

SOMMAIRE

Chapitre I

QUELQUES IDÉES SIMPLES SUR LES SEMI-CONDUCTEURS.....	9
1. Définition et intérêt des semi-conducteurs.....	9
2. Une « approche chimique » du semi-conducteur.....	11
L'apport de la mécanique quantique.....	11
Approche chimique.....	12
3. Les états quantiques du solide cristallin parfait à une dimension	14
a. Méthode des électrons presque libres.....	14
b. Théorème de Bloch.....	18
c. Remplissage des niveaux.....	20

Chapitre II

ÉTATS QUANTIQUES DU SEMI-CONDUCTEUR PARFAIT.....	23
1. États quantiques du cristal tridimensionnel.....	23
a. Théorème de Bloch.....	25
b. Zone de Brillouin.....	27
c. Symétrie d'inversion des surfaces d'énergie constante....	27
d. Symétries des surfaces d'énergie constante.....	28
2. Dynamique de l'électron de Bloch. Moment cristallin.....	28
a. Moment véritable, vitesse de groupe.....	29
b. Théorème d'accélération dans l'espace réciproque.....	30
c. Masse effective, accélération dans l'espace réel.....	31
3. Métal, isolant, semi-conducteur.....	32
a. Densité d'états dans l'espace réciproque.....	32
b. Densité d'états en énergie.....	34
4. Détermination théorique des structures de bandes.....	35
a. L'approximation des liaisons fortes.....	35
Cristal cubique simple à un atome par maille.....	35
Cristal <i>AB</i> unidimensionnel.....	39
Chaîne linéaire distordue.....	42
b. Le développement en ondes planes.....	43
5. Les structures de bandes réelles.....	45
6. L'étude expérimentale des structures de bandes.....	47
a. Méthodes optiques : détermination de niveaux d'énergie..	47
b. La résonance cyclotron : mesure de masse effective.....	50
<i>Appendice II.1</i> : Élément de matrice d'un opérateur périodique entre deux états de Bloch.....	51
Périodicité dans l'espace à trois dimensions et décomposi- tion en série de Fourier.....	51
Action d'un opérateur périodique sur une fonction de Bloch.	51
Éléments de matrice d'un opérateur périodique.....	52
<i>Appendice II.2</i> : Symétries de la structure de bandes.....	54
Transformation de la fonction d'onde par les opérations de symétrie de l'espace direct.....	54
Symétrie des surfaces d'énergie constante.....	55
<i>Appendice II.3</i> : Structure de bandes des éléments de la colonne IV calculée par la méthode des combinaisons linéaires d'orbi-	

tales atomiques.....	56
Structure de bandes obtenue	58
Application : énergie de cohésion des semi-conducteurs de la colonne IV	59
<i>Appendice II.4 : La méthode k.p</i>	62

Chapitre III

ÉTATS EXCITÉS DU SEMI-CONDUCTEUR PUR ET ÉTATS QUANTIQUES DU SEMI-CONDUCTEUR IMPUR..... 67

1. Notion de trou.....	67
2. Les impuretés dans les semi-conducteurs	72
3. Bande d'impuretés.....	77
<i>Appendice III.1 : Problème sur la résonance cyclotron dans le silicium</i>	79
<i>Appendice III.2 : Les puits quantiques et les super-réseaux semi-conducteurs</i>	84
<i>Appendice III.3 : Les semi-conducteurs amorphes</i>	88

Chapitre IV

STATISTIQUE DES SEMI-CONDUCTEURS HOMOGENES..... 91

1. Occupation des niveaux électroniques.....	91
2. Occupation des trous.....	92
3. Détermination du potentiel chimique.....	92
4. Statistique du semi-conducteur pur ou intrinsèque.....	93
5. Statistique du semi-conducteur renfermant des impuretés : notion de porteurs majoritaires et minoritaires.....	98
Semi-conducteur de type <i>n</i>	98
Semi-conducteur dopé <i>p</i>	100
6. Semi-conducteur compensé à température moyenne	101
7. Semi-conducteur à basse température.....	103
8. Une application : le thermomètre semi-conducteur	106
9. La croissance de monocristaux purs.....	107
<i>Appendice IV.1 : Nombre d'occupation d'un niveau donneur</i>	110
<i>Appendice IV.2 : Comment fabriquer un bon substrat semi-isolant pour la microélectronique (problème)</i>	112

Chapitre V

PHÉNOMÈNES DE TRANSPORT DANS LES SEMI-CONDUCTEURS 117

1. Introduction.....	117
2. Le modèle de Drude de la conductivité et de la diffusion.....	118
<i>a.</i> Conductivité électrique.....	119
<i>b.</i> Notion de diffusion	121
<i>c.</i> La diffusion dans le modèle de Drude	121
<i>d.</i> Limites du modèle de Drude	123
3. Traitement semi-classique du transport.....	124
<i>a.</i> L'équation de Boltzmann dans les semi-conducteurs.....	125
<i>b.</i> La conductivité.....	126
<i>c.</i> La diffusion.....	129

<i>d.</i> Résumé.....	131
4. La mobilité dans les semi-conducteurs.....	131
<i>a.</i> Les mécanismes de collisions.....	131
<i>b.</i> Le dopage sélectif des super-réseaux.....	133
<i>Appendice V.1</i> : Problème sur la conductivité d'un semi-conducteur sous champ magnétique dans le modèle de Drude. Effet Hall et magnéto-résistance.....	135

Chapitre VI

EFFETS DE LA LUMIÈRE	141
1. L'absorption de la lumière par les semi-conducteurs.....	141
<i>a.</i> Règle d'or de Fermi.....	143
<i>b.</i> Règles de sélection.....	145
<i>c.</i> Calcul du coefficient d'absorption.....	146
<i>d.</i> Excitons.....	148
2. La recombinaison.....	149
Les processus de recombinaison.....	153
3. La photoconductivité et ses applications.....	156
<i>a.</i> Détection du rayonnement électromagnétique.....	156
<i>b.</i> Electro-photographie.....	157
<i>c.</i> Le tube Vidicon.....	157
<i>Appendice VI.1</i> : Système quantique soumis à une perturbation dépendant sinusoidalement du temps.....	159
<i>Appendice VI.2</i> : Calcul de la probabilité de recombinaison radiative.....	163

Chapitre VII

INJECTION DE PORTEURS PAR LA LUMIÈRE	167
1. Équations de base de fonctionnement des dispositifs semi-conducteurs.....	167
2. La neutralité électrique.....	168
3. Injection ou extraction de porteurs minoritaires dans un barreau semi-conducteur de dopage homogène.....	169
<i>Appendice VII.1</i> : La quasi-neutralité électrique.....	171
<i>Appendice VII.2</i> : Problème sur la photoexcitation, la recombinaison et la photoconductivité des semi-conducteurs.....	173

Chapitre VIII

LA JONCTION $p-n$	179
1. Introduction. Semi-conducteur inhomogène.....	179
2. La jonction $p-n$ à l'équilibre.....	181
<i>a.</i> Discussion qualitative.....	182
<i>b.</i> Différence de potentiel entre les régions p et n	183
<i>c.</i> Calcul de la charge d'espace.....	184
<i>d.</i> Courants dans la jonction à l'équilibre.....	187
3. La jonction hors d'équilibre.....	187
<i>a.</i> Répartition des énergies.....	188
<i>b.</i> Calcul du courant.....	190
<i>c.</i> Répartition des courants et des concentrations.....	193

d. Capacité d'une jonction.....	197
e. Claquage de la jonction $p-n$	198
f. Réponse d'une jonction $p-n$ aux transitoires.....	199
<i>Appendice VIII.1</i> : Problème sur la jonction $p-n$ en régime non stationnaire et ses applications en haute fréquence.....	201

Chapitre IX

APPLICATIONS DE LA JONCTION $p-n$ ET DISPOSITIFS DISSYMMÉTRIQUES	213
1. Applications de la jonction $p-n$	213
a. Cellules photovoltaïques et cellules solaires.....	213
b. Diodes électroluminescentes et lasers à semi-conducteur	215
2. Jonction métal/semi-conducteur à l'équilibre.....	216
3. Jonction métal/semi-conducteur hors d'équilibre	221
4. Surface d'un semi-conducteur	223
5. La photo-émission à partir de semi-conducteur.....	225
6. Hétérojonction	226

Chapitre X

NOTIONS SUR QUELQUES DISPOSITIFS DE L'ELECTRONIQUE ...	229
1. Le transistor à jonctions	229
Application : l'amplificateur à transistor	231
2. Le transistor à effet de champ	233
a. Le F.E.T. à jonctions.....	234
b. Le M.O.S.F.E.T.	235
3. Une application du M.O.S.F.E.T. : le dispositif à charges couplées ou à transfert de charges	238
4. Notions sur l'intégration et la technologie planaire.....	239
5. L' « ingénierie » de structures de bandes.....	242
6. Limites physiques en électronique digitale.....	243
<i>Appendice X.1</i> : Problème sur le transistor $n-p-n$	245
<i>Appendice X.2</i> : Problème sur le transistor à effet de champ à jonctions ou J.F.E.T.....	253
<i>Appendice X.3</i> : Problème sur la structure M.O.S. (Métal, Oxyde, Semi conducteur).....	262
Valeurs des principales constantes physiques	277
Quelques propriétés physiques des semi-conducteurs	278
Bibliographie	279
Index	280