

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

**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  $\sigma$  des semiconducteurs considérés à température ambiante. Calculer la valeur de la conductibilité  $\sigma$  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  $e\Delta\phi = E_g + k_B T \ln \frac{N_d N_a}{NP}$  ;
- (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  $2 \times 10^{15}$  donneurs/cm<sup>3</sup>, 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  $2 \times 10^{15}$  donneurs/cm<sup>3</sup>, on ajoute  $1 \times 10^{16}$  accepteurs/cm<sup>3</sup> 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.