb). Ces atomes sont susceptibles de donner un libre. On parle d'un **dopage de type N**. Dans un semi-conducteur de type N, les électrons libres sont majoritaires alors que les trous sont minoritaires.



5-2 Dopage par accepteur :

Pour augmenter le nombre de trous dans le silicium intrinsèque, on ajoute des atomes d'impureté trivalents. Ce sont des atomes avec trois électrons de valence, tels l'aluminium (Al), le bore (B) et la gallium (Ga). Ces atomes sont susceptibles d'accepter un électron de valence. On parle d'un **dopage de type P**. Le nombre de trou peut être contrôlé par la quantité d'impureté trivalents ajoutée au silicium. Un trou crée par cette méthode de dopage n'est pas accompagné d'un électron de conduction (libre). Dans un semi-conducteur de type P, les trous sont majoritaires et les électrons sont minoritaires.



5-3 Populations des porteurs de charge dans le régime extrinsèque :

Les populations des porteurs de charge sont régies par deux équilibres :

👉 l'équilibre entre la création et la recombinaison de paires électron-trou, qui est exprimé par :

$$n \cdot p = n_i^2 = A^2 T^3 \exp\left(\frac{-E_g}{K_B T}\right)$$

Où n et p sont respectivement les densités volumiques des électrons et des trous.

👉 l'équilibre électrique (ou neutralité électrique), qui conduit à la relation

$$p + N_d = n + N_a$$

Où N_a et N_d représentent les concentrations en atomes accepteurs et donneurs ionisés.

Exemple d'un dopage de type N

dopage de type n avec $N_d \gg n_i$ (en supposant que $N_a = 0$). Equations d'équilibre :

$$n \cdot p = n_i^2$$

$$p + N_d = n$$

Or les électrons sont plus nombreux que les trous alors : $p \ll n$

\Rightarrow

$$n \approx N_d$$

\Rightarrow

$$p = \frac{n_i^2}{n} \approx \frac{n_i^2}{N_d}$$