

Table des matières

Avant-propos	1
Introduction. La révolution numérique	7
Chapitre 1. Le silicium et le germanium : du minerai à l'élément	23
1.1. Extraction et purification du silicium/découverte et extraction du germanium	23
1.1.1. Le silicium : du quartz au silicium métallurgique	23
1.1.1.1. Extraction des métaux de leurs oxydes par voie électrochimique	24
1.1.1.2. Extraction du silicium de la silice par voie chimique.	25
1.1.1.3. Extraction du silicium par réduction carbothermique de la silice : le silicium « métallurgique »	27
1.1.1.4. Purification du silicium produit au four à arc	28
1.1.2. Le germanium	29
1.1.2.1. Découverte et identification du germanium	29
1.1.2.2. Extraction et purification du germanium	30
1.2. Le silicium et le germanium, semi-conducteurs : caractéristiques électriques	30
1.2.1. Historique : la résistivité des « métaux » silicium et germanium	30
1.2.1.1. Le silicium « métal ».	30
1.2.1.2. Le germanium « métal »	33
1.2.2. Les bandes d'énergie	34
1.2.3. Semi-conducteur intrinsèque : la paire électron-trou	36

1.2.4. Semi-conducteur extrinsèque	38
1.2.4.1. L'énergie (niveau) de Fermi	40
1.2.5. Mécanisme de génération/recombinaison de paires électron-trou et « durée de vie » des porteurs minoritaires.	41
1.2.5.1. Mécanisme de génération/recombinaison de paires électron-trou.	41
1.2.5.2. Durée de vie des porteurs minoritaires	43
1.2.6. Influence de la température sur la concentration des porteurs majoritaires.	43
1.2.7. Courant de conduction dans un semi-conducteur	45
1.2.8. Mobilité des porteurs majoritaires : électrons et trous	46
1.2.9. Résistivité du silicium et du germanium extrinsèques	49
1.3. Bibliographie.	51

Chapitre 2. La diode à pointe. 55

2.1. Caractéristiques et fonctions.	56
2.1.1. Courbe caractéristique, effet redresseur	56
2.1.2. Contact redresseur et contact ohmique	58
2.1.2.1. Contact ohmique par effet tunnel	60
2.1.3. Fonctions de la diode à pointe	60
2.1.3.1. Composant d'un circuit de réception d'ondes radio AM.	60
2.1.3.2. Composant d'un « convertisseur de fréquence »	61
2.1.3.3. Les diodes à pointe en germanium : composants de commutation de circuits logiques (commutateurs)	63
2.1.4. Bases physiques du fonctionnement d'une diode à pointe	63
2.1.4.1. Comportement en fréquence	63
2.1.4.2. Mélangeur d'un convertisseur de fréquence	65
2.1.4.3. Commutation	66
2.2. Historique.	67
2.2.1. Découverte de l'« effet redresseur »	67
2.2.2. Découverte de la « détection » d'ondes radio AM par la diode à pointe.	67
2.2.3. Découverte de la diode à pointe à base de silicium	68
2.2.4. La diode à pointe à base de germanium	69
2.2.5. Réception des ondes radars	70
2.3. Les recherches poursuivies pendant la Seconde Guerre mondiale.	73
2.3.1. Recherches sur le silicium.	73
2.3.1.1. Découverte du silicium N et du silicium P.	73
2.3.1.2. Production de silicium de pureté 5N	79

2.3.1.3. Traitement d'oxydation du silicium : l'« effet <i>gettering</i> » . . .	81
2.3.2. Recherches sur le germanium	83
2.3.2.1. Production de germanium	83
2.3.2.2. Diodes à pointe à base de germanium : courbes caractéristiques	84
2.3.2.3. Courant dans une diode à base de germanium N	85
2.3.2.4. Diode à pointe réalisée par soudure de l'électrode sur la pastille de germanium N	85
2.4. Le développement industriel des diodes à pointe à base de germanium après la Seconde Guerre mondiale	86
2.5. Annexe : courants dans une diode métal–semi-conducteur	89
2.6. Bibliographie	92

Chapitre 3. Le transistor à pointes 95

3.1. L'effet de champ	96
3.1.1. Effet de champ « direct », effet de champ « inverse »	96
3.1.2. Les études des Bell Labs	98
3.1.2.1. Les « états de surface » : pièges superficiels	100
3.1.2.2. La mise en évidence de l'effet de champ direct	101
3.2. Le transistor à pointes à base de germanium	104
3.2.1. La découverte du transistor à pointes à base de germanium N	104
3.2.2. Fonctionnement du transistor à pointes à base de germanium N	106
3.2.3. Le transistor à pointes de Herbert Mataré et Heinrich Welker . . .	109
3.3. Le développement industriel du transistor à pointes à base de germanium N	110
3.4. Bibliographie	112

Chapitre 4. La diode PN 115

4.1. Caractéristiques et fonctions	116
4.1.1. La découverte de l'effet redresseur de la « diode PN » à base de silicium	116
4.1.2. Le fonctionnement d'une diode PN	118
4.1.3. Fonctions de la diode	123
4.1.3.1. La diode PN composant de commutation	125
4.1.3.2. La diode PN composant de circuits analogiques	125

4.1.4. Action des dopants et des impuretés sur la « durée de vie » des porteurs minoritaires	126
4.1.4.1. Durée de vie des porteurs minoritaires en fonction du dopage	126
4.1.4.2. Action des impuretés métalliques	128
4.1.4.3. Action de l'oxygène et du carbone	130
4.1.5. Le développement des diodes PN	131
4.1.5.1. La diode PN en germanium.	131
4.1.5.2. La diode PN en silicium.	132
4.2. Production de germanium et de silicium électroniques	133
4.2.1. Production du germanium électronique	133
4.2.1.1. Purification du germanium par procédé physique.	134
4.2.1.2. Production et dopage de germanium monocristallin	134
4.2.1.3. Purification du germanium par procédé de fusion de zone	136
4.2.2. Production de silicium électronique	137
4.2.2.1. Production de silicium polycristallin de très haute pureté	137
4.2.2.2. Procédés de production de silicium polycristallin de très haute pureté.	138
4.2.3. Fabrication de monocristaux	144
4.2.3.1. Procédé CZ (Czochralski).	144
4.2.3.2. Production du silicium monocristallin sans défauts de structure (dislocations).	147
4.2.3.3. Le procédé de la zone flottante (ZF)	147
4.2.4. Fabrication d'une diode en silicium par le procédé CZ.	148
4.2.5. Développements industriels des procédés de tirage de monocristaux.	149
4.3. Annexe : bases physiques du fonctionnement de la diode PN	151
4.3.1. Diagramme de bandes d'énergie et barrière de potentiel	151
4.3.2. Courants d'électrons et de trous : « durée de vie » et « longueur de diffusion » des « porteurs minoritaires ».	154
4.3.3. Courant dans la diode	156
4.4. Bibliographie.	157

Chapitre 5. Le transistor bipolaire 161

5.1. Caractéristiques et fonctions.	162
5.1.1. Historique	163
5.1.1.1. L'invention de Shockley	163

5.1.1.2. L'expérience de Shive et la « durée de vie » des porteurs minoritaires	164
5.1.2. Le fonctionnement du transistor bipolaire	165
5.1.2.1. Les modes de fonctionnement	165
5.1.2.2. Le temps de transit des porteurs minoritaires à travers la base.	168
5.1.3. Les fonctions de base.	169
5.1.3.1. Le fonctionnement du circuit de base	169
5.1.3.2. Commutation	171
5.1.3.3. Amplification de courants faibles	172
5.1.3.4. Réponse en fréquence	174
5.2. Les technologies des transistors.	174
5.2.1. Tirage de monocristal : procédé CZ et procédé mixte CZ-diffusion.	175
5.2.1.1. Transistor bipolaire en germanium	175
5.2.1.2. Transistor bipolaire en silicium	177
5.2.2. Procédé Philco.	177
5.2.3. Procédé « par alliage »	178
5.2.3.1. <i>Drift transistor</i>	180
5.2.4. Vapodéposition et diffusion.	180
5.2.4.1. Le procédé.	180
5.2.4.2. Historique	182
5.2.5. Procédé « par implantation ionique »	185
5.3. Les transistors bipolaires en silicium de structures « méso » et « planar »	186
5.3.1. Masquage par oxydation (<i>oxide masking</i>).	186
5.3.2. Structure méso	187
5.3.3. Structure planar	188
5.3.4. Couche épitaxiale de silicium.	191
5.4. Les développements industriels	193
5.4.1. Transistors bipolaires en germanium	194
5.4.2. Transistors bipolaires en silicium	197
5.4.3. Les satellites Vanguard 1, Explorer 1 et 3	199
5.5. Bibliographie.	199

Chapitre 6. Le transistor à effet de champ MOSFET 205

6.1. Caractéristiques et fonctions.	206
6.1.1. Introduction	206
6.1.2. Fonctionnement du transistor MOSFET	207
6.1.2.1. La capacité MOS	207

6.1.2.2. Les modes de fonctionnement du transistor MOSFET, le temps de transit	208
6.1.3. Les fonctions de base.	212
6.1.3.1. Fonction commutation.	212
6.1.3.2. Fonction amplification.	213
6.1.4. Le composant CMOS	215
6.1.5. Historique du développement du transistor MOSFET	216
6.1.6. L’action des impuretés sur la dispersion et l’instabilité des caractéristiques électriques des transistors.	220
6.2. La miniaturisation et les matériaux des transistors MOSFET	222
6.2.1. La miniaturisation : la loi de Moore	222
6.2.2. Les matériaux de la grille	223
6.2.2.1. Électrode de grille en silicium polycristallin (<i>self-aligned gate</i>) et nouveau processus de fabrication	223
6.2.2.2. Électrode de grille en siliciure de métal réfractaire	226
6.2.2.3. Diélectrique de grille en silice	227
6.2.2.4. Diélectrique de grille en oxynitride de silicium	228
6.2.3. Nouvelle grille HKMG et nouveau processus de fabrication	228
6.2.3.1. Nouvelle grille HKMG constituée d’un diélectrique de constante diélectrique élevée et d’une électrode de grille en métal réfractaire.	228
6.2.3.2. Le procédé ALD de dépôt.	229
6.2.4. Les matériaux de la source et du drain (<i>strained silicon</i>).	232
6.2.5. Nouvelles architectures	232
6.2.5.1. Transistor FD-SOI MOSFET.	233
6.2.5.2. Transistor FinFET MOSFET.	234
6.3. Annexe	235
6.4. Bibliographie.	236
 Index des noms propres.	 241
 Index des noms communs	 243
 Sommaire de <i>Le silicium, du sable aux puces 2</i>.	 247