

# Semi-conducteur extrinsèque

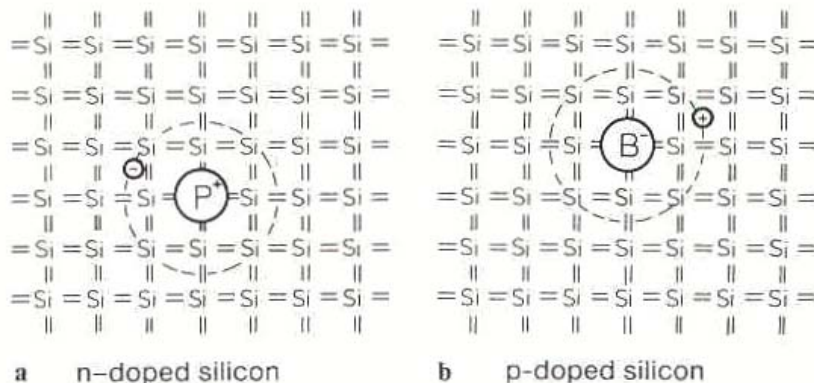
## Introduction

La concentration (n ou p) en porteurs libres (électrons de la bande de conduction, trous de la bande de valence) et donc la conductivité d'un semi-conducteur intrinsèque à température ambiante sont généralement trop faibles (cf. TD sur le semi-conducteur intrinsèque) pour atteindre les densités de courant utiles dans la plupart des dispositifs électroniques. L'une des propriétés remarquables des semi-conducteurs est que cette concentration (et donc la conductivité) peut être accrue de plusieurs ordres de grandeur par l'ajout délibéré d'impuretés en faible quantité lors de l'élaboration du matériau ou par des traitements particuliers : on parle alors de dopage du semi-conducteur et de semi-conducteur extrinsèque. De plus, suivant le type d'impuretés introduites, on peut choisir une conduction par trous ou par électrons. Cette propriété est la base de l'électronique à semi-conducteurs telle qu'elle s'est développée depuis 1950. Les impuretés électriquement actives peuvent accroître la concentration d'électrons libres ou celle de trous libres en donnant des électrons à la bande de conduction (donneurs, dopage n) ou en en acceptant de la bande de valence (accepteurs, dopage p).

Dans un cristal de silicium, une impureté donneuse sera par exemple un atome de la colonne V (P, As, Sb) remplaçant un atome du réseau silicium (figure 1a). L'atome de la colonne V a 5 électrons de valence : 4 d'entre eux sont engagés dans des liaisons covalentes, le cinquième est faiblement lié à l'impureté donneuse chargée positivement. Cette situation peut se modéliser par le modèle hydrogénoïde : on se ramène alors à traiter le problème d'un électron de masse  $m_e^*$  subissant l'attraction du donneur de charge  $+e$  dans un matériau de constante diélectrique  $\epsilon$ . Par analogie avec l'atome d'hydrogène, l'Hamiltonien correspondant s'écrit :

$$H_e = \frac{p^2}{2m_e^*} - \frac{e^2}{\epsilon r} \quad \text{où } r \text{ est la distance de l'électron au donneuse} \quad (1)$$

La résolution de l'équation de Schrödinger associée à  $H_e$  donne les niveaux d'énergie de liaison de l'électron par rapport à  $E_C$  (niveaux hydrogénoïdes), le fondamental étant noté  $E_D$  (figure 2). Comme l'électron est faiblement lié,  $E_C - E_D = E_d$  est généralement faible et l'électron, sous l'effet de la température notamment, pourra se dissocier de son impureté parente, passer en bande de conduction et se déplacer librement dans le cristal. Il y a alors un électron de conduction supplémentaire et le donneur est alors ionisé une fois positivement.

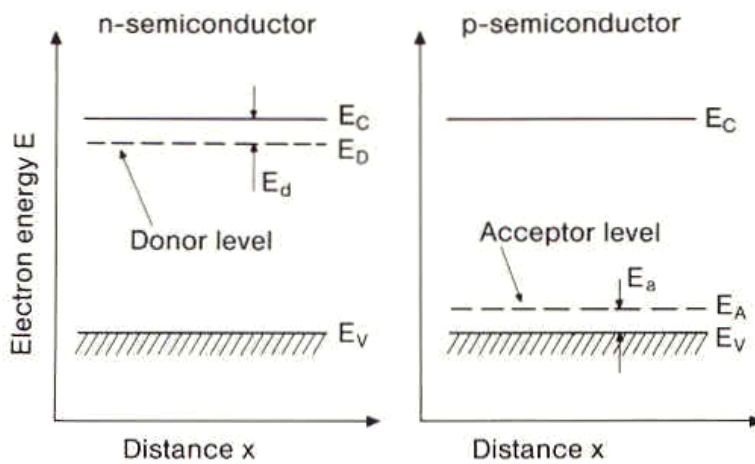


**Figure 1** : représentation schématique d'un donneur (a) et d'un accepteur (b) dans un cristal de silicium.

Si un atome de la colonne III (B, Al, Ga, In) remplace un atome de Si, il peut facilement accepter un électron de la bande de valence en créant simultanément un trou. Ce trou est alors faiblement lié à l'impureté de type accepteur de charge  $-e$  (figure 1b). La situation est symétrique de la précédente et peut à nouveau se modéliser par le modèle hydrogénoïde : on traite le problème d'un trou de masse effective  $m_h^*$  subissant l'attraction de l'accepteur de charge  $-e$  dans un milieu de constante diélectrique  $\epsilon$ . L'Hamiltonien correspondant s'écrit :

$$H_h = \frac{p^2}{2m_h^*} - \frac{e^2}{\epsilon r} \quad \text{où } r \text{ est la distance du trou à l'accepteur} \quad (2)$$

La résolution de l'équation de Schrödinger associée à  $H_h$  donne les niveaux d'énergie de liaison du trou par rapport à  $E_V$  (niveaux hydrogénoïdes), le fondamental étant noté  $E_A$  (figure 2). Comme le trou est faiblement lié,  $E_A - E_V = E_a$  est généralement faible et le trou, sous l'effet de la température notamment, pourra se dissocier de son impureté parente, passer en bande de valence et se déplacer librement dans le cristal. Il y a alors un trou de conduction supplémentaire et l'accepteur est alors ionisé une fois négativement.



**Figure 2 :** position qualitative du niveau fondamental des donneurs et des accepteurs par rapport aux extrema des bandes  $E_C$  et  $E_V$ .  $E_d$  et  $E_a$  sont les énergies d'ionisation des donneurs et des accepteurs respectivement.

## Questions

- 1) A partir des solutions de l'hamiltonien de l'atome d'hydrogène :
  - a) déduire les solutions des hamiltoniens  $H_e$  et  $H_h$ .
  - b) donner l'expression de  $E_a$  et  $E_d$  et des rayons de Bohr correspondants en fonction de  $m_e^*$ ,  $m_h^*$  et  $\epsilon$ .
  - c) faire l'application numérique pour les 2 semi-conducteurs suivants.

| Semi-conducteur | $m_e^*/m_0$ | $m_h^*/m_0$ | $\epsilon/\epsilon_0$ |
|-----------------|-------------|-------------|-----------------------|
| GaAs            | 0.067       | 0.47        | 13.1                  |
| InAs            | 0.026       | 0.41        | 14.6                  |

- 2) Les valeurs de  $E_a$  et  $E_d$  calculées au 1) sont de l'ordre de  $kT$  à 300K. On considère donc qu'à température ambiante, tous les dopants (accepteurs ou donneurs) sont ionisés. Dans ces conditions, à partir de l'équation d'électroneutralité :
  - a) calculer la position du niveau de Fermi  $E_F$  dans un semi-conducteur dopé n avec une concentration de donneurs  $N_D$
  - b) même question dans un semi-conducteur dopé p avec une concentration d'accepteurs  $N_A$ .

On rappelle que :  $n = N_c \exp\left(\frac{E_F - E_c}{kT}\right)$  et  $p = N_v \exp\left(\frac{E_v - E_F}{kT}\right)$

On calculera la position de  $E_F$  par rapport à  $E_C$  ou  $E_V$  puis par rapport à  $E_{Fi}$ , niveau de Fermi du semi-conducteur intrinsèque.

- 3) Application au cas du GaAs.
  - a) Représenter l'évolution de la position du niveau de Fermi 300K en fonction de  $N_A$  pour GaAs dopé p et  $N_D$  pour GaAs dopé n, sachant que  $N_C = 4.4 \cdot 10^{17}/\text{cm}^3$ ,  $N_V = 8.3 \cdot 10^{18}/\text{cm}^3$ ,  $n_i = 2.6 \cdot 10^6/\text{cm}^3$  et  $E_g = 1.42 \text{ eV}$ .
  - b) Dans les deux cas, quand et pourquoi le calcul est-il incorrect ?
  - c) Calculer la conductivité de GaAs dopé p à  $1 \cdot 10^{18}/\text{cm}^3$  et dopé n à  $1 \cdot 10^{17}/\text{cm}^3$ .
- 4) En fait, un semi-conducteur fortement dopé devient conducteur même à très basse température. Ceci s'explique par l'interaction entre électrons ou trous des impuretés dopantes. Cette interaction élargit les niveaux pour former une bande qui rejoint soit la bande de conduction, soit la bande de valence et donne au semi-conducteur des propriétés métalliques. On dit alors que le semi-conducteur est dégénéré.
  - a) Calculer la distance moyenne entre donneurs quand cela se produit dans GaAs. Quelle est la concentration de donneurs  $N_{D0}$  correspondante en assimilant chaque donneur à une sphère ?
  - b) Mêmes questions pour les accepteurs.

## Eléments de réponse

1a) Pour passer de l'Hamiltonien de l'atome H à celui des impuretés hydrogénoïdes, on remplace  $e^2$  par  $e^2/\epsilon$ ,  $m$  par  $m_e^*$  ou  $m_h^*$  et  $E$  par  $(E-E_C)$  ou  $(E_V-E)$ .

$$1b) \quad E_d = \frac{m_e^* e^4}{2\epsilon^2 \hbar^2} = E_H \cdot \frac{m_e^*}{m_0} \frac{1}{\epsilon^2} \quad \text{et} \quad E_a = \frac{m_h^* e^4}{2\epsilon^2 \hbar^2} = E_H \cdot \frac{m_h^*}{m_0} \frac{1}{\epsilon^2}$$

avec  $E_H = \frac{m_0 e^4}{2\hbar^2}$  : énergie de liaison de l'électron sur le niveau 1s de l'atome H

$$r_e = \frac{\hbar^2 \epsilon}{m_e^* e^2} = a_0 \frac{m_0}{m_e^*} \epsilon \quad \text{et} \quad r_h = \frac{\hbar^2 \epsilon}{m_h^* e^2} = a_0 \frac{m_0}{m_h^*} \epsilon$$

avec  $a_0 = \frac{\hbar^2}{m_0 e^2}$  : rayon de la première orbite de Bohr

1c)

| Semi-conducteur | $E_d$ (meV) | $E_a$ | $r_e$ (nm) | $r_h$ |
|-----------------|-------------|-------|------------|-------|
| GaAs            | 5.3         | 37    | 10.4       | 1.5   |
| InAs            | 1.7         | 26    | 29.8       | 1.9   |

2a)  $E_C - E_F = kT \ln(N_C/N_D)$  ou  $E_F - E_{Fi} = kT \ln(N_D/ni)$

2b)  $E_F - E_V = kT \ln(N_V/N_A)$  ou  $E_{Fi} - E_F = kT \ln(N_A/ni)$

3a)

| $N_A$    | $E_F - E_V$ | $N_D$    | $E_F - E_V$ |
|----------|-------------|----------|-------------|
| 1.00E+08 | 6.51E-01    | 1.00E+08 | 8.45E-01    |
| 1.00E+10 | 5.32E-01    | 1.00E+10 | 9.64E-01    |
| 1.00E+12 | 4.13E-01    | 1.00E+12 | 1.08E+00    |
| 1.00E+13 | 3.53E-01    | 1.00E+13 | 1.14E+00    |
| 1.00E+14 | 2.93E-01    | 1.00E+14 | 1.20E+00    |
| 1.00E+15 | 2.34E-01    | 1.00E+15 | 1.26E+00    |
| 1.00E+16 | 1.74E-01    | 1.00E+16 | 1.32E+00    |
| 1.00E+17 | 1.14E-01    | 1.00E+17 | 1.38E+00    |
| 1.00E+18 | 5.48E-02    | 1.00E+18 | 1.44E+00    |
| 1.00E+19 | -4.83E-03   | 1.00E+19 | 1.50E+00    |

3b) Résultat incorrect quand on  $E_C - E_F$  ou  $E_F - E_V$  est de l'ordre de  $kT$  car l'hypothèse  $E_F - E$  supérieur à quelques  $kT$  utilisée dans l'expression de  $n$  et  $p$  n'est plus valable. Dans la fonction de Fermi, on ne peut donc plus considérer que le terme  $\exp(E - E_F)/kT$  est grand devant 1 dans le calcul de  $n$ .

3c) GaAs dopé p à  $1 \cdot 10^{18}/\text{cm}^3$  :  $\sigma = 64 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$  ; GaAs dopé n à  $1 \cdot 10^{17}/\text{cm}^3$  :  $\sigma = 136 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$

4a)  $d = 2r_e$  pour les donneurs et  $N_{D0} = 2.4 \cdot 10^{17}/\text{cm}^3$ .

4b)  $d = 2r_h$  pour les accepteurs et  $N_{A0} = 7 \cdot 10^{19}/\text{cm}^3$ .