

*Département d'Electronique*

**L2 ELN**

**UED : Physique des semi-conducteurs**

***ANNÉE 2019-2020***



# **Physique des Semi-conducteurs**

## SOMMAIRE

### **1. Rappels sur les semi-conducteurs**

- 1.1 Définitions
- 1.2 Structure de bandes
- 1.3 Informations sur le Silicium
- 1.4 Pourquoi les matériaux III-V pour les diodes laser ?

## 1. Introduction

### 1. Rappels sur les semi-conducteurs

#### 1.1 Définitions

Semi-conducteur : matériau dont les propriétés de conduction peuvent être contrôlées par l'introduction de dopants. Bien que cette propriété concerne toutes les structures de semi-conducteurs (amorphe, poly cristalline, et cristalline, voir figure 2.1), les matériaux monocristallins fournissent les propriétés les plus reproductibles et les meilleures performances. Ils sont principalement utilisés dans l'industrie de la microélectronique.

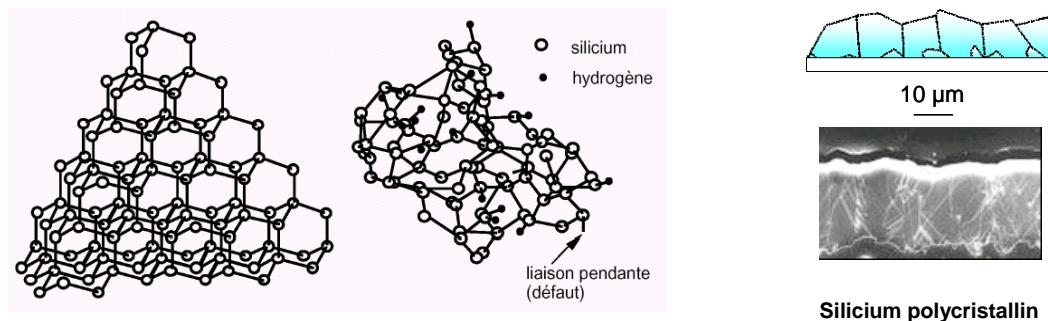


Figure 2.1 : Structures cristalline, amorphe et polycristalline

Dopants : ce sont des atomes qui possèdent un électron en plus (donneurs) ou un électron en moins (accepteurs) que les atomes du substrat dans lequel ils sont injectés.

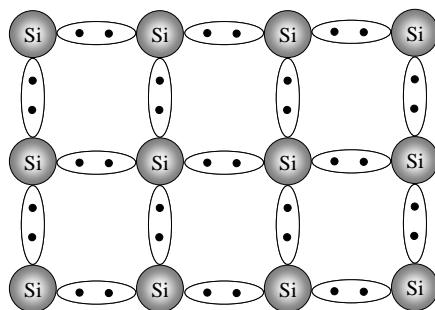


Figure 2.2 : Représentation des atomes de silicium liés les uns aux autres

Un atome de silicium a quatre électrons sur sa couche externe (électrons de valence). Il peut donc s'attacher par des liaisons covalentes à quatre atomes voisins (figure 2.2). Le même type d'arrangement peut être obtenu en combinant les atomes de la colonne III avec ceux de la colonne V = matériaux III-V tels que GaAs et InP (ou encore en combinant les atomes de la colonne II avec ceux de la colonne VI = matériaux II-VI).

Au delà de 0 K, l'énergie thermique peut briser quelques unes des liaisons Si-Si et ainsi permettre la création d'une paire électron-trou (figure 2.3). Les concentrations d'électrons et de trous sont exactement les mêmes dans un semi-conducteur intrinsèque.

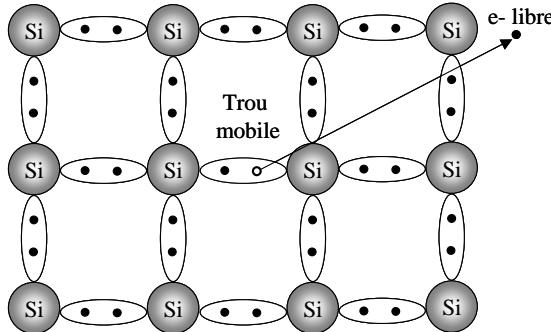


Figure 2.3 : Création d'une paire électron-trou

Si on dope le silicium par des atomes de la colonne V tels que As (figure 2.4.a), ils prennent la place des atomes de Si de la maille cristalline et fournissent chacun un électron supplémentaire (dopage de type N).

Si on dope le silicium par des atomes de la colonne III tels que B (figure 2.4.b), ils prennent la place des atomes de Si de la maille cristalline et présentent chacun un trou supplémentaire (dopage de type P).

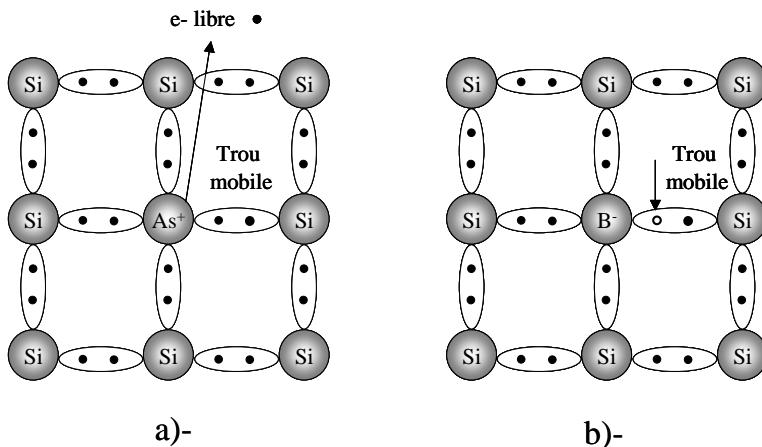


Figure 2.4 : a)- Dopage des SC de groupe IV par un élément de la colonne V  
b)- Dopage des SC de groupe IV par un élément de la colonne III

En technologie moderne de circuits intégrés, on utilise la méthode d'implantation ionique pour doper les substrats. La conductivité du SC peut donc être contrôlée par le dopage. On trouve différents types de plaquettes avec différents niveaux de dopage. Par convention, ces différents niveaux de dopage sont notés  $P^+$ ,  $N^{++}$ ,  $N^-$ ... selon les concentrations données ci-dessous.

$N^{--}$ ou $P^{--}$ :	$N_D$ ou $N_A < 10^{14} \text{ cm}^{-3}$
$N^-$ ou $P^-$ :	$10^{14} \text{ cm}^{-3} < N_D$ ou $N_A < 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
$N$ ou $P$ :	$10^{16} \text{ cm}^{-3} < N_D$ ou $N_A < 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
$N^+$ ou $P^+$ :	$10^{18} \text{ cm}^{-3} < N_D$ ou $N_A < 10^{20} \text{ cm}^{-3}$
$N^{++}$ ou $P^{++}$ :	$N_D$ ou $N_A > 10^{20} \text{ cm}^{-3}$

Comme la densité du silicium monocristallin est de  $5 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ , les niveaux de dopage les plus importants  $N^{++}$  ou  $P^{++}$  donnent des concentrations de porteurs de moins de 1%.

La résistivité des wafers est inversement proportionnelle à la concentration des porteurs (figure 2.5). Elle suit la relation suivante :

$$\rho = \frac{1}{q\mu_n n + q\mu_p p} \quad (2.1)$$

$n$  et  $p$  sont les densités de porteurs.  $\mu_n$  et  $\mu_p$  sont les mobilités respectives des électrons et des trous. La mobilité des porteurs dépend de la température, du dopage et du champ électrique. A température ambiante,  $\mu_n \approx 1500 \text{ cm}^2.\text{V}^{-1}.\text{s}^{-1}$  et  $\mu_p \approx 500 \text{ cm}^2.\text{V}^{-1}.\text{s}^{-1}$ .

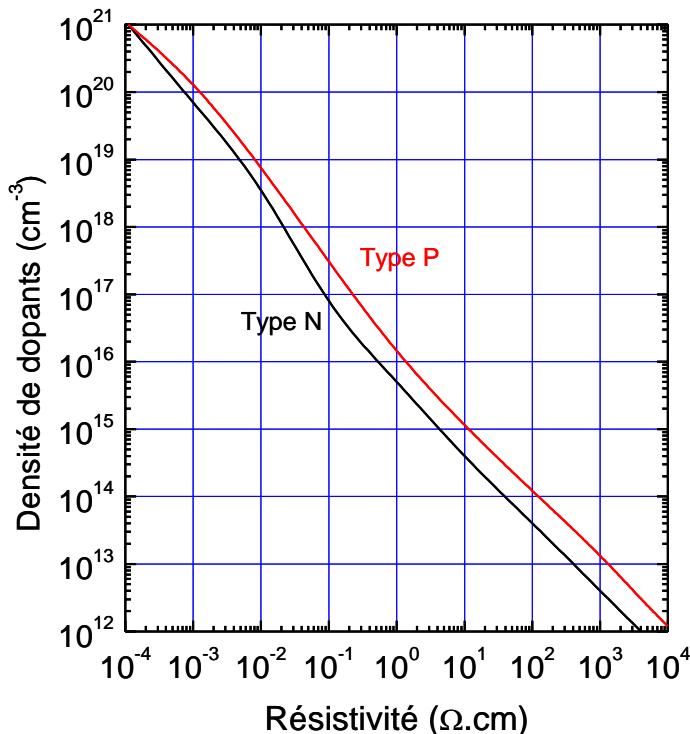


Figure 2.5 : Densité de dopants en fonction de la résistivité

La résistivité des plaquettes de silicium est en général indiquée sur les boîtes de stockage.

## 2.2. Structure de bandes

Dans le modèle de bandes (figure 2.6), la direction verticale représente l'énergie potentielle  $E$  des  $e^-$  dans le cristal. Trois bandes sont discernables : la bande de valence, la bande interdite (gap) et la bande de conduction. La bande de valence concerne les  $e^-$  liés ( $E < E_V$ ). La bande interdite représente l'énergie nécessaire  $E_G$  pour libérer un  $e^-$  vers la bande de conduction. La bande de conduction ( $E > E_C$ ) concerne les  $e^-$  libres.

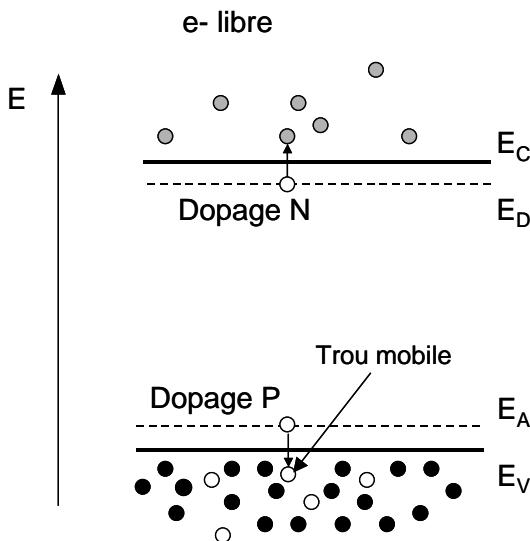


Figure 2.6 : Diagramme de bandes d'un SC dopé P ou N

Quand le semi-conducteur est dopé, on introduit les niveaux d'énergie supplémentaires  $E_D$  et  $E_A$ .  $E_D$  est le niveau d'énergie qu'a l'électron très faiblement lié des donneurs (ex : As) et qui est donc proche de  $E_C$ . La différence d'énergie entre  $E_C$  et  $E_D$  représente l'énergie de liaison entre l'électron et l'atome d'Arsenic.  $E_A$  est l'équivalent de  $E_D$  pour les accepteurs et qui est proche de  $E_V$  puisqu'un électron d'un atome voisin prendra facilement la place du trou, ce qui aura finalement le même effet que si le trou s'était déplacé. La différence d'énergie entre  $E_V$  et  $E_A$  représente l'énergie de liaison entre le trou et l'atome de Bore.

Matériaux	EG à température ambiante	$n_i$ à température ambiante
Germanium	0,66 eV	$2,5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$
Silicium	1,12 eV	$1,45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$
GaAs	1,42 eV	$2 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$

Tableau 2.1 : Bande interdite et concentration de porteurs intrinsèques de trois semi-conducteurs différents

La concentration des porteurs intrinsèques du silicium peut être déterminée à partir de la formule empirique suivante.

$$n_i = 3,9 \times 10^{16} T^{3/2} \exp\left(-\frac{0,605}{kT[\text{eV}]}\right) \text{ cm}^{-3} \quad (\text{avec le premier } T \text{ en K}) \quad (2.2)$$

La probabilité qu'un électron occupe un niveau d'énergie  $E$  est donnée par la distribution de Fermi-Dirac :

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right)} \quad (2.3)$$

où  $E_F$  est le niveau de Fermi, c'est-à-dire le niveau pour lequel la probabilité de trouver un électron est exactement 0,5. Dans un semi-conducteur intrinsèque,  $E_F$  se trouve au milieu de la bande interdite, puisqu'on a autant de trous que d'électrons. Dans un semi-conducteur dopé

$n$ ,  $E_F$  sera plus proche de la bande de conduction, puisqu'on aura plus de chances de trouver des électrons au niveau de la bande de conduction que dans la bande de valence. Inversement, pour un semi-conducteur dopé p,  $E_F$  sera plus proche de la bande de valence.

Les niveaux d'énergie permis pour les électrons dans la bande de conduction sont donnés par :

$$N(E) = \frac{4\pi}{h^3} (m_e^*)^{\frac{3}{2}} (E - E_C)^{\frac{1}{2}} \text{ pour } E > E_C \quad (2.4)$$

Les niveaux d'énergie permis pour les trous dans la bande de valence sont donnés par :

$$N(E) = \frac{4\pi}{h^3} (m_h^*)^{\frac{3}{2}} (E_V - E)^{\frac{1}{2}} \text{ pour } E < E_V \quad (2.5)$$

$m_e^*$  : masse effective des électrons ;  $m_h^*$  : masse effective des trous.

Le nombre d'électrons dans la bande de conduction est donné par :

$$n = \int_{E_C}^{\infty} f(E) N(E) dE \cong N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{kT}\right) \quad (2.6)$$

Le nombre de trous dans la bande de valence est donné par :

$$p = \int_{-\infty}^{E_V} (1-f(E)) N(E) dE \cong N_V \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{kT}\right) \quad (2.7)$$

avec  $N_C = 2\left(\frac{2\pi m_e^* k T}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}}$  et  $N_V = 2\left(\frac{2\pi m_h^* k T}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}}$  étant les densités d'état effectives dans la bande de conduction et dans la bande de valence respectivement.  $N_C = 2,8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  et  $N_V = 1,04 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  dans le silicium à température ambiante.

### 2.3 Informations sur le Silicium

Élément le plus abondant sur Terre après l'oxygène (25,7 %), le silicium est aussi l'un des plus utiles (sable, verre, poterie, semi-conducteur). On rappelle en figure 2.7 les différents plans et direction des réseaux cubiques avec les indices de Miller.

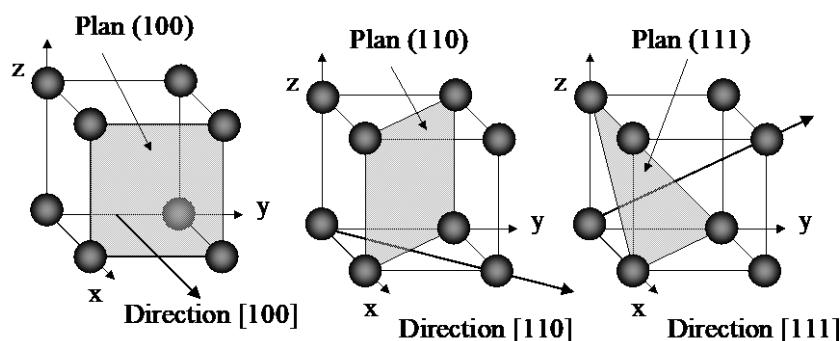


Figure 2.7 : Plans cristallins et directions principales d'un réseau cubique

Les directions sont notées  $[hkl]$  (ou  $\langle hkl \rangle$  pour l'ensemble des directions équivalentes), les plans cristallins  $(hkl)$  (ou  $\{hkl\}$  pour l'ensemble des plans équivalents) par convention.

La structure cristalline du silicium est de type diamant. C'est l'association de deux réseaux cubiques à faces centrées décalés de  $\frac{1}{4}$  de pas de réseau (voir figure 2.8).  
 Configuration électronique :  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$ .  
 Point de fusion :  $1414^\circ\text{C}$ .

Le silicium est résistant à tout type d'acide. Il est attaqué par  $\text{OH}^-$  et les atomes de fluor.

Les propriétés du silicium massique sont, d'une manière générale, isotropes du fait de la symétrie cubique du cristal. La diffusion des dopants est, par exemple, indépendante de la direction du cristal. En revanche, les propriétés surfaciques dépendent de la direction. Les plans {111} laissent apparaître le plus d'atomes de silicium par  $\text{cm}^2$ . Ainsi, les plans {111} s'oxydent plus rapidement que les plans {100} car le taux d'oxydation est proportionnel au nombre d'atomes de silicium disponibles pour la réaction. Les propriétés électriques des systèmes à base de Si dépendent aussi de l'orientation du cristal.

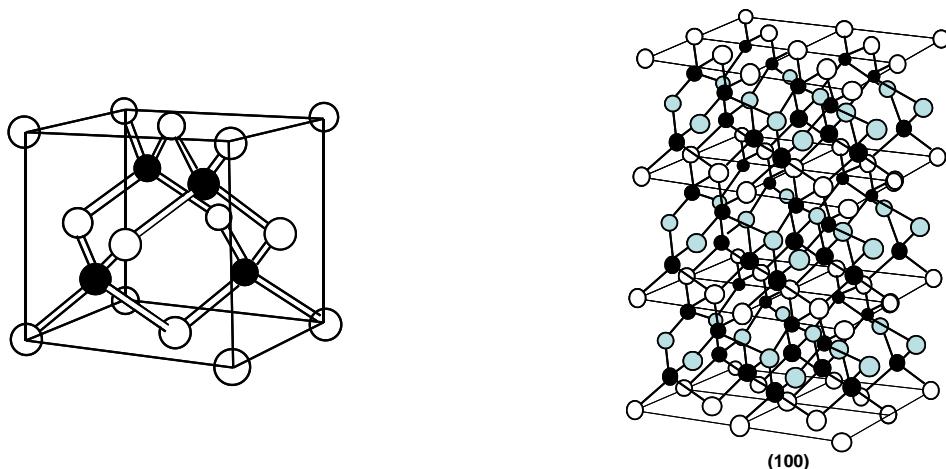


Figure 2.8 : A gauche, maille cubique du silicium (structure diamant). Chaque atome de Si est relié à quatre atomes formant un tétraèdre.

A droite sont représentées 4x3 mailles cubiques de Si <100>

## 2.4 Pourquoi les matériaux III-V pour les LED, les diodes laser et les photodiodes ?

On appelle matériaux III-V les matériaux composés d'éléments des colonnes III et V du tableau de Mendeleïev.

<b>II</b>	<b>III</b>	<b>IV</b>	<b>V</b>	<b>VI</b>
Be	<b>B</b>	C	N	O
Mg	<b>Al</b>	Si	P	S
Zn	<b>Ga</b>	Ge	As	Se
Cd	<b>In</b>	Sn	Sb	Te
Hg	<b>Ti</b>	Pb	Bi	Po

Tableau 1.2 : Extrait du tableau de Mendeleiev

Les deux structures de base pour la micro optoélectronique sont l'AsGa (Arsénure de Gallium) et l'InP (Phosphure d'Indium). Les semi-conducteurs de la colonne IV tels que Si et Ge ont un gap indirect : c'est-à-dire que le minimum de la bande de conduction ne correspond

pas au maximum de la bande de valence dans le diagramme d'énergie en fonction du nombre d'onde (voir figure 2.9).

Pour qu'une transition de la bande de valence vers la bande de conduction (ou l'inverse) ait lieu, il faut que l'énergie totale soit conservée (relation scalaire), mais il faut aussi que l'impulsion ( $\hbar\mathbf{k}$ ) soit conservée (relation vectorielle). Lorsqu'un semi-conducteur est à gap direct, la transition d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction se fait à quantité de mouvement  $\hbar\mathbf{k}$  constante puisque l'impulsion d'un photon est négligeable par rapport à celle de l'électron. La conservation de l'impulsion est donc automatiquement assurée. Un électron de la bande de conduction peut facilement se recombiner avec un trou en émettant un photon de longueur d'onde  $\lambda [\text{nm}] = \frac{1,240}{E_G [\text{eV}]}$ . C'est une transition radiative (diode et diode laser). Pour un semi-conducteur à gap indirect, il faut, pour conserver l'impulsion, faire intervenir l'impulsion des phonons du réseau cristallin. Ceci rend la recombinaison radiative beaucoup moins probable (processus à 3 corps électron - trou - phonon).

Les matériaux III-V tels que GaAs et InP ont un gap direct et c'est pourquoi ils sont très utilisés en optoélectronique.

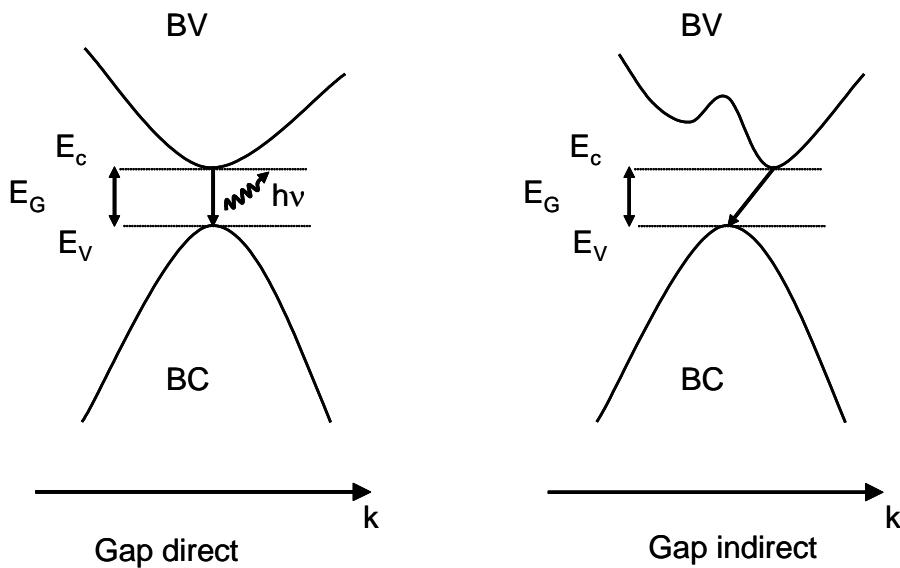


Figure 2.9 : Illustration d'un gap direct et d'un gap indirect