

Série No. 13

20 Mai 2025

But de cette série : comprendre l'effet du dopage dans les semiconducteurs

1. Impuretés et dopage

- (a) Expliquer ce que l'on entend par dopage dans un semi-conducteur, et décrire les propriétés des différents types d'impuretés.
- (b) A l'aide de la portion de tableau périodique montré ci-contre, établir si les impuretés suivantes sont donneurs, accepteurs, ou de type neutre dans les semiconducteurs avec structure type diamant considérés :
 - (i) P qui remplace Si dans Si ;
 - (ii) Ge qui remplace Ga dans GaAs ;
 - (iii) Al qui remplace P dans GaP ;
 - (iv) Si qui remplace C dans SiC.

5 B Boron 1s ² 2s ² 2p ¹	6 C Carbon 1s ² 2s ² 2p ²	7 N Nitrogen 1s ² 2s ² 2p ³
13 Al Aluminum [Ne]3s ² 3p ¹	14 Si Silicon [Ne]3s ² 3p ²	15 P Phosphorus [Ne]3s ² 3p ³
31 Ga Gallium [Ar]3d ¹⁰ 4s ² 4p ¹	32 Ge Germanium [Ar]3d ¹⁰ 4s ² 4p ²	33 As Arsenic [Ar]3d ¹⁰ 4s ² 4p ³

2. Conductivité électrique intrinsèque et extrinsèque : impuretés résiduelles

On considère des cristaux des semiconducteurs suivants : Ge, Si, InAs, GaAs. On admet qu'il ne soit pas possible de réduire la concentration relative des atomes d'impuretés en dessous de 10^{-10} pour les cristaux composés d'un seul élément et de 10^{-8} pour les composés binaires.

En utilisant la loi d'action de masse, préciser la nature intrinsèque ou extrinsèque des porteurs de charge et donc de la conductivité électrique σ des semiconducteurs considérés à température ambiante. Calculer la valeur de la conductibilité σ pour les quatre systèmes.

Hypothèses, simplifications et indications :

utiliser les données du Tableau 7.1 pour les valeurs de E_g et du Tableau 7.5 pour les mobilités ; la masse effective des électrons et des trous est prise égale à la masse des électrons libres ; densités maximales de porteurs de charge : $N = P = 2.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$; densité atomique typique : $5 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$; toutes les impuretés résiduelles sont des donneurs et sont toutes ionisées.

3. Jonction $p - n$ - Modèle de Schottky

En partant des expressions vues en cours au paragraphe 7.6.2 (Eqs. 7.60, 7.63, 7.64)

- (a) montrer que $e\Delta\phi = E_g + k_B T \ln \frac{N_d N_a}{N P}$;
- (b) trouver les expressions pour d_n et d_p (Eq. 7.65 du polycopié).

4. GaAs intrinsèque et dopé : calcul de la position du potentiel chimique

Cet exercice permet de se convaincre, par des applications numériques, du comportement du potentiel chimique en fonction du dopage.

À 300 K, l'arséniure de gallium (GaAs) a un gap de 1.43 eV, une masse effective des électrons $m_c = 0.065 m$ et des trous $m_v = 0.45 m$, avec m la masse de l'électron libre.

- (a) Calculer la position du potentiel chimique et la densité de porteurs intrinsèques n_i .

Le rapport $\frac{\Delta n}{n_i} = \frac{n - p}{n_i}$, avec n_i la densité de porteurs intrinsèques, donne une mesure de l'importance des impuretés en tant que source de porteurs de charge. On peut exprimer $\frac{\Delta n}{n_i}$ comme (Eq. 7.25 du polycopié) :

$$\frac{\Delta n}{n_i} = 2 \sinh [\beta (\mu - \mu_i)].$$

A l'aide de cette expression, répondre aux questions suivantes.

- (b) Après avoir ajouté 2×10^{15} donneurs/cm³, qui sont tous ionisés, où se trouve le potentiel chimique ?

Indications :

$$\text{arcsinh}(x) = \ln(x + \sqrt{x^2 + 1})$$

$$\text{arcsinh}(-x) = -\text{arcsinh}(x)$$

- (c) Si, en plus des 2×10^{15} donneurs/cm³, on ajoute 1×10^{16} accepteurs/cm³ aussi tous ionisés, où se trouve le potentiel chimique à la fin ?

5. Chapitre 7 - Questions de compréhension

- (a) On modélise les impuretés (donneurs et accepteurs) à l'aide du modèle de l'atome d'hydrogène. Quelles sont les corrections que l'on doit apporter aux expressions de l'énergie de liaison et du rayon ?
- (b) Esquisser la courbe caractéristique j vs V d'une jonction $p - n$. Préciser quels sont les porteurs de charge qui contribuent au courant dans les différents régimes.

1. Impuretés et dopage

- (a) L'ajout d'impuretés à un semiconducteur pur donne lieu au dopage du semiconducteur. Afin de doper efficacement le semiconducteur, l'impureté doit avoir un nombre d'électrons de valence différent de celui du semiconducteur pur. Si la valence de l'impureté est supérieure à celle du semiconducteur, nous sommes en présence d'un donneur (l'impureté "donne" un électron au semi-conducteur), tandis que si la valence est inférieure, nous sommes en présence d'un accepteur (l'impureté "prend" un électron au semiconducteur, autrement dit, lui "donne" un trou). Dans le cas où l'impureté a la même valence que le semiconducteur, le dopage est neutre, c'est-à-dire qu'il n'affecte pas les propriétés électroniques du semiconducteur.
- (b) Pour les combinaisons proposées :
- (i) P (pentavalent) est un donneur lorsqu'il remplace Si (tetravalent) dans le Si;
 - (ii) Ge (tetravalent) est un donneur lorsqu'il remplace Ga (trivalent) dans GaAs;
 - (iii) Al (trivalent) est un accepteur lorsqu'il remplace P (pentavalent) dans GaP;
 - (iv) Si (tetravalent) est une impureté neutre lorsqu'il remplace C (tetravalent) dans SiC.

2. Conductivité électrique intrinsèque et extrinsèque : impuretés résiduelles

Pour savoir si à température ambiante les semiconducteurs considérés ont une conductivité électrique intrinsèque ou extrinsèque, il faut comparer la densité des électrons excités thermiquement (soit n_i) déduite de la loi d'action de masse à la densité des impuretés résiduelles (supposées toutes ionisées). De la loi d'action de masse on a déduit l'Eq. 7.19 du polycopié : $n_i(T) = (NP)^{1/2} \exp\left(-\frac{E_g}{2k_B T}\right)$.

Avec cette équation, obtient les valeurs de n_i (avec $k_B T \approx 25$ meV à température ambiante). Voir tableau ci-dessous.

On en déduit que, dans ces hypothèses, à température ambiante Ge et surtout InAs ont une conductibilité intrinsèque, alors que Si et GaAs sont extrinsèques.

Relation entre σ et mobilité ν : $\sigma = ne\nu_e + pe\nu_h$.

Cas intrinsèque : $\sigma = n_i e(\nu_e + \nu_h)$.

Cas extrinsèque (en faisant l'hypothèse que toutes les impuretés sont des donneurs, $N_{imp} = N_d$, tous ionisés) : $\sigma = N_d e\nu_e$.

En utilisant les données pour la mobilité des porteurs de charge on obtient les valeurs de σ reportées dans le tableau.

	n_i (cm $^{-3}$)	N_{imp} (cm $^{-3}$)	i/e	σ (Ω^{-1} cm $^{-1}$)
Ge	$4.6 \cdot 10^{13}$	>	i	0.04
Si	$5.7 \cdot 10^9$	\ll	e	0.001
InAs	$1.9 \cdot 10^{16}$	\gg	i	92
GaAs	$9.5 \cdot 10^6$	\ll	e	0.66

3. Jonction $p - n$ - Modèle de Schottky

$$\begin{aligned} n(\infty) &\cong N_d = N(T) \exp[-\beta(E_c - e\phi(\infty) - \mu)] \\ p(-\infty) &\cong N_a = P(T) \exp[-\beta(\mu - E_v + e\phi(-\infty))] \end{aligned} \quad (1)$$

$$N_d \cdot d_n = N_a \cdot d_p \quad (2)$$

$$\left(\frac{e}{2\varepsilon_0\varepsilon_r}\right)(N_d d_n^2 + N_a d_p^2) = \phi(\infty) - \phi(-\infty) = \Delta\phi \quad (3)$$

(a) En multipliant entre elles les relations (1) pour $n(\infty)$ et $p(-\infty)$, on obtient :

$$N_d N_a = N(T) P(T) \exp[-\beta(E_c - E_v - e\phi(\infty) + e\phi(-\infty))]$$

$$N_d N_a = N(T) P(T) \exp[-\beta(E_g - e\Delta\phi)]$$

$$\begin{aligned} \ln \frac{N_d N_a}{NP} &= \beta(e\Delta\phi - E_g) \\ e\Delta\phi &= E_g + k_B T \ln \frac{N_d N_a}{NP} \end{aligned}$$

(b) En utilisant la relation (2) entre N_d et N_a dans l'expression (3) :

$$\begin{aligned} N_a \left(\frac{N_d}{N_a} d_n\right)^2 + N_d d_n^2 &= \frac{2\varepsilon_0\varepsilon_r \Delta\phi}{e} \\ N_d \left(\frac{N_d + N_a}{N_a}\right) d_n^2 &= \frac{2\varepsilon_0\varepsilon_r \Delta\phi}{e} \end{aligned}$$

$$d_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_r \Delta\phi}{e}} \sqrt{\frac{N_a/N_d}{N_d + N_a}}$$

et de façon équivalente :

$$d_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_r \Delta\phi}{e}} \sqrt{\frac{N_a/N_d}{N_d + N_a}}$$

4. GaAs intrinsèque et dopé : calcul de la position du potentiel chimique

(a) Le potentiel chimique est donné par

$$\begin{aligned} \mu_i \text{ (eV)} &= E_v + \frac{1}{2}E_g + \frac{3}{4}k_B T \ln \left(\frac{m_v}{m_c}\right) = \\ &= 0 + \frac{1.43}{2} + \frac{3}{4} \times 8.617 \times 10^{-5} \times 300 \times \ln \left(\frac{0.45}{0.065}\right) = 0.7525 \text{ eV} \end{aligned}$$

où nous avons posé $E_v = 0$. (En effet, ce qui nous intéresse est la position du potentiel chimique dans la bande interdite.) Le potentiel chimique est tout proche du milieu du gap, juste 0.0375 eV au dessus du milieu du gap. Ce décalage est dû au fait que $m_v > m_c$.

La concentration d'électrons dans la bande de conduction et de trous dans la bande de valence pour le semiconducteur intrinsèque est :

$$\begin{aligned} n_i(T) = p_i(T) &= (NP)^{1/2} \exp\left(-\frac{E_g}{2k_B T}\right) = 2 \left(\frac{k_B T}{2\pi\hbar^2}\right)^{3/2} (m_c m_v)^{3/4} \exp\left(-\frac{E_g}{2k_B T}\right) = \\ &= 2 \left(\frac{1.38 \times 10^{-23} \times 300}{2\pi \times 1.11 \times 10^{-68}}\right)^{3/2} (0.065 \times 0.45)^{3/4} (9.1 \times 10^{-31})^{3/2} e^{-1.43/(2 \times 8.6 \times 10^{-5} \times 300)} \\ &= 1.73 \times 10^{12} \text{ m}^{-3} = 1.73 \times 10^6 \text{ cm}^{-3} \end{aligned}$$

Le GaAs a une concentration de porteurs intrinsèques plutôt faible.

- (b) Lorsque on dope le semiconducteur, on a une différence entre densité de porteurs de charge dans la bande de conduction et dans la bande de valence : $\Delta n = n - p$. Si on fait l'hypothèse que les impuretés sont toutes ionisées, alors $\Delta n = n - p = N_d - N_a$.

Ici on ajoute d'abord des donneurs ($N_d = 2 \times 10^{15}$ donneurs/cm³), qui sont tous ionisés, ce qui implique que (puisque $N_a=0$) :

$$\frac{\Delta n}{n_i} = \frac{N_d}{n_i} = 2 \sinh[\beta(\mu - \mu_i)]$$

En tenant compte du fait que $\text{arcsinh}(x) = \ln(x + \sqrt{x^2 + 1})$ et que, x étant très grand, $\ln(x + \sqrt{x^2 + 1}) \approx \ln(2x)$:

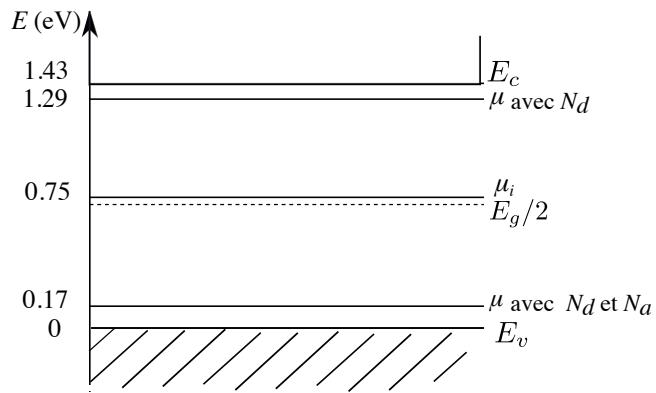
$$\begin{aligned} \mu \text{ (eV)} &= \mu_i + k_B T \text{arcsinh}\left[\frac{N_d}{2n_i}\right] \approx \mu_i + k_B T \ln\left[\frac{2N_d}{2n_i}\right] = \\ &= 0.7523 + 8.617 \times 10^{-5} \times 300 \times \ln\left(\frac{2 \times 10^{15}}{1.73 \times 10^6}\right) = 0.7523 + 0.537 = 1.289 \text{ eV} \end{aligned}$$

C'est à dire que le potentiel chimique est 0.14 eV au dessous du minimum de la bande de conduction.

- (c) On rajoute les accepteurs ($N_a = 1 \times 10^{16}$ cm⁻³). On change directement le signe dans l'argument du sinh pour avoir la différence $\Delta n > 0$ en prévision du passage au ln :

$$\begin{aligned} \frac{N_a - N_d}{n_i} &= 2 \sinh[\beta(\mu_i - \mu)] \\ \mu \text{ (eV)} &= \mu_i - k_B T \text{arcsinh}\left[\frac{N_a - N_d}{2n_i}\right] \approx \mu_i - k_B T \ln\left[\frac{N_a - N_d}{n_i}\right] = \\ &= 0.7523 - 8.617 \times 10^{-5} \times 300 \times \ln\left(\frac{10^{16} - 2 \times 10^{15}}{1.73 \times 10^6}\right) = 0.7523 - 0.58 = 0.1723 \text{ eV} \end{aligned}$$

Donc le potentiel chimique est 0.17 eV au dessus du maximum de la bande de valence.



5. Chapitre 7 - Questions de compréhension

- (a) On tient compte de la masse effective m^* et de la constante diélectrique ε_r du semiconducteur.

Le rayon de Bohr devient $r_0 = 4\pi\varepsilon_0 \frac{\hbar^2}{m^* e^2 / \varepsilon_r} = \frac{\varepsilon_r}{m^*/m} a_0$

L'énergie de liaison

$$E = \frac{1}{2} \frac{e^2 / \varepsilon_r}{4\pi\varepsilon_0 r_0} = \frac{m^*/m}{\varepsilon_r^2} E_H$$

où E_H est l'énergie de liaison de l'électron dans l'atome d'hydrogène dans son état fondamental.

- (b) En polarisation directe, le courant est dû aux porteurs majoritaires (électrons qui proviennent de la région n et trous qui proviennent de la région p). En polarisation inverse le courant est dû aux porteurs minoritaires. Le courant des porteurs majoritaires est appelé de diffusion (parce que lié à la concentration), et aussi de recombinaison (parce que les porteur majoritaires subissent rapidement des recombinaisons lorsque ils arrivent du côté où ils sont minoritaires). Le courant des porteurs minoritaires est indiqué j^E parce qu'il est favori par le champ électrique existant à la jonction, ou aussi de génération, parce que les porteurs minoritaires sont générés thermiquement. Dans une courbe caractéristique $I-V$, parfois le courant présent en polarisation inverse est appelé courant de fuite ou courant de saturation inverse.

