

On peut assimiler les déplacements de ces électrons à un déplacement de trous de charges positives $+e$ en sens inverse (figure 1-d).

Ces électrons et ces trous sont appelés **porteurs libres**.

On désigne par :

- n_i la concentration en porteurs négatifs (les électrons),
- p_i la concentration en porteurs positifs (les trous).

Pour les semi-conducteurs intrinsèques, on a bien $n_i = p_i$

A 27 °C on a : • pour le silicium : $n_i = p_i = 1,5 \cdot 10^{16} \text{ m}^{-3}$
 • pour le germanium : $n_i = p_i = 2,5 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$

Lorsqu'on applique un champ électrique à l'intérieur du semi-conducteur, les porteurs libres prennent un mouvement d'ensemble:

- les trous dans le sens du champ
- les électrons en sens opposé du champ.

Ce double déplacement constitue le courant électrique.

La conductivité du semi-conducteur est : $\sigma = \sigma_n + \sigma_p$

Avec $\sigma_n = e n_i \mu_n$ conductivité due aux électrons

$\sigma_p = e p_i \mu_p$ conductivité due aux trous.

μ_n et μ_p désignent les mobilités des électrons et des trous respectivement.

La résistivité a pour expression: $\rho = \frac{1}{e(n_i \mu_n + p_i \mu_p)} = \frac{1}{e n_i (\mu_n + \mu_p)}$

Exemple: Dans le cas du silicium à $T=300K$ on a:

$$n_i = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}, \mu_n = 1350 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}, \mu_p = 480 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$$

$$\sigma = 4,4 \cdot 10^{-6} (\Omega \text{ cm})^{-1} \text{ et } \rho = 2,3 \cdot 10^5 \Omega \text{ cm}$$

Remarque:

- 1) On montre (statistique de Fermi-Dirac appliquées aux électrons et aux trous) que n_i augmente très rapidement avec la température.
- 2) Une paire électron-trou peut disparaître par un processus inverse dit **recombinaison**: l'électron retombe sur la place vacante que constitue le trou qui disparaît ainsi.

2. Semi-conducteurs extrinsèques

L'introduction en quantité très faible de certaines **impuretés** (appelées aussi **dopants**) dans un semi-conducteur intrinsèque peut augmenter considérablement le nombre de porteurs libres (électrons ou trous) réduisant ainsi la résistivité du matériau du départ. Le cristal ainsi dopé est dit **semi-conducteur extrinsèque**. Les impuretés utilisées sont de valence trois ou cinq et conduisent à deux types de semi-conducteurs:

- semi-conducteurs de **type N** (impuretés de la cinquième colonne),
- semi-conducteurs de **type P** (impuretés de la troisième colonne).

Les principaux dopant utilisés sont regroupés dans le tableau suivant:

Dopant trivalent Eléments de la colonne III	Semi-conducteur	Dopant pentavalent Eléments de la colonne V
Bore (B) Aluminium (Al) Gallium (Ga) Indium (In)	Carbone diamant (C) Silicium (Si) Germanium (Ge)	Azote (N) Phosphore (P) Arsenic (As) Antimoine (Sb)

2.1 Semi-conducteur extrinsèque de type N

Considérons par exemple le silicium intrinsèque. Chaque atome a une couche externe avec quatre électrons qu'il met en commun avec quatre atomes voisins pour constituer une couche de valence saturée. Introduisons dans le réseau cristallin du silicium des impuretés d'arsenic dont les atomes ont une couche externe comprenant cinq électrons. Les atomes d'impureté vont établir des liaisons covalentes avec les atomes de silicium, mais le cinquième électron non engagé dans une liaison covalente sera faiblement lié à l'atome d'arsenic (énergie de l'ordre de 10 meV). La seule agitation thermique permettra la libération de cet électron qui va devenir libre de se déplacer dans le réseau cristallin du silicium (figure 2)

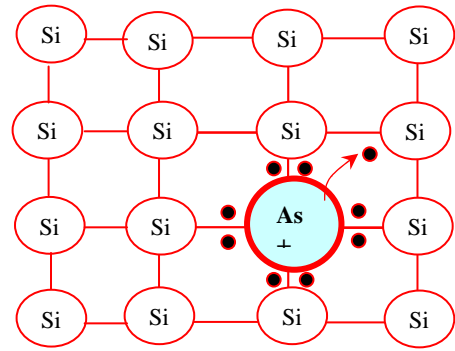


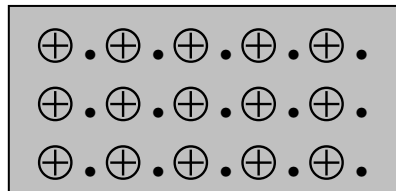
Figure 2

L'électron ainsi libéré laissera derrière lui une charge positive fixe dans le réseau correspondant à l'atome d'arsenic ionisé.

Dans la suite, le semi-conducteur sera représenté par le schéma suivant (figure 3)

Semi-conducteur type N

Figure 3



⊕ : Ion positif fixe dans le réseau
• : électron libre majoritaire

On dit que l'on a introduit dans le silicium des **centres donneurs** et que le semi-conducteur est de **type N**. La conduction est dite de type N car elle se fait grâce à un déplacement de charges **négligables**.

Exemple:

Pour le silicium on a $5 \cdot 10^{22}$ atomes/cm³. On le dope en introduisant 10^{15} atomes d'arsenic par cm³.

La densité intrinsèque est de l'ordre de $n_i = 1,5 \cdot 10^{10}$ électron/cm³.

Le nombre d'électrons libres n_e est égal au nombre d'atome d'arsenic noté N_D plus (+) la densité intrinsèque n_i :

$$n_e = n_i + N_D \approx N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

On obtient les résultats suivants:

Silicium intrinsèque	Silicium extrinsèque dopé à l'arsenic
$\sigma_i = 4,4 \cdot 10^{-6} (\Omega \text{ cm})^{-1}$	$\sigma_n = en_e \mu_n \approx eN_D \mu_n = 0,22 (\Omega \text{ cm})^{-1}$
$\rho_i = 2,3 \cdot 10^5 \Omega \text{ cm}$	$\rho_n = 4,6 \Omega \text{ cm}$

On notera que σ_n (du Si extrinsèque) est plus de 10^5 fois supérieure à la conductivité σ_i du Si pure (intrinsèque).

La concentration des électrons libres provenant des atomes donneurs est très importante devant celle des porteurs intrinsèques (dans ce cas les trous).

On dit que les électrons sont **porteurs majoritaires**, les trous **porteurs minoritaires**.

2.2. Semi-conducteurs de type P

On ajoute cette fois une impureté trivalente de la troisième colonne du tableau périodique (exemple: bore, aluminium, gallium, indium). Ces éléments se substituent à un atome de silicium

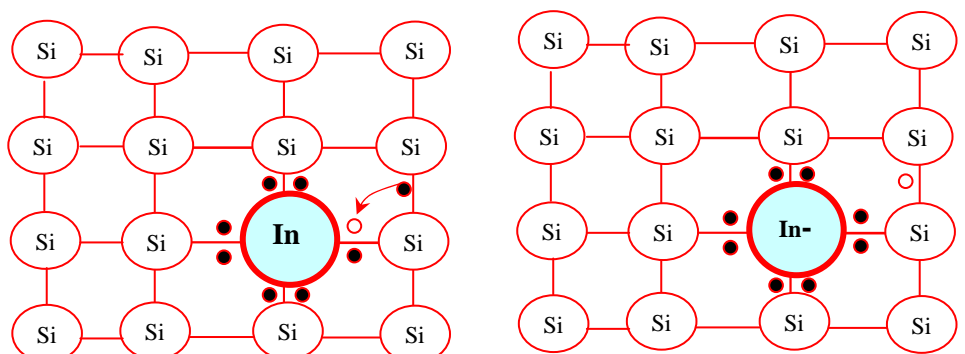


Figure 4

et n'assurent que trois liaisons covalentes avec les atomes du silicium voisins. On obtient ainsi dans l'ensemble du cristal un trou (déficit en charge négative) par impureté. Une faible énergie sera suffisante (de l'ordre de 10 meV) pour qu'un électron d'une liaison voisine puisse compenser ce trou avec apparition d'un nouveau trou etc ... (figure 4)

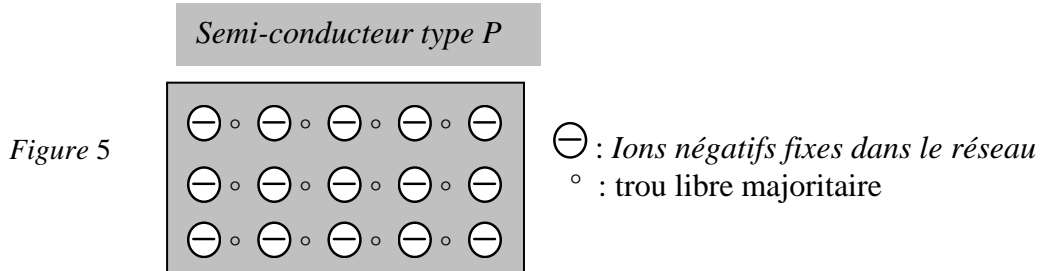
Pour des températures avoisinant l'ambiante, l'agitation thermique (à $T=300K$, $E_{agit.therm.}=3/2 kT=40 meV$) permettra la libération d'un trou par atome d'impureté, d'où une augmentation notable de la concentration en porteurs positifs libres par rapport au semi-conducteur intrinsèque.

De ce fait, les impuretés introduites sont appelées **atomes accepteurs** pour avoir capter un électron. Ils deviennent des ions négatifs qui restent fixes dans le réseau cristallin.

Les trous sont dit porteurs majoritaires et les électrons porteurs minoritaires.

Le semi-conducteur dopé ainsi que la conduction sont dits de **type P** car la conduction se fait grâce au déplacement de charges **positives**.

Le semi-conducteur de type P est schématisé par la figure suivante.



Désignons par N_A la concentration en atomes accepteurs. Le nombre de trous libres p_e est égal au nombre d'atomes accepteurs N_A plus (+) la densité intrinsèque $n_i (=p_i)$:

$$P_e = N_A + n_i \approx N_A \text{ car } N_A \gg n_i .$$

La résistivité du semi-conducteur de type P est $\rho_p = \frac{1}{\sigma_p} = \frac{1}{e\mu_p N_A}$.

Il faut noter comme remarque que les semi-conducteurs de type N et de type P sont globalement neutres.

Illustration: cas du silicium de type P et N à $T=300K$

	$n_e (cm^{-3})$	$p_e (cm^{-3})$	$\mu_n (cm^2V^{-1}s^{-1})$	$\mu_p (cm^2V^{-1}s^{-1})$	$\sigma (\Omega cm)^{-1}$	$\rho (\Omega cm)$
intrinsèque	$1,5 \cdot 10^{10}$	$1,5 \cdot 10^{10}$	1350	480	$4,4 \cdot 10^{-6}$	$2,3 \cdot 10^5$
type N	$4,6 \cdot 10^{15}$	$5 \cdot 10^4$	" " "	" " "	1	1
	$n_e \gg p_e$ électrons majoritaires					
type P	$1,7 \cdot 10^4$	$1,3 \cdot 10^{16}$	" " "	" " "	1	1
	$p_e \gg n_e$ trous majoritaires					