

Annexe III.1 Rappel sur les semi-conducteurs

1. Niveaux d'énergie d'un semi-conducteur

Ayant une conductivité électrique intermédiaire entre l'isolant et le métal, un semi-conducteur est un solide cristallin dont les propriétés de conduction électrique sont déterminées par deux bandes d'énergie particulières: d'une part, la bande de valence, qui correspond aux électrons impliqués dans les liaisons covalentes; d'autre part, la bande de conduction, comprenant les électrons dans un état excité, qui peuvent se déplacer dans le cristal. Ces deux bandes sont séparées par un gap, une bande interdite que les électrons ne peuvent franchir que grâce à une excitation extérieure (par exemple, l'absorption d'un photon). La bande interdite correspond à une barrière d'énergie, dont l'ordre de grandeur est l'électronvolt (eV).

La structure électronique d'un semi-conducteur est représentée sur la figure III-1.

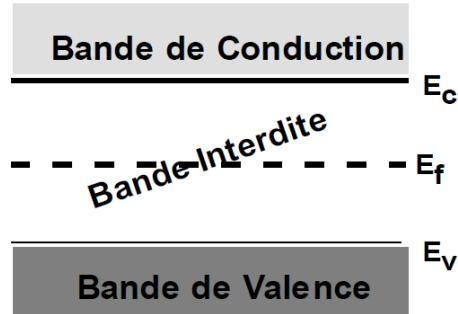


Figure III.1

A l'état fondamental ($T= 0 \text{ K}$) tous les électrons du cristal de silicium se trouvent dans la bande de valence BV. La largeur totale de la bande de valence est d'une dizaine d'eV. L'énergie du bord supérieur de la BV est notée E_v . Le nombre d'états d'énergie comprise entre E et $E+dE$ est donné par $N(E).dE$ où $N(E)$ est la densité d'états pour l'énergie E .

La bande de conduction BC est vide à 0 K. Sa limite inférieure est notée E_c . La région comprise entre les bandes BV et BC (bande interdite) ne contient aucun état susceptible de recevoir un électron. Pour le silicium cristallin sa largeur est de 1,08 eV. A $T \neq 0$, un certain nombre d'électrons sont excités thermiquement de BV vers BC. Aux n électrons excités dans BC correspond un nombre égal p de trous (ou défauts d'électrons) dans BV. Pour une température donnée T , la répartition des électrons est régie par la statistique de Fermi-Dirac $f(E)$ qui donne la probabilité pour qu'un état d'énergie E soit occupé :

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E - E_F}{kT}}}$$

E_F est un paramètre (homogène à une énergie) appelé niveau de Fermi et qui se trouve dans la bande interdite. La figure III-2 montre la forme de la fonction $f(E)$. A la température T, le nombre d'électrons n dans la BC est donné par :

$$n = \int_{BC} N(E)f(E)dE$$

On montre que l'on peut écrire une relation de la forme :

$$n = f(E_c)N(E_c)$$

où $N(E_c)$ définit une densité d'états effective dans la bande de conduction.

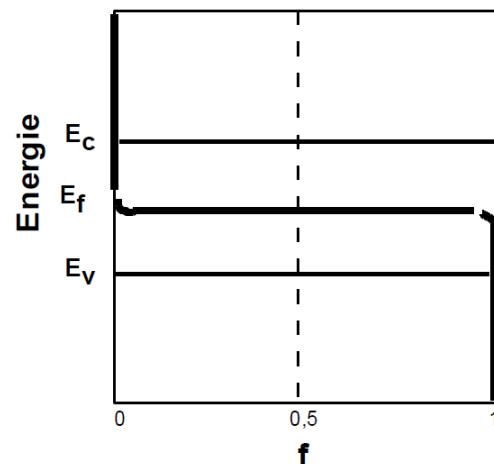


Figure III.2

2. Semi-conducteur intrinsèque

Un semi-conducteur intrinsèque est un semi-conducteur pur sans défaut de structure. Comme il ne contient aucune impureté, tous les électrons présents dans la bande de conduction proviennent de la bande de valence et à chaque électron de la BC correspond un trou dans la BV. Il y a donc autant d'électrons que de trous : $n = p = n_i$; n_i est la concentration intrinsèque avec:

$$n = N_c e^{(E_F - E_c)/kT}$$

$$p = N_v e^{(E_v - E_F)/kT}$$

En remplaçant n et p par leur expression on trouve:

$$E_{Fi} = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{k_B T}{2} \text{Log}\left(\frac{N_v}{N_c}\right)$$

E_{Fi} : position du niveau de FERMI dans un semi-conducteur intrinsèque.

A $T = 0$ °K, le niveau de FERMI dans un semi-conducteur intrinsèque est exactement au milieu de la bande interdite. Lorsque T augmente, le niveau de FERMI s'éloigne légèrement du milieu sauf si $m_e = m_h$. Il est possible en introduisant les notions de nombre intrinsèque et de niveau de FERMI d'écrire:

$$n = n_i \exp - \frac{E_F - E_{F_i}}{k_B T} \quad \text{et} \quad p = n_i \exp - \frac{E_{F_i} - E_R}{k_B T}$$

Dans un semi-conducteur intrinsèque la conductivité est donnée par:

$$\sigma_i = q n_i (\mu_n + \mu_p)$$

3. Dopage

Le dopage d'un matériau consiste à introduire dans sa matrice des atomes d'un autre matériau. Ces atomes vont se substituer à certains atomes initiaux et ainsi introduire davantage d'électrons ou de trous. Les atomes de matériau dopant sont également appelés impuretés, et sont en phase diluée: leur concentration reste négligeable devant celle des atomes du matériau initial. Tout dopage sert à modifier cet équilibre entre les électrons et les trous, pour favoriser la conduction électrique par l'un des deux types de porteurs. L'atome d'impureté provoque des effets qui dépendent de la colonne qu'il occupe dans la classification périodique de Mendeleïev, par rapport à la colonne de l'atome qu'il remplace. Il existe deux types de dopage:

3.1. Dopage type N: consiste à produire un excès d'électrons qui sont négativement chargés:

Si l'on introduit dans le réseau de silicium des atomes pentavalents tels que le phosphore ou l'arsenic (atomes dopants appartenant à la colonne suivant celle du Si), ils se placent en site de substitution. Ils possèdent un électron supplémentaire par rapport à l'atome initial. Quatre électrons sont utilisés pour les liaisons avec les Si voisins, le cinquième est très peu lié (énergie de liaison très faible de 5 à 25 mev). Il est localisé sur l'atome pentavalent uniquement aux très basses températures. Il est donc sur un état libre du système et a une très grande probabilité d'être excité vers BC. On a du silicium dopé N.

A la température ambiante, cet électron est libéré dans le réseau et l'atome d'impureté qui était neutre devient une charge positive fixe. L'atome qui a engendré un électron libre dans le cristal de silicium, est appelé atome donneur (d'électron) et sa densité sera notée N_D . Aux très basses températures, (typiquement < 200 °K), l'énergie thermique n'est plus suffisante pour ioniser l'ensemble des impuretés introduites : on est dans la gamme des températures d'ionisation partielle. Pour une densité de donneur N_D tous à un niveau E_D , la densité des donneurs ionisés est donnée par la relation:

$$N_D^+ = \frac{N_D}{1 + 2 \exp(\frac{E_F - E_D}{k_B T})}$$

Le facteur 2 devant l'exponentielle tient compte du fait que l'on peut placer 2 électrons de spins opposés sur chaque niveau.

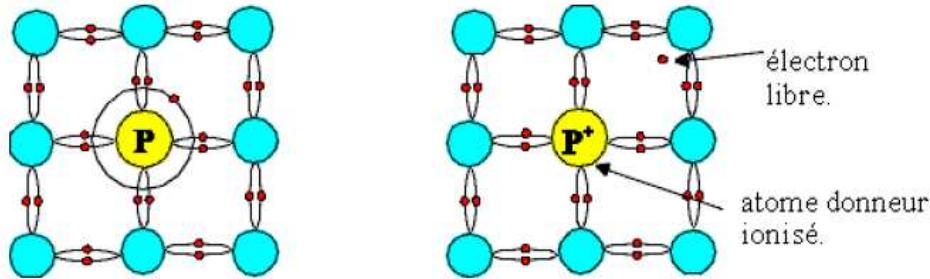


Figure III.3 Exemple d'un dopage type N

La répartition des électrons est encore régie par la fonction de Fermi mais cette fois E_F est situé dans la moitié supérieure de la bande interdite. Les niveaux électroniques correspondant aux atomes d'impureté sont situés dans la bande interdite et très proches de E_C . Il y a un nombre égal de charges positives sur les atomes donneurs (P ou As) et d'électrons dans la bande de conduction.

3.2. Dopage type P: consiste à produire une carence en électrons, donc un excès de trous, considérés comme positivement chargés:

Si l'on introduit des atomes de la colonne III dans un semi-conducteur de la colonne IV (ex: bore atome dopant appartenant à la colonne précédent celle du Si), ces atomes trivalents ne possédant que 3 électrons périphériques, il manque maintenant un électron pour former les quatre liaisons autour de l'impureté. Il existe une liaison insatisfaite, localisée sur l'atome introduit, uniquement aux très basses températures. Il apparaît alors une carence en électrons, autrement dit un trou. A la température ambiante, l'énergie thermique est suffisante pour transférer un électron d'un atome de silicium voisin et le fixer sur l'atome de Bore . Ce qui se traduit par un électron excité depuis BV pour combler cette lacune laissant un trou dans BV. L'atome d'impureté qui était neutre devient une charge négative fixe. On a du silicium dopé P. L'atome qui a engendré un porteur positif (trou) dans le cristal de silicium est dit accepteur d'électron, car il est capable de capturer un électron d'une liaison de valence, sa densité sera notée N_A . Aux très basses températures, (typiquement $< 200 \text{ }^{\circ}\text{K}$), l'énergie thermique n'est pas suffisante pour ioniser l'ensemble des impuretés introduites: on est dans la gamme des températures d'ionisation partielle. Pour une densité de donneur N_A tous à un niveau E_A , la densité des donneurs ionisés est donnée par la relation:

$$N_A^- = \frac{N_A}{1 + 4 \exp\left(\frac{E_A - E_F}{k_B T}\right)}$$

Un facteur 2 devant l'exponentielle tient compte du fait que l'on peut placer 2 électrons de spins opposés sur chaque niveau et un autre facteur 2 tient compte de la dégénérescence de la bande de valence pour Ge, Si et GaAs.

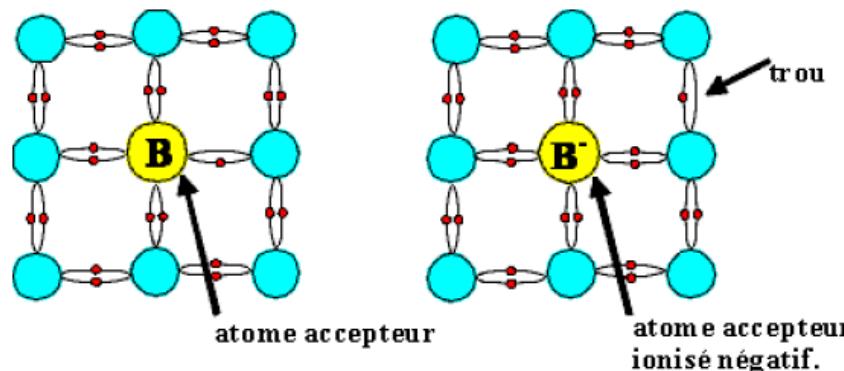


Figure III.5 Exemple d'un dopage type P

La statistique des trous est aussi régie par la fonction de Fermi, E_F est alors dans la moitié inférieure de la bande.

Le dopage provoque donc l'apparition de nouveaux niveaux accepteurs et donneurs d'électrons dans la structure de bande du matériau dopé. Ces niveaux apparaissent dans le gap, entre la bande de conduction et la bande de valence. Ainsi, l'énergie nécessaire pour que les électrons passent dans la bande de conduction est bien plus facilement atteinte que dans un semi-conducteur intrinsèque.

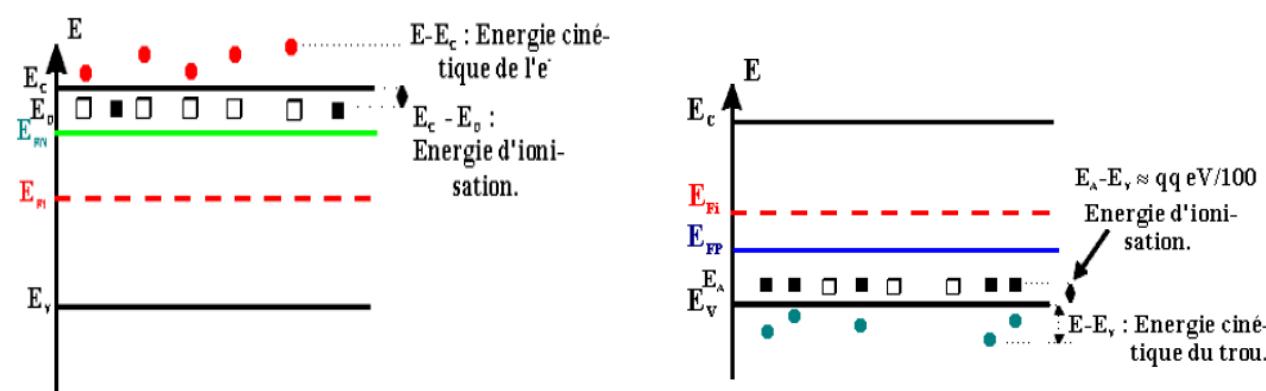


Figure III.6

Un même atome dopant peut être à la fois donneur et accepteur : il est alors dit amphotère. C'est par exemple le cas du Silicium (Si, colonne IV), qui est un dopant de l'Arséniure de gallium (AsGa) : si le Si se met en substitution d'un atome de Gallium (colonne III), il est donneur d'électron. S'il est en substitution d'un atome d'Arsenic (colonne V), il est accepteur.