

## Science des matériaux de l'électrotechnique

**II Conduction électrique**  
**4. Conduction électrique des semiconducteurs**

*Science des matériaux de l'électrotechnique*  
*F.I.S., 2009-2010, 1231F*
*Prof. dr.ing. Florin Ciuprina*

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Conduction électrique des semiconducteurs

### Structure du cours

Chapitre	Contenu
<b>I Propriétés générales des cristaux</b>	
1	<b>Corps cristallins</b> Etats des corps Réseaux cristallins Défauts des réseaux cristallins
2	<b>Electrons dans les cristaux</b> Modèles (classique et quantiques) de l'électron. Bandes d'énergie associées aux corps cristallins. Classification des matériaux en conducteurs, semiconducteurs et isolants.
<b>II Conduction électrique</b>	
3	<b>Conduction électrique des métaux.</b> Conduction aux températures usuelles Supraconductivité électrique.
4	<b>Conduction électrique des semiconducteurs</b> Mécanismes de conduction. Expressions des conductivités intrinsèque et extrinsèques
5	<b>Conduction électrique des isolants solides</b> Conduction en champs usuels (Conduction électronique, Conduction ionique), Conduction en champs intenses (Claquage des isolants solides).
<b>III Propriétés diélectriques</b>	
6	<b>Polarisation électrique</b> Types de polarisation Polarisation en champs harmoniques. Pertes diélectriques.
<b>IV Propriétés magnétiques</b>	
7	Types de magnétisme

*Science des matériaux de l'électrotechnique, F.I.S., 1231 F*

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

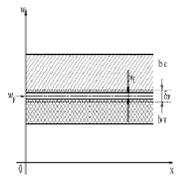
---

---

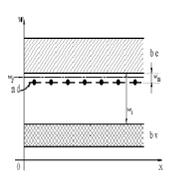
Conduction électrique des semiconducteurs

### 4. Conduction électrique des semiconducteurs

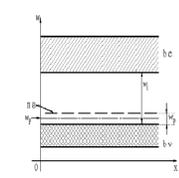
$\sigma = 10^{-6} - 10^5 \text{ S/m}$



semiconducteur intrinsèque  
 $w_i = 10^{-2} - 10^{-1} \text{ eV}$



tip n  
semiconducteurs extrinsèques



tip p  
semiconducteurs extrinsèques  
 $w_j = 0.5 - 1.5 \text{ eV}$

*Science des matériaux de l'électrotechnique, F.I.S., 1231 F*

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Conduction électrique des semiconducteurs

### 4. Conduction électrique des semiconducteurs

- 4.1 Conduction des semiconducteurs intrinsèques
- 4.2 Conduction des semiconducteurs extrinsèques
- 4.3 Variation de la conductivité des semiconducteurs avec la température
- 4.4 Jonction p-n
- 4.5 Utilisations des matériaux semiconducteurs

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

Conduction électrique des semiconducteurs

### 4. Conduction électrique des semiconducteurs

- 4.1 Conduction des semiconducteurs intrinsèques
- 4.2 Conduction des semiconducteurs extrinsèques
- 4.3 Variation de la conductivité des semiconducteurs avec la température
- 4.4 Jonction p-n
- 4.5 Utilisations des matériaux semiconducteurs

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

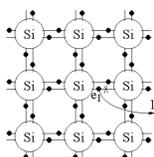
---

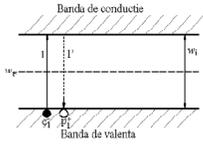
---

---

Conduction électrique des semiconducteurs

### 4.1 Conduction des semiconducteurs intrinsèques





$$\sigma_i = \sigma_n + \sigma_p = N_D q \mu_n^2 \left( \frac{\tau_n}{m_n^*} + \frac{\tau_p}{m_p^*} \right)$$

$$\sigma_i = C_i e^{-u_i/(2kT)}$$

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

Conduction électrique des semiconducteurs

## 4. Conduction électrique des semiconducteurs

- 4.1 Conduction des semiconducteurs intrinsèques
- 4.2 Conduction des semiconducteurs extrinsèques
- 4.3 Variation de la conductivité des semiconducteurs avec la température
- 4.4 Jonction p-n
- 4.5 Utilisations des matériaux semiconducteurs

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Conduction électrique des semiconducteurs

## 4.2 Conduction des semiconducteurs extrinsèques de type n

Semiconducteur de bază	$w_n$ [eV]		
	P	As	Sb
Ge	0,012	0,0127	0,0096
Si	0,044	0,049	0,039

$$\sigma_{en} = \frac{N_{en} q_n^2 \tau_n}{m_n^*}$$

$$\sigma_{en} = C_{en} e^{-w_n/(2kT)} \quad \sigma_n = \sigma_i + \sigma_{en} = C_i e^{-w_i/(2kT)} + C_{en} e^{-w_n/(2kT)}$$

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Conduction électrique des semiconducteurs

## 4.2 Conduction des semiconducteurs extrinsèques de type p

Semiconducteur de bază	$w_p$ [eV]			
	B	Al	Ga	In
Ge	0,0104	0,0102	0,0108	0,0112
Si	0,045	0,057	0,065	0,16

$$\sigma_{ep} = \frac{N_{ep} q_p^2 \tau_p}{m_p^*}$$

$$\sigma_{ep} = c_{ep} e^{-\frac{w_p}{2kT}} \quad \sigma_p = \sigma_i + \sigma_{ep} = c_i e^{-\frac{w_i}{2kT}} + c_{ep} e^{-\frac{w_p}{2kT}}$$

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Conduction électrique des semiconducteurs

### 4. Conduction électrique des semiconducteurs

- 4.1 Conduction des semiconducteurs intrinsèques
- 4.2 Conduction des semiconducteurs extrinsèques
- 4.3 Variation de la conductivité des semiconducteurs avec la température
- 4.4 Jonction p-n
- 4.5 Utilisations des matériaux semiconducteurs

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

Conduction électrique des semiconducteurs

### 4.3 Variation de la conductivité des semiconducteurs avec la température

The graph shows two curves: conductivity  $\sigma$  and carrier concentration  $N$  as a function of temperature  $T$ . The x-axis has two marked temperatures,  $T_s$  and  $T_i$ . The  $N$  curve shows a plateau between  $T_s$  and  $T_i$ , while the  $\sigma$  curve shows a dip in this region. To the right, an energy band diagram shows the valence band (banda de valência), the conduction band (banda de condução), and the donor level (nível dosadores) just below the conduction band.

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

Conduction électrique des semiconducteurs

### 4. Conduction électrique des semiconducteurs

- 4.1 Conduction des semiconducteurs intrinsèques
- 4.2 Conduction des semiconducteurs extrinsèques
- 4.3 Variation de la conductivité des semiconducteurs avec la température
- 4.4 Jonction p-n
- 4.5 Utilisations des matériaux semiconducteurs

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

Conduction électrique des semiconducteurs

### 4.4 Jonction p-n

**Equilibre**

Potentiel électrostatique

Bandes d'énergie

(a)

→ Déplacement des particules

→ Diffusion trous

← Drift trous

→ Diffusion électrons

← Drift électrons

(b)

→ Courant

(c)

$$J_p(\text{drift}) + J_p(\text{diffusion}) = 0$$

$$J_n(\text{drift}) + J_n(\text{diffusion}) = 0$$

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Conduction électrique des semiconducteurs

### 4.4 Jonction p-n

**Courant électrique stationnaire**

(a) Equilibre (E=0)      (b) Polarisation directe (E > 0)      (c) Polarisation inverse (E < 0)

(1) Diffusion trous      (2) Drift trous      (3) Diffusion électrons      (4) Drift électrons

$$I = I_0 (e^{qU/kT} - 1)$$

$$J_p(x) = N_p(x) q_p \mathcal{M}_p E(x) - q_p D_p \frac{dN_p(x)}{dx}$$

drift      diffusion

$$J_n(x) = N_n(x) q_n \mathcal{M}_n E(x) - q_n D_n \frac{dN_n(x)}{dx}$$

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Conduction électrique des semiconducteurs

## 4. Conduction électrique des semiconducteurs

- 4.1 Conduction des semiconducteurs intrinsèques
- 4.2 Conduction des semiconducteurs extrinsèques
- 4.3 Variation de la conductivité des semiconducteurs avec la température
- 4.4 Jonction p-n
- 4.5 Utilisations des matériaux semiconducteurs

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

---

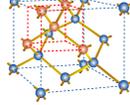
---

Conduction électrique des semiconducteurs

### 4.5 Utilisations des matériaux semiconducteurs

**Silicium (Si)**

- cristallise en réseau de type diamant



- utilisations:
  - circuits intégrés
  - diodes
  - thyristors
  - transistors
  - batteries solaires
  - traducteurs Hall

Caractéristique	Si
Permittivité relative	11
Résistivité intrinsèque a 300 K [ $\Omega\text{m}$ ]	(2,5-3) $10^3$
Largeur de la bande interdite de Fermi a 300 K [eV]	1,105
Mobilité des électrons a 300 K [ $\text{m}^2/(\text{Vs})$ ]	0,145
Mobilité des trous a 300 K [ $\text{m}^2/(\text{Vs})$ ]	0,048

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

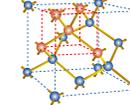
---

Conduction électrique des semiconducteurs

### 4.5 Utilisations des matériaux semiconducteurs

**Germanium (Ge)**

- cristallise en réseau de type diamant



- utilisations:
  - diodes tunnel
  - transistors
  - détecteurs de radiations
  - traducteurs Hall
  - thermomètres pour basses températures

Caractéristique	Ge
Permittivité relative	16
Résistivité intrinsèque a 300 K [ $\Omega\text{m}$ ]	0,47
Largeur de la bande interdite de Fermi a 300 K [eV]	0,665
Mobilité des électrons a 300 K [ $\text{m}^2/(\text{Vs})$ ]	0,39
Mobilité des trous a 300 K [ $\text{m}^2/(\text{Vs})$ ]	0,19

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Conduction électrique des semiconducteurs

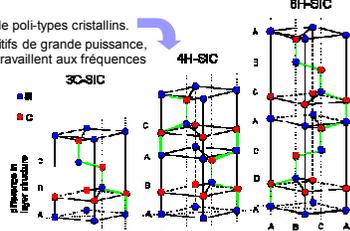
### 4.5 Utilisations des matériaux semiconducteurs

**Sélénium (Se)**

- présente une grande variété d'états allotropiques: vitreux, amorphe, cristallin.
- utilisations: photo-éléments, redresseurs etc.

**Carbure de silicium (SiC)**

- présente une grande variété de poli-types cristallins.
- utilisations: varistors si dispositifs de grande puissance, résistants aux radiations, qui travaillent aux fréquences et températures élevées.



Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Conduction électrique des semiconducteurs

### 4.5 Utilisations des matériaux semiconducteurs

Composés semiconducteurs A<sup>II</sup> - B<sup>IV</sup>

- ZnS, ZnSe, ZnTe, CdS, CdSe, CdTe
- utilisations: photo-résistances, traducteurs Hall, traducteurs de pression etc.

Composés semiconducteurs A<sup>III</sup> - B<sup>V</sup>

- InSb, InAs, InP, GaSb, GaAs, AlSb
- utilisations : diode tunnel, transistors, dispositifs optoélectroniques etc.

Science des matériaux de l'électrotechnique, FLS, 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---