

3. LES TYPES DE SEMICONDUCTEURS

3.1 Semi-conducteur Intrinsèque :

Dans un semi-conducteur parfait, pour $T \neq 0$, chaque fois qu'un électron part de la bande de valence, et passe dans la bande de conduction, un trou apparaît dans la bande de valence. La quantité d'électrons est ainsi rigoureusement égale à la quantité de trous ; leur concentration commune est appelée concentration intrinsèque, n_i . Le matériau est dit dans ce cas intrinsèque.

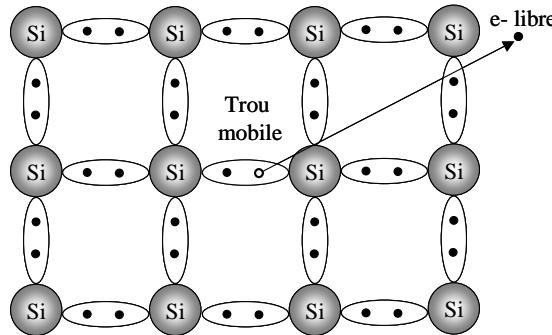


Figure 3.1 : Création d'une paire électron-trou

a) Concentration intrinsèque

La concentration des électrons dans la bande de conduction et la concentration des trous dans la bande de valence sont égales à n_i :

$$n = p = n_i \quad (3.1)$$

or :

$$n = N_c \exp \frac{-E_g}{kT} \quad (3.2) \quad \text{et } p = N_v \exp \frac{-E_g}{kT} \quad (3.3)$$

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

On peut donc exprimer la concentration intrinsèque par :

$$n_i = \sqrt{N_c N_v} \exp \frac{-E_g}{2kT} \quad (3.4)$$

Dans cette relation on constate que la concentration intrinsèque dépend très fortement de la température.

b) Position du niveau de Fermi dans un matériau intrinsèque.

Pour déterminer la position du niveau de Fermi on repart des équations (2.6) et (2.7) donnant les concentrations d'électrons et de trous

$$n = N_c \exp \left(-\frac{E_C - E_F}{kT} \right) \quad p = N_v \exp \left(-\frac{E_F - E_V}{kT} \right)$$

puisque $p = n$, à partir de ces deux équations nous obtenons :

$$N_c \exp \left(-\frac{E_C - E_F}{kT} \right) = N_v \exp \left(-\frac{E_F - E_V}{kT} \right)$$

$$\ln\left(\frac{N_C}{N_V}\right) = \frac{1}{kT}(-E_F + E_V + E_C - E_F) = \frac{1}{kT}(E_V + E_C - 2E_F)$$

D'où :

$$E_F = \frac{E_V + E_C}{2} + kT \ln\left(\frac{N_V}{N_C}\right)$$

Ainsi, le niveau de Fermi intrinsèque (correspondant au matériau intrinsèque), se trouve à peu près au milieu de la bande interdite du matériau.

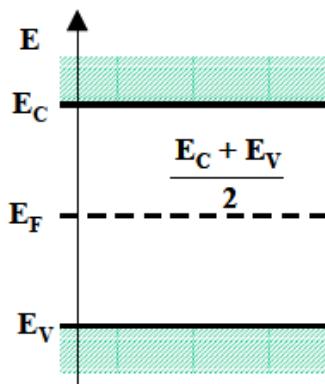


Figure 3.1 : position du niveau de Fermi intrinsèque dans un monocristal parfait. Il se situe approximativement au milieu de la bande interdite à température ambiante.

3.2 Semi-conducteur Extrinsèque :

On peut modifier de façon considérable la concentration de porteurs de charge d'un semi-conducteur intrinsèque en lui ajoutant de faibles quantités d'atomes astucieusement choisis et que l'on appelle impuretés dopantes ou tout simplement **dopants**. On obtient alors un semi-conducteur **extrinsèque** ou **dopé**.

Selon la nature des atomes introduits, soit le **nombre d'électrons devient très supérieur au nombre de trous** et le semi-conducteur est appelé de **type n**, soit le **nombre de trous devient très supérieur à celui des électrons** et le semi-conducteur est appelé de **type p**.

1°) Notion de dopage

Dans un cristal semi-conducteur, il est possible d'introduire des atomes étrangers de valence 3 ou 5 par exemple (colonne III ou V du tableau de Mendéléev). Si tout va bien technologiquement (*cf. cours de technologie microélectronique intégrée*), les atomes vont prendre la place des atomes du réseau, c'est-à-dire se mettre en site substitutionnel comme représenté figures 9 et 10. Nous allons voir que cet apport va transformer considérablement l'état électronique du monocristal.

a) dopage de type n ou donneur

Prenons le cas d'un atome de la **colonne V**, par exemple du phosphore. La couche externe de cet atome comporte, 5 électrons. Les 4 électrons vont entrer en liaison avec les 4 électrons du

semiconducteur (Silicium) pour former 4 liaisons covalentes. Une électron libre du phosphore circule dans le cristal et rejoint la bande de conduction. L'atome de phosphore se retrouve avec 4 électrons de valence avec une charge et devient un ion positif. . Cet atome a ainsi un comportement dopant et puisqu'il a **fourni un électron au cristal** (dans sa bande de conduction), on l'appelle atome **donneur**. Notons que la charge totale du cristal reste nulle, le cristal étant globalement neutre.

b) dopage de type p ou accepteur

Prenons le cas d'un atome de la **colonne III**, par exemple du bore. La couche externe de cet atome comporte, 3 électrons, cet atome va contribuer à former 3 liaisons covalentes avec le semiconducteur (Si). Un trou libre du bore circule dans le cristal et se recombine avec un électron et rejoint la bande de valence. L'atome de bore se retrouve avec une charge électrique négative de l'électron et devient ainsi un ion négatif.

Cet atome a ainsi un comportement dopant et puisqu'il a fourni un trou au cristal (dans sa bande de valence), on l'appelle **atome accepteur**, puisqu'il accepte un électron. Notons que la charge totale du cristal reste toujours nulle, le cristal étant globalement neutre.

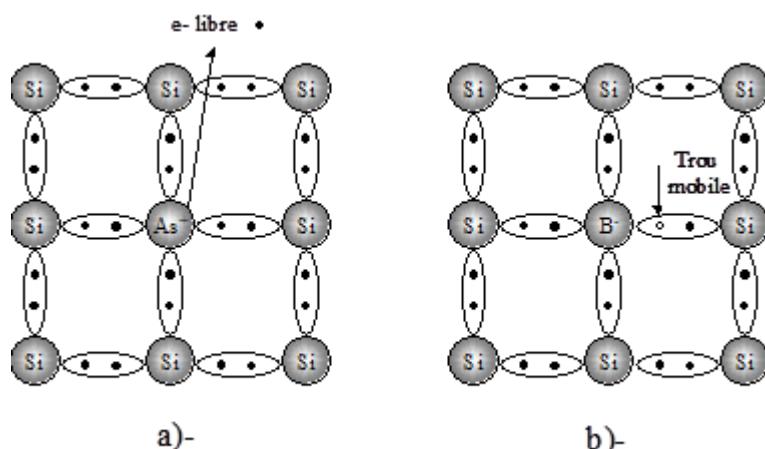


Figure 3.2 a)- Dopage des SC de groupe IV par un élément de la colonne V
 b)- Dopage des SC de groupe IV par un élément de la colonne III

3.2 .1 Semi-conducteur de type N.

Le semi-conducteur est globalement neutre : la somme des charges positives est égale à celle des charges négatives. En faisant le bilan des charges présentes, il n'y a que des électrons, des trous et des ions donneurs, l'équation de neutralité s'écrit :

$$\Sigma \text{ des charges positives} = \Sigma \text{ charges négatives}$$

$$p + N_d^+ = n$$

En supposant que tous les ions sont ionisés ie $N_d^+ = N_d$, nous obtenons : $p + N_d = n$

Sachant que : $n.p = n_i^2$

L'équation de neutralité devient :

$$N_d + \frac{n_i^2}{n} = n$$

D'où :

$$n^2 - N_d n - n_i^2 = 0$$

équation qui admet une solution du type :

$$n = \frac{N_d + \sqrt{N_d^2 + 4n_i^2}}{2}$$

Ainsi si $N_d \geq n_i$ alors $n = N_d$ et $p = \frac{n_i^2}{N_d}$

En conclusion, dans un semiconducteur de type n affirmé,

- les électrons sont majoritaires,
- la concentration en électrons est pratiquement égale à la concentration de dopant,
- les trous sont minoritaires.

3.2 .2 Semi-conducteur de type P.

Le semiconducteur est globalement neutre : la somme des charges positives est égale à celle des charges négatives. En faisant le bilan des charges présentes, il n'y a que des électrons, des trous et des ions accepteurs.

$$\Sigma \text{ des charges positives} = \Sigma \text{ charges négatives}$$

$$p = n + N_a^-$$

En supposant que tous les ions sont ionisés ie $N_a^- = N_d$, nous obtenons : $p = n + N_d$

Sachant que : $n.p = n_i^2$

L'équation de neutralité devient :

$$N_d + \frac{n_i^2}{p} = p$$

D'où :

$$p^2 - N_d p - n_i^2 = 0$$

équation qui admet une solution du type :

$$p = \frac{N_d + \sqrt{N_d^2 + 4n_i^2}}{2}$$

Ainsi si $N_d \geq n_i$ alors $p = N_d$ et $n = \frac{n_i^2}{N_d}$

En conclusion, dans un semiconducteur de type p affirmé,

- les trous sont majoritaires,
- la concentration en trous est pratiquement égale à la concentration de dopant,
- les électrons sont minoritaires.

3.2.3) Cas général

Dans le cas général, les deux types de dopants peuvent exister simultanément dans le matériau. C'est en fait ce qui se passe en pratique pour des raisons purement technologiques. Le semiconducteur est toujours globalement neutre. En faisant le bilan des charges présentes, il y a des électrons, des trous et des ions accepteurs et donneurs.

$$\sum \text{des charges positives} = \sum \text{charges négatives}$$

$$p + N_d^+ = n + N_a^-$$

Le semi-conducteur sera de type n ou de type p :

Type n si $N_d^+ \geq N_a^-$

$$n = \frac{(N_d - N_a) \sqrt{(N_d - N_a)^2 + 4n_i^2}}{2}$$

Type p si $N_a^- \geq N_d^+$

$$p = \frac{(N_a - N_d) \sqrt{(N_a - N_d)^2 + 4n_i^2}}{2}$$

3.2.4) Position du niveau de Fermi – Diagramme d'énergie

a) Cas d'un semiconducteur de type n.

Pour déterminer la position du niveau de Fermi à l'équilibre thermodynamique, il faut partir des relations suivantes :

$$n = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{kT}\right) \quad p = N_V \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{kT}\right)$$

Dans le cas d'un matériau de type n à température ambiante, $n \approx N_D$, ce qui donne par remplacement :

$$N_D = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{kT}\right)$$

d'où l'on déduit :

$$E_C - E_F = kT \ln \frac{N_C}{N_D}$$

En appelant E_i , la position du niveau de Fermi dans le cas où le matériau serait intrinsèque, nous aurions la relation suivante :

$$n_i = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_i}{kT}\right) \text{ et } E_C - E_i = kT \ln \frac{N_C}{n_i}$$

$$E_C - E_i + E_i - E_F = kT \ln \frac{N_C}{N_D} = kT \ln \frac{N_C}{n_i} + E_i - E_F$$

$$E_F - E_i = kT \ln \frac{N_D}{n_i}$$

Le niveau de Fermi se décale donc progressivement du milieu de la bande interdite vers la bande de conduction lorsque le dopage de type n augmente comme représenté figure suivante :

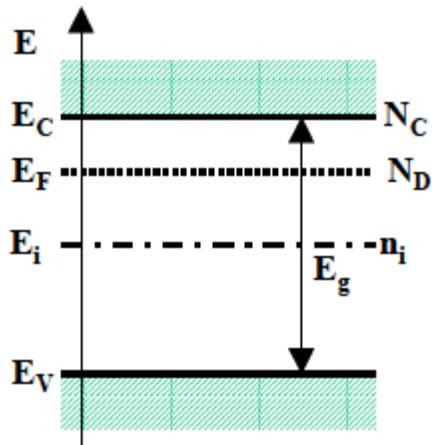


Figure 3.5 Position du niveau de Fermi et valeur correspondante des concentrations de dopants de type n à température ambiante. E_F est d'autant plus proche de la bande de conduction que le dopage est élevé.

b) Cas d'un semiconducteur de type p.

Dans le cas où le matériau est de type p de concentration de dopant accepteur, N_A , nous obtenons :

$$N_A = N_V \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{kT}\right)$$

D'où :

$$E_F - E_V = kT \ln \frac{N_V}{N_A}$$

Ainsi, dans le cas d'un semiconducteur dopé de type p, le niveau de Fermi se trouvera d'autant plus près du sommet de la bande de valence, que le matériau sera plus dopé.

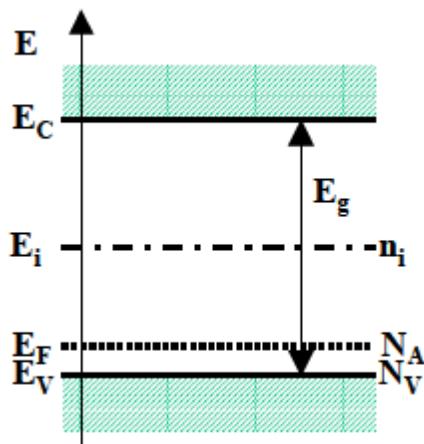


Figure 3.6 Position du niveau de Fermi et valeur correspondante de la concentration des dopants dans un semiconducteur de type p , à température ambiante. Au plus le dopage est fort, au plus le niveau de Fermi s'approche de la bande de valence.

PHEONOMENES DE TRANSPORT DANS LES SEMICONDUCTEURS

I Conductivité – Dérive dans un champ électrique

1°) Mobilité - Conductivité

De façon générale, lorsque l'on applique un champ électrique, on a tendance à déplacer les porteurs de charge, électrons et trous. En réalité, le mécanisme physique d'entraînement par un champ électrique se produit sur des **porteurs** qui se déplacent de façon aléatoire, dans **toutes les directions** de l'espace, dans le matériau, en raison de l'agitation thermique (aux températures normales de fonctionnement) et qui effectuent un **libre parcourt moyen sans choc**. Ce libre parcourt moyen est de l'ordre de grandeur de 200 Å, soit environ une centaine de distances atomiques. Au niveau du choc, un échange d'électrons peut se produire, comme dans le cas d'un relais. Le champ électrique va agir entre ces chocs. La vitesse thermique est très grande (10^7 cm.s^{-1} à 300K). Les porteurs ont ainsi une vitesse thermique moyenne, orientée dans toutes les directions de l'espace qui est légèrement modifiée en imposant une direction statistique préférentielle par la présence du champ électrique.

La figure 41 montre de façon très schématique ces phénomènes. Nous ne rentrerons pas dans les détails au niveau phénoménologique et microscopique et nous n'allons considérer dans la suite que l'aspect **moyenne statistique**.

Appliquons au semi-conducteur une ddp V, il apparaît dans le Semi-conducteur un champ potentiel :

$$\vec{E}(x) = -\frac{\vec{1}}{\vec{grad}V(x)}$$

Les électrons sont entraînés par le champ électrique en sens inverse et les trous dans le même sens que le champ électrique.

A l'échelle macroscopique , les électrons et les trous prennent des vitesses d'ensemble proportionnel au champ électrique .

$$v_n = \mu_n E, \quad \text{et} \quad v_p = \mu_p E$$

Où : v_n et v_p sont la vitesse des électrons et des trous respectivement.

μ_n et μ_p sont la mobilité des des électrons et des trous respectivement.

| Mobilité à T = 300°K | Electrons (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹) | Trous (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹) |
|----------------------|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Ge | 3900 | 1900 |
| Si | 1500 | 475 |
| GaAs | 8500 | 400 |

La mobilité dépend de la température , du champs électrique et du dopage.

Densité totale de courant de dérive dans un champ électrique.

L'application d'un champ électrique au semiconducteur induit la conduction des deux types de porteurs, simultanément. Les électrons se déplacent au niveau de la bande de conduction, les trous

(et donc les électrons liés) au niveau de la bande de valence La densité de courant totale est donc la somme des deux densités de courant :

$$\vec{j}_{dér} = \vec{j}_n + \vec{j}_p$$

D'où :

$$\vec{j}_{dér} = qn\mu_n \vec{E} + qp\mu_p \vec{E}$$

Et :

$$\vec{j}_{dér} = \left(qn\mu_n + qp\mu_p \right) \vec{E} = \sigma \vec{E}$$

Puisque :

$$\rho = \frac{1}{\sigma}$$

Alors on la résistivité du matériau est donnée par : $\rho = \frac{1}{q\mu_n n + q\mu_p p}$

Diffusion des porteurs

Si nous considérons des porteurs de charges, leur mouvement s'effectuera dans une direction qui à **tendance à uniformiser leur distribution spatiale** ; ce phénomène est équivalent à celui de l'équilibre de la pression d'un gaz dans un enceinte, par exemple. La loi de Fick traduit cette tendance.

Densités de courant de diffusion

En considérant macroscopiquement la diffusion des électrons et des trous, leur déplacement est équivalent à un courant. Nous pouvons ainsi exprimer les densités de courant des électrons et des trous en multipliant le flux des porteurs par la charge élémentaire, négative pour les électrons et positive pour les trous. Ce phénomène est décrit par la 2^{ième} loi de Fick.

a°) Diffusion des électrons :

La densité de courant s'exprime par :

$$j_n = + qD_n \frac{dn}{dx}$$

Où : D_n est le coefficient de diffusion des électrons. Ce coefficient est positif.

b°) Diffusion des trous :

La densité de courant s'exprime par :

$$j_p = - qD_p \frac{dp}{dx}$$

Où : D_p est le coefficient de diffusion des trous. Ce coefficient est positif.

Densités de courant totales dans un semiconducteur

Nous avons vu que dans un semiconducteur nous pouvions avoir des courants de dérive d'électrons et de trous et que la diffusion concernait aussi ces deux types de porteurs. Nous pouvons ainsi exprimer, dans un modèle unidimensionnel, la densité de courant totale d'électrons, la densité de courant totale de trous et la densité de courant totale (incluant les deux types de porteurs de charge).

$$j_n = + qD_n \frac{dn}{dx} + qn\mu_n.E$$

$$j_p = - qD_p \frac{dp}{dx} + qp\mu_p.E$$

$$j = j_n + j_p$$

Où j représente le courant total de dérive et de diffusion des électrons et des trous dans un semiconducteur.

