

# ***1. Notions fondamentales sur la physique des semiconducteurs***

Les composants électroniques mettent à profit les propriétés des électrons dans les semiconducteurs. Il est par conséquent nécessaire, avant d'aborder l'étude des composants proprement dits, de préciser ces propriétés et de définir les grandeurs physiques dont les évolutions conditionnent les caractéristiques électriques ou optiques des composants. Les paramètres fondamentaux sont évidemment l'état de la population électronique à l'équilibre thermodynamique et l'évolution de cette population lorsque le semiconducteur est soumis à une perturbation extérieure telle qu'une tension électrique ou un rayonnement électromagnétique. En outre les composants modernes font de plus en plus appel à la juxtaposition de matériaux différents, semiconducteurs ou non. Il est donc nécessaire de préciser et de traduire par des grandeurs mesurables, les propriétés des interfaces entre les différents matériaux constituant ces hétérostructures.

L'objet de ce premier chapitre est une présentation aussi simple que possible des concepts de base permettant de comprendre et de traduire par des grandeurs mesurables, les propriétés des électrons dans les semiconducteurs. Il est organisé de la manière suivante :

- 1.1 . Structure cristalline
- 1.2. Etats électroniques et structure de bandes
- 1.3. Fonctions de distribution et statistiques
- 1.4. Le semiconducteur à l'équilibre thermodynamique
- 1.5. Le semiconducteur hors équilibre
- 1.6. Les interfaces entre deux matériaux différents
- 1.7. Les sources de bruit dans les semiconducteurs

## 1.1. Structure cristalline

Il existe deux types d'état solide, l'état dans lequel l'arrangement des atomes est aléatoire et celui dans lequel les atomes sont arrangés régulièrement aux noeuds d'un réseau.

Le premier état est dit *amorphe*, les matériaux qui se solidifient dans un état amorphe sont généralement appelés des *verres*. Cet état ne diffère de l'état liquide que par le taux de viscosité. Tout liquide dont la viscosité de cisaillement est supérieure à  $10^{13}$  poises est appelé verre.

Le deuxième état, qui nous intéresse plus particulièrement ici, est l'état *cristallisé*, caractérisé par le fait que les atomes sont rangés aux noeuds d'un réseau périodique. Le résultat est un ensemble ordonné de noyaux et d'électrons liés entre eux par des forces essentiellement coulombiennes. Ces forces sont en principe connues mais leurs interactions sont tellement complexes que l'on ne peut pas les calculer en détail. En fait, on associe les électrons des couches internes des atomes avec leur noyau, ce qui représente un ion positif et on traite les électrons périphériques comme des particules quasi-libres dans le champ des ions. On distingue, à partir de ce type de représentation, essentiellement quatre familles de solides cristallisés : les cristaux ioniques, les cristaux covalents, les métaux et les cristaux moléculaires.

Les *cristaux ioniques* résultent de l'association d'un élément fortement électropositif et d'un élément fortement électronégatif. L'élément électropositif a généralement un seul électron périphérique (métaux alcalins : Li, Na, K, Rb, Cs), qu'il cède facilement pour devenir un ion positif avec une configuration électronique stable de couches saturées. L'élément électronégatif a généralement sept électrons périphériques (halogènes : F, Cl, Br, I), il accepte facilement un huitième électron pour devenir un ion négatif avec une configuration électronique stable. Les deux ions ainsi créés sont liés par attraction coulombienne, d'où le nom de cristaux ioniques que l'on donne aux cristaux tels que LiF, NaCl ou KBr. L'électron libéré par le métal alcalin est fortement fixé sur l'halogène de sorte qu'aucun électron n'est libéré dans le réseau du matériau, ces cristaux sont des isolants. En outre, l'énergie de liaison entre les atomes est très importante de sorte que ces cristaux sont généralement très durs.

Les *cristaux covalents* sont construits avec des éléments de la colonne IV du tableau périodique (C, Si, Ge, Sn). Ces éléments ont quatre électrons périphériques qu'ils mettent en commun avec quatre voisins pour établir des liaisons covalentes. Les électrons de valence sont liés mais leur énergie de liaison est beaucoup plus faible que dans les cristaux ioniques. Cette énergie de liaison est importante dans le carbone diamant, ce qui en fait un isolant, elle est nulle dans l'étain, ce qui en fait un conducteur. Dans le silicium et le germanium cette énergie a une valeur intermédiaire qui fait de ces matériaux des semiconducteurs.

Les *métaux* sont construits avec des éléments électropositifs, c'est-à-dire ayant un seul électron périphérique. Cet électron périphérique est libéré dans la

réalisation du cristal, ces matériaux sont très conducteurs. Les liaisons entre atomes sont plus faibles que dans les cristaux ioniques ou covalents, ces matériaux sont moins durs et fondent à basse température. On distingue les métaux alcalins Li, Na, K, Cs et les métaux nobles Cu, Ag, Au.

Les *cristaux moléculaires*, comme leur nom l'indique, sont bâtis sur une unité de base qui n'est plus l'atome mais la molécule. Les forces de liaison sont grandes à l'intérieur de la molécule mais du type Van der Waals entre molécules et par conséquent faibles. Ces matériaux sont peu résistants et fondent à basse température.

### 1.1.1. Géométrie du réseau cristallin

Un cristal est construit à partir d'un groupe de  $n$  particules qui constituent la *cellule de base*. Ce groupe est répété périodiquement, en un réseau défini par trois vecteurs de translation fondamentaux,  $\mathbf{a}$ ,  $\mathbf{b}$ ,  $\mathbf{c}$ , appelés *vecteurs primitifs*.

La position de chaque cellule du cristal est définie par un vecteur du réseau

$$\mathbf{t} = n_1\mathbf{a} + n_2\mathbf{b} + n_3\mathbf{c} \quad (1-1)$$

où  $n_1$ ,  $n_2$  et  $n_3$  sont des nombres entiers. L'ensemble des points définis par les vecteurs  $\mathbf{t}$  pour toutes les valeurs de  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$  constitue le réseau. Le parallélépipède construit sur les trois vecteurs primitifs constitue la maille primitive ou *maille élémentaire*. On remplit tout l'espace en appliquant à la maille élémentaire les opérations de translation définies par les vecteurs  $\mathbf{t}$ . Le volume de la maille élémentaire est défini par le produit mixte. Le symbole  $\times$  désigne le produit vectoriel et le symbole  $\cdot$  désigne le produit scalaire.

$$v = |\mathbf{a} \times \mathbf{b} \cdot \mathbf{c}| \quad (1-2)$$

Il existe une maille élémentaire par noeud du réseau, ce qui s'exprime en disant que la maille élémentaire contient un seul noeud. En fait, la maille élémentaire contient huit noeuds mis en commun avec huit mailles adjacentes.

### 1.1.2. Opérations de symétrie

Les opérations de symétrie sont les opérations qui laissent la structure cristalline invariante. Ces opérations sont d'une part des translations et d'autre part des opérations ponctuelles telles que des rotations autour d'un axe ou des inversions par rapport à un point. L'ensemble des opérations de symétrie du cristal constitue le *groupe de symétrie* du cristal.

En ne considérant que les opérations ponctuelles, rotations et inversions ou combinaisons des deux, on définit le *groupe ponctuel* du cristal. En considérant en outre les opérations de translation, on définit le *groupe spatial* du cristal.