HAL
open science

Conception de commutateurs micro-usinés sur silicium pour les réseaux tout optiques

S. Martinez

To cite this version:

S. Martinez. Conception de commutateurs micro-usinés sur silicium pour les réseaux tout optiques. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2002. Français. NNT : . tel-00002957

HAL Id: tel-00002957

https://theses.hal.science/tel-00002957

Submitted on 6 Jun 2003

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE

N° attribué par la bibliothèque
|__/__/__/__/__/__/__/__/__/__/

THESE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'INPG

Spécialité : Microélectronique

préparée au laboratoire **TIMA**

dans le cadre de l'Ecole Doctorale
« Electronique, Electrotechnique, Automatique, Télécommunications, Signal »

présentée et soutenue publiquement

par

Sergio MARTINEZ

le 21 mai 2002

Titre :

Conception de Commutateurs Micro-usinés sur Silicium pour les Réseaux Tout Optiques

Directeur de thèse :

Bernard COURTOIS

JURY

Mme. Nadine GUILLEMOT,	Président
M. Christian DUFAZA,	Rapporteur
M. Tarik BOUROUINA	Rapporteur
M. Bernard COURTOIS,	Directeur de thèse
M. Christian SCHAEFFER,	Examinateur
M. Abderrahim RAMDANE,	Examinateur
M. Pierre KERN,	Examinateur

Remerciements

Mon intérêt pour les microsystèmes a commencé un certain jour à Monterrey, lors de la lecture d'un article dans le magazine « Spectrum » intitulé « Mirrors on a Chip ». Quelques années sont déjà passées depuis lors et ma conception abstraite des microsystèmes de cette époque a évolué vers une connaissance beaucoup plus définie. Ces années au TIMA ont déjà laissé leur trace.

Je suis profondément reconnaissant à mon directeur de thèse, Bernard Courtois pour avoir soutenu mes recherches dans la voie des microsystèmes. J'admire son engagement pour faire avancer ce domaine émergent. C'est maintenant à moi de porter le flambeau des microsystèmes dans un autre coin du monde.

Je remercie aussi Jean-Michel Karam qui un jour m'a suggéré d'orienter mes recherches soit vers les microsystèmes optiques soit vers les application des télécommunications. J'ai fini par choisir un sujet qui concernait les deux domaines. Merci de m'avoir indiqué la bonne direction.

Je voudrais témoigner ma reconnaissance à Madame Nadine Guillemot, directrice adjointe de l'Ecole Nationale Supérieure d'Electronique et Radioélectricité de Grenoble (ENSERG), qui m'a fait l'honneur de présider mon jury de thèse.

Que les Professeurs Christian Dufaza, directeur d'études dans le Département Microélectronique et Télécommunications de Polytech' Marseille, Université Aix-Marseille I ; et Tarik Bourouina, de l'Ecole Supérieure d'Ingénieurs en Electrotechnique et Electronique (ESIEE), trouvent ici l'expression de ma reconnaissance pour avoir accepté d'être rapporteurs de mon travail.

Je remercie également le Professeur Christian Schaeffer, du Centre Inter-Universitaire de Microélectronique (CIME) ; Monsieur Abderrahim Ramdane, du Laboratoire de Photonique et Nanostructures (LPN) ; et Monsieur Pierre Kern, du Laboratoire d'Astrophysique de l'Observatoire de Grenoble (LAOG) ; qui ont accepté de faire partie de mon jury de thèse.

J'adresse mes remerciement à Monsieur Ahmed Jerraya, directeur du groupe SLS du TIMA, et à Monsieur Steven Levitan de l'Université de Pittsburgh, pour les expériences partagées dans le projet de validation de systèmes hétérogènes.

Je tiens aussi à témoigner ma reconnaissance au Professeur Skandar Basrour et à Monsieur Salvador Mir pour tout le temps qu'ils ont consacré à la lecture du manuscrit de thèse. Leurs conseils m'ont été très précieux pour l'amélioration du document.

Pour les expériences aussi bien professionnelles que personnelles, je remercie mes collèges Fabien Parrain, Benoît Charlot, Nicolas Galy, Jérôme Goy, Christian Dominguez, Libor Rufer, et Zein Juneidi, de l'ancien groupe MCS ; Gabriela Nicolescu, Lobna Kriaa et Wassim Youssef, du groupe SLS; Laurent Fesquet, du groupe CIS ; Alejandro Chagoya, du CIME ; et Tim Kurzweg et José Martinez de l'Université de Pittsburgh. Je remercie également Françoise Renzetti pour son aide dans plusieurs étapes de mon séjour au TIMA.

Je voudrais exprimer ma reconnaissance au Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) et à l'Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM), les deux organismes qui ont soutenu financièrement mes études de Doctorat.

Je remercie ma famille et mes proches pour m'avoir soutenu au cours de mes études : Irma Chapa, Claire Zinelli, Patrick Zinelli, Héctor et Silvia Martinez, Jaime et Irma Garcia, Tatie Cathy, Lydia Chapa, Marie-Cécile Cauvet, Antoine et Dominique Palfroy.

Finalement, je remercie ma femme Andrée pour son soutien incomparable et pour sa patience à m'écouter parler un peu trop de microsystèmes ces dernières années. C'est à Andrée et à ma petite Floranne que je voudrais dédier ce travail.

Table de Matières

Chapitre 1 ..... **1**
Introduction

1.1. Vue d'ensemble sur les réseaux optiques 1
1.1.1. Evolution de la transmission de signaux par fibre optique 2
1.1.2. Fibre optique monomode de silice 4
1.1.2.1. Pertes de propagation 5
1.1.2.2. Dispersion dans les fibres monomode 5
1.1.3. Multiplexage en longueur d'onde 7
1.1.4. Architectures des réseaux optiques. 8
1.1.5. Architecture et spécifications d'un commutateur optique 10
1.1.6. Commutateurs optiques à court terme 12
1.2. Vue d'ensemble sur les microsystèmes optiques 14
1.2.1. Les origines des microsystèmes optiques 14
1.2.2. MOEMS 17
1.2.3. Commutateurs optiques micro-usinés 18
1.3. Motivations, objectifs et plan de thèse 20
Bibliographie 22

Chapitre 2 ..... **25**
Etat de l'Art sur les Commutateurs Optiques

2.1. Classification des commutateurs optiques 25
2.1.1. Commutateurs électro-optiques 26
2.1.2. Commutateurs thermo-optiques 28
2.1.3. Commutateurs acousto-optiques 29
2.1.4. Commutateurs magnéto-optiques 30
2.1.5. Commutateurs tout-optiques 31
2.1.6. Commutateurs mécano-optiques 32
2.2. Avantages des commutateurs opto-mécaniques micro-usinés 35
2.2.1. Pertes d'insertion 36
2.2.2. Diaphonie intercanaux 36
2.2.3. Dépendance sur la polarisation et sur la longueur d'onde 37
2.2.4. Taille 37
2.2.5. Consommation 37
2.2.6. Temps de commutation 38
2.2.7. Coût 38
2.3. Conclusions 38
Bibliographie 39

Chapitre 3 ..... **43**
Modélisation optique des commutateurs micro-usinés

3.1. Structures des commutateurs à base de miroirs 44
3.1.1. Commutateurs 2D 44
3.1.2. Commutateurs 3D 45
3.2. Modélisation de la propagation optique 46
3.2.1. Théorie Electromagnétique 46
3.2.2. Optique d'ondes scalaires 47
3.2.2.1. Optique de faisceaux gaussiens 49
3.2.2.2. Formulation de Rayleigh-Sommerfeld 50
3.2.3. Optique géométrique 51
3.3. Pertes d'insertion dans les commutateurs optiques dues aux erreurs d'alignement des fibres 52

3.3.1. Couplage direct de fibres monomode 52
3.3.2. Collimateurs 56
3.3.2.1. Lentilles diffractives micro-usinées 57
3.3.2.2. Lentilles réfractives micro-usinées 57
3.3.2.3. Lentilles fabriquées par lithographie directement sur la fibre 58
3.3.2.4. Lentilles à gradient d'indice 59
3.3.3. Couplage de fibres monomode avec lentilles à gradient d'indice 60
3.4. Pertes d'insertion dans les commutateurs optiques dues aux imperfections des miroirs 63
3.4.1. Taille du miroir 63
3.4.2. Position angulaire du miroir 64
3.4.3. Facteur de réflexion du matériau 65
3.4.4. Dépôt non-planaire des couches structurelles formant le miroir 66
3.4.5. Courbure du miroir 66
3.4.6. Diffusion sur la surface 66
3.4.7. Diffraction due aux trous pour la gravure 67
3.5. Perspectives sur l'application d'une théorie scalaire de diffraction dans la conception de microsystèmes optiques 67
3.6. Conclusions 71
Bibliographie 72

Chapitre 4 75
Modélisation d'actionneurs électrostatiques micro-usinés

4.1. Actionneurs micro-usinés 76
4.1.1. Actionneurs thermiques 76
4.1.2. Actionneurs magnétiques 77
4.1.3. Actionneurs électrostatiques 78
4.2. Déflection et torsion de poutres 79
4.2.1. Poutre encastrée-libre 79
4.2.2. Poutre sans rotation à l'extrémité libre 81
4.2.3. Torsion de poutres rectangulaires 82
4.3. Actionneur à plaques parallèles avec déplacement transversal 83
4.3.1. Principe de fonctionnement 83
4.3.2. Limite de stabilité 84
4.3.3. Miroir suspendu par quatre poutres de flexion 86
4.4. Actionneur à plaques parallèles avec mouvement latéral 87
4.4.1. Principe de fonctionnement 87
4.4.2. Actionneur à peignes interdigités 88
4.4.3. Miroir avec actionneur à peignes interdigités 89
4.5. Actionneur à électrode giratoire 91
4.5.1. Miroir suspendu par deux poutres de torsion 91
4.5.2. Miroir suspendu par deux poutres de torsion avec angle initial entre les électrodes 94
4.6. Autres actionneurs électrostatiques 96
4.6.1. Moteurs électrostatiques 96
4.6.2. Microactionneurs à interactions de contact 97
4.6.3. Vibromoteurs linéaires 98
4.6.4. Actionneurs à structure mécanique précontrainte 100
4.7. Simulations électrostatique et structurelle couplées 104
4.8. Conclusions 107
Bibliographie 108

Chapitre 5 111
Validation globale de microsystèmes optiques par cosimulation

5.1. Evolution des systèmes intégrés et des outils de conception 112
5.2. Problématique de la conception de microsystèmes optiques 113
5.3. Outils de conception spécifiques à chaque domaine 115
5.3.1. Simulation de composants électroniques et optoélectroniques 115

5.3.2. Simulation de composants électrostatiques 116
5.3.3. Simulation de la propagation de signaux lumineux 117
5.3.4. Génération de modèles d'ordre réduit 118
5.4. Validation globale du système 119
5.5. Cosimulation de systèmes hétérogènes sur *SystemC* 120
5.5.1. Spécification de systèmes hétérogènes 120
5.5.2. SystemC comme langage de spécification de systèmes 121
5.5.3. Concepts de base pour la cosimulation sur SystemC 122
5.5.3.1. Modèle de spécification 123
5.5.3.2. Modèle d'exécution 123
5.5.3.3. Génération automatique du modèle d'exécution 125
5.6. Validation globale d'un commutateur optique par cosimulation 126
5.6.1. Définition d'un commutateur optique de test 126
5.6.2. Proprieté du commutateur à valider 128
5.6.3. Modèle de spécification pour le commutateur optique 129
5.6.4. Modèle d'exécution pour le commutateur optique 130
5.6.5. Résultats de la cosimulation. 132
5.7. Conclusions 133
Bibliographie 134

Chapitre 6 137
Micro-usinage de commutateurs optiques

6.1. Techniques de fabrication de commutateurs 137
6.1.1. Gravure humide anisotrope du silicium 138
6.1.2. Gravure sèche de wafers de silicium 139
6.1.3. Gravure de wafers SOI 139
6.1.4. Micro-usinage en surface 140
6.2. Micro-usinage en surface de Cronos 141
6.3. Fabrication d'un commutateur en technologie MUMP/Cronos 145
6.3.1. Conception des miroirs 146
6.3.2. Conception du système d'actionnement 147
6.3.2.1. Charnière de substrat. 147
6.3.2.2. Plaque glissante et charnières suspendues. 148
6.3.2.3. Matrice de SDA 149
6.3.2.4. Ressorts mécaniques 150
6.3.2.5. Plots électriques 150
6.4. Analyse de résultats et conclusions 150
Bibliographie 152

Chapitre 7 155
Conclusions et perspectives

7.1. Conclusions 155
7.2. Perspectives 158
7.2.1. Atténuateurs variables 158
7.2.2. Egalisateurs 158
7.2.3. Modulateurs 159
7.2.4. Sources accordables en longueur d'onde 159
7.2.5. Filtres optiques 160
7.2.6. Photo-capteurs accordables en longueur d'onde 161
7.2.7. Multiplexeurs/Démultiplexeurs 161
Bibliographie 161

Résumé 164
Abstract 164

Liste de Figures

Chapitre 1 ..... **1**

Figure 1.1. Fibre optique monomode à saut d'indice : (a) dimensions, (b) profil de l'indice de réfraction. 5
Figure 1.2. Pertes d'insertion d'une fibre monomode de silice, d'après [MIY 79]. 5
Figure 1.3. Lien point-à-point utilisant une seule longueur d'onde et des répétiteurs optoélectroniques. 8
Figure 1.4. Lien point-à-point utilisant de multiples longueurs d'onde et des amplificateurs optiques. 8
Figure 1.5. Un lien point-à-point avec un module optique d'insertion/extraction. 9
Figure 1.6. Un module optique d'insertion/extraction : (a) dans l'état de by-pass, (b) dans l'état d'échange. 9
Figure 1.7. Un réseau de transport optique. 10
Figure 1.8. Commutateur optique et composants associés. 11
Figure 1.9. Commutateur électronique avec contrôle électronique. 13
Figure 1.10. Commutateur optique avec contrôle électronique. 13
Figure 1.11. Commutateur optique avec contrôle optique. 14
Figure 1.12. Réseau à guides d'ondes. 15
Figure 1.13. Structure monolithique contenant un photodiode et un transistor. 16
Figure 1.14. Système intégré très hétérogène semblable à celui proposé par R.A. Soref [SOR 93]. 17
Figure 1.15. Commutateur optique : (a) matrice de miroirs, (b) miroir micro-usiné en surface. 19
Figure 1.16. Tendances du marché pour les produits micro-usinés nouveaux, 2002. (Source : Market analysis for microsystems 1996-2002, Nexus ! Task Force) 20

Chapitre 2 ..... **25**

Figure 2.1. Dispositifs électro-optiques (a) coupleur, (b) commutateur 4x4. 26
Figure 2.2. Modulateur de phase thermo-optique. 28
Figure 2.3. Dispositifs acousto-optiques : (a) profil de variation de l'indice de réfraction dans un matériau homogène excité par une onde acoustique, (b) commutateur 1×2, (c) commutateur 1×N. 30
Figure 2.4. Commutateur magnéto-optique. 31
Figure 2.5. Commutateur tout-optique par sélection de la polarisation. 32
Figure 2.6. Routeur contrôlé par le niveau de puissance du signal d'entrée. 32
Figure 2.7. Eléments déflecteurs de signaux lumineux dans l'air [GLO 97]. 33

Chapitre 3 ..... **43**

Figure 3.1. Commutateur optique avec architecture 2D. 44
Figure 3.2. Commutateur optique avec architecture 3D. 45
Figure 3.3. Théories de la propagation de la lumière. 46
Figure 3.4. Définition des paramètres de la formulation de Rayleigh-Sommerfeld. 50
Figure 3.5. Système optique centré : (a) définition de paramètres, (b) matrice de transfert du système. 51
Figure 3.6. Erreurs d'alignement dans une liaison entre fibres. 52
Figure 3.7. Pertes d'insertion dans une liaison entre fibres monomode dues à la séparation entre les fibres. 55
Figure 3.8. Lignes de contour à pertes d'insertion constantes pour $\Delta z \approx 0$: (a) λ=1.3 µm, (b) λ=1.55 µm. 55
Figure 3.9. Effet de la séparation longitudinale entre les fibres sur les pertes d'insertion. 56
Figure 3.10. Lentilles diffractives : à profil continu [HER 98], à profil discret [WU 97]. 57
Figure 3.11. Lentilles réfractives [STE 98]. 58
Figure 3.12. Lentilles réfractives fabriquées directement sur la fibre : après le dépôt et la gravure d'une couche de résine, (b) après une étape de recuit, (c) après une étape de gravure sèche [SAS 00]. 58
Figure 3.13. Lentille à gradient d'indice. 59
Figure 3.14. Couplage de fibres monomode en utilisant des lentilles à gradient d'indice. 60
Figure 3.15. Pertes d'insertion dans une liaison entre fibres monomode collimatées par des lentilles à gradient d'indice en fonction de la séparation entre les fibres et de la taille du faisceau : (a) λ=1,3 µm, (b) λ=1,55 µm. 61

Figure 3.16. Lignes de contour à pertes d'insertion constantes pour une séparation négligeable entre les lentilles et pour un rayon du faisceau transmis de 100 µm : (a) λ=1,3 µm, (b) λ =1,55 µm. ... 61
Figure 3.17. Lignes de contour à pertes d'insertion constantes pour une séparation négligeable entre les lentilles et pour un rayon du faisceau transmis de 250 µm : (a) λ=1,3 µm, (b) λ =1,55 µm. ... 62
Figure 3.18. Accroissement de l'exactitude du positionnement nécessaire en fonction de la distance de séparation : (a) 1,3 µm, (b) 1,55 µm. ... 62
Figure 3.19. Le plan d'un miroir qui montre les vecteurs d'incidence et de réflexion ainsi que les différentes erreurs de rotation. ... 64
Figure 3.20. Pertes d'insertion dues à la rugosité de la surface. ... 67
Figure 3.21. Miroir micro-usiné en surface, technologie MUMPS: (a) vue d'ensemble du réflecteur, (b) vue rapprochée d'un trou. ... 67
Figure 3.22. Extrémité d'une fibre optique monomode et plusieurs plans d'observation. ... 68
Figure 3.23. Les signaux (a) à 10 µm, (b) à 20 µm, (c) à 40 µm et (d) à 80 µm d'une fibre monomode. ... 69
Figure 3.24. Couplage entre deux fibres optiques monomode. ... 69

Chapitre 4 ... 75

Figure 4.1. Actionneurs thermiques : (a) structure composée, (b) structure asymétrique. ... 76
Figure 4.2. Actionneurs magnétiques : (a) utilisant un élément ferromagnétique ou un aimant permanent, (b) utilisant la force de Lorentz. ... 78
Figure 4.3. Poutre défléchie par une force appliquée sur l'extrémité libre. ... 79
Figure 4.4. Poutre défléchie par une force appliquée en x=a. ... 80
Figure 4.5. Déflexion d'une poutre sans rotation dans l'extrémité libre. ... 81
Figure 4.6. Poutre rectangulaire en torsion. ... 82
Figure 4.7. Actionneur à plaques parallèles avec déplacement transversal. ... 83
Figure 4.8. Régions d'opération d'un actionneur électrostatique : (a) tension d'entrée nulle, (b) tension d'entrée inférieure à la limite de stabilité, (c) tension d'entrée supérieure à la limite de stabilité. ... 85
Figure 4.9. Miroir suspendu par quatre poutres de flexion. ... 86
Figure 4.10. Actionneur à plaques parallèles avec mouvement latéral de l'électrode mobile. ... 87
Figure 4.11. Actionneur à peignes interdigités. ... 88
Figure 4.12. Commutateur utilisant un actionneur à peignes interdigités. ... 90
Figure 4.13. Partie du système de suspension pour l'actionneur à peignes interdigités. ... 90
Figure 4.14. Miroir suspendu par deux poutres de torsion. ... 92
Figure 4.15. Miroir suspendu par deux poutres de torsion centrales. ... 93
Figure 4.16. Miroir suspendu par deux poutres de torsion latérales, l'angle initial entre les électrodes est différent de zéro. ... 94
Figure 4.17. Miroir perpendiculaire au substrat et suspendu par deux poutres de torsion latérales, l'angle initial entre les électrodes est différent de zéro. ... 95
Figure 4.18. Moteur électrostatique à interactions de champs [BAR 90] : (a) vue d'ensemble, (b) coupe latérale. ... 96
Figure 4.19. Actionneur à interactions de contact type SDA. ... 97
Figure 4.20. Phases dans l'opération d'un SDA. ... 98
Figure 4.21. Matrice d'actionneurs SDA. ... 98
Figure 4.22. Vibromoteur linéaire. ... 99
Figure 4.23. Structure de la poutre excitée de façon électrostatique. ... 100
Figure 4.24. Actionneur électrostatique : (a) poutre déformée par la contrainte mécanique résiduelle des matériaux, (b) poutre légèrement déplacée vers le bas par l'action d'un champ électrique, (c) poutre collée contre le substrat pour des tensions de commande supérieures à V_{MAX}. ... 101
Figure 4.25. Géométrie de la poutre: (a) poutre non-déformée, (b) poutre déformée. ... 102
Figure 4.26. Poutre électromécanique micro-usinée: (a) vue supérieure, (b) vue latérale, (c) diagramme simplifié du système avec la définition des variables. ... 105
Figure 4.27. Simulation FEM pour une poutre avec excitation électrostatique. ... 106
Figure 4.28. Comparaison des résultats du modèle analytique et du modèle d'éléments finis. ... 107

Chapitre 5 ..... **111**

Figure 5.1. Diagramme d'un commutateur optique. 114
Figure 5.2. Théories de propagation des signaux lumineux. 117
Figure 5.3. Flot de conception sur SystemC [GER 00]. 122
Figure 5.4. (a) Module encapsulé montrant ses ports internes et externes.
(b) Le modèle de spécification d'un système contenant deux modules. 123
Figure 5.5. Modèle exécutable montrant les interfaces de simulateur
ainsi que les interfaces de communication. 124
Figure 5.6. Structure interne de l'interface de communication. 125
Figure 5.7. Commutateur de test. 126
Figure 5.8. Système actionneur-miroir : (a) poutre déformée par la contrainte mécanique résiduelle,
(b) poutre déplacée vers le bas par attraction électrostatique. 127
Figure 5.9. Signaux d'entrée du commutateur optique. 128
Figure 5.10. Reconfiguration du commutateur de test : (a) état initial, (b) état final. 128
Figure 5.11. Modèle de spécification pour le commutateur optique. 130
Figure 5.12. Modèle de simulation pour le commutateur optique. 131
Figure 5.13. Représentation graphique de la spécification initiale du commutateur optique
à l'aide d'un visulaliseur de SystemC. 131
Figure 5.14. Représentation graphique du module optique à l'aide d'un visualiseur de SystemC. 132
Figure 5.15. Signaux disponibles dans les photodétecteurs dans plusieurs étapes de la simulation. 132

Chapitre 6 ..... **137**

Figure 6.1. Commutateur optique fabriqué à partir d'un wafer SOI : (a) vue supérieure du commutateur
montrant le miroir et les rainures pour les fibres, (b) vue en coupe du wafer. 140
Figure 6.2. Miroir micro-usiné en surface. 141
Figure 6.3. Profil des couches dans la technologie MUMPS. 145
Figure 6.4. Commutateur optique : (a) schéma général du commutateur,
(b) vue d'ensemble du commutateur fabriqué. 145
Figure 6.5. (a) Plaque du miroir, (b) détail d'un trou pour la gravure de la couche sacrificielle. 146
Figure 6.6. Rugosité de la surface d'un miroir. A droite, détail d'un trou pour la gravure
de la couche sacrificielle. 146
Figure 6.7. Eléments formant le système d'actionnement. 147
Figure 6.8. Charnière de substrat. 148
Figure 6.9. Eléments divers : (a) poteau de sujétion, (b) charnière suspendue. 148
Figure 6.10. Actionneurs à interactions de contact : (a) vue d'ensemble de la matrice d'actionneurs,
(b) gros plan d'un actionneur. 149
Figure 6.11. Défaut dans une poutre de suspension. 151
Figure 6.12. Collage de structures contre le substrat. 151

Liste de Tableaux

Chapitre 1 ..... **1**

Tableau 1.1. Spécifications nécessaires des commutateurs pour leur utilisation dans les réseaux optiques..... 20

Chapitre 2 ..... **25**

Tableau 2.1. Spécifications techniques d'un commutateur électro-optique à base de guides d'ondes [EOS 02]. 27
Tableau 2.2. Spécifications techniques d'un commutateur électro-optique à base de cristaux liquides [SPE 02]. 27
Tableau 2.3. Spécification techniques de plusieurs commutateurs thermo-optiques à base de silice sur silicium [HIM 98]. 28
Tableau 2.4. Spécifications techniques d'un commutateur thermo-optique à bulles [AGI 02]. 29
Tableau 2.5. Spécifications techniques d'un commutateur 2D mécano-optique [OMM 02]. 35

Chapitre 3 ..... **43**

Tableau 3.1. Coefficients de couplage et pertes d'insertion entre deux fibres monomode séparées longitudinalement d'une distance Δz. 70
Tableau 3.2. Coefficients de couplage et pertes d'insertion entre deux fibres monomode séparées longitudinalement d'une distance Δz. 70

Chapitre 5 ..... **111**

Tableau 5.1. Nom des paramètres de la poutre mixte et valeurs typiques. 129
Tableau 5.2. Fonction de transfert discrétisée de la poutre électromécanique. 130

Chapitre 6 ..... **137**

Tableau 6.1. Niveaux de lithographie de la technologie MUMPS. 144
Tableau 6.2. Techniques pour la création d'un plot de substrat. 150

Chapitre 1

Introduction

Ce chapitre présentera une vue d'ensemble sur les réseaux optiques et sur les microsystèmes optiques, avec une accentuation sur les activités de recherche convergentes, particulièrement sur le commutateur micro-usiné. Le commutateur optique sera présenté d'une part comme un élément essentiel dans l'évolution des réseaux, et d'autre part comme une application potentielle des technologies de micro-usinage.

La partie 1.1 étudiera l'évolution des réseaux à fibre optique en se focalisant sur les caractéristiques distinctives des réseaux optiques modernes telles que la fibre monomode de silice, le multiplexage en longueur d'onde, les réseaux de transport optique et les commutateurs optiques.

La partie 1.2 introduira les microsystèmes optiques. Nous décrirons les différents domaines proches tels que la photonique intégrée, l'optoélectronique, la micro-optique et les MOEMS. Ensuite, nous introduirons le commutateur optique micro-usiné, ses applications dans les réseaux optiques, ainsi que les tendances du marché pour ce dispositif.

Finalement, dans la partie 1.3, nous résumerons les motivations pour la conception de commutateurs optiques micro-usinés, nous établirons l'objectif général de ce travail, et nous présenterons le plan de la thèse.

1.1. Vue d'ensemble sur les réseaux optiques

Les systèmes de communication transmettent l'information principalement au moyen des fréquences porteuses choisies parmi plusieurs bandes du spectre. L'utilisation de fréquences porteuses distinctes permet aux différents signaux d'être transmis dans le même milieu. Quand on utilise des fréquences porteuses de centaines de kilohertz jusqu'à plusieurs

gigahertz, les signaux modulés peuvent être transmis dans l'air ; c'est le cas des systèmes en radio-fréquences (RF). Si les fréquences porteuses sont de l'ordre d'une centaine de terahertz (régions visible et proche infrarouge du spectre électromagnétique), les signaux modulés sont appropriés pour la transmission par fibre ; cela est le cas des réseaux optiques.

A présent, les systèmes de communications en RF ainsi que les réseaux optiques évoluent tous deux à une vitesse sans précédent, et cette évolution continuera certainement dans les prochaines années. Alors que les systèmes en RF facilitent l'accès des usagers aux systèmes de communications, les réseaux optiques constituent, grâce à leur haute capacité de transmission, la colonne vertébrale des systèmes de communications.

Les technologies de micro-usinage quant à elles, ont trouvé des applications prometteuses aussi bien dans les systèmes en RF que dans les réseaux optiques. Ce travail de thèse se focalise sur l'application des microsystèmes dans les réseaux à fibres pour la réalisation de commutateurs optiques.

1.1.1. *Evolution de la transmission de signaux par fibre optique*

Au début des années 50, l'idée de transmettre des signaux à haut débit en utilisant des porteuses dans la région optique était déjà établie. Malheureusement, à cette époque-là, n'étaient disponibles ni la source de lumière ni le milieu de transmission appropriés. En 1960, suite à l'invention de la diode LASER[1], l'attention des chercheurs s'est focalisée dans le développement d'un milieu de transmission adéquat.

A la fin des années 60, le concept de confinement de la lumière ainsi que la possibilité d'utiliser des fibres optiques comme milieu de transmission étaient largement diffusés. Le seul problème qui restait à résoudre était le haut niveau de pertes de propagation qui, à l'époque, montait jusqu'à 1000 dB/km.

Au début des années 70, deux événements ont beaucoup favorisé le développement des systèmes de communication par fibre optique. D'une part, la première diode laser à l'arséniure de gallium à été réalisée. D'autre part, des fibres optiques avec pertes d'insertion de l'ordre de 20 dB/km pour des longueurs d'onde proches du micron ont été fabriquées.

La première génération commerciale de systèmes de communications à fibre optique a été disponible en 1980. A cette époque, la transmission se faisait par fibre multimode en silice, la longueur d'onde utilisée était de 0,8 µm et le débit de transmission était de 45 Mb/s. Pour compenser l'atténuation de la fibre, le signal était régénéré au moyen de répétiteurs optoélectroniques placés à peu près tous les 10 km.

[1] LASER: *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*.

Une deuxième génération de systèmes à fibres optiques utilisant la longueur d'onde de 1,3 µm est apparue au début des années 80. Alors que la première génération utilisait des lasers avec des hétérojonctions du type GaAs/GaAlAs, la deuxième utilisait des composants avec des hétérojonctions du type InGaAsP/InP. Au début de leur introduction, l'avantage le plus important des nouveaux systèmes était la plus faible atténuation des fibres à la longueur d'onde de 1,3 µm (~1 dB/km), et par conséquent la plus grande séparation possible entre les répétiteurs. Malheureusement, le débit de transmission était limité aux alentours de 100 Mb/s. Cette limite était due à la dispersion intermodale des fibres multimodes[2]. Quelques années plus tard, le débit de transmission a pu être augmenté grâce à l'utilisation de fibres monomodes. A la fin des années 80, étaient disponibles sur le marché des systèmes commerciaux avec des débits de transmission de 1,7 Gb/s et des séparations entre les répétiteurs de 50 km.

Les fibres monomode de silice présentent une atténuation d'environ 0,6 dB/km à la longueur d'onde de 1,3 µm, valeur de longueur d'onde où la fibre manifeste précisément le niveau de dispersion le plus faible (§ 1.1.2.2). D'autre part, le niveau d'atténuation le plus bas (0,2 dB/km) se présente près d'une longueur d'onde de 1,55 µm, un fait qui a motivé le développement d'une troisième génération de systèmes à fibre optique. En 1990, il y avait des systèmes sur le marché utilisant la longueur d'onde de 1,55 µm avec des débits de transmission de 10 Gb/s. Cependant, pour atteindre ce débit de transmission sur les longues distances, il a aussi été nécessaire de recourir à l'utilisation de diodes lasers monomodes et de fibres à dispersion décalée (§ 1.1.2.2).

Pour les systèmes de la troisième génération, la distance de régénération était typiquement de 60 km à 70 km, cela en utilisant le schéma classique de détection d'amplitude. La distance de régénération aurait pu être rapidement accrue par l'utilisation de récepteurs hétérodynes (aussi appelés détecteurs cohérents), mais l'introduction de ce type de récepteur plus sophistiqué a été reportée suite à l'apparition, en 1989, des amplificateurs optiques dopés à l'erbium (EDFA[3]). Les amplificateurs optiques introduisent un gain de 40 dB et sont typiquement séparés de 60 km à 100 km dans les liens de transmission de plusieurs centaines (voire milliers) de kilomètres ; ils permettent la régénération des signaux directement dans le domaine optique. Un autre développement récent important est le multiplexage en longueur d'onde (WDM[4]) qui a permis d'augmenter le débit de transmission (§ 1.1.3). A présent, nous pouvons parler d'une quatrième génération de systèmes à fibre optique caractérisée par

---

[2] D'un point de vue pratique, la dispersion d'une fibre optique est l'étalement temporel des impulsions qui se propagent dans la fibre. Quand l'étalement est trop large, une certaine pulsation interfère avec les pulsations voisines. Dans le cas d'une fibre multimode, la dispersion est assez large et principalement due à la différence entre la vitesse de groupe de chaque mode de propagation ; c'est cela qu'on appelle la dispersion intermodale.

[3] EDFA : *Erbium Dopped Fiber Amplifier*.

[4] WDM : *Wavelength-Division Multiplexing*.

l'utilisation d'amplificateurs optiques, de détecteurs cohérents et du multiplexage en longueur d'onde.

Les amplificateurs optiques constituent une solution au problème de l'atténuation (au moins sur une certaine bande de longueurs d'onde) et le multiplexage en longueur d'onde promet de continuer à augmenter le débit de transmission. Malheureusement, le phénomène de la dispersion dans les fibres limite le débit de transmission sur les longues distances, un problème qui s'accroît avec l'utilisation des amplificateurs optiques et des autres dispositifs optiques se trouvant dans la trajectoire des signaux (par exemple, les commutateurs). Une cinquième génération de systèmes à fibre optique devra trouver une solution au problème de la dispersion. La communauté scientifique signale déjà la transmission de solitons comme une possible solution. Les solitons sont des pulsations optiques qui préservent leur forme par compensation de la dispersion avec les effets non-linéaires de la fibre de silice [AGR 97]. Il y a aussi des programmes de recherche importants concernant une nouvelle fibre optique à base de cristaux photoniques. Cette fibre microstructurée, plus communément appelée fibre à trous représente potentiellement une solution au problème de la dispersion.

1.1.2. *Fibre optique monomode de silice*

Les fibres optiques sont des guides d'onde où la propagation des signaux lumineux se décrit au moyen de modes de propagation, chaque mode étant une solution spécifique de l'équation d'onde. La fibre est essentiellement constituée d'un cœur entouré d'une gaine, l'indice de réfraction du cœur étant légèrement supérieur à celui de la gaine. Si le rayon du cœur est suffisamment petit, la fibre accepte seulement le mode fondamental de propagation, ce qui est le cas des fibres monomodes.

A l'heure actuelle, les fibres monomodes à saut d'indice[5] présentent la bande passante la plus large, le coût le plus réduit et le niveau de pertes le plus bas. Les fibres optiques monomodes sont donc universellement utilisées pour la transmission de signaux à haut débit dans les longues distances. La Figure 1.1 illustre les dimensions typiques ainsi que le profil d'indice de réfraction d'une fibre optique monomode à saut d'indice.

[5] Une fibre optique à saut d'indice possède un cœur avec un indice de réfraction uniforme, cela à différence d'une fibre à gradient d'indice. Dans cette dernière, l'indice de réfraction varie en fonction de la distance radiale de la fibre – une technique utilisée dans les fibres multimodes pour minimiser la dispersion intermodale.

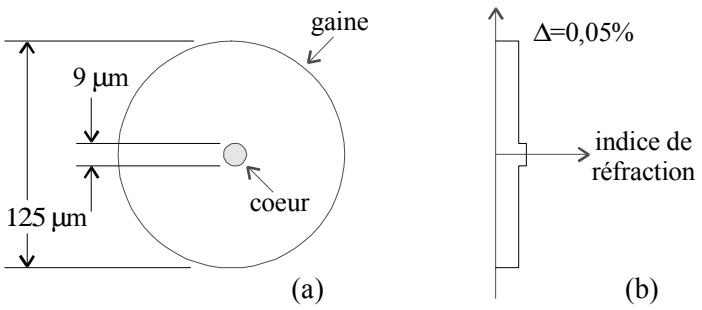


Figure 1.1. Fibre optique monomode à saut d'indice : (a) dimensions, (b) profil de l'indice de réfraction.

1.1.2.1. Pertes de propagation

Le niveau de puissance d'un signal qui se propage dans une fibre optique s'affaiblit en relation exponentielle à la distance de propagation. Les pertes d'insertion de la fibre sont exprimées en dB/km et dépendent de la longueur d'onde du signal, voir Figure 1.2. Pour une fibre monomode de silice, le niveau de pertes est de 0,6 dB/km pour une longueur d'onde de 1,3 µm, et de 0,2 dB/km pour une longueur d'onde de 1,55 µm.

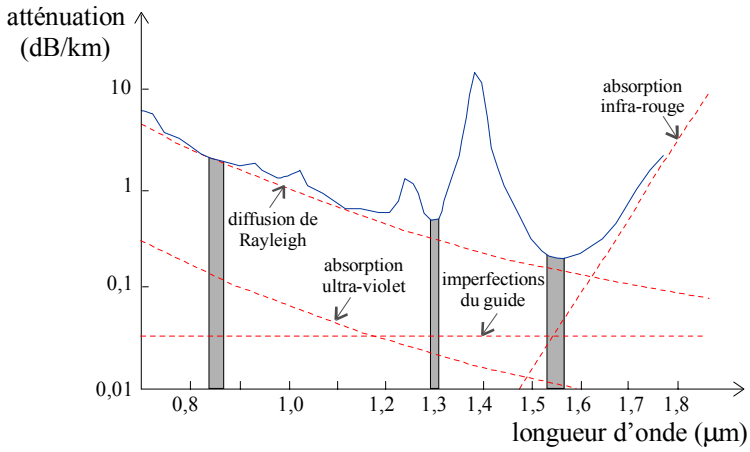


Figure 1.2. Pertes d'insertion d'une fibre monomode de silice, d'après [MIY 79].

1.1.2.2. Dispersion dans les fibres monomode

A l'heure actuelle, c'est la dispersion de la fibre (et non-pas l'atténuation) le facteur limitant de la transmission de signaux à haut débit sur de longues distances.

Dans la pratique, la dispersion se manifeste comme un étalement temporel ΔT des pulsations qui se propagent dans la fibre. En règle générale, pour un débit de transmission R, l'étalement

ΔT doit être beaucoup plus petit que la période de pulsation $T_B=R^{-1}$, cela pour minimiser le chevauchement des pulsations.

Dans les fibres monomode, la puissance optique est contenue uniquement dans le mode fondamental de propagation ; ainsi la fibre monomode n'a pas la dispersion intermodale qui se présente dans les fibres multimode. Cependant, un étalement des pulsations est produit par la dispersion chromatique, aussi appelée dispersion intramodale. Il y a en fait deux effets importants, d'une part la variation de l'indice de réfraction avec la fréquence (dispersion du matériau) ; d'autre part, la variation de la constante de propagation avec la fréquence (dispersion du guidage). Le coefficient de dispersion chromatique D_λ est défini par l'équation :

$$\tau_g = D_\lambda \cdot L \cdot \Delta\lambda = (D_m + D_g) \cdot L \cdot \Delta\lambda \qquad [1.1]$$

ou τ_g est la dispersion du temps de retard du groupe, $\Delta\lambda$ est la largeur spectrale du signal d'entrée, L est la distance de propagation, et D_λ est le coefficient de dispersion chromatique qui s'exprime en ps·km^{-1}·nm^{-1}. Les paramètres D_m est D_g représentent les deux composantes de la dispersion chromatique, respectivement la dispersion du matériau et la dispersion du guidage. Dans la silice et sur la région proche infrarouge, la dispersion est négative aux longueurs d'onde courtes, nulle à une longueur d'onde à peu près de 1,3 µm, et positive aux longueurs d'onde plus larges. Dans une fibre monomode standard, le coefficient de dispersion chromatique est à peu près de ± 4 ps·km^{-1}·nm^{-1} à une longueur d'onde de 1,3 µm, et à peu près de 17 ps·km^{-1}·nm^{-1} à une longueur d'onde de 1,55 µm [TOF 01].

La dispersion du guidage dépend de la géométrie de la fibre. Dans la pratique, il est possible d'ajuster ce type de dispersion pour compenser la dispersion du matériau et ainsi obtenir des fibres optiques « à dispersion décalée » dans lesquelles le zéro de dispersion se trouve à 1,55 µm. Il est également possible d'obtenir des fibres optiques « à dispersion plate » qui présentent une dispersion faible dans l'intervalle de longueur d'onde entre 1,3 µm et 1,55 µm.

Un autre phénomène qui produit une dispersion dans les fibres optiques est le changement, lors de la propagation, de l'état de polarisation du mode électromagnétique, c'est ce qu'on appelle la dispersion de polarisation (PMD[6]). Cet effet a été mis en évidence sur les liaisons à très longue distance. L'état de la polarisation de la lumière injectée par une diode laser dans une fibre optique monomode est modifié par la biréfringence[7] induite. Cet effet se traduit par un élargissement des impulsions τ_{pol} qui varie en fonction de la racine carrée de la distance de

[6] PMD : *Polarisation Mode Dispersion*.

[7] La biréfringence d'une fibre est la différence entre les constantes de propagation correspondants à l'axe lent et à l'axe rapide.

propagation. Le coefficient de dispersion de polarisation D_{pol} s'exprime en ps·km$^{-1/2}$; il est défini par l'équation :

$$\tau_{pol} = D_{pol} \sqrt{L} \qquad [1.2]$$

L'ordre de grandeur de D_{pol} est typiquement de 0,2 ps·km$^{-1/2}$ [COR 02], son effet étant donc important uniquement pour les très longues distances.

1.1.3. *Multiplexage en longueur d'onde*

Même si l'emploi de fibres optiques de silice s'est largement répandu à partir des années 80, c'est plus récemment que le multiplexage en longueur d'onde a été utilisé pour exploiter la très grande bande passante disponible dans ce milieu de transmission.

Le multiplexage en longueur d'onde consiste à utiliser des longueurs d'onde distinctes pour transmettre différents signaux dans une même fibre. Cette technologie a permis d'élargir le débit de transmission dans les liens point-à-point. Plusieurs signaux générés indépendamment dans le domaine électronique sont convertis vers le domaine optique en utilisant des diodes lasers de différentes longueurs d'onde. Les signaux résultants sont ensuite multiplexés et couplés à une fibre optique. Dans le récepteur, un démultiplexeur sépare les différentes longueurs d'onde qui sont ensuite reconverties vers le domaine électronique au moyen de photodiodes. La bande passante d'un système WDM peut s'élargir en accroissant soit le débit de chaque canal, soit le nombre de canaux.

Concernant le débit par canal, les modulateurs électro-optiques en niobate de lithium sont largement utilisés pour la génération de signaux à 2,5 Gb/s, 5 Gb/s et 10 Gb/s ; et même des dispositifs capables de moduler à 20 Gb/s et à 40 Gb/s sont déjà disponibles sur le marché. Cependant, l'utilisation de modulateurs à haut débit est assez onéreuse étant donnés les circuits électroniques de commande nécessaires. Concernant le nombre de canaux de transmission, les matrices de diodes VCSEL[8] accordables en longueur d'onde (§ 7.2.4) constituent une source de lumière assez prometteuse dans la conception de systèmes WDM à haute densité de canaux (DWDM[9]).

L'augmentation progressive du nombre de canaux[10], ainsi que la réduction de l'espacement entre eux, représente pour l'instant la solution la plus viable pour l'accroissement du débit total de transmission ; les réseaux optiques vont sûrement évoluer dans cette direction.

---

[8] VCSEL : *Vertical Cavity Surface Emitting Laser*.
[9] DWDM : *Dense Wavelength Division Multiplexing*.
[10] Etant donné que chaque canal est associé à une longueur d'onde centrale et que le symbole λ est universellement utilisé pour désigner la longueur d'onde, dans le jargon des réseaux optiques, on parle d'une augmentation du nombre de longueurs d'onde ou d'une augmentation du nombre de lambdas.

1.1.4. *Architectures des réseaux optiques.*

Le système de transmission par fibre optique le plus simple est le lien point-à-point. Si l'émetteur et le récepteur sont trop éloignés, on peut régénérer le signal une ou plusieurs fois. Les premiers liens point-à-point, schématisés sur la Figure 1.3, utilisaient une seule longueur d'onde pour transporter l'information ; en plus, la répétition des signaux se faisait au moyen de dispositifs optoélectroniques. Ces systèmes étaient limités à des débits de transmission de plusieurs dizaines de Gb/s.

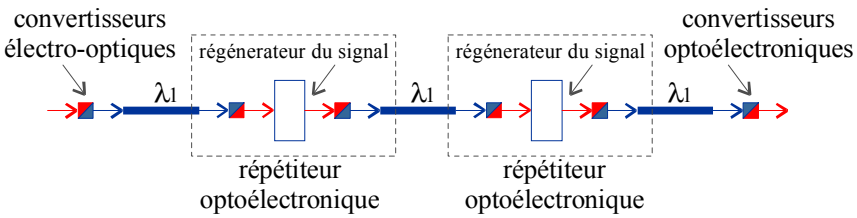


Figure 1.3. Lien point-à-point utilisant une seule longueur d'onde et des répétiteurs optoélectroniques.

L'introduction du multiplexage en longueur d'onde et l'invention de l'amplificateur optique ont permis la transmission de multiples longueurs d'onde dans une seule fibre ainsi que de régénérer les signaux directement dans le domaine optique. La Figure 1.4 illustre un système où *N* signaux sont combinés, transmis à travers une seule fibre, amplifiés plusieurs fois pendant la propagation, et séparés dans le récepteur. Le multiplexage en longueur d'onde a été déjà testé pour transmettre des débits de plusieurs Tb/s sur une seule fibre [KNO 01]. Très probablement, cette technique permettra, dans un futur proche, la transmission de plusieurs dizaines de Tb/s sur une seule fibre.

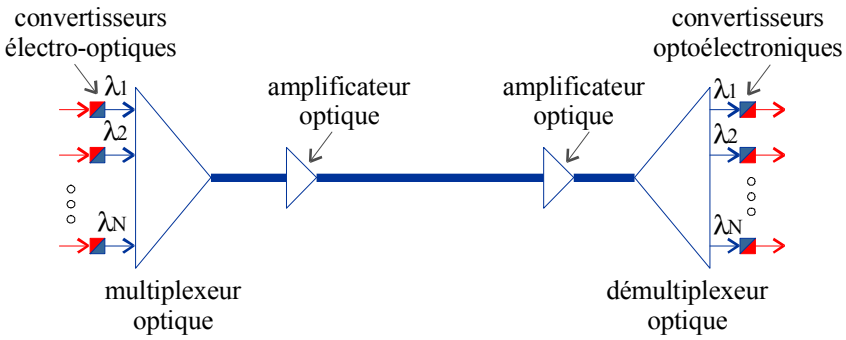


Figure 1.4. Lien point-à-point utilisant de multiples longueurs d'onde et des amplificateurs optiques.

Une amélioration simple du lien point-à-point de la Figure 1.4 est montrée dans la Figure 1.5. Cette nouvelle topologie contient un module optique d'insertion/extraction (OADM[11]) qui

[11] OADM : *Optical Add Drop Multiplexer*.

permet le remplacement d'un signal quelque part entre l'émetteur et le récepteur. Ce nœud au milieu du lien permet, en fait, qu'une paire additionnelle émetteur/récepteur soit reliée au système.

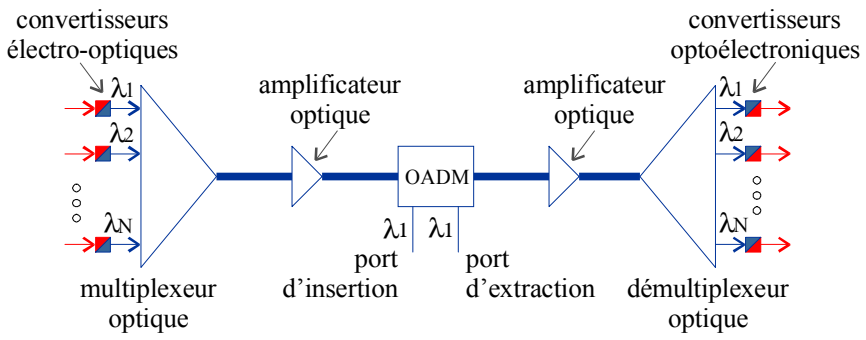


Figure 1.5. Un lien point-à-point avec un module optique d'insertion/extraction.

Le module optique d'insertion/extraction contient un multiplexeur pour séparer les différentes longueurs d'onde d'entrée, un commutateur optique (OXC[12]) qui échange le signal de porteuse λ_1, et un démultiplexeur qui combine les différentes longueurs d'onde sur un seul signal optique, voir Figure 1.6. Le commutateur optique, dans ce cas, est un dispositif à quatre terminaux qui présente deux états possibles : celui de by-pass et celui d'échange. Dans l'état de by-pass [Figure 1.6(a)], le commutateur permet au signal de porteuse λ_1, provenant du multiplexeur d'entrée, de contourner les ports d'insertion/extraction et d'arriver au démultiplexeur de sortie. Les ports d'insertion/extraction, quant à eux, sont reliés pour établir un possible retour de signal. Dans l'état d'échange [Figure 1.6(b)], le signal de porteuse λ_1 provenant du multiplexeur passe à travers le commutateur et ensuite, il est transféré vers le port d'extraction. Simultanément, un nouveau signal (de la même longueur d'onde λ_1) est introduit par le port d'insertion du commutateur.

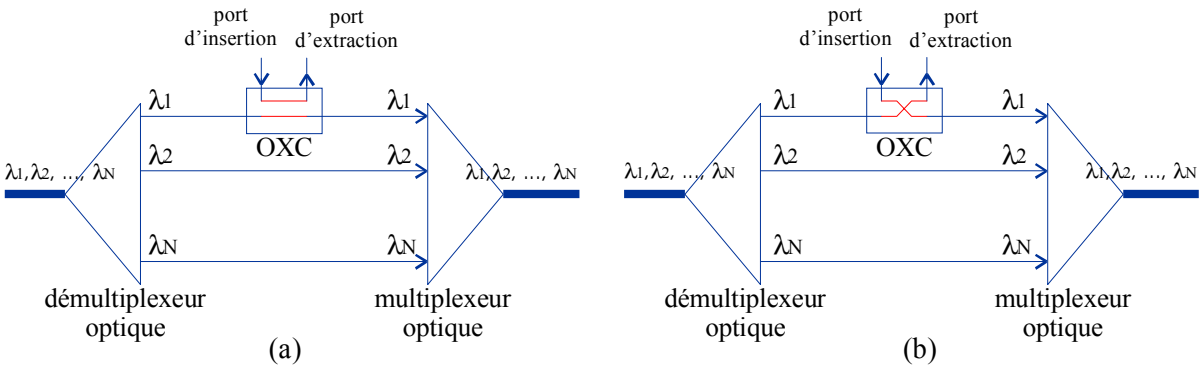


Figure 1.6. Un module optique d'insertion/extraction : (a) dans l'état de by-pass, (b) dans l'état d'échange.

[12] OXC : *Optical Cross-Connect*.

Même si les avantages du multiplexage en longueur d'onde et des amplificateurs optiques sont incontestables, l'absence de connectivité dans l'architecture du type purement point-à-point rend inefficace l'utilisation de la bande passante de la fibre. D'une part, la haute capacité de transmission disponible dans les fibres n'est pas toujours nécessaire pour relier une seule paire de terminaux ; d'autre part, la capacité installée dans un lien n'est pas disponible pour les autres liens.

La Figure 1.6 a montré comment un commutateur optique 2×2 introduit déjà un minimum de connectivité dans le système, et ce n'est là qu'une utilisation ordinaire des commutateurs. De manière plus générale, les commutateurs optiques à multiples ports (dizaines, centaines, voire milliers de ports) pourraient être utilisés pour relier un ensemble de liens point-à-point, et ainsi constituer un réseau de transport optique, voir Figure 1.7. Ce réseau dynamiquement reconfigurable serait partagé par de multiples usagers, et pour une diversité de services comportant différents protocoles et différents débits de transmission. Un tel réseau si « transparent » permettrait non-seulement d'utiliser plus efficacement la bande passante installée, mais de réaliser directement dans le domaine optique d'autres fonctions importantes, telles que la protection et la restauration (§ 1.2.3).

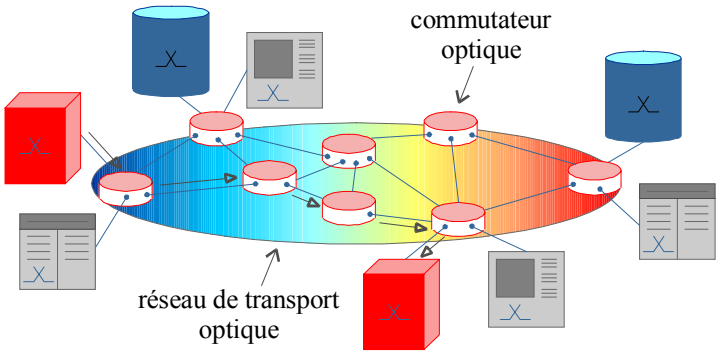


Figure 1.7. Un réseau de transport optique.

1.1.5. *Architecture et spécifications d'un commutateur optique*

A présent, une grande variété d'architectures de réseaux optiques sont à l'étude, la fonctionnalité des commutateurs optiques variant d'une architecture à l'autre. Telcordia considère trois types de dispositifs[13] : commutateurs de fibres (FXC[14]), commutateurs sélectifs à la longueur d'onde (WSXC[15]), et commutateurs capables d'échanger les longueurs d'onde (WIXC[16]).

[13] GR-3009-CORE, « Optical Cross-Connect Generic Requirements ».
[14] FXC : *Fiber Switch Cross-Connect*.
[15] WSXC : *Wavelength Selective Cross-Connect*.
[16] WIXC : *Wavelength Interchanging Cross-Connect*.

Un commutateur type FXC transfère tous les signaux avec différentes longueurs d'onde porteuses, depuis une fibre d'entrée vers une fibre de sortie. Dans le cas des WSXC, les canaux de chaque fibre d'entrée sont d'abord démultiplexés, ensuite les signaux sont commutés individuellement et couplés aux ports de sortie. Finalement, les commutateurs du type WIXC possèdent la capacité non-seulement de commuter individuellement les différents canaux de chaque fibre mais de réassigner les longueurs d'onde porteuses.

Pour les propos de ce travail, on considère que les nœuds de la Figure 1.7 possèdent la fonctionnalité montrée dans la Figure 1.8.

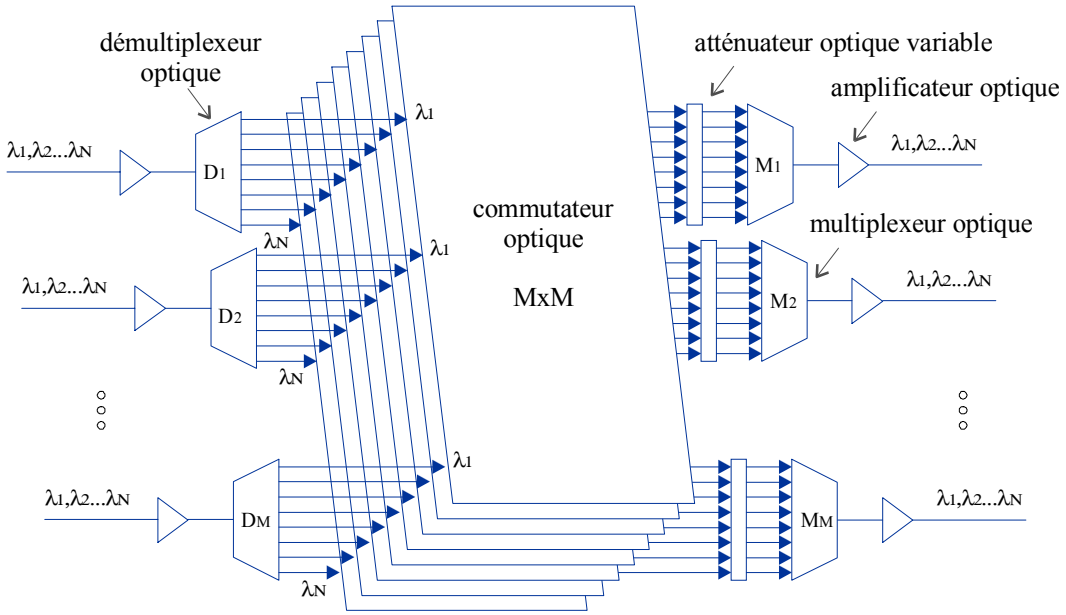


Figure 1.8. Commutateur optique et composants associés.

Le dispositif illustré dans la Figure 1.8 contient :

- des démultiplexeurs 1×N pour séparer les *N* différentes longueurs d'onde de chaque signal d'entrée.
- des multiplexeurs N×1 pour combiner les *N* différentes longueurs d'onde de chaque signal de sortie.
- des matrices M×M d'interrupteurs optiques pour le routage des signaux. Dans cette architecture particulière, nous supposons la disponibilité d'une matrice pour chaque longueur d'onde. Une certaine matrice *k* permet donc de distribuer dynamiquement les *M* signaux de longueur d'onde λ_k provenant des ports d'entrée, vers les *M* ports de sortie.
- des amplificateurs optiques pour compenser l'atténuation que les différents éléments optiques introduisent dans les signaux.

– des atténuateurs variables qui permettent d'uniformiser les niveaux de puissance des signaux avant le multiplexage. Cette fonctionnalité est nécessaire pour minimiser la diaphonie intercanaux.

Le dispositif de la Figure 1.8 permet donc de relier M ports d'entrée avec M ports de sortie, chaque port contenant *N* longueurs d'onde porteuses différentes. La fonctionnalité disponible permet de transférer chacun des signaux arrivant aux ports d'entrée vers le même canal de longueur d'onde de n'importe quel port de sortie.

Au sens large du terme, nous pouvons appeler commutateur optique tout le système de la Figure 1.8. Dans un sens plus strict du terme, le commutateur serait uniquement l'ensemble des interrupteurs optiques. Dans le reste de ce travail, nous utilisons le terme de commutateur optique dans son sens strict.

Les commutateurs optiques, aussi bien que les autres éléments optiques s'interposant dans les trajectoires des faisceaux lumineux, dégradent les signaux. La dégradation est encore plus sévère quand plusieurs commutateurs sont placés en cascade.

Les spécifications techniques les plus importantes des commutateurs optiques sont les pertes d'insertion, la diaphonie intercanaux, la vitesse de commutation et la consommation de puissance. Concernant les pertes d'insertion, on peut observer une dépendance sur la longueur d'onde et sur la polarisation, cela en fonction de la technologie de fabrication. Dans certains commutateurs, les pertes d'insertion varient substantiellement en fonction des ports d'entrée et de sortie du signal (§ 3.1.1). Ce phénomène n'est pas négligeable étant donné que les puissances par canal de transmission, dans une certaine fibre, doivent être le plus uniformes possible.

La vitesse de commutation détermine les applications possibles du commutateur. Les dispositifs les plus lents ne sont pas utiles pour la commutation des paquets optiques mais ils peuvent servir pour des applications de protection et de restauration. Finalement, la consommation de puissance du commutateur dépend du type de contrôle choisi ; en général, la consommation augmente avec le nombre de ports du commutateur.

1.1.6. *Commutateurs optiques à court terme*

Avant de clore cette vue d'ensemble sur les réseaux optiques, nous allons préciser quel type de commutateur présente un intérêt à court terme, et comment il se situe par rapport aux commutateurs actuels et par rapport aux commutateurs qui seront disponibles dans un plus long terme. Nous profitons de cette présentation chronologique pour préciser également la signification que le terme « commutateur tout optique » aura dans ce travail de thèse.

Trois étapes différentes dans l'évolution des systèmes de commutation sont observées. La première concerne la plus grande partie des commutateurs optoélectroniques actuels où les signaux lumineux provenant des fibres optiques d'entrée sont d'abord convertis vers le domaine électronique. Ensuite, les fonctions de multiplexage et de routage sont effectuées en réponse à des signaux de contrôle également électroniques. Finalement, les signaux de sortie électroniques sont reconvertis vers le domaine photonique pour être couplés aux fibres de sortie, voir Figure 1.9. Les réseaux à base de ce type de commutateurs utilisent le domaine photonique pour la transmission et le domaine électrique pour la commutation.

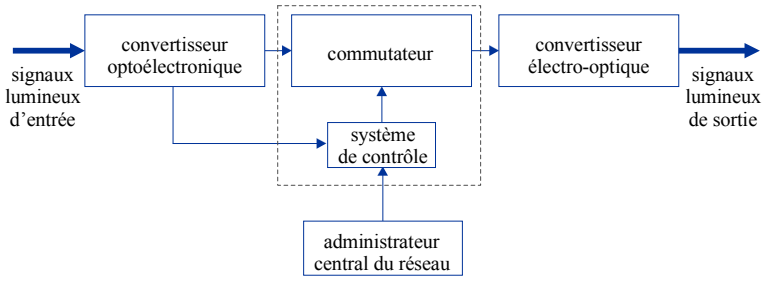


Figure 1.9. Commutateur électronique avec contrôle électronique.

La deuxième étape évolutive des commutateurs concerne les systèmes où les signaux photoniques rentrant dans les commutateurs restent dans ce domaine tout au long du chemin depuis les ports d'entrée jusqu'aux ports de sortie. Cependant, les signaux qui contrôlent les trajectoires des signaux sont des signaux électroniques, voir Figure 1.10. Les réseaux utilisant ce type de commutateurs établissent des trajectoires photoniques depuis la source jusqu'au récepteur.

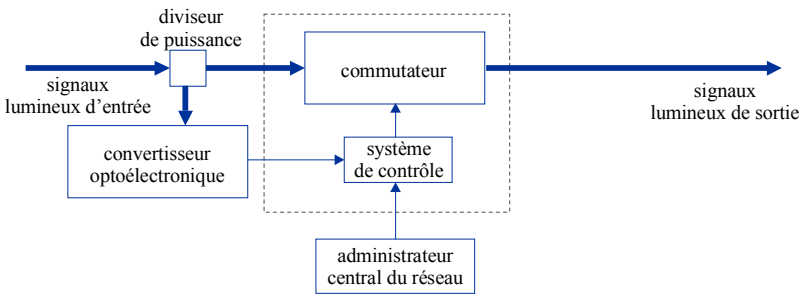


Figure 1.10. Commutateur optique avec contrôle électronique.

La troisième étape évolutive des commutateurs est constituée par des dispositifs de commutation entièrement optiques, c'est à dire par des dispositifs où la lumière est contrôlée par la lumière, voir Figure 1.11.

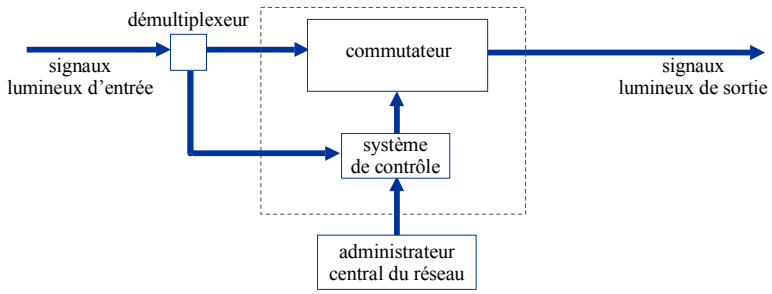


Figure 1.11. Commutateur optique avec contrôle optique.

Dans ce travail de thèse, nous utilisons la dénomination réseaux tout optiques (AON[17]) pour les systèmes qui ne contiennent pas de composants électroniques dans les trajectoires des signaux, conformément à l'utilisation courante du terme à l'heure actuelle. Les réseaux tout optiques sont donc des systèmes utilisant des commutateurs de la deuxième étape évolutive. Les réseaux optiques usant des commutateurs de la troisième étape évolutive seront disponibles dans un avenir assez lointain.

1.2. Vue d'ensemble sur les microsystèmes optiques

Depuis le développement de la première puce microélectronique par Jack Kilby en 1959, les procédés de fabrication des systèmes se sont dirigés vers la miniaturisation et l'intégration à grande échelle. Cette tendance initialement observée dans les composants microélectroniques s'est étendue plus récemment vers d'autres disciplines, telles que l'optique et la mécanique.

Les avantages de la miniaturisation et de la fabrication intégrée sont nombreux. D'une part, les méthodes de fabrication collectives permettent la fabrication simultanée d'une multitude de composants entraînant des coûts de fabrication réduits. D'autre part, l'intégration des composants est associée typiquement à une amélioration de la performance. Dans certains cas, notamment dans le domaine des capteurs, l'intégration a rendu possible l'utilisation de certains phénomènes, les mêmes qui n'étaient pas exploitables dans les dispositifs non-intégrés (par exemple, dans les capteurs de pression capacitifs).

1.2.1. *Les origines des microsystèmes optiques*

Steward Miller avait déjà proposé en 1969 la fabrication intégrée des circuits photoniques utilisant des techniques semblables à celles de la microélectronique [MIL 69]. Deux domaines

[17] AON : *All Optical Network*.

différents se sont ensuite développés : les circuits photoniques intégrés (PIC[18] ou PLC[19]) et les circuits optoélectroniques intégrés (OEIC[20]).

Dans le cas des circuits photoniques intégrés, l'idée a été de fabriquer principalement sur un substrat unique des réseaux à guides d'onde. Un réseau passif à guides d'onde peut réaliser des fonctions statiques comme, par exemple, le démultiplexage d'un signal à multiples longueurs d'onde, voir Figure 1.12. Dans ce cas-là, la configuration du réseau reste toujours fixe. Par ailleurs, les effets électro-optiques ainsi que les effets thermo-optiques de certains matériaux permettent de configurer de manière dynamique un réseau à guides d'onde. L'effet électro-optique du niobate de lithium ainsi que l'effet thermo-optique de la silice sur silicium, sont très utilisés pour la fabrication de réseaux à guide d'ondes re-configurables, par exemple les modulateurs et les commutateurs optiques (§ 2.1.1 et § 2.1.2).

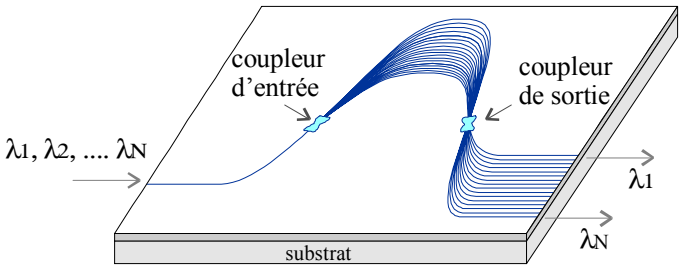


Figure 1.12. Réseau à guides d'ondes.

Dans le cas des circuits optoélectroniques intégrés, l'objectif a été d'intégrer des dispositifs électroniques et optoélectroniques, c'est à dire de fabriquer de manière intégrée des sources de lumière avec leurs circuits électroniques de contrôle, ou bien des photodétecteurs avec leurs circuits de conditionnement de signaux. A titre d'exemple, la Figure 1.13 schématise un dispositif monolithique contenant un photodiode PIN ainsi qu'un transistor HEMT.

[18] PIC : *Photonic Integrated Circuits*.
[19] PLC : *Planar Lightwave Circuits*.
[20] OEIC : *Optoelectronic Integrated Circuits*.

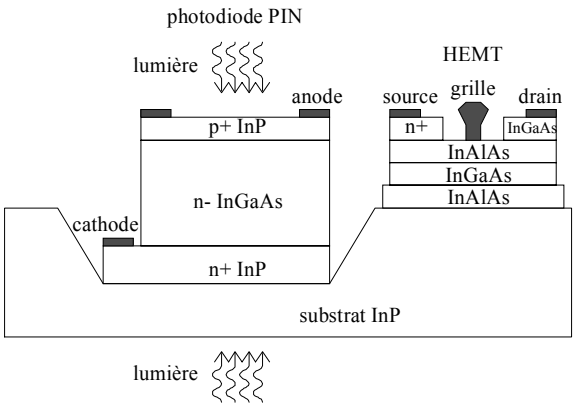


Figure 1.13. Structure monolithique contenant une photodiode et un transistor.

L'intégration de réseaux à guides d'ondes, de circuits électroniques et de dispositifs optoélectroniques est un objectif prioritaire. En 1993, Richard Soref a proposé une « super-puce » à base de silicium contenant tous ces modules [SOR 93]. Actuellement, les incompatibilités entre les matériaux utilisés pour les différents éléments ne permettent généralement pas une intégration monolithique. L'approche d'intégration continue à être fortement hybride.

En fait, le micro-usinage du silicium est utilisé depuis longtemps pour l'alignement de composants dans les systèmes optiques hybrides. Par exemple, le micro-usinage de rainures *V* sur des wafers de silicium a été adopté dans la manufacture de connecteurs à fibre optique [GLO 79]. Le micro-usinage de wafers de silicium a été aussi utilisé pour le positionnement de fibres, de lentilles et de miroirs [DAU 92]. A présent, le micro-usinage permet d'atteindre une précision submicronique dans le positionnement. Cette technique peut être aussi utilisée dans la manufacture de systèmes très hybrides. D'abord, des bancs d'alignement avec des cavités micro-usinées sont crées. Ensuite, les composants ayant été fabriqués suivant différentes technologies spécifiques à chaque dispositif sont assemblés sur les bancs.

Le micro-usinage du silicium a aussi élargi les domaines des microcapteurs et des microactionneurs. Il a rendu possible la fabrication de microsystèmes électromécaniques, en anglais MEMS[21], et de circuits électroniques, le tout sur le même substrat. Récemment, l'incorporation de composants optiques aux MEMS a marqué l'origine des MOEMS[22].

A présent, la miniaturisation et l'intégration à grande échelle fait appel de plus en plus souvent à la conception de MOEMS contenant des circuits électroniques, des dispositifs électromécaniques, des réflecteurs, des lentilles réfractives et diffractives[23], des réseaux de

[21] MEMS : *Micro Electro Mechanical Systems*.
[22] MOEMS : *Micro Opto Electro Mechanical Systems*.
[23] La miniaturisation des dispositifs optiques a été considérée depuis les années 80 comme le domaine de la micro-optique, les éléments les plus importants de cette discipline étant les lentilles réfractives, les lentilles

diffraction, et parfois même des structures à base de guides d'onde et des composants optoélectroniques. Il est désirable d'intégrer tous ces éléments sur la même puce (SOC[24]) ou, au moins, dans le même boîtier (SOP[25]), voir Figure 1.14.

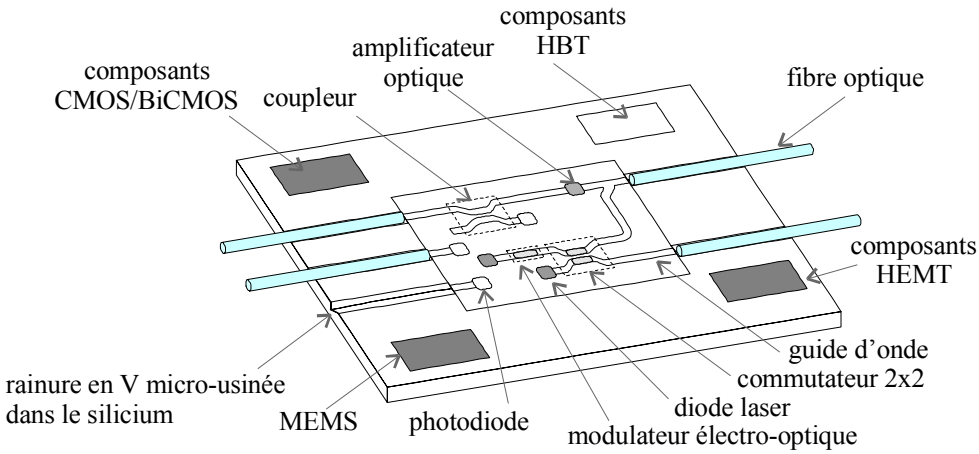


Figure 1.14. Système intégré très hétérogène semblable à celui proposé par R.A. Soref [SOR 93].

1.2.2. *MOEMS*

A la différence des circuits intégrés photoniques où les signaux se propagent presque exclusivement à l'intérieur de guides d'onde, dans les MOEMS, les signaux se propagent fréquemment dans l'air[26]. Les MOEMS contiennent typiquement des miroirs, des lentilles, des réseaux de diffraction et/ou des cavités de résonance. Ces structures sont usuellement capables de se déplacer ou de pivoter par l'action d'un signal électrique, et donc de changer la trajectoire des faisceaux lumineux incidents. Dans le cas particulier des cavités micro-usinées, des champs électrostatiques sont typiquement utilisés pour faire varier l'épaisseur de la cavité. Cet effet permet d'ajuster la fonction de transfert des microsystèmes optiques et optoélectroniques.

Actuellement, parmi les technologies les plus utilisées pour la fabrication de MOEMS, nous pouvons mentionner le micro-usinage en volume [KOV 98], le micro-usinage en surface [BUS 98], le collage de plaques [SCH 98], ainsi que les technologies à haut facteur de forme, DRIE[27] [KOV 98] ou LIGA[28] [GUC 98].

---

diffractives ainsi que les réseaux de diffraction. Certains dispositifs micro-optiques possèdent déjà un bon niveau d'intégration mais leur fonctionnalité reste limitée au domaine optique.

24 SOC : *Systems on a Chip*.

25 SOP : *Systems on a Package*.

26 Il y a aussi des MOEMS hybrides où les signaux se propagent à l'intérieur de guides d'onde mais traversent également l'air [OLL 95].

27 DRIE : *Deep Reactive Ion Etching*.

28 LIGA : *Lithographie Galvanoformung Abformung*.

En ce qui concerne les applications des MOEMS, elles sont assez nombreuses et appartiennent à des domaines assez divers. Une des premières applications d'importance commerciale à été le système de projection à base de micro-miroirs électromécaniques proposé par Texas Instruments [YOU 93]. Ce dispositif sert à former une image et à la projeter sur un écran, à partir de la réflexion d'une source de lumière sur un réseau de micro-miroirs.

Une autre application importante des MOEMS est le spectromètre. Ce dispositif est largement utilisé en chimie comme méthode d'analyse des procédés de combustion, pour le contrôle de qualité dans l'industrie textile, pour l'analyse d'échantillons dans l'industrie biochimique, et pourrait même être utilisé pour le démultiplexage des signaux dans les réseaux optiques (§ 7.2.7). Il y a principalement deux types de spectromètres micro-usinés, un dispositif à réseau de diffraction [MIC 02] fabriqué typiquement par LIGA[29], et un autre dispositif à matrice de cavités Fabry-Pérot [COR 00], ce dernier étant compatible avec les technologies CMOS.

Une application très prometteuse des MOEMS pointe dans le domaine de l'optique adaptative. Une matrice de micromiroirs électromécaniques est utilisée pour la correction des aberrations d'une image dans les systèmes où le trajet optique rencontre des milieux perturbés, comme en astronomie [ROG 97] [KRI 97] [BIF 97] [CUG 01]. L'optique adaptative permet de corriger ainsi le front d'onde perturbé directement sur le domaine optique, avant que l'image n'arrive au capteur optoélectronique pour son traitement numérique ultérieur.

Dans le domaine des réseaux optiques, les applications des MOEMS sont abondantes mais sans aucun doute, la plus importante est le commutateur optique (OXC).

1.2.3. *Commutateurs optiques micro-usinés*

Les techniques de micro-usinage permettent la fabrication de commutateurs optiques à base de miroirs où les signaux se propagent dans l'air. Les directions de propagation des faisceaux sont changées de manière dynamique par les miroirs qui présentent plusieurs positions de base. La Figure 1.15(a) schématise un commutateur constitué d'une matrice de miroirs de 4×4 où chaque miroir présente deux positions possibles : une position parallèle au substrat et une autre perpendiculaire au substrat. Les miroirs permettent donc, de défléchir les faisceaux d'entrée vers les ports de sortie. La Figure 1.15(b) montre un miroir avec un actionneur électrostatique. Ce dispositif, fabriqué par micro-usinage en surface, représente une des cellules du commutateur de la Figure 1.15(a). L'étude de commutateurs, à base de miroirs et

[29] LIGA : de l'allemand *Lithographie Galvanoformung Abformung*.

d'actionneurs électrostatiques, micro-usinés en silicium constitue la partie essentielle de ce travail de thèse.

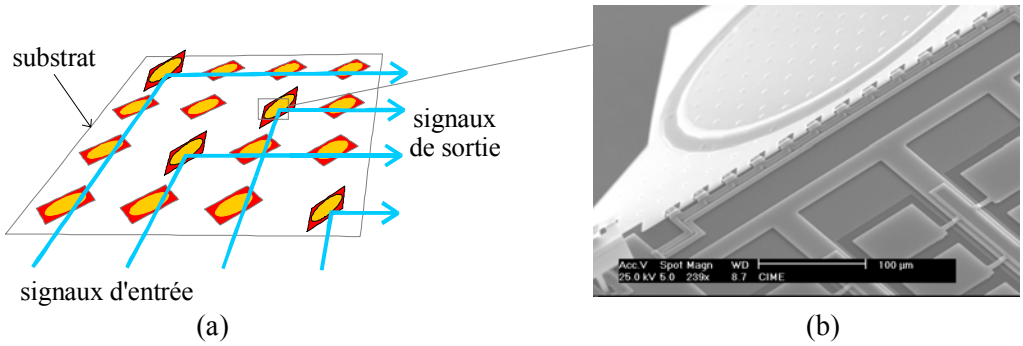


Figure 1.15. Commutateur optique : (a) matrice de miroirs, (b) miroir micro-usiné en surface.

Trois applications sont envisagées, à court terme, pour les commutateurs optiques micro-usinés : approvisionnement, protection et restauration. L'approvisionnement consiste à reconfigurer un réseau optique pour satisfaire continuellement la demande de bande passante dans les différents liens du réseau.

La protection est basée sur la redondance. Plus précisément, quand une liaison optique est en panne, un mécanisme est déclenché afin de transférer le trafic vers une route alternative réservée. La protection optique fonctionne indépendamment du système central d'administration du réseau. Malheureusement, cette technique signifie l'attribution d'une double capacité à chaque canal.

La restauration optique par contre, consiste à transférer le trafic d'une voie en panne vers une autre voie optique disponible dans le réseau de transport. Dans ce cas, bien qu'une proportion de la capacité du réseau doit être réservée pour son utilisation quand quelques voies optiques sont en panne, les ressources nécessaires sont significativement plus modestes que celles de la protection optique.

L'approvisionnement, la protection et la restauration sont des fonctions qui n'ont pas besoin de commutateurs rapides. Dans tous ces cas, la reconfiguration des réseaux en quelques millisecondes est plus qu'acceptable. Le Tableau 1.1 montre les spécifications nécessaires des commutateurs pour qu'ils soient utilisables dans les réseaux optiques [TKA 99].

Description des paramètres	Performances nécessaires
Pertes d'insertion	< 2,5 dB
Diaphonie intercanaux	< 30 dB
Variation des pertes en fonction de la polarisation	< 0,1 dB
Dispersion due à la polarisation	< 1 ps
Temps de commutation	< 10 ms

Tableau 1.1. Spécifications nécessaires des commutateurs pour leur utilisation dans les réseaux optiques.

D'après NEXUS[30], le marché des nouveaux produits micro-usinés sera de 4,2 milliards de dollars pour l'année 2002, le commutateur optique étant un des trois produits les plus importants avec un marché estimé à 1 milliard de dollars, voir Figure 1.16 [NEX 98].

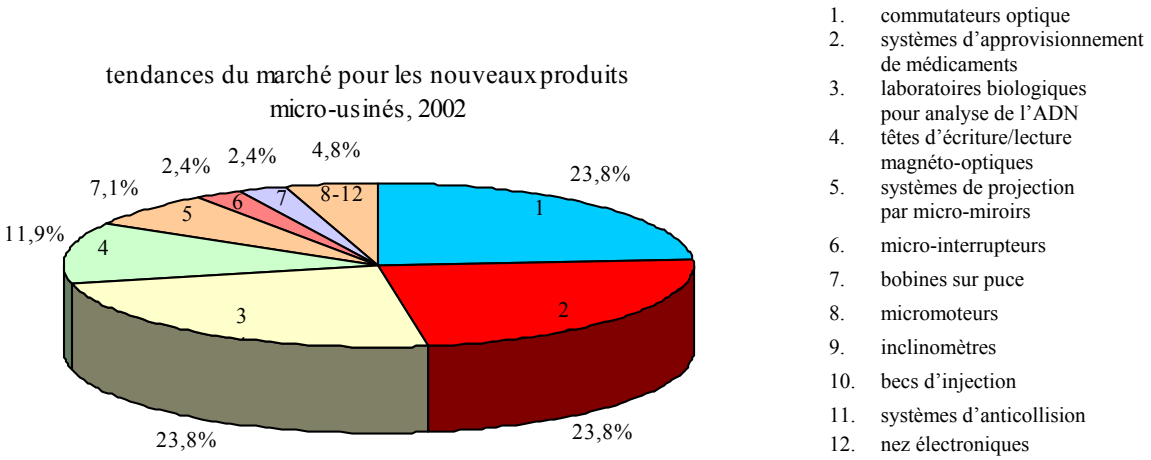


Figure 1.16. Tendances du marché pour les produits micro-usinés nouveaux, 2002.
(*Source : Market analysis for microsystems 1996-2002, Nexus ! Task Force*)

Une autre étude récente révèle que le marché mondial des commutateurs optiques à été de 50 millions de dollars en 2000. Avec un incrément annuel de 124 %, il est prévu qu'il atteigne 6,3 milliards de dollars pour l'année 2006 [KMI 01].

1.3. Motivations, objectifs et plan de thèse

Ce chapitre a révélé l'importance des commutateurs optiques dans les réseaux de communications. Ces composants permettent de partager un réseau de transport entre

[30] NEXUS : *The Network of Excellence in Multifunctional Microsystems*. NEXUS est un organisme européen établi pour promouvoir les technologies des microsystèmes et poursuivre leur adoption par l'industrie européenne, http://www.nexus-emsto.com.

plusieurs services. Ainsi, l'utilisation de la bande passante installée dans les réseaux devient plus efficace. En outre, les commutateurs optiques permettent de réaliser des fonctions de protection et de restauration directement dans le domaine optique.

Ce chapitre a aussi présenté le micro-usinage du silicium comme une technologie applicable à la conception de commutateurs optiques. Nous avons introduit un commutateur où les faisceaux lumineux se propagent dans l'air et sont défléchis au moyen de miroirs électrostatiques. Notre travail de thèse se focalisera sur la conception de ce type de commutateurs.

Le chapitre 2 étudiera les technologies de commutation optique disponibles pour les réseaux de communications. L'objectif principal sera celui de mettre en valeur le potentiel des commutateurs mécano-optiques micro-usinés à travers une comparaison avec les autres types de commutateurs. L'état de l'art sur les activités de recherche aussi bien que sur les dispositifs déjà annoncés dans le marché sera exposé.

Le chapitre 3 étudiera la propagation de faisceaux lumineux dans les commutateurs micro-usinés. Deux architectures de commutateurs (2D et 3D) seront comparées. Nous appliquerons l'optique de faisceaux gaussiens pour la modélisation des pertes d'insertion dues aux erreurs d'alignement des fibres. Quelques autres sources de pertes dans les commutateurs seront aussi étudiées. A la fin du chapitre, nous explorerons la théorie scalaire de la diffraction pour son application dans la conception de commutateurs optiques.

Le chapitre 4 analysera d'abord les avantages actuels des actionneurs électrostatiques, par rapport aux actionneurs thermiques et aux actionneurs magnétiques, en vue de son application dans les commutateurs optiques. Ensuite, nous étudierons les différentes familles d'actionneurs électrostatiques micro-usinés, et plusieurs modèles de dispositifs seront obtenus par couplage des théories électrostatique et structurelle.

Le chapitre 5 examinera la cosimulation multilangage comme méthodologie pour la validation globale de systèmes hétérogènes. Nous appliquerons cette méthodologie dans la conception au niveau système d'un commutateur. *SystemC* sera utilisé comme langage de modélisation de systèmes.

Dans le chapitre 6, nous explorerons le micro-usinage en surface de commutateurs optiques à travers la conception de quelques structures de base pour ces dispositifs. Les avantages et les inconvénients de cette technologie seront mises en évidence.

Finalement, dans le chapitre 7, nous présenterons nos conclusions sur les tendances quant à l'évolution des commutateurs optiques, sur les limitations technologiques actuelles ainsi que sur les difficultés que présente la conception de systèmes si hétérogènes. Nous terminerons

notre travail en exposant les autres applications potentielles des microsystèmes optiques les plus prometteuses dans les réseaux optiques.

Bibliographie

[AGR 97] G. P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, 2nd edion, New York : Wiley, 1997.

[BIF 97] T. G. Bifano, R. Krishnamoorthy, J. K. Dorton, J. Perreault, N. Vandelli, M. N. Horenstein, D. A. Castañon, « Continuous-membrane surface-micromachined silicon deformable mirror », *Optical Enginnering*, vol. 36, no. 5, pp. 1354-1360, 1997.

[BUS 98] J. M. Bustillo, R. T. Howe, R. S. Muller, « Surface micromachining for microelectromechanical systems », *Proceedings of the IEEE*, vol. 86, no. 8, pp. 1552-1574, 1998.

[COR 00] J. H. Correia, G. de Gradf, S. H. Kong, M. Bartek, R. F. Wolffenbuttel, « Single-chip CMOS optical microspectrometer », *Sensors and Actuators A*, vol. 82, pp. 191-197, 2000.

[COR 02] Telecommunications Product Division, Corning Inc., « Corning® single-mode optical fiber, product information PI1036 on SMF-28™ fiber », http://www.corning.com/, 2002.

[CUG 01] O. Cugat, S. Basrour, C. Divoux, P. Mounaix, G. Reyne, « Deformable magnetic mirror for adaptive optics : technological aspects », *Sensors and Actuators A*, vol. 89, pp. 1-9, 2001.

[DAU 92] M. F. Dautartas, A. M. Benzoni, Y. C. Chen, G. E. Blonder, B. H. Johnson, C. R. Paola, E. Rice, Y. –H. Wong, « A silicon-based moving-mirror optical switch », *Journal of Lightwave Technology*, vol. 10, no. 8, pp. 1078-1085, 1992.

[GLO 79] D. Gloge, A. H. Cherin, C. M. Miller, P. W. Smith, « Fiber splicing », in *Optical Fiber Telecommunications*, S. E. Miller, A. G. Chynoweth, editors, Academic Press Inc., 1979.

[GUC 98] H. Guckel, « High-aspect-ratio micromachining via deep X-ray lithography », *Proceedings of the IEEE*, vol. 86, no. 8, pp. 1586-1593, 1998.

[KMI 01] Kessler Marketing Intelligence Corporation, « Reports forcasts rise in optical cross connect technology », *Fiber Optic Bussiness*, October 2001.

[KNO 01] W. H. Knox, « The future of WDM », *OPN Trends*, vol. 1, no. 1, pp. 4-6, 2001.

[KOV 98] G. T. A. Kovacs, N. I. Maluf, K. E. Petersen, « Bulk micromachining in silicon », *Proceedings of the IEEE*, vol. 86, no. 8, pp. 1536-1551, 1998.

[KRI 97] R. Krishnamoorthy, T. G. Bifano, N. Vandelli, M. N. Horenstein, « Development of microelectromechanical deformable mirrors for phase modulation of light », *Optical Engineering*, vol. 36, no. 2, pp. 542-548, 1997.

[MIC 02] STEAG microParts GmbH, http://www.microparts.de.

[MIL 69] S. E. Miller, « Integrated optics: an introduction », *Bell System Technical Journal*, vol. 48, no. 7, pp. 2059-2069, 1969.

[MIY 79] T. Miya, Y. Terunuma, T. Hosaka, T. Miyoshita, *Electronic Letters*, vol. 15, pp. 106, 1979.

[NEX 98] Nexus ! Task Force, *Market Analysis for Microsystems 1996 – 2002*, October 1998.

[OLL 95] E. Ollier, P. Labeye, F. Revol, « Micro-opto mechanical switch integrated on silicon », Electronics Letters, vol. 31, no. 23, pp. 2003-2005, 1995.

[ROG 97] M. C. Roggeman, V. M. Bright, B. M. Welsh, S. R. Hick, P. C. Roberts, W. D. Cowan, J. H. Compois, « Use of micro-electro-mechanical deformable mirrors to control aberrations in optical systems : theoretical and experimental results », *Optical Engineering*, vol. 36, no. 5, pp. 1326-1338, 1997.

[SCH 98] M. A. Schmidt, « Wafer-to-wafer bonding for microstructure formation », *Proceedings of the IEEE*, vol. 86, no. 8, pp. 1575-1585, 1998.

[SOR 93] R. A. Soref, « Silicon-based optoelectronics », *Proceedings of the IEEE*, vol. 81, no. 12, pp. 1687-1706, 1993.

[TKA 99] R. W. Tkach, « Opportunities for MEMS in lightwave networks », *3rd International Conference on Micro Opto Electro Mechanical Systems*, *MOEMS '99*, Mainz, Germany, pp. 1-2, 1999.

[TOF 01] Z. Toffano, *Optoélectronique – composants photoniques et fibres optiques*, Paris : Ellipses, 2001.

[YOU 93] J. M. Younse, « Mirrors on a chip », *IEEE Spectrum*, vol. 30, no. 11, pp. 27-31, 1993.

Chapitre 2

Etat de l'Art sur les Commutateurs Optiques

Ce chapitre présentera les méthodes de commutation optique disponibles pour les réseaux de communications. L'objectif principal sera celui de mettre en valeur le potentiel, à court et moyen termes, des commutateurs mécano-optiques micro-usinés à travers une comparaison avec les autres types de commutateurs.

La partie 2.1 commencera par une classification des commutateurs optiques. Ensuite, pour chaque famille, nous présenterons les principes de fonctionnement, ainsi que les spécifications techniques sur divers dispositifs qui ont été récemment étudiés dans les laboratoires de recherche ou bien qui se trouvent déjà sur le marché.

La partie 2.2 synthétisera les avantages les plus importants des commutateurs mécano-optiques micro-usinés.

Finalement, dans la partie 2.3, nous présentons nos conclusions.

2.1. Classification des commutateurs optiques

Les commutateurs optiques peuvent être classés par le type de contrôle mis en œuvre pour défléchir les faisceaux lumineux. Il y a principalement six familles de commutateurs : électro-optiques, thermo-optiques, acousto-optiques, magnéto-optiques, tout-optiques et mécano-optiques.

2.1.1. *Commutateurs électro-optiques*

Les dispositifs électro-optiques utilisent des matériaux où l'indice de réfraction varie en fonction du champ électrique appliqué (effets Kerr et Pockels). Les propriétés électro-optiques du niobate de lithium ont été largement utilisées dans la conception de dispositifs à base de guides d'ondes. Dans ce cas, les champs électriques contrôlent l'indice de réfraction des guides, et par conséquent, la phase des signaux lumineux qui se propagent dans ces éléments.

Les dispositifs électro-optiques fabriqués en niobate de lithium les plus répandus sont sûrement les modulateurs. Cependant, des commutateurs à base de coupleurs électro-optiques sont aussi disponibles, voir Figure 2.1.

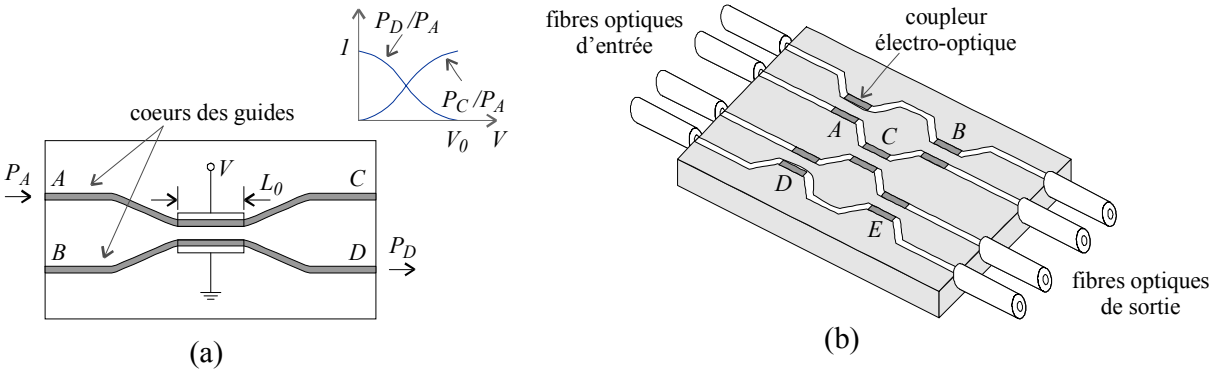


Figure 2.1. Dispositifs électro-optiques (a) coupleur, (b) commutateur 4x4.

Un coupleur consiste en deux guides qui sont à proximité sur une longueur L_0 qui correspond à la distance de transfert (ou région d'interaction) pour une longueur d'onde particulière, par exemple 1,55 µm. Un coupleur électro-optique contient en plus une paire d'électrodes de contrôle. Les signaux qui se propagent dans chaque guide sont par défaut transférés vers l'autre guide lors du passage par la région d'interaction. L'application d'une tension particulière V_0 entre les électrodes permet d'échanger les ports de sortie des signaux, voir Figure 2.1(a). Les coupleurs électro-optiques sont les éléments de base dans la conception des commutateurs, voir Figure 2.1(b).

Les sociétés *EOSpace* et *Lynx Photonics*, entre autres, commercialisent des commutateurs électro-optiques. Ces dispositifs sont disponibles en versions de 1×2, 2×2, 4×4 et 8×8 ports. Le Tableau 2.1 résume les spécifications d'un commutateur commercial de 8×8 ports.

Paramètre	Valeur
Nombre de ports	8×8
Pertes d'insertion	< 10 dB
Temps de commutation	< 1 µs
Diaphonie Intercanaux	< -30 dB
Longueur d'onde	1,55 µm

Tableau 2.1. Spécifications techniques d'un commutateur électro-optique à base de guides d'ondes [EOS 02].

La taille des commutateurs électro-optiques est usuellement de l'ordre de plusieurs centimètres, et les tensions de commande sont de l'ordre de plusieurs dizaines de volts. Les commutateurs électro-optiques sont conçus pour leur opération à une longueur d'onde spécifique et ne sont pas toujours indépendants de la polarisation.

Un autre type de commutateur électro-optique utilise des cellules de cristaux liquides nématiques où les molécules des cristaux sont organisées dans chaque cellule de manière hélicoïdale. Un tel arrangement des molécules permet de pivoter la polarisation d'un faisceau lumineux incident. Quand un champ électrique est appliqué à travers la cellule, l'organisation hélicoïdale des molécules est supprimée et par conséquent, la propriété de rotation de la polarisation aussi. La combinaison d'une telle cellule de cristaux liquides avec un élément séparateur de polarisation constitue un commutateur électro-optique.

Des commutateurs optiques à base de cristaux liquides ont été récemment annoncés par plusieurs sociétés : *Spectra Switch*, *Chromum Technologies* et *Corning*. Pour l'instant, le nombre de ports de ce type de commutateurs est assez réduit. Le Tableau 2.2 résume les spécifications d'un commutateur commercial de 2×2.

Paramètre	Valeur
Nombre de ports	2×2
Pertes d'insertion	< 1 dB
Temps de commutation	< 4 ms
Diaphonie Intercanaux	-40 dB
Pertes dépendantes de la polarisation	0,1 dB

Tableau 2.2. Spécifications techniques d'un commutateur électro-optique à base de cristaux liquides [SPE 02].

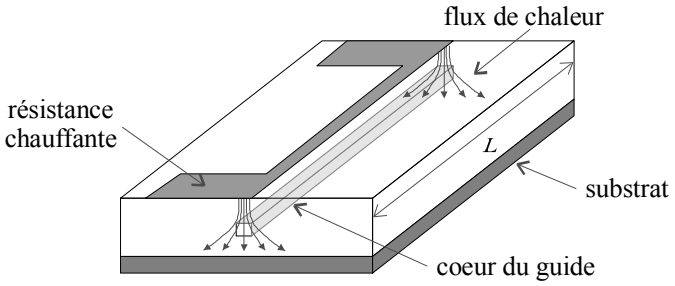
Plus récemment, des commutateurs optiques utilisant l'électro-holographie ont été annoncés séparément par les sociétés *Trellis Photonics* et *DigiLens*. Dans le commutateur de *Trellis Photonics*, des réseaux de diffraction contrôlables électriquement sont imprimés sur des cristaux de KLTN[31]. Chaque réseau de diffraction est indépendant des autres ; il devient actif

[31] KLTN : *potassium lithium tantalate niobate.*

en appliquant une tension particulière, condition pour laquelle un faisceau lumineux incident sur le réseau est réfléchi. Par contre, quand le signal de contrôle est nul, le faisceau lumineux incident passe à travers le cristal. D'après l'information préliminaire disponible, cette technologie permettra l'intégration de commutateurs à un très grand nombre de ports. En outre, les commutateurs utilisant l'électro-holographie seront capables de commuter dans un temps inférieur à 10 ns [TRE 02].

2.1.2. *Commutateurs thermo-optiques*

L'effet thermo-optique constitue le changement de l'indice de réfraction d'un matériau en fonction de la température. Autant que les effets électro-optiques, l'effet thermo-optique permet de moduler la phase des signaux qui se propagent dans un guide d'ondes. Pour ce faire, une résistance chauffante est placée sur le guide, voir Figure 2.2.



$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} L \left(\frac{dn}{dT} \right) \Delta T$$

λ = longueur d'onde
n = indice de réfraction
$\Delta\phi$ = variation de phase
ΔT = variation de température

Figure 2.2. Modulateur de phase thermo-optique.

Une combinaison de matériaux très utilisée dans la conception de dispositifs passifs à base de guides d'ondes est la silice sur le silicium. L'application la plus répandue de cette technologie concerne les multiplexeurs/démultiplexeurs par longueur d'onde, dispositifs qui contiennent jusqu'à 128 canaux. La silice sur silicium présente, en plus, un effet thermo-optique important ce qui a motivé la conception de dispositifs actifs, notamment par *NTT*[32]. Le Tableau 2.3 résume quelques spécifications de commutateurs thermo-optiques à base de silice sur silicium.

Paramètre	**Valeur**		
Nombre de ports	4 × 4	8 × 8	16 × 16
Taille de la puce	25 mm × 65 mm	68 mm × 68 mm	100 mm × 107 mm
Pertes d'insertion	2,6 dB	5,2 dB	6,6 dB
Diaphonie intercanaux	-55 dB	-60 dB	-55 dB

Tableau 2.3. Spécification techniques de plusieurs commutateurs thermo-optiques à base de silice sur silicium [HIM 98].

[32] NTT : *Nippon Telegraph and Telephone Corporation*.

La silice sur silicium est aussi adéquate pour la fabrication de dispositifs passifs qu'actifs, comme les modulateurs de phase ou les coupleurs. La société *Lynx Photonics* a profité de cette propriété de la silice pour la conception de produits qui intègrent plusieurs fonctions dans une même puce. Le point faible des commutateurs thermo-optiques utilisant la modulation de phase est la consommation d'énergie. Par exemple, le commutateur 16×16 du Tableau 2.3 consomme 17 W.

Un type différent de commutateur thermo-optique à été développé par *Agilent Technologies*. Ce commutateur consiste aussi en un réseau de guides d'onde de silice mais dans ce cas, des cavités remplies d'un certain fluide sont formées dans les intersections des guides. En plus, une résistance chauffante est placée sur chaque cavité. L'indice de réfraction du fluide est égal à celui des guides, ce qui permet par défaut la transmission des signaux. Par contre, quand une certaine résistance chauffante introduit de la chaleur, une bulle est formée dans la cavité associée, et un faisceau lumineux incident sur la bulle est réfléchi en base au principe de la réflexion totale. Les commutateurs optiques à bulles sont disponibles en versions qui contiennent jusqu'à 32×32 ports. Le Tableau 2.4 résume les spécifications techniques de ce type de commutateur.

Paramètre	Valeur
Nombre de ports	32 × 32
Pertes d'insertion	< 5 dB
Temps de commutation	< 10 ms
Diaphonie Intercanaux	-50 dB
Pertes dépendantes de la polarisation	0,25 dB

Tableau 2.4. Spécifications techniques d'un commutateur thermo-optique à bulles [AGI 02].

2.1.3. *Commutateurs acousto-optiques*

Une onde acoustique qui se propage dans un milieu homogène engendre dans ce dernier une densité variable associée aux régions de compression/dilation représentées sur la Figure 2.3(a). D'autre part, l'indice de réfraction d'un matériau est une fonction de sa densité, les régions de plus haute densité présentant un indice de réfraction plus grand. La distribution de l'indice de réfraction dans un matériau peut donc être modifiée de manière dynamique par un signal acoustique (généré par exemple par un transducteur piézoélectrique).

La variation cyclique avec une période Λ de l'indice de réfraction produit, sur un faisceau lumineux incident, un effet analogue à celui d'un ensemble de réflecteurs parallèles séparés d'une distance Λ, voir la Figure 2.3(b). Dans ce cas, le signal lumineux sera réfléchi si l'angle d'incidence satisfait la condition de Bragg :

$$sin\theta = \frac{m\lambda}{2\Lambda} \qquad [2.1]$$

où λ est la longueur d'onde du faisceau incident, m est un nombre entier et θ est l'angle de Bragg. Si la condition de Bragg n'est pas satisfaite, le faisceau incident sera transmis.

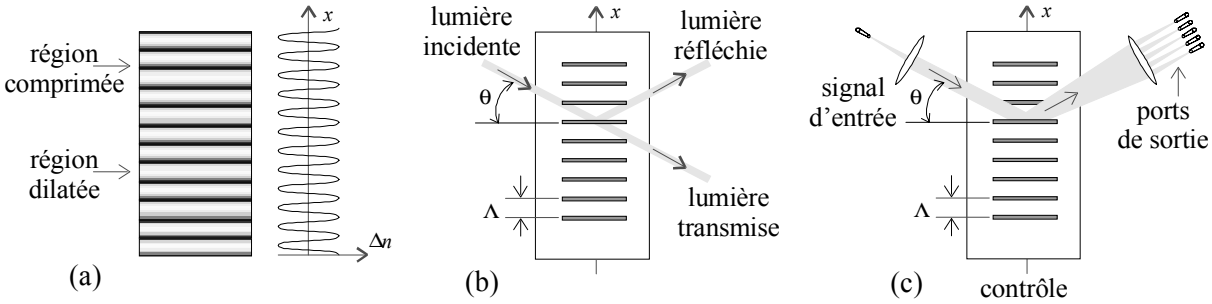


Figure 2.3. Dispositifs acousto-optiques : (a) profil de variation de l'indice de réfraction dans un matériau homogène excité par une onde acoustique, (b) commutateur 1×2, (c) commutateur 1×N.

Le dispositif acousto-optique de la Figure 2.3(b) est, en effet, un commutateur 1×2 où le changement d'état peut se faire au moyen du changement de la fréquence d'excitation. La Figure 2.3(c) montre un commutateur 1×N ; dans ce cas, nous supposons que le signal acoustique possède une divergence angulaire, voir [SAL 91]. Autant que pour le commutateur 1×2, la fréquence du signal d'excitation dans le commutateur 1×N permet de choisir le port de sortie.

Concernant les dispositifs commerciaux, il y a des composants acousto-optiques utilisés dans les réseaux mais ce sont principalement des filtres. Il n'y a pas encore de commutateurs acousto-optiques disponibles sur le marché ; cependant, plusieurs sociétés développent actuellement des produits. La société *Light Management Group*, par exemple, a annoncé des commutateurs acousto-optiques contenant un port d'entrée et jusqu'à 1024 ports de sortie. D'après les spécifications préliminaires, le temps de commutation serait de l'ordre de 5 µs.

2.1.4. *Commutateurs magnéto-optiques*

Les matériaux magnéto-optiques changent leurs propriétés optiques en fonction du champ magnétique appliqué. Un des effets magnéto-optiques les plus connus est l'effet Faraday.

Un matériau qui présente l'effet Faraday est capable de pivoter la polarisation d'un faisceau lumineux qui le traverse. L'angle de rotation de la polarisation par unité de longueur (ρ) est proportionnel au champ magnétique appliqué dans le matériau. L'effet Faraday peut s'utiliser en combinaison avec deux polariseurs orthogonaux pour fabriquer des interrupteurs optiques.

La Figure 2.4 illustre un commutateur magnéto-optique qui contient une matrice d'interrupteurs optiques. Les faisceaux d'entrée sont distribués chacun sur une colonne de la matrice, les ports de sortie reçoivent chacun les faisceaux provenant d'une ligne de la matrice.

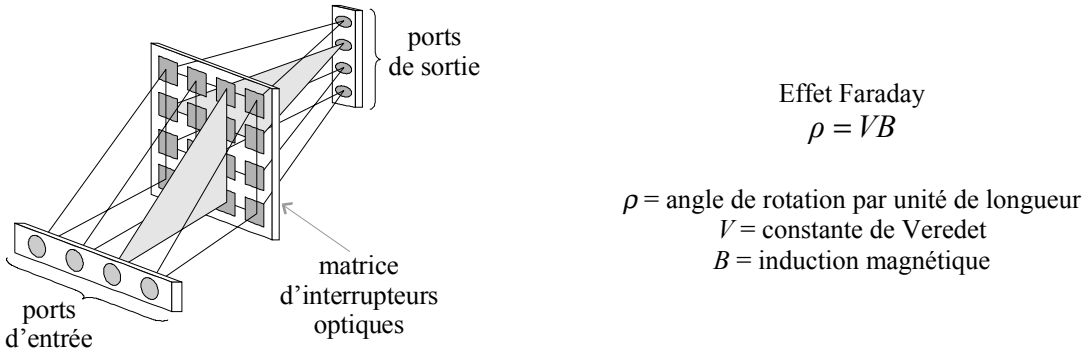


Figure 2.4. Commutateur magnéto-optique.

Les commutateurs magnéto-optiques ont été fabriqués en matrices de 1024×1024, les vitesses de commutation étant d'environ 100 ns [SAL 91]. Du point de vue commercial, les matériaux magnéto-optiques sont pour l'instant, plus utilisés dans les disques optiques que dans les réseaux.

2.1.5. *Commutateurs tout-optiques*

Dans le sens strict du terme, un commutateur tout-optique[33] est celui qui non-seulement véhicule des faisceaux lumineux entre ses ports, mais celui où les signaux de contrôle sont aussi des faisceaux lumineux. Dans un commutateur optique, la lumière contrôle la lumière en utilisant un matériau optique non-linéaire. L'effet Kerr optique est la variation de l'indice de réfraction d'un matériau en fonction de l'intensité de la lumière appliquée.

La Figure 2.5 illustre un commutateur utilisant une fibre optique qui présente l'effet Kerr et deux polariseurs. Le polariseur d'entrée transmet seulement le signal de polarisation verticale ; au contraire, le polariseur de sortie transmet uniquement le signal de polarisation horizontale. Deux signaux se propagent dans la fibre : le signal contenant l'information (signal principal) et le signal de contrôle. Le signal principal rentre dans la fibre à polarisation verticale ; si le signal de contrôle n'est pas présent, la polarisation du signal principal reste verticale et le polariseur de sortie ne transmet pas ce signal. D'autre part, la présence du signal

[33] A présent, le terme « réseau tout optique » est utilisé pour référencer les réseaux où les signaux qui transportent l'information restent dans le domaine optique depuis les ports émetteurs jusqu'aux ports récepteurs, indépendamment du type de contrôle utilisé pour la commutation. Ce sens de réseaux tout optiques (utilisé dans la majeure partie de ce travail de thèse) établit une différence par rapport aux réseaux qui utilisent des commutateurs optoélectroniques. Dans le sens strict du terme, et dans le sens utilisé dans la partie 2.1.5, un réseau tout optique utilise des faisceaux optiques aussi bien pour le transport d'information que pour le contrôle dans les commutateurs.

de contrôle modifie l'indice de réfraction du milieu, introduisant un déphasage et une rotation de 90° dans la polarisation du signal principal, le polariseur de sortie transmet donc le signal principal.

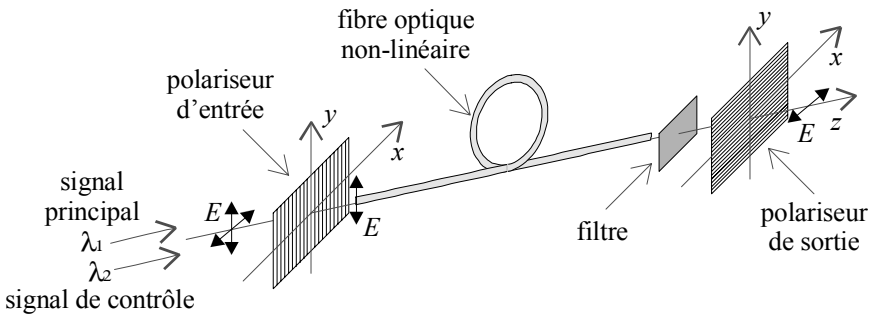


Figure 2.5. Commutateur tout-optique par sélection de la polarisation.

La Figure 2.6 montre un routeur utilisant, lui aussi, l'effet Kerr optique. La puissance optique du signal d'entrée contrôle l'indice de réfraction du milieu. Un signal d'entrée de haute puissance est transféré vers le port *B* alors qu'un signal de basse puissance sort par le port *C*.

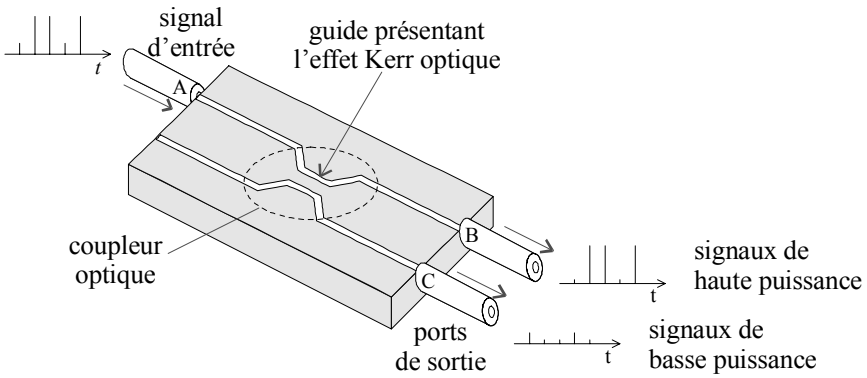


Figure 2.6. Routeur contrôlé par le niveau de puissance du signal d'entrée.

Les commutateurs tout-optiques représentent la solution ultime à la commutation optique mais ils sont regardés à l'heure actuelle, comme une solution à plus long terme.

2.1.6. *Commutateurs mécano-optiques*

Les commutateurs mécano-optiques utilisent des miroirs, des lentilles, des prismes, des réseaux de diffraction, ou même des guides ou des fibres qui se déplacent. Ces composants permettent de défléchir les faisceaux lumineux typiquement dans l'air, voir Figure 2.7. Les actionneurs utilisés pour déplacer ces éléments sont assez divers, les plus importants du point de vue micro-usinage seront présentés et étudiés dans le chapitre 4.

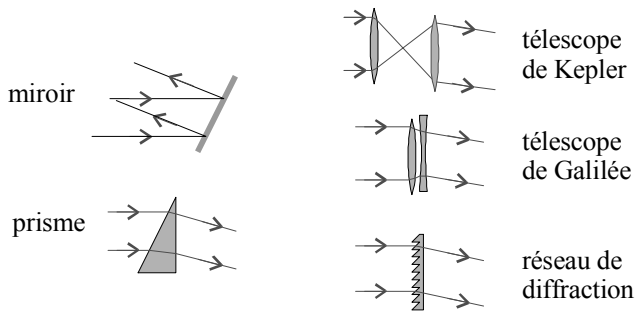


Figure 2.7. Eléments déflecteurs de signaux lumineux dans l'air [GLO 97].

Les commutateurs mécano-optiques sont connus pour avoir de bonnes propriétés optiques ; ils ont été fabriqués traditionnellement à base de composants optiques discrets de haute qualité. Malheureusement, leur vitesse de commutation a été très limitée étant donné, entre autres raisons, la grande taille des composants utilisés. Très récemment, les technologies de micro-usinage ont permis de réduire les dimensions des commutateurs mécano-optiques et par conséquent, la vitesse de commutation.

Les commutateurs mécano-optiques peuvent consister en fibres qui se déplacent latéralement les unes par rapport aux autres. Hogari et al. ont fabriqué sur ce principe un commutateur 2×2 avec un actionneur électrostatique [HOG 91]. Kopka et al. ont développé des commutateurs 1×2 et 2×2 utilisant des actionneurs thermiques [KOP 97] [HOF 99]. Nagaoka et al. ont conçu un commutateur 1×2 avec un actionneur magnétique [NAG 98]. Les commutateurs peuvent consister aussi en guides d'onde mobiles. Ollier et al. ont fabriqué un commutateur 1×2 contenant un guide d'onde suspendu qui se déplace latéralement par l'action d'un champ électrostatique [OLL 95]. Les commutateurs à base de fibres mobiles sont assez larges, ils sont aussi limités quant au nombre de ports. Les commutateurs à base de guides d'ondes sont plus petits mais ils restent encore limités quant au nombre de ports.

Un autre type de commutateur mécano-optique 2×2 à base de guides d'onde a été exploré par Chollet et al. [CHO 96]. Le commutateur consiste en une paire de guides d'ondes parallèles, un fixe et l'autre mobile. La séparation nominale entre les guides est suffisamment large pour minimiser le couplage. Par l'action d'un champ électrostatique, le guide suspendu est rapproché du guide fixe le long d'une période de transfert, ce qui permet l'échange des signaux entre les guides. L'avantage de ce dispositif par rapport aux commutateurs électro-optiques à base de guides d'ondes est la plus petite longueur de guide nécessaire.

Concernant les commutateurs qui utilisent des éléments déflecteurs entre les fibres, Göring et al. ont développé un commutateur optique à base de micro-prismes [GOR 00], tandis que Liu et al. ont fabriqué un autre système à base d'un réseau de diffraction [LIU 00].

Malgré la diversité des éléments disponibles pour défléchir un faisceau lumineux, les miroirs sont les plus utilisés, au moins du point de vue des microsystèmes. En fait, les miroirs sont pour l'instant, et par rapport aux autres éléments micro-déflecteurs, les composants les plus compatibles avec les technologies de micro-usinage.

Les micromiroirs peuvent être fabriqués par plusieurs technologies. La méthode la plus simple se base sur la gravure anisotrope ou isotrope de wafers 100 du silicium. Ainsi des miroirs suspendus, parallèles au plan du substrat, peuvent être usinés [PET 82]. D'autre part, la gravure anisotrope de wafers 110 de silicium peut être utilisée pour la fabrication de miroirs perpendiculaires au plan du substrat [ROS 94] [UEN 95]. Malheureusement, ces méthodes de micro-usinage ne permettent que la conception de structures assez simples. Ces techniques ne facilitent pas l'intégration d'un miroir avec un actionneur. Toshiyoshi et al. ont fabriqué des commutateurs à base de micro-usinage en volume utilisant un actionnement électrostatique [TOS 96], et un actionnement électromagnétique [TOS 99] mais les procédés de fabrication demeurent très complexes.

Des techniques de micro-usinage à haut facteur de forme d'aspect ont été utilisées pour la fabrication intégrée de miroirs verticaux et d'actionneurs électrostatiques en silicium. Juan et al. ont développé une technique de micro-usinage pour wafers de silicium appelée *Deep Etching Shallow Diffusion* [JUA 98]. Cette technique a permis la fabrication monolithique d'un miroir vertical et un actionneur électrostatique à peignes interdigités. Marxer et al. ont conçu un autre système monolithique contenant le miroir et l'actionneur, cette fois fabriqué à partir d'un wafer SOI [MAR 99]. Yasseen et al. quant à eux ont réalisé un commutateur à base d'un moteur électrostatique fabriqué par LIGA [YAS 99].

Le micro-usinage en surface à été largement utilisé pour la fabrication de commutateurs optiques à base de miroirs. Muller et al. ont fabriqué des vibromoteurs électrostatiques linéaires pour le positionnement linéaire et angulaire d'un micro-miroir [MUL 98]. Pai et al. ont conçu des vibromoteurs électro-thermiques linéaires pour déplacer des miroirs verticaux préassemblés [PAI 99]. Lin et al. ont développé un miroir relié au substrat au moyen de charnières [LIN 98]. Une matrice d'actionneurs à interactions de contact reliée au miroir, également au moyen de charnières, fait pivoter les miroirs entre une position parallèle au substrat et une autre perpendiculaire au substrat. Lee et al. ont conçu un commutateur électrostatique consistant en un miroir préassemblé en position verticale et suspendu à un cadre au moyen de poutres de torsion [LEE 99]. Dans ce cas, une électrode de masse est également préassemblée en position verticale et placée à 45° du miroir. Bishop et al. ont développé des miroirs chacun suspendu à une paire de couronnes au moyen de ressorts [AKS 00]. Cette armature permet le positionnement des miroirs avec deux degrés de liberté. Afin d'augmenter la plage dynamique, les miroirs sont soulevés à 50 µm du substrat et préassemblés automatiquement. Pour ce faire, le microsystème utilise un ensemble de poutres

qui se déforment après la gravure des couches sacrificielles, cela en raison de la contrainte mécanique résiduelle. Krishnamoorthy et al. ont fabriqué un autre commutateur avec des miroirs suspendus à un cadre au moyen de poutres de torsion. Le miroir et son cadre sont preassemblés à un certain angle du substrat pour augmenter la plage dynamique [KRI 00].

Concernant la conception de commutateurs à ports multiples, il y a deux approches différentes : l'architecture 2D (§ 3.1.1) et l'architecture 3D (§ 3.1.2). L'architecture 2D est plus appropriée pour la conception de commutateurs de 2×2 à 32×32 ports. L'architecture 3D est destinée aux grands commutateurs de 64×64 à 1024×1024, et même 4096×4096.

Sur le plan commercial, *OMM* est une des sociétés orientée dans la conception de commutateurs 2D. Le Tableau 2.5 montre les spécifications d'un commutateur 32×32 fabriqué en base à l'architecture 2D. Concernant l'architecture 3D, plusieurs sociétés ont déjà annoncé les premiers produits, notamment *Lucent Technologies*, *Nortel*, *Calient*, *JDS Uniphase* et *Xerox*.

Paramètre	**Valeur**
Nombre de ports	32 × 32
Pertes d'insertion	< 6 dB
Temps de commutation	< 13 ms
Diaphonie Intercanaux	-50 dB
Pertes dépendantes de la polarisation	1 dB
Pertes dépendantes de la longueur d'onde 1,53µm-1,57µm ou 1,57µm -1,61µm	1 dB
Pertes dépendantes de la trajectoire	non disponible
Consommation de puissance	< 0,5 W

Tableau 2.5. Spécifications techniques d'un commutateur 2D mécano-optique [OMM 02].

2.2. Avantages des commutateurs opto-mécaniques micro-usinés

Les avantages des commutateurs opto-mécaniques micro-usinés sont nombreux ; nous présentons ici les plus importants.

2.2.1. *Pertes d'insertion*

Quand deux fibres optiques sont couplées, divers mécanismes de pertes, intrinsèques et extrinsèques, sont présents. D'une part, les différences de taille du cœur de la fibre, de son ouverture numérique et de son profil d'indice de réfraction sont les mécanismes intrinsèques les plus importants. D'autre part, la séparation longitudinale entre les fibres, ainsi que les erreurs d'alignement latéral et angulaire sont les mécanismes extrinsèques les plus fréquents. Quand les fibres sont couplées à travers un commutateur optique, divers éléments comme les guides d'ondes, les lentilles ou les miroirs sont présents dans la trajectoire du signal ; ces éléments contribuent aussi à l'atténuation de ce dernier.

Dans le cas des commutateurs à base de guides d'onde, les pertes d'insertion augmentent avec la longueur et la courbure des guides. A mesure qu'un commutateur augmente le nombre des ports, le niveau des pertes d'insertion augmente rapidement. Un autre facteur de pertes dans les commutateurs à base de guides d'onde est le couplage entre la fibre optique de section transversale circulaire et la guide d'onde de section typiquement rectangulaire. Concernant les commutateurs micro-usinés à base de miroirs, les signaux se propagent entre les fibres essentiellement sans atténuation. Dans ce cas, les pertes sont dues à la divergence des faisceaux qui ne sont pas bien collimatés, à l'atténuation des faisceaux dans les lentilles, aux imperfections sur la surface des réflecteurs qui ne sont pas complètement plats, ou bien aux erreurs d'alignement entre les fibres. Heureusement, toutes ces sources de pertes peuvent être raisonnablement contrôlées.

Malgré les limitations actuelles dans la manufacture des miroirs et la mise en boîtier des MOEMS, les commutateurs optiques avec propagation dans l'air constituent une approche très prometteuse pour les systèmes au grand nombre de ports.

2.2.2. *Diaphonie intercanaux*

Une limitation importante des commutateurs à base de guides d'onde est l'interférence entre les guides due aux champs évanescents qui se propagent dans le substrat. A mesure que le commutateur augmente son nombre de ports, le problème de diaphonie s'accroît du fait du couplage à travers les multiples trajectoires et des multiples intersections entre les guides.

Dans les commutateurs micro-usinés avec propagation dans l'air, l'interférence entre canaux provient des erreurs d'alignement et surtout de la dispersion des faisceaux sur la surface des miroirs. La diaphonie peut aussi provenir d'un réflecteur qui transmet partiellement la puissance incidente, ce qui est le cas quand deux fibres sont placées sur le même axe et séparées par un miroir qui transmet partiellement le signal d'entrée. Autant que pour les pertes d'insertion, la diaphonie intercanaux peut être mieux contrôlée depuis la conception du

système. D'autre part, l'accroissement du nombre de ports n'augmente pas significativement le problème.

2.2.3. *Dépendance sur la polarisation et sur la longueur d'onde*

Quand les commutateurs dépendent de la polarisation, il faut toujours maintenir un contrôle strict sur la polarisation du signal d'entrée, ce qui signifie un accroissement du coût et de la complexité des systèmes.

Concernant les dispositifs à base de guides d'onde, l'indépendance sur la polarisation n'est pas toujours facile à obtenir. En plus, le fonctionnement des dispositifs avec cette capacité exige souvent des tensions de contrôle plus grandes, sinon un niveau de diaphonie intercanaux plus élevé devra être accepté.

Les commutateurs optiques avec propagation dans l'air sont presque indépendants de la polarisation, seulement une faible dépendance est due aux miroirs. La réflectivité d'une surface métallique dépend de la polarisation quand le faisceau incident n'arrive pas en direction perpendiculaire à la surface, ce qui est souvent le cas. Par exemple, des sensibilités à la polarisation de 1,1 % ont été reportées par Marxer [MAR 97] pour des surfaces de silicium recouvertes d'or quand l'angle d'incidence était de 45 degrés.

Les commutateurs optiques avec propagation dans le vide, eux aussi, sont presque indépendants de la longueur d'onde. Une légère dépendance des pertes d'insertion sur la longueur d'onde existe du fait que la dispersion de la lumière sur la surface des miroirs dépend de cette variable. En plus, la divergence des faisceaux dans l'espace libre dépend, elle aussi, de la longueur d'onde (§ 3.2.2).

2.2.4. *Taille*

Un autre avantage du commutateur optique avec propagation dans le vide est sa taille. Le commutateur 8×8 fabriqué avec la technologie de silice sur silicium du tableau 2.3 mesure 6,8 cm sur 6,8 cm. Des commutateurs optiques de 8×8 miroirs fabriqués par micro-usinage en surface rentrent sur une puce de 1 cm sur 1 cm. Cette différence de taille est encore plus flagrante quand le nombre de ports augmente.

2.2.5. *Consommation*

Les commutateurs qui utilisent des actionneurs électrostatiques sont potentiellement très efficaces. Par contre, les composants à base de guide d'ondes, et particulièrement, ceux qui utilisent l'effet thermo-optique ont besoin d'une quantité supérieure de puissance pour obtenir les changements sur les indices de réfraction.

2.2.6. *Temps de commutation*

La caractéristique la moins favorable des commutateurs qui contiennent des composants électromécaniques est le temps de commutation. Quelques dispositifs à base de guides d'onde, particulièrement ceux qui utilisent l'effet électro-optique sont, et très probablement resteront, plus rapides que les MOEMS. Cependant, la question importante n'est pas de savoir si les actionneurs électromécaniques vont surpasser la vitesse de contrôle électro-optique, mais seulement si les actionneurs micromécaniques sont suffisamment rapides pour être utiles – la réponse dépend de l'application (§ 1.2.3).

Quelques travaux récents sur les microactionneurs électrostatiques ont déjà démontré des temps de commutation inférieurs à une milliseconde. Cette vitesse de commutation est acceptable pour les applications où la reconfiguration du commutateur est seulement nécessaire quand il y a une faute dans le réseau, ou bien quand il faut approvisionner des capacités de transmission additionnelles sur certaines lignes du réseau. Pour les cas de commutation par paquets, les implémentations avec des dispositifs à base de guides d'onde vont très probablement rester comme les plus adéquats.

2.2.7. *Coût*

En prenant en compte la plus petite surface exigée, l'absence de composants pour contrôler la polarisation, et les capacités de fabrication collective, les commutateurs optiques micro-usinés devraient devenir une solution à bas coût pour les applications d'approvisionnement, protection et restauration.

2.3. Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons étudié les différentes technologies disponibles pour la conception de commutateurs optiques.

Nous avons montré que le niobate de lithium ainsi que la silice sur silicium sont des technologies assez établies dans les réseaux optiques. Nous avons expliqué que l'effet électro-optique de la première ainsi que l'effet thermo-optique de la deuxième peuvent être exploités pour la conception de commutateurs optiques à base de guides d'ondes. Cependant, les pertes d'insertion et l'interférence intercanaux de ces dispositifs s'accroissent rapidement à mesure que le nombre de ports augmente.

Parmi les technologies émergentes, le micro-usinage du silicium s'est révélé comme la plus prometteuse dans le court terme. Cette technologie favorise la conception de commutateurs mécano-optiques où les faisceaux se propagent dans l'air et sont défléchis par des miroirs. Ces

commutateurs présentent des niveaux de pertes d'insertion et de diaphonie intercanaux plus faibles par rapport aux dispositifs à base de guides d'ondes.

Afin de calculer les pertes d'insertion et la diaphonie intercanaux dans les commutateurs mécano-optiques, la propagation des faisceaux lumineux dans ces dispositifs doit être modélisée. Cela sera le sujet du chapitre 3.

Bibliographie

[AGI 02] Agilent Technologies, « N3565AG product data sheet », http://www.agilent.com/.

[AKS 00] V. A. Aksyuk, F. Pardo, C. A. Bolle, S. Arney, C. R. Giles, D. J. Bishop, « Lucent Microstar™ micromirror array technology for large optical crossconnects », in *MOEMS and Miniaturized Systems*, M. E. Motamedi, R. Göring, editors, Proceedings of SPIE, vol. 4178, pp. 320-324, 2000.

[ALF 97] R. C. Alferness, « Integrated optics: technology and system applications converge », *Optics and Photonics News*, pp. 16-22, 57, 1997.

[CHO 96] F. Chollet, M. de Labachelerie, H. Fujita, « Microoptomechanical devices: an electrostatically actuated bending waveguide for optical coupling », in *Micro-Optical Technologies for Measurement, Sensors and Microsystems*, Olivier M. Parriaux, editor, Proceedings of SPIE, vol. 2783, pp. 163-173, 1996.

[EOS O2] EOSpace, « High speed switch matrices », http://www.eospace.com/.

[GLO 97] S. Glöckner, R. Göring, « Multichannel fiber-optic switches based on MOEM systems », in *Microelectronic Structures and MEMS for Optical Processing III*, M. Edward Motamedi, Hans Peter Herzig, editors, Proceedings of SPIE, vol. 3226, pp. 76-85, 1997.

[GOR 00] R. Göring, F. Wippermann, K. Kubitz, « Hybrid MOEMS approaches for fiber optic switches and switch matrices », in *MOEMS and Miniaturized Systems*, M. E. Motamedi, R. Göring, editors, Proceedings of SPIE, vol. 4178, pp. 59-66, 2000.

[HIM 98] A. Himeno, K. Kato, T. Miya, « Silica-based planar lightwave circuits », *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 4, no. 6, pp. 913-924, 1998.

[HOF 99] M. Hoffmann, P. Kopka, E. Voges, « All-silicon bistable micromechanical fiber switch based on advanced bulk micromachining », *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 5, no. 1, pp. 46-51, 1999.

[HOG 91] K. Hogari, T. Matsumoto, « Electrostatically driven micromechanical 2×2 optical switch », *Applied Optics*, vol. 30, no. 10, pp. 1253-1257, 1991.

[HUA 98] L. –S. Huang, S. –S. Lee, E. Motamedi, M. C. Wu, C. –J. Kim, « Optical coupling analysis and vibration characterization for packaging of 2x2 MEMS vertical torsion mirror switches », in *Microelectronic Structures and MEMS for Optical Processing IV*, M. Edward Motamedi, Hans P. Herzig, editors, Proceedings of SPIE, vol. 3513, pp. 135-143, 1998.

[JUA 98] W. –H. Juan, S. W. Pang, « High-aspect-ratio Si vertical micromirror arrays for optical switching », *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 7, no. 2, pp. 207-213, 1998.

[KAW 90] M. Kawachi, « Silica waveguides on silicon and their application to integrated optic components », *Optical and Quantum Electronics*, vol. 22, pp. 391-416, London : Chapman & Hall, 1990.

[KOP 97] P. Kopka, M. Hoffmann, E. Voges, « Bistable 2x2 and multistable 1x4 micromechanical fiber-optic switches on silicon », *3rd International Conference on Micro Opto Electro Mechanical Systems*, *MOEMS '99*, Mainz, Germany, pp. 88-91, 1999.

[KRI 00] U. Krishnamoorthy, P. M. Hagelin, J. P. Heritage, O. Solgaard, « Surface-micromachined mirrors for scalable fiber optic switching applications », in *MOEMS and Miniaturized Systems*, M. E. Motamedi, R. Göring, editors, Proceedings of SPIE, vol. 4178, pp. 270-277, 2000.

[LEE 99] S. –S. Lee, L. –S. Huang, C. J. Kim, M. C. Wu, « Free-space fiber-optic switches based on MEMS vertical torsion mirrors », *Journal of Lightwave Technology*, vol. 17, no. 1, pp. 7-13, 1999.

[LIN 98] L. Y. Lin, E. L. Goldstein, R. W. Tkach, « Free-space micromachined optical switches with submillisecond switching time for large-scale optical crossconnects », *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 10, no. 4, pp. 525-527, April 1998.

[LIU 00] A. Q. Liu, B. Zhao, F. Collet, Q. Zou, A. Asundi, H. Fujita, « Micro-opto-mechanical grating switches », *Sensors and Actuators A*, vol. 86, pp. 127-134, 2000.

[MAK 99] M. Makihara, M. Sato, F. Shimokawa, Y. Nishida, « Micromechanical optical switches based on thermocapillary integrated in waveguide substrate », *Journal of Lightwave Technology*, vol. 17, no. 1, pp. 14-18, 1999.

[MAR 97] C. Marxer, M. –A. Grétillat, N. F. de Rooij, R. Bättig, O. Anthamatten, B. Valk, P. Vogel, « Vertical mirrors fabricated by reactive ion etching for fiber optical switching Applications », *IEEE Workshop on Micro Electro Mechanical Systems*, Nagoya, Japan, pp. 49-54, January 1997.

[MAR 99] C. Marxer, N. F. de Rooij, « Micro-opto-mechanical 2x2 switch for single-mode fibers based on plasma-etched silicon mirrors and electrostatic actuation », *Journal of Lightwave Technology*, vol. 17, no. 1, pp. 2-6, 1999.

[MUL 98] R. S. Muller, K. Y. Lau, « Surface-micromachined microoptical elements and systems », *Proceedings of the IEEE*, vol. 86, no. 8, pp. 1705-1720, August 1998.

[NAG 98] S. Nagaoka, « Compact latching type PANDA fiber switch », *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 10, no. 2, pp. 233-234, 1998.

[NIS 89] H. Nishihara, M. Haruna, T. Suhara, *Optical Integrated Circuits*, McGraw Hill Optical and Electro-Optical Engineering Series, R. E. Fischer, W. J. Smith, series editors, McGraw Hill, 1989.

[NIS 90] H. Nishinoto, M. Iwasaki, S. Suzuki, M. Kondo, « Polarization independent $LiNbO_3$ 8×8 matrix switch », *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 2, no. 9, pp. 634-636, 1990.

[NOL 94] D. A. Nolan, V. A. Bhagavatula, C. Lerminiaux, « Integrated-optics planar components », *IEEE Communications Magazine*, vol. 32, no. 7, pp. 62-67, July 1994.

[OKU 99] M. Okuno, K. Kato, R. Nagase, A. Himeno, Y. Ohmori, M. Kawachi, « Silica-based 8×8 optical matrix switch integrating new switching units with large fabrication tolerance », *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 17, no. 5, pp. 771-781, 1999.

[OLL 95] E. Ollier, P. Labeye, F. Revol, « Micro-opto mechanical switch integrated on silicon », *Electronics Letters*, vol. 31, no. 23, pp. 2003-2005, 1995.

[OMM 02] OMM, « 32x32 photonic switch data sheet », http://www.omminc.com/, 2002.

[PAI 99] M. Pai, N. C. Tien, « Polysilicon actuated micromirror for large matrix optical cross-connects », *3rd International Conference on Micro Opto Electro Mechanical Systems*, *MOEMS '99*, Mainz, Germany, pp. 30-34, 1999.

[PET 82] K. E. Petersen, « Silicon as a mechanical material », *Proceedings of the IEEE*, vol. 70, no. 5, pp. 420-457, 1982.

[POW 97] M. A. Powell, « What integrated optics is really used for », *Optics and Photonics News*, pp. 23-29, 1997.

[SAL 91] B. E. A. Saleh, M. C. Teich, *Fundamentals of Photonics*, Wiley Series in Pure and Applied Optics, J. W. Goodman, series editor, New York : John Wiley & Sons Inc, 1991.

[SPE 02] Spectra Switch, « WaveWalker™ product data sheet », http://www.spectraswitch.com/.

[SYM 94] R. R. A. Syms, « Silica on silicon integrated optics », *Advances in Integrated Optics*, S. Martellucci et al., editors, New York : Plenum Press, 1994.

[ROS 94] L. Rosengren, L. Smith, Y. Bläcklund, « Micromachined optical planes and reflectors in silicon », *Sensors and Actuators A*, vol. 41-42, pp. 330-333, 1994.

[TAB 95] M. Tabib-Azar, *Integrated Optics, Microstructures and Sensors*, Boston : Kluwer Academic Publishers, 1995.

[THY 96] L. Thylén, G. Karlsson, O. Nilsson, « Switching technologies for future guided wave optical Networks: Potentials and Limitations of Photonics and Electronics », *IEEE Communications Magazine*, vol. 34, no. 2, pp. 106-113, 1996.

[TOS 96] H. Toshiyoshi, H. Fujita, « Electrostatic micro torsion mirrors for an optical switch matrix », *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 5, no. 4, pp. 231-237, 1996.

[TOS 99] H. Toshiyoshi, D. Miyauchi, H. Fujita, « Electromagnetic torsion mirrors for self-aligned fiber-optic crossconnectors by silicon micromachining », *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 5, no. 1, pp. 10-17, 1999.

[TRE 02] Trellis Photonics, http://www.trellisphotonics.com/.

[UEN 95] Y. Uenishi, M. Tsugai, M. Mehregany, « Micro-opto-mechanical devices fabricated by anisotropic etching of (110) silicon », *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 5, pp. 305-312, 1995.

[VEL 99] G. J. Veldhuis, T. Nauta, C. Gui, J. W. Berenscht, P. V. Lambeck, « Electrostatically actuated mechanooptical waveguide ON-OFF switch showing high extinction at a low actuation voltage », *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 5, no. 1, pp. 60-66, 1999.

[WUM 97] M. C. Wu, « Micromachining for optical and optoelectronic systems », *Proceedings of the IEEE*, vol. 85, no. 11, pp. 1833-1856, 1997.

[YAS 99] A. A. Yasseen, J. N. Mitchell, J. F. Klemic, D. A. Smith, M. Mehregany, « A rotary electrostatic micromotor 1x8 optical switch », *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 5, no. 1, pp. 26-32, 1999.

Chapitre 3

Modélisation optique des commutateurs micro-usinés

Ce chapitre étudiera les commutateurs à base de miroirs du point de vue optique. Nous examinerons la propagation de faisceaux lumineux dans les commutateurs et nous calculerons les pertes d'insertion.

La partie 3.1 comparera deux types de commutateurs à base de miroirs : les commutateurs 2D et les commutateurs 3D.

La partie 3.2 étudiera les différentes théories de la propagation de la lumière dans l'espace libre : théorie électromagnétique, optique d'ondes scalaires, optique géométrique. Nous examinerons surtout la portée de chaque théorie et la validité de son application dans le domaine des commutateurs optiques micro-usinés.

Dans la partie 3.3, nous appliquerons l'optique de faisceaux gaussiens pour estimer les pertes d'insertion d'un commutateur optique dues aux erreurs d'alignement des fibres. Nous calculerons premièrement les pertes d'insertion d'un lien à fibres monomode dans l'espace libre. Ensuite, nous examinerons les différents collimateurs que l'on peut utiliser pour limiter la divergence des faisceaux lumineux. Finalement, nous calculerons les pertes d'insertion pour le cas où les fibres sont collimatées par des lentilles à gradient d'indice.

Dans la partie 3.4, nous examinerons les mécanismes de pertes introduits par les miroirs, et dans la partie 3.5, nous explorerons la formulation scalaire de Rayleigh-Sommerfeld pour son application dans la modélisation de commutateurs optiques.

Finalement, dans la partie 3.6 nous présenterons nos conclusions.

3.1. Structures des commutateurs à base de miroirs

Dans la partie 2.1.6, nous avons étudié les différents dispositifs que l'on peut utiliser pour défléchir un faisceau dans l'espace libre, parmi lesquels les miroirs se sont révélés comme les plus appropriés aux technologies de micro-usinage. La littérature montre principalement deux types de commutateurs à base de miroirs, fréquemment dénommés « commutateurs 2D » et « commutateurs 3D ».

3.1.1. *Commutateurs 2D*

Dans un commutateur 2D [LIN 98] [OMM 02], les faisceaux lumineux se propagent dans un espace bidimensionnel parallèle au substrat, et les miroirs présentent deux positions de base. La Figure 3.1 illustre ce type de commutateur. Les faisceaux provenant des fibres d'entrée sont d'abord collimatés. Ensuite, ils sont défléchis de 90° par un ensemble de miroirs, et finalement, ils arrivent aux lentilles qui les focalisent sur les fibres optiques de sortie.

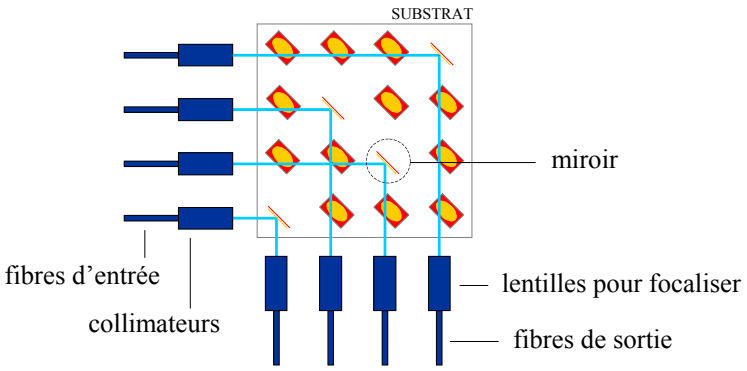


Figure 3.1. Commutateur optique avec architecture 2D.

Dans le schéma de la Figure 3.1, chaque miroir présente soit une position parallèle au substrat (état de non-réflexion), soit une position perpendiculaire au substrat (état de réflexion). Le miroir change donc d'état en pivotant autour d'un axe parallèle au substrat[34].

Si les positions de base des miroirs sont répétitives, le système de commande peut être assez simple [BER 01a] [BER 02b]. Les signaux de contrôle binaires provenant d'un circuit numérique sont simplement conditionnés pour piloter les miroirs. Cependant, à mesure que le nombre de ports augmente, et que les distances entre les ports d'entrée et de sortie s'accroîssent, les tolérances d'alignement deviennent plus petites (§ 3.3.3). Ainsi, un système d'asservissement est nécessaire.

[34] Dans d'autres types de commutateurs 2D, les deux états d'un miroir sont obtenus en faisant pivoter le miroir autour d'un axe perpendiculaire au substrat, ou bien par mouvement linéaire du miroir, parallèle ou perpendiculaire au substrat [MAR 01].

Afin de relier N fibres d'entrée à N fibres de sortie, l'architecture 2D nécessite une matrice de N×N miroirs. Le nombre de miroirs augmente donc proportionnellement au carré du nombre de ports d'entrée.

Dans l'architecture 2D, la longueur moyenne des parcours des faisceaux s'accroît de manière importante en fonction de l'augmentation du nombre de ports. D'autre part, la variance des parcours, elle aussi augmente avec la taille du commutateur ; en conséquence, l'atténuation introduite par le dispositif sur un faisceau dépend fortement des ports d'entrée et de sortie utilisés par ce dernier[35]. Ces inconvénients limitent donc le nombre maximal de ports des commutateurs 2D.

3.1.2. *Commutateurs 3D*

Dans les commutateurs 3D [AKS 00], les faisceaux se propagent dans un espace tridimensionnel et les miroirs présentent plusieurs positions de base. La Figure 3.2 montre un exemple de ce type de commutateur. Les faisceaux provenant des fibres d'entrée sont d'abord collimatés. Ensuite, ils sont envoyés vers une première matrice de miroirs, puis vers une deuxième matrice. Les faisceaux provenant de la deuxième matrice de miroirs sont finalement focalisés sur les fibres de sortie.

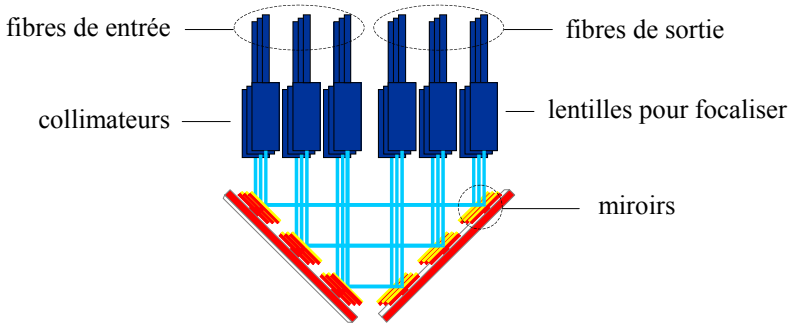


Figure 3.2. Commutateur optique avec architecture 3D.

Le commutateur 3D de la Figure 3.2 a besoin de deux matrices de miroirs. Chaque matrice comprend N miroirs, où N représente le nombre de ports d'entrée (ou de sortie). Ainsi, le nombre total de miroirs s'accroît linéairement en fonction du nombre de ports.

A différence de la structure 2D, l'architecture 3D ne permet généralement pas une intégration monolithique. Dans le système de la Figure 3.2, les matrices de miroirs sont contenues dans des puces séparées qui sont assemblées à 90° dans l'espace.

[35] La variance des pertes d'insertion pose une problème dans les réseaux optiques où les niveaux de puissance des signaux doivent rester uniformes (§ 7.2.1).

L'architecture 3D nécessite des miroirs qui présentent chacun, N positions distinctes, ce qui permet d'établir toutes les liaisons possibles entrée/sortie. A mesure que le nombre de ports augmente, le nombre de positions de base pour chaque miroir, lui aussi augmente. Dans la pratique, les miroirs requièrent impérativement un système d'asservissement afin d'optimiser le couplage entre les ports d'entrée et les ports de sortie. Un tel système de contrôle exige la conception de circuits de commande linéaires de haute-tension[36].

Malgré les exigences du système de contrôle, l'architecture 3D est la seule option pratique pour les commutateurs à grand nombre de ports. Les distances parcourues par les faisceaux dans ce type de commutateur sont plus courtes et beaucoup plus uniformes que pour l'architecture 2D.

3.2. Modélisation de la propagation optique

Dans cette partie, nous étudions les concepts de base de la propagation de la lumière dans l'espace libre en partant de la théorie la plus générale vers la plus particulière (voir Figure 3.3). Nous abordons la théorie électromagnétique comme point de départ. Par la suite, nous examinons les concepts de la propagation d'ondes scalaires. Ensuite, nous étudions l'optique géométrique.

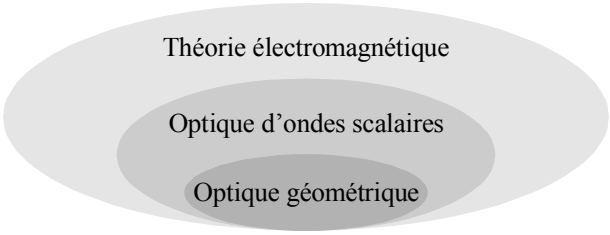


Figure 3.3. Théories de la propagation de la lumière.

Notre objectif est surtout de reconnaître les applications et les limitations de chaque théorie dans le domaine des commutateurs optiques à base de miroirs, et non pas d'approfondir les détails théoriques qui sont traités dans beaucoup d'ouvrages [SAL 91] [BOR 99] [PER 00].

3.2.1. *Théorie Electromagnétique*

La propagation de la lumière dans l'espace libre est décrite par les équations de Maxwell :

[36] Cas de commutateurs avec actionneurs électrostatiques (chapitre 4).

$$\nabla \times \hat{E} = -\mu \frac{\partial \hat{H}}{\partial t} \qquad [3.1]$$

$$\nabla \times \hat{H} = \varepsilon \frac{\partial \hat{E}}{\partial t} \qquad [3.2]$$

$$\nabla \cdot \varepsilon \hat{E} = 0 \qquad [3.3]$$

$$\nabla \cdot \mu \hat{H} = 0 \qquad [3.4]$$

où $\hat{E}$ et $\hat{H}$ représentent respectivement l'intensité du champ électrique et l'intensité du champ magnétique, et ε et μ sont respectivement la permittivité et la perméabilité du milieu.

La théorie électromagnétique pourrait être utilisée pour la simulation par ordinateur de la propagation de la lumière dans les commutateurs. Cependant, l'utilisation de cette méthode demande beaucoup de ressources matérielles (CPU et mémoire) [LEV 01].

La théorie électromagnétique est nécessaire pour décrire les effets de la polarisation ainsi que d'autres effets de nature vectorielle. Par contre, il existe des cas où l'application de la théorie électromagnétique est superflue et une approche scalaire est acceptable, comme nous verrons par la suite.

3.2.2. *Optique d'ondes scalaires*

Dans les systèmes optiques où les structures diffractives sont beaucoup plus grandes que la longueur d'onde, la théorie électromagnétique donne lieu à une théorie scalaire de la diffraction [GOO 96]. Si les systèmes optiques satisfont le critère de la taille, les erreurs provoquées par l'utilisation de la théorie scalaire sont négligeables[37].

En ce qui concerne les commutateurs à base de miroirs pour les réseaux optiques, la taille des miroirs est de plusieurs centaines de microns (§ 6.3.1) alors que les longueurs d'onde d'intérêt dans les réseaux optiques sont de 1,3 µm et 1,55 µm (§ 1.1.2.1). La condition pour l'application de l'optique d'ondes scalaires est satisfaite.

La base de la théorie scalaire est l'équation d'onde qui est obtenue directement à partir des équations de Maxwell pour des milieux linéaires, homogènes, isotropes, non-dispersifs et non-magnétiques [GOO 96] :

$$\nabla^2 u(r,t) - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 u(r,t)}{\partial t^2} = 0 \qquad [3.5]$$

[37] Une situation analogue est observé dans l'étude des circuits électriques où les équations de Maxwell se simplifient en une « théorie des circuits électriques ».

où c est la vitesse de la lumière et $u(r,t)$ est la fonction d'onde.

Dans la théorie scalaire de la diffraction, la fonction scalaire $u(r,t)$ représente un, voire tous les composants scalaires du champ électrique et du champ magnétique.

L'intensité $I(r,t)$ et la puissance $P(t)$ de la fonction $u(r,t)$ sont définies comme suit [SAL 91]:

$$I(r,t) = 2\langle u^2(r,t)\rangle \qquad [3.6]$$

$$P(t) = \iint I(r,t)dS \qquad [3.7]$$

où $\langle u^2(r,t)\rangle$ signifie la valeur moyenne de $u^2(r,t)$.

Pour les cas des ondes monochromatiques, l'équation [3.5] se simplifie comme montré ci-dessous. Une onde monochromatique d'amplitude $a(r)$, de phase $\phi(r)$ et de fréquence ν s'exprime comme suit :

$$u(r,t) = a(r)cos[2\pi\nu t + \phi(r)] \qquad [3.8]$$

et sa représentation complexe équivalente est :

$$U(r,t) = a(r)e^{-j\phi(r)}e^{-j2\pi\nu t} = U(r)e^{-j2\pi\nu t} \qquad [3.9]$$

L'onde monochromatique $u(r,t)$ est simplement la partie réelle de $U(r,t)$. Les deux fonctions, $u(r,t)$ et $U(r,t)$, sont des solutions de l'équation d'onde. Si on substitue la représentation complexe $U(r,t)$ dans [3.5], on peut supprimer les termes qui dépendent du temps pour obtenir l'équation de Helmholtz :

$$(\nabla^2 + k^2)U(r) = 0, \qquad k = \frac{2\pi\upsilon}{c} \qquad [3.10]$$

Il y a des solutions $U(r)$ de l'équation de Helmholtz qui présentent le comportement d'un faisceau. Dans ce cas, l'énergie du flux lumineux est essentiellement concentrée autour d'un axe optique. Tel est le cas des faisceaux gaussiens que nous étudierons dans le § 3.2.2.1 et que nous utiliserons pour l'estimation des pertes d'insertion dans un commutateur (§ 3.3.3).

L'équation [3.10] est aussi à l'origine de la formulation de Rayleigh-Sommerfeld (§ 3.2.2.2 et § 3.5), une méthode qui permet, elle aussi, d'aborder le problème des pertes d'insertion dans les commutateurs. Cette approche tient compte des effets diffractifs.

3.2.2.1. Optique de faisceaux gaussiens

Le faisceau gaussien est une solution de l'équation de Helmholtz ; il est important dans l'étude du couplage entre fibres optiques monomode. Le faisceau gaussien a la forme [SAL 91] :

$$U(r) = \frac{A_1}{q(z)} e^{-\left\{ jkz + jk\frac{\rho^2}{2q(z)} \right\}} = A_0 \frac{w_0}{w(z)} e^{-\left\{ \frac{\rho^2}{w^2(z)} \right\}} \cdot e^{-\left\{ jkz + jk\frac{\rho^2}{2R(z)} - j\zeta(z) \right\}} \qquad [3.11]$$

où $w(z)$ est le rayon du faisceau, $R(z)$ le rayon de courbure du front d'onde, et $\zeta(z)$ le retard de phase du faisceau gaussien par rapport à un front d'onde plat. Les trois paramètres ci-dessus varient en fonction de la distance de propagation z et sont donnés par :

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_0} \right)^2} \qquad [3.12]$$

$$R(z) = z \left[1 + \left(\frac{z_0}{z} \right)^2 \right] \qquad [3.13]$$

$$\zeta(z) = tan^{-1} \left(\frac{z}{z_0} \right) \qquad [3.14]$$

Dans l'équation [3.12], w_0 est le rayon minimum (ou la taille) du faisceau[38], qui se présente sur le plan $z=0$. Le paramètre z_0 est appelé longueur de Rayleigh et dépend de w_0 :

$$w_0 = \sqrt{\frac{\lambda z_0}{\pi}} \qquad [3.15]$$

La variable $q(z)$, appelé « paramètre du faisceau gaussien » ou « rayon de courbure complexe » est défini comme suit :

$$\frac{1}{q(z)} = \frac{1}{R(z)} - j\frac{\lambda}{\pi w^2(z)} \qquad [3.16]$$

[38] En anglais : *beam waist*.

De façon générale, pendant la propagation d'un faisceau gaussien, les paramètres *w(z)* et *R(z)* sont modifiés par le système optique qu'ils traversent. Le changement des paramètres *w(z)* et *R(z)* des faisceaux gaussiens est donné par la règle ABCD :

$$q_2(z) = \frac{Aq_1(z) + B}{Cq_1(z) + D} \qquad [3.17]$$

L'étude de la propagation des faisceaux gaussiens à travers un système optique est facile parce que l'on suppose que les faisceaux restent gaussiens partout et que seuls les paramètres *w(z)* et *R(z)* varient à travers le système. Dans le cas pratique, les effets diffractifs limitent l'application de cette méthode.

3.2.2.2. Formulation de Rayleigh-Sommerfeld

Pour tenir compte des effets diffractifs, on peut utiliser la formulation scalaire de Rayleigh-Sommerfeld [GOO 96]. Cette approche consiste à calculer par intégration le signal inconnu sur un plan (plan d'observation) à partir du signal connu sur un autre plan (plan de la source). Pour ce faire, la source est considérée comme une superposition de sources ponctuelles. La formulation de Rayleigh-Sommerfeld est donnée par l'équation suivante :

$$U(P_0) = \frac{1}{j\lambda} \iint_{\Sigma} U(P_1) \frac{exp(jkr_{01})}{r_{01}} cos\,\theta\, dS \qquad [3.18]$$

où P_0 et P_1 représentent respectivement le plan d'observation et le plan de la source ; $U(P_0)$ et $U(P_1)$ constituent par ailleurs les signaux dans le plan d'observation et dans le plan de la source, k est la constante de propagation, et λ la longueur d'onde. Le paramètre r_{01} est un vecteur dirigé depuis un point sur le plan d'observation vers un point sur le plan de la source ; le paramètre θ est l'angle entre le vecteur r_{01} et le vecteur perpendiculaire au plan de la source, voir Figure 3.4.

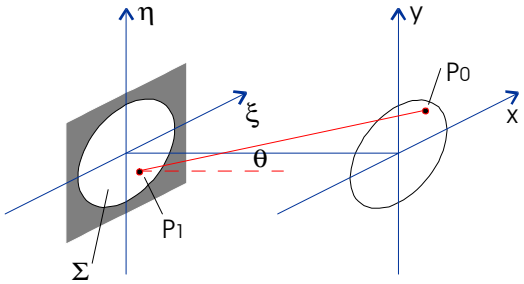


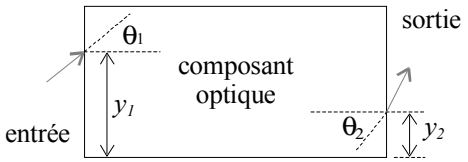
Figure 3.4. Définition des paramètres de la formulation de Rayleigh-Sommerfeld.

3.2.3. *Optique géométrique*

L'optique géométrique est la théorie de la propagation de la lumière la plus simple. La lumière est représentée par des rayons qui traversent les différents milieux optiques en accord avec certaines règles géométriques.

L'optique géométrique concerne la localisation et la direction de rayons de lumière. Cette théorie modélise la propagation d'une collection de rayons de lumière provenant d'une source, et à travers les différents éléments optiques, jusqu'à un plan d'observation. Dans les milieux isotropes, les rayons optiques se propagent dans la direction du flux de l'énergie et la densité de l'énergie est proportionnelle à la densité des rayons [SAL 91].

Un cas particulièrement important est celui des systèmes optiques centrés. Ce type de systèmes est constitué par plusieurs surfaces réfringentes ou réfléchissantes telles que l'ensemble soit symétrique autour d'un axe de révolution. Si en plus, les faisceaux qui se propagent dans le système sont voisins de l'axe optique commun et peu inclinés sur cet axe, le changement de la position y et de la direction θ des faisceaux est décrit par des opérations matricielles. Ces idées sont illustrées dans la Figure 3.5.



$$\begin{bmatrix} y_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} y_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix}$$

Figure 3.5. Système optique centré : (a) définition de paramètres, (b) matrice de transfert du système.

Le concept de matrice de transfert permet d'analyser la propagation de rayons dans l'espace libre, la réfraction de rayons à travers des frontières planes ou sphériques, la transmission de rayons à travers une lentille ou la réflexion de rayons depuis un miroir planaire ou sphérique. Cette méthode nous permet aussi de placer plusieurs composants optiques en cascade ; dans ce cas, la matrice de transfert qui caractérise le système optique complet est la multiplication de toutes les matrices appartenant aux différents composants.

Concernant les commutateurs micro-usinés, l'optique géométrique trouve son application surtout dans les premières étapes de la validation globale des systèmes hétérogènes (§ 5.6) où l'exactitude des résultats peut être sacrifiée au bénéfice d'un temps de simulation plus court.

3.3. Pertes d'insertion dans les commutateurs optiques dues aux erreurs d'alignement des fibres

Nous commençons par le calcul des pertes d'insertion dans une liaison entre fibres monomodes directement couplées. Ensuite, nous examinons les différents collimateurs que l'on peut utiliser pour élargir la séparation entre les fibres. Finalement, nous calculons les pertes d'insertion entre deux fibres monomodes collimatées par des lentilles à gradient d'indice.

3.3.1. *Couplage direct de fibres monomodes*

Les fibres monomode permettent seulement le mode de propagation fondamental. Le champ électrique associé à ce mode se rapproche d'une fonction gaussienne. Comme résultat, le champ électrique et l'intensité de la lumière sortant d'une fibre monomode vers l'espace libre peuvent être représentés approximativement par des faisceaux gaussiens comme suit [AGR 97] :

$$E(\rho,z) = E(0,z)\cdot e^{-\left(\rho^2/w^2(z)\right)} \qquad [3.19]$$

$$I(\rho,z) = I(0,z)\cdot e^{-2\left(\rho^2/w^2(z)\right)} \qquad [3.20]$$

Les équations [3.19] et [3.20] supposent que la fibre est placée sur le coté négatif de l'axe z, et que la lumière sort de la fibre dans le plan $z=0$; le faisceau se propage donc dans la région $z>0$. Le rayon du faisceau $w(z)$ représente à la fois le rayon où le champ électrique est égal à 37 % de sa valeur sur l'axe de la fibre, et le rayon où l'intensité est égale à 13,5 % de sa valeur sur l'axe. A $z=0$, le rayon du faisceau a sa valeur minimale w_0. A mesure que le faisceau se propage, le rayon $w(z)$ augmente et se calcule par l'équation [3.12].

Les pertes d'insertion proviennent des erreurs d'alignement des fibres ainsi que des différences géométriques entre les fibres. La Figure 3.6 montre l'aspect physique d'une liaison entre fibres monomodes. Les paramètres Δx, Δz et $\Delta\theta$ représentent respectivement les erreurs d'alignement latéral, longitudinal et angulaire.

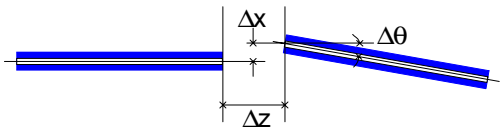


Figure 3.6. Erreurs d'alignement dans une liaison entre fibres.

L'approximation gaussienne de la propagation (§ 3.2.2.1) a été utilisée par Nemoto et Makimoto pour développer un modèle analytique des pertes d'insertion dans la jonction des fibres monomode [NEM 79]. Ce modèle peut être utilisé pour le calcul des pertes d'insertion dans les commutateurs optiques où la distance Δz ne représente plus une erreur d'alignement. Par contre, une séparation entre les fibres est nécessaire pour insérer soit les éléments qui défléchissent les faisceaux, soit les éléments qui effectuent les diverses fonctions de traitement optique : collimation, focalisation, division de puissance ou détection. En général, les commutateurs qui contiennent un nombre de ports plus élevé ont besoin d'une séparation plus grande entre les fibres. Malheureusement, plus on éloigne les fibres, plus l'exactitude dans leurs positionnements latéral et angulaire est nécessaire.

D'après le modèle de Nemoto et Makimoto, les pertes d'insertion sont exprimées par:

$$L = -10\,log\left\{4\frac{D}{B}\cdot e^{(-A\cdot C/B)}\right\} \quad dB \qquad [3.21]$$

où les quantités A, B, C et D sont définies comme suit :

$$A = (k\cdot w_T)^2 / 2\,, \qquad k = 2\pi\cdot n_0 / \lambda \qquad [3.22]$$

$$B = G^2 + (D+1)^2 \qquad [3.23]$$

$$C = (D+1)\cdot F^2 + 2D\cdot F\cdot G\cdot sin(\Delta\theta) + D(G^2 + D + 1)\,sin^2(\Delta\theta) \qquad [3.24]$$

$$D = (w_R / w_T)^2 \qquad [3.25]$$

Les variables w_T et w_R représentent respectivement le rayon du faisceau transmis et le rayon du faisceau reçu ; k est la constante de propagation dans le milieu entre les fibres, n_0 l'indice de réfraction de ce milieu, et λ la longueur d'onde du signal. Le paramètre $\Delta\theta$ est l'erreur d'alignement angulaire entre les axes des fibres.

Les paramètres F et G sont directement associés aux erreurs d'alignement latéral (Δx) et longitudinal (Δz), et peuvent être exprimés comme suit :

$$F = 2\cdot\frac{\Delta x}{k\cdot w_T^2} \qquad [3.26]$$

$$G = 2\cdot\frac{\Delta z}{k\cdot w_T^2} \qquad [3.27]$$

Dans le couplage entre fibres, un autre mécanisme intrinsèque de pertes qui n'est pas pris en compte dans l'équation [3.21], est associé à la discontinuité du milieu de propagation. Une réflexion est produite à chaque interface fibre-vide (pertes de Fresnel). Les pertes d'insertion dues à cette double interface peuvent être calculées par :

$$L_{BR} = -10\,log\left\{\frac{16 \cdot n_F^2 \cdot n_0^2}{\left(n_F + n_0\right)^4}\right\} \quad dB \qquad [3.28]$$

où n_F et n_0 sont respectivement les indices de réfraction du cœur de la fibre et du milieu entre les fibres. Les pertes de Fresnel pour le cas d'une liaison à fibres monomode avec un indice de réfraction typique de 1,47 sont de 0,32 dB. Les pertes de Fresnel sont minimisées en utilisant un gel pour uniformiser les indices de réfraction dans l'interface, ou bien avec l'utilisation de couches anti-réflectives déposées sur les terminaux des fibres. Les équations [3.21] et [3.28] peuvent être additionnées pour le calcul des pertes totales dues aux erreurs d'alignement, à la différence géométrique entre les fibres et à la réflexion à l'interface. Dans ce chapitre, nous supposons que les fibres sont identiques, et que les pertes de Fresnel sont minimisées au moyen de couches anti-réflectives. Nous allons donc nous concentrer sur les erreurs d'alignement des fibres et les limitations imposées à la mise en boîtier des commutateurs.

En utilisant les équations [3.21] à [3.28], nous présentons une analyse du couplage dans une liaison entre fibres SMF-28™ de Corning® [COR 01]. Ces fibres peuvent être utilisées pour la transmission de signaux de 1,3 µm et 1,55 µm, et les diamètres des faisceaux sont respectivement de 9,2 µm et de 10,4 µm. D'après l'information technique de la fibre, les indices de réfraction sont 1,4677 et 1,4682, respectivement à 1,3 µm et à 1,55 µm.

Dans la Figure 3.7, nous montrons les pertes d'insertion dues à la séparation longitudinale entre les fibres. On suppose pour l'instant que les fibres sont parfaitement alignées aussi bien latéralement qu'angulairement. Les pertes d'insertion augmentent soit en réduisant le rayon du faisceau, soit en augmentant la longueur d'onde. Dans le cas présent, le rayon du faisceau joue le rôle prédominant. On observe que pour maintenir les pertes d'insertion en dessous de 2,5 dB, la séparation entre les fibres doit être inférieure à 80 µm. Cette distance de l'ordre de quelques dizaines de microns est trop petite et représente un sérieux problème même pour les commutateurs micro-usinés.

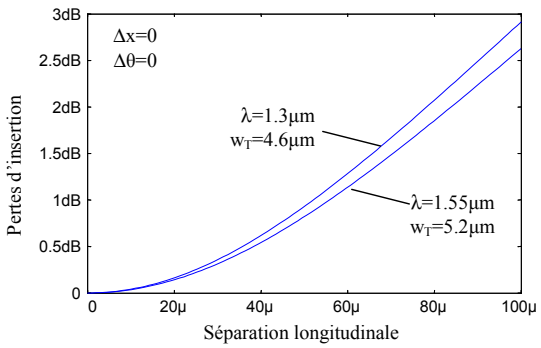


Figure 3.7. Pertes d'insertion dans une liaison entre fibres monomodes dues à la séparation entre les fibres.

Typiquement, les erreurs d'alignement latéral et angulaire sont présentes simultanément dans les liaisons entre les fibres. Leurs effets sur les pertes d'insertion peuvent être représentés par un ensemble de lignes de contour, chacune associée à un niveau de pertes spécifique. A partir de l'équation [3.21], nous avons calculé les abaques représentés sur la Figure 3.8. Nous observons qu'une tolérance légèrement plus grande au positionnement latéral est possible pour le cas où la longueur d'onde est de 1,55 µm [voir Figure 3.8(b)] ; ceci est principalement le résultat d'un rayon de faisceau plus large. Concernant les tolérances sur le positionnement angulaire, les incréments sur la longueur d'onde et sur le rayon du faisceau ont des effets opposés ; dans ce cas, la plus grande tolérance observée dans la Figure 3.8(b) est la conséquence d'une plus grande longueur d'onde.

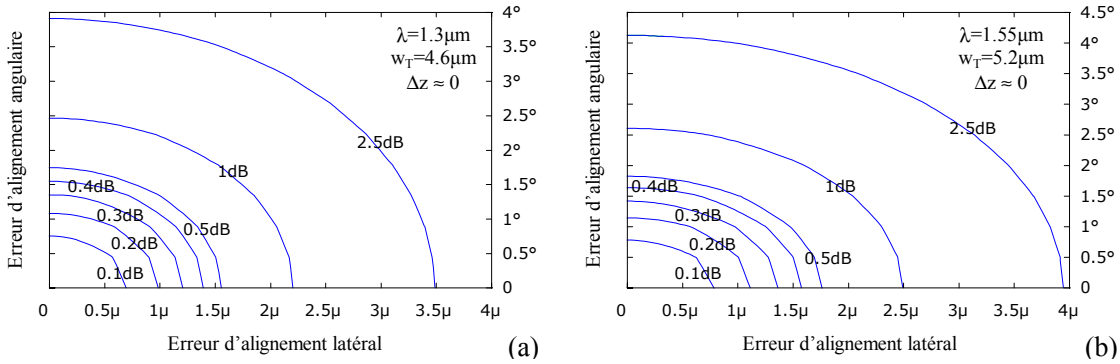


Figure 3.8. Lignes de contour à pertes d'insertion constantes pour $\Delta z \approx 0$: (a) λ=1,3 µm, (b) λ=1,55 µm.

Dans la Figure 3.8, nous avons supposé que la séparation entre les fibres est presque nulle ($\Delta z \approx 0$). Si on augmente la séparation entre les fibres, la tolérance dans les positionnements latéral et angulaire est réduite. Dans la Figure 3.9, on peut observer la tolérance dans le positionnement des fibres pour un niveau de pertes de 2,5 dB, cela pour différentes séparations entre les fibres. A mesure que l'on augmente la séparation entre les fibres, la ligne

de contour à pertes constantes s'approche de l'origine. Quand les fibres sont séparées d'un peu plus de 80 µm, la ligne de contour disparaît, cela signifie que même deux fibres parfaitement alignées possèdent un niveau de pertes d'insertion de plus de 2,5 dB, voir aussi la Figure 3.7.

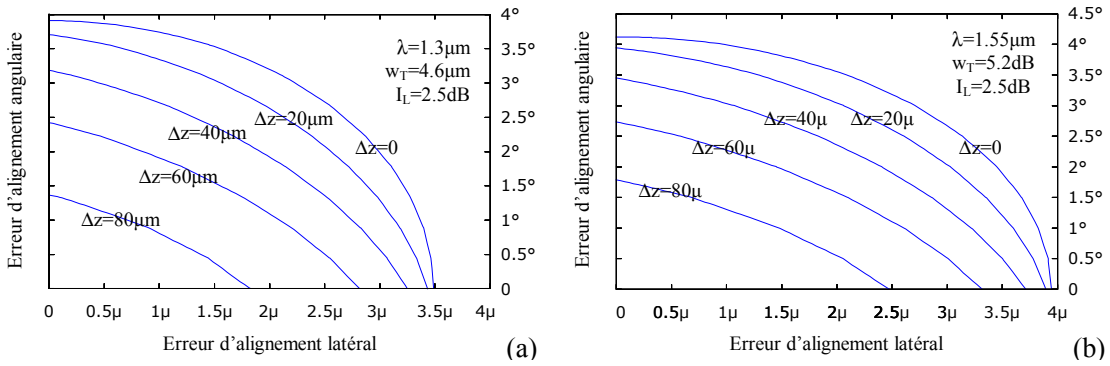


Figure 3.9. Effet de la séparation longitudinale entre les fibres sur les pertes d'insertion.

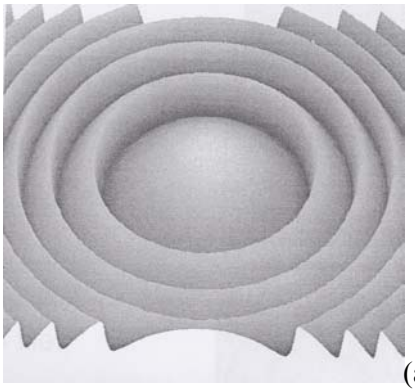
D'après la Figure 3.9, pour maintenir le niveau de pertes d'insertion en dessous de 2,5 dB, on peut accepter des erreurs de positionnement latéral et angulaire relativement grandes (dans l'ordre, respectivement, de 1 µm et 1°) seulement si la séparation entre les fibres est limitée à quelques dizaines de microns. Malheureusement, cette distance si petite limite aussi les applications possibles : atténuateurs variables ou commutateurs optiques de 2×2. On peut concevoir un atténuateur variable constitué principalement par une plaque micro-usinée qui s'introduit partiellement entre les fibres pour ajuster le niveau d'atténuation [BIS 99]. Dans le cas d'un commutateur 2×2, quatre fibres peuvent être placées sur un plan commun avec des séparations angulaires de 90°, et un miroir micro-usiné placé entre les fibres pourrait servir à reconfigurer le réseau [MAR 99]. Cependant, dans cette application, les extrémités des fibres doivent être élaborées avec des formes coniques pour leur permettre de se rapprocher. Dans le cas contraire, une séparation minimale de 125 µm (diamètre de la gaine des fibres) serait nécessaire compte tenu des limitations géométriques.

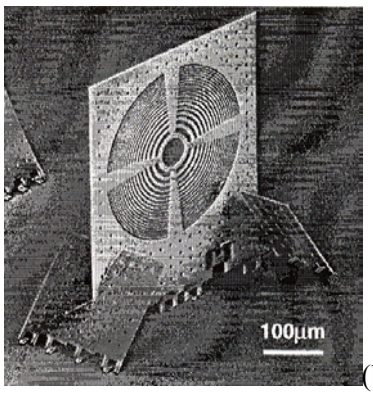
3.3.2. *Collimateurs*

La conception de commutateurs avec des dizaines (voire des centaines) de ports nécessite d'écarter les fibres de plusieurs millimètres ou de plusieurs centimètres. Afin d'augmenter la distance de séparation en gardant les pertes d'insertion à des niveaux acceptables (§ 1.2.3), il faut utiliser des collimateurs pour limiter la divergence des faisceaux. Nous allons présenter plusieurs types de collimateurs applicables dans les commutateurs micro-usinés.

3.3.2.1. Lentilles diffractives micro-usinées

La Figure 3.13 illustre deux lentilles diffractives, la première avec un profil continu, la deuxième avec un profil discret.


(a)



(b)

Figure 3.10. Lentilles diffractives : à profil continu [HER 98], à profil discret [WU 97].

Les lentilles à profils continus possèdent une efficacité de diffraction de 100 %, cependant ces composants sont plus difficiles à fabriquer [HER 98]. Au contraire, les lentilles à profil multi-niveaux sont compatibles avec les procédés de fabrication utilisant la lithographie. Les lentilles de Fresnel avec leurs zones de transmission et de blocage (profil binaire) sont très faciles à fabriquer et peuvent être potentiellement incorporées dans la même puce contenant une matrice de miroirs [LIN 98]. Malheureusement, l'efficacité de diffraction de ces éléments est, en théorie, de l'ordre de 10 % [WU 97]. L'efficacité de la diffraction peut être améliorée en augmentant le nombre de niveaux de déphasage, mais cela signifie aussi une augmentation du nombre d'étapes de lithographie. L'efficacité de la diffraction peut être exprimée en fonction du nombre de niveaux de déphasage M comme suit [WU 97] HER 98] :

$$\eta = \left[\frac{sin(\pi/M)}{(\pi/M)} \right]^2 \qquad [3.29]$$

D'après l'équation [3.29], l'efficacité est égale à 95 % pour M=8 et 99 % pour M=16. Entre les inconvénients des lentilles diffractives, on peut mentionner celui de la variation de la longueur focale en fonction de la longueur d'onde.

3.3.2.2. Lentilles réfractives micro-usinées

La Figure 3.11 illustre une matrice des lentilles réfractives micro-usinées.

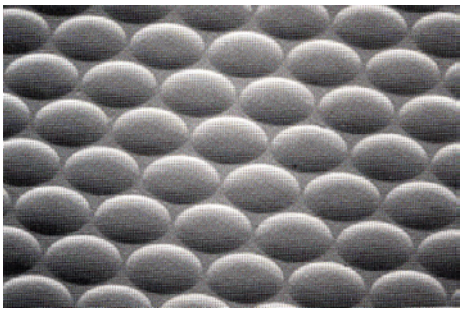


Figure 3.11. Lentilles réfractives [STE 98].

Contrairement aux lentilles diffractives, les foyers des lentilles réfractives sont insensibles à la longueur d'onde. Par ailleurs, une bonne efficacité de transmission est plus facile à obtenir. Concernant la fabrication, le micro-usinage en surface peut être utilisé pour former un support. La lentille est ensuite fabriquée par dépôt de résine, suivi du traitement thermique qui permet de fondre et de resolidifier la résine sous une forme sphérique [KIN 96].

3.3.2.3. Lentilles fabriquées par lithographie directement sur la fibre

L'utilisation de lentilles individuelles ou bien de matrices de lentilles (réfractives ou diffractives) nécessite des procédés d'alignement additionnels lors de la fabrication des commutateurs. A présent, des techniques spécifiques pour fabriquer des lentilles directement sur l'extrémité des fibres sont à l'étude. Par exemple, une couche de résine peut être déposée et gravée directement sur la fibre (voir Figure 3.12).

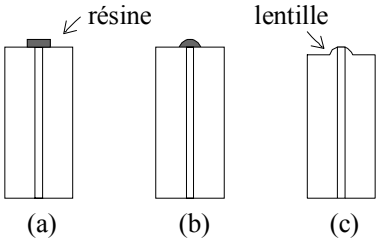


Figure 3.12. Lentilles réfractives fabriquées directement sur la fibre : (a) après le dépôt et la gravure d'une couche de résine, (b) après une étape de recuit, (c) après une étape de gravure sèche [SAS 00].

3.3.2.4. Lentilles à gradient d'indice

Traditionnellement, les lentilles à gradient d'indice[39] ont été utilisées comme collimateurs aussi bien pour les fibres multimodes que monomodes [TOM 80] [SAK 92] ; ces composants sont facilement adaptés aux fibres (voir Figure 3.13).

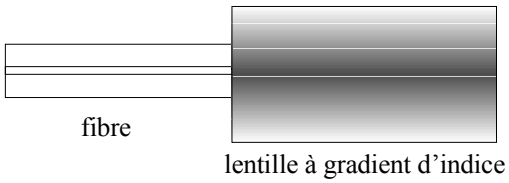


Figure 3.13. Lentille à gradient d'indice.

Un collimateur à gradient d'indice est une lentille de forme cylindrique où l'indice de réfraction diminue de manière quadratique à partir de sa valeur maximale (que l'on trouve sur l'axe). L'indice de réfraction peux s'exprimer comme suit :

$$n(r) = n_C\left(1 - \frac{Ar^2}{2}\right) \qquad [3.30]$$

où n_C est la valeur de l'indice de réfraction sur l'axe et $\sqrt{A}$ la constante du gradient. En utilisant la règle ABCD (équation [3.17]), on peut démontrer qu'un faisceau gaussien avec un rayon minimal w_I et un rayon de courbure infini (comme celui provenant d'une fibre monomode) est transformé par une lentille à gradient d'indice type « quarter pitch » en un autre faisceau gaussien avec un rayon minimal w_O et un rayon de courbure infini [YUA 99]. La relation entre les rayons des faisceaux d'entrée et de sortie du collimateur peut s'exprimer comme suit :

$$w_O = \frac{\lambda}{\pi \cdot n_C \cdot w_I \cdot n_o \cdot \sqrt{A}} \qquad [3.31]$$

où n_O est l'indice de réfraction dans le milieu autour de la lentille collimatrice, et λ la longueur d'onde du signal. L'équation [3.31] montre que le rayon minimal du faisceau à transmettre peut être ajusté en choisissant les paramètres n_C et $\sqrt{A}$.

La fabrication de lentilles diffractives ou réfractives dans la même puce que les miroirs, et la fabrication de lentilles directement sur les fibres, sont des techniques très prometteuses pour une miniaturisation additionnelle des commutateurs optiques. A présent, les procédés de

[39] En anglais GRIN : *GRaded INdex*.

fabrication spécifiques, ainsi que les niveaux des pertes d'insertion limitent l'application de ces techniques. D'autre part, des fibres monomodes collimatées par lentilles à gradient d'indice de haute qualité sont disponibles. Nous allons utiliser ce type de collimateur dans les analyses qui suivent.

3.3.3. *Couplage de fibres monomodes avec lentilles à gradient d'indice*

La Figure 3.14 illustre une liaison optique entre deux fibres monomodes utilisant des collimateurs à gradient d'indice. Les paramètres Δx, Δz et $\Delta\theta$ représentent respectivement l'erreur d'alignement latéral, la séparation entre les collimateurs, et l'erreur d'alignement angulaire.

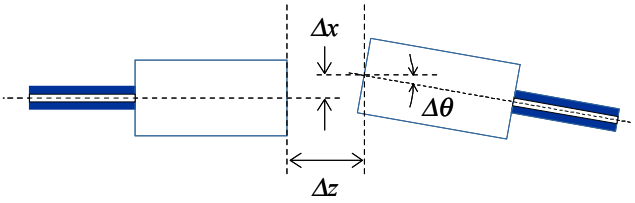


Figure 3.14. Couplage de fibres monomodes en utilisant des lentilles à gradient d'indice.

Le modèle de couplage entre les fibres monomodes présenté par Nemoto et Makimoto [NEM 79] a été étendu par Yuan et Riza [YUA 99], qui ont démontré la validité de l'équation [3.21] dans les liaisons optiques utilisant des lentilles à gradient d'indice. Dans les équations [3.21] à [3.27], w_T représente maintenant le rayon du faisceau sur le plan de sortie du collimateur, et w_R le rayon du mode fondamental couplé sur la lentille réceptrice.

Nous allons maintenant analyser l'effet des collimateurs à gradient d'indice sur la tolérance dans le positionnement des fibres. Nous supposons l'utilisation de lentilles où les rayons des faisceaux de transmission sont de 100 µm, 150 µm, 200 µm et 250 µm. Nous supposons aussi que ces lentilles sont adaptées aux fibres SMF-28™ de Corning® [COR 01]. Pour le cas d'alignements latéral et angulaire parfaits, nous avons évalué (à partir de l'équation [3.21]) les pertes d'insertion comme une fonction de la séparation longitudinale ; les résultats sont montrés sur la Figure 3.15.

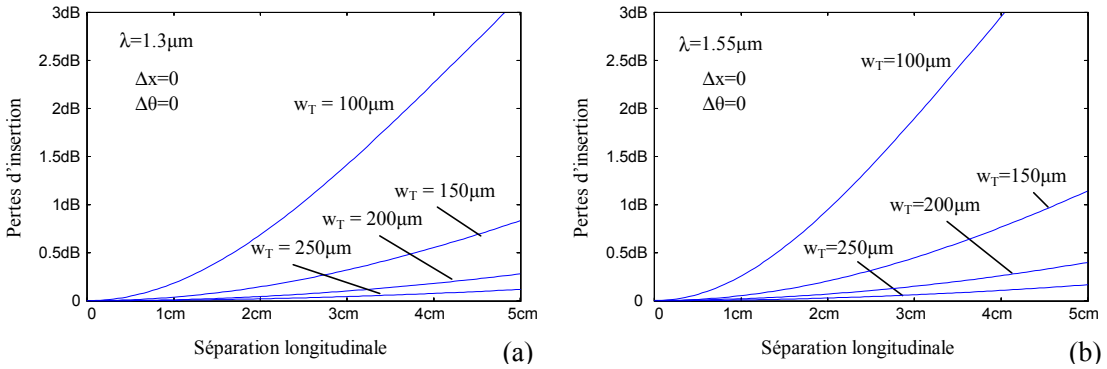


Figure 3.15. Pertes d'insertion dans une liaison entre fibres monomodes collimatées par des lentilles à gradient d'indice en fonction de la séparation entre les fibres et de la taille du faisceau : (a) λ=1,3 µm, (b) λ=1,55 µm.

Pour une distance de séparation fixe, si on augmente le rayon du faisceau de transmission, les pertes d'insertion diminuent. Pour un faisceau de transmission de 100 µm, une séparation de plus de 3 cm est disponible (aussi bien pour le cas de λ=1,3 µm que pour le cas λ=1,55 µm) avant d'atteindre un niveau de pertes de 2,5 dB ; si nous utilisons les faisceaux de 150 µm, 200 µm ou 250 µm, la distance de séparation possible est beaucoup plus grande.

Dans la Figure 3.15, on observe aussi que le niveau des pertes est fonction de la longueur d'onde. Plus grande est la longueur d'onde, plus élevé est le niveau des pertes, cela est dû à une plus grande divergence du faisceau (voir équation [3.12]).

Dans la Figure 3.16, on montre les lignes de contour pour différents niveaux de pertes, cela en supposant un faisceau de transmission de 100 µm. En comparant la Figure 3.8 et la Figure 3.16, nous observons que la tolérance du positionnement latéral est passée de quelques microns à quelques dizaines de microns. D'autre part, la tolérance du positionnement angulaire a baissé de quelques degrés à quelques dixièmes de degré.

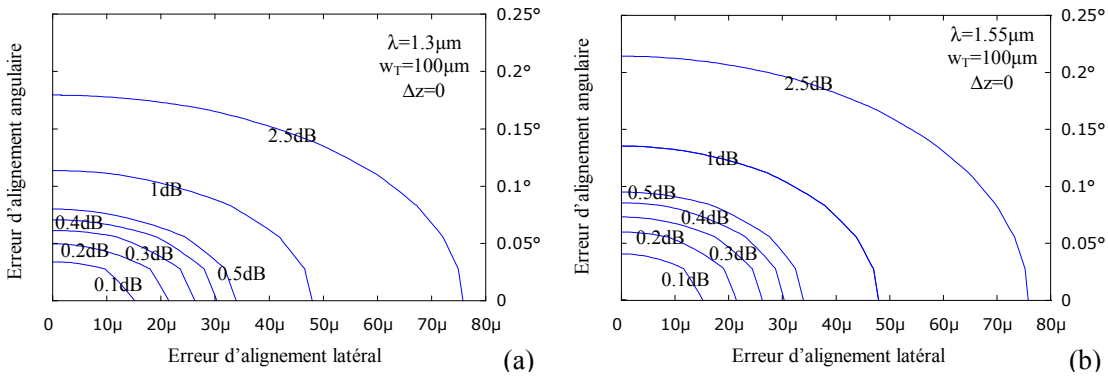


Figure 3.16. Lignes de contour à pertes d'insertion constantes pour une séparation négligeable entre les lentilles et pour un rayon du faisceau transmis de 100 µm : (a) λ=1,3 µm, (b) λ =1,55 µm.

Dans la Figure 3.17, on montre les lignes de contour pour différents niveaux de pertes, cette fois pour un faisceau de transmission de 250 µm. On observe que les tolérances latérale et angulaire ont respectivement augmenté et diminué par rapport à la Figure 3.16.

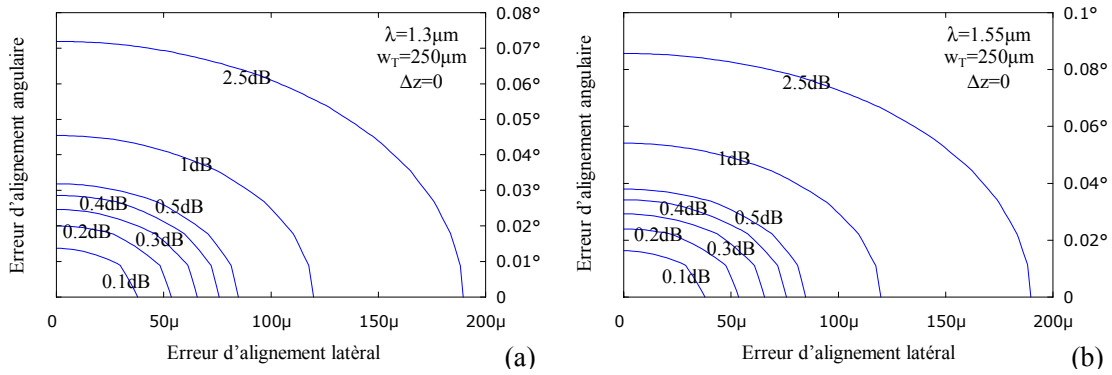


Figure 3.17. Lignes de contour à pertes d'insertion constantes pour une séparation négligeable entre les lentilles et pour un rayon du faisceau transmis de 250 µm : (a) λ=1,3 µm, (b) λ =1,55 µm.

Les résultats montrés dans la Figure 3.16 et la Figure 3.17 supposent que la distance entre les lentilles est négligeable. Autant que pour le cas du couplage direct entre les fibres, l'accroissement de la séparation longitudinale doit être lié à de meilleurs positionnements latéral et angulaire des fibres, cela pour maintenir le même niveau des pertes d'insertion. La Figure 3.18 montre l'effet de la distance de séparation sur les pertes d'insertion pour un faisceau de transmission de 100 µm.

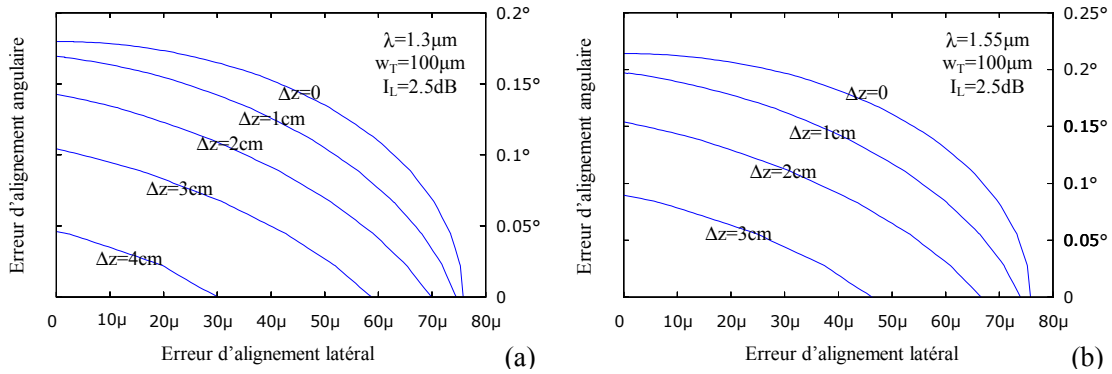


Figure 3.18. Accroissement de l'exactitude du positionnement nécessaire en fonction de la distance de séparation : (a) 1,3 µm, (b) 1,55 µm.

En tenant compte des bas niveaux de pertes acceptables par les réseaux optiques, et à partir de l'information présentée dans cette partie, il semble inévitable d'utiliser des lentilles collimatrices pour les commutateurs optiques avec de multiples ports d'entrée et de sortie. Il faut signaler que même si les pertes d'insertion peuvent éventuellement être compensées par

des étapes d'amplification, cette compensation est limitée par le fait que chaque étape d'atténuation-amplification est associée à une dégradation des signaux (§ 1.1.1). Il faut aussi signaler que l'utilisation de collimateurs à gradient d'indice relâche la tolérance dans le positionnement latéral des fibres mais demande une plus grande exactitude dans le positionnement angulaire.

3.4. Pertes d'insertion dans les commutateurs optiques dues aux imperfections des miroirs

3.4.1. *Taille du miroir*

Le faisceau gaussien de l'équation [3.20] nécessite, en théorie, un miroir infini pour être totalement défléchi. Dans la pratique, la puissance réfléchie par un miroir de taille finie peut être calculée par intégration de l'équation [3.20] sur la surface entière du miroir. A partir de la puissance, les pertes d'insertion sont calculées et le résultat exprimé en décibels:

$$L_M = -10 log\left\{1 - e^{-2a^2/w_m^2}\right\}\ dB \qquad [3.32]$$

où a est le rayon du miroir et w_m le rayon du faisceau sur le plan du miroir. Pour un rayon du miroir égal au rayon du faisceau, des pertes d'insertion de 0,63 dB sont introduites. Pour un rayon du miroir 50 % plus grand que le rayon du faisceau, le niveau de pertes est seulement de 0,05 dB.

Un problème plus sérieux que celui de calculer les pertes d'insertion sur le plan du miroir est celui de modéliser la propagation du faisceau entre le miroir et la fibre de sortie. Cela est dû au fait que le faisceau réfléchi n'est plus un faisceau gaussien. Les pertes d'insertion ne peuvent donc être calculées par l'équation [3.21].

Un fait connu est qu'un faisceau gaussien légèrement taillé devient de nouveau un faisceau gaussien dans le champ distant. Des expressions analytiques pour la propagation d'un tel faisceau ont été obtenues notamment par Belland et al. [BEL 82]. Malheureusement, dans le cas des commutateurs micro-usinés, la sévérité d'écrêtage des faisceaux ainsi que la faible séparation entre les composants rendent inexacte l'application de cette théorie. Une méthode de propagation qui prend en compte la diffraction devient donc nécessaire comme nous le montrerons au § 3.5.

3.4.2. *Position angulaire du miroir*

Dans un commutateur réel, les miroirs ne sont pas parfaitement alignés avec les fibres. Il y a par exemple des erreurs angulaires provenant des jeux dans les microstructures. Même dans les systèmes en boucle fermée pour corriger de manière dynamique les erreurs d'alignement, la correction n'est pas parfaite. L'exactitude du capteur et la résolution du mécanisme actionneur déterminent l'exactitude dans le positionnement du miroir. Il est donc important de comprendre comment les erreurs d'alignement du miroir affectent le couplage optique.

Considérons un faisceau, provenant d'une fibre d'entrée, qui se propage sur le plan *x-y* en faisant nominalement un angle de 45° avec les axes *x* et *y* (direction $\hat{a}_I$ dans la Figure 3.19). Un miroir placé sur le plan *x-z* réfléchit le faisceau vers la direction $\hat{a}_R$, qui coïncide avec l'axe d'une fibre de sortie. Imaginons que le miroir présente une erreur de positionnement angulaire ; c'est à dire, il ne se trouve pas exactement sur le plan *x-z* mais il passe encore par l'origine du système cartésien de la Figure 3.19.

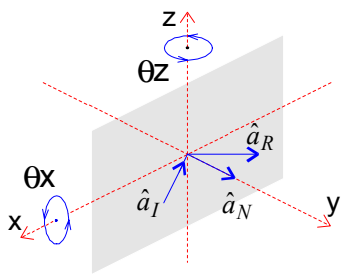


Figure 3.19. Le plan d'un miroir qui montre les vecteurs d'incidence et de réflexion ainsi que les différentes erreurs de rotation.

Le problème peut se séparer en deux parties, en définissant deux erreurs de rotation différentes (θ_X et θ_Z). Dans les deux cas, pour de faibles erreurs d'alignement, il y a une légère réduction dans la surface effective du miroir ; un effet qui sera négligé dans cette analyse. Un problème plus important à considérer est le fait que les faisceaux réfléchis ne sont pas coïncidents avec les axes des fibres.

En relation avec la Figure 3.19, on suppose d'abord que l'orientation du miroir possède seulement une erreur du type θ_Z. Dans ce cas, le vecteur perpendiculaire au miroir et le vecteur parallèle à l'axe *y* forment un angle θ_Z. Par conséquent, le faisceau réfléchi et l'axe de la fibre réceptrice forment un angle :

$$\gamma_I = 2\theta_z \qquad [3.33]$$

Dans le cas d'une erreur angulaire du type θ_X, l'analyse n'est pas aussi simple que pour le cas précédent ; nous avons obtenu la direction du faisceau réfléchi en appliquant la loi de réflexion :

$$(\hat{a}_R - \hat{a}_I) \times \hat{a}_N = 0 \qquad [3.34]$$

avec:

$$\hat{a}_N = cos(\theta_x)\hat{a}_y + sin(\theta_x)\hat{a}_z \qquad [3.35]$$

On a finalement calculé l'angle entre le faisceau réfléchi et l'axe de la fibre réceptrice :

$$\gamma_2 = cos^{-1}\left(cos^2 \theta_x\right) \qquad [3.36]$$

qui peut être simplifié pour le cas de petites erreurs angulaires (en utilisant les séries de Maclaurin) :

$$\gamma_2 = \sqrt{2}\theta_x \qquad [3.37]$$

Les effets des erreurs angulaires γ_1 et γ_2 peuvent être calculés directement à partir de l'équation [3.23]. La grande sensibilité des pertes d'insertion aux erreurs angulaires demande impérativement le contrôle dynamique de la position du miroir pour les commutateurs à grand nombre de ports, cela pour maintenir les pertes d'insertion des commutateurs en dessous d'une limite supérieure acceptable.

3.4.3. *Facteur de réflexion du matériau*

Idéalement, un miroir doit réfléchir 100 % de la puissance incidente, et cela indépendamment de la longueur d'onde, de la polarisation et de l'angle d'incidence. Dans la pratique, ces caractéristiques sont seulement approchées. Dans les miroirs micro-usinés, typiquement, des couches d'aluminium ou d'or sont déposées sur des couches jouant un rôle purement mécanique, cela en vue d'améliorer le facteur de réflexion.

Une couche d'or de plus de 80 nm d'épaisseur possède un coefficient de réflexion de 97,5 % pour une longueur d'onde de 1,3 µm et pour un angle d'incidence de 90°. La même couche présente une sensibilité de 0,9 % à la polarisation du signal incident pour une longueur d'onde de 1,3 µm et pour un angle d'incidence de 45° [MAR 99]. D'autre part, une couche d'aluminium de plus de 50 nm d'épaisseur possède un facteur de réflexion de 97 % (pour

λ=1,3 µm et pour un angle d'incidence de 90°), et une sensibilité à la polarisation de 1,1 % (pour λ=1,3 µm et pour un angle d'incidence de 45°).

3.4.4. *Dépôt non-planaire des couches structurelles formant le miroir*

Dans la fabrication des miroirs, une étape technologique particulièrement importante est l'aplanissement[40], après le dépôt, des couches sacrificielles. Cela évite le transfert du relief des couches inférieures vers les couches supérieures, particulièrement vers la surface du réflecteur. Quand l'aplanissement des couches sacrificielles n'est pas envisageable (§ 6.3), la conception des composants optiques devient plus difficile, pour éviter les irrégularités sur la surface des miroirs, qui par leur présence augmenteraient les pertes d'insertion et la diaphonie intercanaux.

3.4.5. *Courbure du miroir*

Un autre problème non-négligeable des miroirs micro-usinés concerne la contrainte mécanique résiduelle. Normalement, un miroir est fabriqué par superposition d'une couche mécanique et d'une couche avec un bon coefficient de réflexion, par exemple une couche de silicium polycristallin et une couche d'or. La contrainte mécanique résiduelle se manifeste après la gravure de la couche sacrificielle en produisant une courbure et autres déformations dans les miroirs (§ 6.3). Ce problème n'est pas contrôlable par le concepteur du système, et concerne le concepteur du procédé de fabrication. Par exemple, des traitements post dépôt de recuit à haute température peuvent être utilisés pour minimiser la contrainte mécanique résiduelle.

3.4.6. *Diffusion sur la surface*

La rugosité de la surface des miroirs produit la diffusion[41] de la lumière incidente. Si on assume une distribution gaussienne pour la hauteur de la surface, les pertes d'insertion dues à ce phénomène peuvent être calculées comme suit [WU 97] :

$$L_S = 10 log\left\{ e^{(4\pi\sigma cos\theta/\lambda)^2} \right\} \; dB, \qquad [3.38]$$

où σ est la rugosité de la surface, θ l'angle d'incidence, et λ la longueur d'onde. Les pertes d'insertion dues à la diffusion sur la surface, pour des longueurs d'onde de 1,3 µm et de 1,55 µm, sont reportées dans la Figure 3.20.

[40] En anglais : planarization.
[41] En anglais : *scattering*.

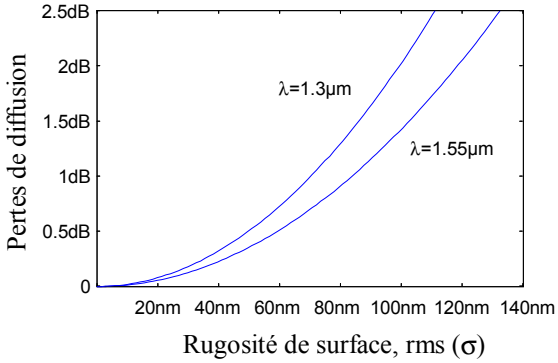
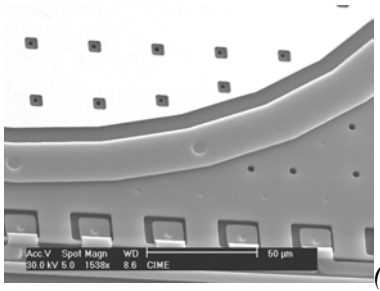


Figure 3.20. Pertes d'insertion dues à la rugosité de la surface.

3.4.7. *Diffraction due aux trous pour la gravure*

Un autre problème des miroirs micro-usinés concerne les trous qui typiquement sont prévus pour faciliter l'attaque chimique pendant la gravure de la couche sacrificielle ; malheureusement, ces perforations réduisent la surface effective du miroir et produisent de la diffraction, voir Figure 3.20.


(a)

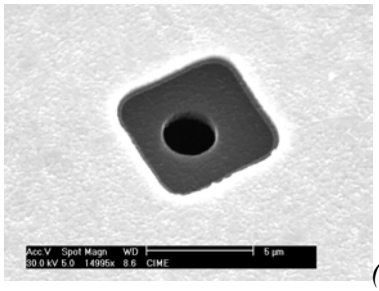

(b)

Figure 3.21. Miroir micro-usiné en surface, technologie MUMPS: (a) vue d'ensemble du réflecteur, (b) vue rapprochée d'un trou.

3.5. Perspectives sur l'application d'une théorie scalaire de diffraction dans la conception de microsystèmes optiques

La modélisation de la propagation de la lumière avec des faisceaux gaussiens traitée dans la partie 3.3 nous a permis une étude analytique et l'estimation des pertes d'insertion dans les commutateurs micro-usinés. Cependant, cette approche ne prend pas en compte l'écrêtage des faisceaux dans les plans des miroirs. Le calcul plus exact des pertes d'insertion nécessite une théorie de la propagation qui prend en compte la diffraction.

Nous explorons dans cette partie, la formulation de Rayleigh-Sommerfeld (§ 3.2.2.2) pour l'analyse de la propagation de la lumière. Nous avons utilisé Chatoyant [LEV 98], un outil de modélisation de systèmes hétérogènes développé à l'Université de Pittsburgh.

La formulation de Rayleigh-Sommerfeld donnée par l'équation [3.18] se trouve parmi les algorithmes de propagation disponibles dans Chatoyant. Le plan de la source ainsi que le plan d'observation sont discrétisés et les résolutions disponibles sont de 48×48, 96×96 et 192×192 points. Nous avons participé à l'évaluation et au raffinement de ces algorithmes. Nous présentons ici quelques exemples de nos simulations.

La Figure 3.22 montre une fibre optique monomode et différents plans d'observation dans l'espace libre. Pour une fibre monomode, l'onde sur l'extrémité de la fibre a une forme quasi-gaussienne avec un rayon de faisceau un peu plus grand que le rayon du cœur de la fibre, et un rayon de courbure des fronts d'onde infini.

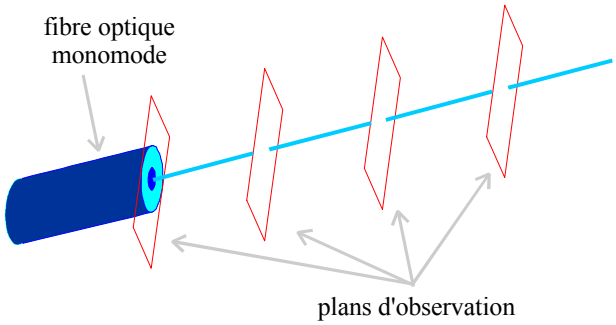


Figure 3.22. Extrémité d'une fibre optique monomode et plusieurs plans d'observation.

La Figure 3.23 montre les signaux obtenus par simulation, à 10 µm, 20 µm, 40 µm et 80 µm de la fibre, nous avons supposé une largeur de faisceau de 10 µm à la sortie de la fibre et une longueur d'onde de 1,55 µm. A mesure que le faisceau se propage dans l'espace libre, la largeur du faisceau et le rayon de courbure des fronts d'onde augmentent.

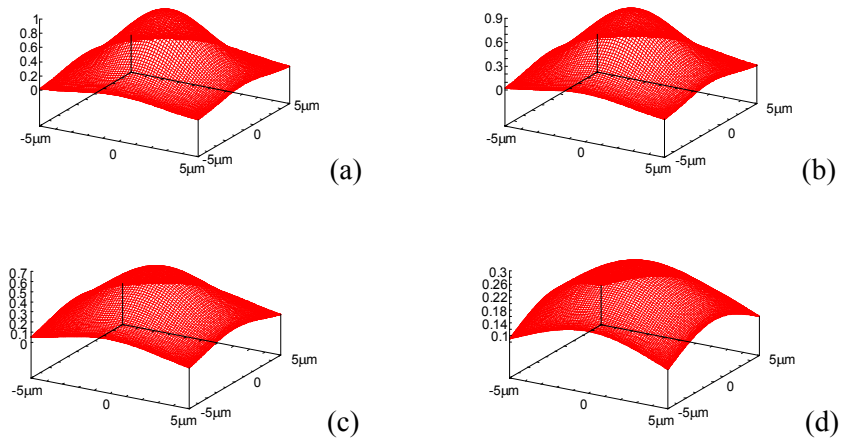


Figure 3.23. Les signaux (a) à 10 µm, (b) à 20 µm, (c) à 40 µm et (d) à 80 µm d'une fibre monomode.

La Figure 3.24 montre deux fibres optiques monomode (largeur de faisceau de 10 µm à la sortie de la fibre et longueur d'onde égale à 1,55 µm), séparées d'une distance Δz. Nous supposons que les fibres sont centrées sur le même axe, c'est à dire, nous considérons que les erreurs d'alignement latéral et angulaire sont négligeables. De nouveau, en utilisant la théorie scalaire de diffraction et l'équation d'efficacité du couplage entre fibres monomode [YUA 99], nous avons obtenu par simulation, la fraction de la puissance qui ayant été transmise par une fibre, arrive à se coupler dans l'autre.

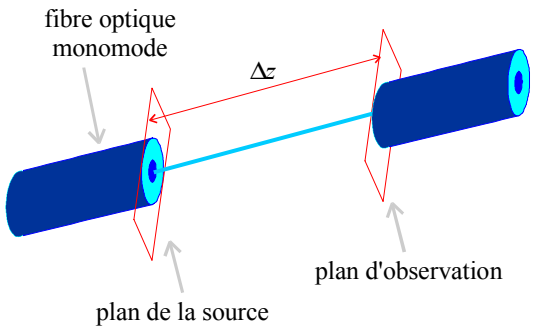


Figure 3.24. Couplage entre deux fibres optiques monomode.

Le Tableau 3.1 montre les coefficients de couplage et les pertes d'insertion pour différentes distances de séparation entre les fibres : 10 µm, 20 µm, 40 µm, 60 µm et 80 µm. Dans le tableau, nous comparons les résultats de la simulation avec les résultats du modèle analytique étudié dans le § 3.3.1.

Δz	$\|\eta\|^2$	Pertes d'insertion (dB)	$\|\eta\|^2$	Pertes d'insertion (dB)
	Modèle Analytique	**Modèle Analytique**	**Simulation**	**Simulation**
0	1	0	-	-
5 µm	0,998	0,0106	0,990	0,0445
10 µm	0,990	0,0421	0,988	0,0533
20 µm	0,963	0,1659	0,961	0,1723
40 µm	0,865	0,6288	0,864	0,6369
60 µm	0,740	1,3050	0,739	1,3136
80 µm	0,616	2,1036	0,615	2,1112

Tableau 3.1. Coefficients de couplage et pertes d'insertion entre deux fibres monomode séparées longitudinalement d'une distance Δz.

Nous avons aussi calculé les pertes d'insertion dans un commutateur optique. Le système de test est constitué par deux fibres collimatées par des lentilles à gradient d'indice. Les fibres sont séparées d'une distance de 3 cm. Par ailleurs, la largeur du faisceau de transmission est de 200 µm, et la longueur d'onde du signal de 1,55 µm. Un miroir circulaire a été placé entre les fibres (à 1,5 cm de chacune).

Nous avons calculé par simulation le coefficient de couplage pour différents diamètres de miroirs : 200 µm, 225 µm et 250 µm. Les résultats sont montrés dans le Tableau 3.2. Nous observons l'accroissement du couplage à mesure que l'on augmente la taille du miroir.

Diamètre du miroir	$\|\eta\|^2$ Simulation	Pertes d'insertion Simulation
200 µm	0,493	3,07 dB
225 µm	0,584	2,34 dB
250 µm	0,645	1,90 dB

Tableau 3.2. Coefficients de couplage et pertes d'insertion pour différents diamètres de miroirs.

La simulation de la propagation optique, en utilisant la formulation de Rayleigh-Sommerfeld, tient compte des effets de diffraction dans les plans des miroirs. Cependant, le temps de simulation des algorithmes est assez long par rapport aux algorithmes associés à l'optique géométrique et à l'optique des faisceaux gaussiens. Les simulations que l'on a présentées ici ont été réalisées sur un PC 800Mhz. Avec une résolution de 48×48 pour le plan de la source et le plan d'observation, le temps de simulation typique a été d'une minute. Pour une résolution de 96×96, le temps de simulation a été de 15 minutes.

3.6. Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons introduit et comparé deux approches de commutateurs optiques : les commutateurs 2D et les commutateurs 3D. La première approche facilite l'intégration monolithique mais le nombre maximal de ports est limité. D'une part, le nombre de miroirs augmente avec le carré du nombre de ports d'entrée. D'autre part, les pertes d'insertion dépendent de manière importante des ports d'entrée et de sortie utilisés par les faisceaux.

L'approche 3D est plus appropriée pour la conception de commutateurs à grand nombre de ports. D'une part, le nombre de miroirs augmente linéairement avec le nombre de ports. D'autre part, les pertes d'insertion sont moins sensibles aux ports d'entrée et de sortie utilisés par les faisceaux.

Nous avons utilisé des faisceaux gaussiens pour modéliser la propagation de la lumière dans les commutateurs optiques, et nous avons calculé les pertes d'insertion dues aux erreurs d'alignement des fibres. Dans le cas de fibres monomodes directement couplées, afin de maintenir des pertes d'insertion en dessous de 2,5 dB, on doit limiter la séparation entre les fibres à moins de 80 μm.

Nous avons étudié plusieurs types de collimateurs. La fabrication de lentilles, diffractives ou réfractives, dans la même puce que les miroirs, ainsi que la fabrication de lentilles directement sur les fibres, sont des techniques très prometteuses pour la miniaturisation des commutateurs optiques. Cependant, les procédés de fabrication sont sophistiqués et la qualité des composants est encore limitée. Par contre, des lentilles à gradient d'indice de haute qualité sont disponibles depuis longtemps. Nous avons opté pour ce dernier type de collimateurs dans nos analyses.

L'expansion des faisceaux au moyen de lentilles à gradient d'indice permet d'augmenter la distance de séparation. En outre, la propagation d'un faisceau plus large dans le commutateur relâche la tolérance dans le positionnement latéral des fibres mais demande une plus grande exactitude dans le positionnement angulaire.

Nous avons aussi examiné les pertes d'insertion dans les commutateurs introduites par les miroirs. Les pertes dues aux erreurs d'alignement peuvent être contrôlées par un système d'asservissement. Par contre, les pertes associées à la courbure ainsi qu'à la rugosité des miroirs sont seulement réduites par l'optimisation des technologies de fabrication.

A la fin du chapitre, nous avons exploré la formulation scalaire de Rayleigh-Sommerfeld pour la modélisation de la propagation de la lumière dans les commutateurs optiques. Nous avons vérifié à travers plusieurs simulations que cette méthode scalaire est applicable à la

modélisation de commutateurs micro-usinés, où les dimensions des miroirs et les distances de séparation sont assez grandes par rapport à la longueur d'onde.

A part la modélisation des commutateurs d'un point de vue optique, les commutateurs à base de miroirs doivent être étudiés d'un point de vue électro-mécanique, un sujet que nous aborderons dans le prochain chapitre.

Bibliographie

[AGR 97] G. P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, 2nd edion, New York : Wiley, 1997.

[AKS 00] V. A. Aksyuk, F. Pardo, C. A. Bolle, S. Arney, C. R. Giles, D. J. Bishop, « Lucent Microstar™ micromirror array technology for large optical crossconnects », in *MOEMS and Miniaturized Systems*, M. E. Motamedi, R. Göring, editors, Proceedings of SPIE, vol. 4178, pp. 320-324, 2000.

[BEL 82] P. Belland, J. P. Crenn, « Changes in the characteristics of a gaussian beam weakly diffracted by a circular aperture », *Applied Optics*, vol. 21, pp. 522-527, 1982.

[BIS 99] D. J. Bishop, V. A. Aksyuk, « Optical MEMS answer high-speed networking requirements », *Electronic Design*, pp. 85-92, april 5th, 1999.

[BOR 99] M. Born, E. Wolf, *Principles of Optics*, Cambridge : Cambridge University Press, 7th edition, 1999.

[COR 01] Telecommunications Product Division, Corning Inc., « Corning® single-mode optical fiber, product information PI1036 on SMF-28™ fiber », http://www.corning.com/, 2001.

[CUS 98] C. DeCusatis, E. Maass, D. P. Clement, R. C. Lasky, Editors, *Handbook of Fiber Optic Data Communication*, San Diego : Academic Press, 1998.

[GOO 96] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*, New York : Mc Graw Hill, 1996.

[HER 98] H. P. Herzig, « Design of refractive and diffractive micro-optics », *in Micro-optics – elements, systems and applications, H.P. Herzig, editor*, London : Taylor and Francis, pp. 1-29, 1998.

[JUA 98] W. –H. Juan, S. W. Pang, « High-aspect-ratio Si vertical micromirror arrays for optical switching », *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 7, pp. 207-213, 1998.

[KER 01a] K. Bergam, N. Bonadeo, I. Brener, K. Chiang, « Ultra-high capacity MEMS based optical cross-connects », in *Design, Test, Integration, and Packaging of MEMS/MOEMS*, *DTIP'01*, Bernard Courtois, Jean Michel Karam, Steven P. Levitan, Karen W. Markus, Andrew A. O. Tay, James A. Walker, editors, Proceedings of SPIE vol. 4408, pp. 2-5, 2001.

[KER 01b] K. Bergam, communication personnelle.

[KIN 96] C. R. King, L. Y. Lin, M. C. Wu, « Out-of-plane refractive microlens fabricated by surface micromachining », *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 8, no. 10, pp. 1349-1351, 1996.

[LEV 98] S. P. Levitan, T. P. Kurzweg, P. J. Marchand, M. A. Rempel, D. M. Chiarulli, J. A. Martinez, J. M. Bridgen, C. Fan, F. B. McCormick, « Chatoyant: a computer-aided-design tool for free-space optoelectronic systems », *Applied Optics*, vol. 37, no. 26, pp. 6078-6092, 1998.

[LEV 01] S. Levitan, communication personnelle.

[LIN 98] L. Y. Lin, E. L. Goldstein, R. W. Tkach, « Free-space micromachined optical switches with submillisecond switching time for large-scale optical crossconnects », *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 10, no. 4, pp. 525-527, 1998.

[MAR 99] C. Marxer, N. F. de Rooij, « Micro-opto-mechanical 2x2 switch for single-mode fibers based on plasma-etched silicon mirrors and electrostatic actuation », *Journal of Lightwave Technology*, vol. 17, pp. 2-6, 1999.

[MAR 01] S. Martinez, B. Courtois, « Insertion losses in micromachined free-space optical cross-connects due to fiber misalignments », in *Design, Test, Integration, and Packaging of MEMS/MOEMS*, *DTIP'01*, Bernard Courtois, Jean Michel Karam, Steven P. Levitan, Karen W. Markus, Andrew A. O. Tay, James A. Walker, editors, Proceedings of SPIE vol. 4408, pp. 289-300, 2001.

[NEM 79] S. Nemoto, T. Makimoto, « Analysis of splice loss in single-mode fibers using a gaussian field approximation », *Optical and Quantum Electronics*, vol. 11, pp. 447-457, 1979.

[OMM 02] OMM, « 32x32 photonic switch data sheet », http://www.omminc.com/, 2002.

[PER 00] J. –P. Pérez, *Optique – Fondements et Applications*, Paris : Dunod, 6ème édition, 2000.

[SAL 91] B. E. A. Saleh, M. C. Teich, *Fundamentals of Photonics*, New York : John Wiley & Sons, 1991.

[SAK 92] T. Sakamoto, « Coupling characteristics analysis of single-mode and multimode optical-fiber connectors using gradient-index-rod lenses », *Applied Optics*, vol. 31, pp. 5184-5190, 1992.

[SAS 00] M. Sasaki, S. Nogawa, K. Hane, « Direct photolithography on optical fiber », *Optical MEMS 2000*, pp. 149-150, 2000.

[STE 98] M. B. Stern, « Binary Optics Fabrication », *in Micro-optics – elements, systems and applications, H.P. Herzig, editor*, London : Taylor and Francis, pp. 53-85, 1998.

[TOM 80] W. J. Tomlinson, « Application of Grin-Rod Lenses in Optical Fiber Communication Systems », *Applied Optics*, vol. 19, pp. 1127-1138, 1980.

[WU 97] M. C. Wu, « Micromachining for optical and optoelectronic systems », *Proceedings of the IEEE*, vol. 85, no. 11, pp. 1833-1856, 1997.

[YUA 99] S. Yuan, N. A. Riza, « General formula for coupling-loss characterization of single-mode fiber collimators by use of gradient-index rod lenses », *Applied Optics*, vol. 38, pp. 3214-3222, 1999.

Chapitre 4

Modélisation d'actionneurs électrostatiques micro-usinés

Ce chapitre constituera une étude comparative sur les actionneurs électrostatiques en se focalisant sur les dispositifs qui peuvent être fabriqués par les techniques de micro-usinage. Par couplage des formulations électrostatique et mécanique, nous obtiendrons des modèles analytiques statiques pour plusieurs actionneurs applicables dans la conception des commutateurs optiques.

La partie 4.1 survolera les familles d'actionneurs thermiques, magnétiques et électrostatiques, afin de reconnaître les avantages actuels des dispositifs électrostatiques. Par la suite, la partie 4.2 synthétisera les modèles de déflection et de torsion des poutres rectangulaires étant donnée la fréquente utilisation de ces éléments dans la conception d'actionneurs électrostatiques.

Dans les parties 4.3 à 4.5, nous étudierons trois familles d'actionneurs à base d'électrodes plates, chacune caractérisée par le type de mouvement de l'électrode mobile : mouvement linéaire transversal, mouvement linéaire latéral, mouvement circulaire.

La partie 4.6 abordera les autres familles d'actionneurs électrostatiques : les moteurs rotatifs, les vibro-moteurs linéaires, les actionneurs à interactions de contact, ainsi que les dispositifs qui utilisent des structures mécaniques précontraintes. Pour ces derniers, nous obtiendrons un modèle analytique qui sera utilisé ultérieurement, dans le chapitre 5, lors de la cosimulation d'un commutateur.

Dans la partie 4.7, nous aborderons la simulation couplée électrostatique-structurelle. Finalement, nous apporterons nos conclusions dans la partie 4.8.

4.1. Actionneurs micro-usinés

Les actionneurs micro-usinés sont assez divers, les plus nombreux sont de type thermique, magnétique ou électrostatique [SNI 95] [FUJ 98] [TIE 00]. Dans cette partie, nous analysons et comparons ces trois familles d'actionneurs en vue de leur application dans les commutateurs optiques.

4.1.1. *Actionneurs thermiques*

Les actionneurs thermiques peuvent être classés en deux catégories. Dans une première catégorie, nous trouvons les dispositifs utilisant les différents coefficients de dilatation entre deux matériaux qui sont en contact et chauffés à une certaine température. Dans une deuxième catégorie, on trouve les dispositifs utilisant un gradient de température dans une structure asymétrique fabriquée à partir d'un seul matériau. Dans les deux cas, un courant électrique est typiquement utilisé pour établir la température ou le gradient de température désirés.

La Figure 4.1 illustre les deux principaux types d'actionneurs thermiques. La Figure 4.1(a) schématise une poutre fabriquée en technologie CMOS standard. La poutre est une structure essentiellement composée par deux couches d'oxyde qui présentent des coefficients de dilatation différents. La première couche est formée par oxydation thermique (LOCOS[42]), alors que la deuxième couche est formée par dépôt en phase vapeur (CVD[43]). D'autre part, une résistance chauffante fabriquée en silicium polycristallin placée entre les deux couches d'oxyde introduit la chaleur nécessaire pour défléchir la poutre.

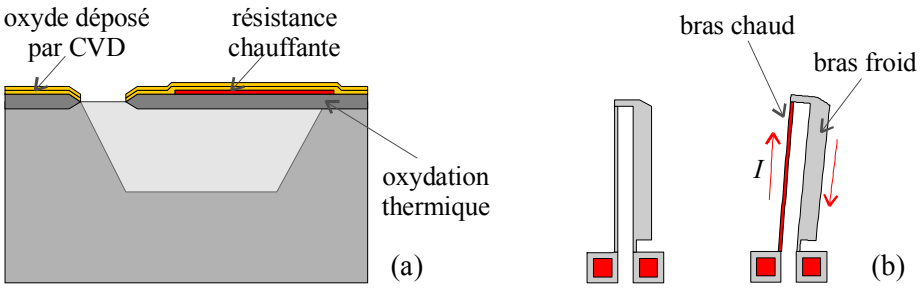


Figure 4.1. Actionneurs thermiques : (a) structure composée, (b) structure asymétrique.

La Figure 4.1(b) schématise une structure asymétrique constituée d'un bras étroit et d'un bras large. Quand le courant *I* passe à travers la structure, le bras étroit dissipe plus de puissance que le bras large, étant donné sa plus grande résistance électrique. Par conséquent, un gradient de température se produit dans la structure. Ainsi, le bras étroit présente une température plus

[42] LOCOS : *Local Oxidation of Silicon.*
[43] CVD : *Chemical Vapor Deposition.*

élevée et une expansion plus grande, ce qui défléchit la structure asymétrique vers la droite. Ce type d'actionneur a été fabriqué en silicium polycristallin par micro-usinage en surface [COM 95], et utilisé pour faire pivoter des miroirs [COM 97]. Les actionneurs thermiques en silicium polycristallin ont été aussi utilisés pour la conception de vibromoteurs linéaires qui à leur tour sont utilisés pour déplacer des miroirs [PAI 99]. Dans ce dernier cas, des vitesses de commutation d'une dizaine de millisecondes sont envisageables [PAI 00].

Les actionneurs thermiques sont généralement plus lents que les mécanismes électrostatiques et magnétiques. Cependant, ces actionneurs sont assez utilisés, d'une part parce qu'ils sont capables de produire de grandes forces, et d'autre part parce que les niveaux de tension de commande nécessaires sont compatibles avec les niveaux utilisés par la microélectronique. En outre, la fabrication d'actionneurs thermiques est compatible avec la fabrication des circuits intégrés.

4.1.2. *Actionneurs magnétiques*

Dans les actionneurs magnétiques, la force est le résultat de l'interaction entre deux champs magnétiques. Par exemple, une poutre ferromagnétique est défléchie par un champ magnétique externe. Si on échange la poutre ferromagnétique par un aimant permanent, des forces d'attraction et de répulsion sont obtenues par le changement de sens du champ magnétique externe.

Un autre mécanisme actionneur est associé à la force de Lorentz. Cette force se présente sur les charges électriques qui se déplacent dans un champ magnétique. Par exemple, si un filament circulaire qui conduit un courant électrique est placé dans un champ magnétique, le champ produit un couple sur le filament. Le couple est généré dans la direction qui permet l'alignement du champ magnétique du filament avec le champ externe. Dans ce cas, le changement de direction de la force peut se faire soit par le changement de sens du champ magnétique externe, soit par le changement de direction du courant électrique dans le filament.

La Figure 4.2 illustre les principes d'opération des actionneurs magnétiques. La Figure 4.2(a) schématise un système contenant une poutre et une bobine. La poutre, à son tour, contient un matériau ferromagnétique (ou un aimant permanent) qui subit une force perpendiculaire au plan de la bobine. La Figure 4.2(b) illustre une boucle de courant dans un champ magnétique externe. Dans ce cas, la boucle subit un couple T_M qui essaie d'aligner son champ magnétique avec le champ externe.

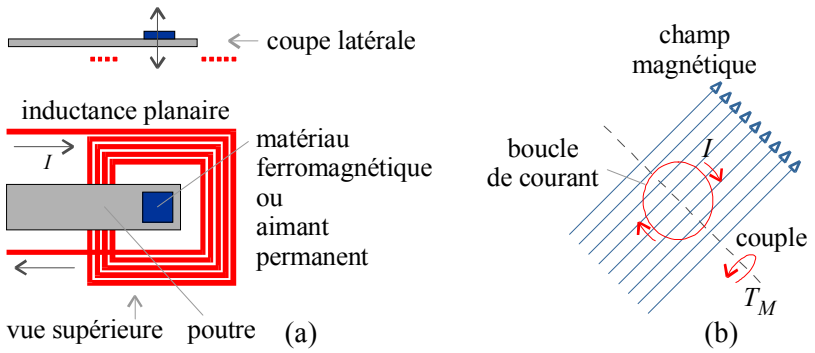


Figure 4.2. Actionneurs magnétiques : (a) utilisant un élément ferromagnétique ou un aimant permanent, (b) utilisant la force de Lorentz.

Concernant la micro-fabrication, le dépôt et la gravure de matériaux magnétiques sont encore un défi. A présent, des efforts sont réalisés en vue de la miniaturisation des actionneurs. Par exemple, des structures de *NiFe* formées par croissance électrolytique ont été incorporées à un procédé de micro-usinage en surface [JUD 95]. Le dépôt par pulvérisation de couches épaisses de *NdFeB* est aussi à l'étude [CUG 01].

4.1.3. *Actionneurs électrostatiques*

Le fonctionnement des actionneurs électrostatiques se base sur la force d'attraction entre deux charges de signes contraires. La disponibilité des forces d'attraction exclusivement, dans les actionneurs électrostatiques, contraste avec la possibilité d'avoir aussi bien des forces d'attraction que des forces de répulsion dans les actionneurs magnétiques.

Les actionneurs électrostatiques sont très efficaces quant à la consommation d'énergie. D'autre part, les matériaux et les structures mécaniques nécessaires pour leur fabrication sont compatibles avec les technologies de micro-usinage, particulièrement avec le micro-usinage en surface [SNI 95].

La miniaturisation est favorable aux actionneurs électrostatiques. En réduisant chaque dimension linéaire de l'actionneur d'un facteur l, le volume et la masse diminuent en fonction de l^3. En supposant que le champ électrique de rupture reste constant (indépendamment de la taille du dispositif), la tension maximale que l'on peut appliquer entre les électrodes diminue linéairement avec la dimension l, et la force électrostatique diminue donc en fonction de l^2. La relation l^3/l^2 entre la masse et la force électrostatique constitue déjà un point favorable de la miniaturisation.

De plus, quand la séparation entre les électrodes est de quelques microns seulement, le champ électrique de rupture augmente en réduisant la séparation entre les électrodes[44] (loi de

[44] Ce phénomène est la conséquence de l'insuffisance de collisions ionisantes pour provoquer l'effet d'avalanche.

Paschen) [MAD 97]. A cette échelle, le champ de rupture entre les électrodes est une fonction de $1/\sqrt{l}$ alors que la tension maximale est une fonction de $\sqrt{l}$. Par conséquent, la force électrostatique est une fonction de *l*.

A présent, les actionneurs électrostatiques sont les plus attractifs pour les commutateurs optiques. D'une part, leurs matériaux et leurs technologies de microfabrication sont déjà assez établis (à l'inverse des actionneurs magnétiques). D'autre part, l'efficacité et la vitesse des actionneurs électrostatiques (~1-10ms) sont supérieures par rapport aux actionneurs thermiques.

4.2. Déflection et torsion de poutres

Les micro-actionneurs électrostatiques utilisent fréquemment des poutres de suspension qui se déforment en réponse à une tension d'entrée. Deux cas particuliers sont importants : les poutres rectangulaires en déflexion et en torsion. Dans cette partie, nous étudierons la déflexion et la torsion des poutres prismatiques déformées par l'action de forces localisées. Ultérieurement, dans ce chapitre, les effets des forces électrostatiques réparties seront examinés.

4.2.1. *Poutre encastrée-libre*

La Figure 4.3 illustre une poutre du type encastrée-libre. Une force *F* ponctuelle, appliquée sur l'extrémité libre, produit un déplacement ainsi qu'une rotation.

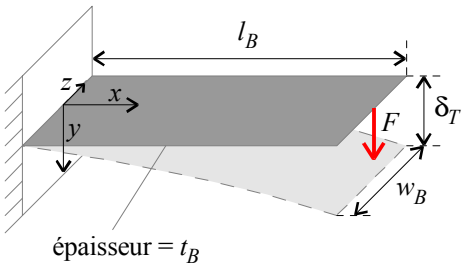


Figure 4.3. Poutre défléchie par une force appliquée sur l'extrémité libre.

Le déplacement vertical *y(x)* de la poutre s'exprime comme suit [GER 97] :

$$y(x) = \frac{F x^2}{6 E I_Z}(3 l_B - x) \qquad [4.1]$$

où E est le module d'élasticité du matériau et I_Z est le moment d'inertie par rapport à l'axe z. Ce dernier est donné par :

$$I_Z = \frac{w_B\, t_B^3}{12} \qquad [4.2]$$

L'angle de déflexion $y'(x)$ s'exprime comme suit :

$$y'(x) = \frac{dy(x)}{dx} = \frac{F\,x}{2E\,I_Z}(2l_B - x) \qquad [4.3]$$

Le déplacement vertical δ_T et l'angle de déflexion de la poutre pour l'extrémité libre sont obtenus directement à partir des équations [4.1] et [4.3] :

$$y(x = l_B) = \delta_T = \frac{F\,l_B^3}{3E\,I_Z} \qquad [4.4]$$

$$y'(x = l_B) = \frac{F\,l_B^2}{2EI_Z} \qquad [4.5]$$

La Figure 4.4 montre une autre poutre en flexion. Dans ce cas, la force F est appliquée sur la position $x=a$.

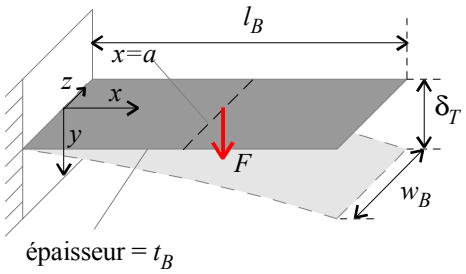


Figure 4.4. Poutre défléchie par une force appliquée en $x=a$.

Le déplacement total δ_T sur l'extrémité droite est obtenu à partir des équations [4.4] et [4.5]. D'abord, on obtient le déplacement vertical et l'inclinaison de la poutre en $x=a$ en substituant l_B par a dans les équations [4.4] et [4.5]. Ensuite, le déplacement δ_T est obtenu en partant du fait que l'inclinaison de la poutre entre $x=a$ et $x=l_B$ est constante. Le déplacement δ_T est exprimé comme suit :

$$y(x = l_B) = \delta_T = \frac{F\,a^2}{6\,E\,I_Z}(3l_B - a) \qquad [4.6]$$

4.2.2. *Poutre sans rotation à l'extrémité libre*

La Figure 4.5 montre une autre poutre fréquemment utilisée dans la modélisation de microactionneurs. A l'extrémité gauche, la poutre est encastrée. Pour l'extrémité droite, la poutre est soutenue de telle façon que la flexion peut se faire librement dans le sens vertical, mais que la rotation est entravée ($y'(l_B) = 0$).

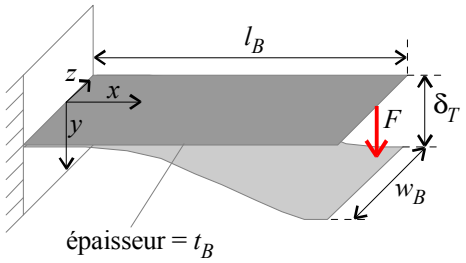


Figure 4.5. Déflexion d'une poutre sans rotation dans l'extrémité libre.

La déflexion *y(x)* et la déflexion maximale δ_T de la poutre s'expriment comme ci-dessous [TAN 90] :

$$y(x) = \frac{F}{12E\,I_Z}(3l_B x^2 - 2x^3) \qquad [4.7]$$

$$\delta_T = \frac{l_B^3}{12E\,I_Z}F \qquad [4.8]$$

La relation entre la force et la déflexion des poutres illustrées dans la Figure 4.3 et dans la Figure 4.5 est équivalente à la relation entre la force et la déformation d'un ressort. Nous pouvons donc caractériser la déflexion de ces poutres par une constante de raideur. A partir de l'équation [4.4], on obtient :

$$k_B = \frac{F}{\delta_T} = \frac{3E\,I_Z}{l_B^3} = \frac{E\,w_B\,t_B^3}{4l_B^3} \qquad [4.9]$$

où k_B est la constante de raideur associée à la poutre de la Figure 4.3. A partir de l'équation [4.8], on obtient :

$$k_B = \frac{F}{\delta_T} = \frac{12 E I_Z}{l_B^3} = \frac{E\, w_B\, t_B^3}{l_B^3} \qquad [4.10]$$

qui est la constante de raideur associée à la poutre de la Figure 4.5.

4.2.3. *Torsion de poutres rectangulaires*

La Figure 4.6 illustre une poutre de section transversale rectangulaire avec un couple T_M appliqué à l'extrémité droite.

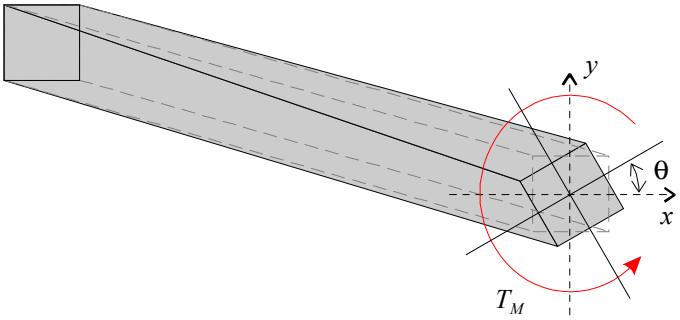


Figure 4.6. Poutre rectangulaire en torsion.

La relation entre le couple appliqué T_M et l'angle de rotation θ pour une poutre rectangulaire s'exprime ainsi [TIM 70] :

$$T_M = \frac{G\, w_B\, t_B^3\, \theta}{3 l_B} \left\{ 1 - \frac{192}{\pi^5} \cdot \frac{t_B}{w_B} \sum_{n=1,3,5,\ldots}^{\infty} \frac{1}{n^5} \tanh\left(\frac{n\pi\, w_B}{2 t_B} \right) \right\} \qquad [4.11]$$

où G est le module de cisaillement du matériau ; et w_B, t_B et l_B sont respectivement la largeur, l'épaisseur et la longueur de la poutre. Dans l'équation [4.11], la série converge très rapidement. Si on ne considère que le premier terme de la série, l'équation se simplifie en :

$$T_M = \frac{G w_B t_B^3}{3 l_B} \theta \left[1 - \frac{192}{\pi^5} \cdot \frac{t_B}{w_B} \tanh\left(\frac{\pi \cdot w_B}{2 t_B} \right) \right] \qquad [4.12]$$

Cette simplification sera utilisée dans les modèles de la partie suivante.

4.3. Actionneur à plaques parallèles avec déplacement transversal

4.3.1. *Principe de fonctionnement*

La Figure 4.7 illustre un actionneur à plaques parallèles. L'électrode inférieure est fixe alors que l'électrode supérieure est mobile et peut se déplacer dans la direction x. Quand la tension V varie, la séparation entre les électrodes change, mais les surfaces au regard des électrodes demeurent fixes.

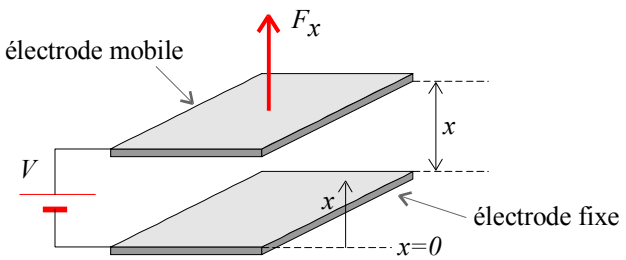


Figure 4.7. Actionneur à plaques parallèles avec déplacement transversal.

La force d'attraction entre les électrodes peut se calculer en utilisant le principe du travail virtuel [SNI 95] :

$$\hat{F} = -\nabla U \qquad [4.13]$$

où U est l'énergie potentielle totale du système[45]. L'équation [4.13] pour le cas unidimensionnel se simplifie en :

$$F_x = -\frac{dU(x)}{dx} \qquad [4.14]$$

La force disponible dans l'actionneur à plaques parallèles de la Figure 4.7 est donnée par [SNI 95] [TAB 98] :

$$F_x = -\frac{1}{2}\frac{\varepsilon S}{x^2}V^2 \qquad [4.15]$$

La force est donc inversement proportionnelle au carré de l'entrefer. Pour augmenter la force, on peut suivre trois stratégies :

[45] L'énergie potentielle totale du système est l'énergie potentielle accumulée dans la batterie plus l'énergie potentielle accumulée dans le champ électrostatique.

- augmenter la surface des électrodes
- augmenter la tension d'alimentation
- réduire la séparation entre les électrodes.

La première solution n'est pas toujours convenable parce que la force augmente uniquement proportionnellement à la surface des électrodes. Ainsi, on augmente la force mais également la taille de l'actionneur.

L'accroissement de la tension d'alimentation semble plus raisonnable étant donné que la force augmente en fonction du carré de la tension. D'autre part, la taille de l'actionneur ne change pratiquement pas. Cependant, les tensions trop élevées ne sont pas compatibles avec les technologies standard de la microélectronique, ce qui empêche l'intégration monolithique des actionneurs avec des circuits de commande.

La réduction de l'entrefer serait la solution la plus convenable pour augmenter la force sans affecter la taille de l'actionneur ni ses possibilités d'intégration avec la microélectronique. Malheureusement, cette réduction entraîne une limitation de la dynamique de l'actionneur.

Dans la pratique, la séparation minimale entre les électrodes est limitée par la technologie de fabrication. A présent, des tensions de l'ordre de quelques dizaines de volts ou même de centaines de volts sont souvent nécessaires pour obtenir le niveau de force nécessaire [LEE 99] [KRI 00].

4.3.2. *Limite de stabilité*

L'actionneur électrostatique à plaques parallèles où l'électrode mobile se déplace perpendiculairement aux plans des électrodes présente le problème de stabilité. Afin d'expliquer ce phénomène, la Figure 4.8(a) schématise un actionneur électrostatique généralisé. L'électrode mobile est accrochée à un ressort de rappel qui est aussi encastré par l'extrémité supérieure.

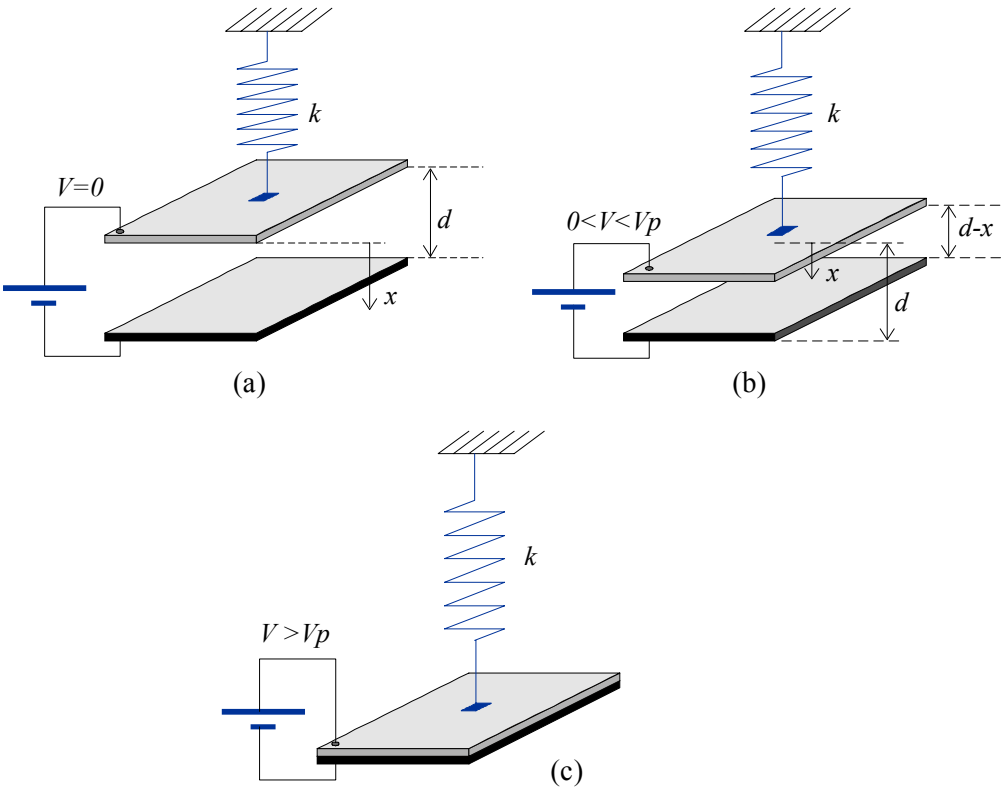


Figure 4.8. Régions d'opération d'un actionneur électrostatique : (a) tension d'entrée nulle, (b) tension d'entrée inférieure à la limite de stabilité, (c) tension d'entrée supérieure à la limite de stabilité.

A mesure que la tension V augmente, l'électrode mobile se déplace vers le bas attirée par la force électrostatique. En même temps, le ressort manifeste une force de réaction. Alors que la tension d'entrée est inférieure à la limite de stabilité V_P[46], l'électrode mobile trouve une position d'équilibre où la force électrostatique et la force du ressort chancèlent [Figure 4.8(b)]. Quand la tension d'entrée est plus grande que V_P, la force électrostatique devient plus grande que la force du ressort, et l'électrode se déplace brusquement jusqu'à $x=d$ [Figure 4.8(c)].

Dans la région de stabilité, on peut obtenir la relation entre la tension d'entrée et le déplacement de l'électrode, à partir du bilan des forces sur l'électrode mobile :

$$\Sigma\hat{F} = \hat{F}_E + \hat{F}_S = \left(\frac{1}{2}\frac{\varepsilon S V^2}{(d-x)^2} - kx \right)\hat{a}_x = 0 \qquad [4.16]$$

où $\hat{F}_E$ et $\hat{F}_S$ représentent respectivement la force électrostatique et la force de réaction du ressort. La tension V est donc obtenue directement à partir de l'équation [4.16] :

[46] En anglais : *Pull-in voltage*.

$$V = \sqrt{\frac{2k}{\varepsilon S} x(d-x)^2} \qquad [4.17]$$

Dans l'équation [4.17], la valeur maximale de V représente la tension limite de stabilité Vp. Cette valeur se présente sur la position $x=d/3$:

$$Vp = \sqrt{\frac{8}{27}\frac{kd^3}{\varepsilon S}} \qquad [4.18]$$

4.3.3. *Miroir suspendu par quatre poutres de flexion*

La Figure 4.9 illustre une application de l'actionneur à plaques parallèles. L'application consiste en un miroir, suspendu par quatre poutres de flexion, qui se déplace verticalement par l'action d'une force électrostatique. La plaque du miroir et le substrat constituent les deux électrodes. Ce dispositif a été mis en œuvre dans le domaine de l'optique adaptative [LIN 94] [MIC 95] [MIN 99].

La relation entre la tension d'entrée et le déplacement est décrite par l'équation [4.17], et la tension limite de stabilité est donnée par l'équation [4.18]. Afin de raffiner la caractérisation du dispositif, il faut obtenir la constante de raideur.

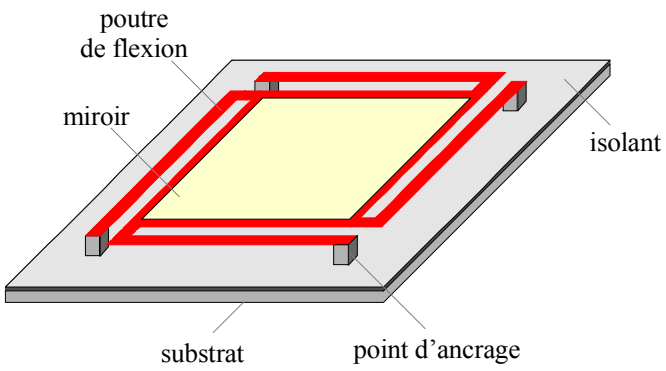


Figure 4.9. Miroir suspendu par quatre poutres de flexion.

Les poutres de suspension de ce système sont du type montré dans la Figure 4.5. Les extrémités des poutres accrochées au miroir se déplacent verticalement mais ne présentent pas de rotation. Chaque poutre est donc idéalement caractérisée par la constante de raideur décrite par l'équation [4.10]. Cependant, la contrainte mécanique résiduelle modifie la raideur du système et son effet doit être incorporé dans le modèle au moyen d'une deuxième constante de raideur [LIN 94] [MIC 95] [MIN 99]. La constante de raideur totale s'exprime donc de la manière suivante :

$$k = N(k_1 + k_2) \qquad [4.19]$$

où N est le nombre de poutres. La constante k_1 est donnée directement par l'équation [4.10] :

$$k_1 = \frac{F}{\delta_T} = \frac{E\, w_B t_B^3}{l_B^3} \qquad [4.20]$$

La constante k_2, quant à elle, peut s'exprimer dans une première approximation comme suit [LIN 94] :

$$k_2 = \frac{\sigma(1-\nu) w_B t_B}{2 l_B} \qquad [4.21]$$

où σ et ν sont respectivement la contrainte mécanique résiduelle et le coefficient de Poisson du matériau qui forme la poutre.

4.4. Actionneur à plaques parallèles avec mouvement latéral

4.4.1. *Principe de fonctionnement*

Un autre actionneur électrostatique à base de plaques parallèles consiste en une électrode fixe, et une électrode mobile qui se déplace latéralement par rapport au premier, voir Figure 4.10. Dans ce cas, quand l'électrode mobile se déplace, le chevauchement entre les électrodes change alors que la séparation entre les électrodes reste constante.

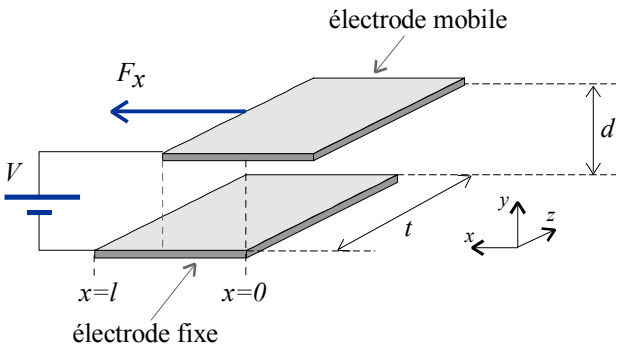


Figure 4.10. Actionneur à plaques parallèles avec mouvement latéral de l'électrode mobile.

En négligeant les effets de bord aux extrémités des plaques et en supposant un chevauchement fixe égal à t dans la direction z, la capacité du système est donnée par :

$$C = \frac{\varepsilon t x}{d} \qquad [4.22]$$

où ε, d et x sont respectivement la permittivité du milieu entre les électrodes, la séparation entre les électrodes, et la longueur de chevauchement des électrodes dans la direction du mouvement.

La force de l'actionneur est obtenue en appliquant le principe du travail virtuel (équation [4.14]) :

$$F_x = \frac{1}{2}\frac{\varepsilon t}{d}V^2 \qquad [4.23]$$

L'équation [4.23] indique que la force est indépendante du chevauchement des électrodes. D'autre part, cette équation n'est pas très précise pour de petits chevauchements, cela est la conséquence des effets de bord aux extrémités des électrodes qui ne sont pas pris en compte dans l'équation [4.22].

L'actionneur électrostatique avec déplacement latéral ne présente pas le problème de stabilité décrit dans le § 4.3.2.

4.4.2. *Actionneur à peignes interdigités*

L'actionneur à peignes interdigités, schématisé dans la Figure 4.11, est un exemple d'actionneur à plaques parallèles avec déplacement latéral. Cet actionneur contient deux électrodes interdigitées, l'une encastrée et l'autre mobile. Les électrodes de cet actionneur contiennent un total de N entrefers.

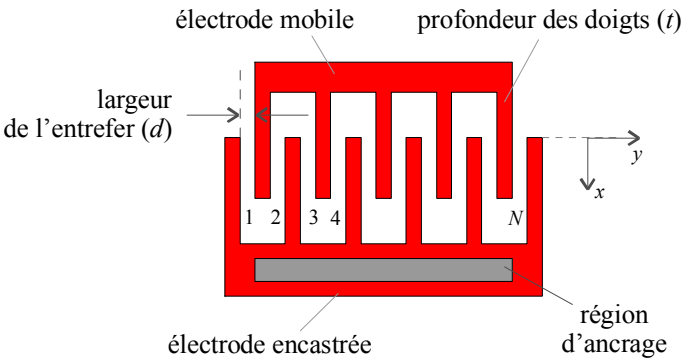


Figure 4.11. Actionneur à peignes interdigités.

La capacité et la force de l'actionneur à peignes interdigités peuvent être directement obtenues à partir des équations [4.22] et [4.23], en introduisant un facteur N pour tenir compte du nombre total d'entrefers :

$$C = N \frac{\varepsilon t x}{d} \qquad [4.24]$$

$$F_x = \frac{N}{2} \frac{\varepsilon t}{d} V^2 \qquad [4.25]$$

La force d'un actionneur à peignes interdigités reste constante à mesure que l'électrode mobile se déplace. Elle peut être augmentée soit en réduisant la largeur des entrefers, soit par l'augmentation de la profondeur des structures ou du nombre de doigts. Dans la pratique, la largeur et la profondeur des entrefers sont des paramètres limités par la technologie. L'incrément de la force se fait donc fréquemment par augmentation du nombre de doigts.

Les actionneurs à peignes interdigités peuvent être fabriqués par micro-usinage en surface [TAN 90]. Malheureusement, la force des actionneurs est limitée car l'épaisseur des couches structurelles est typiquement de quelques microns. De plus, la largeur des entrefers a une limite inférieure de l'ordre de 2 microns [CRO 02].

D'autre part, l'intervalle dynamique est défini, indépendamment de la force, par la longueur des doigts. Normalement, plus longs sont les doigts, plus grand est le déplacement maximal de l'actionneur. L'intervalle dynamique est cependant limité par la lévitation électrostatique [TAN 90]. L'intervalle dynamique peut être aussi augmenté par l'utilisation des structures en résonance (§ 4.6.3).

Les limitations géométriques des actionneurs micro-usinés en surface sont surmontées par le micro-usinage de wafers SOI [MAR 99]. Ainsi, la profondeur des doigts peut atteindre plusieurs dizaines de microns. En outre, la longueur des doigts peut être substantiellement augmentée avant que la lévitation électrostatique devienne importante.

4.4.3. *Miroir avec actionneur à peignes interdigités*

Un commutateur optique utilisant un actionneur à peignes interdigités pour déplacer un miroir est schématisé dans la Figure 4.12 [MAR 99]. Le miroir est accroché à l'électrode mobile, et ces deux éléments sont ancrés au substrat au moyen d'un système de suspension à base de poutres pliées [TAN 90].

Le système de suspension est peu rigide dans la direction x. Par contre, il est très rigide dans les directions y et z. La rigidité dans la direction y évite le cour-circuit alors que la rigidité dans la direction z limite la lévitation de l'électrode. D'autre part, la tension d'alimentation

nécessaire pour déplacer le miroir est fonction de la rigidité de la suspension dans la direction x.

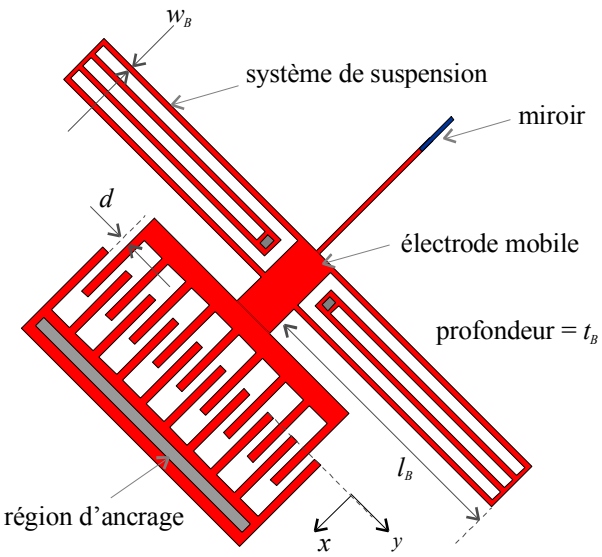


Figure 4.12. Commutateur utilisant un actionneur à peignes interdigités.

Le système de suspension à poutres pliées est analogue à un ressort mécanique avec trois constantes de raideur, une pour chaque direction de mouvement. Dans la Figure 4.12, l'électrode mobile est suspendue par quatre poutres du type montré dans la Figure 4.5, la force dans chaque poutre étant seulement un quart de la force totale. D'autre part, chaque poutre est défléchie seulement de la moitié de la distance totale, voir Figure 4.13.

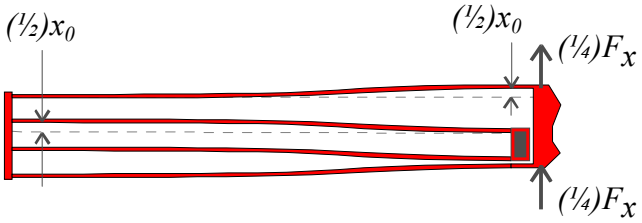


Figure 4.13. Partie du système de suspension pour l'actionneur à peignes interdigités.

Les constantes de raideur k_X et k_Z sont obtenues à partir de l'équation [4.8] :

$$k_X = \frac{24 E I_Z}{l_B^3}, \quad I_Z = \frac{t_B w_B^3}{12} \qquad [4.26]$$

$$k_Z = \frac{24 E I_X}{l_B^3}, \quad I_X = \frac{t_B^3 w_B}{12} \qquad [4.27]$$

La constante k_Y est obtenue directement à partir de la loi de Hooke[47] [GER 97] :

$$k_Y = \frac{8 A_B E}{l_B} \qquad [4.28]$$

où A_B représente la surface transversale de chaque poutre, et où le facteur huit tient compte du nombre total de poutres.

Finalement, la tension d'entrée en fonction de la position x est obtenue à partir du bilan des forces sur l'électrode mobile. La force électrostatique est donnée par l'équation [4.25] alors que la force de réaction mécanique est la force d'un ressort avec la constante de raideur k_X (équation [4.26]) :

$$V = \sqrt{\frac{4 E d}{N \varepsilon} \left(\frac{w_B}{l_B} \right)^3 x} \qquad [4.29]$$

4.5. Actionneur à électrode giratoire

Les actionneurs étudiés dans les deux parties précédentes se basent sur le mouvement linéaire d'une électrode. Dans cette partie, nous étudierons une autre famille d'actionneurs où l'électrode mobile présente un mouvement circulaire.

Les actionneurs à électrode giratoire sont très attractifs pour les commutateurs optiques. Utilisant les électrodes mobiles directement comme réflecteurs, seulement des petites variations angulaires sont suffisantes pour défléchir substantiellement les faisceaux lumineux.

4.5.1. *Miroir suspendu par deux poutres de torsion*

La Figure 4.14 illustre un actionneur électrostatique avec deux électrodes initialement parallèles. L'application d'une tension V provoque un mouvement angulaire de l'électrode supérieure autour de l'axe défini par les poutres de suspension. Ainsi l'électrode mobile (miroir) tourne jusqu'à former un angle $\phi=\phi_0$ par rapport à l'électrode fixe.

Dans l'analyse qui suit, nous supposons que la longueur et la largeur de l'électrode mobile sont respectivement l_M et w_M. D'autre part, la longueur, la largeur et l'épaisseur de chaque poutre de torsion sont respectivement l_B, w_B et t_B.

[47] La loi de Hooke permet de calculer la déformation longitudinale δ d'une poutre en fonction de la force F appliquée sur l'axe de la poutre : $\delta=[l/(AE)]F$. Dans l'équation précédente, l et A sont respectivement la longueur et la surface transversale de la poutre, et E est le module de Young du matériau.

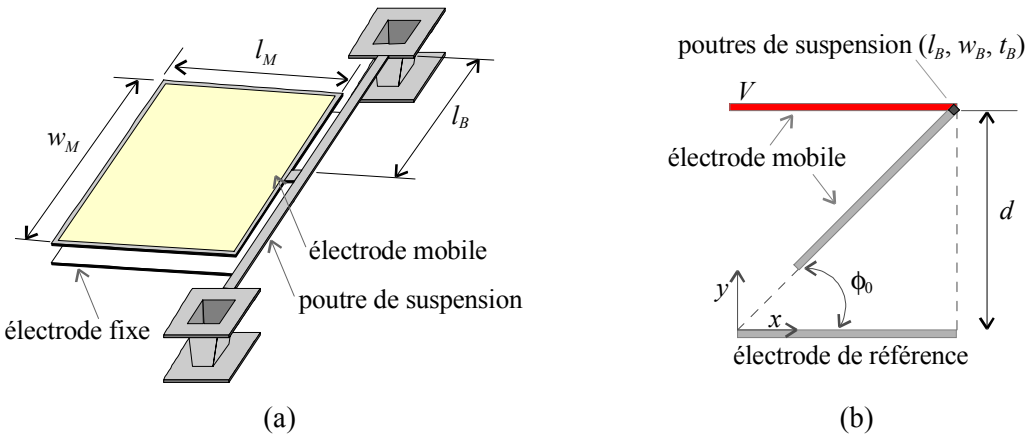


Figure 4.14. Miroir suspendu par deux poutres de torsion.

Le système présente une symétrie polaire. Ainsi, le champ électrique entre les plaques peut s'exprimer comme suit [HAY 88] :

$$\hat{E}(\rho) = -\frac{V}{\rho\varphi_0}\hat{a}_\Phi \qquad [4.30]$$

où ρ est la coordonnée cylindrique qui représente la distance entre chaque point de l'espace entre les électrodes et l'axe z. La pression électrostatique sur l'électrode supérieure varie en fonction de la position et se calcule directement à partir de l'équation [4.30] :

$$P(\rho) = \frac{1}{2}\varepsilon\left|\hat{E}(\rho)\right|^2 = \frac{1}{2}\varepsilon\frac{V^2}{\rho^2\varphi_0^2} \qquad [4.31]$$

Le couple produit par la force électrostatique sur l'électrode mobile est défini par :

$$T_E = \int_0^{w_M}\int_{\frac{d}{\sin\phi_0}-l_M}^{\frac{d}{\sin\phi_0}} P(\rho)\left(\frac{d}{\sin\phi_0}-\rho\right)d\rho dz \qquad [4.32]$$

Après la substitution de l'équation [4.31] dans l'équation [4.32] et la solution de l'intégrale, le couple électrique peut s'exprimer comme suit :

$$T_E = \frac{1}{2}\frac{\varepsilon w_M V^2}{\varphi_0^2}\left\{\frac{l_M \sin\varphi_0}{d - l_M \sin\varphi_0} + ln(1 - \frac{l_M \sin\varphi_0}{d})\right\} \qquad [4.33]$$

D'autre part, le couple mécanique de réaction présenté par les poutres de torsion est donné par l'équation [4.12] :

$$T_M = 2\frac{G\,w_B t_B^3}{3l_B}\theta\left[1-\frac{192}{\pi^5}\cdot\frac{t_B}{w_B}tanh\left(\frac{\pi\cdot w_B}{2t_B}\right)\right] \qquad [4.34]$$

L'angle θ est identique à l'angle ϕ_0 et le facteur deux tient compte du fait qu'il y a deux poutres de suspension. Après l'égalisation des équations du couple électrostatique et du couple mécanique de réaction, on obtient la relation entre la tension d'entrée V et l'angle de déflexion :

$$V = \sqrt{\frac{4Gw_B t_B^3\theta^3}{3\varepsilon_0 l_B w_M}\frac{\left(1-\frac{192}{\pi^5}\cdot\frac{t_B}{w_B}tanh\left(\frac{\pi\cdot w_B}{2t_B}\right)\right)}{\left(\frac{l_M\,sin\theta}{d-l_M\,sin\theta}+ln(1-\frac{l_M\,sin\theta}{d}\right)}} \qquad [4.35]$$

Afin de permettre la rotation de l'électrode mobile (miroir) aussi bien dans le sens horaire que anti-horaire, on peut incorporer une troisième électrode à la structure de base de la Figure 4.14. L'actionneur résultant est schématisé sur la Figure 4.15. Quand une tension est appliquée entre le miroir et l'électrode 1, le miroir tourne dans le sens anti-horaire. Quand une tension est appliquée entre le miroir et l'électrode 2, le miroir tourne dans le sens horaire, voir Figure 4.15(b).

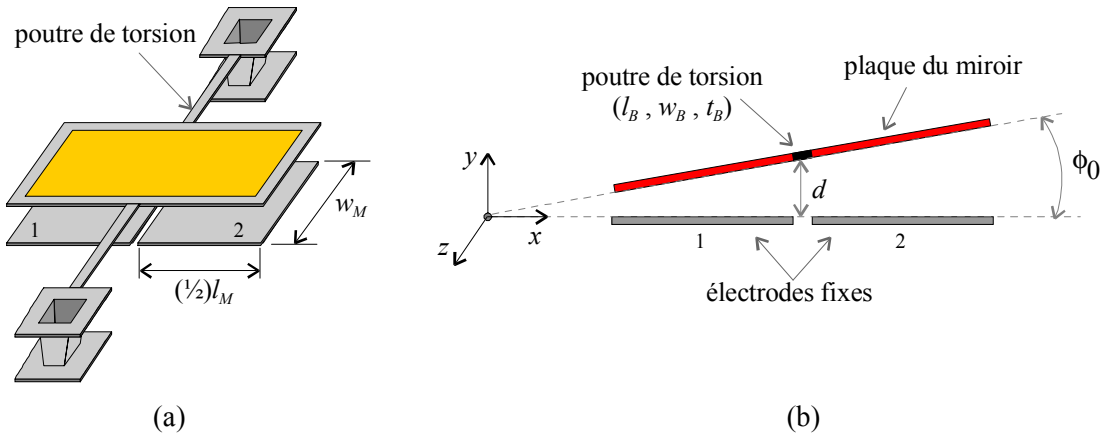


Figure 4.15. Miroir suspendu par deux poutres de torsion centrales.

La tension d'entrée en fonction de l'angle de rotation est essentiellement donnée par l'équation [4.35] où la dimension l_M doit être échangée par (½)l_M:

$$V = \sqrt{\frac{4Gw_B t_B^3 \theta^3}{3\varepsilon_0 l_B w_M} \frac{\left(1 - \frac{192}{\pi^5} \cdot \frac{t_B}{w_B} tanh\left(\frac{\pi \cdot w_B}{2t_B}\right)\right)}{\left(\frac{l_M \sin\theta}{2d - l_M \sin\theta} + ln(1 - \frac{l_M \sin\theta}{2d}\right)}} \qquad [4.36]$$

L'actionneur de la Figure 4.14, ainsi que celui de la Figure 4.15, peut être fabriqué par micro-usinage en surface. Ils présentent cependant un intervalle dynamique limité d'une part par la petite séparation entre les plaques, et d'autre part par le phénomène d'instabilité décrit antérieurement (§ 4.3.2).

4.5.2. *Miroir suspendu par deux poutres de torsion avec angle initial entre les électrodes*

Afin d'augmenter l'intervalle dynamique des actionneurs à électrode giratoire, on peut introduire un angle initial entre les plaques. Cette idée est schématisée dans la Figure 4.16(a). L'actionneur peut être fabriqué par micro-usinage en surface. L'électrode mobile et son cadre de support sont soulevés du substrat et préassemblés à un angle θ_0 par rapport à l'électrode fixe, ce dernier se trouvant sur le plan du substrat [KRI 00]. Les faisceaux incident et réfléchi sont localisés dans un plan perpendiculaire au substrat.

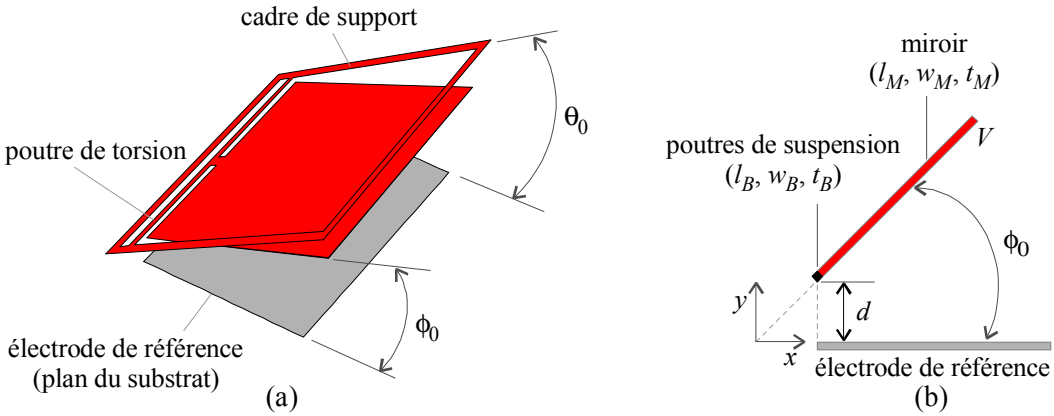


Figure 4.16. Miroir suspendu par deux poutres de torsion latérales, l'angle initial entre les électrodes est différent de zéro.

L'angle entre les électrodes, correspondant à une tension d'entrée nulle, est donc θ_0. Par contre, quand la tension d'entrée est différente de zéro, l'angle entre les électrodes est ϕ_0. Les dimensions du système sont illustrées dans la Figure 4.16(b).

Le champ électrique ainsi que la pression électrostatique sur l'électrode mobile sont donnés respectivement par les équations [4.30] et [4.31].

Le couple électrique sur la plaque du miroir se calcule ainsi :

$$T_E = \frac{1}{2}\frac{\varepsilon V^2}{\varphi_0^2}\int_0^{w_M}\int_{\frac{d}{\sin\varphi_0}}^{\frac{d}{\sin\varphi_0}+l_M}\left(\frac{\rho-\frac{d}{\sin\varphi_0}}{\rho^2}\right)d\rho\, dz \qquad [4.37]$$

et le résultat après l'intégration est :

$$T_E = \frac{1}{2}\frac{\varepsilon w_M V^2}{\varphi_0^2}\left\{ln(1+\frac{l_M \sin\varphi_0}{d})-\frac{l_M \sin\varphi_0}{d+l_M \sin\varphi_0}\right\} \qquad [4.38]$$

Le couple mécanique de réaction est donné par l'équation [4.34]. Finalement, la relation entre la tension d'entrée et l'angle de rotation de la plaque est obtenue en faisant le bilan des couples mécanique et électrique, et en utilisant $\phi_0=\theta_0-\theta$:

$$V = \sqrt{\frac{4Gw_B t_B^3(\theta_0-\theta)^2\theta}{3\varepsilon l_B w_M}\frac{\left(1-\frac{192}{\pi^5}\cdot\frac{t_B}{w_B}tanh\left(\frac{\pi\cdot w_B}{2t_B}\right)\right)}{\left(ln(1+\frac{l_M \sin(\theta_0-\theta)}{d})-\frac{l_M \sin(\theta_0-\theta)}{d+l_M \sin(\theta_0-\theta)}\right)}} \qquad [4.39]$$

La Figure 4.17 schématise un autre actionneur avec un angle initial introduit entre les électrodes [LEE 99]. Dans ce cas, les deux électrodes sont préassemblées sur des plans perpendiculaires au substrat, alors que les faisceaux se propagent dans un plan parallèle au substrat.

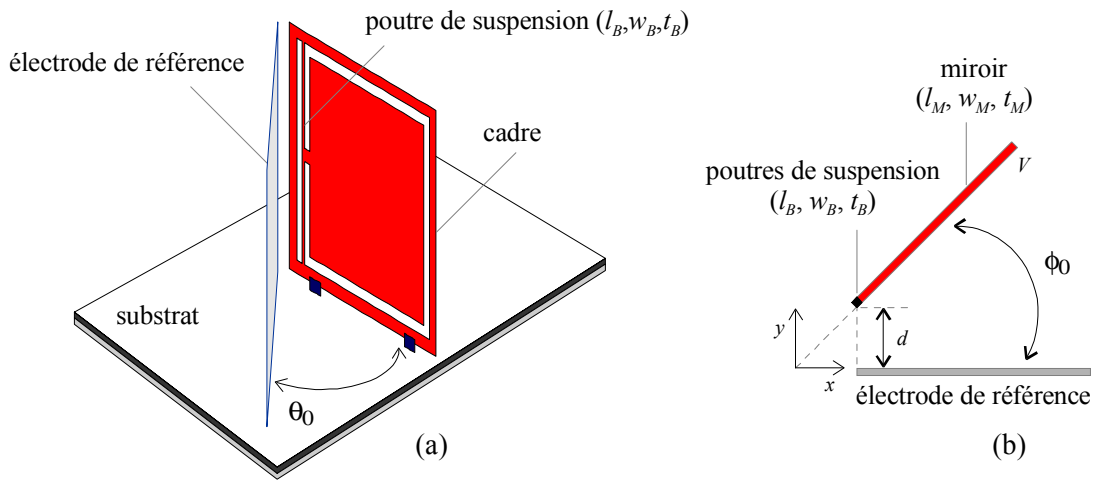


Figure 4.17. Miroir perpendiculaire au substrat et suspendu par deux poutres de torsion latérales, l'angle initial entre les électrodes est différent de zéro.

4.6. Autres actionneurs électrostatiques

Les actionneurs électrostatiques à électrodes plates, détaillés dans la partie précédente, sont limités quant à l'intervalle dynamique. D'autre types d'actionneurs avec un intervalle dynamique plus grand existent, notamment les moteurs rotatifs et les moteurs linéaires, à interactions de champs ou à interactions de contact. Nous allons aborder ici ces dispositifs et leurs possibilités d'utilisation pour les commutateurs optiques. Par ailleurs, nous obtiendrons un modèle statique d'un actionneur utilisant une structure mécanique précontrainte.

4.6.1. *Moteurs électrostatiques*

Les premiers moteurs électrostatiques sur silicium ont systématiquement mis en jeu des interactions de champs électriques à l'interface stator/rotor [MIN 01]. Ces dispositifs ont été fabriqués par micro-usinage en surface utilisant le silicium polycristallin comme matériau structurel [FAN 88] [BAR 90] [MEH 90]. La Figure 4.18(a) présente un moteur électrostatique avec 12 pôles dans le stator et 8 pôles dans le rotor. La Figure 4.18(b) illustre une coupe latérale du moteur montrant le stator, le rotor et le roulement. L'opération du moteur électrostatique se base sur les forces électrostatiques tangentielles qui alignent les pôles du rotor avec les pôles excités du stator. Les bosses fabriquées dans le rotor réduisent les forces de frottement de ce dernier avec le substrat.

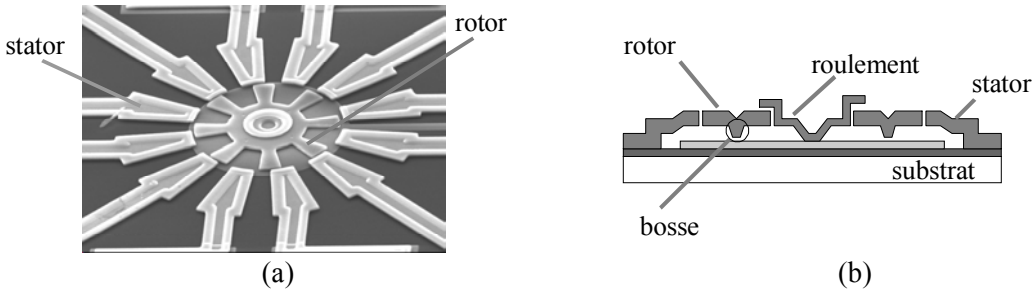


Figure 4.18. Moteur électrostatique à interactions de champs [BAR 90] : (a) vue d'ensemble, (b) coupe latérale.

Dans la pratique, les micro-moteurs électrostatiques à interactions de champs n'ont pas atteint les caractéristiques de performance nécessaires (puissance mécanique, couple) pour répondre aux besoins de motorisation des microsystèmes, particulièrement des commutateurs optiques. Les hauteurs structurelles limitées à quelques microns ainsi que les forces de frottement sont deux facteurs responsables de cet échec [MIN 01].

Deux stratégies existent ayant pour but d'améliorer la performance des moteurs électrostatiques. La première concerne les aspects technologiques, comme la réduction des

tolérances de fabrication, ou la conception de nouveaux procédés de fabrication permettant la création de structures plus épaisses. Par exemple, la technologie LIGA a été utilisée pour fabriquer un moteur électrostatique avec des structures de 200 µm d'épaisseur [YAS 99]. Ce moteur a été utilisé dans la conception d'un commutateur optique.

La deuxième stratégie, pour augmenter la puissance mécanique et le couple utile des moteurs électrostatiques, consiste en l'implémentation de nouveaux mécanismes de transduction d'énergie, par exemple les microactionneurs à interactions de contact.

4.6.2. *Microactionneurs à interactions de contact*

Contrairement aux actionneurs à interactions de champs, le fonctionnement des actionneurs à interactions de contact dépend de la friction entre deux surfaces. La Figure 4.19 illustre un type actionneur à interactions de contact appelé SDA[48] [AKI 93].

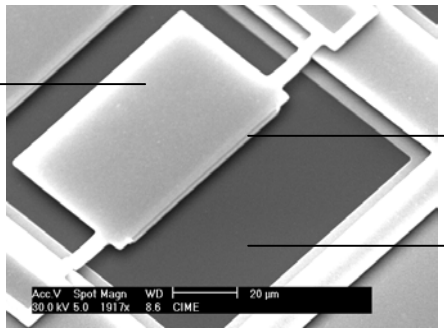


Figure 4.19. Actionneur à interactions de contact type SDA.

Un SDA est constitué d'une plaque flexible en silicium pollycristallin munie d'un plot de contact à une extrémité. Cette structure est suspendue et isolée électriquement du substrat. Le fonctionnement du dispositif nécessite une tension alternative qui s'applique entre le corps de l'actionneur et le substrat. Lors de l'opération du dispositif, la plaque est soumise à une pression électrostatique. A mesure que la tension appliquée augmente, la plaque est plus attirée vers le substrat ce qui provoque un glissement latéral du rebord. Par contre, à mesure que la tension appliquée diminue, la plaque remonte verticalement sans revenir en arrière. L'oscillation électrique appliquée est donc communiquée au plot de contact qui se déplace avec la plaque périodiquement. La Figure 4.20 illustre les différentes phases dans l'opération du dispositif.

[48] SDA : *Scratch Drive Actuator.*

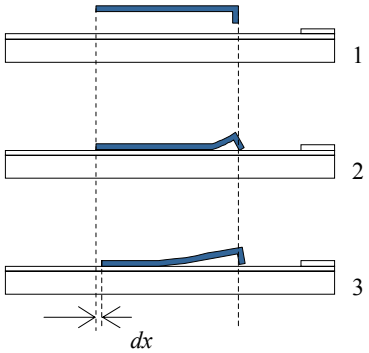


Figure 4.20. Phases dans l'opération d'un SDA.

Le pas de déplacement des SDAs, de l'ordre de quelques dizaines de nanomètres, dépend de la tension d'alimentation. La vitesse de l'actionneur, quant à elle, dépend de la longueur du pas (*dx*) ainsi que de la fréquence de la tension d'entrée. A présent, la tension d'alimentation nécessaire est de l'ordre de 100 V [AKI 97] et la fréquence d'opération peut atteindre une centaine de kHz [MIN 01].

La force disponible dans chaque cellule SDA est de l'ordre de 1500 µN dans l'état actuel de la technologie [MIN 01]. Pour atteindre des forces supérieures, nous pouvons fabriquer des matrices de SDAs comme celle montrée dans la Figure 4.21. Les détails sur la fabrication de cet actionneur seront étudiés dans le chapitre 6.

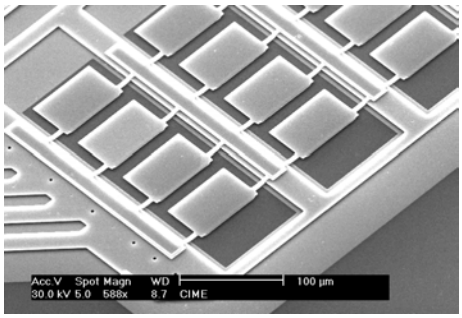


Figure 4.21. Matrice d'actionneurs SDA.

La matrice de SDAs montrée dans la Figure 4.21 a été conçue pour réaliser un mouvement linéaire. Cependant, le même principe à base d'une plaque avec plot de contact peut être utilisé pour réaliser des mouvement circulaires [AKI 93].

4.6.3. *Vibromoteurs linéaires*

L'intervalle dynamique d'un actionneur est augmenté par l'opération du système en résonance, condition selon laquelle, les déplacements sont amplifiés par le facteur de qualité de la structure mécanique. En plus, des structures en résonance peuvent être utilisées à leur

tour pour la fabrication de vibromoteurs [DAN 96] [MUL 98]. Ces dispositifs possèdent un intervalle dynamique encore plus large de l'ordre de centaines de microns.

La Figure 4.22 illustre un vibromoteur linéaire contenant deux paires d'actionneurs à peignes interdigités qui fonctionnent en résonance, ainsi qu'un glissoir. Les structures en résonance déplacent le glissoir par des impacts. Chaque paire d'actionneurs permet le mouvement dans un sens.

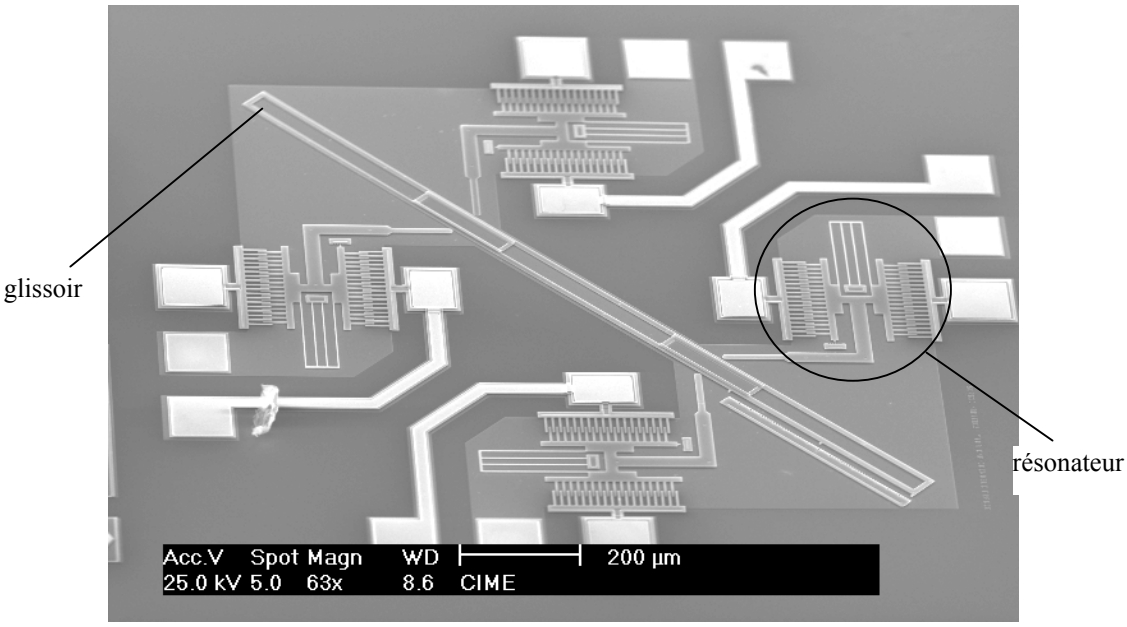


Figure 4.22. Vibromoteur linéaire.

La vélocité et la position finale du glissoir peuvent être contrôlées par l'ajustement respectif de la fréquence et du nombre d'impacts, paramètres qui à leur tour sont contrôlés par la modulation de la largeur ou de la position des pulsations.

Pour l'actionneur à peignes interdigités (§ 4.4.2 et § 4.4.3), la fréquence de résonance mécanique est donnée par :

$$f_R = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \qquad [4.40]$$

où k et m sont la constante de raideur et la masse du système. La constante de raideur de l'actionneur à peignes interdigités est exprimée par l'équation [4.26]. La fréquence de résonance est donc :

$$f_R = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{2Et_B\left(\frac{w_B}{l_B}\right)^3}{m}} \qquad [4.41]$$

Des fréquences de résonance de 10 kHz sont envisageables, ce qui signifie 10 000 impacts potentiels par seconde. Un vibromoteur comme celui de la Figure 4.22 peut être utilisé pour déplacer linéairement un miroir attaché au glissoir [MUL 98].

4.6.4. *Actionneurs à structure mécanique précontrainte*

Nous étudierons un actionneur à structure précontrainte qui fonctionne sur le même principe que celui proposé par Chen et al. [CHE 99], les détails structurels sont cependant différents.

L'actionneur contient une poutre composée d'une couche de silicium polycristallin recouverte d'une couche d'or. Elle est ancrée au substrat par une de ses extrémités. Par ailleurs, la poutre et le substrat sont isolés électriquement au moyen d'une couche diélectrique déposée sur le substrat.

Une électrode est placée directement sur le substrat et la deuxième électrode est constituée par la poutre même. La Figure 4.23 illustre les différents éléments de l'actionneur électrostatique. Ce dispositif peut être fabriqué par micro-usinage en surface (§ 6.2).

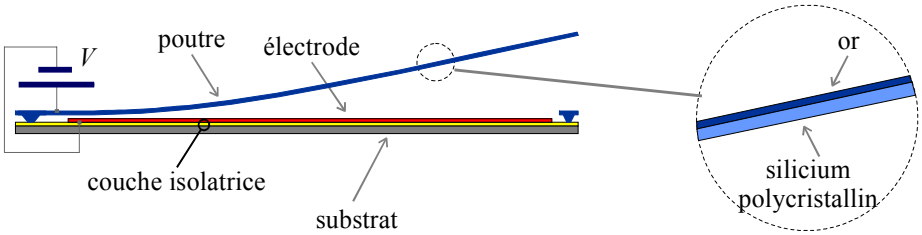


Figure 4.23. Structure de la poutre excitée de façon électrostatique.

La poutre présente une déformation initiale due à la contrainte mécanique résiduelle. Quand une tension est appliquée entre les électrodes, la poutre se déplace verticalement vers le bas par l'action du champ électrostatique. Ce type d'actionneur présente le problème de stabilité étudié dans le § 4.3.2.

Quand la tension d'entrée est nulle, la poutre se trouve dans la position la plus haute [Figure 4.24(a)]. Pendant que la tension d'entrée varie entre zéro et la valeur limite de stabilité V_{MAX}, la position de la poutre varie de manière continue entre la position la plus haute et une position limite inférieure [Figure 4.24(b)]. Quand la tension d'entrée est légèrement

supérieure à la valeur limite de stabilité, la position de la poutre devient instable jusqu'au moment où elle se colle contre le substrat [Figure 4.24(c)].

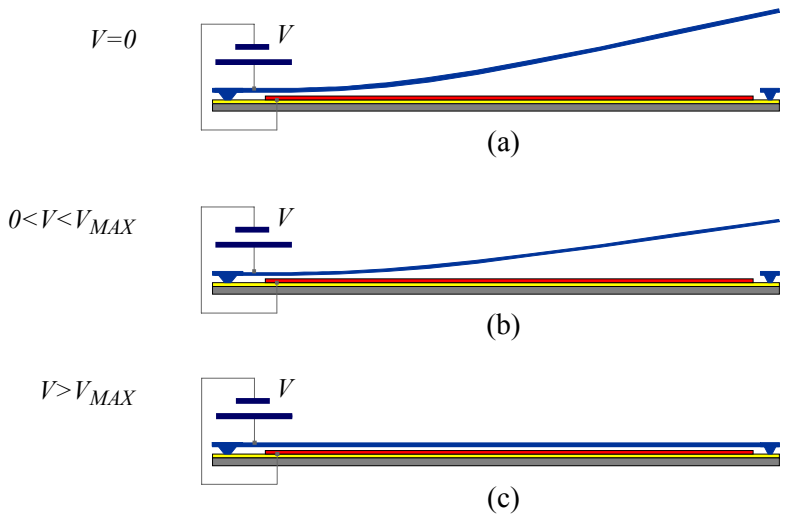


Figure 4.24. Actionneur électrostatique : (a) poutre déformée par la contrainte mécanique résiduelle des matériaux, (b) poutre légèrement déplacée vers le bas par l'action d'un champ électrique, (c) poutre collée contre le substrat pour des tensions de commande supérieures à V_{MAX}.

La Figure 4.25 montre la géométrie de la poutre non-déformée (a) et déformée (b) avec la définition de quelques paramètres pour l'analyse qui suit. W et L sont respectivement la largeur et la longueur de la poutre, alors que t_1 et t_2 sont respectivement les épaisseurs de la couche de silicium polycristallin et de la couche d'or. D est la déformation initiale de l'extrémité libre de la poutre produite par la contrainte mécanique résiduelle des matériaux. Le paramètre d est le déplacement vertical vers le bas de cette même extrémité, déplacement dû à la présence d'un champ électrostatique. L'axe x a son origine sur le point d'ancrage de la poutre alors que X_I et X_F correspondent aux coordonnées de l'électrode inférieure. Z_0 est la séparation (uniforme) entre les électrodes lors du dépôt, c'est à dire, avant la libération mécanique de la poutre. Par contre, $Z(x,V)$ est la fonction qui exprime la séparation entre les électrodes, une fois que la poutre est libérée et qu'une tension est appliquée.

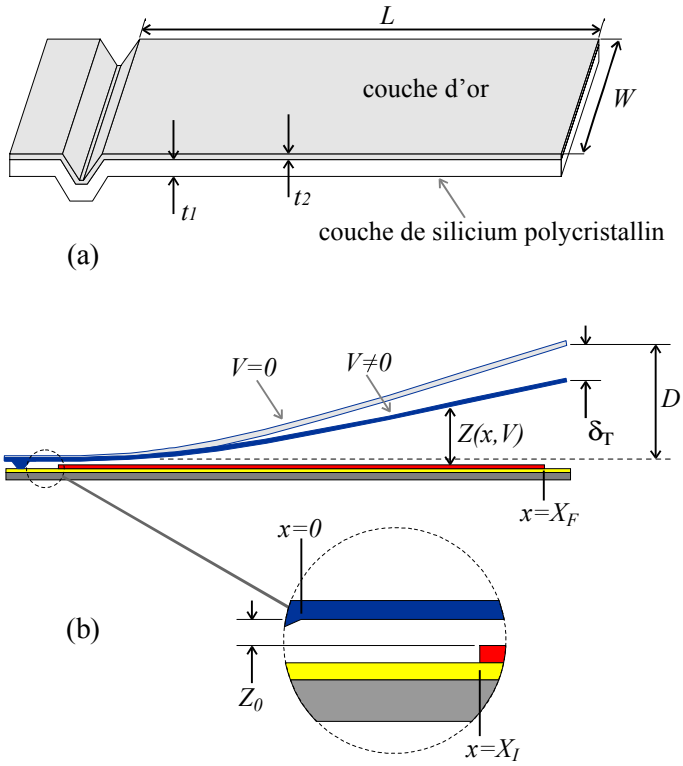


Figure 4.25. Géométrie de la poutre: (a) poutre non-déformée, (b) poutre déformée.

Le comportement statique de la poutre est obtenu par couplage des théories électrostatique et structurelle. La poutre présente le comportement d'un ressort, ainsi la force F est proportionnelle au déplacement δ_T:

$$F = k\delta_T \qquad [4.42]$$

où le paramètre k représente la raideur de la poutre mixte. Elle peut s'exprimer comme suit [MIL 01] :

$$k = \frac{60}{13L^3}\left[\frac{W\left[\left(E_{B1}t_1^2\right)^2 + \left(E_{B2}t_2^2\right)^2 + 2E_{B1}E_{B2}t_1t_2\left(2t_1^2 + 3t_1t_2 + 2t_2^2\right)\right]}{12\left(E_{B1}t_1 + E_{B2}t_2\right)}\right] \qquad [4.43]$$

où E_{B1} et E_{B2} sont respectivement les modules de Young du silicium polycristallin et de l'or. La déflexion verticale de la poutre, due à la contrainte mécanique résiduelle est à peu près une fonction quadratique de la position longitudinale [MIL 01]. La déflexion verticale peut s'exprimer en fonction de la déflexion maximale de la poutre $(D\text{-}\delta_T)$:

$$Z(x,\delta_T) = Z_0 + \frac{x^2}{L^2}(D - \delta_T) \qquad [4.44]$$

La capacité entre les électrodes est obtenue par intégration le long de la poutre :

$$C = \varepsilon W \int_{X_I}^{X_F} \frac{dx}{Z_0 + \frac{x^2}{L^2}(D - \delta_T)} \qquad [4.45]$$

La force de l'actionneur peut être obtenue par l'application du principe de travail virtuel :

$$F = -\frac{1}{2} V^2 \frac{\partial C}{\partial d} = \frac{1}{2} \varepsilon W V^2 \int_{X_I}^{X_F} \frac{x^2 dx}{\left[Z_0 L + \frac{x^2}{L}(D - \delta_T) \right]^2} \qquad [4.46]$$

La tension V est obtenue en substituant l'équation [4.42] dans l'équation [4.46] :

$$V = \sqrt{\frac{2\,k\,\delta_T}{\varepsilon W \int_{X_I}^{X_F} \frac{x^2 dx}{\left[Z_0 L + \frac{x^2}{L}(D - \delta_T) \right]^2}}} \qquad [4.47]$$

Après la résolution de l'intégrale, la tension V s'exprime comme suit :

$$V = \sqrt{\frac{2\,k\,d}{\varepsilon W \left\{ \frac{L}{2\sqrt{Z_0}(D - \delta_T)^{3/2}} tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{D - \delta_T} \cdot x}{\sqrt{Z_0} \cdot L} \right) - \frac{x}{2Z_0(D - \delta_T)\left[1 + \frac{(D - \delta_T)}{Z_0 L^2} x^2 \right]} \right\}_{X_I}^{X_F}}} \qquad [4.48]$$

Les équations [4.43] et [4.48] modélisent le comportement statique de la poutre électromécanique.

Finalement, nous voudrions ajouter que le type d'actionneur utilisant une structure précontrainte, étudié dans cette partie, a trouvé aussi son application dans le préassemblage automatique de microsystèmes [AKS 00].

4.7. Simulations électrostatique et structurelle couplées

Dans les actionneurs électrostatiques que nous avons étudiés, nous avons abordé le couplage entre les domaines électrostatique et structurel de façon analytique. Cette approche permet de maintenir les paramètres du système dans les modèles.

Dans cette partie, nous abordons le couplage des domaines électrostatique et structurel à travers la simulation par éléments finis. La simulation d'un actionneur électromécanique peut s'effectuer de manière séquentielle en utilisant deux logiciels, chacun séparément conçu pour l'analyse électrostatique et pour l'analyse mécanique. Chaque logiciel est exécuté en utilisant comme information d'entrée les données provenant de l'exécution de l'autre outil, les logiciels se communiquent itérativement les données de sortie temporaires jusqu'au moment où les résultats de chaque simulateur satisfont un critère prédéfini.

Nous illustrons la simulation par éléments finis pour le cas d'une poutre micro-usinée montrée dans la Figure 4.26. D'abord, nous présentons un modèle analytique de la poutre, ensuite nous réalisons une simulation couplée avec ANSYS, et finalement, nous comparons les deux modèles.

La Figure 4.26(a) illustre la poutre suspendue sur une cavité formée dans le substrat, par micro-usinage en volume. Dans la Figure 4.26(b) on distingue le substrat de silicium qui forme une première électrode, une couche d'or qui forme la deuxième électrode, et une couche de SiO_2 qui sert d'isolant entre les électrodes. On voit aussi dans le substrat une couche de silicium p+ qui correspond à la couche d'arrêt pour le micro-usinage. Finalement, la Figure 4.26(c) montre un diagramme simplifié de la poutre déjà défléchie où on présente la définition de quelques variables pour l'analyse qui suit.

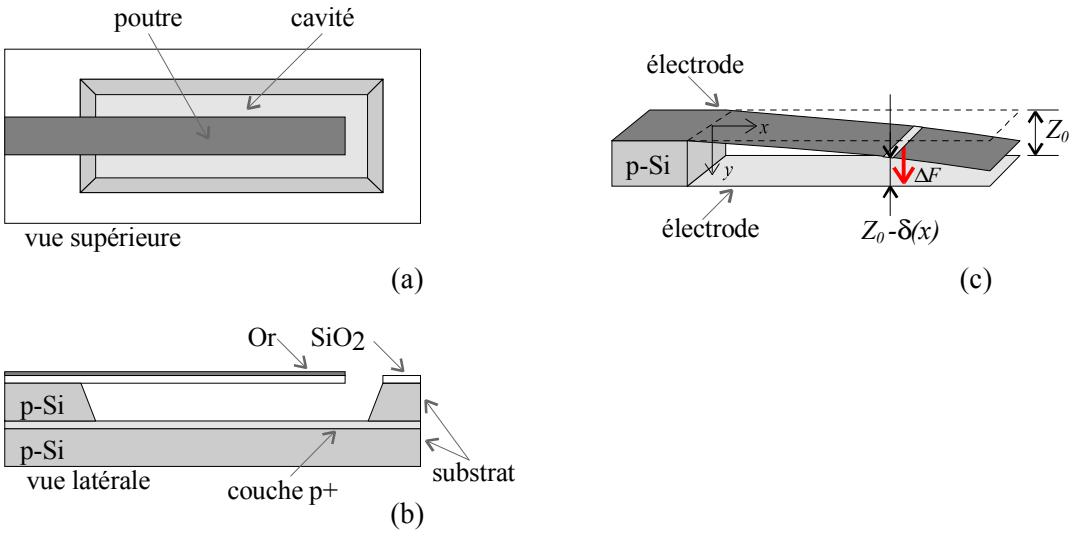


Figure 4.26. Poutre électromécanique micro-usinée: (a) vue supérieure, (b) vue latérale, (c) diagramme simplifié du système avec la définition des variables.

Nous supposons pour la poutre, que l'épaisseur de la couche de SiO_2 est beaucoup plus grande que l'épaisseur de la couche d'or, et que la poutre entière forme un espace équipotentiel. Nous supposons aussi que l'électrode inférieure est plate et qu'elle s'étend depuis $x=0$ jusqu'à $x=L$; cela néglige les effets de l'extension irrégulière de l'électrode du côte gauche, voir Figure 4.26(c). Nous négligeons également les effets de bord du champ électrostatique.

Le modèle analytique s'obtient par couplage des équations électrostatiques et mécaniques. La déformation de la poutre dans l'extrémité libre ($\Delta\delta_T$) due à une force ΔF appliquée verticalement sur une position x de la poutre est donnée par l'équation [4.6] :

$$\Delta\delta_T = \frac{x^2}{6EI_Z}(3L - x)\,\Delta F \qquad [4.49]$$

où I_Z et L sont respectivement le moment d'inertie et la longueur de la poutre, et E correspond au module d'élasticité du SiO_2. D'autre part, l'élément différentiel de force ΔF est donné par :

$$\Delta F = W\,q(x)\,\Delta x \qquad [4.50]$$

où W est la largeur de la poutre, et $q(x)$ est la pression électrostatique sur la poutre. La déformation maximale totale $\delta_T=\delta(x=L)$ s'obtient après avoir substitué l'équation [4.50] dans l'équation [4.49] et par intégration le long de la poutre [PET 78]:

$$\delta_T = W\int_0^L \frac{(3L - x)}{6EI_Z}\,x^2 q(x)\,dx \qquad [4.51]$$

D'autre part, la pression $q(x)$ sur la poutre, due au champ électrostatique produit par une tension V, peut se calculer par la méthode du travail virtuel [SNI 95]:

$$q(x) = \frac{1}{2}\varepsilon\left(\frac{V}{Z_0 - \delta(x)}\right)^2 \qquad [4.52]$$

où ε, Z_0, et $\delta(x)$ sont respectivement la permittivité du milieu, la séparation initiale entre les électrodes, et le déplacement vertical de la poutre.

Pour obtenir un modèle analytique de la poutre excitée de façon électrostatique, il faut simplifier le problème. On peut supposer que la déformation de la poutre $\delta(x)$ est une fonction quadratique de la position longitudinale :

$$\delta(x) \approx \left(\frac{x}{L}\right)^2 \delta_T \qquad [4.53]$$

En substituant l'équation [4.53] dans la [4.52], et l'équation [4.52] dans la [4.51], on obtient une relation entre la tension et la déformation maximale de la poutre.

$$V = \sqrt{\frac{8EI_Z Z_0^3}{\varepsilon W L^4}\left(\frac{\delta_T}{Z_0}\right)^2 \left\{\frac{2}{3\left(1-\frac{\delta_T}{Z_0}\right)} - \frac{1}{\sqrt{\frac{\delta_T}{Z_0}}}\tanh^{-1}\left(\sqrt{\frac{\delta_T}{Z_0}}\right) - \frac{1}{3}\frac{\ln\left(1-\frac{\delta_T}{Z_0}\right)}{\frac{\delta_T}{Z_0}}\right\}^{-1}} \qquad [4.54]$$

Le modèle analytique $V=f(\delta_T)$ donné par l'équation [4.54] contient la géométrie du système et les propriétés des matériaux.

Nous obtenons maintenant le comportement de la poutre à travers une simulation FEM en 2D. La Figure 4.27 illustre un maillage en éléments finis du système, réalisé sur ANSYS, pour une longueur de poutre de 100 µm, une largeur de poutre de 10 µm, une séparation initiale des électrodes de 1 µm, et une épaisseur de poutre de 1µm.

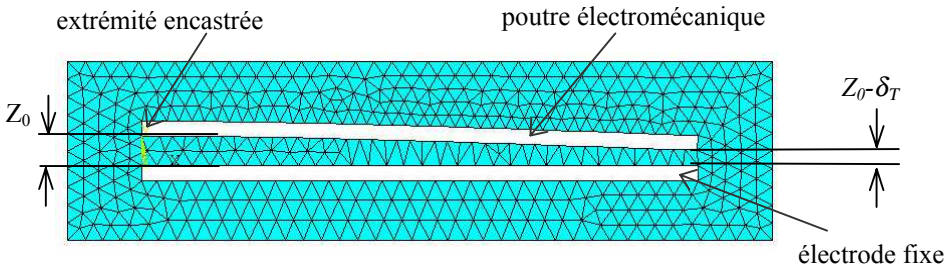


Figure 4.27. Simulation FEM pour une poutre avec excitation électrostatique.

La Figure 4.28 compare les résultats du modèle analytique avec ceux de la simulation par éléments finis. Dans l'intervalle de 0 à 0,5 µm, la différence maximale entre les deux modèles est de 7 %[49].

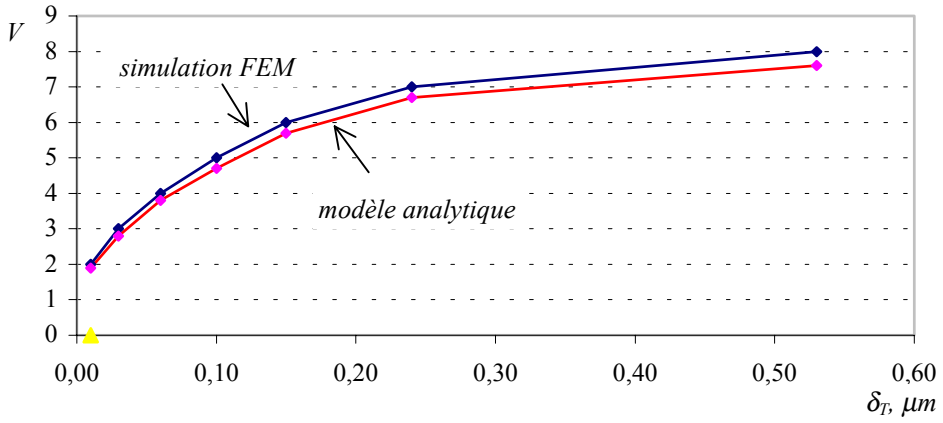


Figure 4.28. Comparaison des résultats du modèle analytique et du modèle d'éléments finis.

Dans le cas de la poutre avec excitation électrostatique, nous avons pu suivre l'approche analytique ainsi que l'approche FEM. Nous observons aussi une bonne correspondance entre les deux modèles obtenus. Dans la pratique, l'approche analytique des analyses mécanique et structurelle couplées n'est pas toujours possible et la modélisation des actionneurs par éléments finis est nécessaire. Par ailleurs, la modélisation des actionneurs électrostatiques par éléments finis permet de prendre en compte les effets non-idéaux des structures micro-usinées.

4.8. Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons étudié plusieurs familles d'actionneurs électrostatiques en vue de leur utilisation dans les commutateurs optiques micro-usinés. Les actionneurs électrostatiques sont d'une part, plus compatibles avec les technologies de micro-usinage que les actionneurs magnétiques, et d'autre part, ils sont plus efficaces que les actionneurs thermiques.

Les actionneurs à plaques parallèles avec déplacement linéaire transversal présentent le problème de la stabilité et sont limités quant à l'intervalle dynamique. D'autre part, les

[49] Nous observons que la limite de stabilité dans cet actionneur (à électrode déformable) est supérieure à celle des actionneurs à plaques parallèles étudiés dans le § 4.3.2. L'intervalle dynamique pourrait aussi être augmenté par l'application de la force électrostatique à une surface limitée de l'électrode mobile qui s'utilise comme point d'appui pour le reste de l'électrode [HUN 99].

actionneurs à plaques parallèles avec déplacement latéral ne présentent pas de problème de stabilité mais leur déplacement maximal est encore limité.

Les actionneurs à plaques avec une électrode giratoire sont limités quant à l'angle maximal de rotation et présentent eux aussi le problème de la stabilité. Cependant, ils sont très attractifs pour les commutateurs optiques, étant donné que seules de très petites rotations sont nécessaires pour défléchir de manière importante les faisceaux lumineux.

Parmi les autres actionneurs examinés, les moteurs rotatifs ainsi que les vibromoteurs linéaires possèdent de grands intervalles dynamiques. D'autre part, les actionneurs à interactions de contact suscitent de l'intérêt parce qu'ils produisent des forces plus grandes que les actionneurs à interactions des champs.

Nous avons obtenu le modèle d'un actionneur qui utilise une poutre précontrainte. Nous utiliserons ce type d'actionneur dans un commutateur optique de test que nous analyserons par cosimulation (§ 5.6).

Par ailleurs, nous avons finalement abordé la modélisation par éléments finis des actionneurs électrostatiques. Nous avons utilisé ANSYS pour la simulation couplée électrostatique-structurelle d'une poutre électromécanique et nous avons trouvé une bonne correspondance entre le modèle FEM et un modèle analytique. Nous évoquerons de nouveau le sujet de la simulation électrostatique-structurelle couplée dans le prochain chapitre (§ 5.3.2).

Dans les chapitres 3 et 4, nous avons étudié indépendamment deux aspects des commutateurs : le comportement optique et le comportement électromécanique. Dans le développement d'un produit réel, ces deux aspects doivent être analysés régulièrement de manière conjointe afin de valider le système globalement. Nous aborderons le sujet de la validation globale dans le prochain chapitre.

Bibliographie

[AKI 93] T. Akiyama, K. Shono, « Controlled stepwise motion in polysilicon microstructures », *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 2, no. 3, pp. 106-110, 1993.

[AKI 97] T. Akiyama, D. Collard, H. Fujita, « Scratch drive actuator with mechanical links for self-assembly of three-dimensional MEMS », *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 6, no. 1, pp. 10-17, 1997.

[AKS 00] V. A. Aksyuk, F. Pardo, C. A. Bolle, S. Arney, C. R. Giles, D. J. Bishop, « Lucent Microstar™ micromirror array technology for large optical crossconnects », in *MOEMS and Miniaturized Systems*, M. E. Motamedi, R. Göring, editors, Proceedings of SPIE, vol. 4178, pp. 320-324, 2000.

[BAR 90] S. F. Bart, M. Mehregany, L. S. Tavrow, J. H. Lang, S. D. Senturia, « Measurements of electric micromotor dynamics », *ASME Microstructures, Sensors and Actuators*, vol. 19, pp. 19-29, 1990.

[BOU 99] T. Bourouina, A. Garnier, H. Fujita, T. Hiramoto, E. Orsier, J. –C. Peuzin, Jean-Claude, « Mechanical characterization of magnetostrictively actuated microresonators », in *Design, Characterization,*

and Packaging for MEMS and Microelectronics, Bernard Courtois, Serge N. Demidenko, editors, Proceedings of SPIE, vol. 3893, pp. 411-420, 1999.

[CHE 99] R. T. Chen, H. Nguyen, M. C. Wu, « A high-speed low-voltage stress-induced micromachined 2x2 optical switch », *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 11, no. 11, pp. 1396-1398, 1999.

[COM 95] J. H. Comtois, V. M. Bright, M. W. Phipps, « Thermal microactuators for surface-micromachining processes », in *Micromachined Devices and Components*, R. Roop and K. Chau, editors, Proceedings of SPIE, vol. 2642, pp. 10-21, 1995.

[COM 97] J. H. Comtois, V. M. Bright, « Applications for surface-micromachined polysilicon thermal actuators and arrays », *Sensors and Actuators A*, vol. 58, pp. 19-25, 1997.

[CRO 02] Cronos Integrated Microsystems, http://www.memsrus.com/.

[CUG 01] O. Cugat, S. Basrour, C. Divoux, P. Mounaix, G. Reyne, « Deformable magnetic mirror for adaptive optics : technological aspects », *Sensors and Actuators A*, vol. 89, pp. 1-9, 2001.

[DAN 96] M. J. Daneman, N. C. Tien, O. Solgaard, A. P. Pisano K. Y. Lau, R. S. Muller, « Linear microvibromotor for positioning optical components », *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 5, no. 3, pp. 159-165, 1996.

[FAN 88] L. –S. Fan, Y. –C. Tai, R. S. Muller, « Integrated movable micromechanical structures for sensors and actuators », *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 35, no. 6, pp. 724-730, 1988.

[FUJ 98] H. Fujita, « Microactuators and micromachines », *Proceedings of the IEEE*, vol. 86, no. 8, pp. 1721-1732, 1998.

[GER 97] J. M. Gere, S. P. Timoshenko, *Mechanics of Materials*, 4th edition, Boston : PWS Publishing Company, 1997.

[HAY 88] W. H. Hayt, *Engineering Electromagnetics*, 5th edition, McGraw-Hill, 1981.

[HUN 99] E. S. Hung, S. D. Senturia, « Extending the travel range of analog-tuned electrostatic actuators », *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 8, no. 4, pp. 497-505, 1999.

[JUD 95] J. W. Judy, R. S. Muller, H. H. Zappe, « Magnetic microactuation of polysilicon flexure structures », *IEEE Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 4, no. 4, pp. 162-169, 1995.

[KRI 00] U. Krishnamoorthy, P. M. Hagelin, J. P. Heritage, O. Solgaard, « Surface-micromachined mirrors for scalable fiber optic switching applications », in *MOEMS and Miniaturized Systems*, M. E. Motamedi, R. Göring, editors, Proceedings of SPIE, vol. 4178, pp. 270-277, 2000.

[LEE 99] S. –S. Lee, L. –S. Huang, C. J. Kim, M. C. Wu, « Free-space fiber-optic switches based on MEMS vertical torsion mirrors », *Journal of Lightwave Technology*, vol. 17, no. 1, pp. 7-13, 1999.

[LIN 94] T. –H. Lin, « Implementation and characterization of a flexure-beam micromechanical spatial light modulator », *Optical Engineering*, vol. 33, no. 11, pp. 3643-3648, 1994.

[MAD 97] M. Madou, *Fundamentals of Microfabrication*, London : CRC Press, chapters 2 and 9, 1997.

[MAR 99] C. Marxer, N. F. de Rooij, « Micro-opto-mechanical 2x2 switch for single-mode fibers based on plasma-etched silicon mirrors and electrostatic actuation », *Journal of Lightwave Technology*, vol. 17, no. 1, pp. 2-6, 1999.

[MEH 90] M. Mehregany, S. F. Bart, L. S. Tavrow, J. H. Lang, S. D. Senturia, M. F. Schlecht, « A study of three microfabricated variable-capacitance motors », *5th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators and Eurosensors III*, *Transducers '89*, vol. 2, pp. 173-179, 1990.

[MIC 95] M. A. Michalicek, D. E. Sene, V. M. Bright, « Advanced modeling of micromirror devices », *Proceedings of the International Conference of Integrated Micro/Nanotechnology for Space Applications*, pp. 214-229, 1995.

[MIL 01] D. C. Miller, W. Zhang, V. M. Bright, « Micromachined, flip-chip assembled, actuatable contacts for use in high density interconnection in electronic packaging », *Sensors and Actuators A*, vol. 89, pp. 76-87, 2001.

[MIN 01] P. Minotti, « Les enjeux scientifiques et industriels de la micromécanique sur silicium », *XVème Congrès Français de Mécanique*, septembre 2001.

[MIN 99] Y. –H. Min, Y. –K. Kim, « Modeling, design, fabrication and measurement of a single layer polysilicon micromirror with initial curvature compensation », *Sensors and Actuators A*, vol. 78, pp. 8-17, 1999.

[MUL 98] R. S. Muller, K. Y. Lau, « Surface-micromachined microoptical elements and systems », *Proceedings of the IEEE*, vol. 86, no. 8, pp. 1705-1720, 1998.

[PAI 00] M. Pai, N. C. Tien, « Low voltage electrothermal vibromotor for silicon optical bench applicatuions », *Sensors and Actuators A*, vol. 83, pp. 237-243, 2000.

[PAI 99] M. Pai, N. C. Tien, « Polysilicon actuated micromirror for large matrix optical cross-connects », *3rd International Conference on Micro Opto Electro Mechanical Systems*, *MOEMS'99*, Mainz, Germany, pp. 30-34, 2000.

[PET 78] K. E. Petersen, « Dynamic micromechanics on silicon: techniques and devices », *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 25, no. 10, pp. 1241-1250, 1978.

[SNI 95] J. J. Sniegowski, and E. J. Garcia, « Microfabricated actuators and their applications to optics », in *Micro-Optics/Micromechanics and Laser Scanning and Shaping*, M. Motamedi, L. Beiser, editors, Proceedings of SPIE, vol. 2383, pp. 46-64, 1995.

[TAB 98] M. Tabib-Azar, *Microactuators – Electrical, Magnetic, Thermal, Optical, Mechanical, Chemical and Smart Structures*, Boston : Kluwer Academic Publishers, 1998.

[TAN 90] W. C. Tang, « Electrostatic comb-drive for resonant sensor and actuator application », Ph. D. dissertation, University of California, Berkeley, CA, 1990.

[TIE 00] N. C. Tien, D. T. McCormick, « MEMS actuators for silicon micro-optical elements », in *MOEMS and Miniaturized Systems*, M. Edward Motamedi, Rolf Göring, Editors, Proceedings of SPIE, vol. 4178, pp. 256-269, 2000.

[TIM 70] S. P. Timoshenko, J. N. Goodier, *Theory of Elasticity*, 3rd edition, New York : McGraw-Hill, 1970.

[YAS 99] A. A. Yasseen, J. N. Mitchell, J. F. Klemic, D. A. Smith, M. Mehregany, « A rotary electrostatic micromotor 1×8 optical switch », *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 5, no. 1, pp. 26-32, 1999.

Chapitre 5

Validation globale de microsystèmes optiques par cosimulation

Les microsystèmes optiques sont des systèmes qui contiennent typiquement des composants électroniques, matériels et logiciels, ainsi que des composants optiques et électromécaniques. Le développement efficace de tels systèmes aussi hétérogènes nécessite un environnement de spécification et de simulation qui facilite la validation globale.

Ce chapitre examinera le flot de conception des microsystèmes optiques qui utilisent des actionneurs électrostatiques et qui présentent la propagation des faisceaux dans l'air. Nous montrerons la *cosimulation multi-langage* comme une méthodologie pour la validation globale de systèmes hétérogènes, et nous appliquerons cette méthodologie dans la conception au niveau système d'un commutateur optique. *SystemC*[50] sera utilisé comme langage de modélisation de systèmes.

La partie 5.1 décrira l'évolution des systèmes intégrés et des outils de la CAO[51]. Dans la partie 5.2, nous analyserons la problématique de la conception de microsystèmes optiques en tant que systèmes hétérogènes. La partie 5.3 examinera les outils qui interviennent dans la conception de microsystèmes optiques et la partie 5.4 étudiera deux méthodologies de validation globale.

La partie 5.5 portera sur les concepts de modélisation de systèmes et de cosimulation sur *SystemC*. Dans la partie 5.6, nous définirons un commutateur optique de base, et nous

[50] *SystemC* est un langage de modélisation à base de C++ conçu pour faciliter la conception au niveau système et l'échange de blocs réutilisables. Ce langage évolue sous le contrôle de la OSCI (*Open SystemC Initiative*), organisation qui rejoint la représentation de compagnies sur les domaines des systèmes embarqués, des semiconducteurs, des blocs IP (*Intellectual Property*), et de la CAO.

[51] CAO : Conception Assistée par Ordinateur.

appliquerons la cosimulation au niveau système pour la validation globale de ce commutateur. Finalement, dans la partie 5.7, nous apporterons les conclusions.

Nous voudrions préciser que le travail présenté dans ce chapitre a été réalisé en collaboration avec le groupe SLS[52] du TIMA, et plus particulièrement avec Gabriela Nicolescu.

5.1. Evolution des systèmes intégrés et des outils de conception

Dans les trois dernières décades du siècle dernier, nous avons pu constater l'essor de la microélectronique. La miniaturisation des transistors a graduellement permis l'intégration monolithique de plus en plus de fonctions électroniques analogiques, numériques et de signaux mixtes.

Un tel développement aussi accéléré des systèmes électroniques matériels n'aurait pas été possible sans une évolution parallèle des outils de la CAO, qui ont progressivement élevé les niveaux d'abstraction. Ainsi, la productivité dans la conception de circuits intégrés s'est accrue quant au nombre de transistors, alors que le nombre de concepteurs par projet ainsi que le temps de développement de produit sont restés à peu prés constants [KIS 95] [COU 98].

A partir des années 90, l'émergence des systèmes embarqués a motivé l'amélioration de la productivité par la réutilisation de modules (blocs IP[53]). Actuellement, des modules DSP, RAM, ROM, MPEG sont couramment intégrés dans une seule puce. Les outils de CAO, quant à eux, sont en train d'évoluer pour faciliter de plus en plus la co-conception de composants matériels et logiciels. Ainsi, la conception de systèmes se tourne vers une spécification du système à très haut niveau d'abstraction, suivie d'un partitionnement en plusieurs modules (matériels ou logiciels) et de la synthèse de chaque module [MAR 00].

Par ailleurs, à la fin du siècle dernier, les bonnes propriétés mécaniques du silicium, connues depuis longtemps [PET 82], ont été finalement exploitées pour la commercialisation d'une grande diversité de microsystèmes électromécaniques ou de MEMS. Très récemment, la fonctionnalité des MEMS a été à son tour étendue grâce à l'inclusion de composants optiques pour engendrer le domaine des microsystèmes optiques ou des MOEMS. Les composants microsystèmes sont de plus en plus intégrés avec des dispositifs électroniques ; dans un futur proche, nous pouvons espérer des systèmes embarqués contenant des composants électroniques, matériels et logiciels, ainsi que des composants microsystèmes [COU 98].

---

[52] SLS : *System Level Synthesis*
[53] IP : *Intellectual Property*.

5.2. Problématique de la conception de microsystèmes optiques

Malgré les outils de simulation qui sont plus ou moins disponibles dans chaque domaine, et malgré les différents outils intégrés récemment développés par plusieurs sociétés [MEM 02] [COV 02] [INT 02], le temps de conception des microsystèmes optiques est encore assez long. Cela est principalement dû à l'hétérogénéité de ce type de systèmes qui rend difficile, la plupart du temps, l'approche de conception *top-down*.

A présent, le cas est fréquent où la conception d'un microsystème optique commence par des simulations de très bas niveau en utilisant des outils spécifiques à chaque domaine. Les outils de simulation spécialisés, chacun typiquement maîtrisé par différents concepteurs, sont capables de reproduire le fonctionnement des composants électroniques, optoélectroniques, électromécaniques et optiques, avec un haut degré de précision, et permettent donc de valider indépendamment le comportement de chaque sous-système. Malheureusement, les différents concepteurs sont trop longtemps concentrés sur des aspects partiels du fonctionnement d'un système. La validation du système complet est souvent réalisée dans une phase assez tardive dans le développement du produit, parfois même à travers le prototypage.

Une stratégie de conception beaucoup plus efficace, consiste à élever le niveau d'abstraction et à valider le plus tôt possible les aspects fonctionnels du système, cela avant de rentrer dans les détails de l'optimisation de chaque composant. Cependant, plus un système est hétérogène, plus la validation globale par simulation devient difficile.

D'un point de vue physique, les microsystèmes optiques sont des systèmes hétérogènes parce qu'ils sont constitués de multiples modules appartenant à des domaines différents (électronique, optique, mécanique). Du point de vue de la conception, les microsystèmes optiques sont aussi hétérogènes pour les raisons suivantes :

- Plusieurs langages sont typiquement utilisés dans la spécification du système. Par exemple, les langages VHDL et C peuvent être utilisés respectivement pour spécifier la partie matérielle et la partie logicielle des systèmes embarqués.
- Plusieurs moteurs de simulation sont fréquemment utilisés dans la conception. Par exemple, les simulateurs ANSYS et Spectre peuvent être respectivement utilisés pour la simulation du bloc mécanique et du bloc électronique d'un système mécatronique.
- Plusieurs niveaux d'abstraction interviennent dans leur représentation. Par exemple, le concepteur d'un certain module peut encapsuler le comportement du reste du système dans un modèle de très haut niveau. Le concepteur peut donc valider son module dans le contexte global. Il peut progressivement raffiner son module en passant d'un niveau d'abstraction supérieur vers un autre niveau inférieur.

A titre d'exemple de microsystème optique très hétérogène, la Figure 5.1 illustre un commutateur avec des actionneurs électrostatiques et la propagation de signaux dans l'air. La zone grisée illustre les différents sous-systèmes qui font partie du commutateur. Le cœur du système est une matrice de miroirs électrostatiques qui est partitionnée en deux blocs : composants électromécaniques et composants optiques.

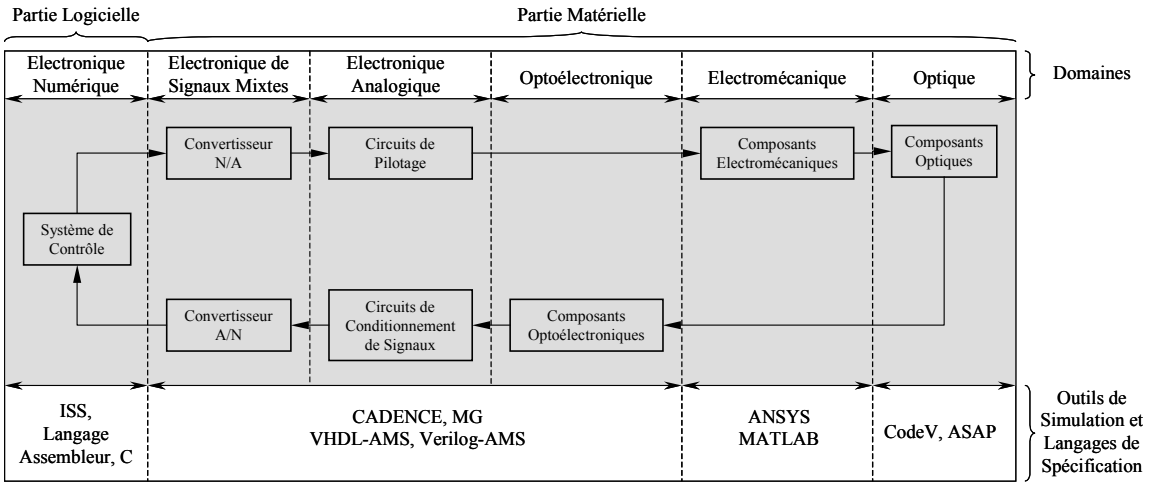


Figure 5.1. Diagramme d'un commutateur optique.

Le bloc de composants optoélectroniques convertit les paramètres des faisceaux lumineux vers le domaine électronique (analogique) ; deux paramètres sont principalement importants : la puissance optique et la longueur d'onde. Les signaux électroniques sont conditionnés et numérisés (blocs de conditionnement de signaux et de conversion A/N) pour les transmettre vers un processeur.

Le système de contrôle commande la reconfiguration du commutateur. En outre, il surveille et contrôle l'efficacité du couplage optique dans les différentes liaisons du commutateur. Le système de contrôle peut s'implémenter de manière logicielle ou matérielle. Pour une implémentation logicielle, on utilise un processeur de propos général dans lequel résident les algorithmes de contrôle.

Les blocs de conversion N/A et des circuits de pilotage réalisent le traitement des signaux sortant du processeur pour qu'ils puissent actionner les miroirs. A présent, les actionneurs électrostatiques nécessitent fréquemment des tensions élevées par rapport aux tensions utilisées par les circuits électroniques.

Le commutateur optique est un système hétérogène, d'une part parce qu'il contient une partie matérielle qui inclut des blocs électroniques, optoélectroniques, électromécaniques et optiques ; et une partie logicielle qui réalise le contrôle du système. D'autre part, le commutateur est aussi un système hétérogène de par sa conception qui fait appel à plusieurs

langages de spécification et à plusieurs outils de simulation, chacun d'entre eux étant plus adéquat à un certain domaine ou à un certain niveau d'abstraction. La Figure 5.1, en bas, montre quelques langages de spécification et quelques outils de simulation séparés par domaine.

La conception de commutateurs optiques ainsi que d'autres microsystèmes hétérogènes a besoin :

- D'outils spécifiques à chaque domaine qui permettent de valider à bas niveau et individuellement les différents modules des systèmes ainsi que de générer des modèles d'ordre réduit pour leur utilisation dans les niveaux d'abstraction plus hauts.
- D'un moyen d'assembler les modèles de tous les modules, et de valider globalement l'opération du système.

Les deux parties suivantes examineront les détails de chacune de ces nécessités.

5.3. Outils de conception spécifiques à chaque domaine

5.3.1. *Simulation de composants électroniques et optoélectroniques*

Les environnements de conception de dispositifs électroniques permettent la spécification et la simulation de composants sur plusieurs niveaux d'abstraction – dispositif, circuit, système.

La simulation de dispositifs est typiquement développée en deux ou trois dimensions. Les dispositifs sont spécifiés comme un modèle géométrique. Ensuite, la simulation est réalisée à partir de la discrétisation des équations différentielles décrivant la physique du dispositif, suivie de l'utilisation d'une technique de différences finies ou d'éléments finis[54]. Ainsi, les distributions spatiales des concentrations de porteurs, du champ électrique, etc. sont obtenues [MOR 96]. Les résultats générés par la simulation des dispositifs sont assez précises. Cependant, les solutions étant obtenues pour plusieurs dimensions (x, y, z, t), le temps de simulation est assez long.

La simulation de circuits est la simulation au niveau de transistors. Les circuits sont spécifiés comme une *netlist* qui contient la topologie ainsi que les paramètres des modèles de chaque composant. Les méthodes de simulation varient en fonction du type d'analyse – DC, AC , Temporelle. Par exemple, la méthode de Newton-Raphson peut être utilisée pour obtenir le point de repos d'un circuit.

[54] La méthode de différences finies discrétise le dispositif en rectangles, alors que la méthode d'éléments finis discrétise le dispositif en formes irrégulières.

La spécification des modules électroniques matériels au niveau système peut se faire au moyen des langages de description matérielle, par exemple VHDL ou Verilog pour les systèmes numériques, et VHDL-AMS ou Verilog-AMS pour les systèmes de signaux mixtes. Ces langages permettent plusieurs niveaux d'abstraction : structurelle, comportemental, flot de données.

La simulation de composants optoélectroniques n'est pas si différente de celle de composants électroniques. En fait, la modélisation de dispositifs optoélectroniques est fréquemment réalisée à partir d'une extension des simulateurs électroniques [MOR 96].

Un outil appelé OE-Spice a été développé à l'université de Toronto [XU 97]. Cet outil permet de modéliser les interactions entre les domaines électronique, optique et thermique. De nouveaux éléments et sous-circuits ont été ajoutés pour représenter divers mécanismes physiques. OE-Spice est principalement conçu pour faciliter la conception de OEIC.

Les langages de description du matériel ont été aussi utilisés pour la modélisation de composants optoélectroniques [LIB 96] [KOH 97] [KOH 98] [JAC 98]. Cette méthode pourrait s'étendre à la conception de systèmes embarqués contenant une partie matérielle (électronique et optoélectronique) et une partie logicielle [JAC 98].

5.3.2. *Simulation de composants électrostatiques*

Dans beaucoup de microsystèmes, le cas est fréquent où les différents domaines intervenant dans le fonctionnement sont couplés. Côté simulation, les variables associées à chaque domaine ne peuvent pas être obtenues indépendamment par l'utilisation de simulateurs d'un seul domaine.

Les actionneurs électrostatiques, particulièrement, présentent le couplage des domaines électrostatique et structurel ; l'application d'un champ électrostatique déforme les électrodes, et le changement de forme des électrodes modifie la distribution du champ électrostatique. La disponibilité d'un simulateur utilisant la méthode d'éléments finis pour le calcul de la déformation et d'un simulateur utilisant la méthode d'éléments frontières pour le calcul du champ électrique ne suffit pas.

Il y a deux méthodes pour aborder les problèmes des domaines couplés : la méthode de relaxation et la méthode de Newton [SEN 98]. Dans la méthode de relaxation, les simulateurs disponibles pour chaque domaine sont utilisés séquentiellement. Chaque simulateur met à jour l'ensemble des variables de son domaine. Après chaque séquence, un test de convergence permet de décider entre réaliser une nouvelle séquence ou bien d'arrêter la simulation. Ce type de couplage entre deux domaines est connu comme couplage faible ou séquentiel [KOH 01]. Le couplage séquentiel permet d'analyser les systèmes multidomaines avec plusieurs

simulateurs spécialisés chacun dans un domaine, cependant les problèmes de convergence sont fréquents.

Dans la méthode de Newton, il y a un seul simulateur qui met au jour de manière simultanée les variables de tous les domaines. C'est ce que l'on appelle couplage fort [KOH 01]. Cette méthode possède une meilleure convergence que la méthode séquentielle, cependant elle nécessite une formulation couplée.

Concernant les actionneurs électrostatiques, la méthode du couplage séquentiel est utilisée par ANSYS [ANS 02]. La méthode du couplage fort, quant à elle, est disponible sur Co-Solve EM [COV 02].

5.3.3. *Simulation de la propagation de signaux lumineux*

Pour la propagation des signaux lumineux dans l'air, nous disposons de plusieurs théories, notamment : l'optique géométrique, l'optique de faisceaux gaussiens, la théorie de diffraction scalaire, et les méthodes vectorielles (voir Figure 5.2). La complexité des algorithmes, la précision des résultats et les exigences des ressources matérielles augmentent normalement de gauche a droite.

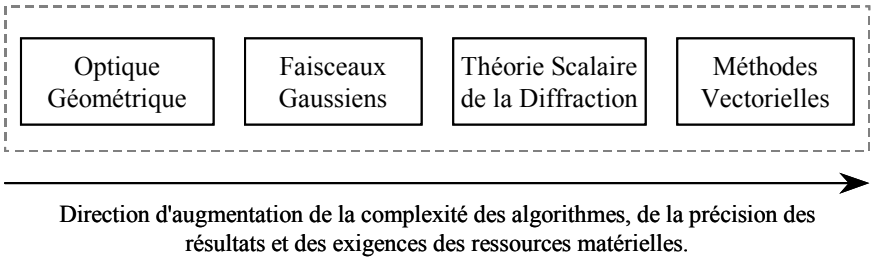


Figure 5.2. Théories de propagation des signaux lumineux.

L'optique géométrique constitue le modèle de propagation le plus simple (§ 3.2.3). Elle permet un calcul rapide de la trajectoire des rayons qui se propagent à travers les éléments optiques. Dans l'approximation paraxiale, un système optique est complètement caractérisé par la matrice de transfert qui transforme la position et l'inclinaison des rayons incidents [SAL 91]. Plusieurs outils de simulation commerciaux utilisent l'optique géométrique : CodeV [ORA 02], Zemax [OPR 02], Oslo [LRC 02], ASAP [BRE 02].

L'optique de faisceaux gaussiens représente un autre modèle de propagation simple. Ce modèle est particulièrement utile dans les systèmes optiques contenant des fibres monomodes, étant donné que le mode fondamental de propagation présente une forme quasi-gaussienne. La transformation d'un faisceau gaussien à travers un système optique est calculée au moyen d'opérations matricielles utilisant la loi ABCD [SAL 91].

Dans l'optique géométrique ainsi que dans l'optique de faisceaux gaussiens, les calculs sont rapides parce qu'il n'y a pas d'opérations d'intégration nécessaires pour l'obtention d'un front d'onde. Dans l'optique géométrique, il n'y a pas le concept de front d'onde alors que dans l'optique de faisceaux gaussiens, la forme du front d'onde est connue et reste inaltérable pendant la propagation du faisceau à travers le système optique. Malgré la simplicité ainsi que la vitesse de simulation de ces deux méthodes, leur utilisation dans le domaine de microsystèmes est limitée étant donné qu'elles ne prennent pas en compte les effets de la diffraction de la lumière.

La théorie scalaire de la diffraction se base sur l'équation de Helmholz (§ 3.2.2). Elle modélise plus précisément la propagation de la lumière pour les systèmes où les dimensions s'approchent de la valeur de la longueur d'onde. La formulation de Rayleigh-Sommerfeld particulièrement, permet la modélisation de la propagation dans les microsystèmes où les dimensions des composants valent quelques longueurs d'onde seulement [KUR 99]. Cependant, le temps de simulation est long, étant données les opérations d'intégration nécessaires.

Finalement, la solution directe des équations de Maxwell (méthode vectorielle) est la méthode la plus précise. Elle modélise correctement la propagation de la lumière même dans les systèmes de dimensions plus petites que la longueur d'onde. Cependant, le temps de calcul est très long et la mémoire nécessaire assez grande. Cette technique s'utilise rarement pour les systèmes avec propagation dans l'air.

5.3.4. *Génération de modèles d'ordre réduit*

Un aspect important pour l'optimisation du temps de conception est la génération de modèles comportementaux. Ces macro-modèles ou modèles d'ordre réduit comme ils sont aussi appelés, décrivent typiquement les aspects fonctionnels des dispositifs. Leur utilisation permet de réduire le temps de simulation. Il y a trois méthodes différentes pour la génération de modèles d'ordre réduit : la méthode expérimentale, la méthode par simulation et la méthode analytique.

Les modèles expérimentaux sont générés à partir de l'ensemble de mesures obtenues directement du système physique alors que les modèles analytiques proviennent d'un développement théorique. Les modèles par simulation, quant à eux, sont obtenus à partir de la simulation du système dans un niveau d'abstraction inférieur.

Les modèles analytiques sont très convenables étant donné qu'ils retiennent typiquement les paramètres physiques du dispositif. Cependant, des simplifications sont souvent nécessaires pour obtenir des solutions explicites. Dans ce cas, les modèles analytiques (approximatifs)

peuvent être validés à partir de la simulation du dispositif dans un niveau d'abstraction inférieur.

Malgré les avantages des modèles analytiques, dans la plupart des cas pratiques, l'obtention de solutions explicites n'est pas possible. La génération de modèles peut donc se faire à partir de mesures obtenues des structures de test, ou bien à partir d'une simulation de plus bas niveau.

Dans le cas de la modélisation optique, l'abstraction du comportement sur des modèles simplifiés est particulièrement importante, étant donné que les méthodes de propagation les plus précis nécessitent des temps de simulation assez longs. A titre d'exemple, les temps de simulation pour les cas présentés dans la partie 3.5, utilisant la formulation de Rayleigh Sommerfeld, varient entre plusieurs minutes et plusieurs heures. Nous avons effectué les simulations sur un PC 800 MHz.

De même que pour la simulation optique, la simulation d'un actionneur électrostatique utilisant les techniques d'éléments finis est longue. Donc, les résultats obtenus par l'analyse couplée électrostatique/structurelle peuvent être utilisés par un «générateur de modèles» pour la création d'un modèle d'ordre réduit.

5.4. Validation globale du système

Traditionnellement, la conception d'un système hétérogène a consisté dans le développement plus au moins indépendant de différents modules pour les assembler plus tard lors de la fabrication d'un prototype. A mesure que les systèmes augmentent en complexité, les risques d'incompatibilités entre les modules augmentent et la validation globale par prototypage devient rapidement inappropriée. Au contraire, la validation globale du système doit se faire par simulation depuis les étapes initiales de la conception et tout au long du flot du développement d'un produit.

Une approche déjà classique pour la validation de systèmes contenant des composants MEMS/MOEMS se base sur les langages de description matériel. Plusieurs équipes, travaillant chacun dans un sous-système différent, développent des modèles sur un langage de description matériel commun. Les modèles sont par la suite assemblés, et le comportement global du système est obtenu en utilisant un seul moteur de simulation. Cette approche est appropriée pour la validation de systèmes essentiellement électroniques avec quelques composants microsystèmes, comme dans plusieurs capteurs sur silicium [CHA 01] [RUF 02]. Dans ce cas, le système est réalisé par un petit groupe de concepteurs, dont quelques uns pluridisciplinaires.

La conception de systèmes hétérogènes plus complexes a besoin de plusieurs équipes de conception spécialisés chacun dans un domaine différent. Donc, l'utilisation d'un seul langage de spécification et d'un seul moteur de simulation n'est pas une méthode de validation efficace parce qu'elle ne profite pas de l'expérience de chaque groupe dans l'utilisation de langages et d'outils de simulation spécialement conçus pour son domaine.

De nouvelles solutions pour la validation globale de systèmes hétérogènes complexes constituent depuis une période récente les enjeux du monde de la recherche académique et industrielle. Une méthode de validation globale en vogue aujourd'hui consiste en l'exécution jointe des différents modules qui constituent le système. Les modules peuvent être représentés sur des langages et niveaux d'abstraction différents, et être exécutés par des moteurs de simulations eux aussi différents. Cette technique est nommée Cosimulation.

A présent, la cosimulation est assez utilisée pour valider les parties matérielles et logicielles des systèmes électroniques embarqués ainsi que l'interaction entre les deux [HIN 97]. De nombreux outils de cosimulation matériel-logiciel existent sur le marché : *Seamless* de *Mentor Graphics* [MEN 01], *Eaglei* de *Synopsys* [SYN 01] et *Coware N2C* de *CoWare Inc.* [COW 01]. Dans le domaine public, plusieurs environnements de cosimulation basés sur *Ptolemy* (Pia [HIN 97], Polis [BAL 97]) ou sur *SystemC* [SEM 00] sont apparus.

Concernant les microsystèmes optiques, à part les composants électroniques matériels et logiciels, l'outil de cosimulation doit incorporer les domaines optique et électromécanique. La cosimulation de microsystèmes optiques utilisant les simulateurs spécialisés déjà existants dans les différents domaines est désirable.

5.5. Cosimulation de systèmes hétérogènes sur *SystemC*

5.5.1. *Spécification de systèmes hétérogènes*

A mesure que la complexité d'un système augmente et que le temps pour la conception se réduit, il devient très important que la spécification du système soit réalisée de façon à éviter une interprétation ambiguë par les différents concepteurs [GER 00].

En général, un système peut être représenté par un ensemble de modèles fonctionnels codifiés sur C ou C++. Les modèles fonctionnels forment un programme que l'on peut exécuter pour émuler le comportement du système.

Le choix des langages C et C++ pour la spécification de systèmes est la conséquence de trois faits [GER 00] :

- Ces langages possèdent les abstractions de contrôle et de données nécessaires pour créer une description compacte et efficace des systèmes.
- Beaucoup de systèmes contiennent une partie matérielle et une partie logicielle, et un de ces langages est fréquemment utilisé dans la conception de la partie logicielle.
- Les concepteurs sont usuellement familiarisés avec ces langages et les outils de développement associés.

Il faut préciser cependant que la création de modèles fonctionnels directement sur C ou C++ est difficile étant donné que ces langages ne possèdent pas les structures nécessaires pour la modélisation du temps, des activités simultanées et de la réactivité. En outre, la modélisation de systèmes directement sur C ou C++ ne facilite pas non plus la réutilisation de composants.

Pour la modélisation du temps, des activités simultanées et de la réactivité, ainsi que pour favoriser la réutilisation et le partage de sous-systèmes, de nouvelles structures de données peuvent être incorporés à C++. Ainsi, les concepteurs déjà familiarisés avec ce langage de programmation deviennent rapidement productifs dans la modélisation de systèmes.

5.5.2. *SystemC comme langage de spécification de systèmes*

SystemC est une extension de C++ qui utilise les *classes* de ce dernier pour définir les structures de données qui facilitent la modélisation de systèmes. Parmi les constructions spéciales de *SystemC*, nous pouvons mentionner [SWA 01]:

- les *modules*
- les *processus*
- les *ports*
- les *signaux*

Les *modules* sont des conteneurs ou des entités hiérarchiques qui peuvent comporter plusieurs autres *modules* ou *processus*. Les modules permettent de découper un système complexe en pièces plus petites et simples, chaque pièce pouvant être créée par un concepteur différent. Les *processus*, quant à eux, sont des structures qui s'utilisent pour la modélisation d'activités parallèles. Ils peuvent se présenter comme des entités autonomes, ils peuvent aussi exister à l'intérieur des *modules*. Les *modules* ainsi que les *processus* sont des entités qui implémentent un comportement ; elles possèdent aussi une interface qui permet d'encapsuler les détails de l'implémentation.

Les *ports* sont les entités à travers lesquelles les modules se connectent, il en existe des monodirectionnels et bidirectionnels. Les *signaux*, quant à eux, transportent l'information à travers les *ports*.

SystemC possède aussi la notion du temps. Ce langage comporte de multiples *horloges* avec des phases arbitraires qui permettent d'ordonner le déroulement des événements ainsi que de synchroniser les *processus*.

Concernant la modélisation de la réactivité, *SystemC* dispose de mécanismes pour attendre des transitions d'*horloge*, des évènements ou des transitions de *signaux*.

SystemC permet la modélisation de systèmes embarqués contenant des parties matérielles et logicielles. Les blocs matériels, les blocs logiciels, ainsi que les interfaces qui les relient peuvent être décrits sur plusieurs niveaux d'abstraction. Ainsi, on peut valider le système à très haut niveau et progressivement raffiner les modèles afin de valider le système à un niveau plus bas. Par exemple, la modélisation de composants matériels peut se faire au moyen de fonctions ou bien dans le style RTL[55], les composants logiciels peuvent être décrits en C ou C++, et les interfaces de communication peuvent se modéliser au niveau de transactions de données ou bien au niveau de cycle d'horloge.

SystemC consiste en un ensemble de fichiers *header* qui contiennent les *classes* ainsi qu'une bibliothèque de liens qui contient le *kernel* de simulation. La Figure 5.3 illustre le flot de conception sur *SystemC* : à gauche nous avons *SystemC*, à droite nous avons les modules qui représentent les différents composants d'un système ainsi qu'un banc de test. Au centre, nous avons l'environnement de développement C/C++ qui permet la compilation et l'édition des liens pour la génération d'un code exécutable qui sert comme simulateur du système.

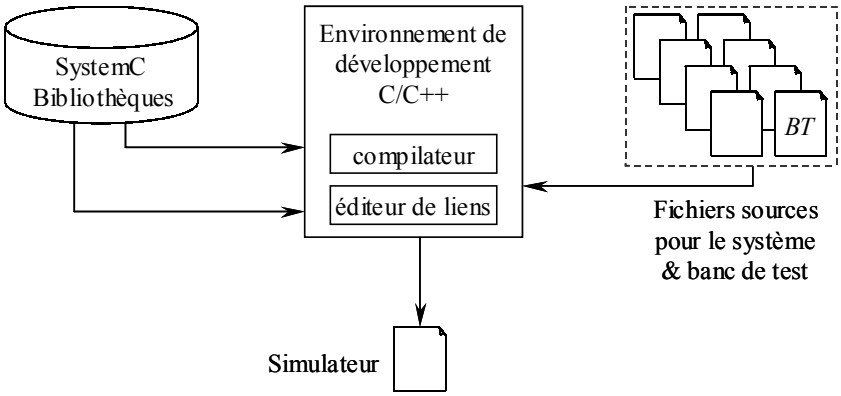


Figure 5.3. Flot de conception sur *SystemC* [GER 00].

5.5.3. *Concepts de base pour la cosimulation sur SystemC*

Nous présentons les principes que nous avons utilisés pour la spécification de systèmes hétérogènes sur *SystemC*, ainsi que pour la génération de modèles exécutables.

[55] RTL : *Register Transfer Level*.

5.5.3.1. Modèle de spécification

Nous représentons un système hétérogène comme une composition de modules hiérarchiques qui possèdent chacun, un comportement ainsi qu'un ensemble de ports. Les modules sont décrits typiquement par différents langages de spécification, et sont interconnectés en reliant leurs ports par des canaux de communication [NIC 02] [KRI 02].

Les modules peuvent appartenir à différents niveaux d'abstraction. Afin de faciliter leurs connections, nous utilisons le concept de capsule [YOO 01]. Une capsule constitue l'interface qui sépare le comportement du module du reste du système. Elle est composée de deux types de ports : ports internes et ports externes. Le concept de capsule permet à l'utilisateur de spécifier rapidement la connexion des modules sans se soucier des conversions de types de données ou de protocoles de communication.

Nous illustrons le concept de capsule dans la Figure 5.4(a). La zone grisée représente la capsule du module 1 décrit sur le langage 1, elle est composée de deux ports internes et de trois ports externes. La Figure 5.4(b) illustre le modèle de spécification d'un système contenant deux modules. Les modules sont encapsulés et reliés au moyen d'un réseau de communication.

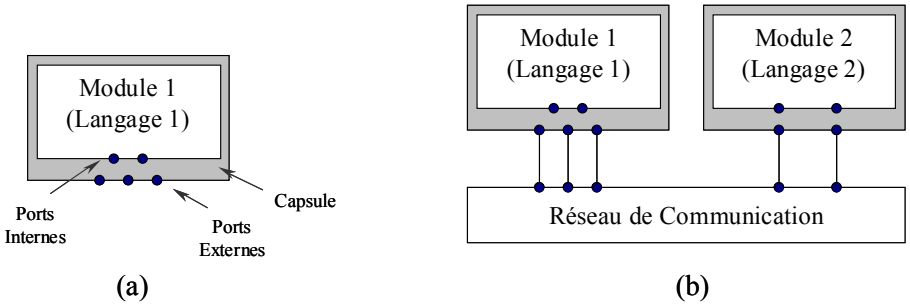


Figure 5.4. (a) Module encapsulé montrant ses ports internes et externes. (b) Le modèle de spécification d'un système contenant deux modules.

5.5.3.2. Modèle d'exécution

Le modèle exécutable du système est obtenu à partir du modèle de spécification par la génération automatique des interfaces de cosimulation. Ces interfaces adaptent :

- les différents environnements de simulation
- les différents niveaux d'abstraction
- les différents protocoles de communication.

Il y a deux types d'interfaces :

- les interfaces de simulateur qui adaptent les différents environnements de simulation au bus de cosimulation, ce dernier implémenté en *SystemC*.
- les interfaces de communication qui adaptent les différents protocoles et niveaux de communication des modules.

La Figure 5.5 illustre le modèle exécutable correspondant au modèle de spécification de la Figure 5.4(b).

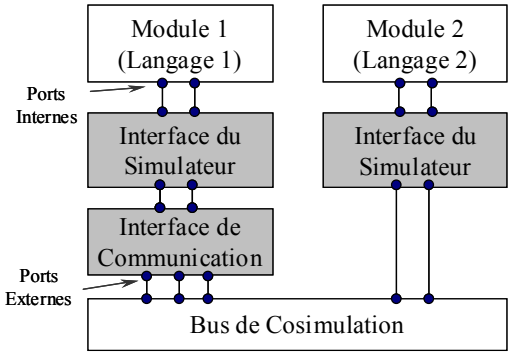


Figure 5.5. Modèle exécutable montrant les interfaces de simulateur ainsi que les interfaces de communication.

L'interface de simulateur est nécessaire pour chaque module dont le comportement est spécifié dans un autre langage que *SystemC*.

L'interface de communication a une architecture générique composée de trois éléments de base [NIC 02]:

- l'adaptateur de module qui fournit aux ports internes (par exemple *fifo port*) les primitives de communication correspondants (par exemple *fifo_write* ou *fifo_read*). Cet adaptateur effectue aussi les conversions de données et la résolution des canaux, cette dernière est nécessaire dans le cas où le nombre des ports internes est différent du nombre des ports externes.
- l'adaptateur du canal qui permet au module d'accéder au canal extérieur ; pour cela, après avoir reçu (via l'adaptateur du module) une demande d'accès au canal, l'adaptateur appelle les services du canal (par exemple *read_hs* dans le cas du protocole *hand_shake*). Un adaptateur du canal est attribué à chaque canal de communication.

– le réseau de communication interne qui permet de transférer les données entre l'adaptateur du module et les adaptateurs du canal. Ce réseau de communication peut être implémenté par des RPC[56].

La Figure 5.6 présente les détails structurels de l'interface de communication du module 1 de la Figure 5.4. Cette interface présente deux ports internes et trois ports externes. L'expansion de cette interface de communication consiste en un module adaptateur qui gère les deux ports internes et trois modules adaptateurs qui gèrent les trois ports externes.

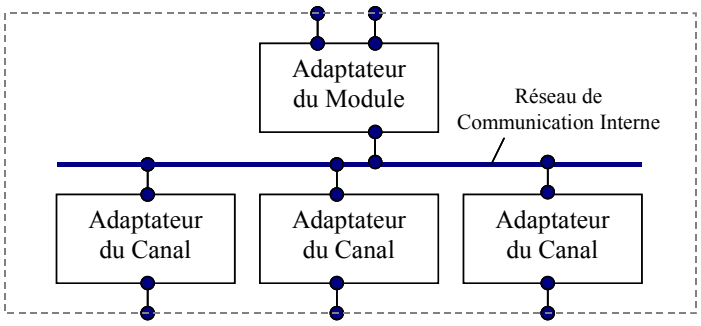


Figure 5.6. Structure interne de l'interface de communication.

5.5.3.3. Génération automatique du modèle d'exécution

Le modèle exécutable du système est généré automatiquement à partir du modèle de spécification et d'une bibliothèque contenant des interfaces génériques. Chaque module décrit dans un autre langage que *SystemC* nécessite une interface de simulation qui consiste en un module *SystemC* encapsulant le simulateur. La communication et la synchronisation entre l'interface et le simulateur sont réalisées au moyen de IPC[57]. Le générateur des interfaces de simulation utilise l'information disponible dans le modèle de spécification : la référence vers la description du comportement du module, la spécification des ports internes (direction, type de données véhiculées, protocole de communication, etc.).

Les interfaces de communication sont obtenues par l'assemblage des adaptateurs de module et des adaptateurs de canal sélectionnés dans la librairie de simulation. Le choix de chaque adaptateur est guidé par les paramètres des ports internes/externes (protocole de communication, direction, type de données transférées, niveau d'abstraction). Les adaptateurs composant les interfaces de communication sont décrits en *SystemC*.

Après avoir créé toutes les interfaces de simulateur et de communications, on génère la routine de plus haut niveau, appelée *sc_main* en *SystemC*. Cette routine connecte tous les

[56] RPC : *Remote Procedure Call*.
[57] IPC : *Inter Process Communication*.

modules et leurs interfaces, elle génère aussi l'horloge et les chronogrammes des signaux. Le fichier *makefile* nécessaire pour la compilation du système obtenu est aussi généré.

5.6. Validation globale d'un commutateur optique par cosimulation

5.6.1. *Définition d'un commutateur optique de test*

Afin d'appliquer les concepts de la cosimulation multi-langage, nous avons défini un commutateur optique que l'on montre dans la Figure 5.7. Le commutateur comporte :

- une matrice de miroirs de 2x2
- deux sources (G1 et G2)
- deux collimateurs (L1 et L2)
- deux lentilles pour focaliser (L3 et L4)
- deux photodétecteurs (D1 et D2)
- un système de commande
- une matrice d'actionneurs électrostatiques de 2x2

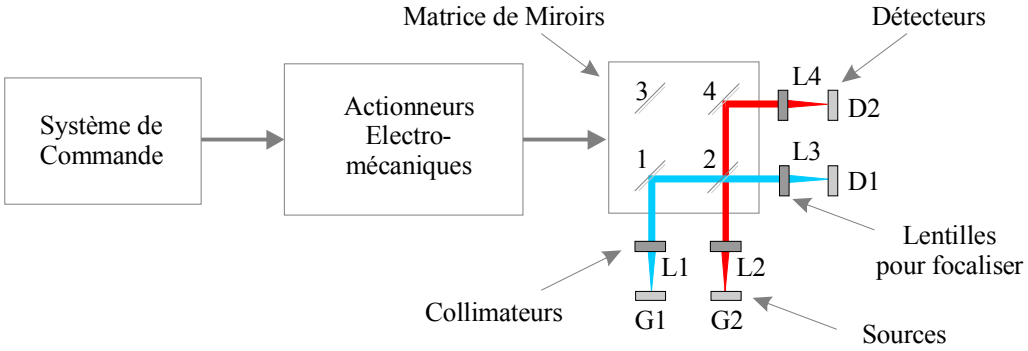


Figure 5.7. Commutateur de test.

Le module optique correspond à une architecture 2D où les faisceaux se propagent tous dans un seul plan (parallèle au plan du substrat). Les lentilles L1 et L2 sont des collimateurs qui limitent la divergence des faisceaux provenant des sources G1 et G2. Les lentilles L3 et L4 focalisent les signaux vers les photo-détecteurs D1 et D2. Les miroirs, quant à eux, sont perpendiculaires au substrat et forment 45° par rapport aux faisceaux lumineux. La Figure 5.7 illustre la fonctionnalité du commutateur. Par exemple, le faisceau sortant de la source G2 est d'abord collimaté par la lentille L2, ensuite reflété par le miroir 4, et finalement focalisé par la lentille L4 sur le détecteur D2.

Le système de commande envoie les signaux électriques pour piloter les actionneurs, qui à leur tour changent l'état des miroirs. Nous supposons que le mécanisme actionneur est comme celui étudié dans le § 4.6.4. Chaque actionneur contient une poutre composée qui présente une déformation initiale due à la contrainte mécanique résiduelle des matériaux. Une électrode est directement placée sur le substrat alors que la poutre même constitue la deuxième électrode. Le miroir, quant à lui, est assemblé en position verticale dans l'extrémité libre de la poutre. Quand une tension est appliquée entre les électrodes, le miroir se déplace vers le bas. Le module actionneur-miroir est schématisé dans la Figure 5.8.

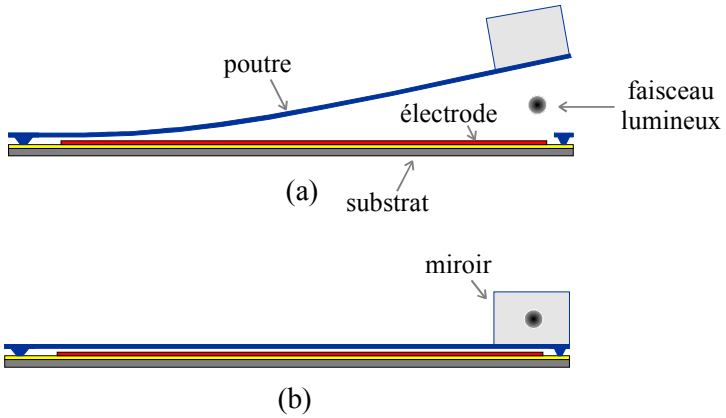


Figure 5.8. Système actionneur-miroir : (a) poutre déformée par la contrainte mécanique résiduelle, (b) poutre déplacée vers le bas par attraction électrostatique.

Les axes de propagation des faisceaux sont parallèles au substrat. D'autre part, la déformation des poutres due à la contrainte mécanique résiduelle est choisie égale à la hauteur des miroirs, et cette dernière est le double en valeur de la position verticale des axes de propagation.

Les miroirs présentent donc chacun deux états de base. Dans un premier état, le faisceau traverse la position du miroir sans changer sa direction de propagation [Figure 5.8(a)]. Dans un deuxième état, idéalement, le miroir réfléchit totalement le faisceau incident [Figure 5.8(b)]. Etant donné que le faisceau incident se propage à 45° du miroir, le miroir change la direction de propagation du faisceau de 90°.

Le commutateur est reconfiguré par l'application de signaux de commande électriques. Les deux états de base pour chaque miroir, schématisés dans la Figure 5.8, représentent les positions dans lesquelles les miroirs restent avant qu'une commande de reconfiguration soit reçue. Autrement dit, ces deux états correspondent aux positions initiale et finale d'un cycle de reconfiguration. Cependant, les miroirs se déplacent dans un espace continu pendant la reconfiguration, et par conséquent, le couplage optique entrée/sortie varie lui aussi dans un intervalle continu.

5.6.2. *Proprieté du commutateur à valider*

L'objectif de ce travail est de créer un modèle exécutable qui émule l'opération du commutateur pendant la reconfiguration. Pour ce faire, le module électromécanique (l'ensemble d'actionneurs électromécaniques), le module optique (l'ensemble formé par les sources, les miroirs, les collimateurs, les lentilles et les détecteurs) ainsi que le système de commande seront cosimulés utilisant chacun un langage de spécification différent.

Les signaux de commande pour les actionneurs électromécaniques seront variés dans un intervalle continu pour obtenir une variation dans le temps des signaux de sortie D1 et D2. Les différents états temporaires des miroirs ainsi que la progression des signaux lumineux reçus par les photodétecteurs seront obtenus par cosimulation.

Afin de mieux visualiser le changement d'état du commutateur, nous avons défini deux sources G1 et G2 différentes. Les sources sont en fait des matrices de faisceaux de 3×3 où chaque cellule peut contenir ou pas un faisceaux gaussien. Les sources G1 et G2 sont illustrées respectivement dans la Figure 5.9(a) et dans la Figure 5.9(b). Nous voudrions insister sur le fait que ces sources ont été définies pour la visualisation des résultats de la cosimulation mais qu'elles ne représentent pas les signaux provenant d'une fibre monomode.

(a) (b)

Figure 5.9. Signaux d'entrée du commutateur optique.

En supposant que les lentilles et les miroirs sont bien dimensionnés, les photo-détecteurs D1 et D2 doivent présenter, dans l'état stable, les images des sources G1 et G2. Les états initial et final du commutateur sont montrés dans la Figure 5.10.

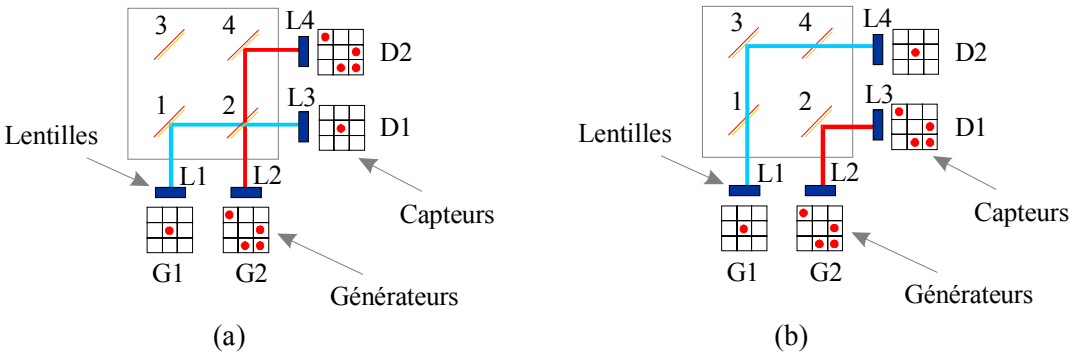


Figure 5.10. Reconfiguration du commutateur de test : (a) état initial, (b) état final.

5.6.3. *Modèle de spécification pour le commutateur optique*

Les modules des sources, des lentilles ainsi que des miroirs proviennent de Chatoyant[58]. Ce sont des modèles C++ qui utilisent une approche géométrique-gaussienne. La position et la direction des centres des rayons sont calculées par les règles de l'optique géométrique (§ 3.2.3), les faisceaux gaussiens (§ 3.2.2.1) sont superposés sur les rayons [LEV 98]. L'avantage de cette méthode de propagation est la vitesse des calculs et l'intégration facile de ces modèles dans l'environnement de cosimulation au niveau système.

L'actionneur électrostatique est spécifié sur MATLAB. Nous avons utilisé un modèle statique discrétisé décrivant la relation entre la tension d'entrée et la déformation de la poutre. Les détails sur la modélisation de l'actionneur électrostatique sont montrés dans le chapitre 4 (§ 4.6.4). Le Tableau 5.1 résume les valeurs typiques des constantes des matériaux et des dimensions de la poutre que nous utilisons ici.

Paramètre	Nom du Paramètre	Valeur typique
E_{B1}	module de Young du poly	169 GPa
E_{B2}	module de Young de l'or	79 GPa
W	largeur de la poutre	200 µm
t_1	épaisseur du poly	1.5 µm
t_2	épaisseur de l'or	0.5 µm
ε	permittivité de l'air	8.85412 pF/m
L	longueur de la poutre	2 mm
Z_0	séparation minimale entre les électrodes	2.75 µm
D	déformation maximale de la poutre @ $V=0$	400 µm
X_I	position longitudinale qui corresponde à l'extrémité gauche de l'électrode inférieure	100 µm
X_F	position longitudinale qui correspond à l'extrémité droite de l'électrode inférieure	2 mm

Tableau 5.1. Nom des paramètres de la poutre mixte et valeurs typiques.

Le modèle discrétisé de l'actionneur provient de l'évaluation des équations [4.43] et [4.48] avec les paramètres du Tableau 5.1. Les résultats sont montrés dans le Tableau 5.2.

[58] Chatoyant est un outil pour la conception de systèmes hétérogènes basé sur *Ptolemy*. Cet outil à été développé par le groupe de S. Levitan à l'Université de Pittsburgh.

Tension d'entrée V	Déplacement Vertical µm
0.0	0
44.96	20
61.03	40
71.59	60
78.97	80
84.13	100
87.53	120
89.49	140
90.17	160
90.18	162
>90.18	400

Tableau 5.2. Fonction de transfert discrétisée de la poutre électromécanique.

Finalement, le système de commande est spécifié directement sur *SystemC*. Le modèle de spécification complet du commutateur optique est schématisé dans la Figure 5.11. Les modules communiquent via des canaux englobant le protocole *hand-shake*. Chaque module du type miroir reçoit des données de contrôle de la part du convertisseur électromécanique, conformément au protocole *fifo*. Les capsules des modules contiennent donc des ports internes spécifiques au protocole *fifo*, et des ports externes spécifiques au protocole *hand-shake*.

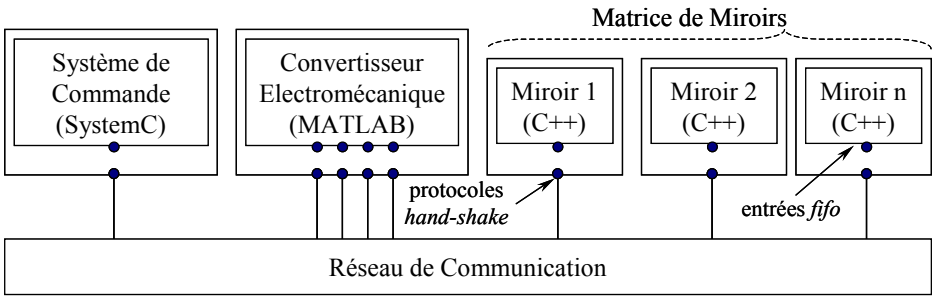


Figure 5.11. Modèle de spécification pour le commutateur optique.

5.6.4. *Modèle d'exécution pour le commutateur optique*

Le modèle exécutable du commutateur optique, généré automatiquement, est schématisé dans la Figure 5.12.

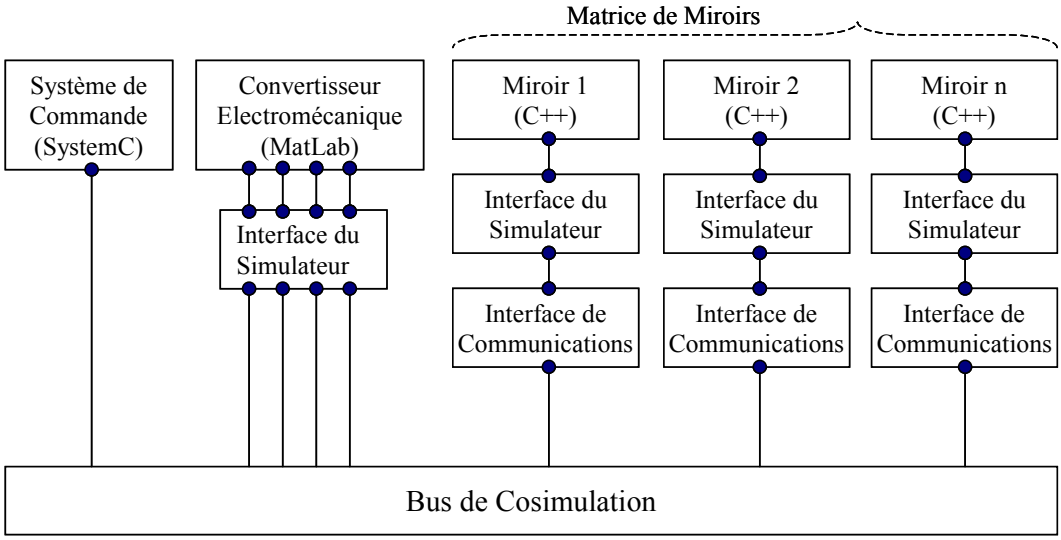


Figure 5.12. Modèle de simulation pour le commutateur optique.

Les interfaces du simulateur pour les modèles C++ de Chatoyant sont des interfaces standard *SystemC* qui encapsulent les codes C++. L'interface du simulateur pour le module de l'actionneur électrostatique adapte le module au bus de cosimulation.

La Figure 5.13 montre le schéma général du commutateur optique à l'aide d'un visualiseur de *SystemC* ; la Figure 5.14 montre le détail du module optique.

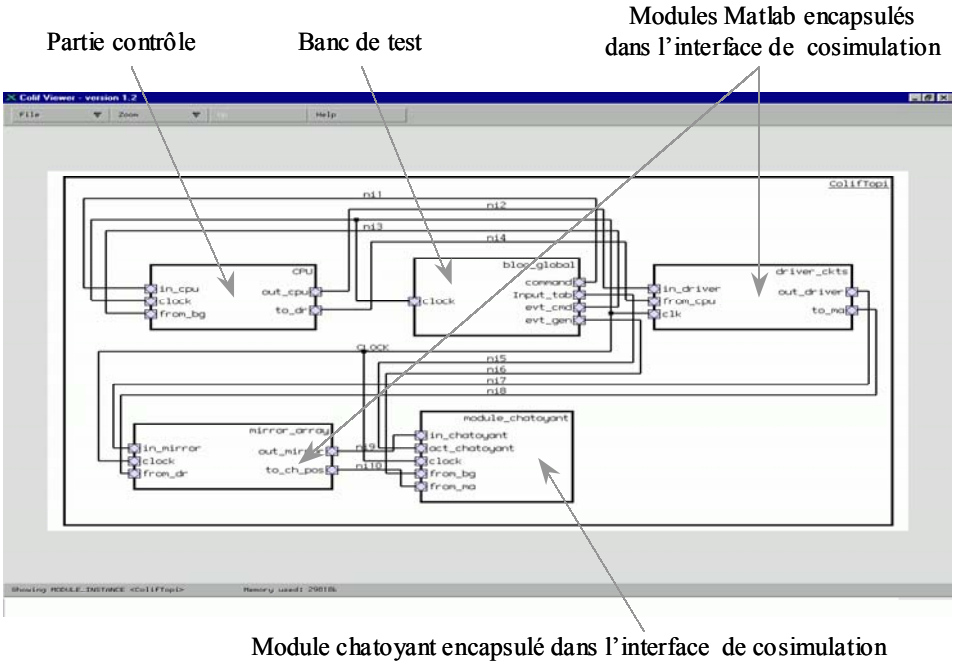


Figure 5.13. Représentation graphique de la spécification initiale du commutateur optique à l'aide d'un visulaliseur de *SystemC*.

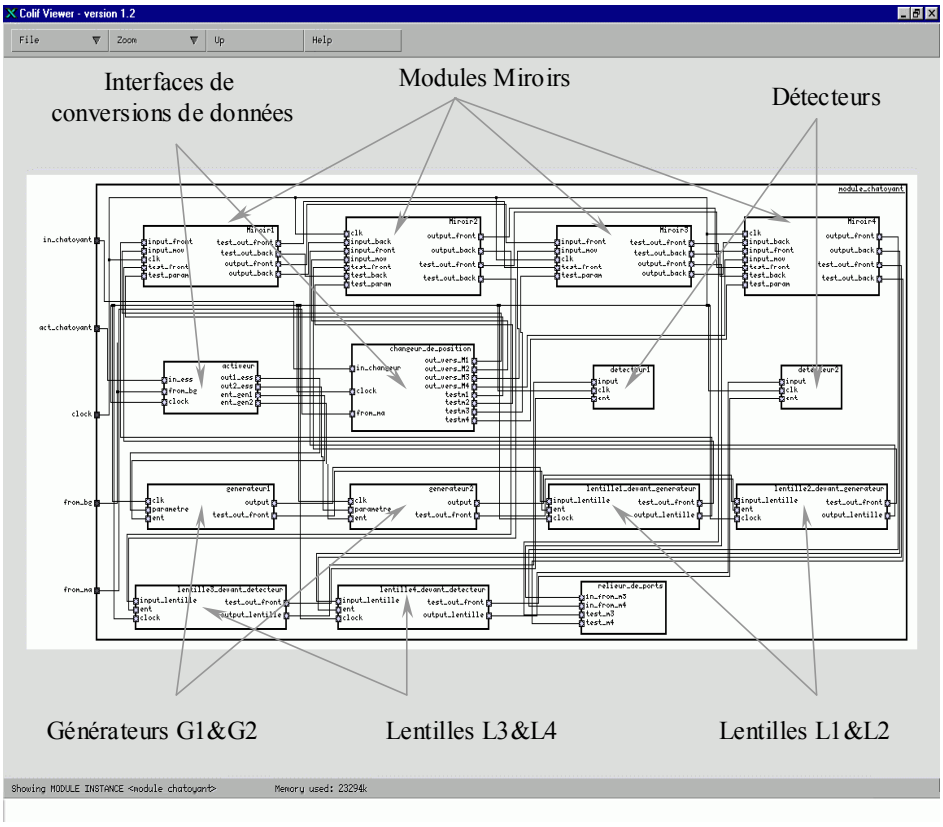


Figure 5.14. Représentation graphique du module optique à l'aide d'un visualiseur de *SystemC*.

5.6.5. *Résultats de la cosimulation.*

Nous avons effectué la cosimulation du commutateur optique sur une station SUN Ultra Sparc 1. Le temps de simulation a été de 30 secondes. La Figure 5.15 présente l'évolution des signaux reçus par les photodétecteurs à mesure que la cosimulation progresse. Initialement, le miroir 1 (voir Figure 5.10) réfléchit le faisceau provenant de G1 vers D1 alors que le miroir 4 réfléchit le faisceau provenant de G2 vers D2. Pendant la simulation, les miroirs changent graduellement leurs positions en conformité avec les consignes envoyées par le système de commande.

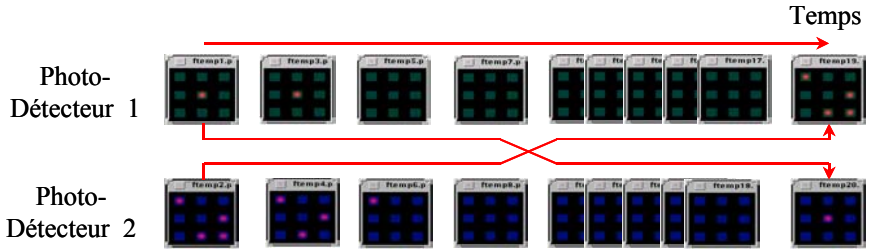


Figure 5.15. Signaux disponibles dans les photodétecteurs dans plusieurs étapes de la simulation.

5.7. Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons révélé l'importance de la validation globale dans la conception de microsystèmes optiques. Être compétitif dans le développement de systèmes aussi hétérogènes nécessite une méthodologie pour la validation globale par simulation depuis les étapes initiales de la conception.

Deux approches de validation globale ont été comparées. La première approche se base sur la spécification de tous les modules du système dans un langage commun. Les modèles sont ensuite assemblés et exécutés par un seul moteur de simulation. Le point faible de cette stratégie est qu'il n'y a pas un langage universel qui soit le plus adéquat pour tous les domaines. La deuxième approche de validation globale réside dans la cosimulation des sous-systèmes, chacun décrit dans un langage et exécuté par un outil qui lui sont plus appropriés. Cette méthodologie profite directement de l'expérience des différents groupes de travail dans l'utilisation des langages et des simulateurs spécialisés dans chaque domaine.

Nous avons appliqué la méthode de la cosimulation à la validation globale d'un commutateur optique de test. Pour ce faire, nous avons utilisé *SystemC* comme langage de modélisation de systèmes. A partir d'une spécification globale du système, nous avons généré les interfaces du simulateur et les interfaces de communication pour les différents modules. Nous avons créé un modèle exécutable que nous avons utilisé pour simuler la reconfiguration d'un commutateur optique.

Dans la cosimulation réalisée, nous avons couplé un module électromécanique spécifié sur MATLAB avec plusieurs modules optiques spécifiés sur C++ et un module de commande spécifié directement sur *SystemC*. Nous avons appliqué la cosimulation pour réaliser une première validation du système à très haut niveau. Par ailleurs, cette méthode de validation peut s'appliquer tout au long du flot de conception à mesure que d'autres modules sont incorporés au système ou que certains modules sont raffinés.

Concernant la modélisation de la propagation optique, nous avons utilisé une technique à base d'optique géométrique et de faisceaux gaussiens, étant donnée la vitesse de simulation de ces méthodes. Nous avons montré dans le chapitre 3, l'application d'une théorie scalaire de la diffraction pour l'analyse des microsystèmes optiques. L'incorporation d'une telle théorie dans l'environnement de cosimulation permettrait d'élargir les aspects de validation globale possibles, par exemple les pertes d'insertion dans un commutateur micro-usiné. Cependant, en tenant compte du temps plus grand de simulation de cette méthode, l'abstraction de la propagation optique sur la forme de macro-modèles s'avère nécessaire.

Les outils de la CAO pour les microsystèmes optiques doivent évoluer progressivement afin de permettre la modélisation de systèmes non-seulement de domaines multiples mais de

niveaux d'abstraction multiples. Ainsi, ces outils vont faciliter la création de modèles exécutables que nous examinerons en tant que prototypes virtuels. Une fois les systèmes validés par simulation de manière exhaustive, on pourra donc procéder avec moins de risques à la fabrication de prototypes physiques, un sujet qui sera traité dans le chapitre prochain.

Bibliographie

[ANS 02] Ansys Inc., http://www.ansys.com.

[BAL 97] F. Balarin, *Hardware-Software Co-design for Embedded Systems*, Boston : Kluwer Academic Publishers, 1997.

[BRE 02] Brault Research Organisation Inc., http://www.breault.com/.

[CHA 01] B. Charlot, F. Parrain, S. Mir, B. Courtois, « A self-testable CMOS thermopile-based infrared imager », in *Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS*, *DTIP'01*, B. Courtois, J. –M. Karam, S. P. Levitan, K. W. Markus, A. A. O. Tay, J. A. Walker, editors, Proceedings of SPIE, vol. 4408, pp. 96-103, 2001.

[CHE 99] R. T. Chen, H. Nguyen, M. C. Wu, « A high-speed low-voltage stress-induced micromachined 2x2 optical switch », *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 11, no. 11, pp. 1396-1398, 1999.

[COU 98] B. Courtois, J. –M. Karam, S. Mir, M. Lubaszewski, V. Székely, M. Rencz, G. Kelly, J. Alderman, A. Morrissey, K. Hofmann, M. Glesner, « CAD, CAT and MPW for MEMS », *Workshop on Synthesis and System Integration of Mixed Technologies*, *SASIMI'98*, pp. 207-219, Sendai, Japan, October 1998.

[COV 02] Coventor, http://www.coventor.com.

[COW 01] Coware, Inc., « N2C », http://www.coware.com/cowareN2C.html.

[GER 00] J. Gerlach, W. Rosenstiel, « System level design using the SystemC modeling platform », *Workshop on Synthesis and System Integration of Mixed Technologies*, *SASIMI'00*, April 6-7, Kyoto, Japan, 2000.

[HIN 97] K. Hinnes, G. Boriello, « Dynamic communication models in embedded systems co-simulation », *Design Automation Conference*, *DAC'97*, pp. 395-400, June 1997.

[INT 02] IntelliSense Corporation, http://www.intellisense.com.

[JAC 98] G. Jacquemod, K. Vuorinen, F. Gaffiot, A. Spisser, C. Seassal, J. –L. Leclercq, P. Rojo-Romeo, P. Viktorovitch, J. –P. Laine, R. Ledantec, T. Benyattou, « Opto-electro-mechanical model for MOEMS », *First International Conference on Modeling and Simulation of Microsystems, Semiconductors, Sensors and Actuators*, Santa Clara, April 6-8, pp. 608-613, 1998.

[KIS 95] P. Kissi, A. Jerraya, « High level specification – electronic design », *IEEE Symposium on Industrial Electronics*, Greece, 1995.

[KOH 01] Ansys Inc, *Theory Manual 001369, Peter Kohnke*, editor, release 5.7, March 2001.

[KOH 97] S. Koh, L. Ye, « Modeling and simulation of optoelectronic multichip modules using VHDL », in *Optoelectronic Integrated Circuits*, Yoon-Soo Park, Ramu V. Ramaswamy, editors, Proceedings of SPIE, vol. 3006, pp. 418-428, 1997.

[KOH 98] S. Koh, « VHDL modeling of optoelectronic interconnect networks », *KAP Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, vol. 16, pp. 111-119, 1998.

[KRI 02] L. Kriaa, W. Youssef, G. Nicolescu, S. Martinez, S. Levitan, J. Martinez, T. Kurzweg, A. A. Jerraya, B. Courtois. « SystemC-based cosimulation for global validation of MOEMS », in *Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS*, *DTIP'02*, B. Courtois, editor, Cannes, May 6-8, 2002.

[KUR 99] T. P. Kurzweg, S. P. Levitan, P. J. Marchand, J. A. Martinez, K. R. Prough, D. M. Chiarulli, « Cad for optical MEMS », *Design Automation Conference*, *DAC'99*, New Orleans, USA, June 20-25, pp. 879-884, 1999.

[LEV 98] S. P. Levitan, T. P. Kurzweg, P. J. Marchand, M. A. Rempel, D. M. Chiarulli, J. A. Martinez, J. M. Bridgen, C. Fan, F. B. McCormick, « Chatoyant: a computer-aided-design tool for free-space optoelectronic systems », *Applied Optics*, vol. 37, no. 26, pp. 6078-6092, 1998.

[LIB 96] V. Liberali, F. Maloberti, A. Regini, « Electro-optical device models for electrical simulators », *KAP Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, vol. 10, pp. 119-132, 1996.

[LRC 02] Lambda Research Corporation, http://www.lambdares.com/.

[MAR 00] P. L. Marrec, « Cosimulation multiniveaux dans un flot de conception multilangage », Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale EEATS, Institut National Polytechnique de Grenoble, juin 2000.

[MEM 02] Memscap, http://www.memscap.com.

[MEN 01] Mentor Graphics, Inc., http://www.mentorg.com/seamless.

[MOR 96] J. J. Morikuni, S. –M. Kang, *Computer-Aided Design of Optoelectronic Integrated Circuits and Systems*, London : Prentice Hall, 1996.

[NIC 02] G. Nicolescu, S. Martinez, L. Kriaa, W. Youssef, S. Yoo, B. Charlot, A. Jerraya, « Application of multi-domain and multi-language cosimulation to an optical MEM switch design », *Asia South Pacific Design Automation Conference*, *ASPDAC'02*, Bangalore, India, January 7-11, 2002.

[OPR 02] Optima Research, http://www.optima-research.com/.

[ORA 02] Optical Research Associates, http://www.opticalres.com/.

[PET 82] K. E. Petersen, « Silicon as a mechanical material », *Proceedings of the IEEE*, vol. 70, no. 5, pp. 420-457, 1982.

[RUF 02] L. Rufer, C. Domingues, S. Mir, « Behavioural modelling and simulation of a MEMS-based ultrasonic pulse-echo system », in *Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS, DTIP'02,* B. Courtois, editor, Cannes, May 6-8, 2002.

[SAL 91] B. E. A. Saleh, M. C. Teich, *Fundamentals of Photonics*, New York : John Wiley & Sons, 1991.

[SWA 01] S. Swan, *An introduction to system level modeling in SystemC 2.0*, © Open SystemC Initiative, http://www.systemc.org/, May 2001.

[SEM 00] L. Sémeria, A. Ghosh, « Methodology for hardware/software coverification in C/C++ », *Asia South Pacific Design Automation Conference*, *ASPDAC'00*, January 2000.

[SEN 98] S. D. Senturia, « CAD challenges for microsensors, microactuators, and microsystems », *Proceedings of the IEEE*, vol. 86, no. 8, pp. 1611-1626, 1998.

[SYN 01] Synopsys, Inc., http://www.synopsys.com/products/hwsw/eagle_ds.html.

[XU 97] J. M. M. Xu, D. S. Ellis, « OE-Spice : A CAD tool for design and simulation of OEIC », Proceedings of SPIE, vol. 3006, pp. 406-417, 1997.

[YOO 01] S. Yoo, G. Nicolescu, D. Lyonnard, A. Baghdadi, A. A. Jerraya, « A generic wrapper architecture for multi-processor SoC cosimulation and design », *CODES*, 2001.

Chapitre 6

Micro-usinage de commutateurs optiques

Ce chapitre traitera des aspects de fabrication des commutateurs optiques micro-usinés à base de miroirs et d'actionneurs électrostatiques. Une partie importante du chapitre examinera les principes associés au micro-usinage en surface de Cronos.

La partie 6.1 étudiera les différentes techniques de micro-usinage disponibles pour la fabrication de commutateurs, particulièrement pour la fabrication de miroirs et d'actionneurs électrostatiques. La partie 6.2 examinera le micro-usinage en surface de Cronos et la partie 6.3 détaillera la fabrication d'un commutateur utilisant cette technologie. La partie 6.4 présentera une analyse des résultats et les conclusions en soulignant les limitations les plus importantes du micro-usinage en surface.

6.1. Techniques de fabrication de commutateurs

Les techniques de micro-usinage appliquées à la fabrication de commutateurs optiques sont assez nombreuses et diverses. Grosso modo, il y a deux grandes techniques de micro-fabrication sur silicium : le micro-usinage en volume et le micro-usinage en surface. En outre, un procédé de fabrication assez répandu, et souvent complémentaire des deux techniques de base mentionnées, est le collage de wafers.

Il faut remarquer que les deux méthodes de fabrication de base se diversifient par l'utilisation de différents types de wafers et de différents types de gravure.

6.1.1. *Gravure humide anisotrope du silicium*

Le micro-usinage en volume du silicium a été utilisé depuis longtemps dans les réseaux optiques, l'application la plus importante étant la fabrication de rainures V pour le positionnement des fibres optiques. Dans ce cas, on utilise la gravure anisotrope au EDP[59], au KOH[60], ou bien au TMAH[61]. Ces substances attaquent plus lentement les plans cristallographiques {111} par rapport aux plans {100} et {110}.

Les rainures V sont fabriquées à partir de wafers (100) de silicium. Pour ce faire, une étape de lithographie est utilisée où le masque contient des motifs rectangulaires orientés le long des directions <110>. Ensuite, la gravure anisotrope du silicium expose les plans {111} qui présentent un angle de 54,74° par rapport au plan du wafer. La profondeur des rainures est bien contrôlée par lithographie dû au fait que les plans {111} peuvent être considérés comme plans d'arrêt pour la gravure.

La gravure anisotrope de wafers (100) de silicium permet aussi la fabrication de cavités en forme de pyramide inversé. Ces cavités sont typiquement utilisées pour le positionnement de lentilles sphériques [DAU 92] [HUA 98] [LEE 99].

En ce qui concerne la fabrication de miroirs sur silicium, la gravure anisotrope est également applicable. Il y a plusieurs orientations possibles pour ces éléments en fonction du type de wafer utilisé et en fonction de l'orientation des ouvertures du masque. Sur un wafer (100), on peut fabriquer des miroirs verticaux sur les plans {100} perpendiculaires à la surface du wafer [ROS 94]. Dans ce cas, la vitesse de gravure de la profondeur est la même que la vitesse de gravure dans les plans des miroirs. Ainsi, la gravure sous le masque est aussi large que la profondeur des cavités. Avec des wafers (100), il est également possible d'exposer les plans {110} qui, formant un angle de 45° avec la surface du wafer, permettent de rediriger un faisceau lumineux qui se propage parallèlement au substrat vers une direction perpendiculaire au substrat ou vice-versa.

Des miroirs verticaux peuvent être aussi fabriqués par gravure anisotrope d'un wafer (110) de silicium [BEA 78] [PET 82]. Les plans {111} sont perpendiculaires à la surface du wafer. D'autre part, le KOH attaque les plans {110} 600 fois plus rapidement que les plans {111} [BEA 78], ce qui rend possible la fabrication de cavités avec une très grand facteur de forme.

Les miroirs fabriqués par gravure anisotrope humide sont donc placés sur certains plans cristallographiques. Les masques doivent être bien alignés par rapport aux axes du cristal pour obtenir les structures désirées. La fabrication de structures un peu plus complexes qu'un

[59] EDP : *Ethylene Diamine Pyrocatechol*.
[60] KOH : *Potassium Hidroxide*.
[61] TMAH : *Tetramethylammonium Hydroxide*.

simple miroir, comme par exemple un miroir avec son actionneur électrostatique, a besoin de techniques plus flexibles.

6.1.2. *Gravure sèche de wafers de silicium*

Une méthode de fabrication de miroirs verticaux, sur wafers de silicium, qui n'a pas besoin d'alignement du masque par rapport aux axes cristallographiques du matériau, combine la gravure sèche et la diffusion d'une couche d'arrêt de gravure type P++ [JUA 96].

Les miroirs se fabriquent sur un wafer type P de 550 µm d'épaisseur. Le wafer est d'abord gravé au KOH avec un masque d'oxyde thermique afin de créer des points d'ancrage de 4 µm. Ensuite, 25 nm de Titane et 5 nm de Nickel sont évaporés sur le wafer. La couche de nickel est gravée après une étape de photolithographie classique. Ensuite, une étape de croissance électrolytique du nickel à travers la résine photosensible est nécessaire afin de former un masque pour la gravure sèche.

Des cavités profondes sont fabriquées par DRIE[62] et postérieurement le masque de nickel est enlevé. Ensuite, une étape de diffusion de bore transforme les structures type P en structures type P++. Une deuxième étape de gravure sèche permet de supprimer la couche P++ dans le fond des cavités.

Le wafer est aminci à 300 µm par gravure au HF/HNO_3 et collé sur un substrat de verre. Ensuite, les structures sont libérées par gravure au EDP utilisant la couche P++ comme couche d'arrêt. Finalement, une couche d'or est déposée pour améliorer la réflectivité du miroir.

Cette technique à été utilisée pour la fabrication monolithique de miroirs avec ses actionneurs électrostatiques à peignes interdigités [JUA 98]. Les miroirs mesurent 50 µm de hauteur et l'électrode mobile est suspendue à une poutre pliée de 800 µm de longueur, 3 µm d'épaisseur et 50 µm de profondeur. Le gap entre les doigts des actionneurs est de 3 µm.

6.1.3. *Gravure de wafers SOI*

Les wafers de SOI[63] permettent aussi la fabrication de structures suspendues au moyen d'une étape de gravure sèche suivie d'une autre étape de gravure humide. La gravure sèche perfore la couche de silicium jusqu'à la couche isolatrice, alors que la gravure humide sert à retirer l'isolant qui fait fonction de couche sacrificielle.

Des commutateurs optiques de deux ports d'entrée et de deux ports de sortie ont été fabriqués par DRIE sur un wafer SOI [MAR 97] [MAR 99]. Cette approche a permis la fabrication d'un

[62] DRIE : *Deep Reactive Ion Etching*.
[63] SOI : *Silicon On Insulator* (silicium sur isolant).

miroir, d'un actionneur électrostatique et des cavités pour l'alignement des fibres, le tout avec un seul masque [voir Figure 6.1(a)].

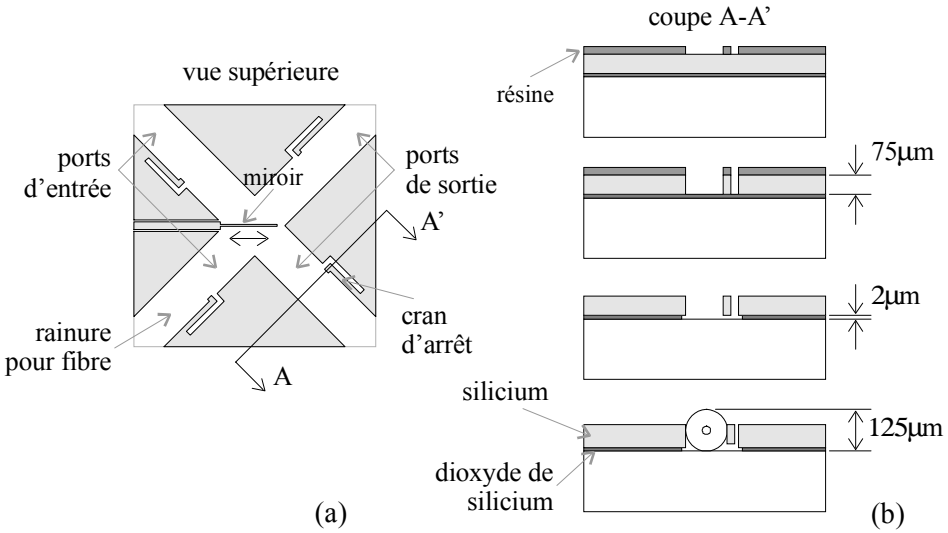


Figure 6.1. Commutateur optique fabriqué à partir d'un wafer SOI : (a) vue supérieure du commutateur montrant le miroir et les rainures pour les fibres, (b) vue en coupe du wafer.

Le procédé de fabrication, illustré dans la Figure 6.1(b), commence par une étape de photolithographie utilisant une couche de résine photosensible épaisse. Ensuite, une étape de gravure avec du plasma permet d'éliminer la couche de silicium de 75 µm. La gravure s'arrête sur le plan de l'isolant. La résine est retirée par la suite et les structures mécaniques sont libérées par gravure humide à l'acide fluorhydrique de l'oxyde isolant. Finalement, une couche d'aluminium est déposée par évaporation pour augmenter la réflectivité du miroir.

Ce dispositif a été conçu pour la commutation de signaux provenant de fibres optiques monomodes, dans lesquelles le cœur et la gaine mesurent respectivement 10 µm et 125 µm de diamètre. Une couche de silicium de 75 µm permettra donc de positionner le cœur de la fibre à une profondeur de 10 µm à 20 µm au dessous de la surface du wafer.

6.1.4. *Micro-usinage en surface*

Le micro-usinage en surface permet aussi de fabriquer des miroirs électrostatiques. Ces miroirs utilisent souvent deux couches mécaniques et une couche de connexions. Le silicium polycristallin est fréquemment utilisé comme matériau structurel alors que le PSG[64] est souvent utilisé comme matériau sacrificiel. D'autre part, une couche de métal sur les structures en silicium polycristallin est typiquement utilisée pour augmenter la réflectivité des miroirs.

[64] PSG : *Phospho-Silicate Glass*.

Des matrices carrées de 16, 64 et 256 miroirs micro-usinés en surface ont été récemment fabriquées [AKS 00], cela pour la commutation de signaux provenant de fibres monomodes. Le diamètre des miroirs est de 500 µm et la séparation entre les miroirs est de 1mm (distance entre les centres de deux miroirs adjacents). Les miroirs sont contrôlés de manière électrostatique par les électrodes qui ont été fabriquées sur le substrat et sous chaque miroir. Chaque miroir est suspendu à un anneau par l'intermédiaire de deux ressorts ce qui permet la rotation du miroir par rapport à l'anneau autour d'un certain axe. L'anneau est attaché à un cadre fixe par l'intermédiaire d'une autre paire de ressorts, ceux-ci permettant à l'anneau de pivoter dans un deuxième axe perpendiculaire au premier (voir Figure 6.2). Le système miroir/anneau/cadre permet deux degrés de liberté.

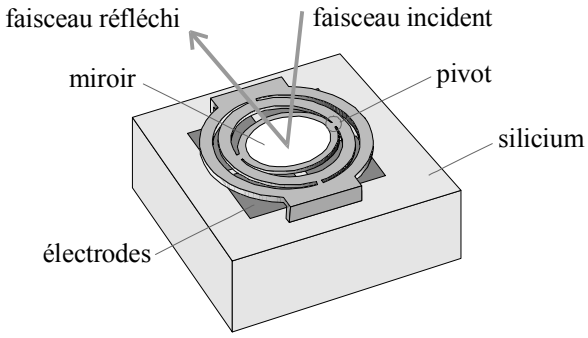


Figure 6.2. Miroir micro-usiné en surface.

Un problème usuel des miroirs micro-usinés en surface est sa limitation sur la plage dynamique. Cela est dû à la faible séparation entre le miroir et le substrat. Une manière d'augmenter l'intervalle possible de rotation des miroirs est de les déplacer verticalement après leur fabrication. Pour ce faire, un système d'actionneurs qui permet, après la gravure des couches sacrificielles, de soulever les miroirs 50 µm au dessus des électrodes a été conçu [AKS 00].

6.2. Micro-usinage en surface de Cronos

Le procédé de prototypage de microsystèmes MUMPS[65] offert par Cronos est un procédé de micro-usinage en surface de propos général. Ce procédé a été généré à partir de travaux précédents réalisés au *Berkeley Sensors and Actuators Center* (BSAC) à la fin des années 80 et au début des années 90. L'évolution des procédés de Berkeley vers la technologie MUMPS a été motivée par l'idée de créer une plate-forme flexible pour le développement de microsystèmes.

[65] MUMPS : Multi-User Microsystem Process.

Nous décrivons brièvement la technologie MUMPS que nous avons utilisée pour la fabrication d'un commutateur optique. Les idées présentées ici se focalisent exclusivement sur les aspects de la technologie et les techniques de conception ayant un rapport à la fabrication de commutateurs optiques.

Le procédé de fabrication MUMPS s'effectue sur un wafer type N de 100 µm d'épaisseur, le wafer étant fortement dopé dans la surface, avec du phosphore ; cela au moyen d'une diffusion thermique. Un substrat très dopé constitue un très bon plan de masse pour les dispositifs électrostatiques.

Une couche de nitrure de silicium de 0.6 µm est déposée sur le substrat par LPCVD[66]. Le nitrure est typiquement utilisé comme couche électriquement isolatrice, soit pour isoler les composants microsystèmes du substrat, soit pour isoler distinctes structures déposées sur le nitrure. La gravure accidentelle du nitrure peut occasionner des courts-circuits à travers le substrat. Cependant, quelques méthodes sont utilisées pour graver délibérément la couche de nitrure permettant ainsi la fabrication d'un plot de substrat du même côté que le microsystème.

Une couche de silicium polycristallin (poly0) de 0.5 µm est déposée par LPCVD. Ensuite, une séquence de lithographie et de gravure RIE[67] (associée au masque POLY0) est utilisée pour le transfert de motifs sur la couche poly0. Les motifs fabriqués en poly0 restent fixes au substrat à la fin du procédé de fabrication, constituant typiquement soit des pistes électriques, soit des barrières électrostatiques.

Une couche de PSG de 2.0 µm appelée *premier oxyde* est déposée par LPCVD. Le premier oxyde constitue une couche sacrificielle qui sera retirée à la fin du procédé de fabrication afin de libérer les structures mécaniques. Le premier oxyde subit deux séquences de lithographie et de gravure, la première séquence (associée au DIMPLES) a pour but la formation de cavités de 0,75 µm de profondeur, alors que la deuxième séquence (associée au masque ANCHOR1) effectue la perforation entière de la couche d'oxyde. Normalement, les deux sortes de cavités seront remplies par la première couche structurelle de silicium (poly1) déposée ultérieurement.

Les cavités créées sur le PSG utilisant le masque DIMPLES servent à introduire des irrégularités (des fossettes) dans la première couche structurelle, plane autrement; cela réduit le problème de collage de cette couche structurale contre le substrat, après la gravure de la couche sacrificielle. Le masque ANCHOR1, quant à lui, permet la formation de points d'ancrage pour les structures fabriquées en poly1 ; ainsi on peut relier les structures en poly1 soit aux structures en poly0, soit au nitrure. Etant donné qu'aucune couche dans la

[66] LPCVD : Low Pressure Chemical Vapor Deposition.
[67] RIE : Reactive Ion Etching.

technologie MUMP est aplanie, chaque nouvelle couche déposée reproduit le profil de la pile de couches se trouvant dessous. Les cavités formées par les masques DIMPLES et ANCHOR1 dans le premier oxyde représentent donc la possibilité de créer des profils particuliers dans les couches structurelles.

Une première couche structurelle de silicium polycristallin de 2 µm (poly1) est déposée. Par la suite, une couche de PSG de 200 nm est aussi déposée. Le wafer est recuit à 1050 °C ; ce procédé thermique sert d'une part, à doper la couche poly1 avec le phosphore disponible dans les couches de PSG. D'autre part, recuire le wafer permet de réduire la contrainte mécanique résiduelle de la première couche structurelle. Ensuite, la couche de PSG de 200 nm est gravée et utilisée comme masque pour la gravure de la couche poly1. A la fin du procédé de fabrication, quand l'oxyde sacrificiel est retiré, les composants en poly1 sont, soit libérés du substrat, soit ancrés en lui. Les structures en poly1 suspendues sont séparées du substrat d'une distance équivalente à l'épaisseur du premier oxyde (2 µm).

Une couche de PSG de 0,75 µm appelée *deuxième oxyde* est déposée. Ensuite, une séquence de lithographie et de gravure (associée au masque POLY1_POLY2_VIA) sert à créer les vias dans le deuxième oxyde qui serviront à relier les structures en poly1 avec une deuxième couche structurale (poly2) à déposer ultérieurement. Par la suite, une autre séquence de lithographie et de gravure (associée au masque ANCHOR2) est utilisée pour perforer les deux couches d'oxyde ; cela permet de créer des points d'ancrage pour la deuxième couche structurale, soit sur poly0, soit sur la couche de nitrure.

Maintenant, la deuxième couche structurale de silicium polycristallin (poly2) est déposée. Ensuite, une couche de 200 nm de PSG est aussi déposée. Le wafer est recuit à 1050 °C pour doper la deuxième couche structurale ainsi que pour réduire la contrainte mécanique résiduelle de cette couche. La couche de poly2 subit une séquence de lithographie et de gravure (associée au masque POLY2). A la fin du procédé de fabrication, les structures en poly2 sont, soit ancrées au substrat, soit ancrées au poly1. Les structures de poly2 ancrées au substrat peuvent servir de barrières pour maintenir sur place les structures en poly1 libérées du substrat ; ce type de barrières est typiquement utilisé dans les moteurs, et dans les actionneurs contenant des éléments glissants. Des structures de 2,75 µm d'épaisseur peuvent être créées par dépôt de poly2 sur poly1 en utilisant le masque POLY1_POLY2_VIA. La forme des structures est donc définie par le masque POLY2. Les structures épaisses permettent d'augmenter la force dans certains types d'actionneurs électrostatiques, par exemple dans les actionneurs à peignes interdigités.

Ensuite, le wafer est recouvert de résine photosensible qui est gravée (utilisant le masque METAL). Une couche d'or de 0,5 µm est déposée et sélectivement gravée par *lift-off*. La couche métallique est utilisée soit pour fabriquer des miroirs, soit pour fabriquer des pistes à

basse résistance électrique. Dans la technologie MUMPS, le métal est toujours mieux déposé sur poly2 que sur poly1.

Le procédé de MUMPS se termine par le dépôt d'une couche protectrice d'oxyde, et la découpe des puces.

Le Tableau 1 résume les différentes couches de la technologie MUMPS indiquant l'épaisseur et les niveaux de lithographie associés à chacune. Les niveaux *HOLE0*, *HOLE1*, *HOLE2* et *HOLEM* n'ont pas besoin de masques additionnels ; ces niveaux sont incorporés respectivement aux niveaux POLY0, POLY1, POLY2 et METAL pour la génération de quatre masques uniquement. Les premiers quatre niveaux ont été définis pour faciliter la conception du *layout*. Ils apportent une manière facile de synthétiser des trous dans les couches de silicium polycristallin et dans la couche d'or, une tâche assez courante dans la conception de microsystèmes. Par exemple, les perforations sont typiquement nécessaires dans les grandes structures pour faciliter la gravure de l'oxyde sacrificiel. Des matrices à trous définies par les niveaux *HOLE1*, *HOLE2* et *HOLEM* produisent les raccourcis nécessaires pendant la gravure à l'acide fluorhydrique.

	Matériau	**Epaisseur**	**Nom des niveaux de lithographie**
♦	nitrure de silicium	0,6 µm	-
♦	silicium polycristallin	0,5 µm	POLY0, *HOLE0*
♦	PSG	2,0 µm	DIMPLE, ANCHOR1
♦	silicium polycristallin	2,0 µm	POLY1, *HOLE1*
♦	PSG	0,75 µm	POLY1_POLY2_VIA, ANCHOR2
♦	silicium polycristallin	1,5 µm	POLY2, *HOLE2*
♦	or	0,5 µm	METAL, *HOLEM*

Tableau 6.1. Niveaux de lithographie de la technologie MUMPS.

Les différentes couches de la technologie MUMPS sont illustrées dans la Figure 6.3 ; nous ne montrons pas les trous dans les structures de silicium polycristallin. Le profil illustré présente des points d'ancrage à la couche de nitrure ainsi qu'à la couche de poly0 ; ces points d'ancrage sont créés par le masque POLY1 (fusion des niveaux POLY1 et *HOLE1*). Des points d'ancrage pour poly2 au nitrure et au poly0 sont aussi montrés, ils ont été créés par le masque POLY2 (fusion des niveaux POLY2 et *HOLE2*). Nous montrons aussi une via poly1-poly2. A droite il y a une structure d'or sur poly2. Afin d'éviter la discontinuité de la couche d'or, il ne faut pas déposer le métal sur un profil trop abrupt.

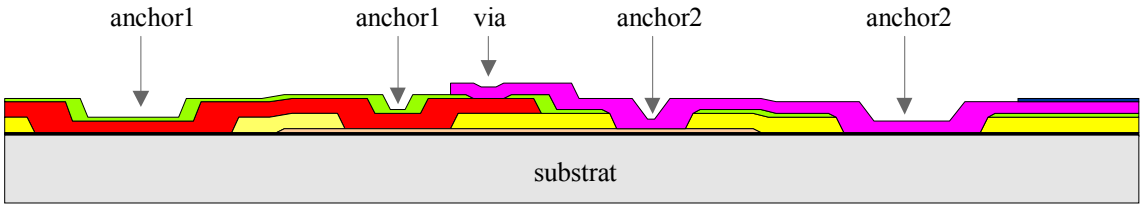


Figure 6.3. Profil des couches dans la technologie MUMPS.

En ce qui concerne la libération des structures mécaniques, les puces de MUMPS sont d'abord trempées dans l'acétone pour enlever la couche de résine de protection. Les structures mécaniques sont après libérées par gravure à l'acide fluorhydrique à 49 % pendant 2,5 minutes. Ensuite, nous rinçons les puces avec de l'eau distillée. Finalement, les puces sont trempées dans de l'alcool pour les laisser sécher dans un four à 120 °C.

6.3. Fabrication d'un commutateur en technologie MUMP/Cronos

Nous présentons les détails de la fabrication d'un commutateur optique de 4×4 ports. Le commutateur a été fabriqué en technologie MUMPS et consiste en une matrice de réflecteurs en architecture 2D (§ 3.1.1). Les miroirs sont capables de pivoter depuis une position horizontale (état de repos) vers une position verticale (état actif). Pour ce faire, un actionneur électrostatique à interactions de contact a été choisi (§ 4.6.2). La Figure 6.4(a) illustre le schéma général du commutateur et la Figure 6.4(b) montre une vue d'ensemble du commutateur fabriqué. Ce concept de commutateur a été inspiré par les travaux de L. Lin et al. [LIN 98] [LIN 99].

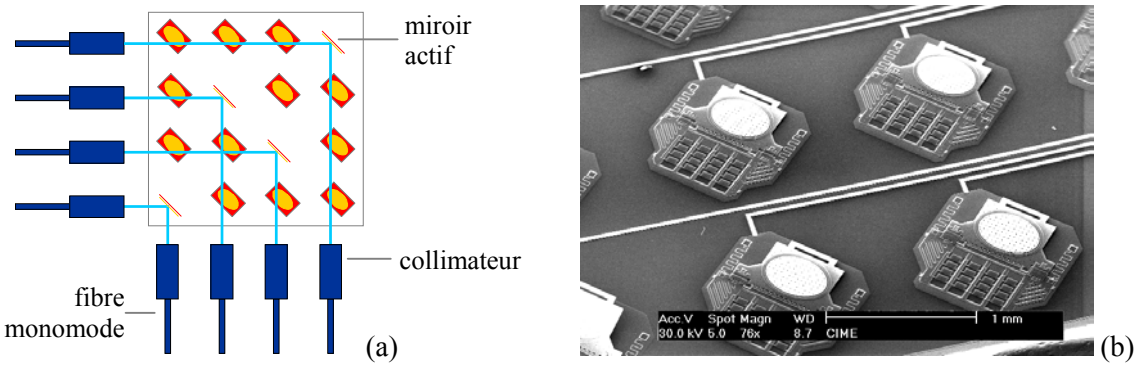


Figure 6.4. Commutateur optique : (a) schéma général du commutateur, (b) vue d'ensemble du commutateur fabriqué.

6.3.1. *Conception des miroirs*

Les miroirs sont de forme éliptique et mesurent 400 µm × 283 µm. Ils sont constitués d'une plaque de poly2 recouverte d'une couche d'or. Cette structure est suspendue à un cadre en poly1 [voir Figure 6.5(a)]. Nous avons prévu des trous pour faciliter la gravure de la couche sacrificielle [voir Figure 6.5(b)]. Les trous sur poly2 sont de 3 µm × 3 µm avec un espacement de 30 µm. Les trous d'or prévus entourent les trous de poly2 par 2 µm en accord avec les règles de conception de la technologie MUMPS.

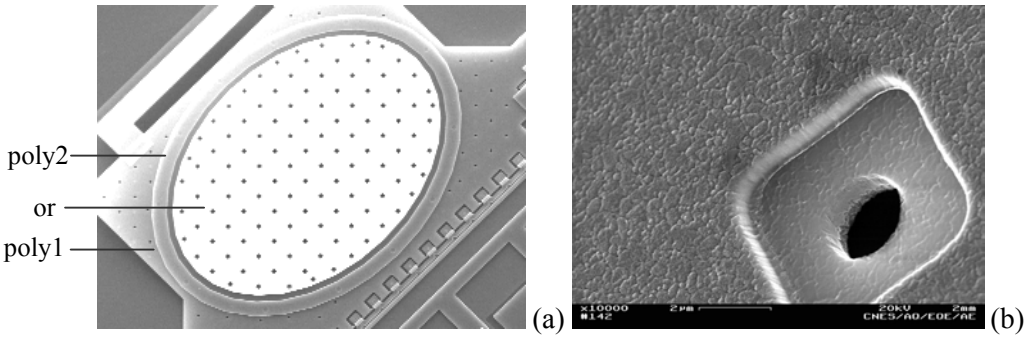


Figure 6.5. (a) Plaque du miroir, (b) détail d'un trou pour la gravure de la couche sacrificielle.

La technologie MUMPS ne possède pas des étapes d'aplanissement des oxydes sacrificiels, donc le relief des couches inférieures sous la surface du miroir doit être évité (§ 3.4.4). Nous n'avons pas eu de problèmes pour satisfaire cette condition, étant donné que le mécanisme actionneur a été placé à côté du miroir, et non-pas en dessous comme certains autres cas le demandent[68]. Par contre, la surface des miroirs présente une rugosité appréciable après la libération des structures mécaniques (voir Figure 6.6).

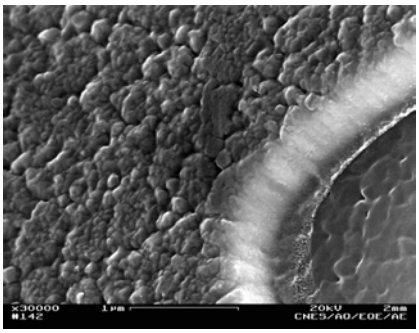


Figure 6.6. Rugosité de la surface d'un miroir. A droite, détail d'un trou pour la gravure de la couche sacrificielle.

[68] Dans certains commutateurs électrostatiques, il est nécessaire de placer des électrodes dessous la plaque du miroir qui fonctionne aussi comme électrode. Dans ce cas, une technologie avec une couche sacrificielle aplanie est nécessaire.

6.3.2. *Conception du système d'actionnement*

L'actionneur électrostatique consiste en fait d'une matrice d'actionneurs à interactions de contact. Les actionneurs sont accrochés à une plaque glissante qui est reliée, à son tour, à la plaque du miroir au moyen de charnières suspendues. La plaque du miroir, quant à elle, est accrochée au substrat sur une extrémité au moyen d'une autre charnière appelée *charnière de substrat*. Afin de pivoter le miroir depuis sa position de repos vers sa position active, un signal électrique alternatif est appliqué. Les actionneurs se déplacent linéairement jusqu'à un point d'arrêt défini par la lithographie (§ 6.3.2.3).

Pour faire revenir le miroir depuis la position active à la position de repos, deux ressorts sont prévus. Les ressorts sont accrochés par une extrémité à la plaque glissante ; par l'autre extrémité, ils sont ancrés sur le substrat. La Figure 6.7 montre les différents éléments qui forment le mécanisme actionneur et comment ces éléments sont reliés à la plaque du miroir.

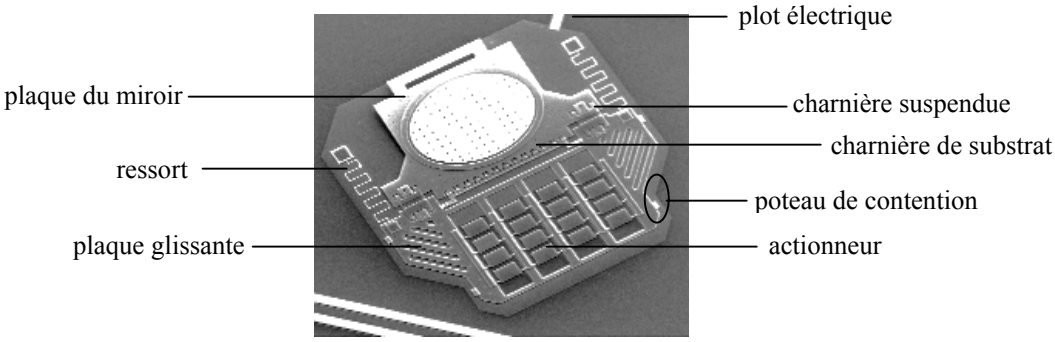


Figure 6.7. Eléments formant le système d'actionnement.

6.3.2.1. Charnière de substrat.

La charnière qui maintient la plaque du miroir accrochée au substrat est constituée d'une structure en poly2 ancrée sur poly0 ; le gond est formé sur poly1 faisant partie de la plaque du miroir (voir Figure 6.8). La largeur du gond choisie est de 2 µm pour faciliter sa rotation. Le jeu de la charnière dans la direction verticale est d'environ 2,75 µm ce qui correspond à l'épaisseur jointe des deux couches sacrificielles. D'autre part, le jeu dans la direction horizontale est à peu près 1,5 µm, c'est à dire deux fois l'épaisseur du deuxième oxyde. Etant donné que la largeur et l'épaisseur du gond sont identiques, les jeux horizontal et vertical sont indépendants de l'état du miroir. Le jeu vertical de la charnière quand le miroir se trouve dans sa position active, pourrait être réduit avec un gond un peu plus large mais cette condition augmente le jeu dans la direction horizontale.

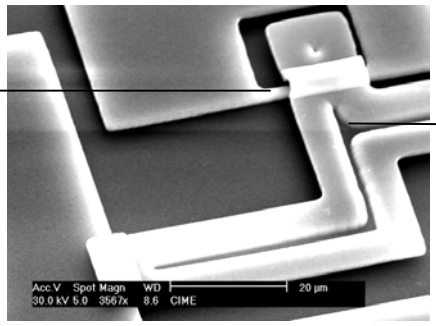


Figure 6.8. Charnière de substrat.

En utilisant le masque DIMPLES, nous avons prévu des fossettes dans l'armature du miroir afin d'éviter, après la gravure, le collage de cette plaque contre le substrat.

6.3.2.2. Plaque glissante et charnières suspendues.

La plaque glissante est conçue pour se déplacer linéairement et parallèlement au substrat. Elle est fabriquée en poly1 et son mouvement latéral est limité par des poteaux en poly2 [voir Figure 6.9(a)]. Nous avons profité du relief de la deuxième couche sacrificielle pour assurer un jeu de seulement 0,75 µm entre la plaque glissante et les poteaux.

Une paire de charnières suspendues est utilisée pour relier la plaque du miroir à la plaque glissante [voir Figure 6.9(b)]. Ces charnières contiennent plusieurs éléments en poly1 et en poly2. La structure principale en poly2 a été étendue vers les deux côtés afin de réduire le jeu mécanique.

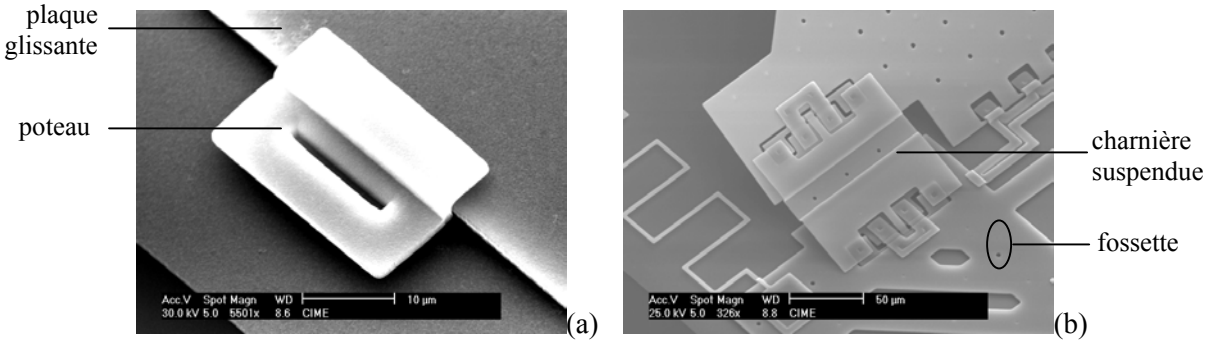


Figure 6.9. Eléments divers : (a) poteau de sujétion, (b) charnière suspendue.

Autant que pour la plaque du miroir, nous avons prévu des fossettes dans la plaque glissante [voir Figure 6.9(b)].

6.3.2.3. Matrice de SDA

Le cœur du mécanisme actionneur est une matrice de SDA (§ 4.6.2) fabriquée en poly2 et accrochée à la plaque glissante. La tension de commande s'applique entre le substrat et les corps des SDA, la couche de nitrure servant d'isolant électrique. En tenant compte du fait que les SDAs ne sont pas seulement reliés mécaniquement mais aussi électriquement à la plaque du miroir et à la plaque glissante, une barrière électrostatique en poly0 est prévue. Cette dernière structure permet d'appliquer la force électrostatique exclusivement sur les actionneurs.

La Figure 6.10(a) montre une vue d'ensemble de la ²matrice d'actionneurs. Chaque actionneur contient une plaque principale, deux poutres de suspension et un plot de contact [voir Figure 6.10(b)]. L'implémentation d'un plot de contact dans la technologie MUMPS est possible grâce au masque POL1_POLY2_VIA. Ce masque a été principalement conçu pour faire des ouvertures dans le deuxième oxyde au dessus des structures en poly1. Cependant, dans notre cas, l'ouverture se fait dans une région où les deux couches d'oxyde sont empilées. Les ouvertures du type via sont effectuées par RIE utilisant normalement le poly1 comme couche d'arrêt ; par ailleurs, la gravure d'une via sur une position qui ne contient pas du poly1 supprime non seulement le deuxième oxyde mais une fraction du premier oxyde [COM 95]. La hauteur du plot de contact obtenue avec cette méthode est de 1 µm.

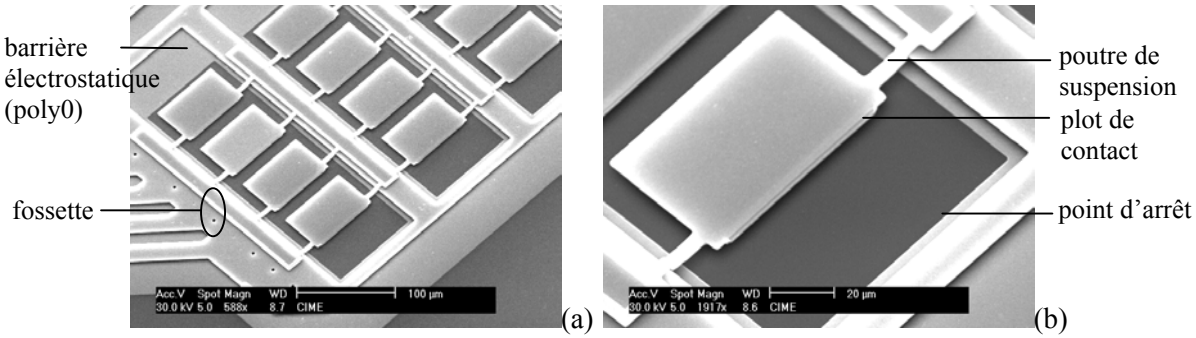


Figure 6.10. Actionneurs à interactions de contact : (a) vue d'ensemble de la matrice d'actionneurs, (b) gros plan d'un actionneur.

Dans la Figure 6.10(a), on voit la barrière électrostatique en poly0. Cette plaque est placée dessous la structure mécanique du système contenant des perforations à l'endroit des actionneurs. Par ailleurs, les cavités de la barrière en poly0 sont suffisamment longues pour couvrir la trajectoire complète des SDA. Il faut préciser que l'épaisseur même de la couche poly0 (0,5 µm) forme une marche dans les extrémités de chaque cavité. Cette marche constitue un point d'arrêt pour les SDA, ce point étant défini par lithographie.

La plaque principale de chaque actionneur mesure 75 µm × 50 µm, dimensions qui possèdent le meilleur rendement [AKI 97] [LAN 97]. Les SDA sont suspendus au moyen de deux poutres de flexion de dimensions 20 µm × 5 µm × 1,5 µm.

6.3.2.4. Ressorts mécaniques

Les ressorts sont fabriqués en poly2. Ils sont reliés à la plaque glissante par une extrémité et ancrés au poly0 par l'autre extrémité. Les ressorts doivent être suffisamment rigides pour éviter leur fracture lors de la gravure ou lors de l'opération du miroir. D'autre part, les ressorts doivent être suffisamment flexibles pour réduire la quantité de SDA nécessaire.

6.3.2.5. Plots électriques

Deux contacts sont prévus pour chaque miroir. Le premier est attaché à la barrière en poly0. Le deuxième plot donne accès au substrat depuis le côté supérieur de la puce. Les actionneurs électrostatiques n'ont pas besoin strictement des pistes présentant des résistances électriques basses. De toutes façons, de bonnes propriétés mécaniques et électriques à la fois peuvent être facilement obtenues en utilisant une structure de poly2 recouverte d'or et ancrée sur poly0. Ce type de structure a été utilisé dans notre prototype pour implémenter des plots qui sont reliés aux barrières électrostatiques en poly0. Afin de créer les plots de substrat, deux stratégies différentes ont été utilisées pour perforer la couche de nitrure, voir Tableau 6.2.

Séquence des masques utilisée pour graver le nitrure	**Matériaux déposés pour former le plot de contact**
anchor1/anchor2	poly2/or
anchor1/p1p2via	poly2/or

Tableau 6.2. Techniques pour la création d'un plot de substrat.

Une fois que le signal de commande est appliqué entre les électrodes, les corps des actionneurs et toutes les autres structures en poly0, poly1, poly2 et métal forment un volume équipotentiel. Cependant, la barrière électrostatique en poly0 permet que la force électrostatique ne soit appliquée que sur les actionneurs.

6.4. Analyse de résultats et conclusions

Le micro-usinage en surface est la technique de micro-usinage la plus flexible pour la fabrication de commutateurs optiques avec un grand nombre de ports et un haut degré de complexité. Cependant, cette technique présente encore quelques inconvénients. Dans le cas

particulier du micro-usinage en surface de Cronos, les couches sacrificielles ne sont pas aplanies. Nous avons observé qu'on peut parfois profiter de cette caractéristique pour fabriquer des structures avec un jeu mécanique minimal, comme le poteau montré dans la Figure 6.9(a). Malheureusement, le cas est fréquent où le relief des couches inférieures cause des problèmes.

Concernant les micro-miroirs, l'absence d'aplanissement des couches sacrificielles décourage quant à l'utilisation de plusieurs électrodes au dessous des miroirs. Concernant les poutres de suspension et de torsion, l'absence d'aplanissement provoque des défauts dans les structures. Ces défauts compliquent la tâche de modélisation. La Figure 6.11 montre un défaut dans une poutre de suspension de l'actionneur électrostatique détaillé dans la partie 6.3.

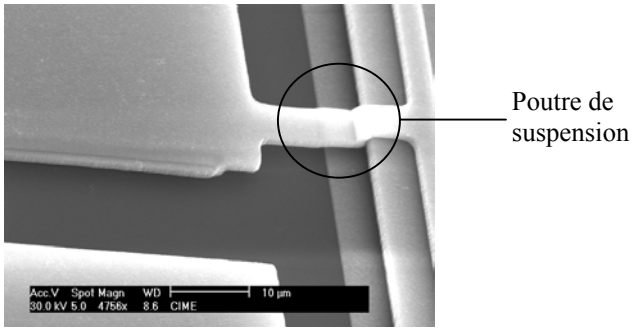


Figure 6.11. Défaut dans une poutre de suspension.

Pour la libération des couches mécaniques, nous avons suivi le procédé standard suggéré par Cronos [KOE 01]. Dans le cas particulier du commutateur, nous n'avons pas observé le problème de collage des structures contre le substrat. Nous avons cependant observé ce phénomène dans quelques autres structures de test que nous avons fabriquées (voir Figure 6.12).

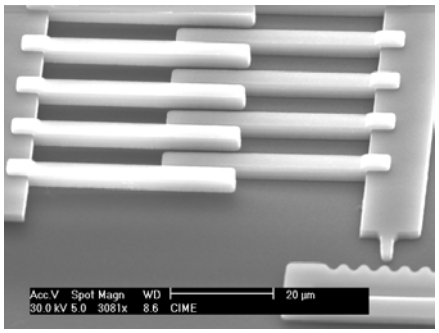


Figure 6.12. Collage de structures contre le substrat.

Un autre problème du micro-usinage en surface est la grande variation du comportement des dispositifs en fonction de la variation des paramètres des matériaux. En général, les paramètres des couches minces dépendent fortement des conditions de dépôt. Par exemple, le module de Young d'une couche mince de silicium polycristallin peut varier entre 120 GPa et 200 GPa. Particulièrement dans la technologie Cronos, la contrainte mécanique résiduelle de la couche poly2 peut varier entre –10 MPa et –20 MPa ; et celle de la couche d'or, entre 50 MPa et 100 MPa.

La fabrication de prototypes de MOEMS est encore beaucoup plus difficile et onéreuse que la fabrication de prototypes purement électroniques. Les technologies disponibles pour le prototypage de microsystèmes ne sont pas aussi bien caractérisées que les technologies de la microélectronique. Elles ne sont pas optimisées non-plus pour les applications dans le domaine de l'optique.

Malgré ces inconvénients, nous avons exploré le micro-usinage en surface et nous avons réussi à fabriquer plusieurs micro-structures qui ont la fonctionnalité correcte du point de vue mécanique. Nous avons fabriqué des miroirs et nous avons aussi fabriqué plusieurs types de micro-charnières.

La réalisation de ces prototypes nous a permis de mieux comprendre les limitations de la technologie, par exemple les défauts dans les structures provoqués par le relief des couches sacrificielles. Cette expérience pratique nous a aussi permis de reprendre la tâche de modélisation de commutateurs micro-usinés avec une idée plus précise des aspects importants à prendre en compte, comme la contrainte mécanique résiduelle des matériaux. La réalisation d'un commutateur opto-mécanique complètement fonctionnel nécessite évidemment beaucoup plus de travail de fabrication et de caractérisation.

Bibliographie

[AKI 97] T. Akiyama, D. Collard, H. Fujita, « Scratch drive actuator with mechanical links for self-assembly of three-dimensional MEMS », *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 6, no. 1, pp. 10-17, 1997.

[AKS 00] V. A. Aksyuk, F. Pardo, C. A. Bolle, S. Arney, C. R. Giles, D. J. Bishop, « Lucent Microstar™ micromirror array technology for large optical crossconnects », in *MOEMS and Miniaturized Systems*, M. E. Motamedi, R. Göring, editors, Proceedings of SPIE, vol. 4178, pp. 320-324, 2000.

[BEA 78] K. Bean, « Anisotropic etching of silicon », *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. ED-25, no. 10, pp. 1185-1193, 1978.

[COM 95] J. H. Comtois, V. M. Bright, « Design techniques for surface-micromachining MEMS processes », in *Micromachining and Microfabrication Process Technology*, Karen W. Markus, editor, Proceedings of SPIE, Vol. 2639, pp. 211-222, 1995.

[DAU 92] M. F. Dautartas, A. M. Benzoni, Y. C. Chen, G. E. Blonder, B. H. Johnson, C. R. Paola, E. Rice, Y. –H. Wong, « A silicon-based moving-mirror optical switch », *Journal of Lightwave Technology*, vol. 10, no. 8, pp. 1078-1085, 1992.

[HUA 98] L. –S. Huang, S. –S. Lee, E. Motamedi, M. C. Wu, C. –J. Kim, « Optical coupling analysis and vibration characterization for packaging of 2x2 MEMS vertical torsion mirror switches », in *Microelectronic Structures and MEMS for Optical Processing IV*, Motamedi, M. Edward; Herzig, Hans P., editors, Proceedings of SPIE, vol. 3513, pp. 135-143, 1998.

[JUA 96] W. –H. Juan, S. W. Pang, « Released Si microstructures fabricated by deep etching and shallow diffusion », *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 5, no. 1, pp. 18-23, 1996.

[JUA 98] W. –H. Juan, S. W. Pang, « High-aspect-ratio Si vertical micromirror arrays for optical switching », *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 7, no. 2, pp. 207-213, 1998.

[KOE 01] D. A. Koester, R. Mahadevan, A. Shishkoff, K. W. Markus, *MUMPs Design Handbook*, Rev. 4.0, Cronos Integrated Microsystems, 2001.

[LAN 97] P. Langlet, D. Collard, T. Akiyama, H. Fujita, « A quantitative analysis of scratch drive actuation for integrated X/Y motion system », in *Tech. Dig., Transducers '97: The International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Chicago*, USA, pp. 773-776, 1997.

[LEE 99] S. –S. Lee, L. –S. Huang, C. J. Kim, M. C. Wu, « Free-space fiber-optic switches based on MEMS vertical torsion mirrors », *Journal of Lightwave Technology*, vol. 17, no. 1, pp. 7-13, 1999.

[LIN 98] L. Y. Lin, E. L. Goldstein, R. W. Tkach, « Free-space micromachined optical switches with submillisecond switching time for large-scale optical crossconnects », *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 10, no. 4, pp. 525-527, 1998.

[LIN 99] L. Y. Lin, E. L. Goldstein, R. W. Tkach, « Free-space micromachined optical switches for optical networking », *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 5, no. 1, pp. 4-9, 1999.

[MAR 97] C. Marxer, C. Thio, M. –A. Gtétillat, N. F. de Rooij, R. Bättig, O. Anthamatten, B. Valk, P. Vogel, « Vertical mirrors fabricated by deep reactive ion etching for fiber-optic switching applications », *IEEE Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 6, no. 3, pp. 277-285, 1997.

[MAR 99] C. Marxer, N. F. de Rooij, « Micro-opto-mechanical 2x2 switch for single-mode fibers based on plasma-etched silicon mirrors and electrostatic actuation », *Journal of Lightwave Technology*, vol. 17, no. 1, pp. 2-6, 1999.

[PET 82] K. E. Petersen, « Silicon as a mechanical material », *Proceedings of the IEEE*, vol. 70, no. 5, pp. 420-457, 1982.

[ROS 94] L. Rosengren, L. Smith, Y. Bläcklund, « Micromachined optical planes and reflectors in silicon », *Sensors and Actuators A*, vol. 41-42, pp. 330-333, 1994.

Chapitre 7

Conclusions et perspectives

La partie 7.1 présentera les conclusions de notre travail de thèse. Nous évoquerons aussi les tendances d'évolution des commutateurs optiques micro-usinés, et les défis technologiques actuels qui devront être surmontés pour la commercialisation massive de ces dispositifs.

La partie 7.2 présentera nos perspectives sur l'avenir des technologies de micro-usinage dans les réseaux optiques. Nous décrirons les applications potentielles des microsystèmes optiques les plus prometteuses dans ce domaine (à part les commutateurs).

7.1. Conclusions

A la fin des années 90, les microsystèmes mécano-optiques pour les applications dans les réseaux optiques étaient encore regardés avec méfiance. A l'heure actuelle, les premiers produits pilotes, notamment les commutateurs optiques à base de miroirs sont déjà disponibles sur le marché [LUC 02] [OMM 02] [SER 02]. Malgré la limitation dans la vitesse de commutation (~1-10 ms), les commutateurs micro-usinés sont suffisamment rapides pour les applications de protection, restauration et approvisionnement (§ 1.2.3). Les commutateurs mécano-optiques sont également applicables dans les modules d'insertion/extraction (§ 1.1.4).

Les pertes d'insertion constituent un autre aspect important du fonctionnement des commutateurs. Il est possible de compenser l'atténuation des commutateurs par l'utilisation des étapes d'amplification, mais cette approche a ses limitations. Chaque étape d'amplification introduit de la dispersion (§ 1.1.1).

Les niveaux de pertes d'insertion expérimentales des commutateurs sont encore élevés. Quelques sociétés offrent des produits pilotes avec des pertes d'insertion supérieures à 5 dB (§ 2.1.6). Les pertes d'insertion proviennent d'une part, des erreurs d'alignement des

composants (§ 3.3), et d'autre part des caractéristiques non-idéales des miroirs (§ 3.4). Les erreurs d'alignement peuvent être compensées de manière dynamique par un système de contrôle en boucle fermée. Par contre, la réduction des pertes associées aux imperfections des miroirs nécessite l'optimisation des procédés de micro-usinage pour minimiser la contrainte mécanique résiduelle des réflecteurs.

Quand deux fibres monomodes sont directement couplées et la distance de séparation maintenue en dessous d'environ 80 µm, les pertes d'insertion restent inférieures à 2,5 dB (§ 3.3.1). Si la distance de séparation est de quelques dizaines de microns seulement, des erreurs d'alignement de l'ordre de 1 µm et 1° peuvent être acceptées. L'utilisation de collimateurs à gradient d'indice permet d'augmenter la distance de séparation de quelques dizaines de microns à quelques centimètres en fonction de la largeur du faisceau de transmission. Par ailleurs, à travers l'expansion du faisceau de transmission, la tolérance du positionnement latéral augmente alors que la tolérance du positionnement angulaire diminue (§ 3.3.3).

Concernant le type d'actionneur, ce sont pour l'instant les dispositifs électrostatiques qui sont les plus compatibles avec les matériaux et les procédés de micro-fabrication (§ 4.1.3). Par ailleurs, la miniaturisation est favorable aux actionneurs électrostatiques où la masse varie en fonction de l^3 alors que la force varie en fonction de l^2 (à champ électrostatique constant). Quand la séparation entre les électrodes est inférieure à quelques microns, la force électrostatique disponible varie en fonction de l (§ 4.1.3).

Les actionneurs électrostatiques ont encore besoin de tensions d'alimentation relativement élevées (dizaines de volts, voire centaines de volts) pour atteindre des niveaux de force acceptables. Cela représente un problème d'incompatibilité avec les circuits microélectroniques.

Les actionneurs magnétiques suscitent également de l'intérêt. D'une part, ils sont capables de produire aussi bien des forces d'attraction que de répulsion. D'autre part, les tensions nécessaires sont plus compatibles avec la microélectronique. Les inconvénients des actionneurs magnétiques par rapport aux actionneurs électrostatiques sont le plus haut niveau de courant nécessaire et la plus haute consommation de puissance. En outre, les actionneurs magnétiques peuvent coupler les champs magnétiques des actionneurs voisins. En tout cas, les procédés de dépôt et gravure de matériaux magnétiques doivent encore évoluer pour permettre aux actionneurs magnétiques de concurrencer les actionneurs électrostatiques. (§ 4.1.2).

Parmi les différentes familles d'actionneurs électrostatiques, les actionneurs à électrode giratoire sont attractifs pour les commutateurs optiques, étant donné que seules de très petites rotations sont nécessaires pour défléchir substantiellement les faisceaux lumineux (§ 4.5).

La conception de commutateurs optiques et, en général, de microsystèmes optiques est difficile, étant donné que ces dispositifs sont très hétérogènes (§ 5.2). La validation globale de tels systèmes est loin d'être, à présent, un procédé automatique. Dans les systèmes matériels contenant des dispositifs électroniques ainsi que des composants microsystèmes, une approche qui s'est développée pendant les dernières années consiste en la modélisation des composants microsystèmes sur un langage de description matériel (§ 5.4). Ainsi, la validation globale du système est réalisée sur les outils de conception électronique. Cette approche demande la traduction de tous les modèles constituant le système vers un langage commun.

Dans ce travail de thèse, nous avons promu la validation globale de systèmes hétérogènes par cosimulation. Ainsi, les divers modules d'un système, typiquement conçus par différentes équipes de travail, sont représentés sur différents langages de spécification et simulés au moyen de différents outils, chacun spécialement conçu pour un domaine particulier ou un niveau d'abstraction spécifique. Un modèle exécutable du système est obtenu à partir de la génération automatique d'interfaces reliant les différents outils de simulation (§ 5.6). Cette approche profite de l'expertise de chaque équipe de travail sur un langage et un outil de simulation spécifiques à son domaine.

Le micro-usinage en surface est une technologie qui favorise la fabrication d'une grande variété d'actionneurs et d'autres structures mécaniques. Cependant, les miroirs sont invariablement constitués d'une couche structurale de faible épaisseur (~1-2 µm) recouverte d'une couche réfléchissante (§ 6.3.1). La minimisation/compensation des effets de contraintes mécaniques résiduelles (nécessaire à la fabrication de miroirs suffisamment plats) demande un procédé de fabrication spécialement conçu pour un tel propos.

Le micro-usinage de wafers SOI (§ 6.1.3) représente une alternative intéressante. Dans ce cas, les miroirs sont formés à partir d'une couche épaisse de silicium polycristallin, la couche d'oxyde étant utilisée comme couche sacrificielle.

Les technologies de micro-usinage ont déjà montré leur applicabilité dans les réseaux optiques, cependant il y a encore une incertitude concernant la fiabilité des microsystèmes optiques. A ce sujet, les techniques pour la mise en boîtier des microsystèmes devront évoluer non-seulement pour améliorer la fiabilité mais aussi pour réduire les coûts de manufacture.

Dans un futur proche, les commutateurs micro-usinés seront sûrement répandus dans les réseaux optiques où ils vont coexister avec les circuits intégrés photoniques, les premiers présentant les plus faibles niveaux de pertes, les derniers ayant une vitesse de commutation plus élevée.

Dans un plus long terme, les commutateurs utiliseront des signaux de contrôle lumineux. Les fibres optiques véhiculeront aussi bien les signaux d'information que les signaux de contrôle.

Les commutateurs seront capables de se reconfigurer très rapidement pour permettre le routage de paquets d'information directement dans le domaine optique.

7.2. Perspectives

Nous présentons maintenant quelques autres applications prometteuses des microsystèmes dans les réseaux optiques. Nous espérons que cette partie pourra servir d'inspiration et de point de départ pour de futurs travaux de recherche.

7.2.1. *Atténuateurs variables*

En tenant compte de la multiplicité et de la diversité des trajectoires dans un réseau optique, il n'est pas difficile de comprendre qu'un réseau puisse véhiculer des signaux qui présentent des niveaux de puissance assez différents. En fait, le niveau de puissance d'un signal varie continuellement à partir du point de transmission, le long de son chemin de propagation jusqu'au point de réception. Une première application des atténuateurs variables se situe dans les ports d'insertion/extraction où la puissance du signal à insérer doit idéalement avoir la même valeur que celle du signal à extraire.

D'autre part, les amplificateurs optiques, qui sont utilisés pour compenser l'atténuation, sont configurés pour présenter une puissance de sortie constante. Malheureusement, pendant la reconfiguration dynamique des réseaux, les opérations d'insertion et d'extraction produisent des transitoires qui sont de plus en plus rapides à mesure que le nombre d'amplificateurs en cascade augmente. Dans ces cas, un atténuateur variable, de réponse rapide, est souhaitable pour supprimer les transitoires.

Dans une autre application, les atténuateurs permettent d'optimiser la détection des signaux en ajustant le niveau de puissance qui convient le mieux aux photodétecteurs.

Les atténuateurs variables sont réalisables par les technologies de micro-usinage. Deux stratégies de conception peuvent être utilisées [GIL 99]. Une première approche consiste à faire glisser une lame entre deux fibres optiques, la position de la lame par rapport au centre des fibres déterminant le degré d'atténuation. Une deuxième approche consiste à utiliser un miroir pour effectuer le couplage entre les fibres ; dans ce cas, l'orientation du miroir contrôle le couplage entre les fibres.

7.2.2. *Egalisateurs*

Les amplificateurs utilisés dans les réseaux optiques présentent un profil de gain non-uniforme par rapport à la longueur d'onde. A présent, la fonction de transfert des

amplificateurs est corrigée à l'aide de fibres à réseau de Bragg, ce qui permet d'augmenter la largeur de bande utile des amplificateurs. Malheureusement, le profil de gain des amplificateurs optiques change en fonction des conditions d'opération et à travers la vie utile du dispositif. Ainsi, les fonctions de filtrage fixes offertes par les fibres à réseau de Bragg ne permettent qu'un aplatissement sub-optimal du gain de l'amplificateur. La solution à ce problème est dans la conception d'égalisateurs dynamiques de spectre [WAL 99].

Les égalisateurs dynamiques de spectre peuvent consister en composants optiques dans l'espace libre, par exemple un réseau de diffraction et un ensemble d'atténuateurs. Les technologies de micro-usinage sont adéquates pour la fabrication de ces éléments optiques et représentent donc une solution potentielle pour la fabrication d'égalisateurs à bas coût.

7.2.3. *Modulateurs*

Bien que les modulateurs électro-optiques de niobate de lithium sont utilisés pour la génération de signaux à haut débit (10 Gb/s, 20 Gb/s, 40 Gb/s) et constituent une technologie assez établie, de telles vitesses de transmission de données ne sont pas toujours nécessaires. Dans les réseaux optiques du futur, les modulateurs micro-usinés avec débit de transmission plus modestes de l'ordre d'une ou de plusieurs dizaines de Mb/s pourraient trouver des applications dans les réseaux optiques.

Une stratégie envisagée par les compagnies des télécommunications, pour améliorer les services déjà offerts ainsi que pour introduire de nouveaux services aux particuliers, est l'extension du réseau à fibres jusqu'aux maisons des souscripteurs (FTTH[69]). Pour que ce projet devienne réalisable, le coût des équipements installés chez le souscripteur devra être le plus bas possible. Afin de permettre la communication depuis la maison vers le bureau de télécommunication, la possibilité existe d'installer chez le souscripteurs des modulateurs pour introduire l'information dans un faisceau porteur envoyé par le bureau central de télécommunication. Les modulateurs micro-usinés avec débits de plusieurs mégabits par seconde représentent une solution potentielle à bas coût pour les systèmes FTTH [GOO 94].

7.2.4. *Sources accordables en longueur d'onde*

Dans les réseaux optiques modernes, la capacité de transmission d'information a augmenté considérablement dans les dernières années grâce à l'utilisation de multiples longueurs d'onde. Les lasers du type VCSEL[70] sont devenus populaires grâce à leur combinaison performance/prix. A l'heure actuelle, de multiples diodes lasers, où chaque élément est conçu

[69] FTTH : *Fiber To The Home*.
[70] VCSEL : *Vertical Cavity Surface Emitting Laser*.

pour émettre une longueur d'onde fixe différente, sont généralement utilisées dans les systèmes WDM.

A mesure que la densité de canaux augmente dans les réseaux optiques, le nombre de diodes lasers nécessaires s'accroît, et la séparation entre les différentes longueurs d'onde diminue. Des diodes lasers capables d'ajuster dynamiquement leur longueur d'onde deviennent de plus en plus nécessaires.

Le fait de pouvoir varier (et contrôler) la longueur d'onde des diodes lasers permet d'une part de réduire l'interférence entre les canaux. D'autre part, si la variation possible de la longueur d'onde est assez large, une même diode est donc capable de transmettre un signal dans un canal parmi plusieurs canaux possibles, ce qui donne de la flexibilité dans la conception et l'implémentation des réseaux. Les diodes accordables représentent également la réduction du nombre de pièces de remplacement nécessaires pour un certain système [BRU 02].

Les technologies de micro-usinage permettent la fabrication des lasers accordables en longueur d'onde à travers l'un ou l'autre des deux mécanismes possibles : la modulation de l'indice de réfraction ou la modulation de la longueur de la région active du laser. Le premier mécanisme consiste à intégrer dans le laser une résistance chauffante, les changements de température servant à contrôler l'indice de réfraction. Le deuxième mécanisme consiste à fabriquer une membrane qui se déplace par l'action d'un champ électrostatique, ce mécanisme permettant une modulation plus rapide de la longueur d'onde [KIA 96] [SUG 98].

7.2.5. *Filtres optiques*

Les filtres optiques permettent de séparer un ou plusieurs canaux d'un signal WDM. Il y a plusieurs types de filtres ; un des plus simples consiste en une cavité Fabry-Pérot dont l'épaisseur est ajustable au moyen d'une force électrostatique.

Les technologies de micro-usinage sont très adéquates pour la fabrication de cavités Fabry-Pérot. L'idée de base est la fabrication de deux miroirs parallèles où la distance de séparation W sert à choisir la fréquence centrale du filtre. Pour réaliser un filtre accordable, on peut fixer un miroir et déplacer l'autre par l'action d'une force électrostatique [TRA 96]. Cependant, un compromis existe entre la séparation nominale des miroirs et la tension de commande. Une petite séparation est désirable pour minimiser la tension de commande, une grande séparation est d'autre part aussi désirable pour éviter les problèmes de collage de plaques.

Une autre façon d'ajuster la fonction de transfert de la cavité Fabry-Pérot consiste à introduire une lame dans la cavité [GOU 99]. L'épaisseur de la lame et son indice de réfraction permettent d'ajuster la distance optique entre les miroirs.

7.2.6. *Photo-capteurs accordables en longueur d'onde*

Les photodétecteurs permettent de convertir les signaux lumineux transmis dans les fibres optiques vers le domaine électronique. Etant donné que les signaux dans les réseaux optiques sont très fréquemment composés de multiples longueurs d'onde, une fonction de filtrage devient nécessaire avant la détection de chaque composant. Les technologies de micro-usinage permettent la conception de photo-capteurs avec des fonctions de transfert étroites.

De manière analogue aux diodes lasers, une membrane suspendue, contrôlée de manière électrostatique, permet d'ajuster la longueur de la cavité du dispositif. Si la plage dynamique de la membrane est suffisamment large, un contrôle électronique du photodétecteur permet de déplacer la fonction de transfert, et en conséquence, de choisir le canal à recevoir. De plus, le fait de pouvoir ajuster la longueur d'onde centrale du dispositif permet d'optimiser l'efficacité de conversion optique-électronique. Les photodétecteurs accordables en longueur d'onde peuvent être fabriqués à partir de différents matériaux ; les travaux les plus importants en ce domaine sont réalisés sur silicium [TRA 96], sur arséniure de gallium [WU 96], et sur phosphure d'indium [VIK 99].

7.2.7. *Multiplexeurs/Démultiplexeurs*

Pour réaliser les fonctions de multiplexage/démultiplexage dans les réseaux optiques, il y a des technologies à base de guides d'ondes bien établies sur le marché (§ 1.2.1). Cependant, les technologies de micro-usinage peuvent, elles aussi, effectuer de telles fonctions. Par exemple, un réseau de diffraction micro-usiné peut servir à séparer les différentes longueurs d'onde d'un signal WDM.

L'avantage potentiel des technologies de micro-usinage est la possibilité d'utiliser une même technologie pour remplir plusieurs fonctions. Par exemple, la fonctionnalité de multiplexage d'un réseau de diffraction peut être combinée avec la fonctionnalité de commutation d'une matrice de miroirs pour échanger quelques composants d'un signal WDM. C'est cela qu'on appelle multiplexeur avec ports d'insertion/extraction (§ 1.1.4).

Bibliographie

[BRU 02] E. Bruce, « Tunable Lasers », *IEEE Spectrum*, pp 35-39, February 2002.

[GIL 99] C. R. Giles, V. Aksyuk, B. Barber, R. Ruel, L. Stulz, D. Bishop, « A silicon MEMS optical switch attenuator and its use in lightwave subsystems », *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 5, no. 1, pp. 18-25, 1999.

[GOO 94] K. W. Goossen, J. A. Walker, S. C. Arney, « Silicon modulator based on mechanically-active anti-reflection layer with 1 Mbit/sec capability for fiber-in-the-loop applications », *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 6, no. 9, pp. 1119-1121, 1994.

[GOU 99] J. P. Gouy, A. Tixier, G. Hashiguchi, H. Toshiyoshi, H. Fujita, « Design of a pigtailed tunable filter for optical fiber transmissions at 1.3-1.55µm », in *Design, Test, and Microfabrication of MEMS and MOEMS*, B. Courtois, S. B. Crary, W. Ehrfeld, H. Fujita, J. –M. Karam, K. Markus, editors, Proceedings of SPIE, vol. 3680, pp. 207-213, 1999.

[KIA 96] M. H. Kiang, O. Solgaard, R. S. Muller, and K. Y. Lau, « Silicon-micromachined micromirrors with integrated high-precision actuators for external-cavity semiconductor lasers », *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 8, no. 1, pp. 95-97, 1996.

[LUC 02] Lucent Technologies, http://www.lucent.com/.

[OMM 02] Optical Micro Machines Inc., http://www.omminc.com/.

[SER 02] Sercalo Microtechnology Ltd., http://www.sercalo.com/.

[SUG 98] F. Sugihwo, M. C. Larson, J. S. Harris, « Micromachined widely tunable vertical cavity laser diodes », *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 7, no. 1, pp. 48-55, 1998.

[TRA 96] A. T. T. D. Tran, Y. H. Lo, Z. H. Zhu, D. Haronian, E. Mozdy, « Surface micromachined Fabry-Perot tunable filter », *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 8, no. 3, pp. 393-395, 1996.

[VIK 99] P. Viktorovitch, J. L. Leclercq, A. Spisser, J. Daleiden, N. Chitica, M. Strassner, D. Rondi, E. Goutain, J. Peerlings, J. Pfeiffer, R. Riemenschneider, K. Hjort, S. Greek , T. Benyattou, R. Ledantec, « MOEMS applications for telecommunications », *3rd International Conference on Micro Opto Electro Mechanical Systems*, *MOEMS'99*, Mainz, Germany, pp. 35-38, 1999.

[WAL 99] J. A. Walker, J. E. Ford, K. W. Goossen, D. J. Bishop, D. S. Greywall, A. Aksyuk, « Surface normal optical MEMS in dynamic WDM transport networks », in *Design, Test, and Microfabrication of MEMS and MOEMS*, B. Courtois, S. B. Crary, W. Ehrfeld, H. Fujita, J. –M. Karam, K. Markus, editors, Proceedings of SPIE, vol. 3680, pp. 41-48, 1999.

[WU 96] M. S. Wu, E. C. Vail, G. S. Li, W. Yuen, C. J. Chang-Hasnain, « Widely and continuously tunable micromachined resonant cavity detector with wavelength tracking », *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 8, no. 1, pp. 98-100, 1996.

Résumé

Les systèmes à fibre optique ont été commercialement utilisés depuis les années 80 pour la transmission de signaux haut débit sur de longues distances. Plus récemment, l'introduction de l'amplificateur optique et du multiplexage en longueur d'onde a permis la transmission et la régénération de signaux de très haut débit directement dans le domaine optique. Cependant, la faible connectivité des réseaux actuels rend encore inefficace l'utilisation de la bande passante disponible. A présent, les systèmes à fibre optique évoluent en permettant de plus en plus, non seulement la transmission mais aussi la commutation de signaux directement dans le domaine optique.

Parmi les technologies existantes pour réaliser la commutation de signaux lumineux, les commutateurs micro-usinés en silicium avec propagation de signaux dans l'air se sont révélés comme une des technologies les plus prometteuses. Ces dispositifs présentent des niveaux de pertes d'insertion et de diaphonie intercanaux plus faibles que les commutateurs à base de guides d'onde surtout dans les commutateurs à très grand nombre de ports.

Ce travail de recherche a été focalisé sur la conception de commutateurs optiques micro-usinés. Après avoir révélé les avantages et les possibles applications de ces dispositifs dans les réseaux optiques, nous avons modélisé la propagation de signaux dans les commutateurs optiques et nous avons appliqué ces modèles pour calculer les pertes d'insertion. Une étude comparative a été réalisée sur les microactionneurs électrostatiques et plusieurs modèles ont été obtenus par couplage des théories électrostatique et structurelle. La cosimulation multilangage à été examinée comme méthodologie pour la validation globale de commutateurs optiques. Finalement, nous avons exploré les technologies de fabrication à travers la conception d'un prototype sur micro-usinage en surface.

Mot clés : microsystèmes, microsystèmes optiques, silicium, commutateurs optiques, micro-miroirs, modélisation de systèmes hétérogènes, micro-usinage en surface.

Abstract

Fiber-optic systems have been used commercially since the 1980s for transmission of high bit-rate signals over long distances. More recently, the introduction of optical amplifiers and wavelength division multiplexing have permitted the transmission and regeneration of very high bit-rate signals directly in the optical domain. However, the weak connectivity in present networks makes still inefficient the use of the available bandwidth. Nowadays, fiber-optic systems are evolving to progressively allow, not only the transmission but the switching of signals directly in the optical domain.

Among the existing technologies to achieve optical switching, free-space micromachined devices in silicon have appeared as one of the most promising. These devices present lower levels of insertion loss and cross-talk when compared to devices based on waveguides, especially in high port-count cross-connects.

Our research has been focused on designing micromachined optical cross-connects. After having revealed the advantages and possible applications of these devices in the optical networks, we have modeled the propagation of signals in the optical cross-connects and we have applied these models to calculate the insertion losses. A comparative study has been carried out on electrostatic actuators and several models have been obtained by coupling the electrostatic and structural theories. Multi-language cosimulation has been examined as a methodology for global validation of optical cross-connects. Finally, we have explored the manufacturing technologies through fabrication of a prototype by surface micromachining.

Keywords : MEMS, MOEMS, Silicon, optical cross-connects, micro-mirrors, heterogeneous system modeling, surface micromachining.

ISBN : 2-913329-85-1 (electronic format) ISBN : 2-913329-85-3 (paper format)