



EGEM

électronique – génie électrique – microsystèmes

Physique des dispositifs pour circuits intégrés silicium

*sous la direction de
Jacques Gautier*

hermes

Lavoisier

Table des matières

Introduction	17
Jacques GAUTIER	
Chapitre 1. Matériaux semi-conducteurs	21
Arnaud BOURNEL, Philippe DOLLFUS, Sylvie GALDIN-RETAILLEAU	
1.1. Les cristaux semi-conducteurs	21
1.1.1. Généralités	21
1.1.2. Structure cristalline	22
1.1.2.1. Définitions	22
1.1.2.2. Les systèmes cristallins cubique centré et cubique faces centrées.	22
1.1.3. Réseau réciproque	26
1.1.3.1. Vecteurs du réseau réciproque	26
1.1.3.2. Zones de Brillouin	26
1.1.3.3. Réseau réciproque et première zone de Brillouin du réseau cfc	27
1.1.4. Les vibrations du réseau cristallin.	28
1.1.4.1. Modes de vibration d'une chaîne linéaire comportant 2 atomes par maille élémentaire	29
1.1.4.2. Vibrations d'un cristal à 3 dimensions et à 2 atomes par maille élémentaire	31
1.1.4.3. Energie associée aux modes de vibration	31
1.2. Structure de bandes des semi-conducteurs	33
1.2.1. Bandes d'énergie des électrons dans un cristal parfait.	33
1.2.1.1. Description de la formation des bandes d'énergie par LCAO	33
1.2.1.2. Equation de Schrödinger pour un électron – Potentiel cristallin et fonctions de Bloch	36

1.2.1.3. Cristal 1D – Modèle de l'électron presque libre	37
1.2.2. Dynamique de l'électron	40
1.2.2.1. Impulsion, vitesse	40
1.2.2.2. Effet d'une force extérieure, masse effective.	41
1.2.2.3. Classification métal/isolant/semi-conducteur	42
1.2.3. Notion de trou	43
1.2.4. Cristal 3D – Généralisation	45
1.2.5. Structure de bande du Si	46
1.2.5.1. Bande de conduction	47
1.2.5.2. Bande de valence	48
1.2.6. Densité d'états dans les bandes permises	49
1.2.6.1. Densité d'états dans l'espace réciproque	49
1.2.6.2. Densité d'états en énergie (cristal 3D).	50
1.2.7. Niveaux d'énergie introduits par les imperfections du cristal	52
1.2.7.1. Niveaux associés aux impuretés de dopage pour un semi-conducteur de la colonne IV (Si, Ge, C)	52
1.2.7.2. Réduction de la largeur de bande interdite (<i>Band gap narrowing</i>)	54
1.2.7.3. Niveaux profonds	55
1.2.8. Peuplement des niveaux d'énergie à l'équilibre thermique.	55
1.2.8.1. Probabilité d'occupation d'un niveau d'énergie ε	56
1.2.8.2. Concentration des porteurs dans les bandes permises.	58
1.3. Conclusion.	60
1.4. Bibliographie	60

Chapitre 2. Eléments de base pour la physique du transport dans

les composants semi-conducteurs 61

Arnaud BOURNEL, Philippe DOLLFUS, Sylvie GALDIN-RETAILLEAU

2.1. Effet des perturbations : transport et génération-recombinaison	61
2.1.1. Phénomènes de transport	61
2.1.1.1. Les mécanismes de relaxation des porteurs : les interactions	62
2.1.1.2. Fonction de distribution – Equation de Boltzmann	64
2.1.1.3. Conduction électrique en champ faible ($E < 1 \text{ kV.cm}^{-1}$).	67
2.1.1.4. Diffusion	69
2.1.1.5. Equations de dérive-diffusion.	71
2.1.1.6. Champ électromoteur.	71
2.1.1.7. Conduction en champ fort	72
2.1.2. Création de porteurs en excès et recombinaison	73
2.1.2.1. Création de porteurs en excès	74
2.1.2.2. Recombinaison	75
2.2. Transport dans les dispositifs.	77
2.2.1. Système à l'équilibre thermodynamique.	78

2.2.2. Système hors d'équilibre	79
2.2.3. Equations à résoudre pour l'étude des dispositifs	81
2.2.3.1. Expression des courants	81
2.2.3.2. Equation de continuité	82
2.3. Exemple de la jonction PN	86
2.3.1. Réalisation : profils de dopage	86
2.3.2. Jonction PN à l'équilibre thermodynamique	87
2.3.2.1. Formation de la zone de charge d'espace (ZCE)	88
2.3.2.2. Etude quantitative	89
2.3.3. Jonction PN polarisée en direct	92
2.3.3.1. Description phénoménologique	92
2.3.3.2. Calcul du courant dans une diode réelle	93
2.3.4. Jonction PN polarisée en inverse	108
2.3.4.1. Description phénoménologique	108
2.3.4.2. Calcul du courant inverse	108
2.3.4.3. Claquage de la jonction	110
2.3.5. Schémas équivalents de la jonction PN	114
2.3.5.1. Capacités de transition	114
2.3.5.2. Capacités de diffusion	115
2.3.5.3. Conductance	116
2.3.5.4. Schémas équivalents	116
2.4. Conclusion	116
2.5. Bibliographie	116

Chapitre 3. Introduction à la physique du transistor MOS 117

Thomas SKOTNICKI et Frédéric BŒUF

3.1. Introduction	117
3.2. Le transistor idéal	120
3.2.1. Tension de seuil	121
3.2.2. Régime de conduction	127
3.2.2.1. Régime ohmique et zone de raccordement	129
3.2.2.2. Pincement	130
3.2.2.3. Régime de saturation	130
3.2.2.4. TMOS en régime bloqué	131
3.2.3. Caractéristiques statiques	131
3.2.3.1. Zone linéaire et zone saturée en fonction de V_{DS} et V_G	131
3.2.3.2. Résistance, conductance et transconductance en régime linéaire ($V_{DS} \ll V_{Dsat}$)	132
3.2.3.3. Résistance, conductance et transconductance en régime saturé ($V_{DS} \geq V_{Dsat}$)	133
3.2.4. Caractéristiques dynamiques	134
3.2.4.1. Délai intrinsèque	135

3.2.4.2. Capacités structurelles	136
3.2.4.3. Délai d'un circuit	136
3.3. TMOS réel.	137
3.3.1. Epaisseur effective de l'oxyde de grille	138
3.3.1.1. Déplétion de la grille	138
3.3.1.2. Phénomène quantique dans le canal	139
3.3.1.3. Epaisseur effective totale et caractérisation.	143
3.3.2. Régime de conduction	144
3.3.2.1. Effet non uniforme du substrat le long du canal	144
3.3.2.2. Pondération de la mobilité.	146
3.3.2.3. Champ effectif et mobilité effective	150
3.3.2.4. Résistance série	153
3.3.2.5. Courant de substrat, autopolarisation, action bipolaire parasite et porteurs chauds.	156
3.3.3. Régime de blocage du TMOS	158
3.3.3.1. Courant en faible inversion	159
3.3.3.2. Calcul de la pente sous le seuil	160
3.3.4. Effets de canal court.	161
3.3.4.1. <i>Short Channel Effect/Drain Induced Barrier Lowering</i>	161
3.3.4.2. Impact de X_j sur les effets de canal court.	165
3.3.4.3. Effet de canal court inverse (RSCE)/Effet de poches (POCKET)	167
3.3.4.4. Effet de canal étroit.	170
3.3.5. Perçage volumique.	172
3.3.6. Tension de seuil en régime de conduction (inversion forte)	173
3.4. Applications pratiques de la modélisation du transistor réel	174
3.4.1. Modèle MASTAR	174
3.4.2. Prédiction et analyse de Roadmaps	177
3.4.3. Facteur d'amélioration technologique et nouvelles architectures	179
3.5. Limites ultimes du TMOS	182
3.5.1. Phénomène hors-équilibre	182
3.5.2. Le transistor balistique	185
3.5.3. Phénomène de quantification latérale dans le canal	188
3.5.4. Fluctuations statistiques des dopants	190
3.6. Bibliographie	191

Chapitre 4. Introduction à la technologie et aux transistors SOI 193
 Sorin CRISTOLOVEANU et Francis BALESTRA

4.1. Introduction	193
4.2. Avantages du SOI	194

4.3. Matériaux SOI	196
4.3.1. Collage de plaquettes	196
4.3.2. Unibond	196
4.3.3. SIMOX	197
4.3.4. SON	199
4.3.5. Autres matériaux SOI	199
4.3.5.1. Silicium sur saphir (SOS)	199
4.3.5.2. FIPOS	200
4.3.5.3. ZMR et ELO	200
4.3.6. Caractérisation des structures SOI	201
4.4. Dispositifs et circuits SOI	202
4.4.1. Circuits CMOS	202
4.4.2. Transistors bipolaires	202
4.4.3. Composants de puissance	203
4.4.4. Composants innovants	203
4.5. Transistors MOS/SOI à film mince totalement déplété	205
4.5.1. Tension de seuil	206
4.5.2. Pente sous le seuil	207
4.5.3. Transconductance	209
4.5.4. Inversion volumique	210
4.5.5. Couplage des défauts	210
4.5.6. Autoéchauffement	210
4.6. Transistors MOS/SOI à déplétion partielle	212
4.7. Effets des petites géométries des transistors MOS/SOI	214
4.7.1. Transistor bipolaire parasite	214
4.7.2. Effets de canal court	215
4.7.3. Dégradation par porteurs chauds	218
4.8. Transistors SOI ultimes	221
4.8.1. Transistor à tension de seuil dynamique (DT-MOSFET)	221
4.8.2. Transistor à plan de masse	222
4.8.3. Transistor d'épaisseur ultime	223
4.8.4. Transistor à double grille	225
4.9. Perspectives et conclusions	227
4.10. Bibliographie	228

**Chapitre 5. Physique et technologie des transistors bipolaires à
homojonctions ou à hétérojonctions intégrés en environnement CMOS** 233

Mireille MOUIS

5.1. Introduction	233
5.2. Principe de fonctionnement du transistor bipolaire à homojonctions (BJT)	235

5.2.1. Le transistor bipolaire idéal	236
5.2.1.1. Principe de fonctionnement en mode normal.	236
5.2.1.2. Le transistor bipolaire en tant qu'amplificateur	237
5.2.2. Phénomènes physiques perturbant le fonctionnement idéal	239
5.2.2.1. Effets de forte injection (fort V_{BE}).	239
5.2.2.2. Influence de la tension V_{CB}	240
5.2.2.3. Recombinaison en base neutre	243
5.2.2.4. Courants de fuite	243
5.2.3. Diagramme des courants dans un transistor réel	244
5.2.4. Résistances d'accès	245
5.3. Le transistor bipolaire en fonctionnement petit signal	246
5.3.1. Capacités et temps de transit	246
5.3.2. Fréquences de coupure caractéristiques	246
5.3.2.1. Fréquence de transition.	246
5.3.2.2. Fréquence maximale d'oscillation	249
5.4. Les compromis limitant les performances d'un BJT	249
5.4.1. Compromis gain en courant/résistance de base.	249
5.4.2. Compromis fréquence de transition-fuites à la jonction EB	250
5.4.3. Compromis f_T - BV_{CEO} et f_T - V_A	250
5.5. L'intégration du BJT en technologie CMOS	251
5.5.1. Principe de l'intégration BiCMOS	251
5.5.2. Principales options technologiques	252
5.6. L'hétérojonction Si/SiGe et son intérêt pour le transistor bipolaire	253
5.6.1. Les limites actuelles à l'intégration des systèmes sur Si	253
5.6.2. Comparaison BJT-HBT à profil de dopants donné.	253
5.6.2.1. Diagramme des bandes.	253
5.6.2.2. Efficacité d'injection	256
5.6.2.3. Tension d'Early : produit « gain \times tension d'Early »	258
5.6.2.4. Temps de transit des électrons	259
5.6.2.5. Effets de forte injection dans le collecteur	260
5.6.2.6. Recombinaison dans la base neutre et dans la ZCE BC	261
5.6.2.7. Variations du gain avec la température	262
5.6.3. Base SiGe : un degré de liberté supplémentaire pour l'optimisation du composant.	263
5.6.3.1. Limites technologiques à la réduction de largeur de base	263
5.6.3.2. Limites à l'augmentation du dopage de base : les deux grandes familles de jonctions émetteur-base	264
5.6.3.3. Remarques à propos de l'émetteur	265
5.6.4. Exemple de comparaison BJT-HBT	266
5.7. Intégration de l'épitaxie SiGe dans une filière BiCMOS	269
5.7.1. Contraintes mécaniques, épaisseur critique	269
5.7.2. Les différents types d'épitaxie.	271
5.7.2.1. Techniques d'épitaxie et préparation de surface	271

5.7.2.2. Epitaxie sur substrat vierge	273
5.7.2.3. Epitaxie sur substrat avec motifs d'isolement	274
5.7.3. Adaptation au HBT des architectures de BJT.	275
5.7.3.1. Architecture dite « simple-polysilicium ».	275
5.7.3.2. Architecture dite « double polysilicium ».	277
5.7.4. Les architectures de HBT spécifiques	279
5.7.4.1. HBT pseudo double-polysilicium quasi auto-aligné	279
5.7.4.2. HBT polysilicium autoaligné par utilisation d'un marqueur d'émetteur	280
5.7.4.3. HBT double-polysilicium auto-aligné par épitaxie sélective dans la fenêtre d'émetteur	281
5.8. Conclusion.	283
5.9. Bibliographie	284
Chapitre 6. Les mémoires non volatiles	291
François MONDON	
6.1. L'utilisation des mémoires électroniques.	291
6.1.1. Présentation.	291
6.1.2. Les mémoires non volatiles	292
6.1.2.1. Différentes variétés de mémoires non volatiles	292
6.1.2.2. L'information stockée est-elle vraiment binaire ?	293
6.1.3. Evolution des mémoires	294
6.2. Principes de fonctionnement d'une mémoire non volatile MOS	295
6.2.1. Utilisation d'un transistor MOS en point-mémoire	295
6.2.2. Structure à piégeage d'interface (transistor MNOS).	297
6.2.3. Structures à grille flottante	298
6.2.4. La programmation	299
6.2.5. La rétention de l'information	300
6.2.6. L'effacement	301
6.3. Mémoires EPROM.	302
6.3.1. Structure du point mémoire : grille flottante et grille de contrôle	302
6.3.2. Ecriture par électrons chauds	303
6.3.3. Effacement par rayonnement UV	305
6.3.4. Evolution des structures	306
6.3.5. Performances, rétention de la charge.	307
6.4. Mémoires EEPROM	308
6.4.1. Le point mémoire EEPROM MNOS	308
6.4.2. Le point mémoire EEPROM à grille flottante	309
6.5. Mémoires Flash-EEPROM	311
6.5.1. De l'EPROM à la Flash-EEPROM	311
6.5.2. Fonctionnement de mémoires « NOR » de type FLOTOX.	312

6.5.2.1. Organisation	312
6.5.2.2. Programmation	312
6.5.2.3. Effacement	314
6.5.3. Fonctionnement de mémoires « NAND »	315
6.5.3.1. Organisation	315
6.5.3.2. Programmation	316
6.5.3.3. Lecture	316
6.5.3.4. Effacement	317
6.5.3.5. Performances.	317
6.5.4. Evolution des mémoires Flash-EEPROM	317
6.5.4.1. La programmation multiniveau	317
6.5.4.2. Cellule Flash à injection par la source.	320
6.5.4.3. Structures pour Flash EEPROM embarquées	320
6.5.4.4. Limitations dues à la perte de charge	321
6.5.5. Au-delà des Flash-EEPROM	322
6.5.5.1. Les dispositifs quantiques	322
6.5.5.2. Les dispositifs ferroélectriques	323
6.5.5.3. Les mémoires magnétorésistives	325
6.5.5.4. Les dispositifs à changement de phase	328
6.6. Phénomènes physiques intervenant dans les mémoires EEPROM.	330
6.6.1. Propriétés électriques de l'oxyde de grille.	330
6.6.1.1. Propriétés de l'oxyde de silicium.	330
6.6.1.2. Conduction dans les structures MOS	330
6.6.1.3. Phénomènes de piégeage et vieillissement de l'oxyde SiO ₂	332
6.6.1.4. Courants de fuite induits par la contrainte	334
6.6.2. Propriétés de l'oxyde formé sur le silicium polycristallin	335
6.6.2.1. Propriétés électriques et rugosité.	335
6.6.2.2. Amélioration du poly-oxyde	336
6.6.2.3. Modèles pour la conduction.	336
6.6.3. Propriétés du nitrure de silicium.	337
6.6.4. Les isolants multicouches oxyde-nitrure-oxyde et oxyde-nitrure	338
6.6.4.1. Conduction des bi-couches oxyde-nitrure.	338
6.6.4.2. Conduction des couches ONO	339
6.7. Bibliographie	340

Liste des symboles	353
------------------------------	-----

Index	363
-----------------	-----