

Chapitre 3

Semi-Conducteurs

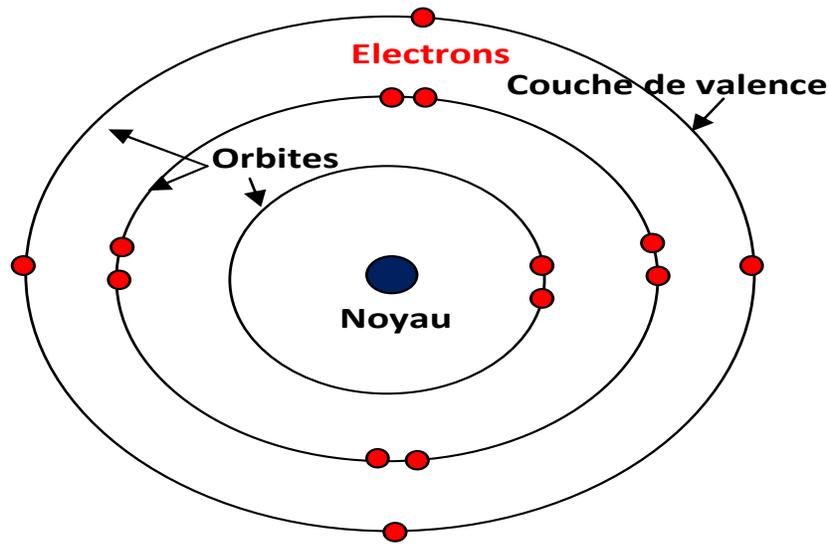
3.1 Introduction

Dans ce chapitre on va étudier les modèles simples de semi-conducteurs intrinsèques et extrinsèques de type n ou de type p commençant par les notions des bandes énergétiques où on va distinguer trois types de matériaux. La connaissance de ces modèles permet, par la suite, de rendre compte du comportement des composants électroniques réalisés à l'aide des semi-conducteurs tels que diode, transistor bipolaire, etc.... On focalise notre étude beaucoup plus sur le type de semi-conducteur

3.2 Généralités

3.2.1 Structure de la matière

Les atomes sont formés d'un noyau entouré d'un nuage électronique. Le noyau est composé de protons, particules élémentaires chargées électriquement à la valeur $+e$, et de neutrons, sans charge. 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. Dans la matière, les atomes se combinent entre eux, en mettant en commun des électrons célibataires de la couche périphérique (électrons de valence), de manière à lui donner une certaine cohésion. Macroscopiquement, ces liaisons, appelées valences, vont donner la consistance du matériau : gaz, liquide, solide plus ou moins dur, structure cristalline. 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).



Structure d'un atome (silicium)

3.2.2 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.

3.2.3 Milieux matériels

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

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 $\rho \leq 10^{-5} \Omega cm$.

 Remarque : ρ augmente si T augmente.

Isolants

Dans le cas des matériaux isolants, on a affaire à des liaisons de type covalente : les électrons célibataires de la couche périphérique forment tous des liaisons avec leurs homologues issus d'autres atomes adjacents. Les liaisons sont robustes, et les charges potentiellement mobiles (les électrons) restent liées aux atomes auxquelles elles appartiennent. Les matériaux qui ont une résistivité ρ très forte ($\rho \geq 10^{10} \Omega cm$) sont des isolants (matériaux non conducteurs de courant électrique). Parmi ces matériaux ; le verre, le bois et les matières plastiques

Semi-conducteurs

Entre les métaux et les isolant 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 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 $10^{-2} \Omega cm$.

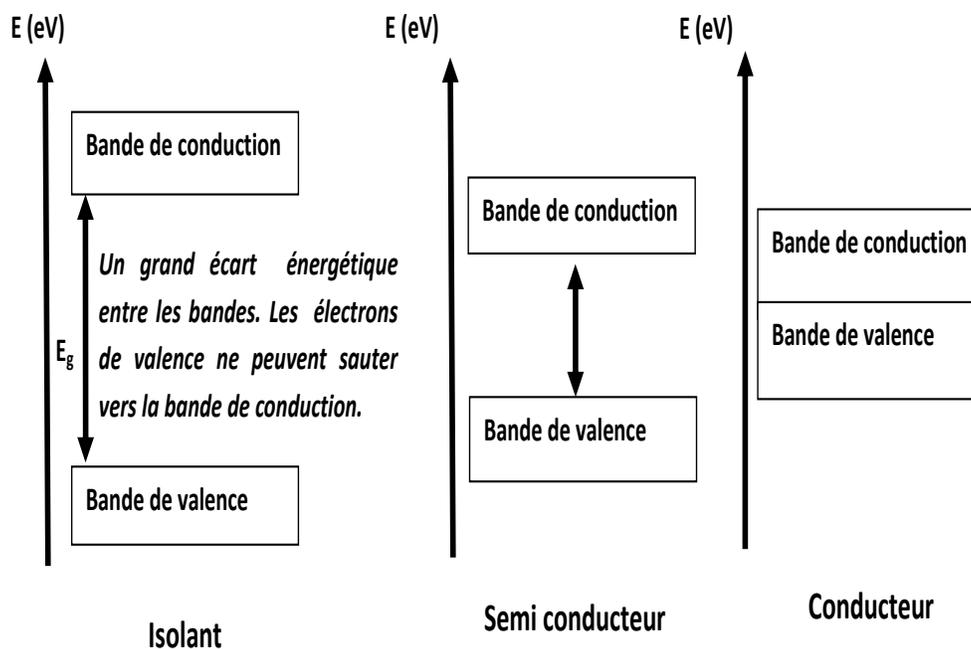
3.2.4 Notion de bande d'énergie :

Dans un cristal, du fait d'un grand nombre d'atomes, il y aura des interactions, et les niveaux d'énergie discrets deviennent des bandes d'énergie occupées par les électrons appelées : bande de conduction et bande de valence, et des bandes interdites.

Bande de valence : c'est l'ensemble des niveaux d'énergie qui peuvent être occupés par les électrons de valence. Ces derniers fournissent les liaisons de covalence entre les différents atomes d'un solide.

Bande de conduction : elle regroupe les niveaux d'énergie qui peuvent être occupés par les électrons qui arrivent de la bande de valence, dite les électrons de conduction (ou les électrons libres) et qui sont responsables de la conduction d'électricité.

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). Selon la largeur de la bande interdite on peut distinguer trois types de matériaux :



Diagrammes de bandes d'énergie d'un isolant, semi-conducteur et conducteur

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.

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

Exemples : Energie de gap E_g de carbone, silicium et germanium (énergie minimale pour créer une paire électron-trou.)

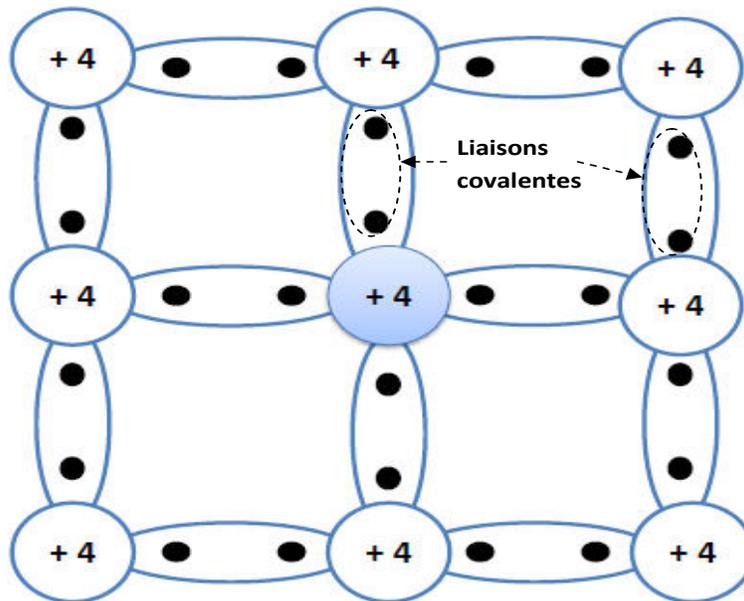
3.3 Semiconducteur non dopé et dopé

3.3.1 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 covalantes.

3.3. SEMICONDUCTEUR NON DOPÉ ET DOPÉ

	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 (Etain)	51 Sb (Antimoine)	

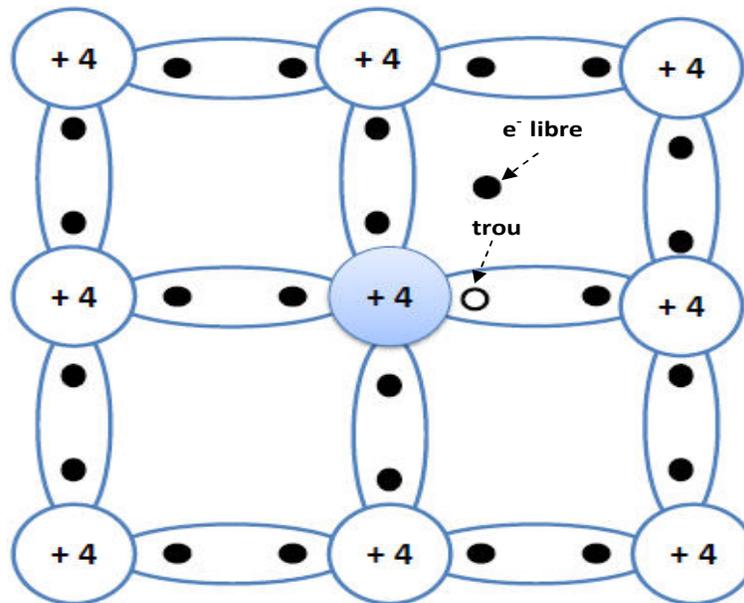


Grâce à l'organisation cristalline, chaque atome est entouré de quatre atomes voisins qui vont combiner leurs électrons de valence de fait que chaque atome se trouve entourer de huit électrons périphériques donc la liaison très stable.

Remarque : A très basse température ($T \approx 0 \text{ K}$) : Les liaisons covalentes sont faiblement brisées. Le semi-conducteur est alors isolant.

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

3.3.2 Conduction des semi-conducteurs

Electrons de conduction et Notion de trous

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 de dévier, non liés à l'atome. Les électrons libres sont aussi appelés électrons de conduction, où leur densité est noté n .

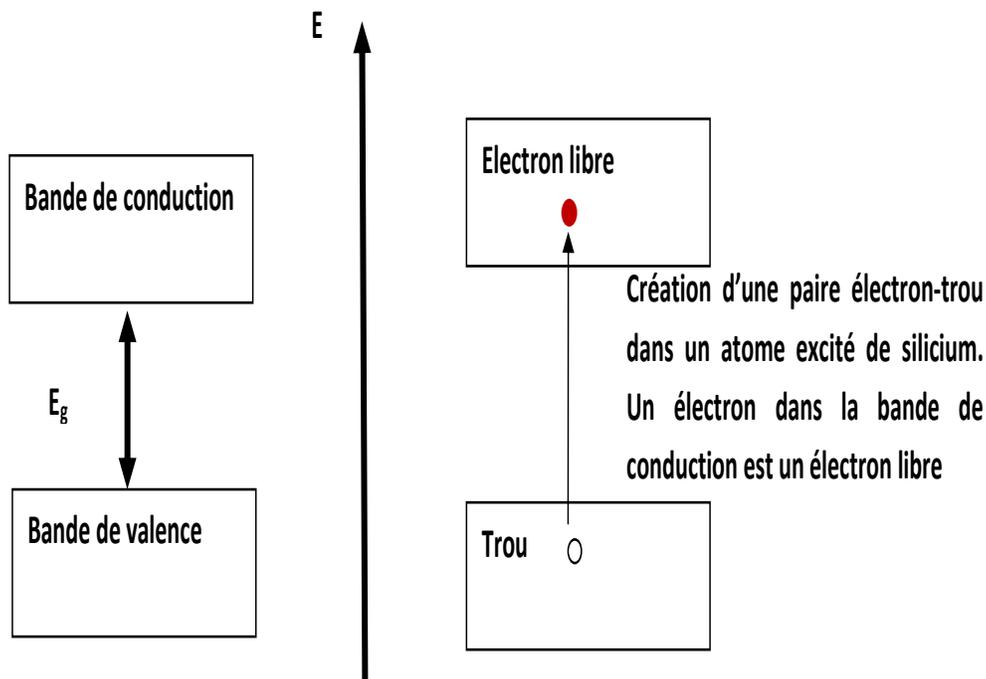
L'augmentation de la température fait croître l'énergie de l'électron et le libère de la bande de valence, mais en quittant cette dernière, il laisse un vide qui se manifeste comme une absence d'une charge négative. Cette absence est interprétée comme la présence d'une charge positive appelée trou, où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

n_i :

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

A : constante dépendant du type de semi-conducteur.

K_B : constante de Boltzman.



Exemple : pour le silicium : $n_i(T = 300K) \approx 1,5 * 10^{10} cm^{-3}$. pour le germanium : $n_i(T + 300K) \approx 2,4 * 10^{13} cm^{-3}$.

Conductivité électrique d'un semiconducteur :

Pour un semi-conducteur, la conductivité 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 est la densité des porteurs électrons, p est la densité des porteurs trous et n_i est la concentration intrinsèque

de chaque type de porteurs libres.

☛ Exemple : Pour le silicium 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.

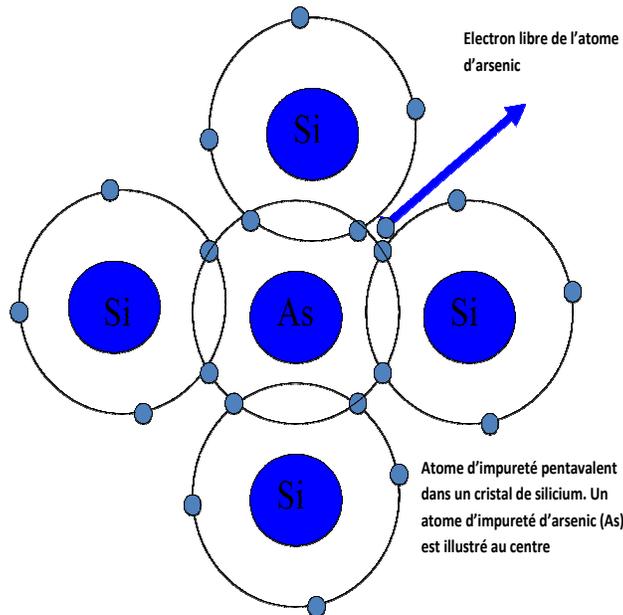
3.3.3 Semiconducteur extrinsèque : Dopage

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, permet d'augmenter le nombre de porteurs de courant (électrons et trous). Les catégories d'impuretés sont de type N et de type P.

Dopage par donneurs :

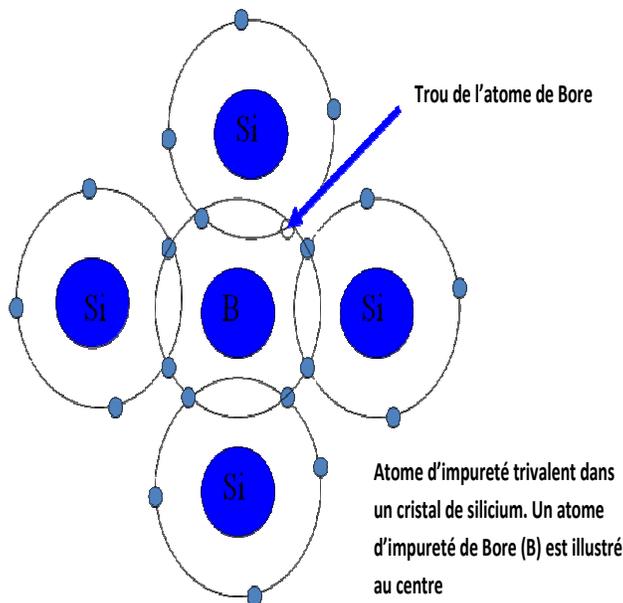
Pour augmenter le nombre d'électrons de la bande de conduction dans un silicium intrinsèque, on ajoute des atomes d'impureté pentavalents. Ce sont des atomes possédants cinq électrons périphériques, tels l'arsenic (As), le phosphore (P), le bismuth (Bi) et l'antimoine (Sb). Ces atomes sont susceptibles de donner un électron 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.



Représentation schématique de la substitution d'un atome d'arsenic à un atome de silicium.

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.



Représentation schématique de la substitution d'un atome de bore à un atome de silicium..

3.3.4 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 :

$$np = n_i^2 = A^2 T^3 \exp\left(\frac{-E_g}{K_B T}\right) \quad (3.1)$$

3.3. SEMICONDUCTEUR NON DOPÉ ET DOPÉ

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 :

$$p + N_d = n + N_a \quad (3.2)$$

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 :

$$np = n_i^2$$

$$p + N_d = n$$

On s'attend à ce que les électrons, issus des donneurs, soient plus nombreux que les trous, issus de la génération thermique : $p \lll n$

\implies

$$n \approx N_d$$

\implies

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