

Science des matériaux de l'électrotechnique

1. Propriétés générales des cristaux

Science des matériaux de l'électrotechnique
F.L.S. 2009-2010, 1231F

Prof. dr.ing Florin Ciuprina

Propriétés générales des cristaux

Structure du cours

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

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

Propriétés générales des cristaux

Bibliographie

- F. Ciuprina, *Science des matériaux de l'électrotechnique – Notes de cours*, UPB, 2001, Ed. Printech (www.elmat.pub.ro/~florin)
- Philippe Robert, *Matériaux de l'électrotechnique*, Presses Polytechniques Romandes, Lausanne, 1989.
- F. Ciuprina, *Materialie electrotehnice – fenomene si aplicatii*, Ed. Printech, 2007 (en roumain)
- P.V. Notingher, *Materialie pentru electrotehnica*, POLITEHNICA PRESS, Bucuresti, 2005. (en roumain)
- A. Iffrim, P. Notingher, *Materialie electrotehnice*, Ed. Didactica si Pedagogica, 1992.
- L. Solymar, D. Walsh, *Electrical Properties of Materials*, Oxford University Press, 2004.
- B. Streetman, S. Banerjee, *Solid state Electronic Devices*, Prentice Hall, 2005
- <http://www.superconductors.org/>.

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

Propriétés générales des cristaux

Mode d'évaluation

- Laboratoire: 30p;
- Testes intermédiaires: 20p;
- Examen final (écrit et oral): 50p.

Conditions minimales pour passer l'examen:

- effectuer tous les travaux de laboratoire,
- accumulation de minimum 50 p

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

Propriétés générales des cristaux

Structure du cours

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

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

Propriétés générales des cristaux

1. Corps cristallins

- 1.1. Etats des corps
- 1.2 Réseaux cristallins
- 1.3. Défauts des réseaux cristallins

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

Propriétés générales des cristaux

1. Corps cristallins

- 1.1. Etats des corps
- 1.2 Réseaux cristallins
- 1.3. Défauts des réseaux cristallins

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

Propriétés générales des cristaux

1.1. Etats des corps

A. Niveau macroscopique:

- Etat gazeux
- Etat condense
 - liquide
 - solide

Gaz: interactions faibles entre les particules constitutives (molécules, atomes), n'ont ni forme ni volume bien défini.

Liquides: forces intermoléculaires plus fortes qu'aux gaz, le volume est bien défini, la forme n'est pas bien défini.

Solides: forces fortes entre les particules (atomes, ions, molécules), forme et volume bien définis.

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

Propriétés générales des cristaux

1.1. Etats des corps

B. Niveau microscopique:

- Etat cristallin
- Etat amorphe

Energie libre: $F = W - TS$

Grandeur d'état

Corps cristallins: ordre locale, ordre à distance

Corps amorphes: ordre locale, désordre à distance

Corps partiellement cristallins: régions amorphes (B) et régions cristallines (A)

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

Propriétés générales des cristaux

1.1. Etats des corps

Types de cristaux:

- ioniques (NaCl)
- covalentes (Ge, Si)
- métalliques (Cu, Au, Ag)
- moléculaires (à liaisons Van der Waals, ex. parafine)
- à liaisons d'hydrogène

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

Propriétés générales des cristaux

1. Corps cristallins

1.1. Etats des corps

1.2 Réseaux cristallins

1.3. Défauts des réseaux cristallins

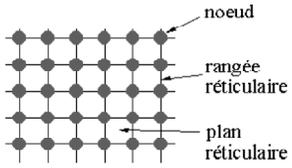
Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Propriétés générales des cristaux

1.2. Réseaux cristallins

Réseau cristallin:
succession régulière de points dans l'espace, nommes *noeuds*.

Structure cristalline:
association noeud - particule.



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

Propriétés générales des cristaux

1.2. Réseaux cristallins

Systèmes cristallins:

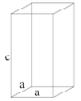
cubique
 $a = b = c$
 $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$



orthorhombique
 $a \neq b \neq c$
 $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$



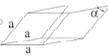
tétragonal
 $a = b \neq c$
 $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$



monoclinique
 $a \neq b \neq c$
 $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$



trigonal (rhomboédrique)
 $a = b = c$
 $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$



triclinique
 $a \neq b \neq c$
 $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$



hexagonal
 $a = b \neq c$
 $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$

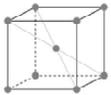


Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

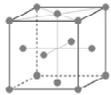
Propriétés générales des cristaux

1.2. Réseaux cristallins

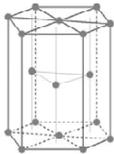
- 7 Systèmes cristallins ► 14 types de réseaux (Bravais)
- les plus importants types de réseaux: CVC, CFC, HC



CC
 Cr, Mo, Ta, V, W,
 Fe α (<770 °C),
 Fe β (770-912 °C),
 Fe δ (1394-1535 °C)



CFC
 Cu, Au, Ag, Al, Ni, Pt,
 Fe γ (912-1394 °C)



HC
 Co, Zn, Mg, Ti

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

Propriétés générales des cristaux

1. Corps cristallins

- 1.1. Etats des corps
- 1.2. Réseaux cristallins
- 1.3. Défauts des réseaux cristallins

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

Propriétés générales des cristaux

1.3. Défauts des réseaux cristallins

- Cristal idéal = sans défauts; à $T = 0 \text{ K}$
- Cristal réel = avec défauts; à $T > 0 \text{ K}$

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

Propriétés générales des cristaux

1.3. Défauts des réseaux cristallins

- ponctuels (zerodimensionnels);
- liniaires (unidimensionnels);
- de surface (bidimensionnels);
- de volume (tridimensionnels).

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

Propriétés générales des cristaux

1.3. Défauts des réseaux cristallins

■ Défauts ponctuels:

- noeud vacant (lacune),
- particule interstitielle
- particule d'impureté (interstitielle, de substitution)



Ilya Frenkel (1894-1952)
physicien russe

F-F' = défaut Frenkel

$$w_{dF} \approx 3 \text{ eV (Al)}$$

$$N_F = \sqrt{N} N' e^{-\frac{w_{dF}}{2kT}}$$

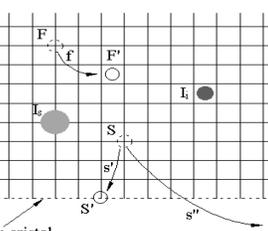


Walter Schottky (1886-1976)
physicien allemand

S = défaut Schottky

$$w_{dS} \approx 0.75 \text{ eV, (Al)}$$

$$N_S = N e^{-\frac{w_{dS}}{kT}}$$



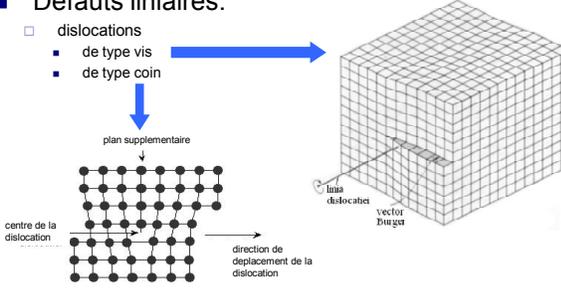
Surface du cristal

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

Propriétés générales des cristaux

1.3. Défauts des réseaux cristallins

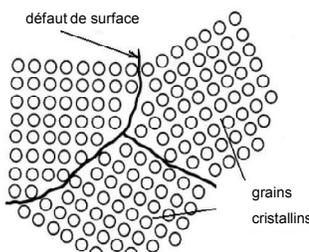
- Défauts linéaires:
 - dislocations
 - de type vis
 - de type coin



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

Propriétés générales des cristaux

1.3. Défauts des réseaux cristallins

- Défauts de surface:
 

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

Propriétés générales des cristaux

1.3. Défauts des réseaux cristallins

- Défauts de volume:
 - cavités,
 - inclusions de corps étrangers,
 - fissures.

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

Propriétés générales des cristaux

2. Electrons dans les cristaux

- 2.1. Modèle classique de l'électron
- 2.2. Modèles quantiques. Ondes associées aux électrons
- 2.3. Systèmes de particules. Nombres quantiques
- 2.4. Etats des électrons dans les cristaux
- 2.5. Répartition des électrons sur les niveaux des bandes permises

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

Propriétés générales des cristaux

2. Electrons dans les cristaux

- 2.1. Modèle classique de l'électron
- 2.2. Modèles quantiques. Ondes associées aux électrons
- 2.3. Systèmes de particules. Nombres quantiques
- 2.4. Etats des électrons dans les cristaux
- 2.5. Répartition des électrons sur les niveaux des bandes permises

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

Propriétés générales des cristaux

2.1. Modèle classique de l'électron

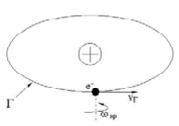
ELECTRON =
boule minuscule de rayon $r \approx 2,82 \cdot 10^{-5} \text{ \AA}$

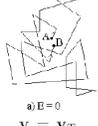


Ernest Rutherford (1871-1937)
physicien britannique

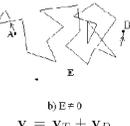


Niels Bohr (1885-1962)
physicien danois





a) $E = 0$
 $\mathbf{v} = \mathbf{v}_T$



b) $E \neq 0$
 $\mathbf{v} = \mathbf{v}_T + \mathbf{v}_D$

$\tau_c = \frac{\bar{l}}{v}$

$\mathbf{v}_D = ME \quad v_D = v_{D0} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$

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

Propriétés générales des cristaux

2. Electrons dans les cristaux

- 2.1. Modèle classique de l'électron
- 2.2. Modèles quantiques. Ondes associées aux électrons
- 2.3. Systèmes de particules. Nombres quantiques
- 2.4. Etats des électrons dans les cristaux
- 2.5. Répartition des électrons sur les niveaux des bandes permises

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

Propriétés générales des cristaux

2.2 Modèles quantiques. Ondes associées aux électrons

électron

$$w = hf = \frac{h\nu}{2\pi} = h\omega;$$

$$p = \frac{h}{\lambda} = \frac{h}{2\pi} \frac{2\pi}{\lambda} = hK;$$

$$\mathbf{p} = h\mathbf{K}.$$

onde

Louis de Broglie (1892-1987)
physicien français

Erwin Schrödinger (1887-1961)
physicien allemand

$\Psi(\mathbf{r}, t)$ ou $\psi(\mathbf{r})$ – fonction d'onde = solution de l'équation de Schrödinger:

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\Delta\Psi + U\Psi = j\hbar\frac{\partial\Psi}{\partial t} \quad |\Psi(\mathbf{r}, t)|^2 = \mathcal{P}(\mathbf{r}, t)$$

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\Delta\psi + U\psi = w\psi \quad |\psi(\mathbf{r})|^2 = \mathcal{P}(\mathbf{r})$$

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

Propriétés générales des cristaux

2. Electrons dans les cristaux

- 2.1. Modèle classique de l'électron
- 2.2. Modèles quantiques. Ondes associées aux électrons
- 2.3. Systèmes de particules. Nombres quantiques
- 2.4. Etats des électrons dans les cristaux
- 2.5. Répartition des électrons sur les niveaux des bandes permises

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

Propriétés générales des cristaux

2.3 Systèmes de particules. Nombres quantiques

Systèmes de particules

- noyaux + électrons = système de N particules.
- les états du système sont décrits par la fonction d'onde ψ_s qui est solution de l'équation de Schrödinger:

$$\sum_{i=1}^N \left[-\frac{\hbar^2}{2m_i} \left(\frac{\partial^2 \psi_s}{\partial x_i^2} + \frac{\partial^2 \psi_s}{\partial y_i^2} + \frac{\partial^2 \psi_s}{\partial z_i^2} \right) \right] + U_s(x_1, \dots, z_N) \psi_s = w_s \psi_s$$

$|\psi_s|^2 = \psi_s \psi_s^*$ = densité de probabilité de la présence de la première particule du système dans le voisinage d'un point donne $M_1(x_1, y_1, z_1)$, de la deuxième particule dans le voisinage du point $M_2(x_2, y_2, z_2)$ etc.

- $\psi_s = \prod \psi_{u_i}$, ψ_{u_i} = expressions approximatives

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

Propriétés générales des cristaux

2.3 Systèmes de particules. Nombres quantiques

Nombres quantiques

ψ_{nlm} dépendent dans les états stationnaires de 4 nombres quantiques:

- nombre quantique principal n**
 - détermine les valeurs de l'énergie de l'électron
 - $n = 1, 2, 3, \dots$
- nombre quantique secondaire l**
 - détermine les valeurs du moment cinétique orbital et du moment magnétique orbital de l'électron
 - $l = 0, 1, 2, 3, \dots, n-1$
- nombre quantique magnétique m_l**
 - détermine les valeurs de la projection du moment cinétique orbital et de la projection du moment magnétique orbital sur une direction arbitraire (souvent la direction du champ magnétique extérieur)
 - $m_l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$
- nombre quantique de spin m_s**
 - détermine les valeurs de la projection du moment cinétique de spin et de la projection du moment magnétique de spin sur une direction arbitraire (souvent la direction du champ magnétique extérieur)
 - $m_s = \pm 1/2$

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

Propriétés générales des cristaux

2.3 Systèmes de particules. Nombres quantiques

Nombres quantiques

n, l, m_l - déterminent un *état orbital* de l'électron
 n, l, m_l, m_s - déterminent un *état quantique* de l'électron

- Principe de l'exclusion de Pauli:**
 Dans un système formé des particules ayant le nombre quantique de spin m_s demi-entier (électrons, protons, neutrons), dans un état état quantique on peut trouver une seule particule composante du système.

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

Propriétés générales des cristaux

2. Electrons dans les cristaux

- 2.1. Modèle classique de l'électron
- 2.2. Modèles quantiques. Ondes associées aux électrons
- 2.3. Systèmes de particules. Nombres quantiques
- 2.4. Etats des électrons dans les cristaux
- 2.5. Répartition des électrons sur les niveaux des bandes permises

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

Propriétés générales des cristaux

2.4. Etats des électrons dans les cristaux

Hypothèses simplificatrices:

- *électrons indiscernables*, la fonction d'onde associée à un électron décrit l'état de chaque électron du cristal.
- *cristaux unidimensionnels*.
- *ions immobiles dans les noeuds* (il existe, pourtant, une interaction electron-ion due au champ électrique produit par les ions).
- il existe une *interaction* entre les *électrons étudiés* et le champ électrique produit par *autres électrons*.

$$-\frac{\hbar^2}{2m_0} \frac{d^2 \psi_s}{dx^2} + U(x) \psi_s = w_s \psi_s$$

$$U(x) = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} U_n \cos\left(\frac{2n\pi x}{a}\right)$$

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

Propriétés générales des cristaux

2.4. Etats des électrons dans les cristaux

Approximation des électrons libres

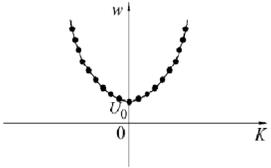
Hypothèses:

- les électrons n'interagissent pas avec les ions des noeuds du réseau → $U = U_0$
- condition de cyclicité (Born): $\psi(x) = \psi(x+L)$

$$\psi(x) = A \exp(jKx)$$

$$w = \frac{\hbar^2}{2m_0} K^2 + U_0$$

$$K = \frac{2n\pi}{L}, n \in \mathbb{Z}$$



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

Propriétés générales des cristaux

2.4. Etats des électrons dans les cristaux

Approximation des électrons quasilibres

Hypothèses:
 les électrons interagissent avec les ions des noeuds du réseau $-U(x) = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} U_n \cos\left(\frac{2n\pi x}{a}\right)$

réflexions Bragg lorsque: $2a \sin \theta = n\lambda, \quad n = \pm 1, \pm 2, \dots$

$K = \frac{n\pi}{a}$, pour le cristal unidimensionnel

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

Propriétés générales des cristaux

2.4. Etats des électrons dans les cristaux

Approximation des électrons quasilibres

$K = \pm \frac{\pi}{a} \rightarrow$ ondes stationnaires:

$\psi(+)= A \exp\left(\frac{j\pi x}{a}\right) + A \exp\left(-\frac{j\pi x}{a}\right) \rightarrow 2A \cos\left(\frac{x\pi}{a}\right) \rightarrow \mathcal{P}(+) = |\psi(+)|^2 \sim \cos^2\left(\frac{x\pi}{a}\right)$

$\psi(-)= A \exp\left(\frac{j\pi x}{a}\right) - A \exp\left(-\frac{j\pi x}{a}\right) \rightarrow 2Aj \sin\left(\frac{x\pi}{a}\right) \rightarrow \mathcal{P}(-) = |\psi(-)|^2 \sim \sin^2\left(\frac{x\pi}{a}\right)$

$w(+)= \frac{\hbar^2 K^2}{2m_0} + U_0 - \frac{U_1}{2}$

$w(-)= \frac{\hbar^2 K^2}{2m_0} + U_0 + \frac{U_1}{2}$

$w_i = U_1 = w(-) - w(+)$

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

Propriétés générales des cristaux

2.4. Etats des électrons dans les cristaux

Approximation des électrons quasilibres

Masse effective de l'électron:

$\mathbf{F} = m_0 \mathbf{a} \qquad \mathbf{F} = \mathbf{F}_{int} + \mathbf{F}_{ext}$

$F_{ext} = m_0^* a \qquad m_0^* = \hbar^2 \left(\frac{d^2 w}{dK^2}\right)^{-1}$

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

Propriétés générales des cristaux

2.4. Etats des électrons dans les cristaux

Approximation des électrons fortement liés

Hypothèses:

- fonction d'onde de type Heitler-London

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

Propriétés générales des cristaux

2.4. Etats des électrons dans les cristaux

Approximation des électrons fortement liés

Niveaux d'énergie pour deux atomes de He : a) isolés, et b) rapprochés jusqu'à l'interaction de leurs électrons

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

Propriétés générales des cristaux

2.4. Etats des électrons dans les cristaux

Approximation des électrons fortement liés

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

Propriétés générales des cristaux

2. Electrons dans les cristaux

- 2.1. Modèle classique de l'électron
- 2.2. Modèles quantiques. Ondes associées aux électrons
- 2.3. Systèmes de particules. Nombres quantiques
- 2.4. Etats des électrons dans les cristaux
- 2.5. Répartition des électrons sur les niveaux des bandes permises

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

Propriétés générales des cristaux

2.5. Répartition des électrons sur les niveaux des bandes permises

Statistique Fermi-Dirac

Répartition des électrons sur les niveaux des bandes permises

↓
Statistique Fermi-Dirac

$E = 0$, équilibre thermique $\varphi_0(w) = \frac{1}{e^{\frac{w-w_F}{kT}} + 1}$

$E \neq 0$, équilibre thermique: $\varphi(w) = \varphi_0(w) + \tau q_0 \nu \mathbf{E} \frac{\partial \varphi_0(w)}{\partial w}$

Conclusion : Uniquement les électrons dont l'énergie appartient à l'intervalle de Fermi peuvent être électrons de conduction, c'est à dire seulement les électrons des niveaux partiellement occupés peuvent établir un courant électrique de conduction dans le cristal.

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

Propriétés générales des cristaux

2.5. Répartition des électrons sur les niveaux des bandes permises

Conducteurs, semiconducteurs, isolants

isolant
 $w_i = > 3 - 5 \text{ eV}$

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

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

Propriétés générales des cristaux

2.5. Répartition des électrons sur les niveaux des bandes permises

Conducteurs, semiconducteurs, isolants

semiconducteur intrinsèque

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

semiconducteurs extrinsèques

$w_i = 0.5 - 1.5 \text{ eV}$

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

Propriétés générales des cristaux

2.5. Répartition des électrons sur les niveaux des bandes permises

Conducteurs, semiconducteurs, isolants

métal monovalent

métal bivalent

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

Propriétés générales des cristaux

2.5. Répartition des électrons sur les niveaux des bandes permises

Concentration des électrons dans une bande permise:

dN_{niv} - concentration des niveaux orbitaux dans dw

$g(w)$ - densité d'états

$dN_{niv} = g(w)dw$

$g(w) = \frac{(2m_0^*)^{\frac{3}{2}}}{4\pi^2\hbar^3} w^{\frac{1}{2}}$

$dN_0 = dN_{niv}2\varphi(w) = g(w)2\varphi(w)$

$dN_0 = \frac{(2m_0^*)^{\frac{3}{2}}}{2\pi^2\hbar^3} w^{\frac{1}{2}}\varphi(w)dw \quad \rightarrow \quad N_0 = \int_0^\infty dN_0$

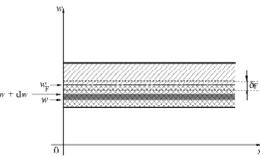
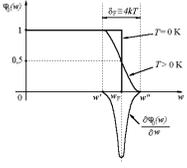
Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Propriétés générales des cristaux

2.5. Répartition des électrons sur les niveaux des bandes permises

Concentration des électrons dans une bande permise:

Hypothèses: métal monovalent, $T = 0\text{ K}$

$$dN_0 = \frac{(2m_0^*)^3}{2\pi^2\hbar^3} w^{1/2} \varphi(w) dw$$

$$N_0 = \int_0^\infty dN_0 \quad \rightarrow \quad N_0 = \frac{(2m_0^*)^3}{3\pi^2\hbar^3} w_F(0)^{3/2}$$

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

Propriétés générales des cristaux

2.5. Répartition des électrons sur les niveaux des bandes permises

Concentration des électrons dans une bande permise:

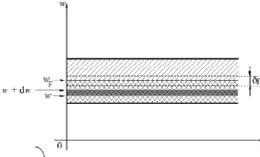
Hypothèses: métal monovalent, $T = 0\text{ K}$

$$N_0 = \frac{(2m_0^*)^3}{3\pi^2\hbar^3} w_F(0)^{3/2}$$

$$w_F(0) = \frac{\hbar^2}{2m_0^*} (3\pi^2 N_0)^{2/3}$$

Aux températures usuelles:

$$w_F(T) = w_F(0) \left[1 - \frac{\pi^2}{12} \left(\frac{kT}{w_F(0)} \right)^2 \right] \quad w_F(T) \approx w_F(0)$$



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