



EGEM

électronique – génie électrique – microsystemes

Détecteurs optoélectroniques

*sous la direction de
Didier Decoster
Joseph Harari*

Hermes

Lavoisier

Table des matières

Avant-propos	15
Didier DECOSTER et Joseph HARARI	

Chapitre 1. Généralités sur les photodétecteurs à semi-conducteurs	17
Franck OMNES	

1.1. Brefs rappels sur les matériaux semi-conducteurs	17
1.2. Photodétection avec les semi-conducteurs : les phénomènes de base	19
1.3. Le dispositif photoconducteur	20
1.4. Jonction p-n et structure p-i-n	21
1.5. Effet d'avalanche dans les structures p-i-n	22
1.6. Jonction Schottky	23
1.7. Structures métal-semi-conducteur-métal (MSM)	25
1.8. Paramètres de fonctionnement des photodétecteurs	26
1.8.1. Coefficient de réponse, gain et rendement quantique	26
1.8.2. Réponse temporelle et bande passante	27
1.8.3. Puissance équivalente de bruit	27
1.8.4. Défectivité	28

Chapitre 2. Photodiodes PIN pour le visible et le proche infrarouge	31
Beaudoin DE CREMOUX	

2.1. Introduction	31
2.2. Processus physiques mis en jeu dans les photodiodes	33
2.2.1. Electrostatique de la diode PIN, zone désertée	33
2.2.2. Mécanismes de génération de paires électron-trou	34
2.2.2.1. Génération radiative, absorption optique	34
2.2.2.2. Génération non radiative	36
2.2.3. Mécanismes de transport	38
2.2.3.1. Transport sous champ électrique, courant de dérive	38

2.2.3.2. Transport sous gradient de concentration, courant de diffusion . . .	39
2.3. Caractéristiques statiques des photodiodes PIN	40
2.3.1. Caractéristiques IV, définition des paramètres statiques	40
2.3.2. Rendement quantique externe	41
2.3.2.1. Rendement optique	41
2.3.2.2. Rendement quantique interne	42
2.3.3. Courant d'obscurité	43
2.3.3.1. Courants de génération	43
2.3.3.2. Courant tunnel	44
2.3.4. Tension de claquage	45
2.3.4.1. Claquage Zener dû à l'effet tunnel	45
2.3.4.2. Claquage par avalanche	45
2.3.5. Courant de saturation	45
2.3.5.1. Limitation extrinsèque par la chute de tension dans la résistance de charge	45
2.3.5.2. Limitation intrinsèque par la charge d'espace des porteurs mobiles	45
2.4. Caractéristiques dynamiques des photodiodes PIN	47
2.4.1. Limitations intrinsèques à la vitesse de réponse	47
2.4.1.1. Temps de transit dans la zone désertée	47
2.4.1.2. Temps de diffusion dans les zones neutres	49
2.4.1.3. Piégeage à l'hétérojonction Pi	49
2.4.2. Limitations dues au circuit	50
2.4.2.1. Réponse du circuit élémentaire, optimum d'épaisseur de zone I	50
2.4.2.2. Réponse d'une photodiode PIN réelle	51
2.4.3. Compromis puissance-fréquence, « loi » en P^2	53
2.5. Matériaux semi-conducteurs utilisés et photodiodes PIN pour le visible et le proche infrarouge	54
2.5.1. Absorption des semi-conducteurs dans le domaine 400-1 800 nm	54
2.5.2. De 400 à 900 nm : silicium et famille GaAlAs/GaAs	55
2.5.2.1. Silicium	55
2.5.2.2. Arsénure de gallium et matériaux accordés	56
2.5.3. De 900 à 1 800 nm : germanium, GaInAsP/InP	57
2.5.3.1. Germanium	57
2.5.3.2. Phosphure d'indium et matériaux accordés	58
2.5.3.3. Autres matériaux	59
2.6. Nouvelles structures de photodiodes	59
2.6.1. Au-delà des limites des PIN conventionnelles	60
2.6.2. Photodiodes à géométrie colinéaire	61
2.6.3. Photodiodes guidées	63
2.6.4. Photodiodes à onde progressive	63
2.6.5. Au-delà des structures PIN	63
2.6.5.1. Structures $P^+p^+N^-N^-$	64
2.6.5.2. Structure P^+iIN^-	64
2.7. Bibliographie	64

Chapitre 3. Les photodiodes à avalanche.	67
Gérard RUPPCHÉ et Joseph HARARI	
3.1. Introduction	67
3.2. Historique	68
3.3. Le phénomène d'avalanche	69
3.3.1. Coefficients d'ionisation	70
3.3.2. Facteurs de multiplication	71
3.3.3. Tension de claquage	73
3.4. Propriétés des photodiodes à avalanche	74
3.4.1. Caractéristiques courant-tension et photomultiplication	75
3.4.2. Bruit des photodiodes à avalanche	76
3.4.3. Rapport signal/bruit des photodiodes à avalanche	79
3.4.4. Rapidité, temps de réponse, réponse en fréquence des photodiodes à avalanche	81
3.5. Aspects technologiques	83
3.5.1. Jonctions d'anneau de garde	84
3.5.2. Structure mesa	85
3.5.3. Défauts cristallins et microplasma	86
3.6. Photodiodes à avalanche au silicium	87
3.6.1. PDA Si N ⁺ P	87
3.6.2. PDA Si N ⁺ P π P ⁺	88
3.6.3. PDA Si N ⁺ π P π P ⁺	90
3.6.4. PDA Schottky SiP-Si N	92
3.7. Photodiodes à avalanche à base d'arsénure de gallium	93
3.8. Photodiodes à avalanche au germanium	95
3.8.1. PDA Ge de structures N ⁺ P, N ⁺ NP, P ⁺ N pour liaisons à 1,3 μ m	95
3.8.2. PDA Ge de structures P ⁺ NN ⁻ pour liaisons à 1,55 μ m	97
3.9. Photodiodes à avalanche à base de phosphure d'indium InP	99
3.9.1. PDA InGaAs/InP pour liaisons optiques à 2,5 Gbit/s	100
3.9.2. PDA InGaAs/InP rapides	102
3.10. Photodiodes à avalanche III-V à faible bruit	103
3.10.1. PDA III-V super-réseau ou multipuits quantiques	103
3.10.2. PDA à résonance spin-orbite	104
3.10.2.1. PDA GaAlSb/GaSb	104
3.10.2.2. Photodiodes à avalanche HgCdTe	105
3.11. Perspectives	105
3.11.1. PDA Si/InGaAs	106
3.11.2. PDA « guide d'onde » MPQ	106
3.11.3. PDA faible bruit à très fine zone de multiplication	106
3.12. Conclusion	107
3.13. Bibliographie	108

Chapitre 4. Les phototransistors	111
Carmen GONZALEZ et Antoine MARTY	

4.1. Introduction	111
4.2. Les phototransistors	112
4.2.1. Les phototransistors selon leur matériau de fabrication	112
4.2.2. Les phototransistors selon leur structure	113
4.2.2.1. Les phototransistors unipolaires à effet de champ	114
4.2.2.2. Les phototransistors bipolaires	115
4.3. Le phototransistor bipolaire : description et principe de fonctionnement	116
4.3.1. L'effet phototransistor	118
4.3.1.1. Les principaux courants dans le phototransistor	118
4.3.1.2. L'efficacité d'injection de l'émetteur dans une homojonction et une hétérojonction	120
4.3.1.3. Le facteur de transport dans la base	121
4.3.2. Le coefficient de réponse du phototransistor	122
4.3.3. Les gains statiques électrique et optique du phototransistor	123
4.3.3.1. Les gains statiques électriques β_0 et α_0	123
4.3.3.2. Le gain statique optique G_{opt}	124
4.3.4. Caractéristiques dynamiques du phototransistor	124
4.3.4.1. Le fonctionnement en petits signaux	124
4.3.4.2. Le fonctionnement non linéaire	128
4.3.4.3. Le fonctionnement en régime de forts signaux	132
4.3.5. Le bruit dans le phototransistor	134
4.4. Circuits photorécepteurs à base de phototransistors	135
4.4.1. Circuits d'amplification	135
4.4.2. Circuits non linéaires	137
4.5. Applications	137
4.5.1. L'isolation galvanique	137
4.5.2. Les phototransistors pour les télécommunications optiques	140
4.5.2.1. Le phototransistor InP/InGaAs en tant que photodétecteur avec préamplification	141
4.5.2.2. Le phototransistor InP/InGaAs en tant que mélangeur opto/électrique	143
4.6. Conclusion	144
4.7. Bibliographie	145
Chapitre 5. Les photodiodes métal-semi-conducteur-métal (MSSM)	149
Joseph HARARI et Vincent MAGNIN	
5.1. Introduction	149
5.2. Fonctionnement et structure	149
5.2.1. Principe	149
5.2.2. Matériaux utilisés	154

5.2.2.1. Composition des électrodes	154
5.2.2.2. Structure épitaxiale	156
5.3. Caractéristiques statiques et dynamiques	157
5.3.1. Coefficient de réponse	157
5.3.2. Comportement dynamique	163
5.3.3. Bruit	165
5.4. Possibilités d'intégration et conclusion	167
5.5. Bibliographie	168

Chapitre 6. Photodétecteurs pour l'ultraviolet	171
Franck OMNES et Eva MONROY	

6.1. Introduction	171
6.2. Le contraste UV-visible	178
6.3. Photodétecteurs Si et SiC pour la photodétection UV	178
6.3.1. Photodiodes UV à base de silicium	179
6.3.2. Photodétecteurs UV à base de SiC	182
6.4. Détecteurs UV à base de nitrures III-V	183
6.4.1. Photoconducteurs	183
6.4.1.1. Réponse spectrale	183
6.4.1.2. Temps de réponse	185
6.4.1.3. Effet d'une modulation de la fréquence du signal optique incident	188
6.4.2. Photodiodes à barrière Schottky à base d'AlGaIn	188
6.4.2.1. Propriétés électriques	188
6.4.2.2. Réponse spectrale	190
6.4.2.3. Temps de réponse	192
6.4.2.4. Bruit et détection	192
6.4.2.5. Photodiodes à barrière Schottky fabriquées à partir de GaN élaboré par la technique de croissance latérale (ELOG)	193
6.4.2.6. Application des photodétecteurs AlGaIn à barrière Schottky à la simulation des effets biologiques de la lumière UV	193
6.4.3. Photodiodes métal-semi-conducteur-métal (MSSM)	195
6.4.4. Photodiodes p-n et p-i-n	195
6.4.4.1. Caractéristiques statiques	196
6.4.4.2. Temps de réponse	197
6.4.4.3. Bruit	197
6.4.4.4. Photodiodes p-i-n sur GaN à croissance latérale	198
6.4.4.5. Photodiodes à avalanche à base de GaN	198
6.4.5. Les phototransistors	199
6.4.5.1. Phototransistors bipolaires	199
6.4.5.2. Phototransistors à effet de champ	200
6.5. Conclusion	200
6.6. Bibliographie	202

Chapitre 7. Le bruit dans les photodiodes et les systèmes de photoréception. 205
 Robert ALABEDRA et Dominique RIGAUD

7.1. Les outils mathématiques du « bruit » 206
 7.1.1. Signal certain d'énergie ou de puissance finie 206
 7.1.2. Signal aléatoire et bruit de fond. 208
 7.2. Les bruits fondamentaux 208
 7.2.1. Bruit thermique 209
 7.2.2. Bruit de grenaille 209
 7.2.3. Bruit de multiplication 210
 7.3. Bruit en excès 213
 7.3.1. Le bruit de génération-recombinaison 213
 7.3.2. Bruit en 1/f 213
 7.4. Analyse des réseaux électriques bruyants 215
 7.4.1. Représentation du bruit dans les dipôles. 215
 7.4.2. Représentation du bruit dans les quadripôles. 217
 7.5. Bruit dans les photodétecteurs. 218
 7.5.1. Paramètres caractéristiques 219
 7.5.2. Photodiodes PIN. 220
 7.5.3. Photodiodes à avalanche 223
 7.6. Optimisation en bruit d'un photorécepteur 224
 7.6.1. Formulation du problème 224
 7.6.2. Principes d'adaptation du photodétecteur à son transistor 228
 7.7. Calcul du bruit d'un photorécepteur 230
 7.7.1. Equations de base 230
 7.7.2. Modèles de bruit associés aux transistors 232
 7.7.2.1. Dans le cas d'un transistor à effet de champ 232
 7.7.2.2. Dans le cas d'un transistor bipolaire. 233
 7.7.3. Exemple de calcul : cas d'un photorécepteur de type PIN-FET 234
 7.8. Remarques et conclusions 241
 7.9. Bibliographie 242

Index 243

La photodétection représente un grand nombre de systèmes très nombreux : télécommande, capteur solaire, galvanique, capteur solaire, même processus : transmission signal devant être le plus possible. Lorsqu'il s'agit de photodétection il faut que ce photodétecteur implique qu'un certain nombre d'exigences de l'application de structures photodétectrices p-n et PIN, photodiodes, photodétecteurs MSM, d'onde visé dans l'application l'intermédiaire de la bande des matériaux employés.

Cet ouvrage rassemble les marquantes de notre époque comprises entre l'infrarouge bien les éléments qui permettent les performances et commence au premier chapitre des rappels sur les matériaux photodétection, et les structures

1. Le caractère très spécifique nécessiterait un ouvrage particulier

OPTOÉLECTRONIQUE

Le traité Electronique, Génie Electrique, Microsystèmes répond au besoin de disposer d'un ensemble de connaissances, méthodes et outils nécessaires à la maîtrise de la conception, de la fabrication et de l'utilisation des composants, circuits et systèmes utilisant l'électricité, l'optique et l'électronique comme support.

Conçu et organisé dans un souci de relier étroitement les fondements physiques et les méthodes théoriques au caractère industriel des disciplines traitées, ce traité constitue un état de l'art structuré autour des quatre grands domaines suivants :

Electronique et micro-électronique

Optoélectronique

Génie électrique

Microsystèmes

Chaque ouvrage développe aussi bien les aspects fondamentaux qu'expérimentaux du domaine qu'il étudie. Une classification des différents chapitres contenus dans chacun, une bibliographie et un index détaillé orientent le lecteur vers ses points d'intérêt immédiats : celui-ci dispose ainsi d'un guide pour ses réflexions ou pour ses choix.

Les savoirs, théories et méthodes rassemblés dans chaque ouvrage ont été choisis pour leur pertinence dans l'avancée des connaissances ou pour la qualité des résultats obtenus.

hermes
Science
— publications —

www.hermes-science.com

ISBN 2-7462-0562-9



9 782746 205628