



**EGEM**

électronique – génie électrique – microsystemes

**Microsystemes**  
**opto-électromécaniques**

**MOEMS**

*sous la direction de*  
*Pierre Viktorovitch*

**hermes**

*Lavoisier*

---

## Table des matières

<b>Avant-propos</b> . . . . .	15
Pierre VIKTOROVITCH	
<b>Chapitre 1. Les microdéflecteurs optiques</b> . . . . .	17
Henri CAMON	
1.1. Introduction . . . . .	17
1.2. Actionnement piézo-électrique . . . . .	18
1.2.1. L'actionnement interne . . . . .	18
1.2.2. L'actionnement externe . . . . .	20
1.3. Actionnements thermiques . . . . .	22
1.4. Actionnements magnétiques . . . . .	23
1.4.1. Les spires et la force de Lorentz . . . . .	24
1.4.2. La magnétostriction . . . . .	25
1.5. Actionnements électrostatiques . . . . .	26
1.5.1. Le micro-usinage de surface . . . . .	26
1.5.2. Le micro-usinage de volume . . . . .	29
1.6. Comparaison des performances . . . . .	32
1.7. Bibliographie . . . . .	35
<b>Chapitre 2. Microtechniques pour l'alignement optique et le packaging</b> . . . . .	39
Michel DE LABACHELERIE	
2.1. Introduction . . . . .	39
2.2. Technologies de base pour l'alignement optique . . . . .	40
2.2.1. Usinage chimique humide anisotrope du silicium . . . . .	40
2.2.2. Technologie LIGA et attaque plasma anisotrope DRIE . . . . .	43
2.2.3. Assemblages de précision . . . . .	45
2.3. Connexions entre fibres optiques et composants . . . . .	46

2.3.1. L'intérêt de la connectivisation de composants optiques . . . . .	46
2.3.2. Connexion fibre/fibre . . . . .	47
2.3.3. Connexion fibre/guide . . . . .	48
2.4. Microbanes optiques . . . . .	55
2.5. Conclusion . . . . .	59
2.6. Bibliographie . . . . .	60
<b>Chapitre 3. MOEMS III-V . . . . .</b>	<b>65</b>
Jean-Louis LECLERCQ, Michel GARRIGUES, Pierre VIKTOROVITCH	
3.1. Introduction : motivations pour les MOEMS à base de semiconducteurs composés III-V . . . . .	65
3.2. Un état de l'art résumé sur les MOEMS III-V et leurs applications . . . . .	66
3.3. Un cas d'école : dispositifs multilames à base de semiconducteurs III-V de la filière InP . . . . .	70
3.3.1. La brique de base et principes généraux de mise en œuvre . . . . .	70
3.3.2. Conception des dispositifs . . . . .	72
3.3.2.1. Conception optique . . . . .	72
3.3.2.2. Conception électromécanique . . . . .	75
3.3.3. Fabrication des dispositifs : micro-usinage de surface . . . . .	80
3.3.3.1. Sélectivité et anisotropie . . . . .	81
3.3.3.2. Collage . . . . .	84
3.3.3.3. Contraintes résiduelles . . . . .	86
3.3.3.4. « Rebouclage » avec la conception électro-optomécanique . . . . .	87
3.3.4. Présentation détaillée d'un exemple de dispositif : filtre accordable pour réseaux colorés de télécommunications (systèmes WDM) . . . . .	88
3.3.4.1. Spécifications . . . . .	88
3.3.4.2. Conception électro-optomécanique . . . . .	90
3.3.4.3. Fabrication . . . . .	94
3.3.4.4. Caractérisation et tests sur banc fibré . . . . .	95
3.3.5. Autres dispositifs et applications . . . . .	98
3.3.5.1. <i>Switches</i> optiques . . . . .	98
3.3.5.2. Photodétecteurs accordables pour la spectroscopie dans le proche infrarouge . . . . .	99
3.3.5.3. VCSEL accordable . . . . .	102
3.4. Conclusions et perspectives . . . . .	105
3.5. Listes des acronymes . . . . .	107
3.6. Bibliographie . . . . .	107
<b>Chapitre 4. Aspects technico-économiques : tendances et marchés . . . . .</b>	<b>111</b>
Philippe BREGI et Rémy POTTIER	
4.1. Les microtechnologies en optique : définition, description . . . . .	111
4.1.1. Définitions . . . . .	111

4.1.2. Les microcomposants optiques, applications . . . . .	112
4.1.3. Technologies de fabrication . . . . .	112
4.1.4. Conclusion . . . . .	115
4.2. Les réseaux et systèmes de télécommunications optiques . . . . .	116
4.2.1. Structure des réseaux de télécommunications . . . . .	116
4.2.1.1. Commutation et transmission . . . . .	117
4.2.1.2. Du numérique à l'optique . . . . .	118
4.2.2. Evolution des réseaux optiques . . . . .	118
4.2.2.1. Du PDH au SDH . . . . .	118
4.2.2.2. L'essor du WDM . . . . .	120
4.2.3. Segmentation des réseaux optiques par application . . . . .	120
4.2.3.1. Liaisons sous-marines . . . . .	120
4.2.3.2. Liaisons <i>Ultra Long Haul</i> . . . . .	121
4.2.3.3. Liaisons <i>Long Haul</i> . . . . .	121
4.2.3.4. Liaisons <i>Metro</i> . . . . .	121
4.2.3.5. Liaisons <i>Access</i> . . . . .	121
4.2.3.6. Boucle locale . . . . .	122
4.2.4. Systèmes optiques et besoin en sauts technologiques . . . . .	122
4.2.4.1. Equipements de ligne . . . . .	123
4.2.4.2. Equipements de centres . . . . .	123
4.3. Les microtechnologies en télécoms . . . . .	123
4.3.1. Contexte technico-économique . . . . .	123
4.3.2. Attraits des microtechnologies pour l'optique . . . . .	124
4.3.3. Comparaison de quelques solutions technologiques pour réaliser des composants télécoms optiques intégrés . . . . .	125
4.3.4. Les différentes fonctions optiques réalisables en microtechnologies . . . . .	125
4.3.5. Composants accordables : des opportunités pour les MEMS . . . . .	128
4.3.5.1. Introduction . . . . .	128
4.3.5.2. <i>Variable Optical Attenuator</i> (VOA) . . . . .	129
4.3.5.3. Filtres accordables . . . . .	129
4.3.5.4. Lasers accordables . . . . .	129
4.3.5.5. Compensation de dispersion . . . . .	130
4.4. Acteurs des composants optiques pour télécoms en Europe . . . . .	130
4.4.1. Sociétés MEMS . . . . .	130
4.4.2. Sociétés en optique intégrée . . . . .	132
4.4.3. Fabricants de MEMS et de composants en optique intégrée pour applications télécoms optiques en Europe . . . . .	133
4.5. Conclusion . . . . .	134
4.6. Détail pour les matrices de commutation optique pour OXC . . . . .	134
4.6.1. Besoins système pour une couche optique brassée . . . . .	134
4.6.1.1. La couche réseau SDH/SONET . . . . .	134
4.6.1.2. Le nœud devient le goulot d'étranglement . . . . .	135
4.6.1.3. Evolution vers un réseau tout optique . . . . .	135
4.6.1.4. Besoins système en matrices de commutation optique . . . . .	135
4.6.1.5. Comparaison des différentes solutions systèmes . . . . .	136

4.6.2. Technologies . . . . .	136
4.6.3. Marchés . . . . .	137
4.6.3.1. Composants : matrices de commutation . . . . .	137
4.6.3.2. Evaluation du marché par taille des composants . . . . .	139
4.6.4. Conclusion . . . . .	139
4.7. Lexique . . . . .	139

**Chapitre 5. MOEMS pour la correction de surface d'onde en optique adaptative** . . . . . 141

Wilfrid SCHWARTZ, Jean-Luc BEUZIT, Pierre KERN

5.1. Introduction . . . . .	141
5.2. L'optique adaptative appliquée à l'astronomie . . . . .	142
5.2.1. La turbulence atmosphérique . . . . .	142
5.2.2. Le principe de l'optique adaptative . . . . .	143
5.2.2.1. L'analyseur de front d'onde . . . . .	144
5.2.2.2. Le système de correction : le miroir déformable . . . . .	146
5.2.2.3. La commande du miroir . . . . .	146
5.2.3. Les systèmes actuels . . . . .	147
5.3. Nouveaux développements en optique adaptative . . . . .	149
5.3.1. Systèmes astronomiques . . . . .	150
5.3.1.1. Observations à plus courtes longueurs d'onde . . . . .	151
5.3.1.2. Imagerie à très haute dynamique . . . . .	151
5.3.1.3. Très grands télescopes . . . . .	152
5.3.2. Ophtalmologie . . . . .	152
5.3.3. Spécifications des micromiroirs déformables . . . . .	153
5.4. Technologie des MOEMS pour l'optique adaptative . . . . .	153
5.4.1. Les cristaux liquides . . . . .	155
5.4.2. Les miroirs déformables . . . . .	158
5.4.2.1. Actionnement . . . . .	158
5.4.2.2. Miroirs segmentés . . . . .	159
5.4.2.3. Composants à surface continue . . . . .	166
5.5. Conclusion . . . . .	174
5.6. Bibliographie . . . . .	174

**Chapitre 6. Microsystèmes pour les télécommunications optiques** . . . . . 181

Philippe HÉLIN, Tarik BOUROUNA, Gilbert REYNE

6.1. Introduction . . . . .	181
6.1.1. Les MOEMS pour applications télécom . . . . .	181
6.1.2. Commutateurs optiques ( <i>switches</i> ) et matrices de commutateurs ( <i>cross-connects</i> ) . . . . .	182
6.1.3. Intérêt des technologies MEMS . . . . .	182
6.1.4. Vers le rêve du tout optique ? . . . . .	183

**6.2. Nouvelles technologies pour la fabrication de matrice de commutateurs** . . . . .

6.2.1. Commutateurs optomécaniques . . . . .	
6.2.2. Technologies électro-optique et thermo-électrique . . . . .	
6.2.3. Bulle d'Agilent . . . . .	
6.3. Les solutions à base de MEMS . . . . .	
6.3.1. L'approche 2D digitale . . . . .	
6.3.2. L'approche 3D analogique . . . . .	
6.4. La technologie MEMS . . . . .	
6.4.1. L'usinage de volume . . . . .	
6.4.2. L'usinage de surface . . . . .	
6.4.3. La gravure ionique réactive profonde du silicium . . . . .	
6.5. Exemples de commutateur par approche digitale . . . . .	
6.5.1. Commutateur obtenu par gravure chimique anisotrope du silicium . . . . .	
6.5.2. Commutateur obtenu par gravure profonde du silicium . . . . .	
6.5.2.1. Commutateur de l'IMT . . . . .	
6.5.2.2. Commutateur de Mitsubishi . . . . .	
6.5.3. Commutateur obtenu par usinage de surface . . . . .	
6.5.3.1. Structures à microhamière . . . . .	
6.5.3.2. Commutateur d'UCLA . . . . .	
6.5.3.3. Le commutateur d'ATT . . . . .	
6.6. Matrice de commutateurs optiques réalisée au LIMMS/CNRS-IIS . . . . .	
6.6.1. Principe de fabrication : usinage de volume d'un monocristal de silicium . . . . .	
6.6.2. Avantages liés aux directions cristallographiques . . . . .	
6.6.3. Conséquences du procédé sur le dessin des masques . . . . .	
6.6.4. Conséquences sur la structure obtenue . . . . .	
6.6.5. Détail du procédé de fabrication technologique . . . . .	
6.6.6. Exemples de structures simples et de structures en ligne . . . . .	
6.6.7. Bistabilité magnétique appliquée à l'actionnement du commutateur . . . . .	
6.6.8. Principe et réalisation du matrage . . . . .	
6.6.9. Principe de l'actionnement du système matricié . . . . .	
6.7. L'approche analogique de Lucent . . . . .	
6.8. Conclusion . . . . .	
6.9. Bibliographie . . . . .	

**Chapitre 7. Une antenne de recherche française au Japon : le LIMMS** . . . . .

Jean-Philippe GOUY

7.1. Introduction . . . . .	
7.2. Le LIMMS . . . . .	
7.2.1. Historique . . . . .	
7.2.2. Motivations . . . . .	
7.2.3. Politique scientifique . . . . .	

213	7.2.3.1. Thématiques de recherche.
213	7.2.3.2. Les projets.
213	7.2.4. Organisation.
213	7.2.4.1. Ressources humaines.
214	7.2.4.2. Ressources financières.
214	7.3. Les laboratoires d'accueil japonais.
214	7.3.1. Du RGOE au CIRMM.
214	7.3.2. Thématiques de recherche et laboratoires.
215	7.3.2.1. Micro/nano systèmes électromécaniques : le Fujita-lab.
215	7.3.2.2. Micro-usinage volumique : le Masuzawa-lab.
217	7.3.2.3. Instrumentation scientifique et nanotechnologie :
219	le Kawakatsu-lab.
219	7.3.2.4. Composants électroniques silicium ultimes :
221	le Hiramoto-lab.
222	7.3.2.5. La microrobotique : le Hashimoto-lab.
223	7.3.2.6. Opto-électronique et structures quantiques : le Arakawa-lab.
225	7.3.2.7. Microfluidique appliquée à la biologie : le Fujii-lab.
225	7.4. Projets LIMMS.
225	7.4.1. MOEMS en espace libre.
225	7.4.1.1. Alignement par micro-actionneurs de composants optiques.
227	7.4.1.2. Matrice de commutateurs optiques.
228	7.4.1.3. Microscanner optique bidimensionnel
228	à actionnement magnétostrictif.
228	7.4.1.4. Filtre optique accordable en longueur d'onde.
228	7.4.1.5. Packaging avec connexions électriques et optiques.
229	7.4.2. MOEMS et guides optiques.
229	7.4.2.1. Microswitch optique à guide optique.
230	7.4.2.2. Interrompateur Mach-Zehnder sur silicium.
230	7.4.3. MOEMS et matériaux III-V.
230	7.4.3.1. Réseaux de VCSEL pour interconnexion en espace libre.
231	7.4.3.2. Systèmes de détection intégrée utilisant un VCSEL GaAs
231	pour microscopie optique en champ proche.
232	7.4.3.3. Microsystèmes à base de GaN.
232	7.4.3.4. Microsystèmes à base de semiconducteurs organiques.
233	7.5. Bibliographie.
237	Index.

**MICROSYSTÈMES**

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.

