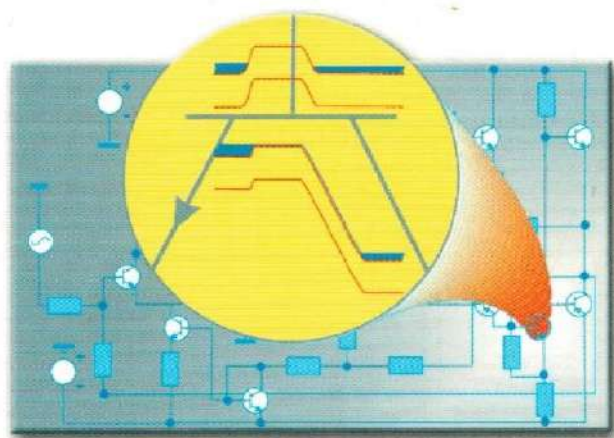


Henry Mathieu

2^e CYCLE • ÉCOLES D'INGÉNIEURS

Physique des semiconducteurs et des composants électroniques

Cours



5^e édition

DUNOD

2-621-10-1

2-621-10-1

Hg



Physique des semiconducteurs et des composants électroniques

Henry Mathieu

Professeur à l'université Montpellier II

DUNOD

Table des matières

AVANT-PROPOS	XV
I. NOTIONS FONDAMENTALES SUR LA PHYSIQUE DES SEMICONDUCTEURS.....	1
1.1. Structure cristalline	1
1.1.1. Géométrie du réseau cristallin	3
1.1.2. Opérations de symétrie	3
1.1.3. Systèmes cristallins.....	3
1.1.4. Plans réticulaires — Indices de Miller.....	4
1.1.5. Le système cubique.....	5
1.1.6. Réseau réciproque — Zones de Brillouin.....	6
1.1.7. Densité d'états dans l'espace réciproque	7
1.1.8. Théorème de Bloch.....	8
1.2. Etats électroniques dans les semiconducteurs	
Structure de bandes d'énergie	10
1.2.1. Des orbitales atomiques à la structure de bandes.....	10
1.2.2. Méthodes de calcul de la structure de bandes d'énergie	22
1.2.3. Caractéristiques de la structure de bandes d'énergie	26
1.2.4. Concept de masse effective.....	31
1.2.5. Densité d'états dans les bandes permises.....	36
1.3. Statistiques — Fonction de distribution des électrons	40
1.3.1. Statistique de Boltzmann	41
1.3.2. Statistiques quantiques.....	43
1.3.3. Signification physique des multiplicateurs de Lagrange.....	47
1.3.4. Fonction de Fermi.....	50
1.4. Le semiconducteur à l'équilibre thermodynamique	51
1.4.1. Semiconducteur non dégénéré	51
1.4.2. Semiconducteur dégénéré	54
1.4.3. Semiconducteur intrinsèque.....	56
1.4.4. Semiconducteur extrinsèque à la température ambiante	57
1.4.5. Evolution avec la température	61
1.5. Le semiconducteur hors équilibre	66
1.5.1. Courants dans le semiconducteur.....	66
1.5.2. Génération-Recombinaison — Durée de vie des porteurs.....	78
1.5.3. Equations d'évolution.....	84
1.5.4. Notion de neutralité électrique.....	87
1.6. Interface entre deux matériaux différents	95
1.6.1. Travail de sortie — Affinité électronique.....	95

1.6.2. Effet Schottky	98
1.6.3. Etats de surface et d'interface	100
1.6.4. <i>Emission thermoélectronique dans les hétérostructures</i>	102
1.6.5. Emission de champ	107
2. JONCTION pn	109
2.1. Jonction abrupte à l'équilibre thermodynamique	109
2.1.1. Charge d'espace	109
2.1.2. Tension de diffusion	111
2.1.3. Potentiel et champ électriques dans la zone de charge d'espace	113
2.1.4. Largeur de la zone de charge d'espace	114
2.1.5. Signification de la longueur de Debye	115
2.2. Jonction abrupte polarisée	117
2.2.1. Distribution des porteurs	118
2.2.2. Courants de porteurs minoritaires	122
2.2.3. Densité de courant — Caractéristique	124
2.3. Jonction à profil de dopage quelconque	127
2.3.1. Régions n et p très courtes	127
2.3.2. Jonction quelconque	130
2.4. Capacités de la jonction pn	130
2.4.1. Jonction polarisée en inverse — Capacité de transition	130
2.4.2. Jonction en régime alternatif — Capacité de diffusion	132
2.5. Mécanismes de génération-recombinaison dans la zone de charge d'espace	136
2.5.1. Polarisation inverse — Courant de génération	138
2.5.2. Polarisation directe — Courant de recombinaison	139
2.6. Jonction en régime transitoire — Temps de recouvrement	140
2.7. Claquage de la jonction polarisée en inverse	147
2.7.1. Effet Zener — Effet d'avalanche	147
2.7.2. Diode à avalanche — Facteur de multiplication	149
2.7.3. Diode IMPATT	154
2.8. Diode tunnel	163
2.8.1. Principe de fonctionnement	163
2.8.2. Caractéristique	165
2.9. Jonction en régime de forte injection	172
2.9.1. Injection de porteurs	172
2.9.2. Densité de courant	175
2.9.3. Chute de tension dans les régions neutres	177
3. TRANSISTORS BIPOLAIRES	183
3.1. Effet transistor	183
3.2. Equations d'Ebers-Moll	185
3.2.1. Courants de porteurs minoritaires dans l'émetteur et le collecteur	185
3.2.2. Courants de porteurs minoritaires dans la base	187
3.2.3. Courants d'émetteur et de collecteur	188
3.3. Différents types de profil de dopage	190
3.3.1. Transistor à dopages homogènes	190
3.3.2. Transistor drift	192

3.4. Effet Early	195
3.4.1. Facteur de réaction d'Early	195
3.4.2. Equations dynamiques du transistor	197
3.5. Réseaux de caractéristiques	199
3.5.1. Montage base commune	199
3.5.2. Montage émetteur commun	202
3.5.3. Montage collecteur commun	205
3.6. Transistors spécifiques	205
3.6.1. Transistor de puissance	205
3.6.2. Transistor balistique — SMST	207
3.7. Structure pnpn-Thyristor	208
3.7.1. Principe de fonctionnement	208
3.7.2. Diode de Shockley	212
3.7.3. Thyristor	218
3.7.4. Triac	221
3.8. Transistor unijonction — UJT	222
3.9. Transistor à hétérojonction — HBT	228
3.9.1. Principe de fonctionnement	228
3.9.2. Courants d'émetteur et de collecteur	234
3.9.3. Transistor à base graduelle	237
3.9.4. Fréquence de coupure	238
4. CONTACT METAL-SEMICONDUCTEUR — DIODE SCHOTTKY	241
4.1. Diagramme de bandes d'énergie	242
4.1.1. $\Phi_m = \Phi_s$	242
4.1.2. $\Phi_m > \Phi_s$	243
4.1.3. $\Phi_m < \Phi_s$	247
4.2. Zone de charge d'espace	252
4.2.1. Champ et potentiel électriques	252
4.2.2. Capacité	254
4.3. Caractéristique courant-tension	256
4.3.1. Courant d'émission thermoélectronique	257
4.3.2. Courant de diffusion	259
4.3.3. Combinaison des deux courants	262
5. STRUCTURE METAL-ISOLANT-SEMICONDUCTEUR	
CAPACITE MOS	267
5.1. Diagramme de bandes d'énergie	267
5.1.1. Structure métal-vide-semiconducteur	267
5.1.2. Structure métal-isolant-semiconducteur — MIS	272
5.2. Structure MIS idéale	276
5.2.1. Charge d'espace	277
5.2.2. Potentiel et champ électriques	283
5.2.3. Tension de seuil	286
5.3. Structure MIS en régime transitoire	287
5.3.1. Régime de déplétion profonde	287
5.3.2. Temps de stockage	289
5.4. Capacité de la structure	291
5.4.1. Régime d'accumulation	293

5.4.2. Régime de déplétion et de faible inversion.....	293
5.4.3. Régime de forte inversion.....	294
5.5. Potentiel de surface $V_s(V_G)$.....	297
6. HETEROJONCTIONS.....	299
6.1. Diagramme de bandes d'énergie.....	299
6.1.1. Diagramme énergétique loin de la jonction.....	300
6.1.2. Etats d'interface.....	303
6.1.3. Diagramme énergétique au voisinage de la jonction.....	303
6.2. Hétérojonction à l'équilibre thermodynamique.....	309
6.3. Hétérojonction polarisée.....	313
6.3.1. Modèle d'émission thermoélectronique.....	314
6.3.2. Modèle de diffusion.....	327
6.3.3. Courant tunnel — Courant de recombinaison.....	333
7. TRANSISTORS A EFFET DE CHAMP.....	337
7.1. Transistor à effet de champ à jonction — JFET.....	338
7.1.1. Structure et principe de fonctionnement.....	338
7.1.2. Equations fondamentales du JFET.....	340
7.1.3. Réseau de caractéristiques.....	346
7.2. Transistor à effet de champ à barrière de Schottky — MESFET.....	350
7.2.1. Structure et spécificité.....	350
7.2.2. Courant de drain.....	352
7.2.3. Tension de saturation — Courant de saturation.....	357
7.2.4. Transconductance.....	359
7.2.5. Fréquence de coupure.....	360
7.3. Transistor à effet de champ à grille isolée — MOSFET.....	363
7.3.1. Structure et principe de fonctionnement.....	363
7.3.2. Courant de drain — Réseau de caractéristiques.....	366
7.3.3. Transistor réel.....	374
7.3.4. Transistor MOS de puissance.....	375
7.3.5. Mémoires non volatiles à transistor MOS.....	376
7.4. Transistor à effet de champ à gaz d'électrons bidimensionnel TEGFET.....	381
7.4.1. Structure.....	381
7.4.2. Commande de grille.....	382
7.4.3. Polarisation de drain.....	389
7.4.4. Effet MESFET parasite.....	392
8. CIRCUIT A TRANSFERT DE CHARGES — CCD.....	397
8.1. Principe de fonctionnement.....	397
8.1.1. Structure de base.....	397
8.1.2. Description et organisation du CCD.....	398
8.2. Etude du transfert.....	402
8.2.1. Equation générale.....	402
8.2.2. Transfert par champ induit.....	406
8.2.3. Transfert par diffusion thermique.....	406
8.2.4. Effets de bord.....	408
8.2.5. Inefficacité de transfert.....	409

8.3. CCD à canal enterré - BCCD	410
8.3.1. Capacité MOSnSp en régime de déplétion profonde.....	410
8.3.2. Structure du BCCD	417
9. COMPOSANTS OPTOELECTRONIQUES	419
9.1. Interaction rayonnement-semiconducteur	419
9.1.1. Photons et électrons.....	419
9.1.2. Interaction électron-photon — Transitions radiatives	423
9.1.3. Absorption — Emission spontanée — Emission stimulée.....	425
9.1.4. Recombinaison de porteurs en excès — Durée de vie.....	430
9.1.5. Création de porteurs en excès.....	432
9.1.6. Semiconducteurs pour l'optoélectronique	436
9.2. Photodétecteurs.....	442
9.2.1. Distribution des photoporteurs dans un semiconducteur	442
9.2.2. Exemples de distribution	449
9.2.3. Cellule photoconductrice.....	460
9.2.4. Cellule photovoltaïque — Photodiode	464
9.2.5. Cellule solaire — Photopile.....	470
9.3. Emetteurs de rayonnement à semiconducteur	476
9.3.1. Diode électroluminescente - LED	476
9.3.2. Diode laser - LD.....	487
9.3.3. Emetteurs à semiconducteur et télécommunications	509
10. EFFETS QUANTIQUES DANS LES HETEROSTRUCTURES SUPERRESEAUX.....	513
10.1. Effets quantiques dans les hétérojonctions et les structures MIS	513
10.1.1. Structure de sous-bandes d'énergie	516
10.1.2. Energie potentielle des électrons	522
10.1.3. Méthodes de calcul dans l'approximation de Hartree.....	531
10.2. Puits quantiques	546
10.2.1. Spectre d'énergie	549
10.2.2. Multipuits quantiques	557
10.2.3. Puits quantiques couplés.....	557
10.3. Superréseaux.....	560
10.3.1. Structure de sous-bandes d'énergie	561
10.3.2. Modèle de Kronig-Penney.....	563
11. COMPOSANTS SUBMICRONIQUES	573
11.1. Spécificités des hétérostructures	574
11.1.1. Ingénierie de bandes.....	574
11.1.2. Pseudo-champs électriques associés aux variations de gap	575
11.1.3. Pseudo-champs électriques associés aux variations de masse effective.....	575
11.1.4. Champ électrostatique résultant.....	577
11.2. Paramètres spécifiques des faibles dimensions.....	578
11.2.1. Porteurs chauds.....	578
11.2.2. Vitesse de saturation.....	579
11.2.3. Régime de survitesse	581
11.3. Effet Gunn.....	583
11.3.1. Transfert électronique interbande-Effet RWH.....	583
11.3.2. Formation de domaine de charge d'espace.....	587
11.3.3. Diode Gunn	589

11.4. Transistors bipolaires	592
11.4.1. Transistor à homojonctions-BIP	592
11.4.2. Transistor à hétérojonction à base graduelle-HBT	593
11.5. Transistor JFET à canal court	594
11.6. Transistor MOSFET à canal réduit	595
11.6.1. Canal court-Effets de bord longitudinaux	596
11.6.2. Canal étroit-Effets de bord latéraux	598
11.6.3. Tension et courant de saturation	599
11.7. Transistor MESFET-GaAs	600
11.7.1. Régime linéaire	602
11.7.2. Régime sous-linéaire	605
11.7.3. Régime de saturation	608
12. COMPOSANTS QUANTIQUES	611
12.1. Transport parallèle dans les structures quantiques	613
12.1.1. Spécificités	613
12.1.2. Mobilité	615
12.1.3. Effet Gunn bidimensionnel	617
12.1.4. Transfert dans l'espace réel-RST	619
12.1.5. Etalon de résistance	627
12.2. Transport perpendiculaire dans les structures quantiques	631
12.2.1. Oscillateur de Bloch	631
12.2.2. Effet Wannier-Stark	635
12.2.3. Transport dans les superréseaux-RDN	637
12.2.4. Effet tunnel résonnant dans une double barrière-RDN	640
12.2.5. Effet tunnel résonnant dans un superréseau-RDN	645
12.3. Transistors quantiques	650
12.3.1. Transistor à effet Stark-SET	650
12.3.2. Transistor bipolaire à effet tunnel résonnant-RTBT	652
12.3.3. Transistor à fil quantique-QWT	655
12.4. Modulateurs électro-optiques	658
12.4.1. Effet électro-optique en régime quantique	658
12.4.2. Effets Stark dans un puits quantique	659
12.4.3. Effet Stark confiné - QCSE	661
12.4.4. Electro-modulateur	666
12.5. Photomultiplicateurs solides	666
12.5.1. Photomultiplicateur à marches d'escalier	666
12.5.2. Photomultiplicateur à multipuits quantiques	674
12.6. Laser à puits quantiques	678
12.6.1. Effets géométriques - Facteur de confinement	678
12.6.2. Effets quantiques	682
12.6.3. Laser à cavité verticale - VCSEL	683
12.6.4. Microcavité photonique - Laser sans seuil	688
12.6.5. Laser à cascade quantique	689
12.6.6. Laser à boîtes quantiques	692
13. SEMICONDUCTEURS A GRAND GAP	
COMPOSANTS HAUTE TEMPERATURE	695
13.1. Solutions technologiques	696
13.1.1. Silicium sur isolant - SOI	696

13.1.2. Arséniures sur diamant	697
13.2. Semiconducteurs à grand gap	699
13.2.1. Diamant	701
13.2.2. Carbure de silicium - SiC	704
13.2.3. Nitrures III-N – BN, AlN, GaN, InN.....	710
13.3. Composants à base de SiC	717
13.3.1. Diode à jonction	717
13.3.2. Diode Schottky.....	721
13.3.3. Transistor bipolaire	724
13.3.4. Thyristor.....	726
13.3.5. Transistor JFET à grille enterrée - SGJFET.....	728
13.3.6. Transistor MESFET	730
13.3.7. Transistor SIT	734
13.3.8. Transistor MOSFET.....	735
13.3.9. Transistor IGBT	743
13.4. Composants à base de nitrures III-N.....	744
13.4.1. Transistors MESFET et MISFET.....	746
13.4.2. Transistor JFET.....	746
13.4.3. Transistor HFET	747
13.4.4. Transistor IGHFET	752
13.4.5. Transistor HBT à hétérojonction GaN/SiC	753
13.4.6. Cathode à émission froide.....	755
13.4.7. Dispositifs à émission de champ – Ecrans plats	758
13.5. Composants optoélectroniques de courte longueur d'onde.....	758
13.5.1. Détecteurs de rayonnement ultraviolet	759
13.5.2. Emetteurs bleus	763
13.5.3. Emetteurs ultraviolets.....	767
13.5.4. Emetteurs blancs	769
ANNEXES	771
A.1. Coefficient de transmission d'une barrière de potentiel – Méthode BKW.....	771
A.2. Linéarisation de la fonction de distribution de Fermi.....	773
A.3. Effet Hall.....	777
A.4. Disques optiques - CD – DVD.....	790
A.5. Diagramme de chromaticité.....	793
A.6. Blocage de Coulomb.....	797
A.7. Ancrage du niveau de Fermi par les états de surface.....	804
A.8. Bruit dans les composants.....	808
BIBLIOGRAPHIE	811
INDEX ALPHABETIQUE.....	817