

Roland Fortunier

# Propriétés physiques des matériaux solides

Des métaux aux semi-conducteurs



Écoles  
d'ingénieurs  
Licence  
Master

ellipses

# Table des matières

<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>I LES ELECTRONS</b>	<b>9</b>
<b>1 Description physique</b>	<b>13</b>
1.1 Description d'une onde . . . . .	13
1.1.1 Paquet d'ondes . . . . .	14
1.1.2 Relation d'incertitude . . . . .	17
1.2 Quantification de l'énergie . . . . .	18
1.2.1 Le corps noir et la constante de Planck . . . . .	19
1.2.2 Le modèle de Bohr . . . . .	23
1.3 Description quantique d'une particule . . . . .	25
1.3.1 Onde de de Broglie . . . . .	25
1.3.2 Principe de superposition . . . . .	26
1.3.3 Relation d'incertitude de Heisenberg . . . . .	27
1.4 Le paquet d'onde gaussien . . . . .	28
1.4.1 Fonction d'onde initiale . . . . .	28
1.4.2 Evolution dans le temps . . . . .	30
<b>2 Equations de mouvement</b>	<b>33</b>
2.1 Equation de Schrödinger . . . . .	33
2.1.1 Cas général et solutions stationnaires . . . . .	33
2.1.2 Lien avec la mécanique classique . . . . .	35
2.2 Particule dans un puits de potentiel . . . . .	36
2.2.1 Fonction d'onde et énergie . . . . .	37
2.2.2 Probabilité de présence . . . . .	39
2.3 Particule dans une boîte de potentiel . . . . .	41
2.3.1 Cas 1D . . . . .	41
2.3.2 Cas 3D . . . . .	43

2.4	Oscillateur harmonique . . . . .	44
2.4.1	Approche newtonienne . . . . .	44
2.4.2	Approche quantique . . . . .	45
2.5	Le microscope à effet tunnel . . . . .	48
2.5.1	La marche de potentiel . . . . .	49
2.5.2	La barrière de potentiel . . . . .	50
2.5.3	Principe du microscope . . . . .	52
<b>3</b>	<b>Mesure de grandeurs physiques</b>	<b>55</b>
3.1	Opérateurs et observables . . . . .	55
3.1.1	Définitions . . . . .	56
3.1.2	Quelques opérateurs . . . . .	57
3.1.3	Le moment cinétique . . . . .	59
3.2	Structure électronique des éléments chimiques . . . . .	63
3.2.1	Equation de Schrödinger . . . . .	64
3.2.2	Remplissage des couches électroniques . . . . .	66
3.3	Spectroscopie de la molécule HCl . . . . .	69
3.3.1	Règles de sélection . . . . .	70
3.3.2	Population des niveaux d'énergie . . . . .	72
<b>II</b>	<b>LE SOLIDE CRISTALLIN</b>	<b>75</b>
<b>4</b>	<b>Structures cristallines</b>	<b>79</b>
4.1	Réseaux et structures . . . . .	79
4.1.1	Réseau de Bravais . . . . .	79
4.1.2	Motif, rangées, plans . . . . .	82
4.2	Exemples de structures cristallines . . . . .	85
4.2.1	Chlorure de sodium et chlorure de césium . . . . .	85
4.2.2	Structures cubiques usuelles . . . . .	86
4.2.3	Structure hexagonale compacte (hc) . . . . .	89
4.3	Le carbone sous toutes ses formes . . . . .	90
4.3.1	Graphite et diamant . . . . .	91
4.3.2	Fullerène et nanotechnologies . . . . .	93
<b>5</b>	<b>Interaction avec une onde</b>	<b>95</b>
5.1	Réseau réciproque et facteur de structure . . . . .	97
5.1.1	Le réseau réciproque . . . . .	97
5.1.2	Loi de Bragg généralisée . . . . .	100
5.1.3	Zones de Brillouin . . . . .	103
5.1.4	Facteur de structure . . . . .	105

5.2	Analyse d'un spectre de diffraction . . . . .	108
5.2.1	Phases en présence . . . . .	108
5.2.2	Analyse d'une phase . . . . .	109
<b>6</b>	<b>Liaisons cristallines</b>	<b>113</b>
6.1	Différents types de liaisons . . . . .	113
6.1.1	Liaison de Van der Waals . . . . .	113
6.1.2	Liaison ionique ou hétéropolaire . . . . .	116
6.1.3	Liaison covalente ou homopolaire . . . . .	117
6.1.4	Liaison métallique . . . . .	119
6.1.5	Autres liaisons . . . . .	120
6.2	Phonons . . . . .	121
6.2.1	Vibration de réseaux monoatomiques . . . . .	121
6.2.2	Vibration de réseaux diatomiques . . . . .	123
6.2.3	Densité de modes . . . . .	125
6.2.4	Capacité calorifique du réseau d'un cristal . . . . .	127
6.3	Défauts dans les cristaux . . . . .	130
6.3.1	Défauts ponctuels . . . . .	131
6.3.2	Dislocations . . . . .	135
<b>III</b>	<b>LES ELECTRONS DANS UN SOLIDE CRISTALLIN</b>	<b>139</b>
<b>7</b>	<b>Modèle de Drude</b>	<b>143</b>
7.1	Description du modèle . . . . .	143
7.1.1	Densité du gaz et collisions . . . . .	144
7.1.2	Vitesse et énergie dans le gaz d'électrons . . . . .	146
7.2	Propriétés de conduction . . . . .	147
7.2.1	Conduction électrique . . . . .	147
7.2.2	Conduction thermique . . . . .	149
7.2.3	Loi de Wiedemann-Franz . . . . .	150
7.3	Transparence et opacité des métaux . . . . .	151
7.3.1	Equations d'interaction et de propagation . . . . .	151
7.3.2	Longueur d'onde de plasmon . . . . .	153
<b>8</b>	<b>Modèle de Sommerfeld</b>	<b>155</b>
8.1	Description du modèle . . . . .	155
8.1.1	Fonction d'onde et énergie . . . . .	156
8.1.2	Surface de Fermi . . . . .	157
8.2	Propriétés de conduction . . . . .	161
8.2.1	Electrons de conduction . . . . .	161

8.2.2	Capacité calorifique du matériau . . . . .	163
8.2.3	Loi de Wiedemann-Franz . . . . .	165
8.3	Energie d'une surface libre . . . . .	165
8.3.1	Redistribution des états électroniques . . . . .	166
8.3.2	Augmentation de l'énergie . . . . .	166
<b>9</b>	<b>Modèle de Bloch</b>	<b>169</b>
9.1	Description du modèle . . . . .	170
9.1.1	Fonction d'onde et énergie . . . . .	170
9.1.2	Apparition de bandes interdites . . . . .	173
9.2	Propriétés de conduction . . . . .	175
9.2.1	Surface de Fermi . . . . .	176
9.2.2	Métaux, semi-conducteurs et isolants . . . . .	177
9.3	Les semi-conducteurs . . . . .	179
9.3.1	Densité d'états . . . . .	181
9.3.2	Occupation des niveaux . . . . .	184
9.4	Propriétés de conduction des semi-conducteurs . . . . .	187
9.4.1	Semi-conducteur intrinsèque . . . . .	187
9.4.2	Semi-conducteur extrinsèque . . . . .	189
9.4.3	Relation d'Einstein . . . . .	192
9.4.4	Influence de la température . . . . .	193
<b>10</b>	<b>Applications</b>	<b>197</b>
10.1	Le cristal photonique . . . . .	198
10.1.1	Interaction avec une onde électromagnétique . . . . .	198
10.1.2	Apparition d'une bande interdite . . . . .	200
10.2	Le capteur à effet Hall . . . . .	201
10.2.1	Caractérisation de semi-conducteurs . . . . .	201
10.2.2	Capteurs de position . . . . .	203
10.3	La diode . . . . .	204
10.3.1	Jonction PN à l'équilibre . . . . .	204
10.3.2	Polarisation de la jonction . . . . .	208
10.4	Le transistor MOS . . . . .	211
10.4.1	Création du canal . . . . .	212
10.4.2	Calcul de la tension de seuil . . . . .	213
10.4.3	Peuplement du canal . . . . .	215
	<b>Références</b>	<b>219</b>
	<b>Index</b>	<b>223</b>