

SOMMAIRE

1 THÉORIE DES BANDES D'ÉNERGIE D'UN SEMI-CONDUCTEUR

1.1	L'électron dans un cristal	14
1.1.1	Modèle de Sommerfeld.....	14
1.1.2	Bandes d'énergie (approche intuitive).....	16
1.1.3	Calcul des bandes d'énergie.....	17
1.1.4	Distinction métal-isolant-semi-conducteur.....	24
1.1.5	Notion de trou.....	26
1.1.6	Masse effective de l'électron dans un cristal.....	27
1.1.7	Densité d'états dans les bandes permises.....	30
1.2	Semi-conducteurs intrinsèques	33
1.3	Semi-conducteurs extrinsèques	35
1.3.1	Ionisation des impuretés.....	36
1.3.2	Équilibre électrons-trous.....	37
1.3.3	Calcul de la position du niveau de Fermi.....	38
1.3.4	Semi-conducteurs dégénérés.....	40
1.4	Alignement des niveaux de Fermi	41
	<i>Exercices</i>	41
1.5	Bibliographie	45

2 THÉORIE DE LA CONDUCTIVITÉ ÉLECTRIQUE ET ÉQUATIONS DE TRANSPORT

2.1	Dérive des électrons dans un champ électrique	48
2.2	Mobilité	49
2.3	Courant de dérive	51
2.3.1	Effet Hall.....	52
2.4	Courant de diffusion	54
2.5	Équations de dérive-diffusion	55
2.5.1	Relations d'Einstein.....	55
2.6	Équations de transport	56
2.7	Quasi-niveaux de Fermi	59
	<i>Exercices</i>	59
2.8	Bibliographie	62

3	PHÉNOMÈNES DE GÉNÉRATION ET DE RECOMBINAISON	
3.1	Introduction	64
3.2	Transitions directes et indirectes	65
3.3	Centres de génération/recombinaison	67
3.4	Durée de vie des porteurs excédentaires	69
3.4.1	Exemple	69
3.5	Recombinaison SRH	71
3.6	Recombinaison en surface	75
	<i>Exercices</i>	75
3.7	Bibliographie	77
4	LA JONCTION PN	
4.1	Introduction	80
4.2	Jonction PN à l'équilibre	81
4.3	Jonction PN polarisée	87
4.4	Calcul du courant	89
4.4.1	Diode idéale (courant de diffusion)	92
4.4.2	Courant de génération/recombinaison	95
4.4.3	Claquage de la jonction	96
4.5	Capacité de la jonction PN	97
4.5.1	Capacité de transition	98
4.5.2	Capacité de diffusion	99
4.6	Modèles de la jonction PN	100
4.6.1	Modèle « grands signaux » à basse fréquence	100
4.6.2	Modèle « petits signaux » à basse fréquence	101
4.6.3	Modèle « petits signaux » à haute fréquence	102
	<i>Exercices</i>	102
4.7	Bibliographie	108
5	LA DIODE SCHOTTKY	
5.1	Diagramme de bandes	110
5.2	Extension de la zone de déplétion	112
5.3	Variation de la barrière de potentiel avec la tension appliquée ..	112
5.4	Mécanismes de conduction	114
5.5	Influence des états d'interface	114
5.6	Comparaison avec la diode à jonction PN	115
5.7	Bibliographie	118
6	LE JFET	
6.1	Bibliographie	125

7	LE MESFET	
7.1	Bibliographie	130
8	LE TRANSISTOR À BASE PERMÉABLE	
8.1	Bibliographie	134
9	LE TRANSISTOR MOS	
9.1	Introduction et principes de base.....	136
9.2	La capacité MOS.....	138
9.2.1	Accumulation	139
9.2.2	Déplétion.....	142
9.2.3	Inversion	144
9.3	Tension de seuil (1)	148
9.3.1	Tension de bandes plates.....	148
9.3.2	Tension de seuil (2).....	150
9.4	Calcul du courant dans le transistor MOS.....	150
9.4.1	Effet de substrat.....	155
9.4.2	Simplification du modèle.....	157
9.5	Mobilité de surface.....	159
9.6	Saturation de la vitesse des porteurs.....	162
9.7	Courant sous le seuil.....	164
9.8	Modulation de la longueur du canal.....	168
9.9	Modélisation numérique du transistor MOS.....	169
9.10	Effets liés à la réduction des dimensions	174
9.11	Exemples d'applications (portes logiques)	177
9.12	Dégradation du transistor MOS par porteurs chauds.....	179
9.12.1	Règles d'échelle.....	179
9.12.2	Électrons chauds	181
9.12.3	Courant de substrat	181
9.12.4	Courant de grille	182
	<i>Exercices</i>	182
9.13	Bibliographie	186
10	LE CCD	
10.1	Bibliographie	193

11 LE TRANSISTOR BIPOLAIRE

11.1	Introduction et principes de base	196
11.1.1	Exemple d'utilisation	200
11.2	Fabrication du transistor bipolaire	204
11.3	Modèle d'Ebers et Moll	206
11.3.1	Rendement d'émetteur	213
11.3.2	Facteur de transport dans la base	214
11.4	Régimes de fonctionnement	216
11.5	Modèle de transport	217
11.6	Transistor à dopage inhomogène (Modèle de Gummel-Poon)	219
11.6.1	Gain en courant	222
11.7	Effet Early	227
11.8	Variation du gain en fonction du courant	230
11.8.1	Recombinaison dans la jonction E-B	230
11.8.2	Effet Kirk	232
11.9	Résistance dans la base	235
11.10	Simulation numérique du transistor bipolaire	235
11.11	Claquage de la jonction de collecteur	239
11.11.1	Base commune	239
11.11.2	Émetteur commun	239
11.12	Modèle à contrôle par la charge	241
11.12.1	Régime actif	241
11.12.2	Modèle grands signaux (régime quelconque)	245
11.12.3	Modèle petits signaux	246
	<i>Exercices</i>	246
11.13	Bibliographie	250

12 LE THYRISTOR

12.1	Thyristor à contact de gâchette non rectifiant	252
12.1.1	Déclenchement	253
12.2	Thyristor à gâchette amplificatrice	257
12.3	Thyristor GTO	258
12.4	Le triac	259
12.5	Bibliographie	261

13 DISPOSITIFS À HÉTÉROJONCTIONS

13.1	Notion d'hétérojonction	264
13.1.1	Diagramme de bandes	265
13.2	HBT	267
13.3	HEMT	268
13.4	Dispositifs photoniques	271
13.4.1	LED	271
13.4.2	Diode laser	272
13.5	Bibliographie	276

14 DISPOSITIFS À EFFET QUANTIQUE

14.1	Diode tunnel	278
14.2	Dispositifs à faible dimensionnalité	282
14.2.1	Bandes d'énergie	283
14.2.2	Calcul de la densité d'états	288
14.2.3	Calcul du courant	292
	<i>Exercice</i>	292
14.3	Bibliographie	295

15 PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

15.1	Matériaux semi-conducteurs	298
15.2	Fabrication et raffinage du silicium	299
15.3	Techniques de dopage	301
15.3.1	Implantation ionique	302
15.3.2	Diffusion des dopants	304
15.3.3	Dopage par source gazeuse	307
15.4	Oxydation	308
15.5	Dépôt chimique en phase vapeur	313
15.5.1	Épitaxie	313
15.5.2	Dépôt de couches diélectriques	314
15.6	Photolithographie	315
15.7	Gravure	320
15.8	Métallisation	322
15.8.1	Contact ohmique	322
15.8.2	Déposition du métal	323
15.8.3	Siliciures métalliques	323
	<i>Exercices</i>	323
15.9	Bibliographie	326

13 DISPOSITIFS À HÉTÉROJONCTIONS

13.1	Notion d'hétérojonction	264
13.1.1	Diagramme de bandes	265
13.2	HBT	267
13.3	HEMT	268
13.4	Dispositifs photoniques	271
13.4.1	LED	271
13.4.2	Diode laser	272
13.5	Bibliographie	276

14 DISPOSITIFS À EFFET QUANTIQUE

14.1	Diode tunnel	278
14.2	Dispositifs à faible dimensionnalité	282
14.2.1	Bandes d'énergie	283
14.2.2	Calcul de la densité d'états	288
14.2.3	Calcul du courant	292
	<i>Exercice</i>	292
14.3	Bibliographie	295

15 PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

15.1	Matériaux semi-conducteurs	298
15.2	Fabrication et raffinage du silicium	299
15.3	Techniques de dopage	301
15.3.1	Implantation ionique	302
15.3.2	Diffusion des dopants	304
15.3.3	Dopage par source gazeuse	307
15.4	Oxydation	308
15.5	Dépôt chimique en phase vapeur	313
15.5.1	Épitaxie	313
15.5.2	Dépôt de couches diélectriques	314
15.6	Photolithographie	315
15.7	Gravure	320
15.8	Métallisation	322
15.8.1	Contact ohmique	322
15.8.2	Déposition du métal	323
15.8.3	Siliciures métalliques	323
	<i>Exercices</i>	323
15.9	Bibliographie	326

16 FILIÈRES TECHNOLOGIQUES

16.1 Procédé nMOS	328
16.2 Procédé CMOS	333
16.3 Procédé bipolaire (NPN)	338
16.4 Bibliographie	343

17 CONSTANTES PHYSIQUES ET DONNÉES NUMÉRIQUES

ANNEXES	347
17.1 Notions de mécanique quantique	348
17.2 Notions de cristallographie	349
SOLUTIONS AUX EXERCICES	351
INDEX	385