

# TABLE DES MATIERES

## CHAPITRE I : ELEMENTS DE CRISTALLOGRAPHIE

<b>1 - Introduction aux réseaux cristallins</b>	1
<b>2 - Réseaux cristallins</b>	
2.1 Le cristal	2
2.2 Rangée, nœud, maille, indices de Miller	3
<b>3 - Réseau réciproque</b>	4
<b>4 - Zone de Brillouin</b>	5
<b>5 - Diffraction dans un cristal</b>	6
<b>6 - Représentation du cristal de silicium</b>	7
<b>Exercices du chapitre I</b>	11
<b>Réponses aux exercices du chapitre I</b>	12

## CHAPITRE II : ELECTRONS DANS UN CRISTAL

<b>1 - Potentiel d'un électron dans un cristal</b>	13
<b>2- Modèle de l'électron libre dans un cristal. Modèle de Sommerfeld</b>	14
<b>3 - Modèle de l'électron quasi-libre dans un cristal</b>	15
3.1. Considération sur la forme du potentiel	15
3.2. Considération sur la fonction d'onde	15
3.3 Méthode de calcul	15
3.4 Résolution simplifiée dans le cas d'une perturbation de potentiel	17
<b>4 – Conclusion sur les diagrammes d'énergie</b>	
4.1 Diagramme des phases d'un cristal réel	19
4.2 Gap direct et gap indirect	20
4.3 Remplissage des bandes d'énergie	21
<b>Exercices du chapitre II</b>	22
<b>Réponses aux exercices du chapitre II</b>	23

## CHAPITRE III : NOTIONS DE STATISTIQUE. SYSTEMES DE PARTICULES

<b>1 - Pression et énergie d'une molécule dans un gaz parfait</b>	
1.1 Introduction à la notion de statistique	25
1.2 Calcul de la pression	25
1.3 Energie cinétique moyenne	27
<b>2 - Distribution d'énergie des molécules dans un gaz parfait</b>	
2.1 Probabilité des collisions	27
2.2 Calcul du facteur universel, $\beta$	29
<b>3 - Distribution de Maxwell</b>	
3.1 Distribution maxwellienne des vitesses	30
3.2 Distribution des énergies	30
3.3 Conclusion	32
<b>4 - Fonction de distribution de Fermi-Dirac</b>	
4.1 Statistique de Fermi-Dirac	32
4.2 Distribution de Fermi-Dirac	35

4.3 Allure de la fonction de Fermi-Dirac	36
<b>Exercices du chapitre III</b>	38
<b>Réponses aux exercices du chapitre III</b>	39

## CHAPITRE IV : INTRODUCTION A LA PHYSIQUE DU SEMICONDUCTEUR

<b>1 - Bandes d'énergie</b>	
1.1 Semiconducteur parfait à $T=0K$	40
1.2 Statistique de remplissage des niveaux d'énergie	41
1.3 Semiconducteur à une température $T \neq 0$	44
<b>2 - Porteurs de charge</b>	
2.1 Notion de trous	45
2.2 Masse effective des porteurs de charge	46
2.3 Concentrations des porteurs quasi-libres dans les bandes d'énergie. Densités d'états électroniques	48
2.4 Concentration intrinsèque et niveau de Fermi à l'équilibre thermodynamique	51
<b>3 - Semiconducteur extrinsèque</b>	
3.1 Notion de dopage	54
3.2 Concentration des porteurs quasi-libres dans un semiconducteur dopé	55
3.3 Position du niveau de Fermi – Diagrammes d'énergie	59
<b>4 - Génération –recombinaison – Durée de vie des porteurs</b>	
4.1 Génération-recombinaison thermique	63
4.2 Génération-lumineuse	63
4.3 Recombinaison radiatives	63
4.4 Niveaux pièges dans un semiconducteur	63
4.5 Résultats de la théorie simplifiée de Shockley-Read-Hall	64
4.6 Recombinaison Auger	66
4.7 Durée de vie totale	66
<b>Exercices du chapitre IV</b>	68
<b>Réponses aux exercices du chapitre IV</b>	69

## CHAPITRE V : PHENOMENES DE TRANSPORT

<b>1 - Conductivité – Dérive dans un champ électrique</b>	
1.1 Mobilité – Conductivité	71
1.2 Densité totale de courant de dérive dans un champ électrique. Résistivité	74
<b>2 - Diffusion des porteurs</b>	
2.1 Loi de Fick. Coefficient de diffusion	75
2.2 Densités de courant de diffusion	76
<b>.3 - Densités de courant totales dans un semiconducteur</b>	77
<b>4 - Relation d'Einstein</b>	77
<b>5 - Equations de continuité</b>	78
<b>6 - Equation de Poisson</b>	79
<b>7 - Densités de courant généralisées</b>	80
<b>8 – Piézo-résistance et piézo-électricité</b>	80
8.1 Considération mécanique des matériaux cristallins. Module de Young	81
8.2 Piézo-résistance et piézoélectricité	81
<b>9 – Effet Hall</b>	
9.1 Analyse de l'effet	82
9.2 Mobilité de Hall	84

<b>10 – Conclusion</b>	84
<b>Exercices du chapitre V</b>	85
<b>Réponses aux exercices du chapitre V</b>	87

## **CHAPITRE VI : JONCTION PN – DIODES A JONCTION**

<b>1 - Constitution</b>	
1.1 Réalisation physique et définitions	89
1.2 Concentrations et types de porteurs dans la jonction	89
<b>2 - Etude de la jonction pn à l'équilibre thermodynamique</b>	
2.1 Mouvement de charges au contact	90
2.2 Tension de contact ou tension de diffusion	92
2.3 Diagramme d'énergie	92
2.4 Champ électrique et dimension de la zone de charge d'espace	93
<b>3 - Etude de la jonction pn polarisée</b>	
3.1 Analyse physique du problème	95
3.2 Polarisation directe et inverse	96
3.3 Profils de concentrations des porteurs – Densités de courant	96
3.4 Effet de la recombinaison : diode courte et diode longue	102
3.5 Caractéristique – Résistance différentielle	107
3.6 Capacité de la jonction	107
3.7 Jonction fortement polarisée en inverse	108
<b>4 - Jonctions appliquées aux diodes</b>	
4.1 Réalisation physique des diodes	109
4.2 Diodes varicap	109
4.3 Diode tunnel (Esaki)	109
4.4 Photodiodes	110
4.5 Diodes électroluminescentes	111
<b>Exercices du chapitre VI</b>	113
<b>Réponses aux exercices du chapitre VI</b>	115

## **CHAPITRE VII : LE TRANSISTOR BIPOLAIRE**

<b>1 - Constitution</b>	
1.1 Réalisation physique et définitions	117
1.2 Profil de dopage	118
1.3 Diagramme d'énergie de la structure à l'équilibre thermodynamique	119
<b>2 - Principe de fonctionnement</b>	
2.1 Régime de conduction	120
2.2 Diagramme d'énergie en conduction normale	120
2.3 Effet transistor. Bilan des injections. Nécessité d'une base courte	121
2.4 Effet des recombinaisons	123
2.5 Bilan des courants	123
2.6 Gain en courant du transistor	125
2.7 Efficacité d'injection	125
2.8 Caractéristique en fonctionnement normal	126
<b>3 - Effets des recombinaisons</b>	
3.1 Recombinaison dans l'émetteur	126
3.2 Recombinaison dans la base – facteur de transport	127
3.3 Effet des recombinaisons sur le gain en base commune	127
3.4 Recombinaisons dans la zone de charge d'espace de la jonction émetteur-base	128
3.5 Conséquences sur les courants ; Caractéristiques bas niveau	129

<b>4 - Autres effets et limites physiques principales</b>	
4.1 Effet de la polarisation collecteur-base : effet Early	130
4.2 Tension de claquage de la jonction collecteur-base	131
4.3 Effet de la forte injection	132
4.4 Effet du dopage de la base et de l'émetteur	134
<b>5 – Schémas équivalents électriques du transistor</b>	
5.1 Schéma équivalent en petits signaux basse fréquence	136
5.2 Schéma équivalent en petits signaux haute fréquence	137
5.3 Eléments parasites dans un transistor bipolaire	138
<b>6 – Conclusion</b>	139
<b>Exercices du chapitre VII</b>	140
<b>Réponses aux exercices du chapitre VII</b>	142

## CHAPITRE VIII : LE TRANSISTOR A EFFET DE CHAMP A GRILLE ISOLEE.

### TRANSISTOR MOS

#### 1 - Constitution

1.1 Réalisation physique et définitions	143
1.2 Différents types de structures de base	144
1.3 Symboles des différentes structures de base	145
1.4 Réalisation physique	145

#### 2 - Principe de fonctionnement

2.1 Sans polarisation de grille par rapport au substrat	146
2.2 La grille est polarisée positivement par rapport au substrat	147
2.3 La polarisation de la grille atteint la tension de seuil : $V_{GS} \geq V_{th}$	147
2.4 Caractéristique $I_{DS}(V_{DS})$ d'un transistor NMOS <i>normally off</i> .	148

#### 3 - Analyse physique de la structure métal oxyde semiconducteur idéale

3.1 Diagramme d'énergie à l'équilibre thermodynamique	151
3.2 Régime d'accumulation	151
3.3 Régime de désertion	153
3.4 Régime de faible inversion	153
3.5 Régime de forte inversion	154
3.6 Résolution de l'équation de Poisson	155
3.7 Concentration de charge en surface en fonction de la polarisation de grille	157
3.8 Variation de $\psi_s$ en fonction de la polarisation de grille	159
3.9 Variation du champ électrique dans la structure MOS	160
3.10 Tension de seuil de la structure MOS	161
3.11 Capacité équivalente de la structure MOS	161

#### 4 - Caractéristique de transistor MOS idéal

4.1 Expression de la charge dans le canal	162
4.2 Calcul du courant	164
4.3 Caractéristique sous le seuil	164

#### 5 – Schémas équivalents électriques du MOS

5.1 Schéma équivalent en petits signaux basse fréquence	166
5.2 Schéma équivalent en petits signaux haute fréquence	167
5.3 Eléments parasites dans un transistor MOS intégré	167

#### 6 - Défauts cristallins et de surface

6.1 Différents types de défauts	168
6.2 Etats énergétiques	168
6.3 Structures MOS non cristallines	169
6.4 Conclusion	170

<b>Exercices du chapitre VIII</b>	171
<b>Exercices du chapitre VIII</b>	173

**CHAPITRE IX : LE TRANSISTOR A EFFET DE CHAMP A JONCTION : TRANSISTORS JFET**

<b>1 - Constitution</b>	175
<b>2 - Symboles</b>	176
<b>3 - Principe de fonctionnement</b>	
3.1 La tension drain-source est maintenue très faible	177
3.2 La tension drain-source polarise en inverse la jonction drain-grille	178
3.3 La tension drain-grille dépasse la tension de pincement	179
3.4 Conclusion sur le comportement	180
<b>4 - Modélisation simplifiée de la structure</b>	
4.1 La tension drain-source est maintenue très faible : régime linéaire	181
4.2 Caractéristique statique jusqu'au régime de saturation	182
4.3 Pincement et saturation du courant	183
<b>5 - Schémas équivalents</b>	
5.1 Schéma équivalent en source commune basse fréquence	184
5.2 Schéma équivalent en petits signaux haute fréquence	184
<b>6 - Conclusion</b>	185
<b>Exercices du chapitre IX</b>	186
<b>Réponses aux exercices du chapitre IX</b>	187

**CHAPITRE X : LA DIODE METAL-SEMICONDUCTEUR : DIODE SCHOTTKY**

<b>1 - Constitution</b>	189
<b>2 - Diagrammes des bandes d'énergie</b>	
2.1 Travail de sortie	190
2.2 Affinité électronique	190
2.2 Diagramme d'énergie du contact métal-semiconducteur	191
<b>3 - Etude du contact Schottky : zone de charge d'espace</b>	
3.1 Zone désertée	193
3.2 Charge totale de la zone de charge d'espace dans le semiconducteur	194
3.3 Capacité de la zone de charge d'espace	195
<b>4 - Effet d'abaissement de barrière : effet Schottky</b>	
4.1 Electron dans le vide devant un plan métallique	196
4.2 Abaissement de barrière ; effet Schottky	197
<b>5 - Transport à travers la jonction</b>	
5.1 Considérations générales	198
5.2 Conduction des porteurs majoritaires	200
5.3 Théorie thermoïonique	201
5.4 Théorie de la diffusion	203
5.5 Théorie mixte, thermoïonique-diffusion	204
5.6 Porteurs minoritaires	204
<b>6 - Conclusion</b>	205
<b>Exercices du chapitre X</b>	206
<b>Réponses aux exercices du chapitre X</b>	207

<b>Problèmes de synthèse</b>	
Sujet 1 : Analyse d'une diode intégrée dans une technologie submicronique	209
Sujet 2 : Transistor bipolaire NPN intégré	212
Sujet 3 : Transistor PMOS dans une technologie CMOS submicronique	214
Sujet 4 : NMOS de puissance à canaux verticaux	217
Sujet 5 : Transistor MOS parasite d'un transistor à effet de champ à jonction	220
<b>Réponses aux problèmes de synthèse</b>	
Sujet de synthèse 1 :	223
Sujet de synthèse 2 :	225
Sujet de synthèse 3 :	227
Sujet de synthèse 4 :	229
Sujet de synthèse 5 :	231
<b>Quelques constantes physiques importantes</b>	233
<b>Tableau de classification périodique des éléments</b>	234
<b>Index</b>	235
<b>Références bibliographiques</b>	239