

Chapitre II : Matériaux semi et supra-conducteurs

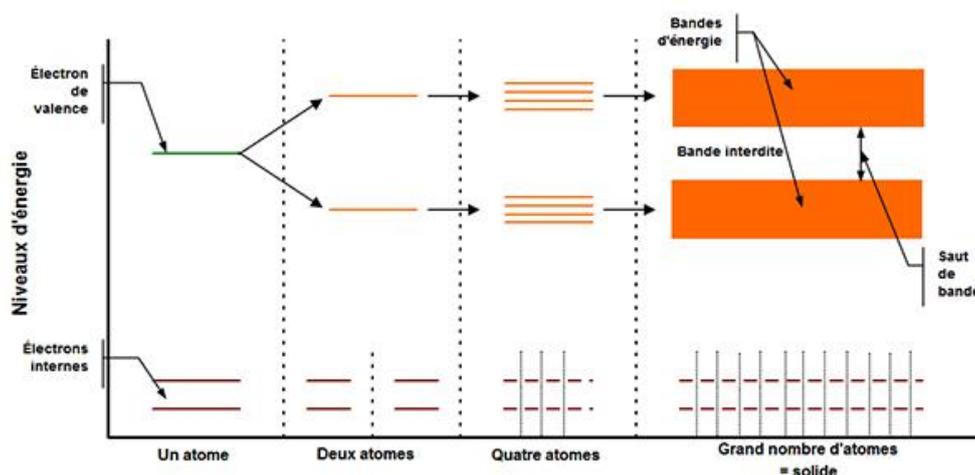
II.1. Introduction

La **conductivité électrique** caractérise l'aptitude d'un matériau à laisser les charges électriques se déplacer librement et donc permettre le passage d'un courant électrique. Lorsque l'on applique une différence de potentiel à un échantillon de matière, celui-ci adopte généralement l'un des deux comportements : soit conducteur, soit isolant. Parmi les isolants, on compte les semi-conducteurs. Ces derniers se comportent comme tels à l'équilibre et à 0 Kelvin mais peuvent facilement prendre le rôle de conducteurs à condition de les doper et de leur apporter l'énergie nécessaire (thermique, électrique,...).

Les semi-conducteurs sont à la base de l'électronique moderne. La recherche sur ces matériaux a commencée au début du 19^{ème} siècle. Au fil des années de nombreux semi-conducteurs ont été étudiés. Parmi les plus célèbres, nous trouvons le silicium **Si** et le germanium **Ge** de la colonne IV du tableau périodique.

II.2. Bandes d'énergie

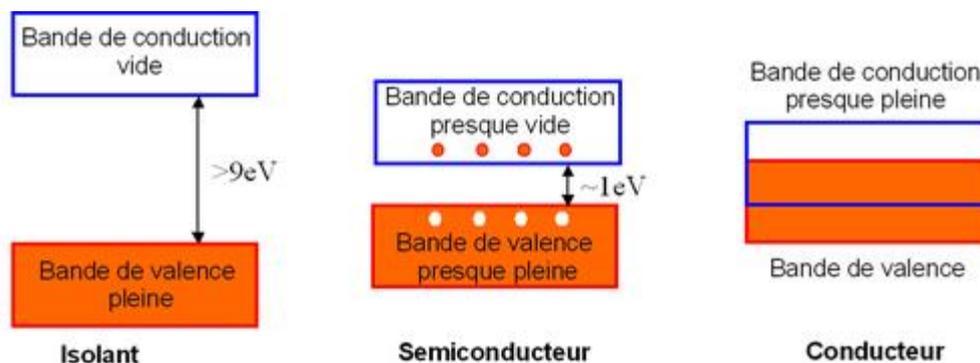
Dans un atome isolé, les électrons ne peuvent occuper que des états d'énergie discrets, comme expliqué par la mécanique quantique. Le principe d'exclusion de Pauli indique que pas plus de deux électrons dans le solide peuvent avoir la même énergie, par conséquent, lorsque deux atomes identiques sont proches l'un de l'autre (molécule diatomique), les états subissent un dédoublement. Si le nombre d'atomes augmente, ces deux niveaux se subdivisent eux-mêmes en d'autres niveaux d'énergie très voisins ce qui donne finalement des bandes d'énergie. La dernière bande remplie est appelée **bande de valence (BV)** et la bande immédiatement supérieure **bande de conduction (BC)**. Ces deux bandes sont séparées par une bande interdite ou « gap » et c'est la valeur de l'énergie de cette bande qui va fixer les propriétés électriques du matériau.



II.3. Les isolants, les semi-conducteurs et les conducteurs

Le caractère isolant ou conducteur électrique d'un matériau s'explique par la **théorie des bandes**:

- Un **conducteur** possède une bande de conduction partiellement remplie et se chevauchant avec la bande de valence. L'interpénétration des bandes de valence et de conduction implique qu'il n'existe pas d'énergie de gap et ainsi la conduction du matériau est « élevée ». Les métaux tels que le fer (Fe), le cuivre (Cu), l'or (Au), l'argent (Ag) et l'aluminium (Al) sont des conducteurs de courant électrique.
- Un **isolant** : la bande de conduction est vide et est séparée de la bande de valence par une bande interdite dont la largeur est de plusieurs eV (supérieures à $\sim 9\text{eV}$). Parmi ces matériaux ; le verre, le mica, la silice (SiO_2) et le carbone (Diamant)...
- Un **semi-conducteur** : le gap de la bande interdite est plus bas. Un semi-conducteur est donc un isolant mais qui peut devenir un conducteur très facilement en excitant les électrons de valence : on fait ça en chauffant le matériau, ou en l'éclairant, ou en le soumettant à une tension électrique bien définie



II.4. Les semi-conducteurs intrinsèques et extrinsèques

Les semi-conducteurs sont tous des cristaux covalents, contenant parfois une trace de liaison ionique. Au zéro absolu, un cristal pur, parfait, de n'importe quel semi-conducteur serait isolant.

Les propriétés caractéristiques des semi-conducteurs sont habituellement dues à :

- l'agitation thermique;
- aux impuretés;
- aux différents défauts du réseau.

I.4.1. Les semi-conducteurs intrinsèques

Un semi-conducteur intrinsèque et un semi-conducteur pur. Par exemple un semi-conducteur de germanium intrinsèque ne contient que des atomes de germanium.

Dans un semi-conducteur intrinsèque, du fait de l'agitation thermique, il existe des électrons libres. Ces électrons libres laissent la place à des trous qui sont aussitôt comblés par des électrons libres. On dit qu'il y a recombinaison.

I.4.2. Les semi-conducteurs extrinsèque

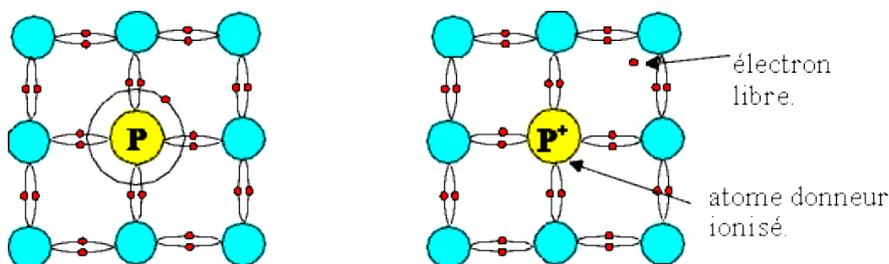
Les semi-conducteurs intrinsèques ne conduisent pas très bien le courant du fait de leur nombre limité d'électrons libres dans la bande de conduction. La conductibilité peut être augmentée par l'addition d'impuretés dans le semi-conducteur intrinsèque. Ce procédé est appelé **dopage**.

Il ya deux types de dopage:

- **dopage de type N** : l'impureté est un atome donneur
- **dopage de type P** : l'impureté est un atome accepteur

a. Dopage type N

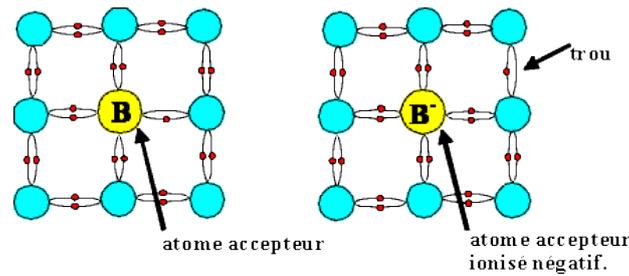
Dans un semi-conducteur de la colonne IV (Si), on introduit une impureté de la V colonne (Phosphore : P), le cinquième électron se retrouve avec une énergie de liaison très faible (5 à 25 meV). Il est localisé sur l'atome pentavalent uniquement aux très basses températures. Cet atome de la cinquième colonne a engendré un électron libre dans le cristal de silicium, on l'appelle un **atome donneur**.



b. Dopage type P

Dans un semi-conducteur de la colonne IV (Si), on introduit une impureté de la III colonne (Bore : B). Cet atome trivalent ne possède que 3 électrons périphériques. Il va partager 3 électrons avec 3 atomes de silicium. Le quatrième atome de silicium ne peut prendre en partage un électron de l'atome de bore, il y a donc un trou d'ou le nom d'accepteur.

Les **trous** sont les **porteurs majoritaires** du semi-conducteur **type P**.



III.4. Les supraconducteurs :

La supraconductivité désigne la propriété de certains matériaux de conduire parfaitement le courant électrique en générant d'importants champs magnétiques. En dessous d'une certaine température dite critique (proches du zéro absolu ou $- 273,15^{\circ}\text{C}$), un matériau peut passer à l'état supraconducteur, il se caractérise alors par deux propriétés spécifiques. Premièrement il n'oppose plus aucune résistance au passage d'un courant électrique. Sa résistivité tombe à zéro et le courant peut circuler dans le matériau sans dissipation d'énergie. Deuxièmement un champ magnétique extérieur suffisamment faible ne peut pas pénétrer à l'intérieur du supraconducteur, il reste seulement à sa surface. Ce phénomène d'expulsion est nommé effet Meissner, du nom du physicien qui l'observa la première fois en 1933.

A l'échelle atomique, lorsqu'un matériau devient supraconducteur à très basse température, ses électrons (qui sont aussi des ondes à un niveau quantique) s'associent par paires. Toutes les paires d'électrons se superposent alors les unes aux autres pour former une seule onde quantique (le « condensat ») qui devient insensible aux défauts du matériau, faisant ainsi disparaître toute résistance électrique.

Les matériaux supraconducteurs permettent ainsi de propager des intensités électriques considérables, on peut aussi stocker de l'électricité sans pertes à long terme et exploiter les champs magnétiques intenses qui les entourent pour mettre en lévitation de fortes charges métalliques et les déplacer sans frottements mécaniques. La complexité des technologies de refroidissement à de très basses températures limite encore les applications des supraconducteurs. Des progrès techniques sont toutefois attendus pour réduire partiellement cette contrainte.