Les Semi-Conducteurs

I. Définition

Les semi-conducteurs sont des matériaux dont la conductivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants.

Matériaux	Conductivité (S/cm)
Conducteur	$10^2 \sim 10^6$
Semi-Conducteur	$10^{-6} \sim 10^2$
Isolant	$10^{-16} \sim 10^{-6}$

A la différence de celle des conducteurs et des isolants, la conductivité des semi-conducteurs dépend fortement de leur pureté, de l'organisation et des irrégularités de la structure moléculaire, de la température… et d'autres quantités physiques et chimiques. Cette propriété représente leur avantage principal puisqu'elle permet la construction de la plupart des composants électroniques ayant des caractéristiques très diversifiées.

On peut classer les matériaux en conducteur, semi-conducteur et isolant grâce à la largeur de leur Zone Interdite. On sait en effet que les électrons circulent autour du noyau d'un atome quelconque en couche. Plus une couche est éloignée du noyau, plus l'énergie des électrons de cette couche est élevée. Le déplacement d'un électron d'une couche à une autre vers l'extérieur s'effectue de façon discrète (par saut) si on lui fournit une énergie supplémentaire (échauffement, par exemple). Le retour en arrière est possible et il s'accompagne d'une libération d'énergie.

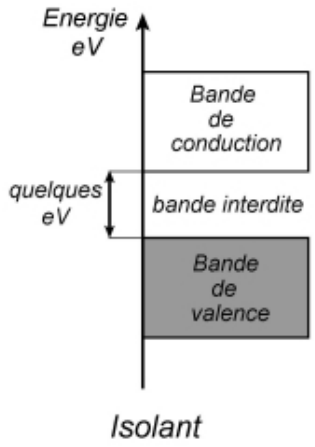
La conductivité des matériaux est déterminée par les électrons des 2 zones les plus éloignées du noyau, appelée Zone de valence et Zone de conduction. Les électrons qui se trouvent dans la zone de valence n'ont pas assez d'énergie pour se détacher du noyau, mais peuvent commencer à circuler autour de 2 noyaux rapprochés, créant ainsi une liaison covalente.

Les électrons qui se trouvent dans la zone de conduction possèdent une assez grande énergie, ce qui leur permet de se détacher de leur noyau. Ils circulent d'une façon chaotique parmi tous les noyaux d'atomes du matériau. On les appelle les électrons libres. Ils se déplacent facilement dans un champ électrique en constituant un courant dont la valeur dépend de leur quantité.

✓ Cas des isolants :

- Zone de conduction : Quasi vide
- Zone Interdite : ΔW (largeur) de 3 à $15eV$

⇒Très rares sont les électrons de valence qui reçoivent assez d'énergie pour « sauter » la zone interdite. La conductivité est faible.

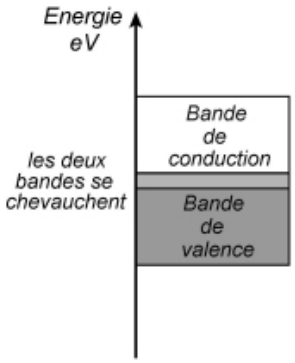


Isolant

✓ Cas des conducteurs :

La zone de conduction coïncide avec la zone de valence (ΔW = 0). Autrement dit, tous les électrons de valence des conducteurs sont libres.

⇒Conductivité élevée

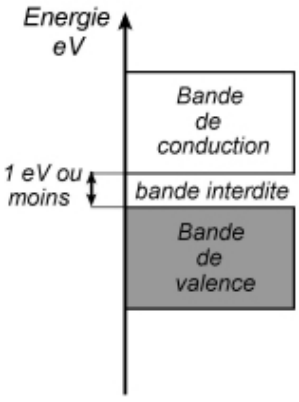


Conducteur

✓ Cas des semi-conducteurs :

La zone de conduction est séparée de la zone de valence par un ΔW non nul, mais, très faible. On a $\Delta W = 0{,}7eV$ pour le Germanium et de l'ordre de $1{,}1eV$ pour le Silicium.

A $T = 0K$ (soit $-273{,}15°C$), les électrons de valence n'ont pas assez d'énergie pour sauter la zone interdite, et la bande de conduction est vide. Mais, quand la température est plus élevée (et c'est toujours le cas), une vibration thermique apparait, et l'énergie de certains électrons de valence devient assez élevée pour qu'ils se transforment en électrons libres.

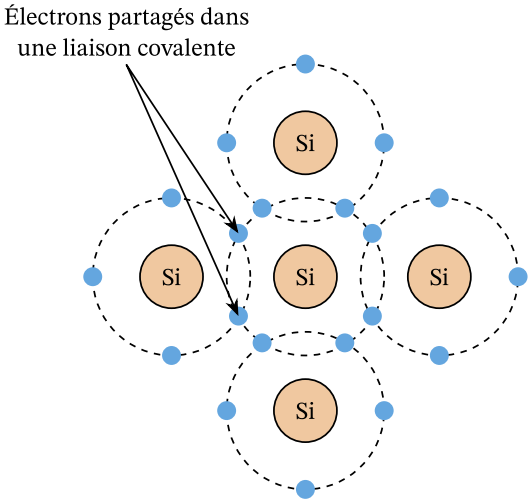


Semi-conducteur

II. Conductivité intrinsèque d'un semi-conducteur

Il existe plusieurs types de semi-conducteurs utilisés en électronique (Silicium, Germanium…). On limitera notre étude au cas du Silicium (généralisation aisée pour les autres semi-conducteurs car même comportement). Dans un premier temps, on considère le composant « pur ».

A T = 0K, chaque atome de cristal est lié aux atomes voisins par 4 liaisons covalentes.



Pour $T \neq 0K$, certains électrons de la bande de valence passent dans la bande de conduction, entrainant l'interruption de certaines liaisons covalentes. L'absence d'un électron de valence dans une liaison covalente est équivalente à l'existence d'un trou qui a, en valeur absolue, la même charge que l'électron, mais, comptée positivement. Le nombre d'électrons libres est toujours égal au nombre de trous. Ce nombre est d'autant plus important que la température est élevée.

Le processus de création de paire e^-/trous dans un semi-conducteur s'appelle la thermogénération. Il est accompagné du processus inverse, appelé recombination. En effet, durant son mouvement chaotique, un électron libre peut rencontrer un trou et reconstituer ainsi une liaison covalente interrompue. On dit que l'électron recombine avec le trou. Pendant ce passage de la zone de conduction à la zone de valence, l'énergie de l'électron diminue. La recombination dégage donc de l'énergie.

Pour chaque température, il existe un équilibre dynamique entre le nombre de paires e^-/trous thermogénérés et recombinés. Cela signifie, qu'à une température donnée, la concentration des électrons libres *n* ou la concentration des trous *p* est constante. Cette concentration s'appelle concentration intrinsèque n_i.

Ex : A $T = 300K, n_i = 1{,}45.10^{10} cm^{-3}$

Un trou peut attirer un électron d'une liaison covalente voisine qui laissera sa place à un trou. On peut dire aussi que c'est le trou qui s'est déplacé dans le sens inverse du déplacement de l'électron. Ce processus ne s'accompagne pas d'un changement de l'énergie de l'électron. Il est chaotique, comme le déplacement des électrons libres dans le cristal.

Si on applique un champ électrique au cristal (tension), les mouvements chaotiques des électrons et des trous deviennent ordonnés et orientés. Le courant qui va alors traverser le semi-conducteur est composé de deux types de porteurs, les électrons libres et les trous, qui se déplacent dans des sens opposés.

La conductivité dépend du nombre et de la vitesse de déplacement des électrons et des trous. Pour le silicium, $\sigma = 4{,}58.10^{-6} S/cm$

On montre que la résistance d'un morceau de silicium de longueur $3mm$ et de section rectangulaire de $50x100\mu m^2$ (dimensions du même ordre de grandeur que celles des composants électroniques) présente une résistance de $1{,}31G\Omega$, ce qui est énorme.

Conclusion : Le silicium à l'état pur ne convient dont pas pour construire des composants électroniques, car sa conductivité est trop faible.

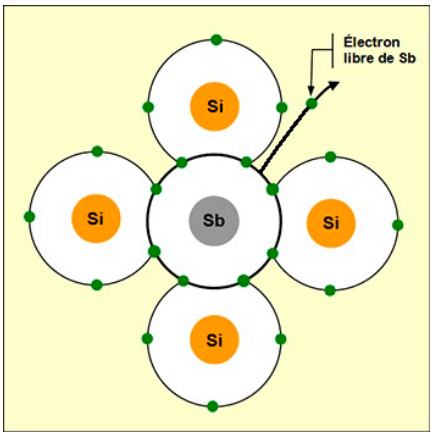
III. Conductivité d'un semi-conducteur dopé

Pour augmenter la conductivité du silicium et le rendre ainsi utilisable en électronique, on augmente le nombre de porteurs de charge mobiles en introduisant dans sa structure un certain nombre d'impuretés. Ce processus s'appelle le dopage. Les impuretés sont des éléments ayant un électron de plus ou de moins que le silicium dans leur bande de valence.

- ✓ Dopage Type N :

  On introduit des atomes ayant un électron de plus dans la couche de valence comme, dans le cas du silicium ou du germanium, du phosphore P, de l'arsenic As ou de l'antimoine Sb. Ces atomes, insérés dans le réseau cristallin, formeront quatre liaisons covalentes avec quatre atomes de silicium, le cinquième électron de la couche de valence restant libre. Cet électron qui n'est que très faiblement lié à l'atome va se placer sur un niveau énergétique plus près de la bande de conduction. Il lui suffira d'acquérir une faible énergie supplémentaire ($\Delta E \approx 0{,}01\, eV$) pour

accéder à cette bande. De ce fait, le matériau possède une meilleure conductivité électrique.
Ces électrons libres ne créent pas de trous dans le réseau, le nombre total d'électrons est donc supérieur au nombre de trous. Les **électrons** sont **les porteurs majoritaires** et les **trous les porteurs minoritaires**. Les atomes dopants sont appelés atomes donneurs.



✓ <u>Dopage Type P :</u>

On introduit des atomes ayant un électron de moins dans la couche de valence comme, dans le cas du silicium ou du germanium, comme le gallium Ga, le bore B, l'aluminium Al ou l'indium In. Il leur manque un électron pour compléter les quatre liaisons covalentes avec les atomes de silicium voisins. Un trou est créé dans la structure. Ce trou crée un nouveau niveau d'énergie voisin de la bande de valence ($\Delta E \approx 0{,}05\ eV$), accessible plus facilement aux électrons. Il peut être rempli par un électron d'un autre atome de silicium, qui à son tour libère un trou et ainsi de suite (figure ci-dessous). Le matériau devient ainsi conducteur de l'électricité.
Comme finalement le nombre de trous dépasse le nombre d'électrons, les trous sont donc les porteurs majoritaires et les électrons les porteurs minoritaires. Les atomes dopants sont appelés atomes accepteurs ou receveurs.

