

# Table des matières

<b>Introduction</b> . . . . .	1
<b>Chapitre 1. Introduction et rappels</b> . . . . .	3
1.1. Historique synoptique de la microélectronique . . . . .	3
1.1.1. Électricité : Ampère, Coulomb, Faraday, Gauss, Henry, Kirchhoff, Maxwell, Ohm. . . . .	3
1.1.2. Tubes à vide . . . . .	3
1.1.3. Premières applications . . . . .	4
1.1.4. Ordinateurs (transistors (trans-resistors) + circuits intégrés (CI)) . . . . .	5
1.1.5. Analyse et théorie des circuits, techniques de synthèse. . . . .	6
1.1.6. Transistors . . . . .	7
1.1.7. Circuits intégrés . . . . .	7
1.1.8. Transistors à effet de champ. . . . .	8
1.1.9. Circuits intégrés numériques . . . . .	9
1.1.10. Mémoires vives à accès aléatoire (écriture et lecture). . . . .	10
1.1.11. MOS . . . . .	10
1.1.12. <i>Charge-Coupled Device</i> (CCD (MOS)) – Dispositif à transfert de charge (MOS « multi-grilles ») . . . . .	11
1.1.13. Technologies de fabrication . . . . .	11
1.1.14. Conception assistée par ordinateur (CAO) – <i>Conception Aided Design</i> (CAD). . . . .	13
1.2. Conception technologique assistée par ordinateur (TCAD) . . . . .	17
1.2.1. La TCAD microélectronique réelle . . . . .	17
1.2.2. Modèles TCAD <i>versus</i> modèles CAO. . . . .	17
1.2.2.1. Modèles TCAD (modèles numériques). . . . .	17
1.2.2.2. Modèles CAO (modèles compacts, modèles analytiques). . . . .	18
1.2.3. Procédés technologiques. . . . .	18

1.3. Fabrication . . . . .	19
1.3.1. Procédés de diffusion. . . . .	21
1.3.1.1. Diffusion à partir de sources gazeuses (plus guère utilisée) . . . . .	22
1.3.1.2. Diffusion à partir de sources solides ou de dose en surface (plus guère utilisée) . . . . .	23
1.3.2. Modélisation de la diffusion. . . . .	24
1.4. Jonction PN. . . . .	26
1.4.1. Jonction PN non polarisée. . . . .	27
1.4.2. Jonction PN polarisée en direct. . . . .	29
1.4.3. Jonction PN polarisée en inverse. . . . .	30
1.4.4. Polarisation de la jonction. . . . .	32
1.5. L'effet transistor . . . . .	39
1.5.1. Transistor bipolaire. . . . .	40
1.5.2. Contrôle du gain en courant. . . . .	42
1.6. <i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i> (MOSFET) . . . . .	42
1.6.1. Structure de base . . . . .	42
1.6.2. Principe de fonctionnement . . . . .	44
1.6.3. Modèle électrique de la capacité MOS et courbe C(V) . . . . .	45
<b>Chapitre 2. Modélisation des processus de diffusion . . . . .</b>	<b>47</b>
2.1. Introduction. . . . .	47
2.2. Équations phénoménologiques de la diffusion . . . . .	50
2.2.1. Processus de diffusion (lacunaires et interstitiels) . . . . .	51
2.2.2. Première loi de Fick . . . . .	52
2.2.3. Flux généralisé . . . . .	55
2.2.4. Deuxième loi de Fick. . . . .	56
2.2.5. Codiffusion(s) . . . . .	57
2.3. Calcul du flux et effet du champ électrique interne . . . . .	58
2.4. Influence des différentes lacunes sur le coefficient de diffusion. . . . .	61
2.5. Calcul du champ électrique dans le cas de l'arsenic . . . . .	62
2.6. Exemple : modélisation des diffusions des dopants dans les grains et les joints de grains d'un polysilicium. . . . .	64
2.6.1. Méthode par blocs . . . . .	69
2.6.2. Itérations non linéaires. . . . .	69
2.6.3. Méthode de Gauss-Siedel . . . . .	69
2.6.3.1. 1 <sup>re</sup> étape : temps 0, 1, 2 . . . . .	69
2.6.3.2. 2 <sup>e</sup> étape : milieu de la montée en température . . . . .	69
2.6.3.3. 3 <sup>e</sup> étape : début du plateau de recuit (ici 1 050° C) . . . . .	71
2.6.3.4. 4 <sup>e</sup> étape : milieu du plateau de recuit . . . . .	71
2.6.3.5. 5 <sup>e</sup> étape : fin de plateau, milieu du temps de trempe et <i>in fine</i> , fin de recuit . . . . .	71

2.7. Processus microscopiques . . . . .	75
2.7.1. Mouvement brownien . . . . .	75
2.7.2. Mécanismes de diffusion et effets de corrélation . . . . .	78
2.7.2.1. Échange interatomique . . . . .	78
2.7.2.2. Assistance par des défauts ponctuels . . . . .	78
2.7.2.3. Mécanismes de diffusion et effets de corrélation . . . . .	80
2.7.2.4. Application aux structures cubiques (par exemple Si) . . . . .	82
2.8. Théorie phénoménologique de la diffusion . . . . .	85
2.9. Rappel de thermodynamique des processus irréversibles . . . . .	85
2.10. Conclusion . . . . .	90
2.11. Annexe 1 . . . . .	90
2.11.1. Modélisation numérique de la diffusion simple . . . . .	90
2.11.1.1. Conditions aux limites . . . . .	92
2.11.1.2. Code MATLAB global . . . . .	95
2.11.1.3. Conclusion . . . . .	97
2.12. Annexe 2 . . . . .	97
2.12.1. Introduction. . . . .	98
2.12.2. Élaboration d'un simulateur dynamique. . . . .	98
2.12.3. Modélisation du rebond d'une particule sur un mur . . . . .	102
2.12.4. Gaz parfait dans une boîte . . . . .	104

## **Chapitre 3. Fonctionnement électrique des composants . . . . . 109**

3.1. Introduction. . . . .	109
3.1.1. Dans un futur proche . . . . .	109
3.1.2. Motivations scientifiques . . . . .	111
3.1.3. L'existant. . . . .	114
3.1.3.1. Simulation électrique de type Monte-Carlo . . . . .	114
3.1.3.2. Simulation du transport dans les hétérostructures. . . . .	114
3.1.4. Démarche possible . . . . .	115
3.2. Synoptique de l'état actuel . . . . .	116
3.2.1. Modèle de dérive-diffusion . . . . .	116
3.2.1.1. Sur l'équation de Boltzmann . . . . .	126
3.2.2. Des composants rapides, dédiés à la radiofréquence ou aux micro-ondes. . . . .	131
3.2.2.1. TBH SiGeC . . . . .	139
3.2.3. Le DG MOSFET. . . . .	145
3.2.3.1. Introduction . . . . .	145
3.2.3.2. Structure . . . . .	146
3.2.3.3. Fonction de Wigner . . . . .	150
3.2.3.4. Formalisme . . . . .	150

3.3. Fonction de Wigner . . . . .	153
3.3.1. Équation de Wigner-Boltzmann . . . . .	157
3.3.2. Modèle de Schrödinger-Poisson . . . . .	158
3.3.2.1. Équation de Poisson . . . . .	159
3.3.2.2. Équation de Schrödinger . . . . .	159
3.3.2.3. Méthode de discrétisation . . . . .	160
3.3.2.4. Discrétisation de la MDF . . . . .	161
3.3.2.5. Conditions aux frontières . . . . .	162
3.3.2.6. Conditions aux contacts . . . . .	162
3.3.2.7. Résolution de l'équation de Schrödinger . . . . .	163
3.3.3. Résultats numériques . . . . .	164
3.3.4. Effets de canaux courts . . . . .	165
3.3.4.1. DIBL . . . . .	165
3.3.4.2. Effet tunnel dans la structure DGMOS . . . . .	165
3.4. Électromagnétisme – MOS : équations de Maxwell . . . . .	168
3.4.1. Introduction . . . . .	168
3.4.2. Équations de Maxwell . . . . .	169
3.4.3. Présentation de la méthode FDTD . . . . .	171
3.4.3.1. Principe de la méthode de YEE . . . . .	171
3.4.4. Conducteur électrique parfait (PEC) . . . . .	174
3.4.5. Conducteur magnétique parfait (PMC) . . . . .	175
3.4.6. Condition absorbante UPML . . . . .	176
3.4.7. Modélisation des éléments localisés linéaires . . . . .	179
3.4.7.1. Cas d'une résistance . . . . .	181
3.4.7.2. Cas d'une capacité . . . . .	181
3.4.7.3. Cas d'une inductance . . . . .	182
3.4.8. Simulations des interconnexions . . . . .	182
3.4.8.1. Cas d'une ligne microruban . . . . .	182
3.4.8.2. Cas d'une interconnexion de type VIA . . . . .	183
3.4.8.3. Simulation de circuits radio et hyperfréquences . . . . .	187
3.5. Substrat dans les circuits tridimensionnels à l'échelle micro ou nanoélectrique . . . . .	190
3.5.1. Introduction . . . . .	190
3.5.1.1. Nomenclature . . . . .	191
3.5.2. Outils mathématiques . . . . .	192
3.5.2.1. Noyaux de Green . . . . .	193
3.5.2.2. Analyse du substrat . . . . .	193
3.5.3. Analogie avec les lignes à transmissions pour des milieux multicouches . . . . .	197
3.5.4. Résultats « GREEN/TLM » . . . . .	199
3.5.4.1. Contacts enterrés . . . . .	200

3.5.5. Équation de la chaleur . . . . .	201
3.5.5.1. Conditions aux frontières . . . . .	203
3.6. Conclusion . . . . .	207
3.7. Annexe . . . . .	207
3.7.1. Jonction P-N : fonctionnement, rappels . . . . .	208
3.7.2. L'algorithme de Scharfetter-Gummel . . . . .	209
3.7.2.1. Formulation des équations . . . . .	209
3.7.2.2. Normalisation des équations . . . . .	209
3.7.2.3. Résolution des équations, algorithme de Scharfetter et Gummel. . . . .	209
3.7.2.4. Discrétisation des équations . . . . .	210
3.8. Constantes et données. . . . .	212
3.9. Éléments finis sous MATLAB (NPN) . . . . .	247
3.9.1. Définition de la structure. . . . .	247
3.9.2. Assemblage . . . . .	249
3.9.3. Résolution : avantages et inconvénients de la méthode des éléments finis. . . . .	250

## **Chapitre 4. Le bruit de fond en électronique . . . . . 253**

4.1. Introduction. . . . .	253
4.2. Fluctuations et bruit . . . . .	254
4.2.1. Rappels sur la distribution de Dirac . . . . .	254
4.2.2. Fonctions aléatoires, corrélation et densités spectrales de fluctuations. . . . .	255
4.2.2.1. Fonctions aléatoires . . . . .	255
4.2.2.2. Fonctions aléatoires stationnaires du second ordre . . . . .	255
4.2.2.3. Théorème de Wiener-Khintchine . . . . .	256
4.2.2.4. Propriétés de la densité spectrale de fluctuations . . . . .	257
4.3. Calcul du bruit par la méthode de Langevin. . . . .	258
4.3.1. Principe de la méthode. . . . .	258
4.3.2. Exemple : bruit de génération, recombinaison . . . . .	258
4.3.3. Grandeurs associées au bruit en électricité . . . . .	259
4.3.4. Exemple : bruit thermique d'une résistance . . . . .	261
4.3.5. Forme des équations de Langevin . . . . .	262
4.3.6. Exemple : injection d'électrons dans la région $p$ d'une jonction PN. . . . .	263
4.4. Calcul du bruit par la méthode du champ d'impédance . . . . .	263
4.4.1. Principe de la méthode. . . . .	263
4.4.2. Champ d'impédance . . . . .	263
4.4.3. Calcul effectif du champ d'impédance . . . . .	265

4.4.4. Exemple : bruit en régime ohmique de charge d'espace (simple injection) . . . . .	266
4.5. Calcul du bruit par la méthode de l'impédance de transfert principe : formulation. . . . .	269
4.5.1. Principe. . . . .	269
4.5.2. Cas des structures unidimensionnelles : bruit d'un barreau en hautes fréquences . . . . .	271
4.6. Bruit substrat : vers la 3D . . . . .	273
4.7. Annexe . . . . .	276
4.7.1. Calcul du triplet $\{\delta n, \delta p, \delta \Phi\}$ . . . . .	276
4.7.1.1. Solution initiale : équation de Poisson . . . . .	276
4.7.1.2. Modifications apportées aux équations . . . . .	276
4.7.1.3. Les pseudoniveaux de Fermi $\Phi_n$ et $\Phi_p$ . . . . .	277
4.7.1.4. Solution finale . . . . .	279
4.7.1.5. Remarques. . . . .	282
4.8. Conclusion . . . . .	282
<b>Bibliographie . . . . .</b>	<b>285</b>
<b>Index . . . . .</b>	<b>293</b>