



**HAL**  
open science

# Inscription laser UV pulsé sur nouveau matériau hybride pour codeurs optiques intégrés

Sylvain Gatti

► **To cite this version:**

Sylvain Gatti. Inscription laser UV pulsé sur nouveau matériau hybride pour codeurs optiques intégrés. Physique Atomique [physics.atom-ph]. Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, 2007. Français. NNT: . tel-00258256v2

**HAL Id: tel-00258256**

**<https://theses.hal.science/tel-00258256v2>**

Submitted on 26 May 2008

**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.

ACADÉMIE DE MONTPELLIER

---

U N I V E R S I T É      M O N T P E L L I E R      I I

— SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC —

**T H È S E**

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ MONTPELLIER II

DISCIPLINE : Électronique

FORMATION DOCTORALE : Électronique - composants et systèmes

ÉCOLE DOCTORALE : Information, Structures et Systèmes

Présentée publiquement

par

**Sylvain Gatti**

---

**Inscription laser UV pulsé sur nouveau matériau hybride pour  
codeurs optiques intégrés**

---

Directeur de Thèse :

Yves Moreau

Soutenue le 3 décembre 2007 devant le jury composé de :

Jean-Michel Dumas	ENSIL, Université de Limoges	Rapporteur
Bernard Claudet	ELIAUS, Université de Perpignan	Rapporteur
Sebastien Verdet	SOFRADIR, Grenoble	Examineur
Yves Moreau	IES, Université de Montpellier	Examineur
René Legros	GES, Université de Montpellier	Examineur
Raphael Kada Kribich	IES, Université de Montpellier	Examineur

---

Institut d'Electronique du Sud





# Table des matières

<b>Table des matières</b>	<b>i</b>
<b>Remerciements</b>	<b>1</b>
<b>Introduction</b>	<b>4</b>
<b>1 Contexte</b>	<b>7</b>
1.1 Renouveau de l'optique . . . . .	8
1.1.1 Variété des domaines d'applications . . . . .	8
1.1.2 L'optique et le stockage de données . . . . .	9
1.1.3 Instrumentation de contrôle et de mesure . . . . .	10
1.1.3.1 Microscopie à champ proche optique . . . . .	11
1.1.3.2 Pinces optiques (optical tweezers) . . . . .	12
1.1.4 Les Télécommunications optiques . . . . .	13
1.1.4.1 Les réseaux de télécommunications par fibres optiques . . . . .	13
1.1.5 Éléments terminaux des applications optiques . . . . .	14
1.1.5.1 La fibre optique . . . . .	15
1.1.5.2 Les Composants optiques passifs à base de fibres . . . . .	16
1.2 Conclusion . . . . .	18
<b>2 Optique Intégrée</b>	<b>20</b>



TABLE DES MATIÈRES

---

2.1	Introduction . . . . .	22
2.2	Propagation optique . . . . .	22
2.2.1	Les guides d'ondes . . . . .	23
2.2.2	Résolution directe des équations de propagation . . . . .	25
2.2.3	Equations de propagation . . . . .	25
2.2.4	Propagation dans un guide plan . . . . .	27
2.2.4.1	Approche par l'optique géométrique . . . . .	28
2.2.4.2	Approche par résolution transversale . . . . .	29
2.2.4.3	Modes et courbes de dispersion . . . . .	31
2.2.5	Propagation dans un guide à largeur limitée . . . . .	32
2.2.5.1	Méthode de l'indice effectif . . . . .	32
2.2.5.2	Calcul des modes par la méthode de Marcuse . . . . .	33
2.2.5.3	Calcul des modes pour guides de section quelconque . . . . .	34
2.2.5.4	Calcul vectoriel des modes . . . . .	35
2.2.5.5	Implémentation logicielle . . . . .	35
2.2.5.6	Approche modale de la propagation . . . . .	36
2.2.5.7	Approche directe de la propagation: méthode des faisceaux propagés (BPM) . . . . .	36
2.2.6	Conclusion . . . . .	37
2.3	Les différents matériaux utilisés pour la réalisation de circuits optiques . . . . .	38
2.3.1	Verres massifs . . . . .	38
2.3.2	Les semi-conducteurs . . . . .	40
2.3.2.1	Matériaux $III - V$ . . . . .	40
2.3.2.2	Silicium . . . . .	41
2.3.3	Niobate de Lithium ( $LiNbO_3$ ) . . . . .	42
2.3.4	Silice sur Silicium . . . . .	43

---

2.3.4.1	Dépôt par hydrolyse à la flamme ( <i>F.H.D.</i> ) . . . . .	43
2.3.4.2	Dépôt par phase vapeur ( <i>C.V.D.</i> ) . . . . .	44
2.3.4.3	Procédé sol-gel . . . . .	44
2.3.5	Les polymères Organo-Minéraux . . . . .	45
2.4	Matériaux photo-sensibles pour la réalisation de circuits optiques . . . . .	46
2.4.1	Les germanosilicates . . . . .	47
2.4.2	Matériaux thermiquement réticulables . . . . .	49
2.4.3	Les polymères . . . . .	50
2.4.3.1	Dépôt de couches minces par dip-coating et spin-coating . . . . .	52
2.4.4	Les matériaux Hybrides sol-gel . . . . .	54
2.5	Procédés d'écriture de circuits optiques . . . . .	54
2.5.1	La Photolithographie . . . . .	56
2.5.2	L'inscription laser . . . . .	57
2.6	Conclusion . . . . .	58
<b>3</b>	<b>Approche technologique</b> . . . . .	<b>60</b>
3.1	Un matériau organique-inorganique pour l'optique intégrée . . . . .	61
3.1.1	Synthèse de matériaux hybrides . . . . .	62
3.1.1.1	Synthèse du réseau minéral : procédé sol-gel . . . . .	62
a)	Hydrolyse . . . . .	63
b)	Condensation . . . . .	63
3.1.1.2	Synthèse du réseau organique : Photopolymérisation . . . . .	64
a)	Polymérisation radicalaire . . . . .	64
b)	Polymérisation cationique . . . . .	64
3.1.1.3	Synthèse de la solution de dépôt . . . . .	65
3.1.2	Dépôt des couches minces . . . . .	66

---

## TABLE DES MATIÈRES

---

3.2	Optimisation du banc d'écriture laser . . . . .	67
3.2.1	Banc d'écriture laser . . . . .	67
3.2.2	Le laser YLF . . . . .	69
3.2.2.1	Caractérisation du laser . . . . .	70
3.2.3	Module acousto-optique . . . . .	70
3.2.3.1	Principe de fonctionnement d'un modulateur acousto-optique	71
3.2.3.2	Caractérisation du modulateur acousto-optique . . . . .	72
3.2.4	Système de déplacement et interface PC . . . . .	72
3.2.4.1	Tables de micro-déplacement . . . . .	72
3.2.5	Interface logicielle de commande : Laser Writing . . . . .	74
3.2.6	Visualisation de la Focalisation . . . . .	76
3.3	Conclusion . . . . .	77
<b>4</b>	<b>Fabrications, tests et optimisations de circuits simples</b>	<b>79</b>
4.1	Banc d'écriture laser : tests et optimisations . . . . .	80
4.1.1	Vers des guides de $5 \mu m$ sur $5 \mu m$ . . . . .	80
4.1.2	Réalisation et optimisation des guides d'ondes . . . . .	81
4.1.2.1	Optimisation de la tenue des guides sur le matériau . . . . .	81
4.1.3	Guides d'ondes vus par la tranche . . . . .	84
4.1.4	Erreurs de tracé des moteurs . . . . .	85
4.1.5	Erreurs dues à la synchronisation du modulateur acousto-optique . . .	85
4.2	Caractérisation de guides droits et guides courbes . . . . .	86
4.2.1	Caractérisation de guides droits . . . . .	87
4.2.2	Caractérisation de guides courbes . . . . .	89
4.3	Mesure de l'indice de réfraction . . . . .	90
4.4	Caractérisation des premiers composants . . . . .	90

---

4.4.1	Le diviseur/coupleur en Y . . . . .	90
4.4.1.1	Réalisation . . . . .	92
4.4.1.2	Caractérisation . . . . .	93
4.4.2	Le coupleur directionnel . . . . .	94
4.4.2.1	Réalisation . . . . .	96
4.4.2.2	Caractérisation . . . . .	96
4.5	Conclusion . . . . .	97
<b>5</b>	<b>Multiplexage Optique : WDM et CDMA</b>	<b>99</b>
5.1	Multiplexage en longueur d'onde : théorie . . . . .	101
5.1.1	Multiplexage optique . . . . .	101
5.1.2	Composants WDM en optique intégrée . . . . .	102
5.1.3	Le Coupleur en étoile . . . . .	104
5.1.4	Étude de la focalisation . . . . .	105
5.1.5	Etude de la dispersion . . . . .	107
5.1.5.1	Bande spectrale libre . . . . .	109
5.1.6	Pertes d'insertion et non-uniformité . . . . .	110
5.1.6.1	Bande angulaire libre . . . . .	111
5.1.6.2	Pertes d'insertion . . . . .	112
5.1.7	Diaphotie (Crosstalk) . . . . .	113
5.1.8	Dépendance à la polarisation . . . . .	115
5.2	Conception d'un WDM à coupleurs en étoile . . . . .	116
5.2.1	Paramètres de fonctionnement . . . . .	116
5.2.2	Etapas de la conception . . . . .	116
5.2.3	Conception pratique d'un composant WDM à coupleur en étoile . . .	117
5.2.3.1	Paramètres physiques . . . . .	117

---

## TABLE DES MATIÈRES

---

5.2.3.2	Paramètres géométriques . . . . .	120
5.3	Réalisation d'un WDM à coupleurs en étoile . . . . .	122
5.3.1	Réalisation de Tapers . . . . .	122
5.3.2	Réalisation de Coupleurs en étoile . . . . .	124
5.3.2.1	Contrôle du coupleur-diviseur . . . . .	126
5.3.3	Réalisation du réseau déphaseur . . . . .	129
5.3.4	Réalisation du composant complet . . . . .	129
5.4	Caractérisation d'un WDM à coupleurs en étoile . . . . .	130
5.4.1	Critères de caractérisation . . . . .	130
5.4.2	Résultats de caractérisation . . . . .	133
5.5	Étude, réalisation et caractérisation de composants pour l'accès multiple par codes : CDMA . . . . .	134
5.5.1	Qu'est-ce que le CDMA ? . . . . .	134
5.5.2	Codage et décodage grâce à un composant optique . . . . .	135
5.5.2.1	Codage spectral . . . . .	135
5.5.2.2	Décodage . . . . .	137
5.5.3	Réalisation du regroupement des sorties du CDMA . . . . .	137
5.5.3.1	Croisements des guides de sorties . . . . .	137
5.5.3.2	Regroupement des guides de sortie . . . . .	139
5.5.4	Caractérisation du composant CDMA . . . . .	139
5.6	Conclusion . . . . .	142
	<b>Conclusion</b>	<b>143</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>147</b>
	<b>Table des figures</b>	<b>152</b>

# Remerciements

Mes travaux se sont déroulés à l'Institut d'Electronique du Sud de Montpellier. Je remercie le directeur Daniel Gasquet pour m'avoir accueilli au sein du laboratoire.

Je remercie M. Jean-Michel Dumas, Professeur à l'Université de Limoges ainsi que M. Bernard Claudet, Maître de Conférence à l'Université de Perpignan pour avoir accepté de juger mon travail et d'en être les rapporteurs.

Mes remerciements vont aussi à David Billon-Lanfrey et Sébastien Verdet pour avoir accepté d'être examinateurs de ma thèse. Je les remercie également pour m'avoir permis de finir la rédaction de ma thèse dans de bonnes conditions tout en me permettant de participer à leurs projets au sein de SOFRADIR. Il ont su porter une attention sincère sur mes travaux.

Mes remerciements vont également à René Legros, Maître de Conférence à l'Université Montpellier II, pour avoir accepté d'être examinateur de ce mémoire, mais surtout pour sa disponibilité pendant ces trois années, son implication et son soutien dans ce projet.

Je tiens à remercier Yves Moreau, Professeur à l'Université Montpellier II, d'avoir été mon Directeur de thèse. Il m'a, au long de ces trois années, transmis sa joie de vivre quotidienne en complément de son expérience scientifique.

Je tiens à remercier très chaleureusement Raphaël Kribich pour m'avoir co-encadré pendant cette thèse. Il a su me transmettre, en tant qu'expert dans le domaine, toute son expérience dans l'optique intégrée, ce qui m'a permis d'atteindre les objectifs fixés pour cette thèse. Il a su, en tant qu'ami, être là dans les moments difficiles et être de bon conseil au long des trois années, dans ses débuts de co-encadrant.

Je remercie Jihane Jabbour membre de l'équipe "Matériaux" du GES, pour sa collaboration dans le projet et le développement du nouveau matériau sur lequel j'ai pu inscrire mes circuits.

Le projet n'aurait pu être ce qu'il a été sans l'aide complémentaire de Florent Deliane qui m'a fait profiter de son expérience dans les moments de galère.

Je tiens à remercier toute l'équipe Nano-solo : les Pascals, Laurent, Michel et bien sur Sébastien ; les jeunes de l'atelier (Jacques, Fabrice et Thomas), pour leur bonne humeur communicative, Marie-agnès toujours présente dans les moments d'urgence, toute l'équipe de la salle blanche, Myke pour toute son aide ces trois années, et bien d'autres. Comment oublier de remercier les DJ Stéphane et Pierrot du 4ème étage pour l'ambiance quotidienne et leur disponibilité permanente !

J'ai eu le plaisir d'encadrer des étudiants pendant ces trois années : merci à Yannick le Québécois, Renaud et Rémy pour votre travail qui m'a été salutaire.

Il est difficile d'oublier de remercier tous les collègues de l'IES, devenu des amis, avec qui j'ai passé ces trois années : je pense bien sûr à Alain Dulin, Muriel, Nico le Ch'ti, Olivier, Guillaume Pille... Mais aussi les amis de toujours qui m'ont soutenu pendant toutes ces années : un grand merci à Gerald et Aurélie connus lors de mes débuts sur Montpellier pour leur réelle amitié, ainsi qu'à Seb et Laeti, Dr Coquel, Olive, Fabrice, les grimpeurs Sétois, le 13 cour des miracles...

Je ne peux écrire ces remerciements sans avoir une pensée pour mon grand-père qui était tellement fier que ses petits enfants fassent des études, ainsi qu'à mon oncle Pépin qui m'avait appris les tables de multiplication au milieu des champs entre deux laboures Gersoise. Je tiens à remercier toutes ma très grande famille notamment mes grands-mères pour leur soutien toutes ces années.

Je tiens à exprimer ma gratitude à mes parents et ma soeur. Je ne les remercierais jamais assez d'avoir toujours cru en moi, de m'avoir encouragé dans mes choix, pour leur soutien et pour leur patience, ce qui n'a pas toujours du être facile.

Je remercie mes beaux-parents qui m'ont soutenu toutes ces années et qui ont su limiter toutes les contraintes pour que la rédaction de cette thèse se passe dans de bonnes conditions, Landaises entre autre.

Enfin je tiens à remercier Delphine, qui tout au long de mon cursus universitaire, en faisant elle aussi preuve de grande patience, m'a soutenu et encouragé ("un jour tu leurs diras merci..."). Dans l'impossibilité de résumer en seulement quelques mots le bonheur et la chance que j'ai de l'avoir à mes cotés, je la remercie énormément pour tout.

---

J'ai appris à la fin de ma thèse que j'allais devenir Papa : une pensée va à ma fille dont l'arrivée prochaine me comblera de bonheur.



# Introduction

Les applications qui utilisent les propriétés de l'optique sont aujourd'hui de plus en plus nombreuses. Les domaines concernés s'étendent tous les jours au fur et à mesure des progrès techniques et continueront certainement dans les prochaines décennies. Le domaine le plus demandeur d'avancées technologiques reste aujourd'hui le transport d'information. Les réseaux de télécommunications pour le transport de données multimédia demandent une recherche de systèmes offrant une bande passante toujours plus grande face à l'accroissement du nombre des utilisateurs et de la qualité du service demandé.

La fibre optique à travers ses qualités : faibles pertes ( $0.1 \text{ dB/km}$  contre  $0.1 \text{ dB/m}$  dans le cuivre) et grande bande passante (quelques centaines de TeraHertz) représente une solution viable que certains fournisseurs d'accès à Internet (FAI) ont déjà choisie de proposer commercialement à leurs clients. Ces réseaux utilisent aujourd'hui de nombreuses fonctions optiques afin de diviser, répartir ou amplifier le signal. Des applications telles que le multiplexage optique en longueur d'onde, analogue au multiplexage en fréquences en électronique, ont vu le jour afin d'augmenter la capacité effective de transfert de données. Ces composants multiplexeurs sont présents essentiellement sous la forme de dispositifs en couches minces diélectriques sur substrat de verre, de réseaux de Bragg photo inscrits directement dans les fibres, de réseaux diffractifs en espace libre ou plus récemment en circuits optiques intégrés.

L'optique intégrée permet la miniaturisation des composants, et une fabrication industrielle de masse, sur l'exemple des circuits électroniques. La fabrication est effectuée généralement par photolithographie et masquage, échange ionique ou implantation ionique, ce qui offre peu de flexibilité dans la réalisation de circuits.

Lors de précédents travaux réalisés au sein du laboratoire, un matériau de type hybride organique-inorganique à photo-polymérisation radicalaire et parallèlement un système de photo-inscription localisée par laser ont été développés. Le matériau permet entre autres une modification locale de l'indice par simple insolation UV, ce qui induit une écriture simple

---

de circuits, et le procédé d'inscription par Laser qui a succédé à un procédé d'inscription par masque, s'est révélé très efficace, essentiellement par sa souplesse et la rapidité avec laquelle on peut parcourir les cycles conception-réalisation-test de développement.

Bien que la qualité des composants réalisés se soit révélée très satisfaisante, le laboratoire a voulu explorer les possibilités d'un nouveau matériau et d'une nouvelle technique d'inscription.

Le changement de matériau devait résoudre en particulier les problèmes d'adhérence des guides sur le substrat, améliorer certaines propriétés mécaniques, améliorer la transparence, simplifier la synthèse. Ce matériau est de type EETMOS à photo-polymérisation cationique.

Le remplacement du banc d'inscription laser devenu hors d'usage, se justifiait par la recherche d'une puissance ponctuelle plus élevée qui devrait favoriser une polymérisation plus complète et une écriture plus rapide, d'une longueur d'onde plus faible qui devrait favoriser une plus grande résolution, et d'un effet dû aux aspects impulsionsnels de l'émission laser. L'objectif de ce type de montage (écriture directe) étant de pouvoir concevoir un circuit, le réaliser et le tester dans la même journée afin de pouvoir intervenir rapidement sur toute étape de fabrication du matériau et du composant.

Nous présentons dans le premier chapitre, le contexte technologique dans lequel sont utilisés les circuits optiques. Nous abordons les différents domaines d'applications dans lesquels l'optique est présente, et plus particulièrement le domaine des télécommunications en détaillant les éléments optiques qui composent celui-ci.

Le deuxième chapitre présente les différents matériaux et les procédés d'inscription pour la réalisation de composants optiques. A travers une approche théorique, nous traitons au préalable des notions de propagation optique dans les guides d'ondes.

Le troisième chapitre présente d'une part le nouveau matériau hybride organique-inorganique développé et d'autre part le nouveau banc d'écriture laser UV : nous présentons les arguments qui nous ont poussé à choisir les différents éléments qui le compose, afin d'optimiser le fonctionnement de notre bâti d'écriture laser.

A travers la réalisation de tests d'écriture et la fabrication de composants simples de type "diviseurs/coupleurs en Y" ou coupleurs directionnels, nous présentons dans le chapitre quatre, les parties fabrications, tests, et optimisations lors de la réalisation effective de circuits intégrés optiques avec le nouveau matériau et le nouveau bâti.

Ont aussi été réalisés des composants plus complexes tels que des (dé)multiplexeurs en

longueur d'onde. Les travaux décrits dans le chapitre cinq ont été complétés par la réalisation d'un circuit original de (dé)multiplexage par code démontrant la faisabilité. Nous abordons ainsi la conception et les techniques de dessin de ces composants, la caractérisation et les problèmes rencontrés pour optimiser leur fonctionnement.

Pour finir, nous concluons sur les différents résultats obtenus et présentons les perspectives de ce procédé de fabrication alliant notre banc d'écriture laser pulsé développé et le nouveau matériau.

# Chapitre 1

## Contexte

### Sommaire

---

<b>1.1</b>	<b>Renouveau de l'optique . . . . .</b>	<b>8</b>
1.1.1	Variété des domaines d'applications . . . . .	8
1.1.2	L'optique et le stockage de données . . . . .	9
1.1.3	Instrumentation de contrôle et de mesure . . . . .	10
1.1.4	Les Télécommunications optiques . . . . .	13
1.1.5	Éléments terminaux des applications optiques . . . . .	14
<b>1.2</b>	<b>Conclusion . . . . .</b>	<b>18</b>

---

Ce chapitre présente le contexte dans lequel a été effectué notre travail. Nous exposerons ainsi les différents domaines d'applications de la photonique et l'intérêt qu'apporte cette discipline au sein des nouvelles technologies.

## 1.1 Renouveau de l'optique

### 1.1.1 Variété des domaines d'applications

L'optique connaît depuis plusieurs décennies un essor mondial incontestable. Après avoir été considérée comme une discipline classique et longtemps limitée au spectre visible et aux applications traditionnelles des images, l'optique est associée actuellement à un large éventail d'applications. Son approche s'est élargie : l'optique géométrique, s'est vue complétée par l'optique ondulatoire puis par l'optique physique et l'optique quantique. Les applications nouvelles sont souvent liées à l'aspect "photonique" de la lumière : science dont les contours sont mal définis, est généralement associée à l'étude de composants permettant la génération, la transmission, le traitement ou la conversion de signaux optiques, bien souvent dans un contexte proche de l'électronique (lasers, photodétecteurs ...). La photonique est aussi largement associée à "l'optique intégrée" : science des composants miniaturisés de traitement de la lumière. On retrouve la photonique dans de nombreux domaines d'applications :

- L'usinage industriel : découpe laser, marquage, nettoyage.
- Le médical : traitement des défauts de l'oeil (re-modélisation de la surface de l'oeil), bistouri laser, endoscopie, l'imagerie par rayons X.
- L'imagerie : système de reconnaissance, écran, projecteur.
- La sécurité et la défense : identification anthropométrique (biométrie...), aide au pilotage d'hélicoptères (détection d'obstacles), protection de zones sensibles, la détection de composés chimiques (colorimétrie, spectroscopie d'absorption ou d'excitation...).
- Le secteur de la mesure et du contrôle : télémétrie laser, vélocimétrie laser, holographie, analyse spectrale.
- Le spectacle : laser, projecteur, vidéo.
- Les nanotechnologies, la biotechnologie et la biophotonique : nombreuses applications pour différents secteurs : la microscopie avec l'utilisation du champ proche optique ; le médical pour la photo-thérapie et photo diagnostic in situ ; le traitement d'images avec l'amélioration du traitement, du stockage et du transfert des images.

Il y a 50 ans, l'optique était considérée comme une science achevée, susceptible seulement de quelques progrès techniques. Depuis quatre décennies, on assiste à un développement continu voire à un renouveau complet de cette science depuis l'apparition du laser et de la fibre optique.

Les propriétés des lasers (cohérence spatiale, cohérence temporelle, sources monochromatiques, puissance...) ont permis de développer des domaines jusque là méconnus comme l'holographie, des méthodes interférométriques de mesure, la spectroscopie à haute résolution, l'optique intégrée ou encore l'optique non linéaire. On a pu utiliser la lumière comme support de transmission des informations. L'apparition de la fibre optique de Silice, à faible pertes, parallèle à celle du laser, a propulsé le développement de la transmission des informations par voie optique.

Dans ce contexte, certaines applications méritent d'être plus détaillées. Les télécommunications apparaissent comme un secteur de l'optique en grande expansion aujourd'hui notamment grâce à l'évolution de l'internet à haut débit : il y a aujourd'hui en France 4,4 millions d'abonnés au haut débit en 2004 contre 19,4 millions en Février 2007, soit 5 fois plus en 3 ans [1]. Les applications de type capteur dans le militaire tout comme dans le civil font partie aussi d'un domaine en plein croissance, le secteur de l'instrumentation optique s'élargit avec l'avancée de la biophotonique, de la nanophotonique. On peut citer encore l'utilisation de l'optique pour la sauvegarde de données.

### 1.1.2 L'optique et le stockage de données

Alors que la concrétisation d'un ordinateur tout optique commercialisable a du mal à se mettre en place, le stockage optique de données commence à voir le jour. Le stockage de données est nécessaire pour les différents secteurs de notre société : on a chaque jour besoin de plus de capacité pour le stockage des données, et ceci sans erreur pour pouvoir les réutiliser plus tard. Les CD avec une capacité de 700 *Mo*, les DVD dont la capacité atteint les 9,4 *Go* pour les doubles couches, ou encore les "Blu Ray Disc" avec une capacité pouvant aller jusqu'à 45 *Go* et plus en trois couches, utilisent une technologie optique étant donné qu'ils sont gravés et lus par des têtes optiques. Des longueurs d'onde de plus en plus courtes (780 *nm* pour le CD et 405 *nm* pour le Blu-Ray) permet d'utiliser un faisceau de plus en plus étroit en jouant sur l'augmentation de l'ouverture numérique de celui-ci (0,45 pour les lecteurs CD, 0,85 pour le Blu-Ray).

Les prévisions pour 2015 d'après l'étude faite par *Photonics*<sup>21</sup> en 2006 [2], annoncent une capacité de stockage de 250 et 500 *Go* sur des supports de la taille d'un CD.

Un second type de stockage consiste à utiliser les phénomènes de l'holographie [3], pour pallier entre autre aux retards mécaniques qu'entraînent les lecteurs de type CD ou autres. Ces mémoires autorisent un débit pouvant aller jusqu'à 125 *Mo/s*, contre 7800 *ko/s* pour un lecteur CD "54X". Elles sont robustes et ont un faible temps d'accès. Le procédé consiste à coder la phase entre 2 faisceaux. On utilise divers matériaux pour ces mémoires : elles sont inscriptibles ou ré-inscriptibles. Il est cependant nécessaire d'utiliser ce genre de mémoire avec des systèmes de traitement d'information à base de circuits intégrés optiques afin de garder les performances de ces mémoires. *Photonics*<sup>21</sup> dans son rapport annonce pour 2015 [2] un développement de cette technologie pour pallier aux limites des supports CD.

### 1.1.3 Instrumentation de contrôle et de mesure

On retrouve des systèmes optiques à base de capteurs dans un nombre considérable d'applications, par exemple dans le domaine de l'armement [4]. Ainsi pour l'aide à la décision à partir d'observations, des capteurs de type infrarouges et visibles sont embarqués sur des véhicules terrestres ou satellites. Le développement de capteurs optiques pour la protection et l'efficacité des militaires sur le terrain, en action nocturne est un des domaines de recherche les plus étudié dans le domaine du militaire.

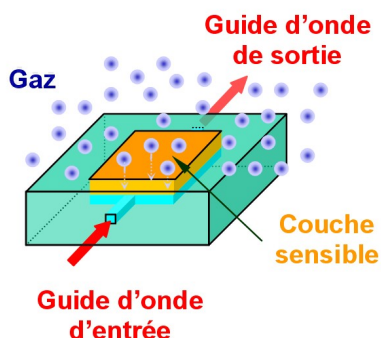


Figure 1.1 – Plateforme Optique pour un capteur de gaz

Peu à peu, ces systèmes sont adaptés pour une utilisation hors du domaine militaire : la détection d'obstacles sur des voitures dans le cas de capteur IR, la détection de gaz, la biométrie, ou encore dans la lutte contre le pillage du patrimoine culturel, sont les quelques exemples du développement des capteurs optiques aujourd'hui.

Les capteurs optiques sont, pour leurs fonctions premières, utilisés dans des zones à risques ou pour de l'analyse sans contact.

Les capteurs de gaz fondés sur un dispositif optique, par exemple, permettent de s'affranchir des risques liés à l'électricité dans des zones potentiellement dangereuses.

Les techniques de mesures et de contrôle sont extrêmement variées autant sur les domaines d'applications que sur les principes/propriétés utilisées : les techniques développées pour l'instrumentation sont très variées par exemple :

- Les contrôles et mesures interférométriques et holographiques[5]
- La métrologie optique dédiée aux écoulements
- Les capteurs à fibre optique
- La télémétrie laser
- La microscopie en champ proche
- Les pinces optiques

### 1.1.3.1 Microscopie à champ proche optique

La microscopie a révolutionné le domaine de la biologie ainsi que toutes les applications où l'observation d'éléments microscopiques est nécessaire. La microscopie classique est limitée en résolution par la diffraction, on s'oriente donc, dans le domaine de la biologie par exemple, vers la microscopie à champ proche optique de type SNOM [6][7] ou d'autres techniques d'observations telles que l'utilisation de microscopes à force atomique ou à effet tunnel.

L'utilisation de SNOM permet d'étudier à l'échelle sub-longueur d'onde, la fluorescence par exemple de molécules biologiques.

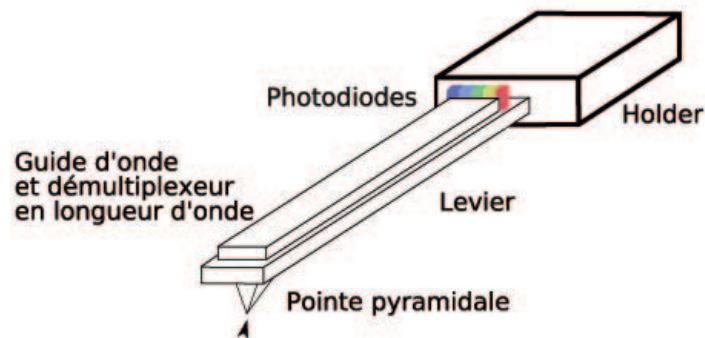


Figure 1.2 – Levier de SNOM avec guide d'onde, démultiplexeur et photodiodes intégrées



Le SNOM agit sur un échantillon en nano-source ou en nano-détecteur [8][9]. Les particules biologiques sont éclairées par une pointe de microscope à force atomique (AFM) [10] ouverte à son extrémité (voir figure 1.2). La source peut être déportée, tout comme le photodétecteur lequel mesure au niveau de la pointe l'onde évanescente. Un guide d'onde (fibre ou optique intégrée) assure le transport de lumière de/vers la pointe. Nous envisageons au laboratoire d'utiliser l'optique intégrée pour le guidage, et d'y intégrer des fonctions optiques tel que le filtrage en longueur d'onde.

### 1.1.3.2 Pincettes optiques (optical tweezers)

Les pincettes optiques permettent de "nano-manipuler" un objet sans le toucher, c'est-à-dire sans qu'il y ait de contact matériel entre l'outil et l'objet. Cette utilisation permet d'attraper une cellule ou un fragment d'organisme cellulaire, puis de les fixer ou de les transporter dans un autre site cellulaire [11]. La force mise en oeuvre est la pression de rayonnement exercée par la lumière sur l'objet. Une bille de taille microscopique de type cellule ou autre, est placée dans un faisceau à fort gradient d'intensité lumineuse. Les rayons lumineux incidents (A et B) qui traversent la bille changent de direction à leur entrée et à leur sortie (voir figure 1.3). Les modifications de quantité de mouvements qui en résultent produisent des forces optiques ( $F_a$  et  $F_b$ ) d'autant plus grandes que l'intensité lumineuse est forte ( $F_b > F_a$ ). La force résultante qui s'exerce sur la bille correspondant à la somme des forces optiques ( $F_a + F_b$ ) tend à attirer la bille dans la direction où la lumière est la plus intense.

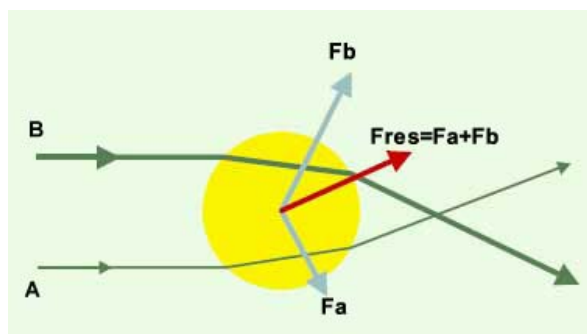


Figure 1.3 – Principe de manipulation d'un objet microscopique avec une pince optique

Le développement d'outils permettant la manipulation de cellules et de molécules de taille biologiques a ouvert, tout comme la microscopie à champ proche optique, des nouvelles voies de recherche dans le domaine de la photonique. Les techniques de nano-manipulation par les pincettes optiques ont rendu possible la mesure en temps réel des forces et contraintes exercées ou produites par des structures moléculaires. Les nombreuses applications tel que l'étude de

l'élasticité de la membrane du globule rouge a permis de mieux comprendre les propriétés visco-élastiques de celle-ci en prévention de la destruction prématurée. L'association pinces mécaniques et ciseaux optiques permettent ainsi de déplacer et injecter un spermatozoïde directement dans un ovule.

## 1.1.4 Les Télécommunications optiques

### 1.1.4.1 Les réseaux de télécommunications par fibres optiques

L'évolution des réseaux de télécommunication vers le transport de données multimédias et interactives conduit à développer des systèmes offrant une grande bande passante et capable de fonctionner sur de très grandes distances [12]. Le réseau optique représente actuellement une solution viable grâce aux qualités des fibres optiques. On atteint aujourd'hui des records de débit de l'ordre de  $14\ Tbit/s$  sur des liaisons de  $160\ km$  en réunissant 140 canaux sur une même fibre optique, chaque canal étant capable de transporter des informations à des débits limites pour l'électronique amont, tels que  $111\ Gbit/s$  [13]. Avec sa large bande passante ( $25\ THz$ ) la fibre optique permet de multiplier le nombre de canaux et donc d'augmenter le débit de transmission. Cette bande passante est des avantages de l'utilisation de la fibre optique par rapport au réseau cuivré, l'avantage premier étant la faible atténuation : on atteint quelques fractions de  $dB/km$ , alors que l'atténuation dans le cuivre est de l'ordre de quelques  $dB/m$  !

Les télécommunications optiques interviennent aujourd'hui essentiellement au niveau de raccordements des centraux pour le raccordement de l'internet haut débit [14] : le réseau des artères, le réseau capillaire restant essentiellement encore à base de cuivre. La figure 1.4 nous permet de constater schématiquement un réseau urbain du central ADSL jusqu'à chez l'abonné [15]. Sur ce schéma est représenté une architecture mixte d'un réseau : le client n'est pas directement raccordé à la fibre optique.

Il existe différents types d'architectures mixtes pour relier un abonné à l'internet haut débit de type ADSL :

- FTTCab (*Fiber To The Cabinet*) : La fibre optique s'arrête à l'armoire de sous-répartition. Le débit obtenu via la technologie VDSL est de  $20\ Mbits/s$  en moyenne dans le sens descendant, sachant que cette valeur dépend directement de la distance entre le sous-répartiteur et le client final.
- FTTCurb (*Fiber To The Curb*, "Curb" pour trottoir) : La fibre optique est amenée jusqu'au point de concentration. Cette solution permet de se rapprocher en moyenne

à environ 300 mètres du client : les débits possibles atteignent 30 *Mbits/s*.

En 2006, le fournisseur d'accès à Internet (FAI) Free décidait de se lancer dans le très haut débit. Il annoncé qu'à compter du premier semestre 2007, il commercialiserait une offre à 50 *Mbits/s*, reposant sur la fibre optique, pour 29,99 *euros* par mois : le FTTH (*Fiber To The Home*) ou encore le FTTB (*Fiber To The Building*). Concrètement, la fibre est amenée jusqu'à chez l'abonné : on remplace donc les boîtiers ADSL par des boîtiers optiques. Cette technologie devrait à terme permettre d'atteindre des débit de l'ordre de 2,5 *Gbits/s*, soit 100 fois plus qu'avec une architecture mixte "fibre optique-cuivre". Cette technologie permettra de plus de raccorder des abonnés d'une distance supérieure à 10 *Km* en restant avec des débits très élevés.

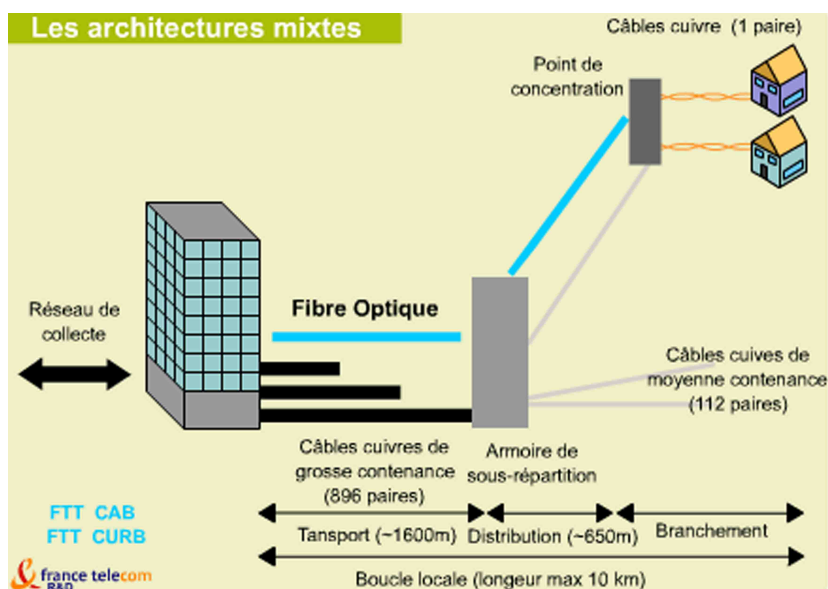


Figure 1.4 – Architecture de transmission mixte "fibre optique-cuivre" (Source France Télécom - RD).

### 1.1.5 Éléments terminaux des applications optiques

Pour que l'abonné au Haut débit puisse bénéficier des nombreux avantages de l'utilisation de l'optique pour le transport d'informations, il faut s'orienter vers une "chaîne tout optique", du réseau de collecte jusqu'à chez l'abonné, en passant par l'amplification optique globale sur les grandes distances pour éviter les remises en forme électroniques par canal. Dans le cadre du tout optique, sont développés des composants optiques dont les fonctions, relativement variées, sont similaires aux composants électroniques.

### 1.1.5.1 La fibre optique

Le développement de la fibre optique remonte aux années 70 dans les laboratoires de la firme Corning. Une fibre optique est essentiellement un guide de lumière qui évite une déperdition d'énergie le long de son parcours, ce qui serait évident pour une transmission en espace libre [16].

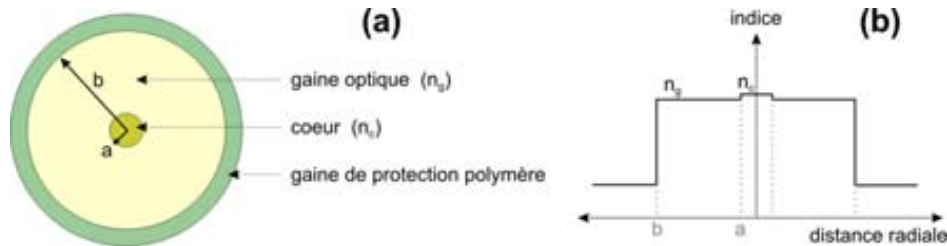


Figure 1.5 – Représentation de la coupe d'une fibre Optique (a) et de son profil d'indice

Une fibre optique peut être assimilée à un guide d'onde qui exploite les propriétés réfractrices de la lumière. Un cœur entouré d'une gaine (voir figure 1.5), d'indice de réfraction légèrement plus élevé (différence de quelques millièmes) peut confiner la lumière qui se trouve entièrement réfléchi à l'interface entre les deux matériaux (en raison du phénomène de réflexion totale interne). L'ensemble est généralement recouvert d'une gaine plastique de protection [17].

On peut classer les fibres optiques utilisées en Télécoms sous deux types : les fibres monomodes et les fibres multimodes.

- Les fibres multimodes, premières fibres optiques sur le marché, ont pour caractéristiques de transporter plusieurs modes (trajets lumineux) simultanément. La dispersion modale entraîne un étalement temporel du signal. Elles sont utilisées généralement, pour des bas débits et de courtes distances. Elles sont caractérisées par un diamètre de cœur de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de micromètres : les coeurs en multimodes sont de 50 ou 62,5  $\mu m$  pour le bas débit). Il est facile de coupler ces fibres avec d'autres dispositifs, optique intégrée par exemple, étant données les dimensions.
- Pour de plus longues distances et/ou de plus hauts débits, on préfère utiliser des fibres monomodes (dites SMF, pour Single Mode Fiber), qui sont technologiquement plus avancées car plus fines, ...et plus difficile à coupler.

Une fibre monomode ne connaît que la dispersion chromatique, beaucoup plus faible que la dispersion intermodale, due au fait qu'on ne transmet jamais une longueur

d'onde unique (ce qui correspondrait à une sinusoïde infinie, incapable de transmettre de l'information) mais un groupe de longueurs d'ondes. Ces fibres monomodes sont caractérisées par un diamètre de coeur de l'ordre de quelques longueurs d'onde soit moins d'une dizaine de micromètres (le coeur monomode est de  $9 \mu m$  pour le haut débit).

### 1.1.5.2 Les Composants optiques passifs à base de fibres

Tout en donnant des exemples d'applications dans le domaine des télécommunications, nous présenterons succinctement quelques composants passifs à base de fibres tels que les coupleurs à fibres, les isolateurs optiques, les réseaux de Bragg ou encore les multiplexeurs en longueurs d'ondes [18].

- Les coupleurs à fibres : Les coupleurs à fibres peuvent être réalisés par fusion contrôlée de deux fibres. La fusion contrôlée des deux fibres permet de fusionner les deux gaines et de rapprocher les deux coeurs de quelques microns seulement, permettant le couplage des deux guides (voir figure 1.6). On peut ainsi diviser un faisceau en deux ("splitter") ou coupler deux faisceaux. L'influence de la longueur d'onde dans le phénomène de couplage permet de réaliser des filtres en longueur d'onde. L'association de plusieurs coupleurs 1x2 peut se faire afin de créer un coupleur 1xN.

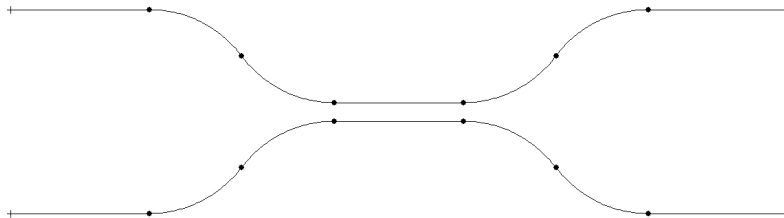


Figure 1.6 – Schéma d'un coupleur directionnel

- Les isolateurs optiques et circulateurs optiques : Un isolateur permet de protéger une source de lumière des réflexions de type retour de lumière vers la source. Ces réflexions rendent instables les lasers. L'isolateur optique est un dispositif qui empêche le retour de lumière dommageable dans les liaisons optiques [19].

Le phénomène mis en jeu ici est l'effet Faraday. Cet effet consiste en une rotation dépendante du sens de propagation, de la polarisation d'un faisceau lumineux.

Les circulateurs optiques sont fondés sur le même principe que les isolateurs optiques. La différence est que l'on peut récupérer le faisceau se propageant suivant le sens de

retour de l'isolateur sans le renvoyer vers l'entrée du dispositif. On isole l'entrée de la sortie en envoyant le signal sur une deuxième sortie.

- Les réseaux de Bragg : La plupart des fibres présentent un phénomène de photosensibilité : on peut modifier l'indice de réfraction en exposant la fibre à une radiation ultraviolette. On peut ainsi réaliser une variation d'indice en éclairant la fibre et ainsi obtenir au coeur de la fibre, un réseau de Bragg (voir figure 1.7) [20].

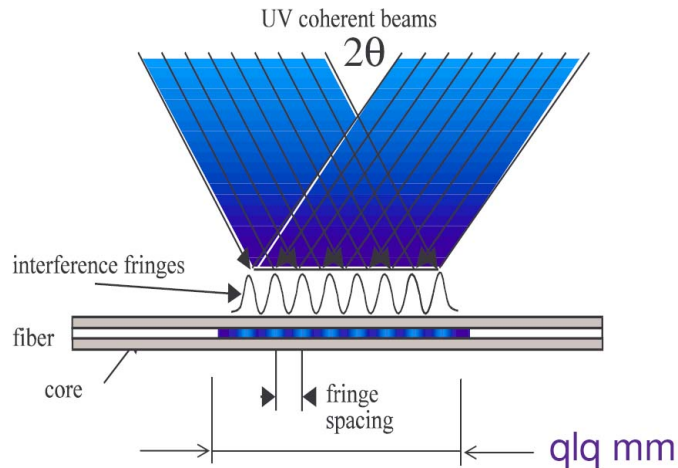


Figure 1.7 – Réalisation d'un réseau de Bragg dans une fibre optique

Le réseau de Bragg agit comme un miroir qui peut être très sélectif en longueur d'onde. Les applications sont nombreuses en télécommunications : on peut ainsi utiliser les réseaux de Bragg comme réflecteurs sélectifs, filtres multi-longueurs d'ondes ou compensateurs de dispersion chromatique.

- Le Multiplexeur optique :

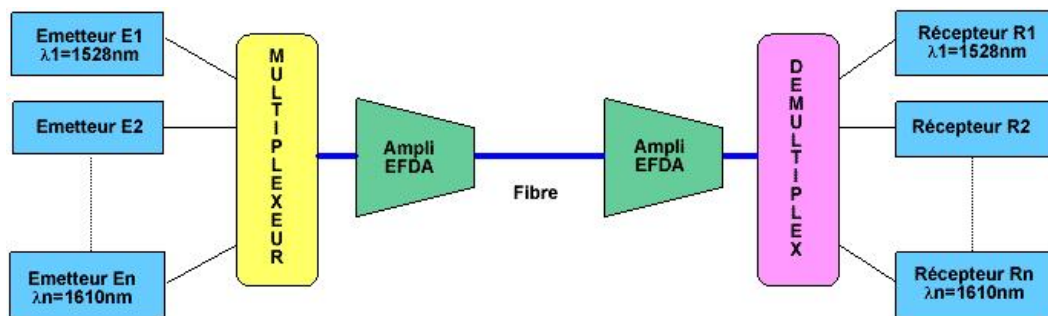


Figure 1.8 – Principe d'une liaison WDM

La technologie WDM (Wavelength Division Multiplexing) est née de l'idée d'injecter simultanément dans la même fibre optique plusieurs trains de signaux numériques à

la même vitesse de modulation, mais chacun à une longueur d'onde distincte, là où l'on injectait auparavant un seul signal lumineux, on augmente ainsi la capacité de transmission de la fibre. A l'émission, on multiplexe " $N$ " canaux au débit nominal " $D$ "; à la réception, on démultiplexe le signal global " $N * D$ " en " $N$ " canaux nominaux (voir figure 1.8). La technologie *WDM/DWDM* multiplie la capacité de transfert d'informations d'une fibre par le nombre de longueurs d'onde qu'elle transporte. Ce système ne nécessite pas une restructuration complète des réseaux existants. Il suffit d'ajouter aux extrémités des fibres optiques les circuits intégrés afin de multiplexer et démultiplexer le signal [12].

Ce multiplexage en longueur d'onde (WDM), purement optique, peut compléter un multiplexage électronique temporel ou fréquentiel.

La technologie la plus courante utilise des filtres en couches minces. Les réalisations se distinguent par la résolution en longueur d'ondes qu'elles permettent :

- WDM (Wavelength Division Multiplexing) (G.692) : plusieurs trains de signaux numériques à la même vitesse de modulation, mais chacun à une longueur d'onde distincte.
- DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) La technologie WDM est dite dense lorsque l'espacement utilisé entre deux longueurs d'onde est égal ou inférieur à  $100 \text{ GHz}$  soit  $0.8 \text{ nm}$ . On l'emploie désormais pour les transmissions longue distance. Dans la pratique, cela signifie que l'on fait passer dans une même fibre beaucoup de signaux portés par des fréquences très rapprochées les unes des autres.
- U-DWDM (Ultra - Dense Wavelength Division Multiplexing) permet jusqu'à 400 canaux de transmission.
- CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing) seulement 8 à 16 canaux, mais une technologie moins coûteuse utilisable notamment pour les boucles locales (MAN).

## 1.2 Conclusion

La photonique, une technologie clef aujourd'hui, a émergé il y a quarante ans d'une synthèse de technologies : l'optique, l'électronique, la physique, la chimie, les nanotechnologies... On retrouve des applications dans des domaines très variés tel que la santé, la sécurité, l'usinage industriel, les télécommunications...

Son épanouissement repose sur des avancées rapides en terme de technologies de fabrication, non seulement au niveau des supports essentiellement la fibre de silice, des composants

optoélectroniques (lasers et photodétecteurs), mais aussi de composants d'extrémité.

Ces composants doivent trouver des technologies fiables, les moins coûteuses possible, en général miniaturisées. Nous avons dans notre travail essayé d'affiner un type de technologie utilisable pour la partie composant d'optique intégrée, qui devrait permettre d'outrepasser les performances actuelles en terme de coût, de rapidité de développement, en compatibilité avec le support fondamental qu'est la fibre.

Nous allons explorer dans le chapitre suivant, les différents matériaux développés ainsi que les différentes techniques d'inscriptions associées aux matériaux pour réaliser des circuits intégrés optiques.



# Chapitre 2

## Optique Intégrée

### Sommaire

---

<b>2.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>22</b>
<b>2.2</b>	<b>Propagation optique</b>	<b>22</b>
2.2.1	Les guides d'ondes	23
2.2.2	Résolution directe des équations de propagation	25
2.2.3	Equations de propagation	25
2.2.4	Propagation dans un guide plan	27
2.2.5	Propagation dans un guide à largeur limitée	32
2.2.6	Conclusion	37
<b>2.3</b>	<b>Les différents matériaux utilisés pour la réalisation de circuits optiques</b>	<b>38</b>
2.3.1	Verres massifs	38
2.3.2	Les semi-conducteurs	40
2.3.3	Niobate de Lithium ( $LiNbO_3$ )	42
2.3.4	Silice sur Silicium	43
2.3.5	Les polymères Organo-Minéraux	45
<b>2.4</b>	<b>Matériaux photo-sensibles pour la réalisation de circuits optiques</b>	<b>46</b>
2.4.1	Les germanosilicates	47
2.4.2	Matériaux thermiquement réticulables	49
2.4.3	Les polymères	50
2.4.4	Les matériaux Hybrides sol-gel	54
<b>2.5</b>	<b>Procédés d'écriture de circuits optiques</b>	<b>54</b>
2.5.1	La Photolithographie	56
2.5.2	L'inscription laser	57

---

<b>2.6 Conclusion</b> . . . . .	<b>58</b>
---------------------------------	-----------

---

## 2.1 Introduction

On peut distinguer trois grandes périodes [21] dans la technologie optique.

- La première génération : ce sont les systèmes optiques, développés autour de l'optique dite "conventionnelle" qui nécessitent l'utilisation de miroirs, de lentilles et lasers à gaz afin de réaliser différents systèmes optiques. Le taux d'encombrement de ces systèmes est très importants de l'ordre du  $m^2$ .
- La seconde génération : il s'agit de la "micro-optique". Les systèmes mis en oeuvre utilisent des LEDs, des fibres multimodes... Les alignements sont plus difficiles, la taille du faisceau est de l'ordre du mm, et l'encombrement est de l'ordre de  $10\text{ cm}^2$ .
- La troisième génération : elle correspond à l'intégration de composants optiques dans une couche mince, les guides qui y sont inscrits dessinent un circuit optique à la façon des circuits intégrés. Les circuits permettant la propagation de la lumière sont de l'ordre du  $\mu m$  et entraînent une propagation monomode. L'encombrement de ces circuits reste de l'ordre du  $cm^2$ . Les technologies, fortement inspirées des technologies microélectroniques, sont nombreuses et variées autant au niveau des matériaux qu'au niveau des procédés d'inscription des circuits, des gravures. Notre travail centré sur l'optique intégrée, repose sur un nouveau matériau en cours de développement et de nouvelles approches pour l'inscription de circuits.

Nous allons dans ce chapitre présenter les différentes techniques d'inscription de circuits intégrés optiques et les matériaux qui leur sont associés. Nous commencerons par un historique de l'optique intégrée, puis nous poursuivrons sur la théorie des guides d'ondes éléments de base du guidage optique.

## 2.2 Propagation optique

Au 17<sup>e</sup> siècle, les connaissances en optique étaient fondées sur les lois de l'optique géométrique telles que les lois de la réflexion et de la réfraction.

Il faudra attendre le 19<sup>e</sup> siècle pour que les phénomènes de diffraction et de polarisation soit observés : Fresnel explique alors la diffraction par la nature ondulatoire de la lumière. A la fin du 19<sup>e</sup> siècle, James Maxwell montre que la lumière est un faisceau d'ondes électromagnétiques se déplaçant dans le vide à la vitesse constante : elle résulte d'une vibration du champ électrique et du champ magnétique en chaque point de l'espace.

Au 20<sup>e</sup> siècle, la nature corpusculaire (photons) de la lumière est évoquée, elle permet

l'énoncé de la théorie de l'émission stimulée de radiations lumineuses, ce qui donnera par la suite naissance aux lasers. Finalement, la physique quantique permet de faire la synthèse entre les photons et les ondes électromagnétiques du spectre lumineux.

Dans l'important domaine d'application que sont les télécommunications, l'étude des sources et des détecteurs relève plutôt de l'aspect corpusculaire, tandis que la transmission et les circuits passifs d'extrémité reposent sur les théories de la propagation optique. L'information à transmettre module une onde sinusoïdale généralement en amplitude, quelques expérimentateurs explorent les modulations de phase. L'utilisation des fibres optiques pour la transmission, peut être étendue à des fonctions optiques réalisées grâce à des dispositifs à fibre.

L'optique intégrée apparaît comme une alternative plus récente à la technologie à fibre : elle utilise, comme l'électronique, des technologies planaires : on dessine les circuits optiques dans des couches d'épaisseur de l'ordre du  $\mu m$ . Les fibres optiques sont alors remplacées par des guides d'onde à sections droites dont la topologie détermine en partie la fonction optique réalisée [22].

On peut distinguer trois aspects à prendre en compte lors de la fabrication de composants optiques :

- le choix du matériau : celui-ci détermine en partie la technologie que l'on va utiliser. Il implique de nombreux paramètres dans l'optimisation du confinement d'un guide d'onde.
- le mode de dépôt de couches : tout comme dans le domaine de l'électronique, les techniques utilisées peuvent être multiples pour chaque matériau.
- le procédé d'inscription : les technologies varient selon les matériaux utilisés, la précision d'inscription désirée, et là aussi souvent plusieurs possibilités....

Le composant de base de l'optique intégrée est le guide d'onde. Le principe du guidage optique est repris ici avant l'exploration des différents matériaux et des procédés d'inscription qui leur sont associés.

### 2.2.1 Les guides d'ondes

L'énergie lumineuse est portée par un champ électrique et un champ magnétique (onde électromagnétique). En optique intégrée, ou dans les fibres, ou encore en espace libre, on peut considérer le milieu comme neutre, sans charge, ce qui permet la simplification des équations de Maxwell, équations qui régissent la propagation électro-magnétique.

Toute onde peut se décomposer en ondes sinusoidales ("harmonique") [23]. Les milieux de propagation ont ici un comportement supposé linéaire, et au voisinage de l'axe de propagation ("approximation paraxiale"), on peut considérer les ondes planes. La propagation des vibrations des champs électriques et magnétiques (vecteurs perpendiculaires entre eux) peut se résumer en l'équation de Helmholtz, si l'on néglige les effets de polarisation.

Le comportement des guides d'ondes en optique intégrée et des fibres optiques est identique : la lumière est guidée par réflexion totale à l'intérieur d'une région dont l'indice de réfraction est légèrement plus élevé ( $\Delta n \approx 0,01$ ). Néanmoins la géométrie des fibres et des guides présente deux différences : la section des guides est approximativement rectangulaire pour des raisons de facilité de réalisation (voir figure 2.1), et l'extérieur est la plupart du temps non symétrique pour les guides.

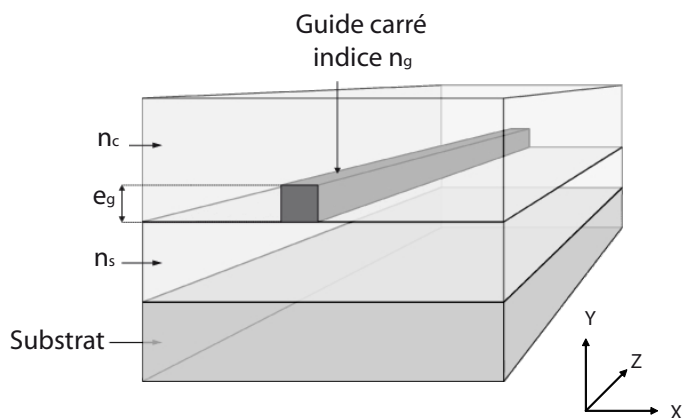


Figure 2.1 – Guide d'onde 3D

Les différentes technologies et matériaux employés ont conduits à différents types de guides 3D. Quelques structures sont représentées sur la figure 2.2.

L'intérêt d'un guide est avant tout d'infléchir la trajectoire a priori rectiligne de la lumière. Cette capacité est fortement dépendante du contraste d'indice. Les guides en relief permettent d'avoir une différence d'indice grande, tout comme les guides d'onde à partir de matériaux III-V ((GaAs ou InP) /Benzocycobutène(BCB)) [24]. Ceci permet d'obtenir des guides courbés dont le rayon de courbure peut être aussi faible de quelques  $\mu m$ . Néanmoins, les pertes engendrées par l'utilisation de ces matériaux, de l'ordre de  $50 \text{ dB/cm}$  impliquent des utilisations très spécifiques.

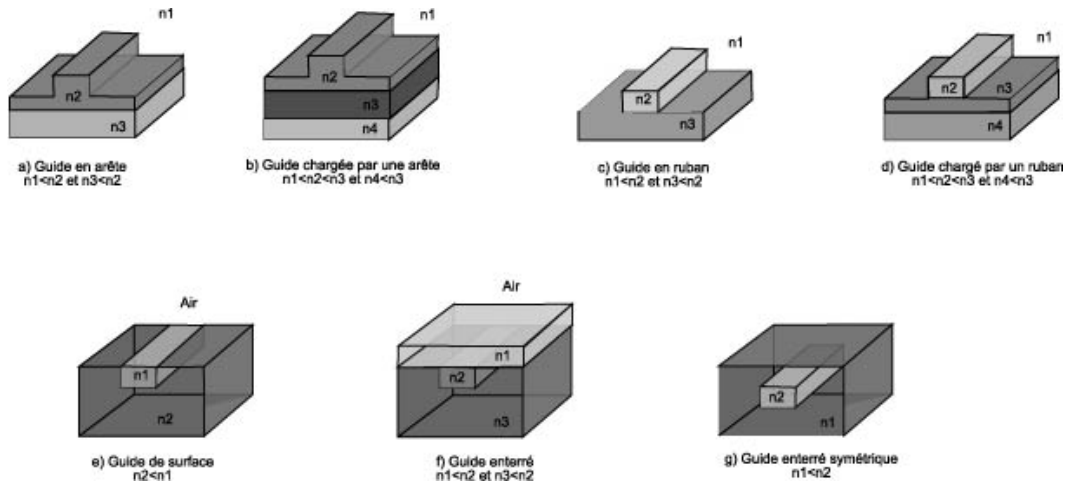


Figure 2.2 – Représentation de différents types de structures de guides d'onde 3D

### 2.2.2 Résolution directe des équations de propagation

Pour étudier la propagation, on peut naturellement en théorie revenir aux équations de Maxwell et calculer les champs électriques et magnétiques, en fonction du temps et en chaque point de l'espace par une méthode de différences finies (**F**inite **D**ifferences **T**ime **D**omain) ou par éléments finis. Ces méthodes utilisées en hyperfréquence sont très lourdes pour l'optique. Néanmoins, vue la progression des performances des ordinateurs, et la miniaturisation des circuits, elle est utilisable, par exemple pour les nano-circuits ou les cristaux photoniques. Elles s'affranchissent des hypothèses sur les directions de propagation, tiennent compte des réflexions etc. puisqu'elles cherchent directement des solutions aux équations de Maxwell.

On peut facilement évaluer la demande en ressources d'un tel programme : En ne considérant que deux dimensions (on suppose les champs et indices invariant dans la troisième dimension), on se limite alors à trois inconnues par point ( $E_x$ ,  $H_y$ ,  $H_z$ ). Une fenêtre de calcul de  $100 \times 5000 \mu m$  conduit à la résolution de quelques 200 millions d'équations à chaque pas de temps! Ceci nous fait préférer une approche "modale" où tout faisceau lumineux est considéré comme une somme de faisceaux élémentaires : les modes.

### 2.2.3 Equations de propagation

En fonction du temps, les ondes propagées peuvent être considérées comme la somme de composantes sinusoïdales. On considère ici en fonction du temps une onde sinusoïdale dite "harmonique" générique de fréquence angulaire  $\omega = \frac{2\pi \cdot c}{\lambda}$ . La vitesse de propagation de l'onde

dans le vide est égale à  $c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \cdot \mu_0}}$ .

Non loin de l'axe de propagation  $z$ , les rayons lumineux peuvent être assimilés à une onde plane (onde qui n'existe en fait que dans un milieu infini et homogène). Les composantes de l'onde plane (champ magnétique et champ électrique) obéissent aux équations de Maxwell, ici simplifiées parce qu'on considère le milieu diélectrique pur sans charge ni courant :

$$\text{Rot}(E) = -\mu_0 \frac{d\vec{H}}{dt} \quad (2.1)$$

$$\text{et Rot}(H) = \varepsilon_0 \cdot n^2 \frac{d\vec{E}}{dt} \quad (2.2)$$

Les solutions sont de la forme :

$$\vec{E} = \vec{E}(x, y) e^{j(\omega \cdot t - \beta \cdot z)} \quad (2.3)$$

$$\text{et } \vec{H} = \vec{H}(x, y) e^{j(\omega \cdot t - \beta \cdot z)} \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} = j \cdot \omega \quad \text{et} \quad \frac{\partial}{\partial z} = -j \cdot \beta$$

Dans la direction  $z$  de propagation, la constante  $\beta$  qualifie la vitesse de propagation ou la longueur géométrique d'une période :  $\beta = k_0 \cdot n_e = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot n_e = \frac{2\pi}{\lambda}$ . L'indice de réfraction  $n_e$  peut être perçu comme un facteur de ralentissement, et/ou de raccourcissement de la période  $\lambda$ .

Les composantes du champ électromagnétique sont indépendantes de  $y$  et deux familles de solutions peuvent vérifier les équations de Maxwell, les modes TE (Transverse Electric) de composantes non nulles  $E_y$ ,  $H_x$  et  $H_z$  et TM (Transverse Magnétique) avec  $H_y$ ,  $E_x$  et  $E_z$ . Les équations d'ondes pour les modes TE et TM sont :

Modes TE :

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + (k_0^2 \cdot n^2 - \beta^2) \cdot E_y = 0 \quad (2.5)$$

$$H_x = -\frac{\beta}{\omega \cdot \mu_0} E_y \quad (2.6)$$

$$H_z = -\frac{1}{j \cdot \omega \cdot \mu_0} \frac{\partial E_y}{\partial x} \quad (2.7)$$

Modes TM :

$$\frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2} + (k_0^2 \cdot n^2 - \beta^2) \cdot H_y = 0 \quad (2.8)$$

$$E_x = -\frac{\beta}{\omega \cdot \epsilon_0 \cdot n^2} H_y \quad (2.9)$$

$$E_z = -\frac{1}{j \cdot \omega \cdot \epsilon_0 \cdot n^2} \frac{\partial H_y}{\partial x} \quad (2.10)$$

#### 2.2.4 Propagation dans un guide plan

Nous allons traiter ici de la propagation dans un guide plan dont l'intérêt est de fournir des résultats calculables et extensibles par combinaison aux guides canaux.

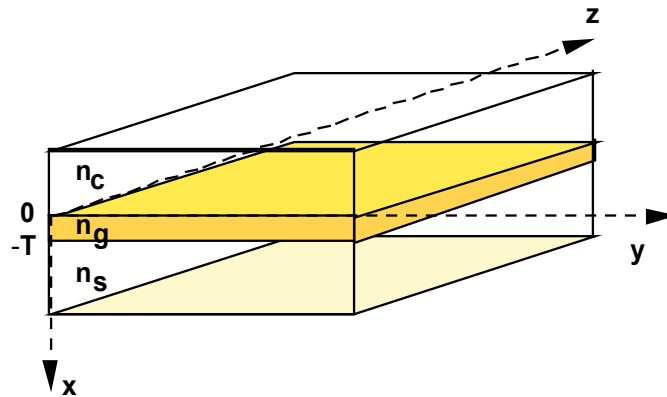


Figure 2.3 – Représentation d'un guide plan

Les équations différentielles associées à des conditions aux limites au niveau des plans de séparation, conduisent à un problème de valeurs propres où les valeurs propres sont les constantes de propagation  $\beta$  élevées au carré, des modes TE et TM possibles. Les vecteurs propres sont les profils des champs correspondants. L'indice effectif  $n_e = \frac{\beta}{k_0}$  caractérise la propagation possible, sa vitesse de phase et sa forme, dans le guide étudié, en fonction de la longueur d'onde dans le vide  $\lambda$  de l'excitation lumineuse.



### 2.2.4.1 Approche par l'optique géométrique

On peut analyser grossièrement les propagations possibles dans un guide plan grâce à l'optique géométrique [25]. L'angle d'injection influe sur la propagation de la lumière (mode) : on associe à chaque mode un angle de propagation, ce qui nous permet de calculer une vitesse de propagation (et un indice effectif) en considérant la projection du vecteur d'onde sur l'axe de propagation du guide. L'indice effectif est relié à l'angle d'incidence  $\theta$  ( $\theta$  est de  $90^\circ$ ) pour une lumière incidente dans le plan de la couche guidante). Les angles critiques  $\theta_c = \sin^{-1} \left( \frac{n_c}{n_f} \right)$  et  $\theta_s = \sin^{-1} \left( \frac{n_s}{n_f} \right)$  délimitent les possibilités de propagation : modes guidés si  $\theta > \theta_s$ , mode rayonnant dans le substrat si  $\theta_s > \theta > \theta_c$ , et  $\theta < \theta_c$  comme on peut le constater sur la figure 2.4 :

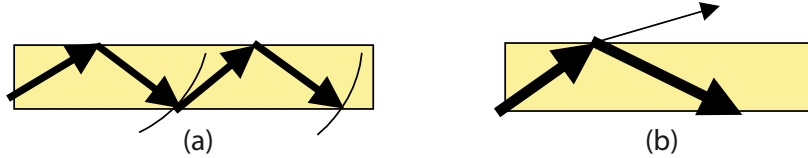


Figure 2.4 – Approche de la propagation guidée grâce à l'optique géométrique : réflexions totales et rayons en phase après une double réflexion (a), fuite dans la gaine (b)

Si le matériau est sans pertes, seul le cas de la réflexion totale conduit à une propagation de la lumière sans atténuation.

Après deux réflexions (sur les deux interfaces) le rayon lumineux doit se retrouver en phase avec le rayon parallèle qui ne s'est pas réfléchi sur un tronçon donné, ayant donc parcouru un nombre entier de longueurs d'ondes : seuls certains angles par rapport à l'axe de propagation permettent de retrouver un déphasage multiple de  $2\pi$ . Ceci explique les valeurs discrètes des angles possibles et des indices effectifs (indice du coeur \*  $\cos(\text{angle})$ ) : Sur la figure 2.5, les rayons parallèles (de même angle  $\alpha$ ) doivent se retrouver en phase (sur AC).

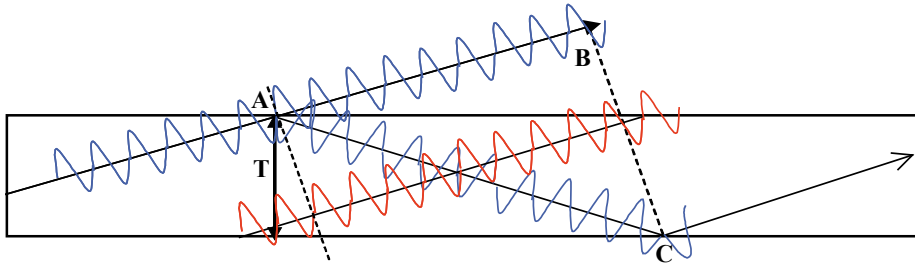


Figure 2.5 – Approche géométrique : Rayons en phase après deux réflexions

$$\frac{2\pi \cdot AC}{\lambda/n_g} - \pi - \frac{2\pi \cdot AB}{\lambda/n_g} - \pi = 2.m.\pi \quad (2.11)$$

La différence de chemin = nb entiers de longueurs d'ondes.

$$\frac{2\pi.AC}{\lambda}(1 - \cos(2\alpha)) = \frac{2\pi.T/\cos\alpha}{\lambda/n_g}(1 - \cos(2\alpha)) = 2(1+m)\pi \Rightarrow \sin(\alpha_m) = (1+m)\frac{\lambda/n_g}{2\pi} / 2 * T \quad (2.12)$$

Ce calcul est approximatif : il ne tient pas compte de l'indice de la gaine, ou du contraste d'indice. Une amélioration consiste à considérer une largeur effective  $T_e$  plus importante et fonction de l'écart d'indice. On considère ainsi qu'une partie de la propagation s'effectue à l'extérieur du coeur du guide (effet Goeth-Hanchen).

#### 2.2.4.2 Approche par résolution transversale

Dans un guide plan, les modes peuvent être évalués avec exactitude en résolvant l'équation de propagation dans chaque milieu et en ajustant les conditions aux limites. Les profils transversaux des champs électriques et magnétiques sont sinusoïdaux à l'intérieur du coeur et en exponentielles décroissantes à l'extérieur pour des raisons de stationnarité.

On considère la polarisation TE. L'analyse de TM est similaire. Les solutions de l'équation 2.5 sont :

$$E_y = E_c \cdot e^{(-\gamma_c \cdot x)} \quad (2.13)$$

dans la couche supérieure (couche tampon),  $x > 0$

$$E_y = E_g \cdot e^{(k_x \cdot x + \phi_c)} \quad (2.14)$$

dans la couche guidante,  $0 > x > -T$

$$E_y = E_s \cdot e^{(k_x \cdot x + \phi_c)} \quad (2.15)$$

dans le substrat,  $x < -T$

Les constantes de propagations dans la direction x peuvent s'exprimer en fonction de l'indice effectif  $n_e = \frac{\beta}{k_0}$  :

$$\gamma_c = k_0 \quad k_x = k_0 \quad \gamma_s = k_0$$

et les conditions aux limites précisent par continuité :

$$E_c = E_f \cdot \cos \phi_c \Rightarrow \phi_c = \tan^{-1} \left( \frac{\gamma_s}{k_x} \right) \quad (2.16)$$

continuité à  $x = 0$

$$E_s = E_f \cdot \cos(k_x T - \phi_c) \Rightarrow K_x T - \phi_c = \tan^{-1} \left( \frac{\gamma_s}{k_x} \right) \quad (2.17)$$

continuité à  $x = -t$

En éliminant  $\phi_c$  :

$$k_x T - \tan^{-1} \left( \frac{\gamma_c}{k_x} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{\gamma_s}{k_x} \right) = (m + 1) \cdot \pi \quad (2.18)$$

$m(= 0, 1, 2, \dots)$  dénote le numéro de l'ordre du mode.

Comme les indices des trois régions sont connus, la quantité de base  $k_x$  peut être obtenue, et donc l'indice effectif  $n_e$ . Ses valeurs sont discrètes et comprises entre  $n_s$  et  $n_g$ , dépendante de l'entier positif  $m$  (ordre du mode).

La plus grande valeur de  $n_e$  correspond au mode fondamental, ou en optique géométrique à l'incidence la plus proche de  $90^\circ$ .

Cette équation non linéaire peut être résolue sur une simple calculatrice programmable par une méthode de type Newton ou sécante (approximations successives), sur tableur ou a fortiori avec logiciel mathématique ou code dédié dans un langage de programmation. La convergence étant quadratique, on obtient en moins d'une dizaine d'itérations une valeur d'indice effectif pour un mode dans un guide plan donné.

Les champs électriques ou magnétiques ont des profils (amplitude dans le sens perpendiculaire à la propagation) caractéristiques : nombre de maxima (ou nombre de zéros du profil). On peut approximer ces profils par une cosinusoïde à l'intérieur du guide, et des exponentielles à arguments négatifs (décroissante) en dehors (les ondes dites évanescentes  $\rightarrow 0$  à l'infini).

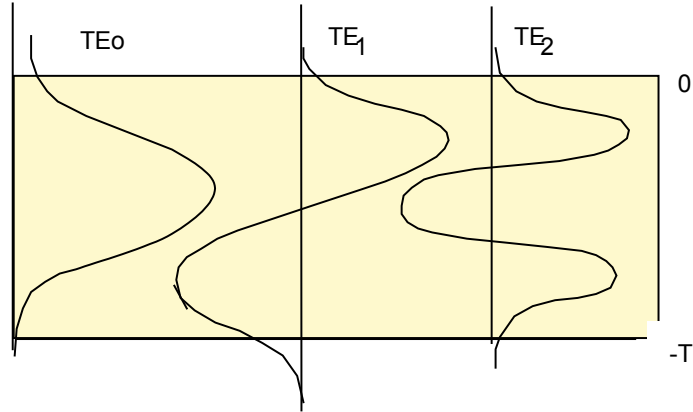


Figure 2.6 – Profils des modes TE dans un guide

### 2.2.4.3 Modes et courbes de dispersion

On peut introduire la fréquence réduite ou normalisée pour caractériser un guide plan d'épaisseur  $T$  à une longueur d'onde  $\lambda$ .  $V$  dépend directement des paramètres qui conditionnent la propagation : le rapport épaisseur "T/longueur d'onde  $\lambda$ " et l'écart (le "contraste") d'indice entre le guide et son substrat.

$$V = k_0 T \sqrt{n_g^2 - n_s^2} \quad (2.19)$$

avec  $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$

On définit aussi le coefficient de dissymétrie  $a_e = \frac{n_s^2 - n_c^2}{n_g^2 - n_s^2}$  au cas où l'indice supérieur  $n_c$  serait différent de l'indice du substrat  $n_s$ . Chaque mode (repéré par un entier  $m$ ) sera associé à une valeur  $n_e$  et un profil.

Si l'on permute les rôles de l'indice effectif (qui était l'inconnue) et des caractéristiques géométriques ( $V$ ) du guide plan (paramètres), l'équation devient une simple formule qui donne  $V$  en fonction de l'indice effectif. A partir de ces calculs point par point, on peut tracer les courbes  $b_e$  en fonction de  $V$  dites courbes de dispersion par analogie avec les fibres où, étant donné l'utilisation sur grande distance, l'indice effectif va essentiellement entraîner une dispersion (étalement des impulsions transmises).

L'indice effectif normalisé  $b_e$  peut être lu sur la courbe de dispersion, laquelle est calculée numériquement comme solution de l'équation ci-dessous  $F(u) = 0$  d'inconnue  $b_e$ .

$$F(u) = (m + 1)\pi - \arctan \sqrt{\frac{1 - b_e}{b_e}} - \arctan \sqrt{\frac{1 - b_e}{b_e + a_e}} - V \cdot \sqrt{1 - b_e} \quad (2.20)$$

On peut en déduire  $b_e$  :

$$b_e = \frac{n_e^2 - n_s^2}{n_g^2 - n_s^2} \quad (2.21)$$

## 2.2.5 Propagation dans un guide à largeur limitée

Les guides plans n'ont que peu d'intérêt pratique, les calculs qui leur sont associés peuvent néanmoins être utilisés pour les guides à largeur limitée.

La plupart des guides à la base des circuits optiques intégrés doivent être de dimensions telles que seul le mode fondamental peut se propager. Dans ce cas la puissance lumineuse ne se propage qu'avec une seule vitesse. Parallèlement le fonctionnement de certains circuits reposent sur les propagations différentielles des premiers modes (coupleurs directionnels, phasars, WDM, dispositifs à interférences multimodales), d'où l'intérêt du calcul des modes.

### 2.2.5.1 Méthode de l'indice effectif

Il existe plusieurs façons de calculer les modes : une méthode simple dite "de l'indice effectif" fondée sur deux calculs quasi analytiques dans des guides plans [21] donne des résultats assez précis pour les guides usuels en égard à sa simplicité. Elle permet de calculer les indices effectifs et les profils des modes dans un guide de section rectangulaire, en plusieurs étapes :

1. on considère un guide plan de même épaisseur que le guide, et on calcule ses indices effectifs, en général on utilise cette méthode pour des épaisseurs faibles conduisant à un guide plan unimodal.
2. on considère maintenant un guide plan d'épaisseur égale à la largeur du guide, et dont le matériau central a pour indice l'indice effectif résultant du calcul antérieur

3. les indices effectifs trouvés sont d'autant plus proches des indices effectifs calculés par des méthodes plus sophistiquées, qu'ils sont proches de l'indice du coeur (les premiers modes).

Cette méthode simple est surprenante par l'efficacité de ces résultats.

### 2.2.5.2 Calcul des modes par la méthode de Marcuse

Il est néanmoins plus exact de résoudre (en scalaire ou en vectoriel) l'équation d'onde en deux dimensions dans une section. Un logiciel a été développé au laboratoire pour le calcul de guides à section quelconque.

Trouver les modes en résolution "scalaire" et leur constante de propagation  $\beta (= k.n_e)$  peut être compris comme un problème de valeurs propres : l'équation d'onde pour un champ électrique ou magnétique  $F$  si dessous :

$$\left( \frac{\delta^2}{\delta x^2} + \frac{\delta^2}{\delta y^2} + \frac{\delta^2}{\delta z^2} \right) F_{xyz} + k^2 n^2 F_{xyz} = 0 \quad (2.22)$$

devient :

$$\left( \frac{\delta^2}{\delta x^2} + \frac{\delta^2}{\delta y^2} + k^2 n^2 \right) F_{xyz} = \beta^2 \cdot F_{xy} \quad (2.23)$$

avec  $F_{xyz} = e^{(-i.\beta.z)}.F_{xy}$

Etant donné la nature transcendante (exponentielle ou sinusoidale) des profils des champs de mode, nous avons préféré considérer les profils (inconnus) comme des combinaisons linéaires de fonctions de base orthogonale [26] plutôt qu'une simple décomposition de type différences finies.

$$F(x, y) = e^{(-i.\beta.z)} \sum c_{ij} S_i(x) \times S_j(y) \quad (2.24)$$

La base choisie est constituée de fonctions sinusoidales (facilement dérivables) nulles sur les limites du domaine rectangulaire entourant le ou les guides :

$$S_{ij}(x, y) = 2 / \sqrt{L_x \cdot L_y} \cdot \sin(i \cdot \pi \cdot x / L_x) \cdot \sin(j \cdot \pi \cdot y / L_y) \quad (2.25)$$

Une largeur  $L_x$  ou  $L_y$  du domaine double par rapport à celle de la section est suffisante dans la plupart des cas. En substituant  $F(x, y)$  (et ses dérivées) dans l'équation d'onde pour

tous les couples  $ij$ , on obtient 2.26 en  $c_{ij}$  :

$$E(\dots C_{ij}\dots, x, y) = \Sigma C_{ij} \left[ -n_e^2 - \frac{\pi^2}{k^2} \left( \frac{i^2}{L_x^2} + \frac{j^2}{L_y^2} \right) + n^2(x, y) \right] S_{ij}(x, y) = 0 \quad (2.26)$$

L'équation 2.22 en  $c_{ij}$  sera vérifiée pour tout point  $(x,y)$  du domaine, si pour toute fonction poids  $W(x, y)$ ,  $\iint E(\dots c_{ij}\dots, x, y) x.W(x, y).dx.dy = 0$  est vérifié. L'équation 2.26 est approximativement vérifiée si la double intégrale est nulle pour l'ensemble des fonctions de base  $S_{ij}(x, y)$  précisément choisies comme fonction  $W(x,y)$  : Cette méthode (dite de Galerkin [27] utilisée dans les méthodes d'éléments finis) substitue donc un système d'équations intégrales à une équation différentielle résolue dans un domaine.

L'intégration par sous-domaines peut être effectuée par voie analytique sur des sous-domaines rectangulaires. De façon à pouvoir prendre en compte des géométries particulières, nous avons introduit une transformation bi-linéaire pour une intégration précise applicable à toute forme polygonale.

### 2.2.5.3 Calcul des modes pour guides de section quelconque

Le logiciel développé au laboratoire introduit [28] dans la méthode de Marcuse une souplesse quant à la description des formes qui ne sont plus limitées à des rectangles horizontaux, qui sont composées de quadrilatères quelconques. Les guides "ronds" ou trapézoïdaux que l'on peut rencontrer en pratique sont ainsi beaucoup mieux pris en compte.

Le calcul de l'intégrale sur un quadrilatère quelconque, dérivé des outils logiciels d'éléments finis [29], est fondé sur l'intégration dans un rectangle de référence  $(-1, 1) - (1, -1)$  et l'utilisation d'une interpolation bilinéaire :

$$\iint E(x, y).dx.dy = \iint E(x(\eta, \zeta), y(\eta, \zeta)) \det(J).d\eta.d\zeta \quad (2.27)$$

où  $(\eta, \zeta)$  sont des coordonnées de référence variant chacune entre  $-1$  et  $+1$ , les fonctions  $x(\eta, \zeta)$  et  $y(\eta, \zeta)$ , sont respectivement égales à :

$$x(\eta, \zeta) = [N] [x_0 x_1 x_2 x_3]^t \text{ et } y(\eta, \zeta) = [N] [y_0 y_1 y_2 y_3]^t$$

avec

$$[N] = 1/4 \times [(1 - \zeta) \times (1 - \eta)(1 + \zeta) \times (1 - \eta)(1 + \zeta) \times (1 + \eta)(1 - \zeta) \times (1 + \eta)], \text{ (fonction d'interpolation)}$$

$x_i$  et  $y_i$  sont les coordonnées des sommets du quadrilatère, et  $\det(J)$  est le déterminant de la matrice Jacobienne de la transformation.

L'intégration choisie est une méthode numérique de Gauss-Legendre, développée en produit (intégration dans les deux dimensions). Elle repose sur l'évaluation de l'intégrande en des points particuliers optimisés (zéros des polynômes, fournies par des tables). Pour un nombre de points donnés, la méthode est beaucoup plus précise que celles fondées sur un espacement régulier (Simpson ou trapèzes), particulièrement, comme c'est le cas ici, lorsque les intégrandes contiennent des fonctions transcendentes.

#### 2.2.5.4 Calcul vectoriel des modes

Les deux composantes perpendiculaires ( $E_x$  et  $E_y$ ), dans deux équations sont du type :

$$\frac{d^2 E}{dx^2} + \frac{d^2 E_x}{dy^2} + (k^2 n(x, y)^2 - \beta^2) \cdot E_x + \frac{d}{dx} \left( E_x \frac{d \ln(n_{xy}^2)}{dx} + E_y \frac{d \ln(n_{xy}^2)}{dy} \right) = 0 \quad (2.28)$$

Quoique que plus lourde, la démarche reste du même type, avec un vecteur inconnu juxtaposition des composantes de  $E_x$  et  $E_y$  décomposées sur la même base orthogonale des  $S_{ij}(x, y)$ .

#### 2.2.5.5 Implémentation logicielle

Pour ces calculs, le laboratoire a développé un logiciel écrit en langage Java [30], langage "objet" : le programme est structuré en blocs qui peuvent être modifiés indépendamment : la section de guidage est décrite à l'aide de rectangles, et de quadrilatères quelconques. Il serait facile d'introduire d'autres formes de description comme l'ellipse en fournissant une méthode d'intégration des produits de fonctions de base sur l'ellipse. Des formes à variation d'indices de réfraction peuvent également être rajoutées. Outre les interfaces conviviales standards (description à la souris...), java rend ce logiciel portable et accessible par internet [28], tout en étant exécuté sur la propre machine de l'utilisateur.



### 2.2.5.6 Approche modale de la propagation

La connaissance des modes (profil et vitesse (i.e. indice effectif)) permet une simulation directe de la propagation par tronçon (chaque tronçon ayant ses propres modes). On peut combiner ce type de calcul avec des calculs de type optique diffractive et simuler la propagation dans des circuits aussi complexes que des phasars WDM [31]. Nous avons utilisé pour nos travaux cette approche pour une première évaluation des paramètres.

### 2.2.5.7 Approche directe de la propagation : méthode des faisceaux propagés (BPM)

La méthode des faisceaux propagés (BPM) est une méthode numérique qui résout une équation différentielle de proche en proche par calcul direct du profil du champ électrique dans une tranche  $dz$  en fonction des tranches précédentes traversées. Les notions de mode n'interviennent pas. Elle est assez précise mais demande plus de ressources informatiques que les précédentes. Elle est utilisable pour des guides dont la géométrie change et c'est son grand intérêt [32]. La méthode de calcul par BPM FD (Beam Propagation method, finite differences) est la suivante :

A partir de l'équation scalaire de Helmholtz (équation aux valeurs propres), en séparant le terme en  $d^2 E_y/dz^2$ , on obtient (ici en 2D : x et z), en mode TE :

$$2j.k_0 n_{ref} \frac{dE_y}{dz} = \frac{d^2 E_y}{dx^2} + k_0^2 (n^2(x, z) - n_{ref}^2) E_y \quad (2.29)$$

où  $n_{ref}$  est un indice moyen si possible choisi proche de l'indice effectif (non connu mais estimé).

Ceci provient du remplacement suivant :

$$\frac{d^2 E_y}{dz^2} = \frac{d}{dz} \left( \frac{dE_y}{dz} \right) = -j.k_0.n_{ref} \frac{dE_y}{dz} \quad (2.30)$$

Le premier terme correspond à la discrétisation :

$$2.j.k_0.n_{ref} \frac{dE_y}{dz} = 2.j.k_0.n_{ref} \frac{E_{z+\Delta z} - E_z}{\Delta z} \quad (2.31)$$

On peut donc extraire l'expression de  $E_{z+\Delta z}$ .

A partir du profil connu (ensemble des valeurs pour les différents  $x$ ) dans la tranche en  $z$ , on peut calculer le profil dans la tranche  $z + dz$ .

Le programme jBPM développé au sein de notre équipe, calcule successivement dans chaque tranche (ligne verticale) le nouveau profil  $E_{z+\Delta z}$ .

On peut voir sur la figure 2.7 la simulation de la propagation d'un faisceau dans le star-coupler de sortie d'un phasar WDM réalisé (voir chapitre 5).

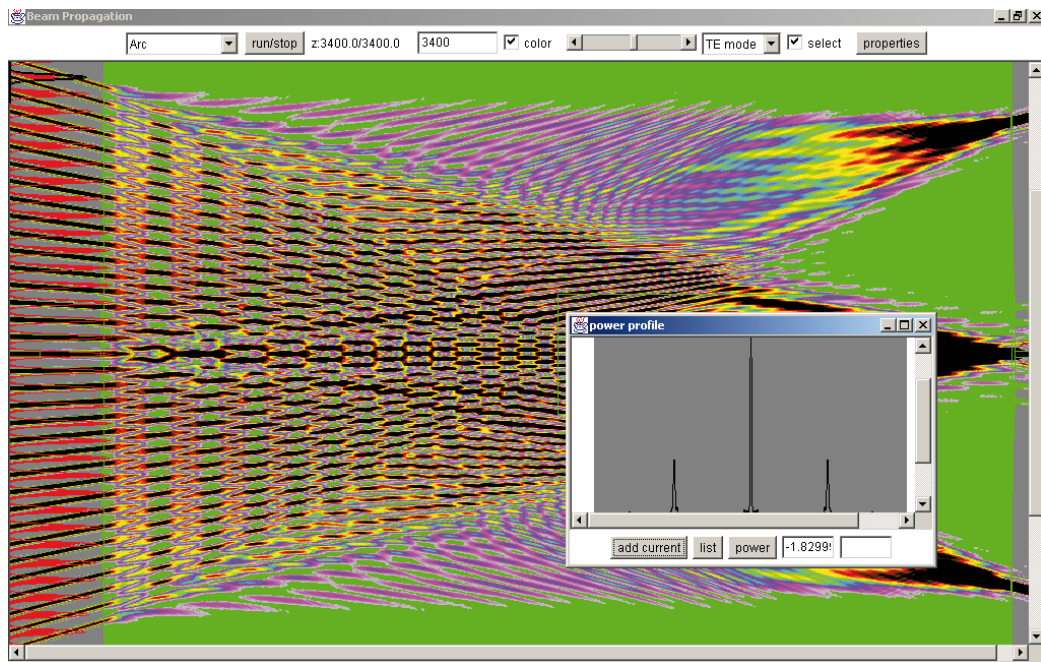


Figure 2.7 – Simulation de la propagation d'un faisceau dans un star-coupleur

## 2.2.6 Conclusion

La première partie de ce chapitre avait pour but la présentation de l'élément clé de l'optique intégrée : le guide d'onde, sa structure, ses modes, la propagation... Différentes approches sont possibles : d'une part l'approche géométrique, l'approche quasi-analytique, la méthode de l'indice effectif, le calcul de modes par résolution d'un problème aux valeurs propres permettant à partir des valeurs des indices effectifs de calculer une propagation pour chacun des modes (approche modale), et d'autre part une méthode directe ne donnant pas les modes mais directement le profil du faisceau.

Ces approches ont permis de développer un ensemble de logiciels permettant l'étude de la propagation dans des circuits complexes, donc leur conception, l'ajustement des para-

mètres. Ceci nous a permis de développer des circuits innovants que nous détaillerons dans le chapitre 5.

Nous traiterons dans la deuxième partie de ce chapitre des différents procédés utilisés pour réaliser des guides d'ondes optiques. Nous présenterons ainsi les principaux matériaux utilisés, les différentes techniques de dépôt de couches, ainsi que les procédés d'inscription de circuits qui leur sont associés.

## 2.3 Les différents matériaux utilisés pour la réalisation de circuits optiques

Plusieurs techniques sont élaborées pour produire des circuits optiques intégrés. Chaque matériau peut être associé à un procédé d'inscription qui lui est propre. Nous allons aborder dans ce paragraphe les matériaux les plus couramment employés pour le guidage optique.

### 2.3.1 Verres massifs

Les premiers guides confinés réalisés par échange ionique ont été obtenus en 1972. Aujourd'hui des composants optiques intégrés fabriqués par cette méthode sur des verres d'oxyde sont disponibles commercialement. Les substrats de verre sont, en général de  $SiO_2$  (verre à vitres) ou de  $B_2O_3$  (pyrex) avec de faibles proportions d'alcalins ( $Na, K$ ) ou alcalinoterreux ( $Ca$ ), présents sous forme ionique. Depuis quelques années, de nombreuses études ont été menées pour appliquer ce procédé sur les verres de fluorures, dont les propriétés optiques sont très prometteuses.

Les guides 3D obtenus par cette technique sont des guides de surface. Le principe de cette méthode consiste à modifier localement la composition d'un verre, grâce à un échange d'ions, provoquant ainsi une variation de l'indice de réfraction, ce qui permet donc de créer une structure guidante si l'indice résultant est supérieur à celui du substrat. La variation d'indice peut être le résultat d'un ou de plusieurs des phénomènes suivants :

- la variation de la densité du verre
- la polarisabilité différente des ions échangés
- la présence de contraintes de surface du fait de la différence de taille des ions échangés

Les guides canaux sont réalisés grâce au dépôt d'un masque sur le substrat, cette étape précédant l'échange ionique. Les différentes étapes nécessaires à la réalisation des guides

canaux sont présentées dans la figure 2.8. Le masque de photolithographie utilisé présente une suite de paquets composés de plusieurs fenêtres de largeur égale à  $3 \mu m$  ou à  $5 \mu m$ , les fenêtres étant espacées de quelques centaines de micromètres ( $\approx 350 \mu m$ ).

La réalisation de guides de qualité nécessite à la fois des surfaces avec une faible rugosité, exemptes de rayures, aussi planes que possible et un très bon parallélisme pour permettre une photolithographie de qualité.

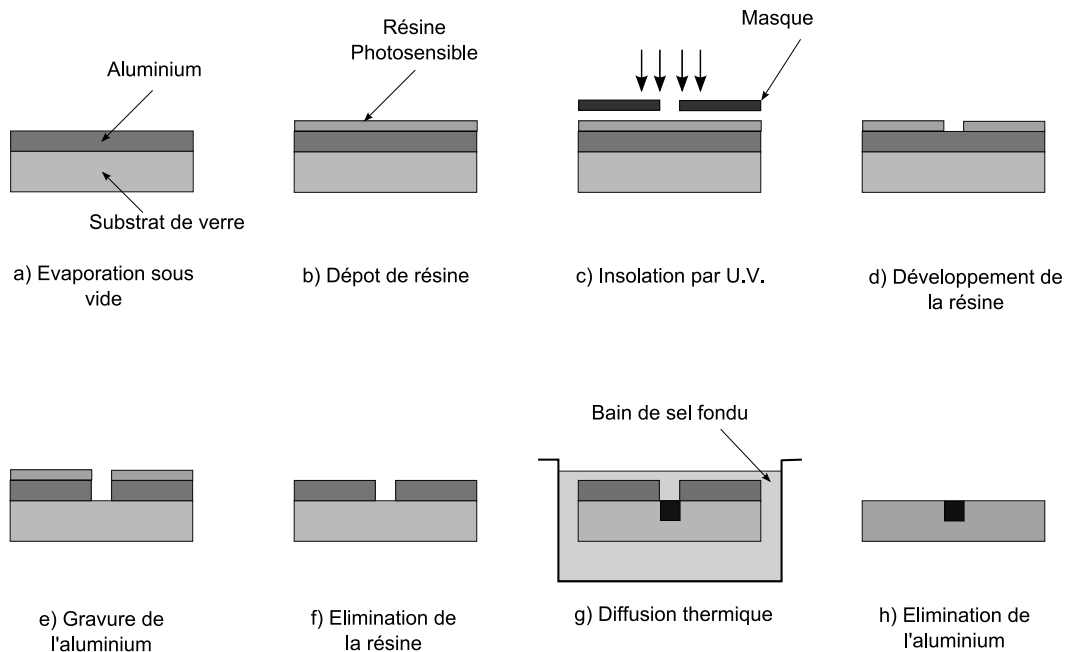


Figure 2.8 – Processus de fabrication par échange ionique d'un guide d'onde

Les ions présents dans le verre sont remplacés par des ions plus lourds par trempage dans un sel, et par diffusion thermique. Ce sont les ions  $Ag^+$ ,  $K^+$  et  $Ti^+$  associés aux ions  $Na^+$  qui sont les plus adaptés pour l'échange ionique. On peut constater des échanges d'indice de l'ordre de  $7.10^{-3}$ . Les temps de trempage varient entre 20 minutes et 4 heures à des températures voisines de  $400 \text{ }^\circ C$ , dans le cas d'un verre à vitre afin d'obtenir des guides monomodes. Ce type d'échange permet de réaliser des guides dont les dimensions sont du même ordre que celles des fibres monomodes.

Des guides présentant de faibles pertes, sont obtenus :  $0,2 \text{ dB/cm}$  à  $0,6328 \mu m$  et  $0,09 \text{ dB/cm}$  à  $1,55 \mu m$  [33]. Des dispositifs passifs de type "1xN", coupleurs directionnels, multiplexeur et démultiplexeur de longueurs d'ondes à base d'interféromètres de Mach-Zenhder sont fabriqués. Cette technique intervient aussi dans la réalisation de guides d'ondes canaux pour des utilisation en amplification ou spectroscopie [34].

### 2.3.2 Les semi-conducteurs

On peut noter plusieurs avantages à utiliser des matériaux semi-conducteurs pour la conception de circuits intégrés optiques. Outre qu'ils résultent de procédés de fabrication très répandus (à cause de l'électronique), ils permettent une intégration monolithique : guides et dispositifs optoélectroniques et électroniques.

#### 2.3.2.1 Matériaux *III – V*

Les méthodes de fabrication associées aux matériaux *III – V* sont fondées sur les principes de photolithographie [35][36]. Cette méthode bien maîtrisée dans le domaine de la microélectronique [21] permet aussi de réaliser des structure 3D généralement de type "structure en arête" (voir figure 2.9).

La première étape du procédé de photolithographie, est l'application d'une photorésine sur la surface d'un substrat (*GaAs* pour ce matériau). Cette photorésine est ensuite exposée à une radiation lumineuse. Lors de cette étape l'utilisation d'un masque, formé de zones opaques et transparentes, permet de définir le motif que l'on souhaite reproduire sur la plaquette. L'exposition crée des réactions au sein de la résine et engendre des modifications chimiques, les zones irradiées vont voir leur résistance mécanique évoluer suivant le type de résine (positive ou négative). L'utilisation de solvants appropriés va permettre d'éliminer la partie de la couche de matériau non insolée, et permettre de faire croître différentes couches pour créer le guide d'onde.

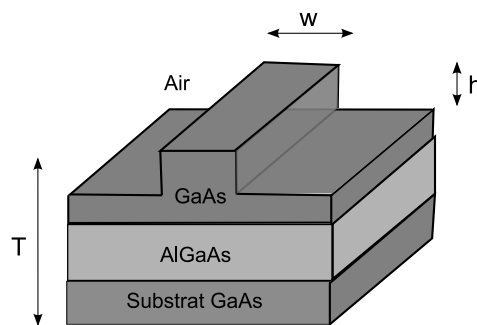


Figure 2.9 – Guide d'onde réalisé sur substrat GaAs (pour exemple :  $h \approx 0,3 \mu\text{m}$ ,  $W \approx 3 \mu\text{m}$ ,  $T \approx 1,45 \mu\text{m}$ )

Le confinement vertical de la lumière est assuré par des changements de composition du matériau qui modifient la valeur de l'indice de réfraction. Le confinement latéral est dû à la différence d'indice entre le matériau et l'air.

Des guides de surface sont également réalisables par des techniques de contrainte ou de diffusions de porteurs qui permettent d'obtenir un confinement latéral.

Une couche de recouvrement peut être déposée afin d'obtenir un guide enterré. L'utilisation de ce type de matériau permet d'obtenir des guides 3D qui présentent des pertes de propagation inférieures à  $0,2 \text{ dB/cm}^3$  [37].

L'intégration de fonctions optiques directement couplées à ces composants d'extrémités sur une même puce permet d'optimiser les performances du système. Les matériaux *III – V* sont adaptés à la réalisation de fonctions de commutation tout optique et de fonctions non linéaires.

### 2.3.2.2 Silicium

Le silicium présente un grand intérêt dans la réalisation de substrats larges à faible coût [38]. Le silicium n'intervenant que très peu dans la fabrication de composants d'extrémité, le nombre d'applications de celui-ci est nettement inférieur que pour les matériaux *III – V*.

Les guides 3D réalisés sont principalement de type en arête (voir figure 2.10). La structure de ces guides est constituée d'une couche guidante en silicium déposée sur une couche tampon de silice, elle-même sur un substrat silicium.

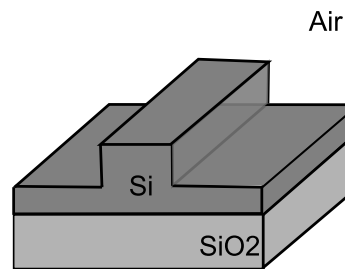


Figure 2.10 – Guide d'onde réalisé sur substrat de silicium

La grande différence d'indice entre le silicium et la silice ( $\Delta n = 2,0$ ) permet la réalisation de guides de petites dimensions ( $< 1 \mu m$ ) adaptés à une technologie à très haut degré d'intégration (*V.L.S.I.* : "Very Large Scale Integration") telle que la technologie *CMOS* pour l'interconnexion optique en informatique [39].

L'utilisation du silicium, comme coeur de guide, est limitée aux longueurs d'ondes supérieures à  $1,05 \mu m$ . Comme pour les composés *III – V*, les faibles dimensions des guides

induissent des problèmes de couplage avec les fibres optiques à base de silice.

Deux technologies de fabrication sont employées. La première consiste à déposer une couche de silicium sur de la silice puis à graver les guides dans le silicium [40]. La seconde méthode consiste à implanter de l'oxygène à une profondeur donnée dans le silicium pour y créer une couche de  $SiO_2$ . Une gravure du silicium permet de dessiner les guides [41]. Une couche de recouvrement en silice peut être déposée pour enterrer les guides et ainsi diminuer le trop fort écart d'indice avec l'air.

Les guides réalisés présentent des pertes de  $0,2 \text{ dB/cm}$  à  $1,3 \mu\text{m}$  avec des rayons de courbure de  $16\text{mm}$  [40].

On peut noter trois inconvénients à utiliser des semi-conducteurs pour la fabrication de circuits optiques intégrés :

- le coût (pour les matériaux  $III - V$ )
- le nombre important d'étapes de fabrication
- les problèmes de connexions avec les fibres optiques dus aux faibles dimensions des guides et à la forte différence d'indice de réfraction

### 2.3.3 Niobate de Lithium ( $LiNbO_3$ )

Le niobate de lithium ( $LiNbO_3$ ) est un composé chimique de niobium, de lithium et d'oxygène. Il est transparent pour des longueurs d'ondes entre  $350$  et  $5500 \text{ nm}$ . Plusieurs techniques de fabrication de guides d'ondes basées sur des déplacements d'ions sont utilisées sur ce matériau :

- L'extraction ionique : le  $LiNbO_3$  est chauffé aux environs de  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ . Les ions  $Li^+$  diffusent vers l'extérieur, provoquant une augmentation d'indice au voisinage de la surface.
- La diffusion ionique : un film métallique est déposé localement sur le  $LiNbO_3$ . L'échantillon est chauffé dans un flux de gaz inerte ( $Ar$  et  $N_2$  ou  $O_2$ ) à environ  $1000^\circ\text{C}$ . Le métal diffuse dans le  $LiNbO_3$  produisant une augmentation locale de l'indice au voisinage de la surface.
- L'échange ionique : l'échange ionique est réalisé par immersion du  $LiNbO_3$  dans une solution de sel métallique ( $A_gNO_3$ ) et d'acide benzoïque salé.

Ce matériau peut être dopé par l'oxyde de magnésium qui augmente sa résistance aux dommages optiques quand il est dopé au-delà d'un certain seuil. D'autres dopants possibles sont

le fer, le zinc, l'hafnium, le cuivre, le gadolinium, l'erbium, l'yttrium, le manganèse, et le bore, qui créent des sources optiques modulables par des tubes à ondes progressives.

De tels monocristaux ont des propriétés électro-optiques, et de non-linéarités optiques étonnantes. Ils sont utilisés dans le doublage de fréquence, les cellules à effet Pockels, les oscillateurs paramétriques optiques, les lasers déclenchés, des instruments acousto-optiques et des guides d'ondes. Ainsi, le niobate de lithium est largement utilisé aujourd'hui dans le marché des télécommunications tel que les téléphones mobiles ou les modulateurs optiques.

### 2.3.4 Silice sur Silicium

Les guides d'ondes réalisés dans des couches à base de silice vitreuse, présentent l'avantage d'être compatible avec les fibres optiques toute silice. La fabrication de ces couches sur substrat silicium permet de bénéficier à la fois de la technologie de fabrication des fibres optiques et des avantages du silicium : coût faible, gravure de fente ("V-groove") pour la connexion avec des fibres, clivage aisé, hybridation.

Les principales technologies de dépôt de silice sur silicium sont : l'hydrolyse à la flamme (F.H.D), le dépôt par vapeur chimique [42] (C.V.D/ PECVD) et le procédé sol-gel. D'autres techniques pour le dépôt de couche silice sur silicium tel que l'implantation ionique et l'oxyde thermique sont utilisées mais moins répandues aujourd'hui.

#### 2.3.4.1 Dépôt par hydrolyse à la flamme (F.H.D.)

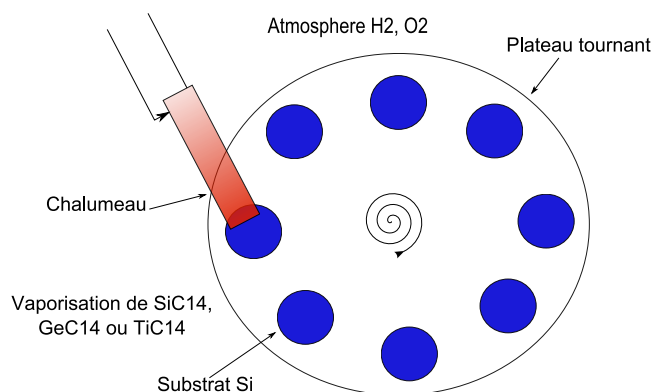


Figure 2.11 – Dépôt par hydrolyse à la flamme

Le dépôt par hydrolyse de flamme est un procédé développé pour la fabrication de préforme de fibre optique. Les précurseurs employés, SiCl<sub>4</sub>, GeCl<sub>4</sub> ou TiCl<sub>4</sub> sont brûlés dans



une atmosphère composée d'hydrogène et d'oxygène (voir figure 2.11). Une suie fine d'oxyde dont la taille des particules est de l'ordre de  $0,1 \mu m$  est produite et se dépose sur le substrat. Le dépôt peut se faire simultanément sur plusieurs substrats de silicium. La suie déposée est densifiée à des températures élevées (de l'ordre de  $1200 \text{ }^\circ C$ ) afin de réduire la porosité de la couche.

Une couche de  $SiO_2-GeO_2$  sur une couche de  $SiO_2$  d'indice moins élevée est déposée pour assurer le confinement. Après photolithographie et gravure, des guides d'ondes en ruban sont obtenus. Ils peuvent être encapsulés par une couche de silice pour former une structure enterrée. Des étapes de traitement en température terminent le cycle de fabrication. On peut obtenir des pertes de l'ordre de  $0,1 \text{ dB/cm}$  et des dispositifs actifs, basés sur des guides d'ondes silice dopés à l'erbium ou au néodyme sont développés [43][44][45].

Cette technologie permet de faire des dispositifs performants, intéressants pour un large domaine d'applications et pour l'implémentation de systèmes commercialisés.

#### **2.3.4.2 Dépôt par phase vapeur (C.V.D.)**

Le dépôt de couches diélectriques par C.V.D. consiste à créer au voisinage du substrat un oxyde gazeux obtenu en faisant réagir à chaud des vapeurs de composés chimiques [46][47]. La différence de température entre le gaz et le substrat provoque la solidification de l'oxyde et crée le dépôt. Des couches  $SiO_2$ ,  $TiO_2$ ,  $ZrO_2$ ... et leurs mélanges peuvent être obtenus. Les vitesses de dépôts sont plus faibles que par F.H.D., mais la densité des couches est plus élevée. La température de dépôt est comprise entre  $400 \text{ }^\circ C$  et  $800 \text{ }^\circ C$ . Les couches sont ensuite densifiées. Les températures utilisées vont de  $900 \text{ }^\circ C$  à  $1100 \text{ }^\circ C$  durant plusieurs heures. Des couches tampons de  $16 \mu m$  d'épaisseur et des coeurs de  $6 \mu m$  d'épaisseur sont déposées.

Des structures de guides d'ondes 3D similaires à celle obtenues par la voie F.H.D. et élaborées suivant un protocole semblable sont fabriquées.

#### **2.3.4.3 Procédé sol-gel**

La première synthèse "sol-gel" [48] d'un verre de silice a été décrite par un chimiste français, J.J. Ebelmen en 1845. Selon ces observations, "sous l'action d'une atmosphère humide, un éther silicique se transforme progressivement en une masse solide transparente qui n'est autre que de la silice comparable au cristal de roche le plus limpide" [49]. La recherche sur les

réactions de polycondensation a entraîné le développement de cette technique de fabrication de verres minéraux.

Le principe du procédé "sol-gel" s'apparente à celui qu'utilisent les chimistes pour fabriquer un matériau polymère. Les précurseurs moléculaires utilisés dans le procédé "sol-gel" sont en général des alcoxydes de silicium  $SI(OR)_4$  dans lequel l'atome de silicium tétraédrique est entouré de quatre groupements  $OR$ , où  $R$  est un groupement alkyle simple ( $R =$  méthyl  $CH_3$  ou éthyl  $C_2H_5$ ).

Un sol (particules en suspension dans un milieu liquide) est obtenu par hydrolyse-polycondensation à température ambiante de ces précurseurs. Les couches sont déposées par "spin coating" ou "dip coating". Ces méthodes ont été à l'origine mises au point pour le dépôt de résines photosensibles. Après dépôt, les couches sont densifiées à des températures supérieures à 400 °C. Au-delà d'une certaine épaisseur, des craquements des couches apparaissent. Pour pallier à ce problème, des couches de faibles épaisseurs (quelques centaines de nanomètres) doivent être déposées. Des dépôts successifs et des traitements thermiques permettent de fabriquer des couches de quelques microns d'épaisseurs [50][51]. Ceci permet d'obtenir des dimensions de guides compatibles avec celles d'une fibre optique. Ces étapes supplémentaires alourdissent considérablement le protocole de fabrication de guides d'ondes.

La synthèse de matériau "sol-gel" présente des avantages technologiques importants tels que la souplesse de dépôts, la qualité des couches et la nécessité d'un équipement modeste. Cependant, malgré un potentiel important en terme de coûts, de diversité de matériaux, de flexibilité et de qualité de couches, le procédé a encore un retard important dans la fabrication de dispositifs optiques intégrés, en comparaison aux autres techniques d'inscription tels que le dépôt par hydrolyse à la flamme ou encore le dépôt par phase vapeur.

### 2.3.5 Les polymères Organo-Minéraux

Les matériaux organiques pour l'optique sont apparus dans l'optoélectronique depuis une vingtaine d'années comme une voie très prometteuse vers l'accroissement des densités de stockage et des débits requis par les systèmes d'information. Nous pouvons noter les différents avantages des matériaux organiques par rapport à leurs concurrents inorganiques :

- Facilité de mise en oeuvre, en particulier en ce qui concerne l'intégration des composants optoélectroniques en un ensemble compact.
- Une plus grande variabilité des structures chimiques permettant la conception de matériaux multifonctionnels. De bonnes performances d'un point de vue physique,

comme par exemple une bande passante théoriquement supérieure à 100  $GHz$ .

Le faible coût potentiel de fabrication reste aussi un atout supplémentaire. Les matériaux non linéaires sont les seuls à pouvoir offrir des fonctions à très haut débit et sur une large bande spectrale, pour des composants tels que les modulateurs de phase ou d'amplitude, les commutateurs ou les multiplexeurs. Ces matériaux sont en effet capables d'engendrer de nouvelles fréquences (doubleur ou tripleur de fréquence), de modifier la phase ou l'amplitude d'un signal par l'application d'un champ électrique (effet électrooptique), et de façon plus général d'assurer un traitement rapide de l'information [52].

Deux types de matériaux polymères sont employés :

- Les polymères réticulables par effet thermique appelés (polyimides), permettant de créer des guides en ruban pouvant être enterrés par la suite à la suite de dépôt successifs de couches.
- Les polymères photosensibles (polyméthyl méthacrylate : P.M.M.A.), permettant d'élaborer également des guides de surface avec des variations d'indice faibles.

On peut noter trois inconvénients limitant l'utilisation des ces matériaux :

- leur vieillissement important et rapide par photo-dégradation. Leurs comportements devient fragile comme le sont naturellement les matériaux organiques [53].
- leur faible tenue en température : les polymères se dégradent à partir de  $250^{\circ}C$ .
- les pertes de propagations des guides d'ondes élevés en raison de l'existence de modes de vibrations des groupements CH.

Nous avons pu remarquer sur les premiers matériaux hybrides de type P.M.M.A. (PolyMethyl MethAcrylate), étudiés au sein de notre équipe, des défauts. Nous avons donc développé un nouveau matériau hybride de type epoxy afin notamment de réduire les pertes de propagations et l'adhérence des guides d'ondes. Nous détaillerons dans le chapitre 3, les propriétés de ce matériau innovant sur lequel nous avons inscrit des circuits intégrés optiques complexes réalisant des fonctions novatrices.

## 2.4 Matériaux photo-sensibles pour la réalisation de circuits optiques

Les matériaux photosensibles sont des matériaux dont il est possible de modifier les propriétés structurales en les faisant réagir directement par simple irradiation à un champ électro-magnétique. Il y a peu d'effet thermique intervenant dans ce type de mécanisme. L'effet généralement utilisé est la modification de liaisons inter-atomiques due à l'absorption de

l'énergie d'un ou plusieurs photons. Cette modification est à l'origine d'une nouvelle configuration de la structure moléculaire du matériau. En optique intégré, il existe deux types répandus de matériaux photosensibles : les polymères et les verres dopés.

La famille des polymères est largement répandue. Classiquement, en micro-électronique, on utilise un phénomène d'adsorption en surface pour déposer des rubans d'isolant électrique. On peut ainsi faire croître localement du P.M.M. (PolyMethyl MethAcrylate) à partir d'une solution de M.M.A. (méthacrylate de méthyle). Ces matériaux sont très utilisés dans les techniques d'inscriptions par photolithographie (masques).

On a vu précédemment la possibilité de modifier les défauts d'une structure cristalline dopée, par recristallisation. Les verres dopés, ne sont pas cristallins ; toutefois les verres dopés germanium utilisés pour la fabrication des coeurs des fibres optiques, subissent une modification de leurs défauts après irradiation et présentent une augmentation locale d'indice.

#### 2.4.1 Les germanosilicates

Le cas de matériaux dopés est couramment rencontré dans les composants à fibres optiques. Nous avons pu voir dans le chapitre précédent que les fibres classiques du commerce sont fabriquées à base d'une matrice de silice vitreuse. Afin de réaliser l'augmentation d'indice dans le coeur de la fibre, la région centrale est dopée avec du germanium. Depuis l'observation de la photosensibilité dans l'UV des germanosilicates [54] à la fin des années 1970 de nombreux travaux ont été effectués sur la possibilité d'augmenter localement l'indice par exposition aux UV.

Les mécanismes mis en jeu sont photolytiques. Comme dans la silice pure, il existe des défauts localisés dans les germanosilicates. Certains types de défauts sont liés à l'insertion des atomes de germanium dans le réseau tétraédrique de la silice. Ces types de défauts peuvent être classés en deux types selon si les pions des électrons sont appairés (défauts diamagnétiques) ou non (défauts paramagnétiques). Les défauts diamagnétiques sont la cause d'une forte absorption dans l'UV (180 – 350 nm). Il a été montré (Marchenko) que les défauts diamagnétiques ayant absorbé l'UV se recombinent et sont la cause de la formation de défauts paramagnétiques supplémentaires qui, de par leur arrangement moléculaire propre présentent un indice de réfraction plus élevé. Par exemple, en un point où un défaut est dû à un oxygène manquant (défaut diamagnétique) dans la matrice, on apporte une énergie UV qui brise la liaison  $Si - Ge$ . Le site Germanium se transforme en un centre de défaut type  $GeE'$  alors que l'électron libéré va être capturé par un site germanium sans défaut électronique pour créer

un défaut tel que celui de la figure.

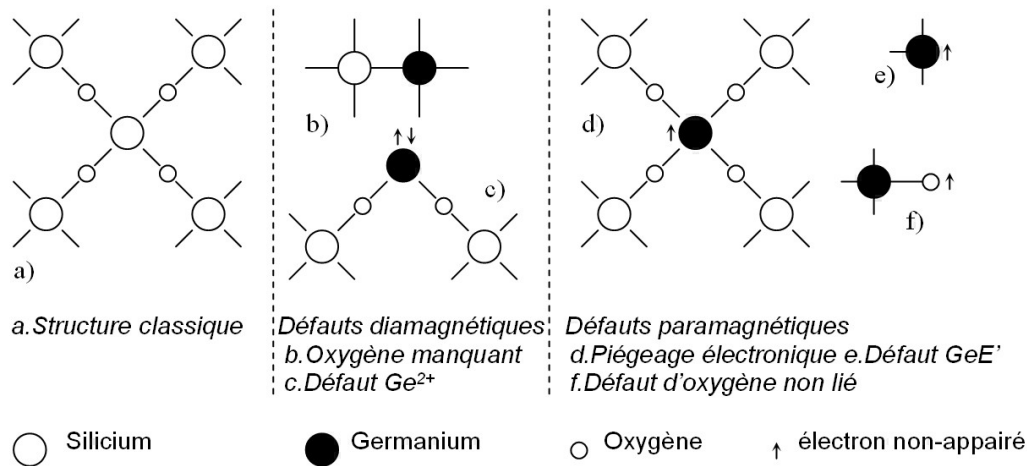


Figure 2.12 – Structure de la silice (a) et défauts ponctuels liés à l’insertion d’un atome de germanium (b-f)

Toutefois afin de compléter cette approche moléculaire insuffisante pour expliquer des variations d’indice aussi importantes que celles observées, il faut prendre en compte les effets de défauts distribués agissant sur les contraintes et effets de volumes subis par le matériau [55].

Cette propriété de photosensibilité est largement utilisée afin d’inscrire des réseaux de Bragg dans les fibres du commerce [56]. Cependant ce procédé nécessite des lasers excimères de forte puissance ainsi qu’une hydrogénation de la fibre, indispensable pour catalyser l’augmentation d’indice créée par l’irradiation [57]. Des circuits optiques intégrés passifs et actifs ont été réalisés tels que des coupleurs directionnels, des jonctions en Y, des cavités à réseaux de Bragg...

Les différences d’indice et les vitesses d’écriture sont comparables à celles des polymères. Ce sont des matériaux qui rendent les circuits réalisés compatibles avec les fibres optiques du marché. Les problèmes de résistance aux agressions extérieures et de vieillissement rencontrés avec les polymères n’existent pas avec les verres dopés. Une large gamme de circuits a été réalisée. Un problème réside dans la complexité d’installation. Comme pour les méthodes de dépôt, des enceintes de gaz contrôlés sont utilisées afin de porter la pression d’hydrogène à environ 200 Bar. De plus, ce type d’écriture ne permet pas de discriminer par gravure les parties insolées du reste de la couche afin d’extraire des motifs en relief.

### 2.4.2 Matériaux thermiquement réticulables

Certains polymères, connus sous le nom de polyamides, présentent la propriété de réagir à une augmentation de température en se réticulant. Le phénomène de réticulation thermique transforme un polymère linéaire en un polymère dont le réseau est tridimensionnel, ce qui lui confère de nouvelles propriétés physiques. Un effet de durcissement mécanique procure à la partie réticulée une meilleure résistance à la gravure.

Des guides d'ondes présentant des pertes de  $1 \text{ dB/cm}$  dans le visible ont été réalisés par réticulation thermique induite par laser dans des verres de silice-titane [58]. Le matériau a été élaboré par procédé sol-gel. L'écriture par laser  $CO_2$  à une puissance de  $60 \text{ mW}$  et une vitesse de  $2 \text{ mm/s}$  pour le déplacement d'un spot de  $100 \mu\text{m}$  de diamètre a permis la réticulation des guides. On peut observer la densification de la partie insolée car cette dernière semble creusée dans la couche. Les parties non-insolées sont gravées chimiquement avec une solution de HF.

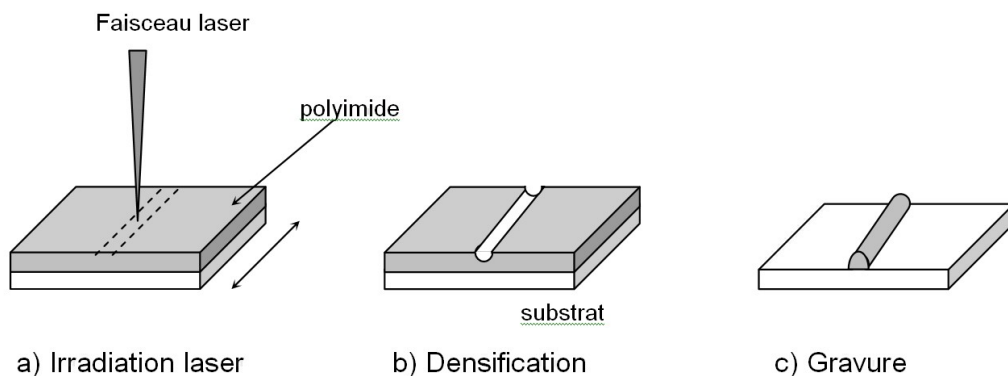


Figure 2.13 – Processus de densification et gravure sélective d'un polyimide

Les guides obtenus sont larges et l'utilisation d'un laser  $CO_2$ , de longueur d'onde importante ( $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ ), limite la résolution du spot laser. De plus, le phénomène de densification suivi d'une étape de gravure est propice à l'apparition de défauts et de rugosité du guide ayant pour conséquences de fortes pertes de propagation par diffusion. Enfin, la réticulation étant initiée par la température, il est difficile de bien maîtriser spatialement et temporellement l'écriture.

### 2.4.3 Les polymères

La famille des polymères comprend plusieurs groupes dont le plus photosensible est celui des polymères vinyliques. Le groupement vinylique est caractérisé par une double liaison entre carbones :

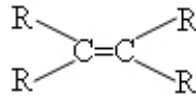


Figure 2.14 – Structure d'un polymère vinylique

Avec  $R$  un radical de type  $H$ ,  $CH_3$ ,  $C_2H_5$ ... L'ouverture de la double liaison suite à l'irradiation permet au monomère vinylique de se recombinaison avec d'autres monomères afin de polymériser. La capacité de polymérisation est améliorée par l'utilisation de groupements vinyliques de type acrylates :

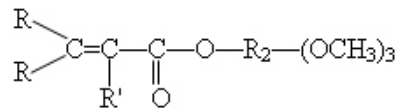


Figure 2.15 – Structure d'un acrylate

Avec  $R_2$  un radical de type  $CH_2$ ... et  $R' = H$  pour les acrylates et  $R' = CH_3$  pour les groupements méthacrylates comme le *MMA*.

Un photo-initiateur permettant le contrôle de la réaction est introduit dans le polymère. Ce photo-initiateur est sensible aux UV, et ses liaisons sont facilement ouvertes par irradiation créant ainsi des radicaux libres. Ces radicaux permettent la recombinaison des molécules et facilitent la polymérisation. Cette polymérisation se découpe en trois phases :

- Initiation : L'énergie UV brise une liaison du photo-initiateur qui se sépare en deux radicaux libres de charges opposées. Ensuite le radical se recombine avec un monomère (dans le cas d'une polymérisation radicalaire).
- Propagation : Le monomère auquel s'est greffé le radical libre du photo-initiateur se recombine avec un autre monomère libre et ainsi de suite.
- Terminaison : Deux monomères ayant chacun un radical du photo-initiateur se recombinaison. La chaîne moléculaire est alors fermée des deux côtés et plus aucune recombinaison n'est possible.

D'un point de vue optique, l'indice de réfraction de la partie polymérisée est augmenté. En effet, la restructuration engendrée modifie les états électroniques et donc la polarisation des atomes et des molécules présents. Cet état de polarisation étant lié à la constante diélectrique du matériau, l'indice de réfraction est modifié, et dans le cas des polymères utilisés pour l'écriture de guides d'onde, l'indice est augmenté (de l'ordre de  $10/100^{\text{ème}}$ ).

Une fois polymérisé le *PMMA* résiste à la gravure chimique ce qui permet d'élaborer des motifs en relief. De plus, le matériau insolé voit son indice de réfraction augmenter, ce qui permet un confinement optique sans avoir à passer par une étape de gravure pour réaliser des guides enterrés.

Outre la polymérisation de la partie organique par voie radicalaire il existe un autre procédé basé sur une photopolymérisation par voie ionique, comprenant la polymérisation anionique et cationique, notamment avec l'utilisation de monomères possédant des fonctions époxydes ou éthers vinyliques.

Les photoamorceurs radicalaires permettent comme nous avons pu le voir précédemment, de réticuler les résines de type acrylates, méthacrylates, polyuréthanes... Ils présentent en effet la particularité de se décomposer sous l'effet de la lumière UV en des radicaux libres pouvant amorcer la polymérisation. Leur principal inconvénient est leur sensibilité à l'oxygène de l'air.

La polymérisation cationique a connu un essor grâce au développement de photoamorceurs efficaces basés sur des sels d'iodonium, de sulfonium, et de ferrocenium de formule générale  $(R_1)_2S^+ - R_2X^-$  ( $R_1$  et  $R_2$  sont des regroupements alkyl). Ces regroupements permettent de déterminer la zone d'absorption UV et la solubilité du photoamorceur [59]. La présence du cyclohexane et l'absence de liaisons aromatiques insaturées confèrent au matériau de bonnes propriétés de résistance au frottement [60]. De plus, contrairement à la polymérisation radicalaire, l'oxygène n'a pas un rôle inhibiteur dans le processus de polymérisation cationique. En revanche, ce type de réaction reste très sensible à la présence de nucléophiles comme l'eau et l'alcool qui peuvent stopper la réaction de propagation en formant des polyols. Nous détaillerons par la suite l'étude de matériaux EETMOS à polymérisation cationique dont la formule est représentée sur la figure 2.16.

Les avantages de la photopolymérisation par rapport aux procédés thermiques classiques (utilisés sur les polyimides) sont liés à la possibilité de travailler avec de faibles énergies, le contrôle spatial et temporel de l'initiation de la réaction ainsi que le fort taux de polymérisation atteint. De plus, elle permet une étape de gravure des plus simple, le matériau



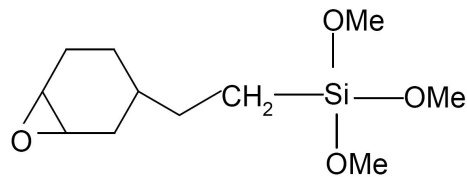


Figure 2.16 – Formule développée du EETMOS (M représente le monomère)

non-insolé n'étant pas polymérisé, il peut être dissout par gravure chimique.

Les polymères permettent d'atteindre des différences d'indice de l'ordre du centième voir plus. Les vitesses d'écriture relativement lentes peuvent être augmentées avec la puissance laser. L'initiation du processus de polymérisation étant photolytique, un bon confinement de la réaction est obtenu d'où une qualité d'écriture élevée qui a permis de réaliser des composants de bonne qualité à un coût réduit tels que des coupleurs et des switches [61].

Les polymères sont aussi utilisés comme résines dans la fabrication de masque. Après avoir écrit au laser la résine, celle-ci peut servir de masque afin de graver la silice ou le métal. Des composants optiques à diffraction (réseaux diffractifs, masques de phases, lentilles de Fresnel...) ont été réalisés par gravure laser d'une résine polymère servant de masque à une étape de gravure RIE dans des substrats de silice fondue. De façon successive on peut ainsi réaliser des gravures à plusieurs niveaux. Un montage utilisé [62] est basé sur un laser HeCd émettant à 442 nm et focalisé en un spot de 0.8 μm de diamètre. Un défecteur acousto-optique dévie le faisceau angulairement de façon à obtenir une ligne de 0.8 μm par 128 μm (largeur réglable par le défecteur). Le déplacement de l'échantillon relativement à la perpendiculaire de la ligne du faisceau a permis la gravure de motifs de 128 μm de long. Selon la périodicité et la largeur des motifs, des éléments diffractifs peuvent ainsi être fabriqués tels que des réseaux diffractifs cités précédemment dans les différents procédés de fabrication de multiplexeurs ou démultiplexeurs.

#### 2.4.3.1 Dépôt de couches minces par dip-coating et spin-coating

Les couches de polymères sont déposées sur tous types de substrat et en particulier sur semi-conducteurs. Deux techniques sont généralement utilisées pour le dépôt de ces couches :

- la technique par trempage puis tirage : "dip-coating" (voir figure 2.17(a))
- la technique par rotation : "spin-coating" (voir figure 2.17(b))

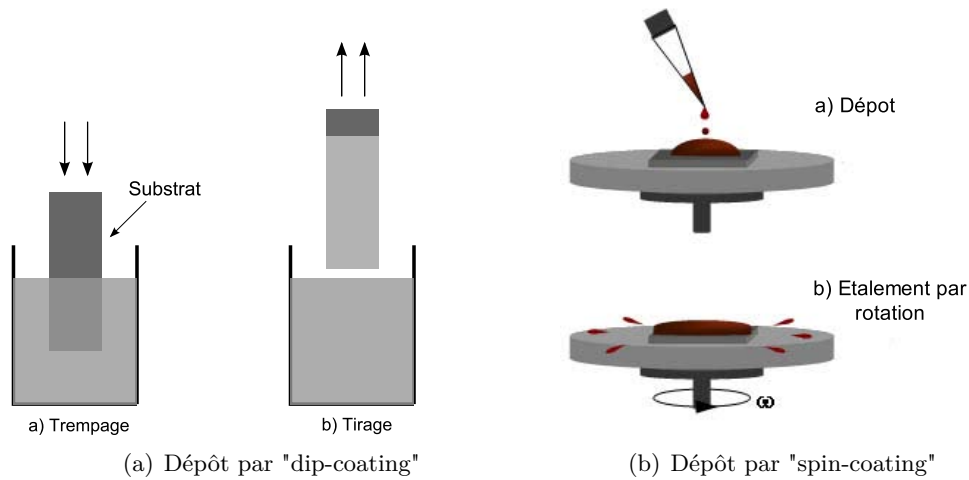


Figure 2.17 – Technique de dépôt de couche de polymère sur tout type de substrat

Le dip-coating consiste à tremper le substrat dans une solution polymère puis à le retirer à vitesse constante. L'épaisseur de la couche est, entre autre, imposée par la vitesse de tirage.

Pour la technique du spin-coating, une goutte de solution est déposée sur le substrat qui est mis en rotation. L'épaisseur de la couche dépend, entre autre, de la vitesse de rotation.

Le dip-coating s'avère plus adapté à la fabrication de couches épaisses homogènes, tandis que le spin-coating est utilisé pour la fabrication de couches minces inférieures à  $1 \mu\text{m}$ .

Pour une utilisation dans le domaine de la photonique, on peut faire une insertion de molécules de type chromophore afin d'élaborer des composants actifs réalisant des fonctions optiques non linéaires [63]. Les limitations de l'utilisation de matériaux polymères proviennent de leur fragilité mécanique, des problèmes de vieillissement, de tenue en température, et de la difficulté d'obtenir de faibles pertes de propagation dans l'infrarouge pour les polymères photosensibles.

Une chimie maîtrisée et une technologie flexible détaillée dans les paragraphes précédents, ont permis d'utiliser des matériaux organiques pour la fabrication de dispositifs optiques intégrés.

#### 2.4.4 Les matériaux Hybrides sol-gel

La chimie "douce" mise en jeux dans ce type de procédé est compatible avec les réactions de la chimie organique. Il devient ainsi possible d'associer, au sein d'un matériau, des espèces minérales et organiques.

Le développement de ces matériaux hybrides initié il y a une vingtaine d'année, connaît aujourd'hui un développement important et portent des noms variés tel que *ORMOSIL* (ORganically MODified SILicate), *ORMOCER* (ORganically MODified CERamic), *CERAMER* (CERAmic polyMER) ou encore *POLYCERAM* (POLYmer CERAMic).

Ces matériaux peuvent être obtenus à partir de précurseur mixtes. Ces molécules comportent simultanément des fonctions hydrolysable ( $Si - OR$ ,  $R$  correspondant à un groupement organique hydrolysable) qui donnent naissance à un réseau de silice et des fonctions organiques ( $Si - R'$ ) qui restent fixées sur le squelette de silice. Selon sa nature, le groupement organique confère à la silice des propriétés nouvelles : hydrophobe, optique, chimique... On peut aussi utiliser un groupement organique polymérisable de type vinyl, époxy ou méthacrylate, comme nous avons pu le voir précédemment. On a alors une double réticulation, organique et minérale, qui conduit à de véritables copolymères offrant toute une gamme de possibilités nouvelles telles que la réalisation de guides d'ondes optiques.

Certains des procédés de fabrication qui ont été présentés dans les paragraphes précédents sont accessibles par une technologie basée sur les effets thermiques ou optiques d'un faisceau laser tel que les matériaux polymères par exemple. Cette méthode d'inscription peut-être associée aux matériaux hybrides afin de réaliser des circuits intégrés optiques.

Nous avons pu voir qu'il existe deux types répandus de matériaux photosensibles : les polymères et les verres dopés. Les matériaux Hybrides organiques-inorganiques sont un mélange de ces deux matériaux : la matrice vitreuse (partie minérale) est associée à la partie polymère photo-polymérisable par défaut. En effet, comme nous l'avons dis précédemment, les limitations de l'utilisation de matériaux polymères proviennent de leur fragilité. Le fait d'allier aux polymères une matrice vitreuse, entraîne une robustesse de celui-ci ce qui accroît le durée de vie de ces dépôts.

## 2.5 Procédés d'écriture de circuits optiques

La réalisation de composants optiques passe par trois phases de fabrications :

- le choix du matériau
- le choix de la technique de dépôt des couches
- le procédé d'inscription des circuits

Les procédés les plus couramment rencontrés sont ceux à faible température initiés directement par l'absorption d'un ou plusieurs photons :

- PhotoGravure (*GaAs/CH<sub>3</sub>Br*)
- PhotoDépôt (*Al, Ti, Cd, Ni, Ti, N, Si, Ge...*)
- Photopolymérisation (polymères)

Les autres procédés nécessitent une température élevée qui va activer d'autres processus :

- Oxydation thermique
- Dopage Photochimique (*InP, Si...*)
- Diffusion thermique
- Dépôt Pyrolytique (*Si*)
- Décomposition pyrolytique
- Recristallisation (*GaAs, InP...*)

Nous avons vu dans les paragraphes précédents les différents matériaux utilisés pour la réalisation de circuits intégrés optiques. Nous avons abordé le dépôt par dip-coating et spin-coating notamment utilisé avec les matériaux de type polymères et hybrides. Nous allons traiter désormais des différentes techniques d'inscriptions associées aux différents matériaux en commençant par la technique la plus couramment utilisée : la photolithographie.

Les composants optiques intégrés sont pour la plupart réalisés en utilisant cette méthode dite de masquage, emprunté à la microélectronique. Une autre technique d'inscription réside dans le fait d'utiliser un laser pour insoler la couche de matériau : cela permet d'une part une plus grande précision pour la réalisation de ces composants mais surtout, une plus grande liberté pour la réalisation de ces composants. L'utilisation de masques ne permet pas en temps réel l'optimisation ou la modification lors de la réalisation de circuits optiques : il faut pour cela re-dessiner un masque afin de pouvoir modifier le design du composant.

Lors d'une inscription laser, plusieurs mécanismes physiques peuvent être mis en oeuvre en même temps, de façon indépendante ou en s'assistant les uns les autres. Une étude des différentes méthodes laser existantes a permis de regrouper les procédés en différents groupes selon l'effet obtenu au final.

Les deux procédés les plus classiques sont effectués dans un milieu gazeux et sont les méthodes de dépôt, regroupant le dépôt pyrolytique et le photodépôt, ainsi que les méthodes de gravure, initiées par décomposition photolytique, décomposition pyrolytique. Le mécanisme d'oxydation thermique se rapproche de ces deux familles, car une réaction avec le milieu environnant modifie la structure du substrat, mais selon les conditions cette modification ne mène pas forcément à une gravure ou un dépôt, les autres cas sont explorés. La recristallisation est utilisée pour modifier les profils de dopage des matériaux cristallins. Enfin, les méthodes de restructuration du matériau au niveau moléculaire par recombinaison de liaisons sont utilisées à travers les matériaux photosensibles dans lesquels prennent place des réactions telles que la photopolymérisation ou la reconfiguration de défauts.

### 2.5.1 La Photolithographie

La photolithographie est basée sur une technologie planaire : des caractéristiques de planéité, d'état de surface, de conductivité bien précises sont recherchées à tous les stades de la fabrication.

La photolithographie consiste à faire des dépôt de photorésines sur la surface d'un substrat [64]. Elle est ensuite exposée à une source lumineuse (UV généralement). Lors de cette étape, l'utilisation d'un masque permet de définir le motif que l'on souhaite reproduire, celui-ci étant formé de zones opaques et transparentes.

Le dépôt des différents matériaux peut être effectué grâce à différents procédés, en fonction des matériaux utilisés. On utilisera par exemple des dépôts par MBE (épitaxie par jet moléculaire) afin de faire croître des couches de matériaux III-V sur des substrats de silicium.

L'exposition lors d'un masquage (voir figure 2.8) crée des réactions au sein de la résine et engendre des modifications chimiques : les zones photo-exposées vont voir leur solubilité évoluer de façon positive ou négative selon le type de résine. Lors de l'utilisation d'une résine négative, l'image formée résiste lors du développement. Les parties non gravées permettent ainsi de protéger le matériau afin de faire croître des structures. Les dépôts de résines et de gravures sont suivis de cuisson après dépôts ainsi que des opérations de refroidissement pour stopper le processus.

L'achat de masques reste encore aujourd'hui onéreux et long à faire, et ne permet pas d'erreur lors de son développement et sa réalisation. Le procédé de fabrication de photolithographie entraîne de nombreuses étapes de dépôts de couches ainsi qu'une maîtrise parfaite

des insulations et gravures de la photorésine. Cette technique prévue pour une production de masse et de reproductibilité ne permet pas d'intervenir en temps réel sur un défaut lié à un mauvais design d'un masque.

### 2.5.2 L'inscription laser

Sur le principe d'une insolation UV, nous avons développé un banc d'inscription laser sur matériaux hybride organo-minéral. Celui-ci a été réalisé dans le but de réduire considérablement les différentes phases de fabrication : simplifier le procédé d'insolation, utiliser un procédé de dépôt de couches plus facile à mettre en oeuvre et développer une synthèse beaucoup moins lourde en utilisant des matériaux jusqu'ici non utilisés pour de telles applications. Cette technique d'inscription devra donc nous permettre une plus grande liberté dans la réalisation de circuits innovants.

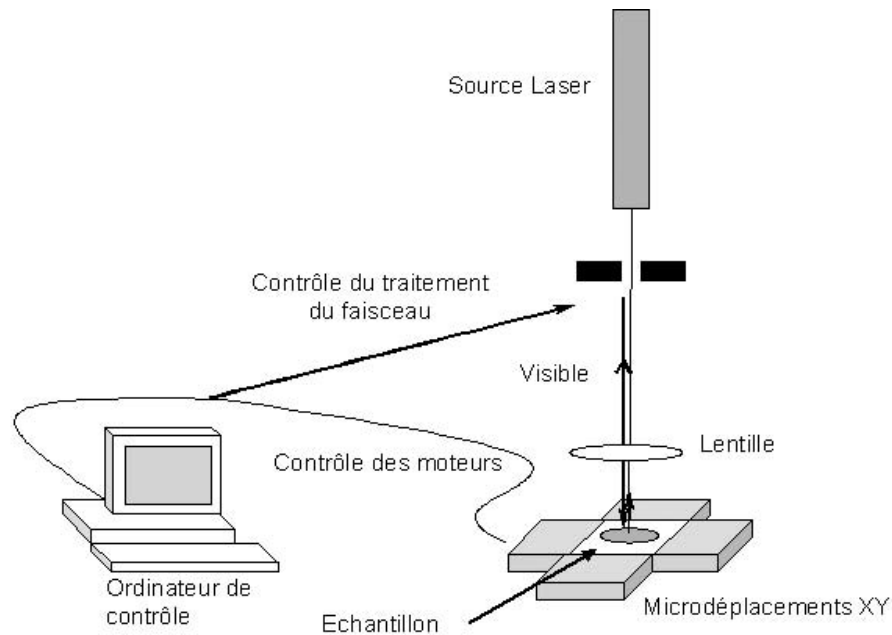


Figure 2.18 – Banc de photoinscription Laser

Cette technologie très souple d'utilisation, a donc été développée autour de deux volontés :

- l'utilisation d'un matériau innovant à bas coût dont la synthèse et le dépôt resterait le plus simplifié possible.

- le développement d'un procédé d'écriture laser permettant une liberté d'inscription dans la réalisation de circuits novateurs. Le but de ce banc sera de réaliser n'importe quel design en temps réel.

Ce procédé d'inscription doit être développé dans le but de pouvoir dans la même journée, faire des dépôts de couches, réaliser l'inscription un circuit complexe, caractériser les circuits afin de pouvoir, si besoin est, intervenir dans un laps de temps très court sur une des différentes étapes de fabrication de notre circuit optique, qui présente un défaut.

L'inscription laser permet de dessiner sur un support à base de matériaux photosensibles des circuits intégrés optiques complexes. Après de nombreux traitements optiques, le faisceau laser est focalisé sur la couche photosensible. Celle-ci, afin de pouvoir réaliser le dessin prévu, doit être fixée sur des tables de translations de type micro-déplacements XY (voir figure 2.18). L'insolation avec l'écriture laser telle qu'elle est représentée sur la figure 2.18 est dynamique contrairement aux techniques de masquage où le support de l'échantillon reste fixe (insolation statique). Une autre variante de ce banc optique est de déplacer le faisceau laser par rapport à l'échantillon : l'échantillon dans ce cas reste alors fixe sur son support.

Le faisceau laser issu d'une source laser est traité optiquement afin d'obtenir lors de la focalisation sur la couche photosensible un spot d'une largeur égale aux guides que l'on souhaite réaliser. Le traitement optique peut être fait en utilisant des lentilles, objectifs ou encore des micro-trous.

## 2.6 Conclusion

L'étude et la fabrication de circuits optiques intégrés associés à la technologie sol-gel ont été réalisés au sein de notre laboratoire lors du développement d'un premier banc d'écriture laser en 1999. Des circuits complexes ont été développés avec un matériau sol-gel hybride à polymérisation radicalaire. Cette technologie à bas-coût a montré ses limites au niveau du vieillissement et au niveau de l'adhérence lors de la gravure des couches non insolés. Il était aussi intéressant d'explorer d'autres matériaux.

Nous avons ainsi développé un nouveau banc d'écriture laser afin de pouvoir résoudre les problèmes rencontrés lors des premières expériences.

Pour la partie matériau, nous avons développé une nouvelle synthèse sur un nouveau matériau de type EETMOS jusqu'ici jamais utilisé dans de telles applications : nous avons ainsi réalisé des circuits intégrés optiques sur un matériau hybride à polymérisation cationique

afin de réduire les pertes de propagation élevées dans l'infrarouge (pertes observées avec la polymérisation radicalaire) et agir sur le vieillissement prématuré de nos couches.

La physionomie d'un nouveau banc d'écriture a été entièrement revue. Le changement majeur a été l'utilisation d'un laser à semi-conducteur pulsé alors que le premier était un laser à gaz (HeCd) continu. Sa longueur d'onde plus basse que pour le laser continu utilisé dans le premier montage (262 *nm* contre 325 *nm*) nous a paru être un argument en vue de l'augmentation de la précision d'écriture sur nos échantillons. Sa puissance d'impact plus importante a été un des nombreux arguments pour l'acquisition de ce laser : le but étant d'obtenir une polymérisation plus élevée et plus précise, entraînant ainsi une meilleure adhésion des parties polymérisées, en l'occurrence les coeurs de nos guides d'ondes.

Le chapitre suivant aura pour but de présenter le nouveau matériau que nous avons développé. A travers ses différents éléments optiques, acousto-optiques et optoélectroniques, on présentera notre nouveau banc d'écriture laser. Les premiers tests et les caractérisations de composants simples seront présentés en préambule de la réalisation de composants complexes innovants.



# Chapitre 3

## Approche technologique

### Sommaire

---

<b>3.1</b>	<b>Un matériau organique-inorganique pour l'optique intégrée . . .</b>	<b>61</b>
3.1.1	Synthèse de matériaux hybrides . . . . .	62
3.1.2	Dépôt des couches minces . . . . .	66
<b>3.2</b>	<b>Optimisation du banc d'écriture laser . . . . .</b>	<b>67</b>
3.2.1	Banc d'écriture laser . . . . .	67
3.2.2	Le laser YLF . . . . .	69
3.2.3	Module acousto-optique . . . . .	70
3.2.4	Système de déplacement et interface PC . . . . .	72
3.2.5	Interface logicielle de commande : Laser Writing . . . . .	74
3.2.6	Visualisation de la Focalisation . . . . .	76
<b>3.3</b>	<b>Conclusion . . . . .</b>	<b>77</b>

---

Dans un premier temps, nous présentons ici le matériau développé avec l'aide du laboratoire GES ("Groupe d'Etude des Semi-conducteurs"), matériau qui nous a servi de support tout au long de cette étude.

Ce matériau ayant une partie organique peut être polymérisé. Les parties polymérisées présentent d'une part un indice légèrement plus élevé, d'autre part une plus grande résistance aux solvants. Ces deux propriétés peuvent être mises à profit pour construire des guides optiques. Quant à la polymérisation, elle peut être effectuée grâce à une insolation UV. Nous présentons ici un bâti d'insolation mis en place durant ces travaux.

### 3.1 Un matériau organique-inorganique pour l'optique intégrée

Les premiers essais de réalisation de circuits photoniques à partir de matériaux hybrides organiques-inorganiques datent d'une vingtaine d'années. En 1992, H. Krug [65] fabrique les premiers guides d'onde. Une équipe de l'Ecole polytechnique de Montréal [66] et de l'Université de McGill a repris le procédé à partir de 1994. Des travaux ont montré l'efficacité d'une composition basée sur un mélange de methacryloxypropyltriméthoxysilane (MAPTMS) et de propoxyde de Zirconium pour la réalisation de circuits optiques intégrés 3D [67][68][69].

Deux techniques de fabrication des guides d'ondes sont permises par les propriétés des matériaux hybrides :

- Une technique par gravure : on utilise une composition de couches pour laquelle il est aisé de modifier l'indice de réfraction en faisant varier la proportion des précurseurs. Les guides d'ondes sont inscrits par polymérisation locale sous irradiation UV puis révélés par gravure de la partie non polymérisée.
- Une technique directe à partir des mêmes précurseurs (dans des proportions différentes) mais utilise directement l'augmentation d'indice provoquée par la polymérisation pour la constitution d'un guide d'onde 3D.

Nous utiliserons plutôt la technique par gravure sans oublier la technique directe plus légère.

Un matériau hybride est un système dans lequel coexistent à la fois des espèces organiques et inorganiques. La nature hybride de ces matériaux leur confère non seulement des propriétés intermédiaires entre le minéral et l'organique mais également des comportements nouveaux.

### 3.1.1 Synthèse de matériaux hybrides

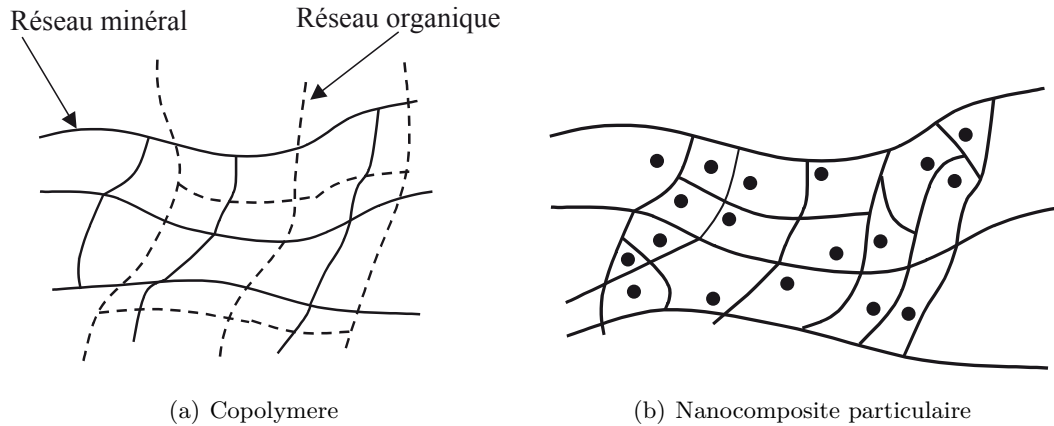


Figure 3.1 – Fabrication d'un matériau Hybride

Il existe deux façons de fabriquer un matériau hybride :

- La première consiste à une distribution aléatoire d'un réseau minéral à travers un réseau organique, sans qu'il y ait des liaisons chimiques ou de fortes interactions. On forme ainsi un copolymère (voir figure 3.1-a). Les réactions de formation de chaque réseau doivent se faire simultanément sans amener d'inhomogénéités.
- La deuxième consiste à introduire de la partie minérale ou organique sous forme de particules colloïdales (quelques dizaines de nanomètres). Cela entraîne la formation de nanocomposites particuliers avec une liaison matrice particule faible. La synthèse de ce type de matériau est réalisée à l'état liquide (voir figure 3.1-b).

La synthèse des matériaux hybrides s'effectue en deux parties. D'une part elle est effectuée par la synthèse du réseau minéral appelée plus communément "procédé sol-gel" et d'autre part par la synthèse du réseau organique intervenant lors de la photopolymérisation.

#### 3.1.1.1 Synthèse du réseau minéral : procédé sol-gel

Un sol est défini comme une suspension de particules solides dans un solvant. Ces interactions sont de trois types :

- électrostatiques : forces coulombiennes entre espèces chargées
- chimiques : liaisons hydrogènes avec complexation du soluté et du solvant
- physiques : liaisons de Van Der Waals faibles entre espèces neutres

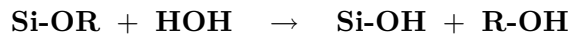
Un gel est défini comme un système biphasé dans lequel les molécules de solvant (eau, alcool) sont emprisonnées dans le réseau solide. On peut définir deux types de gels :

- Les gels physiques dus à une déstabilisation d'une solution colloïdale : sous l'effet d'une action mécanique (agitation), les liaisons interparticules peuvent être rompues pour trouver l'état sol. Lorsque l'état d'équilibre est rompu (déstabilisation), les particules voisines peuvent s'assembler, augmentant la viscosité du sol jusqu'à figer les systèmes à l'état gel. Ce gel peut être obtenu en diminuant l'espace interparticulaire en obligeant l'évaporation du solvant par exemple.
- Les gels chimiques, obtenue par voie polymérique, sont formés par réaction d'hydrolyse et condensation. Les particules constituant le réseau solide sont liées par des liaisons chimiques : l'état sol est alors irréversible. Ils font appel aux précurseurs tels que les alcoolates ou les alcoxydes [70]. Leur formule chimique est  $M(OR)_n$ , OR étant un groupement organique hydrolysable et M un métal. Ils se présentent sous forme liquide dans un solvant organique adapté.

Ces gels chimiques sont formés par réactions d'hydrolyse et condensation que nous avons choisi d'illustrer par celles intervenant dans le cas du silicium  $Si(OR')_4$ .

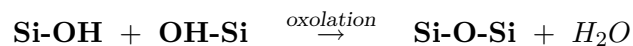
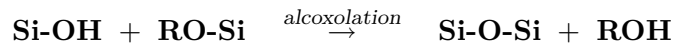
**a) Hydrolyse**

Cette réaction consiste en la formation de groupements silanols ( $Si-OH$ ) par hydrolyse des groupements alcoxydes ( $Si-OR$ ) [71].



**b) Condensation**

Cette étape est celle de la formation des groupements siloxanes ( $Si-O-Si$ ) par réactions des condensations qui peuvent avoir lieu entre les groupements hydroxyles et alcoxydes (on parle alors d'alcoxolation), soit entre groupements hydroxyles (on parle d'oxolation). Les sous produits de ces réactions sont l'alcool et l'eau.



### 3.1.1.2 Synthèse du réseau organique : Photopolymérisation

La photopolymérisation consiste à dissocier par rayonnement UV des espèces réactives.

On y retrouve :

- soit des fonctions organiques
- soit des intermédiaires appelés "photoamorceurs", dont la fonction est de pallier le manque de réactivité des fonctions organiques.

L'intérêt principal de la photopolymérisation dans notre cas est d'obtenir une réticulation localisée afin de pouvoir réaliser des guides d'ondes. Ainsi le choix du photoamorceur permet de donner des propriétés optiques désirées à un matériau organique-inorganique. Des matériaux avec des propriétés d'amplification ou de non linéarité sont également réalisables.

L'efficacité du photoamorceur est fonction de différents critères dont les plus importants sont présentés ci-dessous :

- il doit être soluble et stable dans la solution à polymériser
- il doit présenter une forte absorption dans le domaine d'émission de la source lumineuse utilisée pour la polymérisation

#### a) Polymérisation radicalaire

Le rôle inhibiteur de l'oxygène est particulièrement marqué dans le cas des matériaux hybrides. En effet la solubilité et la perméabilité du dioxygène sont renforcées par la présence du silicium. Lorsque la polymérisation est réalisée sous air, l'approvisionnement en dioxygène est constant. Il en résulte la formation d'une surface peu ou pas polymérisée et l'apparition d'un gradient de réticulation dans l'épaisseur. Dans le cas de photopolymérisation de couches, ce problème devient critique puisqu'il peut en résulter dans les cas extrêmes l'impossibilité d'effectuer la polymérisation. C'est la raison pour laquelle, on a coutume d'effectuer cette polymérisation sous atmosphère inerte en l'absence d'oxygène, ce qui complique le procédé [72].

#### b) Polymérisation cationique

La polymérisation radicalaire a été testée avec l'utilisation de methacryloxypropyltriméthoxysilane MAPTMS et le produit de la réaction entre le peroxyde de zirconium et l'acide méthacrylique ( $ZR(OPr)_4 : MAA$ ). Cette solution a le désavantage d'être compliquée à réaliser, d'avoir des propriétés mécaniques insuffisantes, ainsi qu'une mauvaise adhérence entre

le dépôt et le silicium. De plus nous avons pu observer de très hautes pertes de propagation à la longueur d'onde  $1.55 \mu m$ , longueur d'onde utilisée pour les télécommunications.

Pour résoudre ce problème, il a été testé un nouveau matériau utilisant une nouvelle synthèse, développée par polymérisation cationique [73]. Des recherches bibliographiques nous ont poussé au développement et à l'utilisation par la suite du epoxyclohexyletriméthoxysilane (EETMOS) connu pour sa bonne adhérence sur de nombreux substrats (silicium, verres plastiques...), de bonnes propriétés mécaniques ainsi que pour son fort taux de polymérisation dû à la présence du cycle aliphatique.

### 3.1.1.3 Synthèse de la solution de dépôt

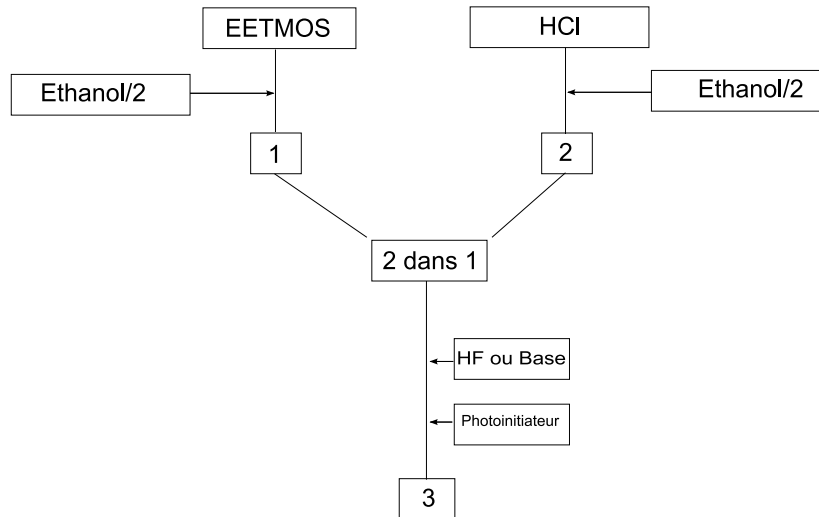


Figure 3.2 – Protocole de Synthèse

La synthèse du matériau se déroule de la façon suivante :

L'alcool est divisé en deux parts égales respectivement ajoutés à l'HCl et au EETMOS. Le mélange *HCl/Ethanol* est ensuite ajouté goutte à goutte sous agitation dans le mélange EETMOS/Ethanol (figure 3.2 partie "2 dans 1"). On ajoute ensuite goutte à goutte un mélange HF/Ethanol (0,32 %, 4,05 % et 8,1 % massique par rapport au EETMOS) ou Base/Ethanol (63,1 %, 6,31 %, 0,31% massique par rapport au EETMOS ; 0,7 mole d'éthanol pour 1 mole EETMOS) à la fin de la synthèse, dans le but de catalyser la condensation.

À la fin de la synthèse, l'Iodinium - hexafluorophosphate (Irgacure 250 de CIBA) est ajouté comme photoinitiateur (5/100 massique par rapport au EETMOS). La solution est maintenue sous agitation pendant 1 heure afin d'assurer la solubilité du photoinitiateur.

Parmi les différentes solutions testées, cette synthèse avec 0,31 %  $NH_4OH$  ou 0,32 %  $HF$  apparaît comme possédant un minimum de groupements silanols ( $Si - OH$ ) et un maximum d'oligomères multifonctionnels, ce qui aura tendance, on le verra par la suite, d'accroître l'adhérence des guides d'ondes et de réduire les pertes de transmission. Nous verrons à travers des tests d'écritures de guides d'ondes observés par microscopie électronique à balayage (MEB), que la solution à partir du sol 0,32 %  $HF$  justifie le choix de l'utilisation de celui-ci pour la synthèse de notre matériau.

### 3.1.2 Dépôt des couches minces

La fabrication des circuits intégrés en optique tout comme en microélectronique est fondée sur une technologie de couches minces. A l'aide de trois couches, on reconstitue un coeur et une gaine. Le dépôt des différentes couches est obtenue par la méthode de dip-Coating (voir 2.3.5). Cette méthode consiste à tremper le substrat dans la solution puis à le retirer à vitesse constante.

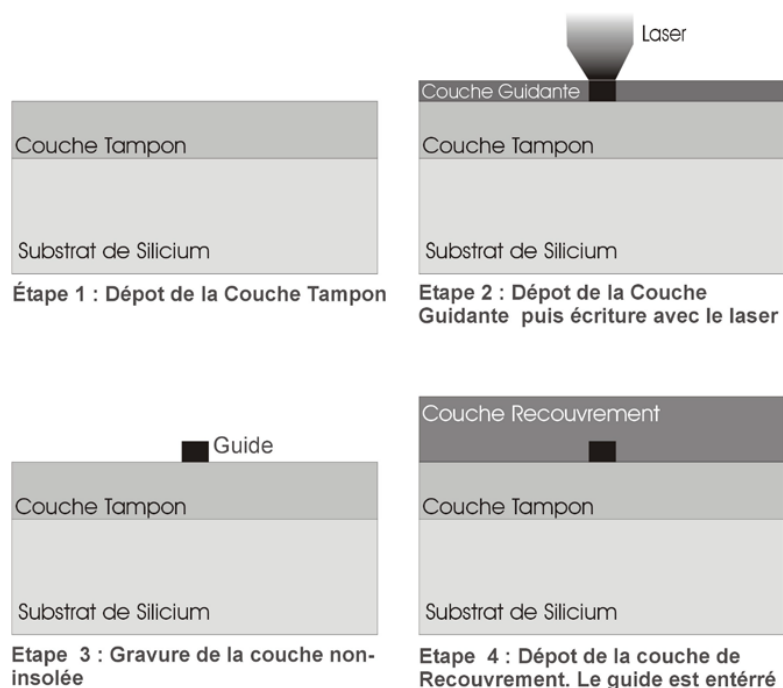


Figure 3.3 – Protocole de dépôt d'une structure transverse d'un guide d'onde 3D

Le protocole de dépôt des différentes couches est le suivant :

- On dépose une couche dite couche tampon (CT) (voir figure 3.3 - étape 1) sur un substrat de silicium. Le dépôt des couches par la méthode de dip-coating se fait à

une vitesse spécifique permettant d'obtenir les épaisseurs choisies. On fait subir à la CT deux traitements thermique en deux temps : un pré-séchage de 20 mn à 60 °C puis un recuit d'1 heure à 100 °C. Le séchage permet d'évaporer les solvants alors que le recuit permet de réticuler la partie organique.

- La seconde étape est la fabrication du coeur du guide : une couche guidante élaborée par la synthèse détaillé ci-dessus (voir 3.1.1.3) est déposée par dip-coating sur la couche tampon (voir figure 3.3 - étape 2). Son épaisseur détermine la hauteur du guide. Cette couche subit un séchage de 20 mn à 80 °C afin d'obtenir une résistance mécanique suffisante pour la manipulation mais surtout une réticulation suffisamment faible pour permettre aux entités photopolymérisables de se mouvoir pour réagir entre elles. La couche guidante fait fonction de gaine dans les zones non polymérisée et de coeurs dans les zones polymérisées (voir figure 3.3 - étape 2). D'un point de vue optique l'indice de réfraction de la partie polymérisée est modifié (augmenté) ce qui permet un confinement optique. Son épaisseur est égale à la hauteur des guides voulus, soit dans notre cas 5µm.
- La partie non polymérisée est éliminée par gravure avec du propanol (voir figure 3.3 - étape 3). Les guides réalisés sont soumis a un traitement thermique d'une durée de 1 heure à 110 °C.
- Le guide est ensuite enterré sous une couche de recouvrement de 10 à 12 µm dont les caractéristiques en terme d'indice sont identiques à la couche tampon (voir figure 3.3 - étape 4). Le confinement est optimal : le guide est alors isolé de l'influence de l'air.

## 3.2 Optimisation du banc d'écriture laser

Nous allons détailler le banc d'écriture laser que nous avons mis au point afin de réaliser toutes sortes de circuits, allant des plus simples de type guides droits aux plus complexes de type démultiplexeurs.

### 3.2.1 Banc d'écriture laser

L'écriture laser est fondée sur le déplacement d'un spot sur une couche photosensible. Nous utilisons un laser UV YLF (Yttrium Lanthane Fluor) pompé par diode, de longueur d'onde 262 nm. Il est pulsé ce qui lui permet d'atteindre une puissance moyenne de 10 mW à une fréquence de 3 KHz. La longueur d'onde, plus faible que celle du laser à gaz ( $\lambda_{lg} = 325$  nanomètres) de type Hélium-Cadmium utilisée dans un précédent montage [74], nous permet



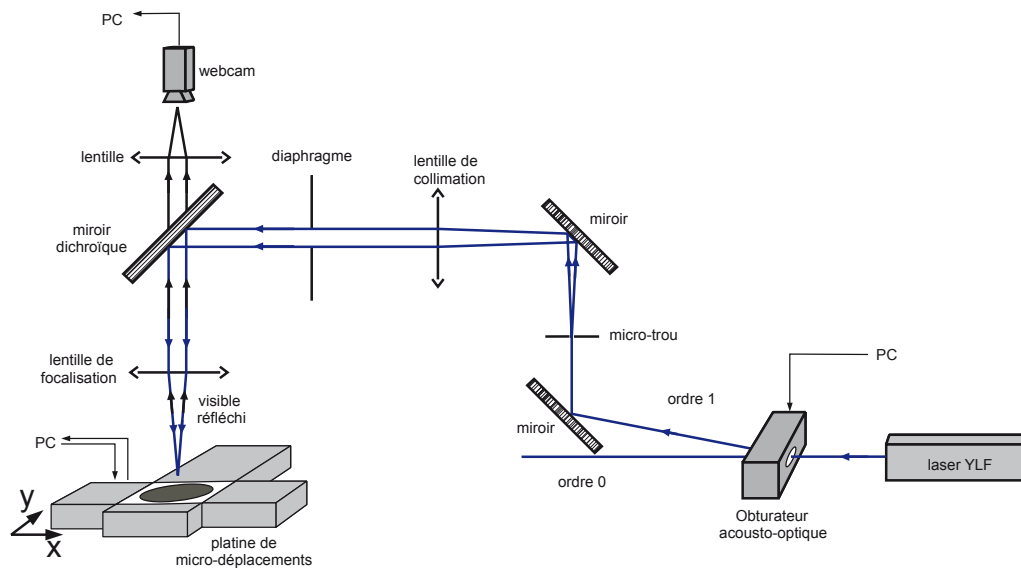


Figure 3.4 – Représentation du banc d'écriture laser

d'obtenir une meilleure résolution en terme de profil du faisceau ainsi qu'une meilleure gestion de la différence d'indice du matériau insolé. L'intérêt premier de ces laser émettant à de faibles longueurs d'onde est qu'ils permettent de focaliser sur une tâche très petite pour les applications submicroniques. La maintenance moins contraignante et les avantages du laser YLF par rapport au laser à gaz utilisé couramment en recherche dans le domaine des nanotechnologies nous ont incité à nous tourner vers cet équipement.

Afin d'obtenir un spot de dimension égale à celle des guides que l'on souhaite dessiner, il est nécessaire de transformer le faisceau issu du laser à l'aide d'éléments optiques. Nous éclairons un micro trou circulaire de  $100\ \mu\text{m}$  directement avec le laser, qui correspond dans notre montage à notre plan objet. Une lentille de focale  $200\ \text{mm}$  permet de collimater le faisceau issu du micro-trou. Un diaphragme est placé sur le chemin optique afin de supprimer les anneaux de diffraction et de ne garder que le disque d'Airy. Cette image est ensuite focalisée sur le matériau avec une lentille de focale  $10\ \text{mm}$  faisant office d'objectif. Ce rapport de magnification de 20 correspondant au rapport "longueur de focale de la lentille de collimation / longueur de focale de la lentille de focalisation", pour une ouverture objet de  $100\ \mu\text{m}$ , a été choisi afin d'obtenir un spot de  $5\ \mu\text{m}$  de diamètre à la focalisation sur la couche photosensible.

L'obturation du faisceau laser est réalisée à l'aide d'un modulateur acousto-optique calibré pour la longueur d'onde du laser.

L'inscription du circuit se fait par le déplacement de l'échantillon sous le faisceau laser à

l'aide de platines de micro-déplacement contrôlées par ordinateur via une interface développée au laboratoire.

Nous avons placé en dernier miroir, dans le sens de propagation de la lumière, un miroir dichroïque. Une partie de l'énergie arrivant sur la couche photosensible n'est pas absorbée et est réémise à une longueur d'onde plus haute dans le visible. Il nous permet donc de récupérer cette énergie réémise à une longueur d'onde dans le visible.

### 3.2.2 Le laser YLF

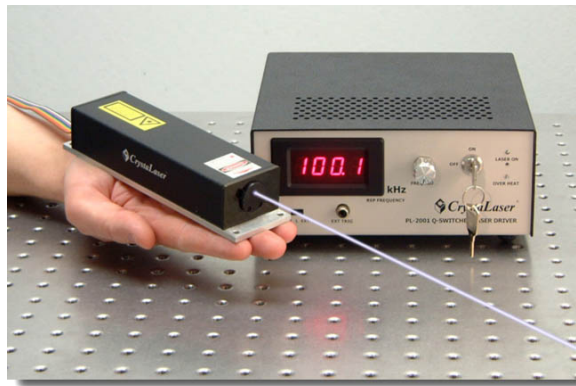


Figure 3.5 – Laser UV pulsé YLF émettant à 262 nm

Le laser que nous avons choisi pour l'inscription de circuits optiques est un laser solide de type ND :YLF. C'est un laser comportant deux étages pour doubler sa longueur d'onde. La longueur initiale étant de 1048 nm, il est quadruplé grâce à deux étages doubleurs pour émettre dans l'UV à 262 nm. Ce laser a une répétition de pulses pouvant varier de 1 kHz à 100 kHz en mode interne et 0 Hz à 200 kHz en modulation externe avec une puissance maximale de 10 mW à 3 kHz. La largeur fixe des pulses est de 10 ns. La répétition des pulses est géré par un Q-switch placé en amont des étages doubleurs

Le mode  $TEM_{00}$  est le mode fondamental d'émission pour lequel le profil énergétique transverse du faisceau émis est gaussien.

La divergence du faisceau est de 2 mRad et le diamètre est seulement de 0,25 mm. Malgré une divergence du faisceau supérieure à un laser de type Hélium-Cadmium ( $\theta = 0,16$  mRad), les lasers YLF se trouvent aussi performants en annonçant un diamètre largement inférieur que les laser à gaz (1.17 mm). Ces caractéristiques nous permettent d'obtenir un maximum d'énergie sur une petite surface et ainsi profiter de cette dynamique pour éclairer avec toute la puissance du laser le micro-trou.

### 3.2.2.1 Caractérisation du laser

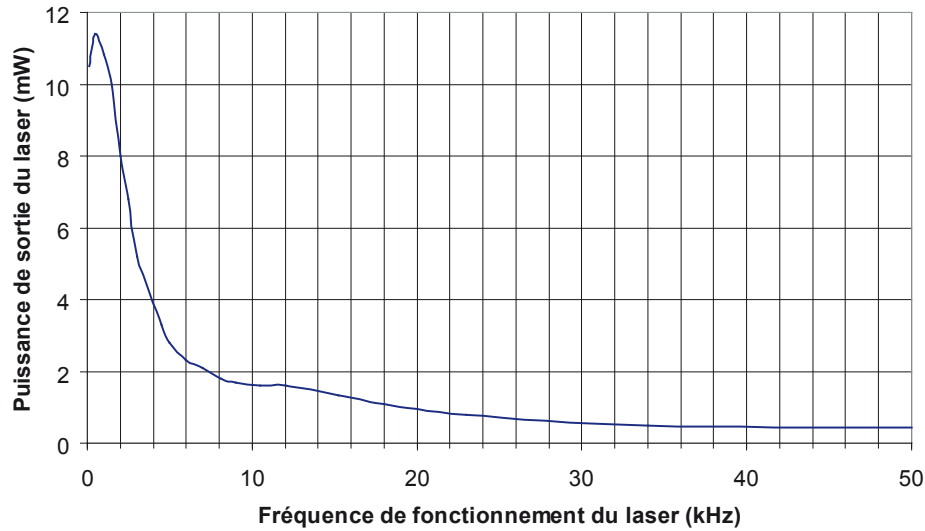


Figure 3.6 – Relevé du profil d'intensité du laser YLF en fonction de sa fréquence

Afin de déterminer la plage de fréquence utilisable du laser, nous avons caractérisé celui-ci en faisant un relevé de son intensité pour différentes fréquences (voir figure 3.6). On s'aperçoit contrairement à ce qui a été annoncé par le fabriquant que le maximum d'intensité intervient bien en dessous de la fréquence annoncée. On obtient une puissance de  $11,5\text{ mW}$  à  $0,5\text{ kHz}$ . On observe ainsi à  $3\text{ kHz}$  une puissance de  $5,2\text{ mW}$  qui devrait être à son maximum à cette fréquence c'est à dire  $10\text{ mW}$ .

La puissance décroît linéairement selon un premier modèle entre  $0,5$  et  $4\text{ kHz}$ , puis entre  $12$  et  $40\text{ kHz}$  selon un deuxième modèle, pour atteindre une puissance minimale de  $0,4\text{ mW}$ .

### 3.2.3 Module acousto-optique

Nous avons choisi l'utilisation d'un modulateur acousto-optique afin d'obturer le faisceau dans les phases de non inscription des circuits. La déflexion optique obtenue par un modulateur acousto-optique présente l'avantage d'être très rapide et surtout de ne pas induire de vibrations contrairement à un obturateur mécanique.

Le principe de fonctionnement du modulateur acousto-optique remonte à 1921 [75]. Léon Brillouin prédit qu'un liquide traversé par une onde acoustique de faible longueur d'onde, se comporterait comme un réseau de diffraction pour la lumière. Ce ne fut qu'environ 10

années plus tard que cet effet fut observé [76]. Ce type d'interaction acousto-optique, appelé "diffusion Brillouin" s'est rapidement avéré un moyen puissant d'investigation spectroscopique des vibrations thermiques dans les solides et les liquides. Les composants optoélectroniques issus de ce phénomène permettent de moduler la lumière aussi bien en amplitude qu'en phase, de défléchir un faisceau lumineux grâce à l'effet réseau ou encore décaler la fréquence optique d'un laser d'une valeur déterminée par celle de l'onde acoustique.

### 3.2.3.1 Principe de fonctionnement d'un modulateur acousto-optique

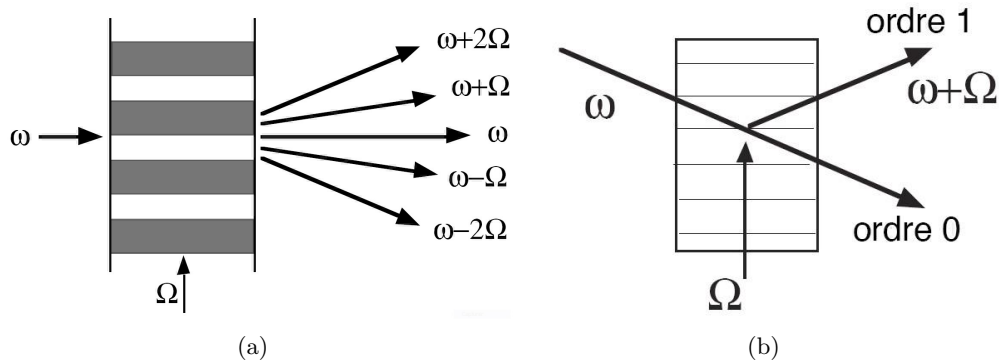


Figure 3.7 – Diffraction d'une onde lumineuse par un modulateur acousto-optique (a) - Diffraction d'un rayonnement incident à l'angle de Bragg (b)

Le principe de fonctionnement d'un modulateur acousto-optique pour l'utilisation que nous allons en faire est le suivant. Le système utilisé est un cristal acousto-optique transparent dans l'UV. Il permet de moduler le niveau de puissance de sortie du laser. Un module piézo-électrique permet de coupler dans le cristal une onde radiofréquence  $\Omega$  afin d'y faire propager une onde acoustique (voir figure 3.7-a). L'onde pression se propage, ce qui conduit à la modification périodique de l'indice de réfraction. Il est alors induit dans le cristal un réseau de Bragg. Il apparaît alors différents ordres de diffraction, qui sont situés de part et d'autre de la direction de propagation incidente. La répartition d'intensité dans les différents ordres de diffraction est fonction de l'amplitude du réseau de phase, et donc de la puissance qui est transportée par l'onde acoustique.

Dans notre cas, lorsqu'on injecte le faisceau laser incident selon l'angle de Bragg, on peut exciter en sortie différents ordres de diffraction. On utilise principalement l'ordre 0 et 1 ou 0 et -1 (voir figure 3.7-b) étant donné que ce sont ceux qui transmettent le plus de puissance. On peut coupler 0 % à 90 % de l'énergie incidente dans l'ordre 1, et 10 % à 100 %

dans l'ordre 0. On utilisera donc l'ordre 1 pour effectuer l'obturation du faisceau laser pour un fonctionnement "ON" vers "OFF". L'ordre 0 dans le plan incident de propagation du faisceau laser devra être décalé d'un certain angle afin que l'on éclaire le micro trou qu'avec l'ordre 1 (voir figure 3.4).

### 3.2.3.2 Caractérisation du modulateur acousto-optique

Nous avons effectué une caractérisation du modulateur acousto-optique afin de déterminer sa courbe de réponse (voir figure 3.8). Nous pouvons observer que la courbe de réponse de celui-ci n'est pas linéaire. La zone de fonctionnement entre 20 et 55 % présente une évolution proportionnelle à la puissance relevée. Dans le cas de tracés de guides d'onde pour différentes largeurs nous utiliserons donc cette zone de fonctionnement.

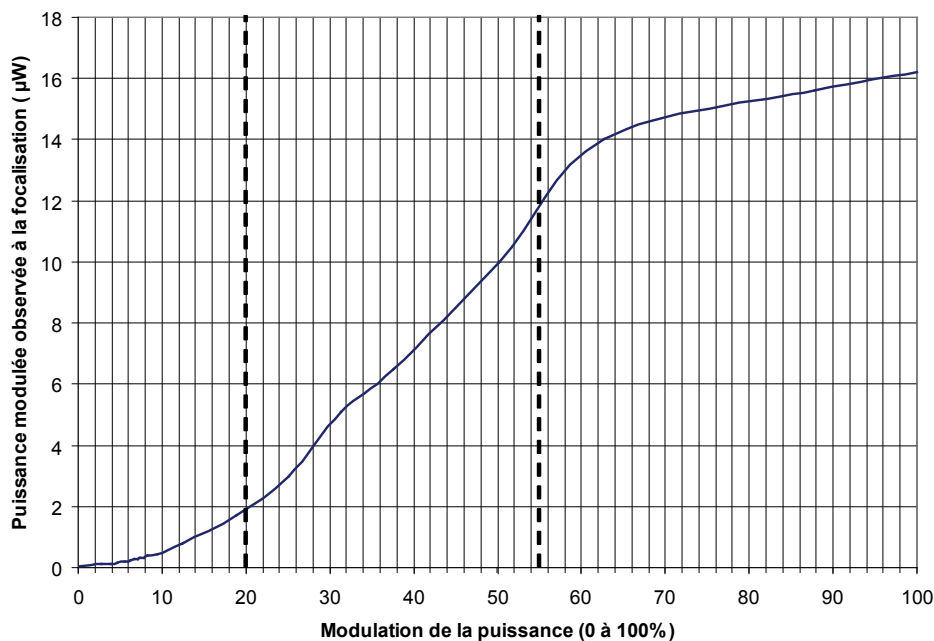


Figure 3.8 – Courbe de réponse du modulateur acousto-optique fonction de sa modulation

## 3.2.4 Système de déplacement et interface PC

### 3.2.4.1 Tables de micro-déplacement

Le principe d'un banc d'écriture laser est de dessiner un circuit optique sur un échantillon. Deux solutions s'offrent à nous : déplacer l'échantillon avec un faisceau fixe ou déplacer

le faisceau en laissant l'échantillon fixe.

Dans le cas d'une déflexion optique ou optomécanique, le faisceau peut être déplacé de façon optique ou mécanique. Dans les deux cas cela entraîne des modifications de l'alignement optique. Dans l'industrie optique ce procédé est très utilisé : on déplace via un miroir motorisé le faisceau afin d'écrire sur des disques compacts. Cette méthode se traduit très couramment par un décentrage sur le miroir ce qui entraîne une translation du faisceau. De plus une action mécanique de ce type entraîne des vibrations sur les miroirs qui sont généralement couplés au banc optique.

Notre méthode s'appuie sur un positionnement de l'échantillon fixe à la perpendiculaire du faisceau (voir figure 3.4). L'échantillon est donc déplacé selon deux axes à une distance toujours la même de la dernière lentille du montage, la lentille de focalisation.

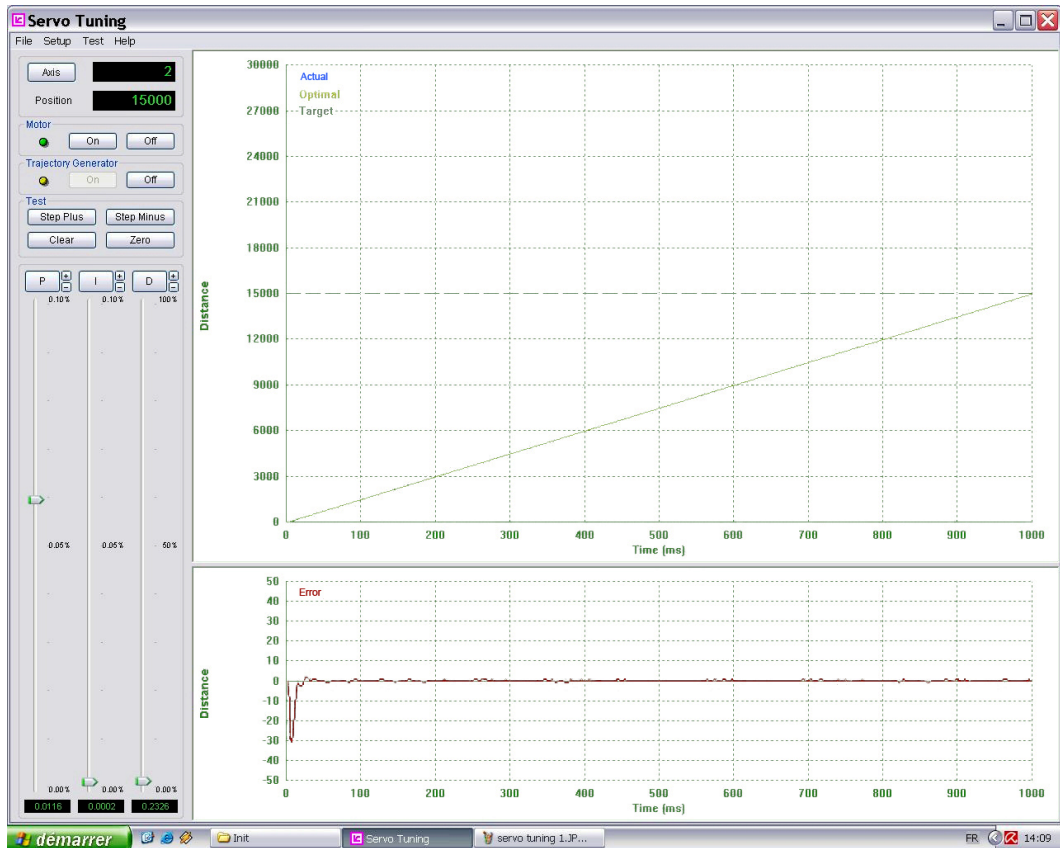


Figure 3.9 – Réglage de l'asservissement des platines de micro-déplacements

Nous avons choisi des tables de micro-déplacement de type "DCX-PCI300" de "Precision MicroControl Corporation". Ces platines sont montés perpendiculairement l'une à l'autre à 90° formant un système pouvant balayer un plan en XY de 10 cm sur 10 cm. Une carte

d'interface permet de communiquer et de commander ces tables avec un PC. Les langages permettant de commander celle-ci sont le MCCL, le C++, le Visual Basic, Delphi et Labview. Un module ajouté sur la carte nous permet d'obtenir l'acquisition des tracés effectués par les moteurs et ainsi de pouvoir régler minutieusement les paramètres PID de nos platines. L'erreur maximale tolérée pour nos dessins étant minime (en dessous du  $\mu m$ ), nous avons réglé l'asservissement moteur de type PID via une interface (voir figure 3.9) afin d'obtenir des erreurs maximales de l'ordre de  $\pm 0,1 \mu m$ .

Le réglage s'effectue en faisant parcourir par les moteurs une distance pré-définie (voir figure 3.9-courbe du haut), à une certaine vitesse (dans notre cas  $1,5 \text{ mm/s}$ ). On observe les erreurs de positionnement (voir figure 3.9-courbe du bas) et on y remédie en agissant sur les paramètres de PID (Proportionnel, Intégral, Dérivé).

### 3.2.5 Interface logicielle de commande : Laser Writing

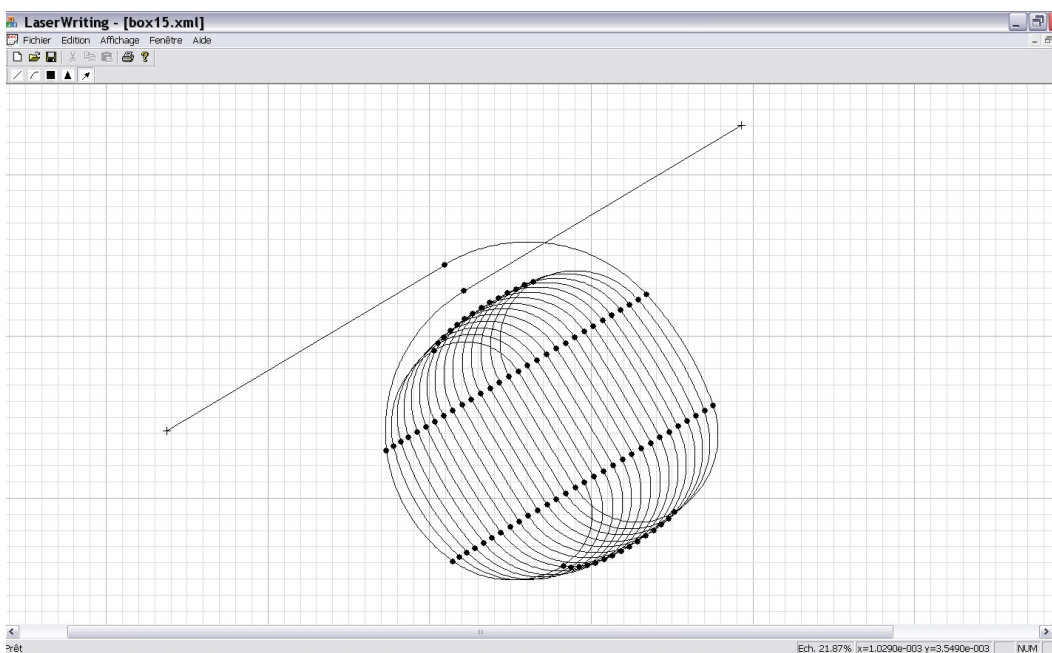


Figure 3.10 – Logiciel Laser Writing

Nous avons développé au sein de notre équipe un programme permettant de faire la liaison entre notre logiciel de design ("jDesign") et nos platines de micro-déplacement.

Il permet à l'utilisateur de dessiner des circuits tests simples et/ou de traiter des dessins des circuits préalablement préparés par un autre logiciel tel que jDesign lui aussi développé

au laboratoire. Mais sa principale fonction est de transmettre aux moteurs des micropositionneurs les trajectoires correspondant aux guides.

Le logiciel comporte plusieurs menus (voir figure 3.10). Cette interface apparaît comme un logiciel de dessin. On peut dessiner différentes formes : segments, courbes à laquelle vont se greffer bientôt des objets préconçus de type "diviseur par deux en Y", "tapers (cônes)"... Chaque objet est défini par un point de départ et un point d'arrivée en coordonnées relatives ou absolues.

Pour des raisons de précision, de stabilisation et de temps, il est préférable d'enchaîner les guides qui sont fonctionnellement reliés. Le logiciel permet un marquage de ce lien qu'il interprète comme un seul chemin d'écriture continu.

Si deux objets ont un point en commun (même abscisse et même ordonnée), mais qu'ils ne sont pas liés, les platines de micro-déplacement ne parcourront pas les deux segments d'une traite. Un repositionnement interviendra à la fin du tracé du premier segment pour tracer le deuxième.

Si deux guides sont liés mais présentent une forte discontinuité tangentielle, le tracé présentera des erreurs de positionnement, dû à l'accélération des moteurs pour atteindre une vitesse stable. On peut observer ce phénomène sur la figure 3.11-(a), lors de la réalisation de deux guides d'onde "jointés" avec un angle de  $90^\circ$  entre chacun. L'accélération des moteurs entraîne des oscillations.

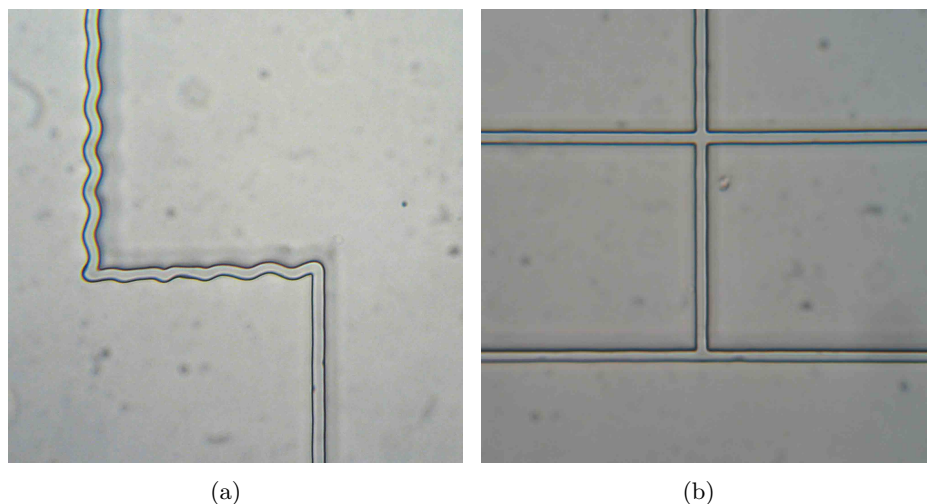


Figure 3.11 – Guides d'ondes tracés d'une seule traite pour des angles de jonction trop élevés (a) - Tracé de guides d'ondes avec périodes d'accélération-décélérations et modulateur acousto-optique (b)



Pour pallier le problème d'accélération et de décélération pour des guides liés dont les tangentes ne se correspondent pas, nous imposons des périodes d'accélération et de décélération pendant lesquelles le faisceau ne sera pas allumé. Le logiciel "Laser Writing" gère l'allumage et l'extinction de l'obturateur acousto-optique et impose une distance de 1 *mm* avant et après (voir figure 3.11-a).

Les oscillations observables sur la figure 3.9-(courbe du bas), correspondent à une période d'accélération de 50 *ms* pour atteindre une vitesse de déplacement de 1,5 *mm/s*.

### 3.2.6 Visualisation de la Focalisation

Afin de visualiser la focalisation sur l'échantillon, on a mis en place un système permettant de visualiser l'impact du spot sur l'échantillon. On peut outre sa focalisation, avoir un retour d'informations sur le profil du spot et la perpendicularité du faisceau par rapport à l'échantillon.

Lors de l'insolation de la couche guidante, l'énergie des photons UV est absorbée par les molécules du matériau qui se réorganisent. Une partie de l'énergie est ensuite restituée sous forme de photons qui sont moins énergétiques donc de longueur d'onde supérieure : on a donc un phénomène de photoluminescence. La lumière observée émet à une longueur d'onde dans le bleu.

Afin de récupérer ce faisceau bleu, nous avons placé un miroir dichroïque sur le chemin optique du faisceau UV. On peut voir sur la figure 3.4 que ce miroir est le dernier du banc optique dans le sens de la propagation. Celui-ci étant placé à l'emplacement du miroir de réflexion à 90 ° afin de laisser passer la longueur d'onde bleue en réfléchissant l'UV. Le miroir dichroïque, composé de couches diélectriques superposées, forme un réseau de Bragg. Ce réseau permet de choisir les taux de réflexion et de transmission selon la longueur d'onde. A l'aller, le faisceau UV est réfléchi et au retour le faisceau visible traverse le miroir pour se focaliser sur une webcam.

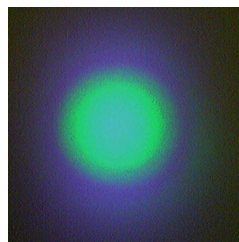


Figure 3.12 – Observation du spot d'écriture avec le système de monitoring

On a placé entre la webcam et le miroir dichroïque une lentille convergente. On récupère sur la webcam, lorsque le faisceau UV est bien focalisé sur l'échantillon, une image du spot dans le visible (voir figure 3.12). Ce système nous permet de régler la focalisation du faisceau UV très rapidement, de régler sa perpendicularité et aussi d'observer le profil du faisceau en temps réel. Le réglage de la focalisation pourrait être motorisé en XYZ et couplé à l'information de la webcam, afin que le réglage soit automatique dès la mise en service du banc d'écriture.

### 3.3 Conclusion



Figure 3.13 – Photo de notre nouveau banc d'inscription laser pulsé

Les matériaux hybrides organiques-inorganiques peuvent être utilisés en optique intégrée par l'exploitation d'une polymérisation locale qui renforce l'indice de réfraction, et renforce la résistance aux solvants. Cette polymérisation locale peut être causée par une insolation UV. Un nouveau bâti d'insolation par laser UV a été conçu et construit permettant l'écriture directe de circuits optiques sur un matériau lui aussi nouveau développé en parallèle.

Le nouveau matériau possède un groupement de type epoxy connu pour permettre une meilleure adhérence sur de nombreux substrats par rapport à son prédécesseur de type MAPTMS, il possède en outre l'avantage d'une plus grande simplicité de synthèse et donc d'une meilleure reproductibilité des propriétés finales.

Le nouveau bâti (voir figure 3.13) utilise un laser solide à semi-conducteurs à émissions pulsées, ce qui à puissance moyenne égale, fournit une puissance crête importante, ce qui autorise théoriquement un contraste d'indice légèrement plus élevé. Nous avons cherché à améliorer la résolution de l'écriture laser en diminuant la longueur d'onde (de 365 *nm* à 262 *nm*), le bâti a fait l'objet de mise au point au niveau de nombreux détails.

# Chapitre 4

## Fabrications, tests et optimisations de circuits simples

### Sommaire

---

<b>4.1</b>	<b>Banc d'écriture laser : tests et optimisations . . . . .</b>	<b>80</b>
4.1.1	Vers des guides de $5 \mu m$ sur $5 \mu m$ . . . . .	80
4.1.2	Réalisation et optimisation des guides d'ondes . . . . .	81
4.1.3	Guides d'ondes vus par la tranche . . . . .	84
4.1.4	Erreurs de tracé des moteurs . . . . .	85
4.1.5	Erreurs dues à la synchronisation du modulateur acousto-optique . .	85
<b>4.2</b>	<b>Caractérisation de guides droits et guides courbes . . . . .</b>	<b>86</b>
4.2.1	Caractérisation de guides droits . . . . .	87
4.2.2	Caractérisation de guides courbes . . . . .	89
<b>4.3</b>	<b>Mesure de l'indice de réfraction . . . . .</b>	<b>90</b>
<b>4.4</b>	<b>Caractérisation des premiers composants . . . . .</b>	<b>90</b>
4.4.1	Le diviseur/coupleur en Y . . . . .	90
4.4.2	Le coupleur directionnel . . . . .	94
<b>4.5</b>	<b>Conclusion . . . . .</b>	<b>97</b>

---

Nous avons présenté dans le précédent chapitre le nouveau matériau à photopolymérisation cationique ainsi que le nouveau banc d'écriture laser pulsé. Nous allons présenter ici les différents tests réalisés afin de valider notre système d'écriture de circuits intégrés optiques. A travers les caractérisations de nos guides d'ondes nous présenterons les pertes observées dans nos structures, les problèmes rencontrés pour leurs réalisations et les optimisations qui ont permis d'obtenir les structures souhaitées.

Afin de valider notre structure, nous avons réalisé des circuits optiques simples de type "diviseurs / recombineurs" ou "coupleurs directionnels". Nous présenterons leurs principes de fonctionnement et les résultats de leurs caractérisations.

## 4.1 Banc d'écriture laser : tests et optimisations

La structure du banc d'écriture détaillée sur la figure 3.4 a été utilisée pour effectuer les premiers tests matériaux, le matériau étant nouveau. Nous avons dans le même temps réalisé des guides d'ondes de sections carrées de  $5 \mu m$  sur  $5 \mu m$  éléments de base des circuits optiques souhaités. Les largeurs et hauteurs de guide ont été déterminées à l'aide de logiciels de simulations pour un confinement optimal à  $1,31 \mu m$ . Les résultats sont en concordance avec la théorie donnée dans le chapitre 2. La réalisation de dessins complexes passe d'abord par une phase d'optimisation d'éléments simples.

### 4.1.1 Vers des guides de $5 \mu m$ sur $5 \mu m$

Le moyen que nous avons choisi pour créer un spot de faible dimension à la focalisation sur l'échantillon est de créer à partir d'un faisceau laser, un objet qui va être imagé par un dispositif de collimation puis focalisé. Cette propagation est décrite par les lois de la diffraction. Si l'on place sur le trajet du faisceau en  $Z = Z_1$  un élément qui le fait diffracter, la propagation subit une altération due au phénomène de diffraction engendré. Lorsque on refocalise cet objet en plaçant une lentille à une distance donnée de la source diffractante, on va inverser la propagation de la lumière et ainsi reformer l'image de l'objet diffractant illuminé.

Une symétrie de révolution est engendrée par la troncation du faisceau à l'aide d'un micro-trou circulaire. L'image de ce micro-trou est une figure de diffraction composée d'un disque d'Airy et d'anneaux de diffractions (voir figure 4.1-a). En plaçant un diaphragme sur le chemin optique, on ne garde de la troncation du faisceau que le disque d'Airy : on

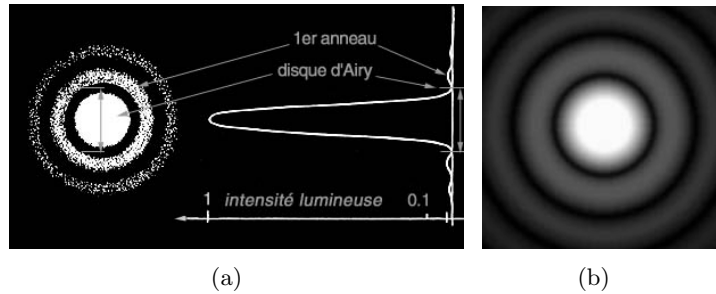


Figure 4.1 – Représentation d'un disque d'Airy et de sa répartition énergétique de forme Gaussienne (a) . Acquisition visuelle d'un disque d'Airy et de ses anneaux (b)

supprime ainsi les anneaux de diffractions secondaires (voir figure 4.1-b). Ce "nettoyage" du faisceau nous permet de ne garder que le lobe principal du faisceau Gaussien en supprimant les hautes fréquences. On obtient ainsi à la focalisation, un faisceau dont la répartition de l'énergie transverse est gaussienne dont la taille est celle du micro-trou modifiée par le facteur de magnification du système d'imagerie.

#### 4.1.2 Réalisation et optimisation des guides d'ondes

Nous allons présenter dans ce paragraphe les différents tests effectués pour valider le matériau dans une optique d'utilisation sous forme de guides d'onde.

##### 4.1.2.1 Optimisation de la tenue des guides sur le matériau

Le matériau ayant été développé parallèlement au banc optique, nous avons testé différents paramètres afin d'obtenir des guides d'ondes de largeur et hauteur souhaitées. Des tests de puissance laser en fonction de la vitesse d'écriture afin d'observer les décollements des guides d'ondes ont été effectués pour plusieurs synthèses (compositions différentes et/ou étapes d'élaborations modifiées).

Il a fallu trouver un compromis "Vitesse platines motorisés / Puissance laser / Fréquence laser" :

- Une trop grande vitesse des platines de micro-déplacements entraîne des erreurs de tracé et de positionnement comme nous le verrons au paragraphe 4.1.4.
- Une puissance non optimisée entraîne des guides de largeurs soit supérieures à  $5 \mu m$ , soit inférieures à  $5 \mu m$  : Une trop forte énergie entraîne un élargissement, les queues latérales des gaussiennes étant alors suffisantes pour polymériser le matériau. Les

problèmes de décollement par rapport à la couche tampon apparaissent si la polymérisation n'est pas suffisante pour induire un maintien de la couche guidante insolée sur la couche tampon.

- L'utilisation d'un laser pulsé introduit une contrainte supplémentaire par rapport à un laser continu : on ne doit pas distinguer les impacts sur le guide. Les impacts dus aux impulsions du laser ne seront pas observables si la fréquence d'impulsions est élevée mais la puissance sera réduite (fonctionnement physique du laser), ce qui implique une vitesse de déplacement basse pour l'obtention de la polymérisation souhaitée. Inversement, si l'on souhaite utiliser le laser avec une puissance lumineuse plus élevée, pour garder le même rapport "puissance / vitesse", et toujours avoir des guides de largeurs de sections  $5 \mu m$ , une fréquence basse d'impulsions devra être choisie : dans ce cas une polymérisation non continue des guides d'ondes pourra être observée (voir figure 4.2) .

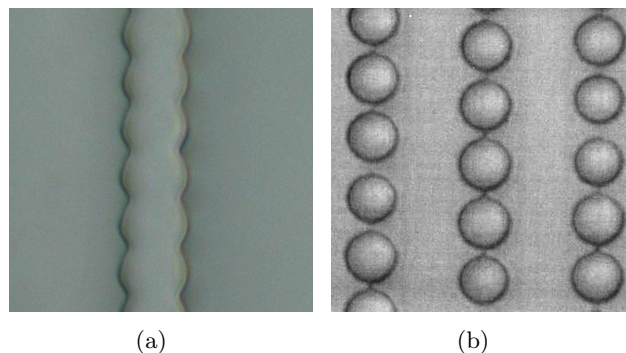


Figure 4.2 – Observation de deux tests de vitesse d'écriture pour une même fréquence laser de  $3 \text{ KHz}$ . La vitesse  $v_1$  du test (a) est inférieure à la vitesse  $v_2$  du test (b)

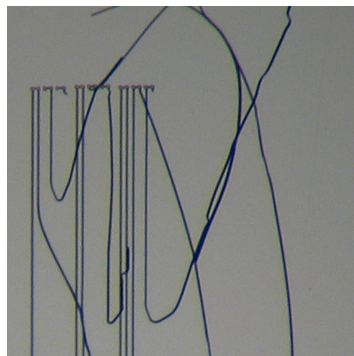


Figure 4.3 – Tests d'adhérence pour la réalisation de guides d'ondes à base de structure 3D de  $5 \mu m$  sur  $5 \mu m$ , pour différentes puissances laser et différentes vitesses d'écriture. Les paramètres optimaux sont le résultat d'un compromis.

L'optimisation de ces paramètres a entraîné de très nombreux essais afin d'obtenir les guides de dimensions souhaitées. L'adhérence des guides d'ondes sur leur substrat, dépendante du taux de polymérisation, a été analysée pour chaque guide d'onde écrit sur notre matériau.

La figure 4.3 illustre les problèmes rencontrés de tenue de guides d'ondes sur le matériau : la figure représente le tracé de guides droits en faisant des "aller-retours" pour différentes puissances : les guides avec bonne adhérence à la couche inférieure (couche tampon) sont réalisés avec de fortes puissances et vitesses de déplacement faibles. Les décollements observés sont dus à des puissances lumineuses trop faibles ou à des vitesses d'écriture trop hautes.

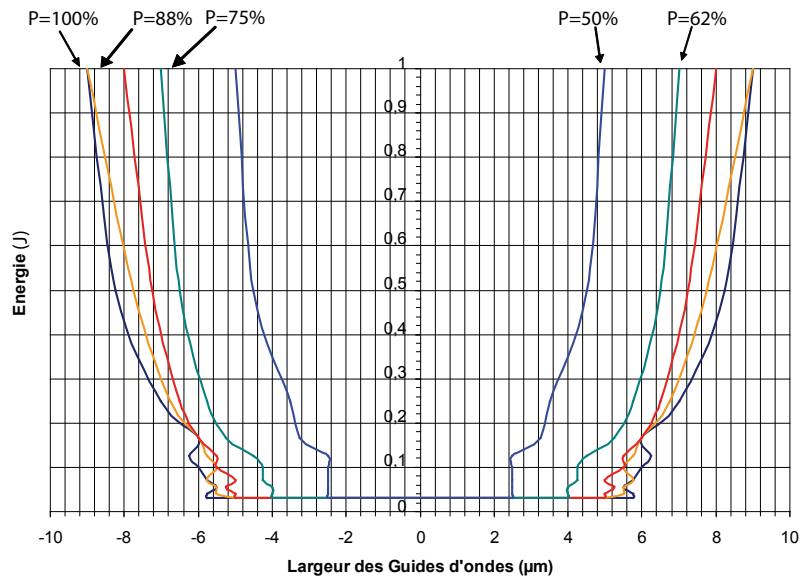


Figure 4.4 – Relevé de l'évolution de la polymérisation du matériau en fonction de l'énergie reçue à travers l'observation de la largeur des guides d'ondes

La courbe 4.4 représente un test de mesure de largeur des guides d'ondes relevées pour différentes puissances du laser, présentées ici en pourcentage de la puissance maximale.

Ce test nous permet d'observer l'évolution de la polymérisation du matériau en fonction de la dose d'énergie reçue (en  $J/m^2$ ), à travers l'observation de la largeur des guides d'ondes. On peut ainsi tracer le profil d'énergie du champ au delà de la lentille de focalisation en effectuant les tests pour différentes vitesses de déplacements des platines correspondant à différentes énergies déposées sur l'échantillon ( $E = p * t$ ) représentées ici sur l'axe des ordonnées.

On peut constater que pour cette synthèse de matériau, des guides de  $5 \mu m$  sont obtenus



pour une puissance laser de l'ordre de 50 % de  $P_{max}$ , et une vitesse de déplacement élevée ou une énergie  $E$  déposée sur l'échantillon faible (0,1 %).

### 4.1.3 Guides d'ondes vus par la tranche

Les sections de nos guides d'ondes ont été observées pour juger de la qualité des différents guides réalisés. A l'aide d'une pointe diamantée, on clive les échantillons perpendiculairement aux guides d'ondes de façon à permettre les observations par la tranche.

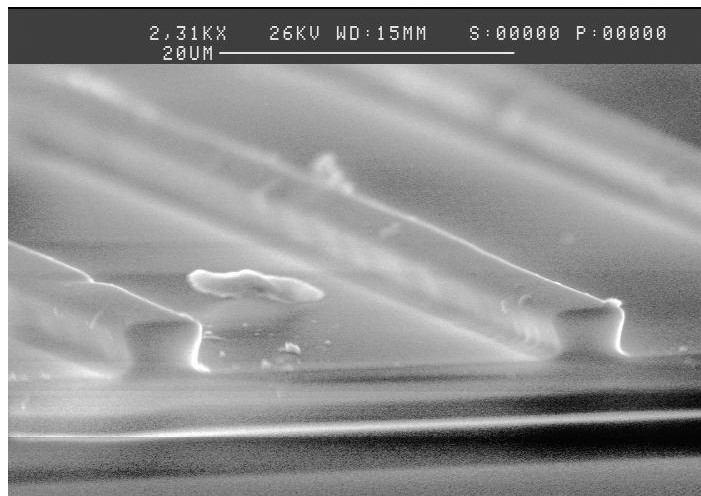


Figure 4.5 – Observation par microscopie électronique à balayage (MEB) de guides droits avant optimisation

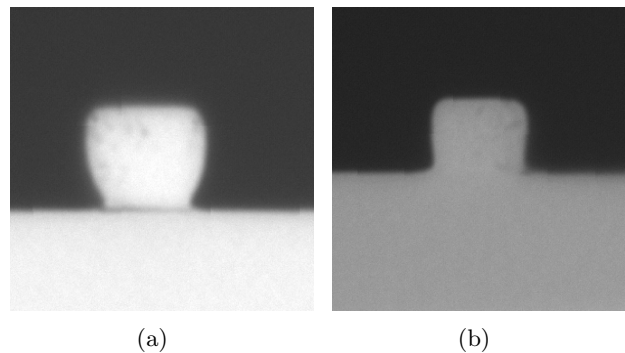


Figure 4.6 – Observation de la section d'un guide trapèze (a) et de la section d'un guide carré de  $5 \mu m$  sur  $5 \mu m$  (b)

Les premiers essais ne nous ont pas permis d'obtenir des résultats exploitables. Les guides d'ondes en raison d'une focalisation et autres paramètres mal maîtrisés étaient beaucoup trop larges (de l'ordre de  $20 \mu m$ ). Un dosage pas encore maîtrisé du photo-initiateur a

entraîné des problèmes d'effets "trapèzes" sur la forme des guides d'ondes (voir figure 4.5 et 4.6-a). On suppose pour expliquer cette forme, une absorption plutôt en surface de la couche guidante qui laisse moins d'énergie en profondeur.

Une fois les problèmes résolus, on a pu obtenir des guides de la largeur souhaitée  $5\ \mu m$  sur une épaisseur de  $5\ \mu m$  (voir figure 4.6-b).

#### 4.1.4 Erreurs de tracé des moteurs

Les premiers tracés de trajectoires montraient des erreurs de positionnements. Après réglages de l'asservissement PID (réglages de la réponse des moteurs à une consigne prédéfini) nous avons pu corriger ces défauts. On peut voir sur la figure 4.7, que le design (courbe pleine), et l'erreur relevée par le module d'acquisition (courbe en pointillés) sont superposés. On n'observe pas d'erreurs supérieures à  $0,1\ \mu m$ , erreur maximale voulu lors du réglage du PID (voir figure 3.9).

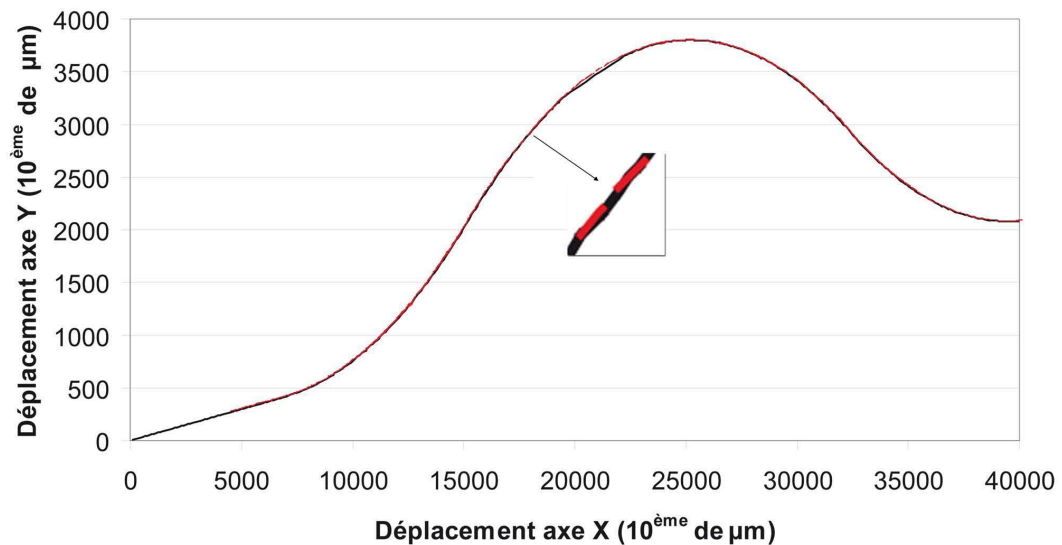
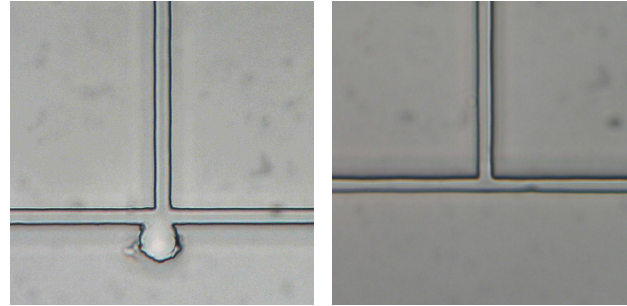


Figure 4.7 – Représentation de l'acquisition d'un tracé moteur (courbe pleine) et de l'erreur de positionnement relevée tout au long du tracé (courbe en pointillés)

#### 4.1.5 Erreurs dues à la synchronisation du modulateur acousto-optique

En utilisant le mode ON-OFF du module acousto-optique il s'est avéré que des erreurs de dépassement de trajectoire apparaissaient. Ces problèmes étaient dus à une mauvaise synchronisation entre les moteurs et le modulateur acousto-optique.



(a) tracé de croisements avant ajustement de l'asservissement PID (b) tracé de croisements après ajustement de l'asservissement PID

Figure 4.8 – Observation de l'erreur d'écriture sur le tracé de croisements avant réglages (a) et après réglages (b) : mauvais asservissement PID entraînant des dépassements de trajectoires

Les figures 4.8-(a) et 4.8-(b) nous permettent d'évaluer l'erreur avant et après correction.

## 4.2 Caractérisation de guides droits et guides courbes

L'optimisation de la synthèse du matériau et de son dépôt ainsi que le réglage du banc optique nous ont permis de corriger les défauts observés sur les différents tests réalisés.

Afin de mesurer les pertes de nos guides d'ondes, nous avons développé un banc optique de caractérisation. On dénombre deux types de pertes relatives aux guides d'ondes :

- Les pertes de propagation. Exprimées en  $dB/cm$  dont les sources sont multiples :
- Les pertes par diffusion d'imperfections sont localisées au sein de la couche guidante ou aux interfaces. Elles sont liées aux pertes de guidage.
- Les pertes par absorption sont principalement dues au matériau (impuretés chimiques...)
- Les pertes de guidage sont la conséquence d'un mauvais confinement. Une partie du signal sort du coeur de guide par l'intermédiaire de la partie évanescente du signal. Ces pertes sont plus grandes pour les modes de propagation d'ordre élevé pour lesquels le nombre de réflexions aux interfaces est plus important.
- Les pertes par radiation sont dues à un transfert d'une partie de l'énergie d'un mode guidé vers un mode de radiation (à l'interface guide-air ou guide-substrat). Les pertes par radiation sont généralement négligeables pour les modes bien confinés et, au contraire élevées pour les modes d'ordres élevés.

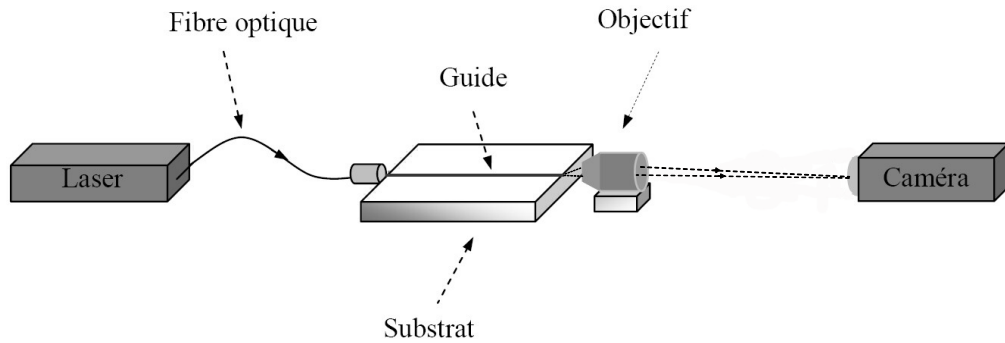


Figure 4.9 – Représentation schématique du banc de caractérisation optique

Le banc optique de caractérisation permet la mesure des pertes dans nos guides d'ondes et l'étude spectrale du matériau.

Le banc de caractérisation est constitué de trois platines de micro-déplacement réglables manuellement sur les 3 axes XYZ. On place une fibre optique sur une de ces platines pour injecter le signal lumineux. La deuxième platine nous permet de fixer l'échantillon : elle est équipée d'un module d'aspiration afin que l'échantillon ne subisse pas de mouvements pendant les mesures. Une troisième platine nous permet soit de placer une lentille biconvexe pour les mesures de pertes de guides d'ondes et pour la visualisation du champ proche de sortie (à la focale de celui-ci se trouvant un capteur de puissance) soit une fibre optique pour récupérer directement le signal issue des guides d'ondes. Cette fibre optique positionnée en sortie de l'échantillon nous permet de faire des études spectroscopiques avec un analyseur de spectre.

Nous disposons pour les alignements d'une source émettant dans le visible à  $633 \text{ nm}$ . Pour les mesures de pertes ainsi que les études de spectres, nous injectons soit un signal issu d'une source cohérente émettant à  $1,31 \mu\text{m}$  soit d'une autre source de même type émettant à  $1,55 \mu\text{m}$  ou encore d'une source large bande dont la longueur d'onde centrale  $\lambda_c$  est  $1,31 \mu\text{m}$ .

### 4.2.1 Caractérisation de guides droits

La méthode utilisée pour la mesure des pertes est dite "méthode du cut-back". Elle permet d'une part de mesurer les pertes de propagation mais aussi les pertes de couplage. Le but est de mesurer le rapport de puissance "entrée/sortie" pour différentes longueurs d'échantillons.

On place tout d'abord la fibre d'injection à l'entrée de l'échantillon face au guide d'onde. On utilise les platines de micro déplacement "XYZ" afin de s'aligner sur le guide d'onde. On

effectue la même opération en sortie du guide d'onde. L'échantillon a été préalablement clivé afin d'obtenir des faces bien droites pour que l'injection puisse se faire bien perpendiculairement à la section du guide d'onde.

En clivant l'échantillon à différentes longueurs, on peut tracer l'évolution des pertes en fonction de la longueur du guide d'onde. Les pertes de couplage sont mesurées par extrapolation pour une longueur nulle. Le tracé pour de nombreux échantillons, nous permet de s'affranchir des variations de couplage.

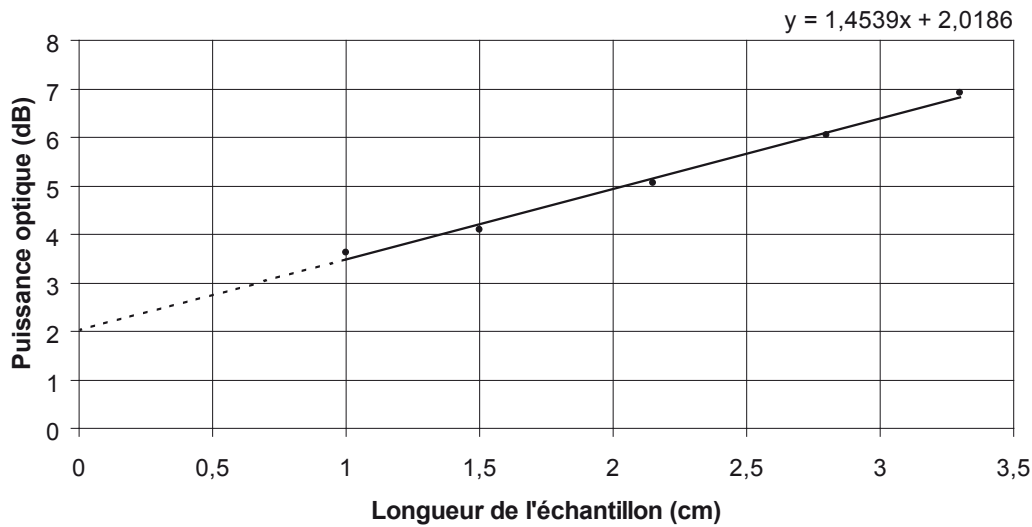


Figure 4.10 – Mesure des pertes d'un guide droit élaboré à partir de notre matériau. Mesures effectués pour une injection à la longueur d'onde  $1,31 \mu m$

Nous avons mesuré par cette méthode les pertes de propagation et de couplage aux longueurs d'ondes d'injection de  $1,31 \mu m$  (voir figure 4.10) et de  $1,55 \mu m$ .

On observe à  $1,31 \mu m$  des pertes de propagation de l'ordre de  $1,45 dB/cm$ . Ces pertes restent élevées par rapport à d'autres types de matériaux mais suffisamment faibles pour étudier des circuits plus complexes. L'élaboration et le développement de nouvelles synthèses du matériau devraient nous permettre à terme d'obtenir une baisse significative des pertes observées. Les pertes de couplage sont de l'ordre de  $2dB$  (injection + récupération du signal). Les mesures ont été effectués pour des guides de  $5 \mu m$  sur  $5 \mu m$  monomodes.

Les pertes étant relativement élevées l'écriture de guides de même largeur et même hauteur avec un laser continu ont été réalisées. La caractérisation de ceux-ci nous a permis de conclure que l'effet pulsé de notre laser à la vitesse de déplacement  $1,5 mm/s$  de l'échantillon ne rentré pas en jeu. On a relevé des pertes de propagation de l'ordre de  $1,84 dB/cm$  pour

des guides droits tracés avec ce laser continu sur notre matériau.

Nous avons obtenu des pertes de l'ordre de  $16 \text{ dB/cm}$  lors de la caractérisation de guides d'ondes à  $1,55 \mu\text{m}$  (guides d'ondes réalisés avec notre laser pulsé). Celles-ci restent beaucoup trop élevées pour que l'on puisse utiliser ce matériau à cette longueur d'onde. La suite de l'étude de nos guides d'ondes et les dessins de nos circuits, ont été optimisés pour une utilisation à la longueur d'onde  $1,31 \mu\text{m}$  ou autour de cette longueur d'onde notamment avec l'utilisation d'une source "large bande".

#### 4.2.2 Caractérisation de guides courbes

Nous avons réalisé une étude sur les guides d'ondes courbes afin de déterminer le rayon minimal que l'on peut utiliser dans nos circuits. Cette valeur est un élément essentiel pour la miniaturisation de nos circuits ainsi que pour la réduction des pertes. Le rayon de courbure minimal est étroitement lié à la différence d'indice [77] et permet de déterminer celle-ci.

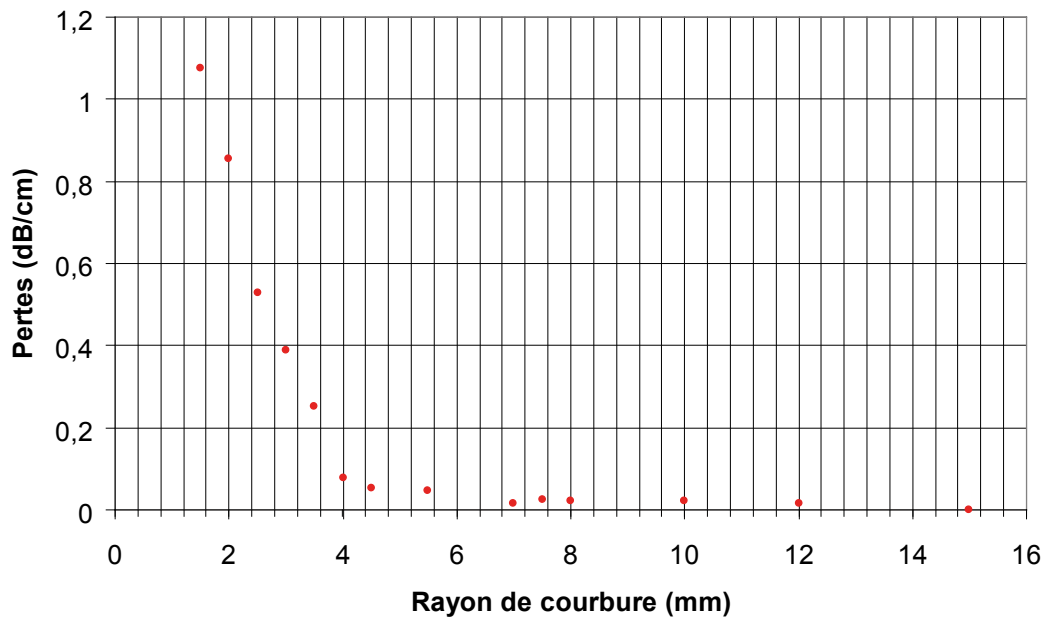


Figure 4.11 – Evolution des pertes de courbure en fonction de différents rayons de courbure pour un écart d'indice  $\Delta n=0,014$  entre le guide d'onde et la couche de recouvrement

La courbe 4.11 représente l'évolution des pertes en courbure. On soustrait aux pertes totales mesurées les pertes de propagation et de couplage afin de déterminer uniquement les pertes de courbures.

Lorsque les rayons de courbures sont élevés, les pertes de courbures sont quasi nulles. Plus le rayon de courbure augmente, plus on peut déceler les pertes dues aux virages.

Pour des virages dont le rayon de courbure est supérieur à  $4,5\text{ mm}$ , les pertes de courbures sont minimales. Pour un rayon inférieur à  $4,5\text{ mm}$ , les pertes croissent très rapidement. Un rayon compris entre  $5\text{ mm}$  et  $6\text{ mm}$  nous permettra d'avoir le moins de pertes possibles dues aux courbures et reste relativement correct pour une miniaturisation de nos composants.

### 4.3 Mesure de l'indice de réfraction

L'indice de réfraction de notre couche guidante a été mesuré à l'aide d'un réfractomètre d'Abbe pour une longueur d'onde de  $589\text{ nm}$ . L'indice de réfraction de la couche guidante qui peut varier en fonction du traitement thermique imposé à la couche, est un paramètre essentiel à maîtriser pour la réalisation des guides. L'étude des sections des guides d'ondes, ainsi que l'adhérence de ceux-ci nous a poussé à utiliser un traitement thermique de  $110^\circ\text{C}$  pour une durée de  $1\text{ heure}$ .

Avant insolation, l'indice de réfraction est de  $1,514$ . Il augmente de  $5$  millièmes pour atteindre la valeur  $1,519$  après polymérisation. Après traitement thermique il est de  $1,520$ . L'indice de réfraction de la couche tampon étant de  $1,506$  nous pouvons en déduire l'écart d'indice  $\Delta n$  qui est de  $0,014$ .

### 4.4 Caractérisation des premiers composants

Les premiers composants que nous avons réalisés après les guides droits et les guides courbes sont des "diviseurs / coupleurs" de puissance en Y et des coupleurs directionnels. Ces deux composants nécessitent seulement l'utilisation de guides droits et guides courbes ce qui nous permet d'observer le fonctionnement de nos guides d'ondes, précédemment caractérisés, dans des circuits.

#### 4.4.1 Le diviseur/coupleur en Y

Le principe de ce composant (dont la forme est un Y) consiste à diviser en deux un guide droit afin de séparer ou coupler un signal (voir figure 4.12). Ce circuit demande une

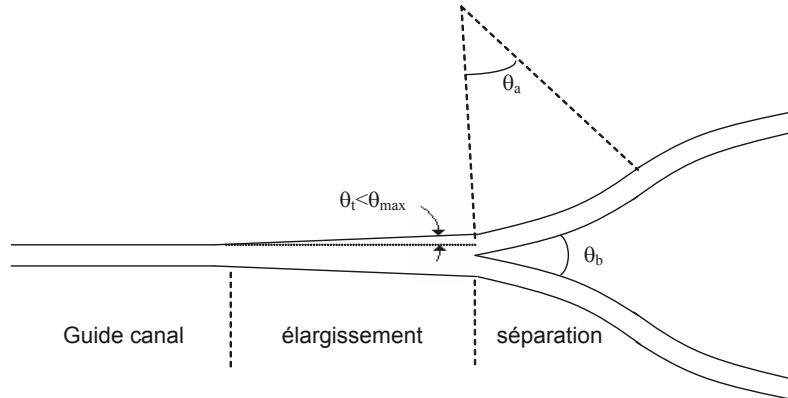


Figure 4.12 – Topographie d'un diviseur en Y

conception très méticuleuse. Afin d'effectuer une division du signal identique dans les deux branches, il faut une grande homogénéité dans la conception du Y. On peut, en utilisant plusieurs composants de ce type, réaliser des "diviseurs /recombineurs"  $1 * N$  ou  $N * 1$  (voir figure 4.13).

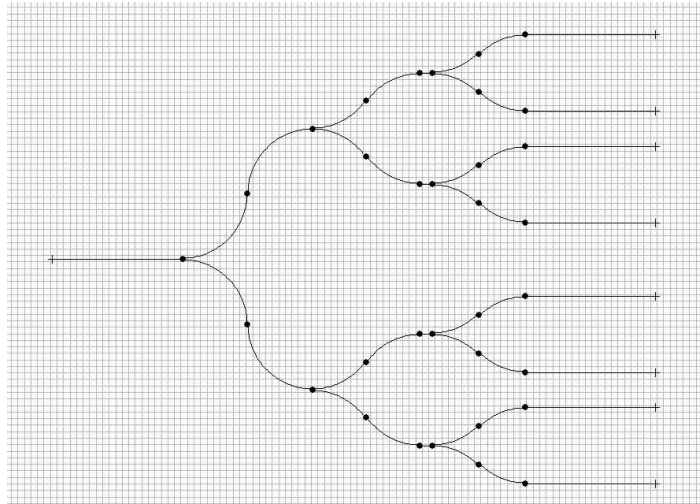


Figure 4.13 – Design d'un diviseur/recombineur en Y par 8

Sur la figure 4.12,  $\theta_b$  représente l'angle de séparation des bras,  $\theta_a$  l'angle d'inflexion des virages en  $S$  et  $\theta_t$  l'angle d'élargissement du guide canal.

La lumière est injectée depuis un canal monomode (voir figure 4.14-Phase I) connecté à un guide qui s'élargit progressivement (voir figure 4.14-Phase II). La conséquence est l'étalement de l'énergie du mode guidé. Lorsque le profil du mode est suffisamment large, il recouvre plus les modes des deux guides courbes de sortie : la puissance est ainsi séparée dans les deux



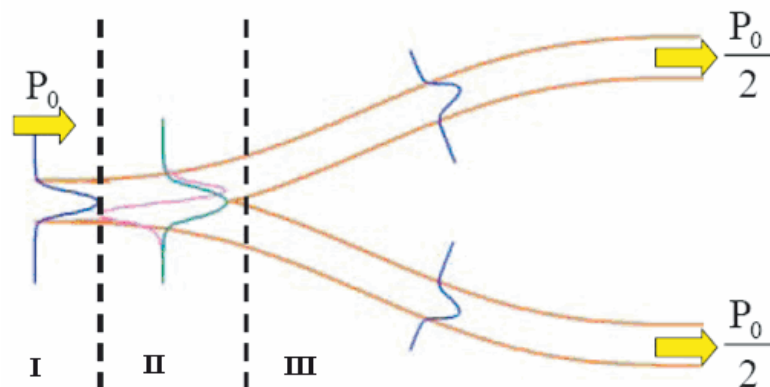


Figure 4.14 – Principe de fonctionnement d’un diviseur/recombineur en Y

canaux (voir figure 4.14-Phase III). L’angle de séparation, la précision d’écriture des deux branches en  $S$ , feront que la puissance perdue lors de la division sera minimale.

#### 4.4.1.1 Réalisation

Ce composant est composé d’un guide droit, et de quatre arcs de cercles dont le rayon a été choisi en fonction d’une étude préliminaire afin de composer les deux bras du Y. Les deux guides courbes se recouvrent au début de leurs trajectoires pour se séparer progressivement. La qualité de la jonction entraînera dans des conditions optimums, d’écriture et de gravure, une bonne séparation de la puissance.

La précision d’allumage et d’extinction du modulateur acousto-optique joue un grand rôle pour la conception de ce composant : le départ du premier bras diviseur doit se faire exactement au même endroit que le départ du deuxième bras.

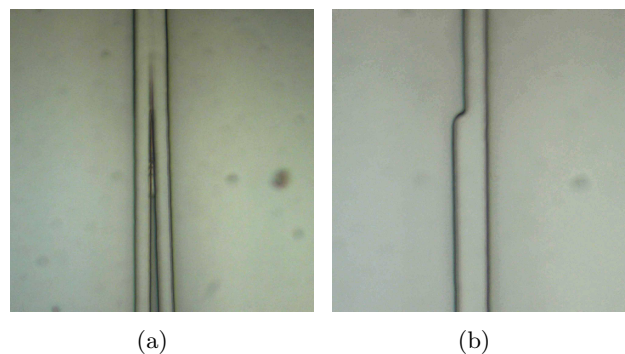


Figure 4.15 – Observation des défauts sur la réalisation de diviseur en Y

Ce composant est intéressant car il permet d'avoir des retours d'informations sur le réglage du banc optique. On peut ainsi observer :

- si le spot laser à sa focalisation sur l'échantillon, a une puissance homogène sur sa totalité, grâce à l'observation du recouvrement des deux bras. On remarque dans le cas contraire des gonflements au départ du Y (voir figure 4.15-a), et notamment une difficulté de gravure qui se traduira par une zone élargie donc multimode entraînant des pertes.
- si l'asservissement des moteurs est bien réglé : le départ d'un bras doit se faire au même endroit que l'autre. Si les moteurs sont mal asservis entraînant des erreurs de positionnements, ou que le modulateur acousto-optique ne se déclenche pas au bon moment, on pourra observer le problème dès la gravure de l'échantillon (voir figure 4.15-b).

Les photos (voir figure 4.16-a et b) témoignent de la résolution de ces problèmes. Une fois les paramètres optimisés, nous n'observons plus de problème de gravure ou de difformité à l'allumage du modulateur acousto-optique.

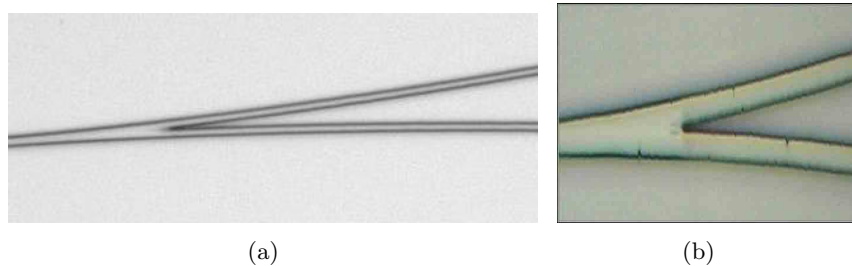


Figure 4.16 – Optimisation de diviseur en Y

Une fois que la phase d'optimisation a été effectuée, nous avons pu tester et caractériser nos composants.

#### 4.4.1.2 Caractérisation

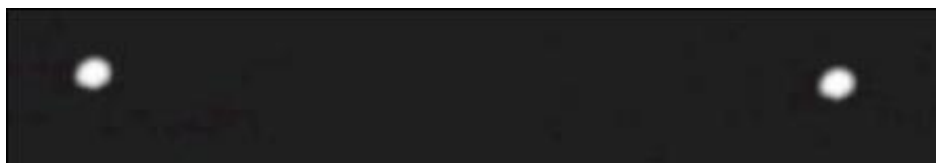


Figure 4.17 – Observation de l'émission en sortie d'un Y diviseur par deux, en injectant une longueur d'onde de  $1,31 \mu\text{m}$  en entrée

Nous avons testé nos diviseurs à la longueur d'onde  $\lambda=1,31 \mu m$ . Nous avons effectué différentes mesures pour des rayons de courbures différents. A chaque fois la division de puissance par deux est presque parfaite. Nous avons observé pour les différents rayons de courbure un écart moyen de puissance entre chaque branches de  $0,01 dB$ .

On peut voir sur la figure 4.17, que le confinement est optimum : on n'observe pas de guides plans ce qui signifie que l'énergie émise dans le bras d'entrée n'est pas propagée dans les différentes couches de notre composant.

#### 4.4.2 Le coupleur directionnel

Dans les réseaux de fibres optiques, les coupleurs permettent de distribuer le signal optique reçu vers plusieurs fibres ou acheminent le signal de plusieurs fibres vers une seule. On les utilise aussi pour prélever une partie de la puissance optique afin de surveiller sa stabilité ou pour mesurer des réflexions [12].

Les coupleurs remplissent la même fonction que les diviseurs recombineurs en Y cependant on a la possibilité de modifier la puissance transmise sur chaque bras en modifiant la longueur de couplage.

Un coupleur directionnel est composé de guides droits qui se rapprochent progressivement par le biais de guides en S (sbend). Lorsque deux guides monomodes identiques sont très éloignés l'un de l'autre, il n'y a pas d'interaction entre eux. Les deux guides ne se "voient" pas. Par contre, si les guides sont suffisamment proches, les parties évanescentes des modes guidés vont se recouvrir, on parle alors de modes couplés : le mode du guide voisin excité, récupère tout ou une partie de la puissance disponible. Ce phénomène d'échange d'énergie entre les guides est périodique. La période spatiale de l'oscillation d'énergie dans un guide et le coefficient de couplage par unité de longueur dépendent du degré avec lequel la partie évanescente du mode guidé pénètre dans l'autre guide.

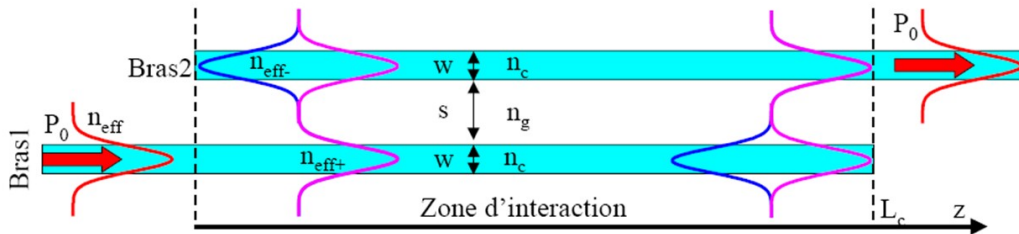


Figure 4.18 – Principe de fonctionnement d'un coupleur directionnel.  $n_c$  est l'indice dans les couches inférieures et supérieures,  $n_g$  est l'indice du guide,  $n_{eff}$  est l'indice effectif

On peut caractériser le système à deux guides (monomodes) par deux supers modes pairs et impairs d'indices efficaces  $n_{eff-}$  et  $n_{eff+}$  (voir figure 4.18). Les deux modes ont des indices effectifs différents ce qui introduit une différence de vitesse de propagation. Des interférences intermodales alternativement constructives et destructives provoquent le transfert d'intensité lumineuse d'un guide vers l'autre. Pour une longueur de couplage importante, le recouvrement est suffisamment faible pour que les deux modes interfèrent totalement. Dans cette configuration, la longueur de couplage totale  $L_c$  [78] est définie par :

$$L_c = \frac{\lambda}{2\Delta n} \quad (4.1)$$

avec  $\Delta n$ , la différence d'indice entre les guides effectifs du mode symétrique et du mode antisymétrique qui dépend entre autre de la distance de couplage.

Si la longueur de propagation  $z$ , parcourue par la lumière à travers le coupleur directionnel, est égale à une fois ou un nombre impair de fois la longueur de couplage, l'énergie est transférée du bras d'injection vers le second.

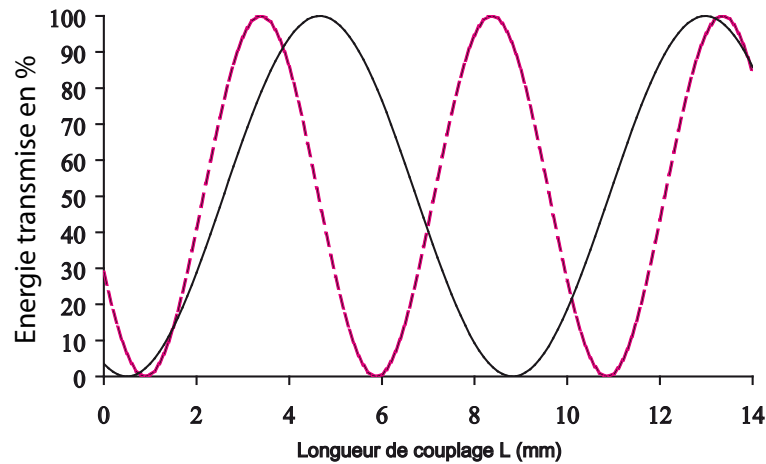


Figure 4.19 – Répartition de l'intensité lumineuse dans un coupleur direct, en fonction de la longueur de couplage

De façon similaire, si la distance  $z$  est égale à un nombre pair de fois la longueur de couplage, l'intensité lumineuse sera complètement revenue dans le premier guide après avoir été transféré dans le guide adjacent.

$P_1$  et  $P_2$  sont les puissances normalisées associées respectivement au bras supérieur et au bras inférieur :  $P_1 + P_2 = 1$ . Dans la situation de faible couplage, d'après la théorie des modes couplés [79], la puissance normalisée  $P_2$  à la sortie du guide 2 est donnée par la relation

suivante :

$$P_2 = \sin^2 \left[ \frac{\pi \cdot L}{2 \cdot L_c} \right] \quad (4.2)$$

La figure 4.19, illustre la distribution d'intensité lumineuse entre les bras d'un coupleur directionnel pour différentes longueurs d'ondes.

#### 4.4.2.1 Réalisation

La réalisation d'un coupleur directionnel est plus simple que celle d'un diviseur en Y. Sur la figure 4.20 les guides sont écartés de  $2 \mu m$ .

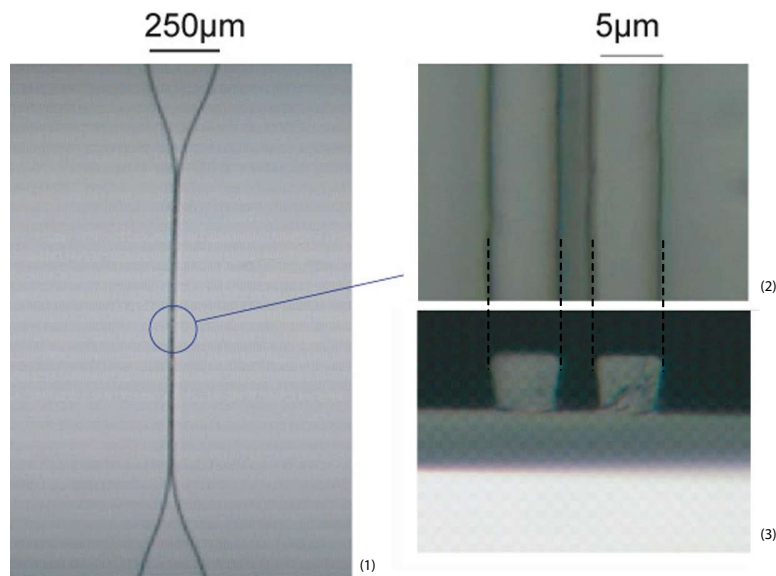


Figure 4.20 – Observation d'un coupleur directionnel dont l'écartement entre les deux branches est de  $2 \mu m$ . (Photo 1 : représentation du coupleur en entier. Photo 2 : vue de dessus de la zone de couplage et de l'écartement des deux branches. Photos 3 : vue en coupe des deux branches)

On peut d'ailleurs observer la bonne gravure entre les guides malgré des sections pas encore totalement optimisées au moment de l'écriture de ce composant ainsi qu'une vue de dessus des bras du coupleur.

#### 4.4.2.2 Caractérisation

La figure 4.21, représente les résultats expérimentaux obtenues pour un coupleur dont l'écartement entre les bras est de  $3 \mu m$ . Les deux courbes représentent l'observation de l'in-

tensité des deux bras du coupleur directionnel. La réalisation de ce coupleur nous permet de confirmer l'étude théorique : l'énergie du bras 1 passe bien dans le bras 2, et vice et versa lorsque la propagation se fait selon  $z$  pour différentes longueurs de couplage.

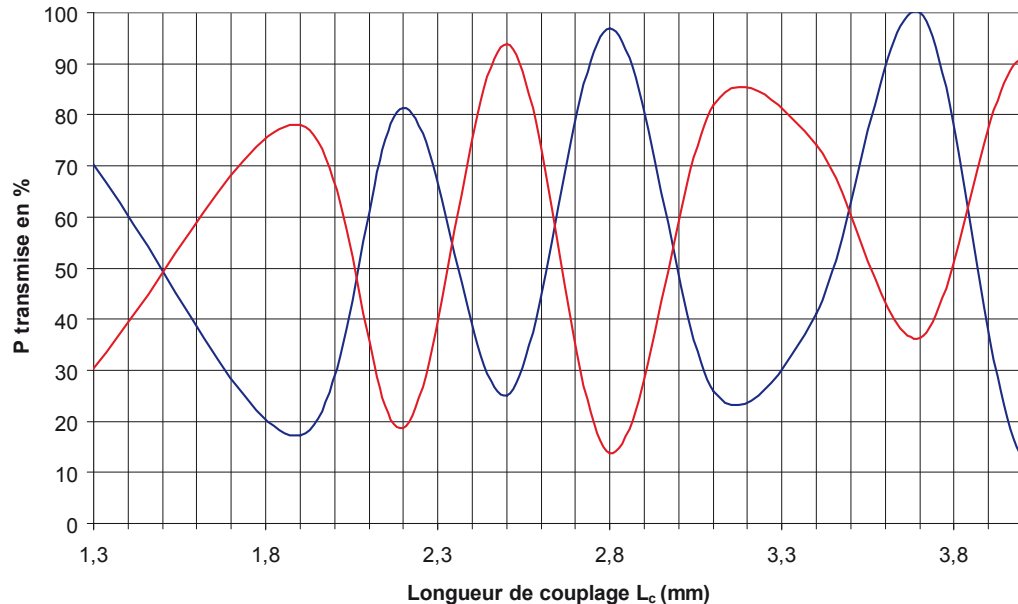


Figure 4.21 – Caractérisation de différents coupleurs directionnels dont les bras pour chaque composant sont éloignés de  $3 \mu m$ . Observation de l'énergie issue de chaque bras pour différentes longueurs de couplage

L'étude expérimentale a été faite en réalisant plusieurs coupleurs, dont la longueur de couplage était différente pour chacun d'eux. Tous les coupleurs ont été caractérisés dans les mêmes conditions : on observe cependant des niveaux d'énergie différents, entre certains pics. Cela peut-être dû à une injection mal centrée sur les guides d'ondes, à des poussières dans la couche guidante créant ainsi des pertes de propagation ou encore à un clivage pas parfaitement droit entraînant ainsi quelques pertes de couplage.

## 4.5 Conclusion

Ce chapitre a abordé les tests effectués pour l'optimisation du matériau et pour l'optimisation de notre banc optique. Nous avons à travers la réalisation et la caractérisation de composants "simples" validé notre procédé d'écriture laser pulsé sur le matériau hybride de type EETMOS. Des composants élémentaires (guides droits et guides courbes) ont permis

une première exploration des possibilités de cette technologie, à partir par exemple d'études sur le rayon de courbure, ou le couplage directionnel entre deux guides rapprochés.

Cette étude nous permet donc d'aborder l'étude et la réalisation de composants complexes.

# Chapitre 5

## Multiplexage Optique : WDM et CDMA

### Sommaire

---

<b>5.1</b>	<b>Multiplexage en longueur d'onde : théorie . . . . .</b>	<b>101</b>
5.1.1	Multiplexage optique . . . . .	101
5.1.2	Composants WDM en optique intégrée . . . . .	102
5.1.3	Le Coupleur en étoile . . . . .	104
5.1.4	Étude de la focalisation . . . . .	105
5.1.5	Etude de la dispersion . . . . .	107
5.1.6	Pertes d'insertion et non-uniformité . . . . .	110
5.1.7	Diaphotie (Crosstalk) . . . . .	113
5.1.8	Dépendance à la polarisation . . . . .	115
<b>5.2</b>	<b>Conception d'un WDM à coupleurs en étoile . . . . .</b>	<b>116</b>
5.2.1	Paramètres de fonctionnement . . . . .	116
5.2.2	Etapas de la conception . . . . .	116
5.2.3	Conception pratique d'un composant WDM à coupleur en étoile . .	117
<b>5.3</b>	<b>Réalisation d'un WDM à coupleurs en étoile . . . . .</b>	<b>122</b>
5.3.1	Réalisation de Tapers . . . . .	122
5.3.2	Réalisation de Coupleurs en étoile . . . . .	124
5.3.3	Réalisation du réseau déphaseur . . . . .	129
5.3.4	Réalisation du composant complet . . . . .	129
<b>5.4</b>	<b>Caractérisation d'un WDM à coupleurs en étoile . . . . .</b>	<b>130</b>
5.4.1	Critères de caractérisation . . . . .	130
5.4.2	Résultats de caractérisation . . . . .	133



<b>5.5 Étude, réalisation et caractérisation de composants pour l'accès multiple par codes : CDMA . . . . .</b>	<b>134</b>
5.5.1 Qu'est-ce que le CDMA ? . . . . .	134
5.5.2 Codage et décodage grâce à un composant optique . . . . .	135
5.5.3 Réalisation du regroupement des sorties du CDMA . . . . .	137
5.5.4 Caractérisation du composant CDMA . . . . .	139
<b>5.6 Conclusion . . . . .</b>	<b>142</b>

---

Dans le chapitre précédent, ont été présentés le banc d'écriture laser et la réalisation de circuits élémentaires : guides droits et guides courbes, puis la fabrication et la caractérisation des premiers composants réalisés : diviseurs de puissance en Y et coupleurs directionnels.

La qualité de fabrication de circuits simples ayant été démontrée, nous abordons dans ce chapitre la réalisation de composants plus complexes permettant le multiplexage. Deux types de multiplexages sont étudiés : un classique démultiplexage en longueur d'onde (WDMA), et un multiplexage plus original à répartition par code (CDMA).

Le principe de fonctionnement, le procédé d'écriture et la caractérisation de coupleurs de puissances en étoile, de multiplexeurs en longueur d'onde fondés sur un réseau de guides déphaseurs et finalement de multiplexeurs par code sont présentés.

## 5.1 Multiplexage en longueur d'onde : théorie

### 5.1.1 Multiplexage optique

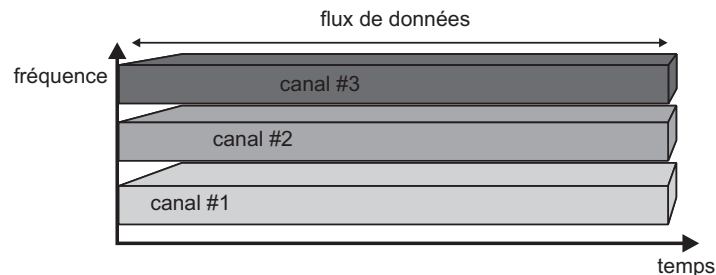


Figure 5.1 – Accès multiple à répartition en fréquence (FDMA)

Le multiplexage en fréquence, utilisé depuis longtemps dans le domaine des transmissions Hertziennes, repose sur un ensemble de porteuses à différentes fréquences modulées séparément par un signal à transmettre (voir figure 5.1).

En optique, le terme de porteuses de différentes longueurs d'onde est employé plutôt que porteuses à différentes fréquences (les transmissions hertziennes utilisaient aussi dans les années cinquante les longueurs d'onde !). La transposition du multiplexage fréquentiel classique en optique est donc un multiplexage en longueur d'onde (*Wavelength Division multiplexing*).

La fréquence de modulation des porteuses optiques est limitée par l'électronique à quelques dizaines de GigaHertz. Afin d'exploiter les possibilités spectrales de la fibre optique,

dont la bande passante dépasse la centaine de TéraHertz, un multiplex de porteuses optiques est généré par mélange des longueurs d'onde.

La configuration de base d'un tel système de transmission est illustré sur la figure 5.2.

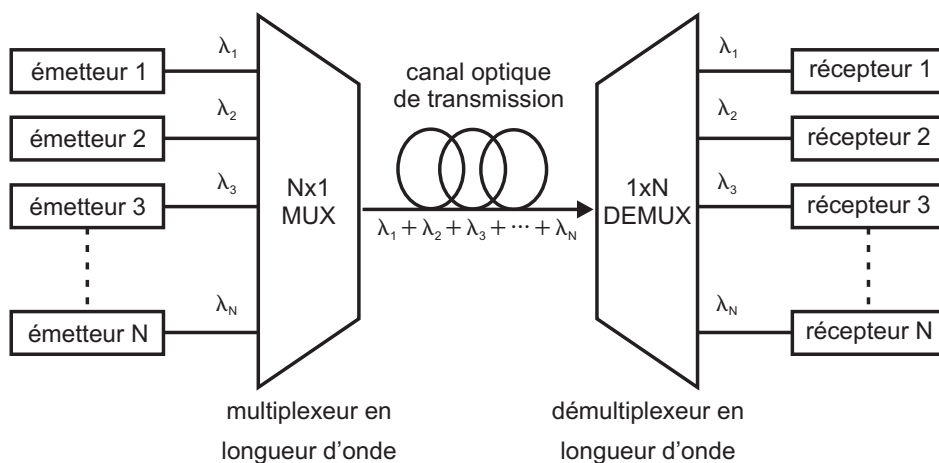


Figure 5.2 – Accès multiple à répartition en longueur d'onde (WDMA)

Une longueur d'onde est attribuée à un utilisateur, l'ensemble des utilisateurs communiquant dans une fenêtre fréquentielle donnée. En télécommunication optique, on considère souvent des fenêtres de largeur  $40 \text{ nm}$  correspondant par exemple à 50 longueurs d'ondes espacées de  $0,8 \text{ nm}$ . Cette largeur de fenêtre correspond à la bande passante des systèmes d'amplification optique usuels. La longueur d'onde  $\lambda$  étant relié à la vitesse  $c$  par la formule  $\lambda = c.t$ , un écart de  $0,8 \text{ nm}$  correspond à un écart fréquentiel de  $100 \text{ GHz}$ . Actuellement on peut doubler le nombre de canaux et multiplexer sur une bande optique 100 canaux qui seront alors espacés de  $50 \text{ GHz}$  par entrelacement des longueurs d'onde. Dans un tel système, chaque utilisateur peut utiliser via un canal, le débit maximal autorisé par le matériel électronique (de l'ordre de la dizaine de GigaHertz). Le multiplexage des canaux permet alors d'atteindre des débits de l'ordre de quelques Terabits par seconde ( $5 \text{ Tbits}$  avec 100 canaux de  $50 \text{ GHz}$  sur une fenêtre optique de  $40 \text{ nm}$ ).

### 5.1.2 Composants WDM en optique intégrée

Typiquement, le composant permettant de mélanger/séparer les longueurs d'onde est composé d'un étage permettant d'élargir le faisceau optique qui attaque alors un élément diffractif apportant les propriétés dispersives requises avant une refocalisation du signal en

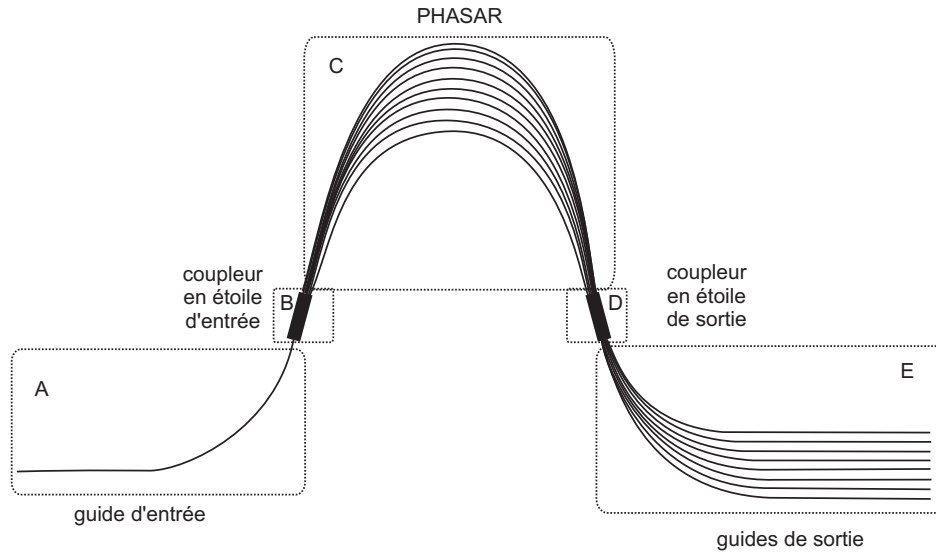


Figure 5.3 – Démultiplexeur optique à coupleur en étoile

sortie sur une fibre/un guide dépendant de la longueur d'onde. Par retour inverse de la lumière, le composant utilisé en sens inverse joue le rôle de mélangeur de longueurs d'onde.

En optique intégrée, les multiplexeurs en longueurs d'onde les plus répandus exploitent une architecture directement inspirée des spectromètres à réseau de diffraction. Ce dernier élément est remplacé par un réseau de guides déphaseurs (Phasar : *Phase Array* ou AWG : *array of waveGuides*). Des coupleurs de puissance remplacent les lentilles d'expansion et de focalisation. Couramment le coupleur de puissance est de type en étoile.

Des études originales ont été faites au sein du laboratoire [74] sur des WDM à base de coupleurs à interférences multimodes. La réalisation de ceux-ci a donné de bons résultats et la possibilité de les incorporer dans un multiplexeur en longueur d'onde pour la réalisation d'un système de multiplexage par code a été étudiée [80]. Les résultats ont montré la limite de tels dispositifs pour la réalisation de tels systèmes.

Nous présentons ici la fabrication de multiplexeurs fondés sur l'utilisation de coupleurs en étoile. La fabrication de ces coupleurs nécessite une haute résolution d'écriture et la réalisation du réseau de guide une bonne précision de positionnement.

Un démultiplexeur de type WDM à coupleur en étoile est représenté sur le schéma 5.3. Ce WDM comprend cinq zones chacune ayant été testée séparément avant la réalisation du composant complet. Les guides d'entrée et de sortie dans la zone A et E sont assimilables à des guides courbes que nous avons testés dans le chapitre 4. Les coupleurs en étoile sont

représentés dans les zones *B* et *D*. Le réseau déphaseur dans la zone *C*.

Le premier étage du WDM (zone *B*) permet de diviser la puissance optique qui est injectée dans les guides de différentes longueurs (zone *C*). Chacun déphase plus ou moins le signal en fonction de sa longueur et de la longueur d'onde. Le front d'onde résultant à la sortie des guides correspond à la courbure d'entrée du recombineur de sortie (zone *D*). Il induit une focalisation selon un angle dépendant de la longueur d'onde. On focalise donc sur les différentes sorties en fonction de la longueur d'onde.

### 5.1.3 Le Coupleur en étoile

Le coupleur en étoile tient son nom de la forme d'étoile qu'il affiche lorsqu'il est doté de *N* entrées et *N* sorties. Le coupleur en étoile est un guide large dont les extrémités sont des arcs de cercles (voir figure 5.4). Sa fonction dans les AWG est de diviser le faisceau en entrée, et de permettre la focalisation en sortie.

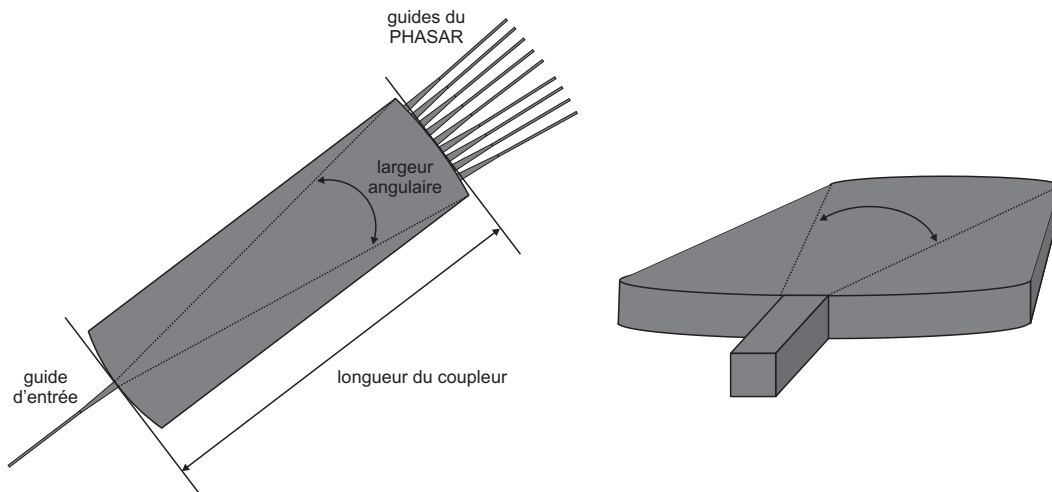


Figure 5.4 – Coupleur en étoile : représentation en 2D et 3D

Dans un coupleur en étoile la longueur de la partie multimode est relativement faible en regard de la largeur (contrairement au dispositif MMI) : le faisceau se propage dans le coupleur comme en espace libre (à la dimension verticale près). Le rôle de celui-ci est d'étaler le profil de champ incident. Avant que le faisceau puisse se réfléchir sur les bords du coupleur, il est récupéré par les guides de sortie. Ceux-ci sont disposés sur un arc de cercle qui épouse la forme du front d'onde diffracté : les signaux lumineux dans les bras de sorties sont en phase lorsque l'injection est centrale. La propagation du faisceau est représentée par les deux lignes en pointillés sur la figure 5.4.

La longueur de l'arc correspondant au front d'onde à une distance donnée dépend entre autre de la largeur du faisceau à l'injection du premier coupleur (cône de diffusion du faisceau présent entre le guide droit et le coupleur) (figure 5.5).

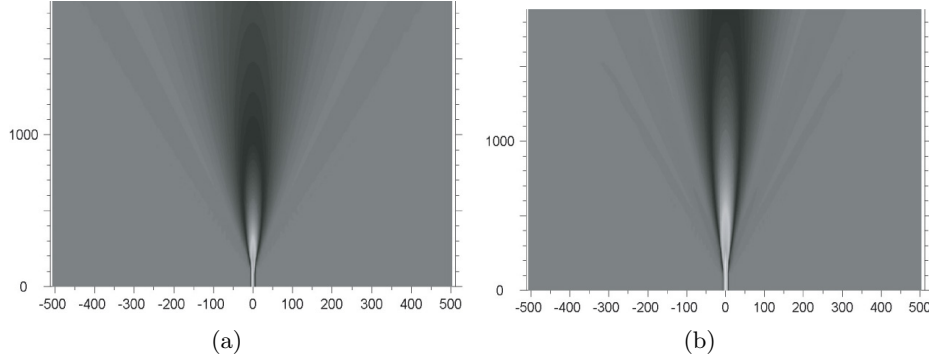


Figure 5.5 – Propagation simulée d'un faisceau dans un coupleur en étoile pour différentes largeurs de tapers :  $6 \mu m$  (a) et  $10 \mu m$  (b)

Le profil de champ étant gaussien à l'entrée, il reste gaussien tout au long de la propagation mais sa largeur augmente au fur et à mesure de la propagation (le profil du champ à une distance  $z$  de l'entrée est la transformée de Fourier du champ à l'entrée, et la transformée d'une gaussienne est une gaussienne). Cela donne une répartition en cloche à l'extrémité. Le profil obtenu est équiphase.

#### 5.1.4 Étude de la focalisation

Notre réseau de guides déphaseurs peut être analysé comme un réseau de diffraction utilisé en spectrométrie. Notre système obéit donc à l'équation de réseaux de diffraction suivante :

$$\frac{n_{sc}}{\lambda} (\sin \theta_i + \sin \theta_o) = m.G \quad (5.1)$$

avec  $n_{sc}$  l'indice du coupleur en étoile,  $\theta_i$  et  $\theta_o$  les angles d'entrée et de sortie des guides d'onde,  $m$  est un entier donnant l'ordre de diffraction et  $G$  est le vecteur d'onde du réseau défini, dans le cas d'un réseaux de guides, par l'équation suivante :

$$G = \left(1 - \frac{n_g \cdot \Delta L}{m \cdot \lambda}\right) \frac{1}{d} \quad (5.2)$$

où  $n_g$  est l'indice effectif du mode guidé dans les bras du réseau de guides déphaseurs,  $\Delta L$  est la différence constante de longueur entre deux bras adjacents et  $d$  le pas du réseau.

En incorporant l'expression (5.2) dans l'équation (5.1) on en déduit l'équation suivante :

$$n_{sc}(d \cdot \sin \theta_i + d \cdot \sin \theta_o) + n_g \cdot \Delta L = m \cdot \lambda \quad (5.3)$$

On considère pour l'étude de la focalisation du faisceau que l'injection dans le coupleur d'entrée (figure 5.3 - zone *B*), se fait par un guide placé au centre du coupleur en étoile : l'injection est dite centrale. Dans ces conditions, si le déphasage entre chaque signal en sortie du réseau de guides déphaseurs est un multiple de  $2\pi$ , la focalisation doit s'opérer au centre du cercle de sortie ( $\theta_i = \theta_o = 0$ ). Toutes les longueurs des guides exprimées en longueur d'onde centrale ont la même partie fractionnaire, en revanche, exprimée s en une autre longueur d'onde, les longueurs ont une partie fractionnaire multiples d'un incrément. Cet incrément introduit un déphasage progressif sur l'ensemble des bras et se traduit par un pivotement du front d'onde.

L'incrément de longueur  $\Delta L$  peut être déterminé pour un ordre  $m$  (donc plusieurs valeurs) par la formule :

$$\Delta L = m \frac{\lambda_c}{n_g} = \frac{m \cdot c}{n_g \cdot f_c} \quad (5.4)$$

$\lambda_c$  est la longueur d'onde centrale dans le vide,  $f_c$  sa fréquence et  $c$  la vitesse de la lumière dans le vide.

Le réseau de guides déphaseurs (phasar) se comporte comme une lentille biconvexe qui modifie la phase selon l'axe transverse. Cette lentille à pour rôle de reformer l'image du champ injecté à l'entrée du premier coupleur en étoile sur l'arc de sortie du deuxième coupleur. Le rapport de magnification est généralement unitaire. Les distances focales au niveau du coupleur d'entrée et du coupleur de sortie sont identiques. Elles correspondent aux longueurs du coupleur ( $R_a$ ).

Le rayon du courbure du bord du coupleur côté réseau de guides déphaseurs est égal à la longueur du coupleur d'entrée. L'autre bord a une courbure deux fois plus forte (voir figure 5.6). Cette courbure, permet de suivre au mieux la ligne de focalisation (cercle de Rowland) pour différentes longueurs d'ondes. On élimine ainsi les aberrations de second ordre pour la longueur d'onde centrale ainsi et les longueurs d'onde adjacentes. Les sorties autres que la sortie centrale (cas où  $N$  est impair), ne sont pas perpendiculaires à la tangente

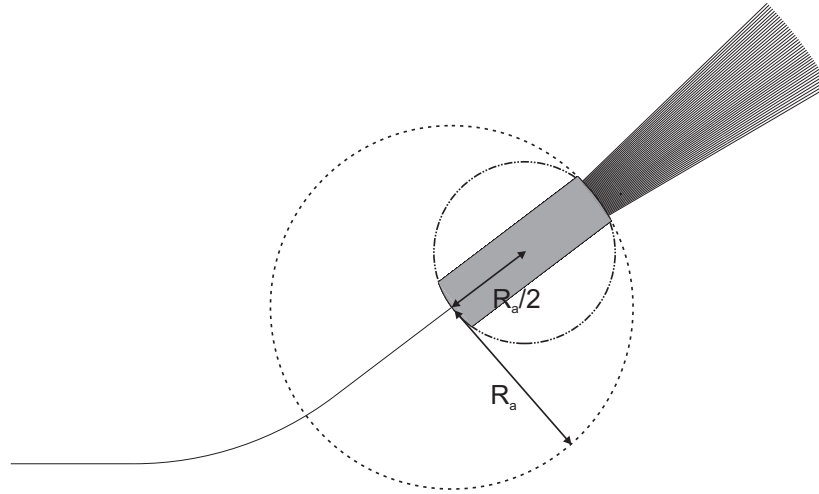


Figure 5.6 – Configuration en cercles de Rowland visant à éliminer les aberrations de second ordre.

au cercle de sortie au point de connexion (voir figure 5.7). On retrouve les mêmes courbures en entrée et en sortie : le dispositif étant entièrement symétrique.

Pour récupérer suffisamment d'énergie, le nombre de guides surtout dans le cas d'injections non centrale doit être le plus important possible. Ce nombre, pour une largeur de coupleur donnée, est toutefois limité par les problèmes de couplage qui surviennent entre deux guides trop proches. Le réseau de guides déphaseurs opère une discrétisation spatiale qui influe sur la qualité de reproduction des images du champ en sortie. Il convient donc de choisir un écart inter-guide suffisamment faible : il convient donc de trouver un compromis entre les différents paramètres. En pratique, les simulations permettent d'estimer les perturbations en cas de couplage et d'optimiser les paramètres.

### 5.1.5 Etude de la dispersion

L'angle de dispersion  $\theta$  dû à une différence de phase  $\Delta\Phi$  entre les bras adjacents peut être calculé simplement. Il permet de mesurer le décalage des images du champ d'entrée sur la ligne focale en sortie du coupleur de sortie. On peut le calculer à partir de règles de géométrie. La figure 5.8 représente une vue rapprochée sur deux entrées du coupleur de sortie. L'angle de dispersion est volontairement exagéré, afin de mieux rendre compte des considérations géométriques suivantes.

Sur la figure 5.8,  $\theta$  est l'angle du sommet d'un triangle si l'on considère que l'arc peut être assimilé à une droite entre deux sorties ( $\theta$  est petit et le rayon du cercle de sortie grand



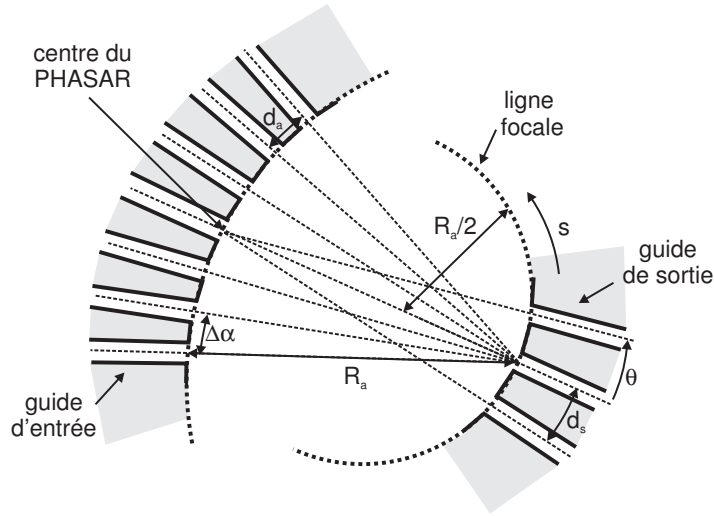


Figure 5.7 – Topologie du coupleur en étoile de sortie, utilisé en recombineur.

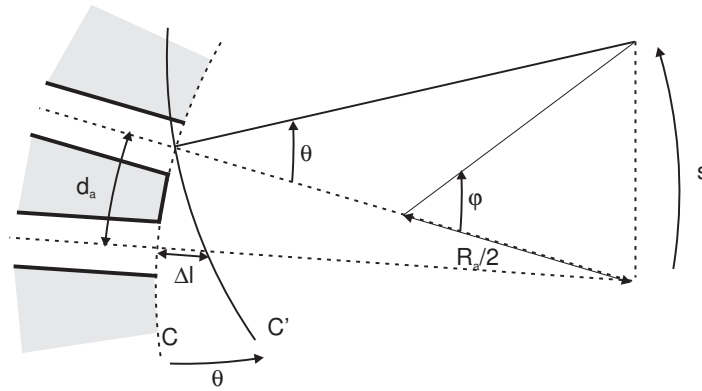


Figure 5.8 – Schéma des entrées du coupleur de sortie. Le contour du front d'onde  $C$  est décalé en  $C'$  lors d'un changement de longueur d'onde.

devant la distance entre deux sorties. Il en découle :

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\Delta l}{d_a}\right) = \arcsin\left(\frac{(\Delta\Phi - m \cdot 2\pi)}{\beta_{sc} \cdot d_a}\right) \approx \left(\frac{(\Delta\Phi - m \cdot 2\pi)}{\beta_{sc} \cdot d_a}\right) \quad (5.5)$$

$\Delta\Phi = \beta_g \cdot \Delta L$  est le déphasage total amené par un bras du réseau de guides déphaseurs par rapport au bras adjacent,  $\beta_g$  et  $\beta_{sc}$  les constantes de propagation respectivement dans les bras et dans le coupleur,  $\Delta l$  l'écart équivalent dans le coupleur entre les longueurs de deux bras adjacents et  $d_a$  la distance centre à centre entre les bras du réseau de guides déphaseurs. Dans le cas général  $\beta_{sc} \approx \beta_g$ .

La dispersion  $D$  du réseau est donnée comme la quantité de déplacement du spot focalisé le long de la ligne focale par unité de variation de la fréquence spatiale  $f$  du signal :

$$\begin{aligned}
 D &= \frac{ds}{df} = \frac{R_a}{2} \cdot \frac{d\varphi}{df} = R_a \frac{d\theta}{df} \\
 \rightarrow D &= \frac{R_a}{d_a} \frac{d\left(\frac{\beta \cdot \Delta L}{\beta_{SC}} - \frac{m \cdot 2\pi}{\beta_{SC}}\right)}{df}
 \end{aligned} \tag{5.6}$$

Nous considérons que  $\beta_{SC}$  est constant autour de  $f_c = \frac{c}{\lambda_c}$  la fréquence centrale et donc que  $\beta_{SC} = \frac{2\pi \cdot f_c \cdot n_{SC}}{c}$ , avec  $n_{sc}$  l'indice effectif du mode 0 dans le coupleur en étoile.

On en déduit , avec  $\frac{d_a}{R_a} = \Delta\alpha$ , en approximation faibles angles (voir figure 5.7) :

$$\begin{aligned}
 D &= \frac{\Delta L}{\Delta\alpha} \frac{2\pi c}{2\pi \cdot c \cdot f_c \cdot n_{SC}} \frac{d(f \cdot n_g)}{df} \\
 \Rightarrow D &= \frac{1}{f_c} \frac{\tilde{n}_g \cdot \Delta L}{n_{sc} \cdot \Delta\alpha}
 \end{aligned} \tag{5.7}$$

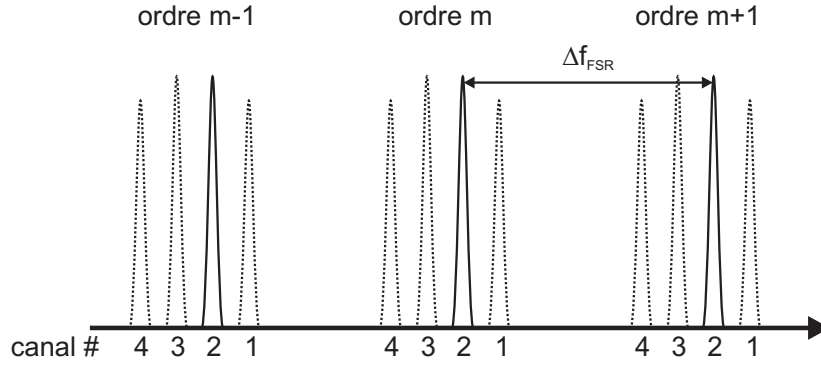
$\tilde{n}_g$  représente l'indice de groupe du mode 0 dans les bras du réseau de guides déphaseurs :

$$\tilde{n}_g = n_g + f \frac{dn_g}{df} \tag{5.8}$$

### 5.1.5.1 Bande spectrale libre

L'équation 5.5 nous permet de voir qu'à chaque incrément de  $2\pi$ , pour  $\Delta\Phi$ , le faisceau sera focalisé à la même position. Cette périodicité est une conséquence de la discrimination par le réseau de guides déphaseurs (voir figure 5.3 - zone C).

La bande spectrale libre (ou gamme spectrale libre) ou FSR (*Free Spectral Range*) est l'écart entre les deux voisines se focalisant aux mêmes positions en sortie. Les longueurs d'onde de travail sont répartit sur la gamme spectral libre. Le choix d'un FSR large permet l'utilisation d'un grand nombre de fréquences et donc de voies de multiplexage ou l'utilisation de voies de multiplexage plus espacés en fréquence. La figure 5.10 représente les spectres de sortie pour différents ordres du réseau en fonction du canal de sortie.


 Figure 5.9 – Illustration de la gamme spectrale libre  $\Delta f_{FSR}$ .

Le FSR est calculé en imposant une rotation de  $2\pi$  pour  $\Delta\Phi$  :

$$\Delta\Phi = \beta \cdot \Delta L \quad (5.9)$$

On en déduit la relation entre le FSR et l'ordre du réseau qui est donné par l'expression suivante :

$$\Delta f_{FSR} = \frac{c}{\tilde{n}_g \cdot \Delta L} = \frac{f_c}{m'} \quad (5.10)$$

avec

$$m' = m \left( \frac{\tilde{n}_g}{n_g} \right) \quad (5.11)$$

La relation exacte entre  $\Phi$  et  $\Delta\Phi$  n'est pas linéaire (voir équation 5.5), ce qui implique que l'équation 5.10 est approximative [81].

### 5.1.6 Pertes d'insertion et non-uniformité

Nous allons étudier dans ce paragraphe les différentes sources de pertes dans le composant WDM. On s'intéressera plus particulièrement aux différences entre les sorties (non-uniformité) et aux pertes totales qui se reportent sur l'ensemble des sorties.

Le profil de champ au niveau de la sortie du coupleur en étoile d'entrée est approximativement Gaussien. Ainsi, l'intensité lumineuse décroît lorsque l'on s'éloigne du centre de la focalisation pour aller vers les guides du réseau les plus à l'extérieur du coupleur (voir profil gaussien sur figure 5.11-étape 4).

Le profil Gaussien est donné par :

$$I(\theta) = I_0 \cdot e^{\left(\frac{-2\theta^2}{\theta_0^2}\right)} \quad (5.12)$$

avec

$$\theta_0 = \frac{\lambda}{n_{SC}} \cdot \frac{1}{w_e \cdot \sqrt{2\pi}} \quad (5.13)$$

$\theta_0$  est l'angle associé à la largeur effective du faisceau  $w_e = w_0 \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}}$  avec  $w_0$  la largeur réelle du faisceau et  $\theta$  l'angle principal autour duquel le faisceau se propage.

La non-uniformité  $P_{NU}$  entre les pics est donnée par le rapport d'intensité entre le centre et la sortie la plus excentrée, caractérisée par son angle de dispersion  $\theta_{max}$  :

$$P_{NU} = -10 \cdot \log \left[ e^{\left(\frac{-2\theta_{max}^2}{\theta_0^2}\right)} \right] \approx 8.7 \frac{\theta_{max}^2}{\theta_0^2} \quad (5.14)$$

Si le FSR choisi est égal à  $N$  fois l'écartement  $\Delta\lambda$  entre deux canaux adjacents, les pertes sur les canaux aux sorties extrêmes seront proches de 3 dB. L'uniformité peut-être améliorée en augmentant  $\theta_0$  qui, à longueur d'onde et largeur de guide dans le phasar constantes, est constant. La solution est de rapprocher les sorties ce qui revient à diminuer  $\theta_{max}$

### 5.1.6.1 Bande angulaire libre

La périodicité de la focalisation est fréquentielle (notion de FSR) mais aussi spatiale. Cette périodicité dite bande angulaire libre est issue de la discrétisation du champ incident par le réseau de guides. Ce phénomène est présenté sur la figure 5.11.

Un champ de profil Gaussien est injecté dans le coupleur d'entrée (*Etape 1*). Il s'étale lors de sa propagation en espace libre, et au niveau du réseau de guides déphaseurs (*Etape 2*) s'opère une discrétisation du champ dont l'enveloppe est en cloche, approximativement Gaussienne. Sur la figure, l'énergie prélevée est représentée en traits pleins assimilés dans la suite à des pics de Dirac. Le profil du mode guidé dans les bras monomodes du réseau de guides déphaseurs est Gaussien, ce qui explique la forme de chaque partie du champ en sortie du réseau de guides déphaseurs *Etape 3*. Lors de la focalisation en sortie *Etape 4*, assimilée à une transformée de Fourier, le profil périodique composé de Gaussiennes *Etape 2* est transformé en Gaussienne élargie et discrétisée. La multiplication par l'enveloppe Gaussienne se

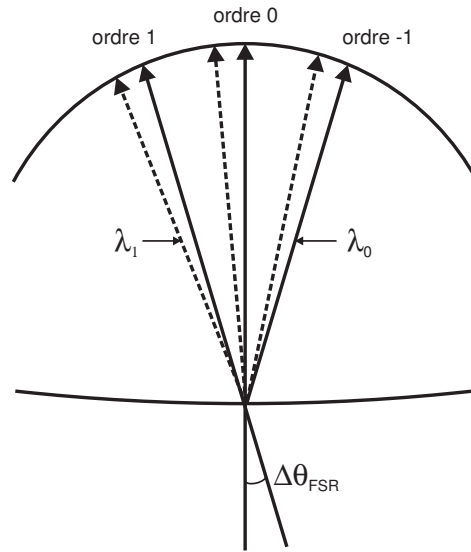


Figure 5.10 – Représentation graphique de la notion de bande angulaire libre.

transforme en convolution de la Gaussienne focalisée (plus étroite) par les pics de Dirac de la Gaussienne discrétisée. Le FSR et la périodisation sont des phénomènes liés :

$$\Delta\theta_{FSR} = \frac{\Delta s_{FSR}}{R_a} = \frac{D}{R_a} \Delta f_{FSR} \quad (5.15)$$

La figure 5.10 représente la bande angulaire libre pour deux longueurs d'onde adjacentes en fonction de l'ordre du réseau.

D'après les équations (5.7) et (5.10), une diminution de l'écart de longueur  $\Delta L$  entre les bras du réseau de guides déphaseurs provoque une augmentation du  $\Delta f_{FSR}$  et une diminution de la dispersion  $D$ . Il en résulte que pour une même variation de longueur d'onde l'image se déplace d'une distance plus petite sur la ligne focale si l'on diminue le  $\Delta L$ .

### 5.1.6.2 Pertes d'insertion

L'énergie n'est pas collectée sur toute la surface de sortie du coupleur diviseur. Une partie de l'énergie injectée est donc perdue. On peut remédier partiellement en utilisant des tapers (entonnoirs) à l'entrée des guides.

De même, l'espace entre les sorties nécessaire pour éviter la diaphonie intervient aussi pour augmenter les pertes d'insertion du dispositif.

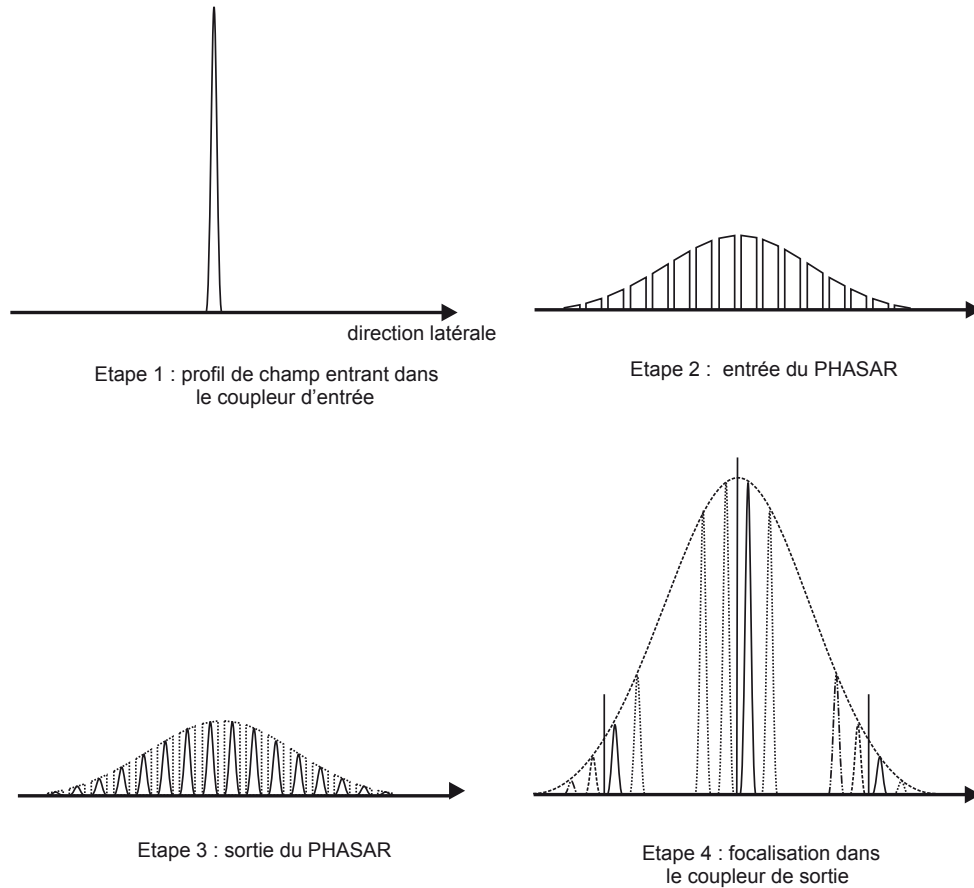


Figure 5.11 – Étapes de transformation du faisceau dans le démultiplexeur.

### 5.1.7 Diaphotie (Crosstalk)

Il y a diaphotie (ou crosstalk) lorsqu'une partie de l'énergie liée à une longueur d'onde est couplée sur une sortie autre que celle sur laquelle cette longueur d'onde est censée être récupérée.

La diaphotie est de deux types :

- la diaphotie adjacente définie pour deux sorties adjacentes.
- la diaphotie totale définie sur l'ensemble des sorties.

Il existe différentes sources de diaphotie :

- la principale source de diaphotie est liée à l'espace entre les guides de sortie, qu'il faut ajuster pour obtenir des performances du FSR suffisantes tout en évitant le couplage.

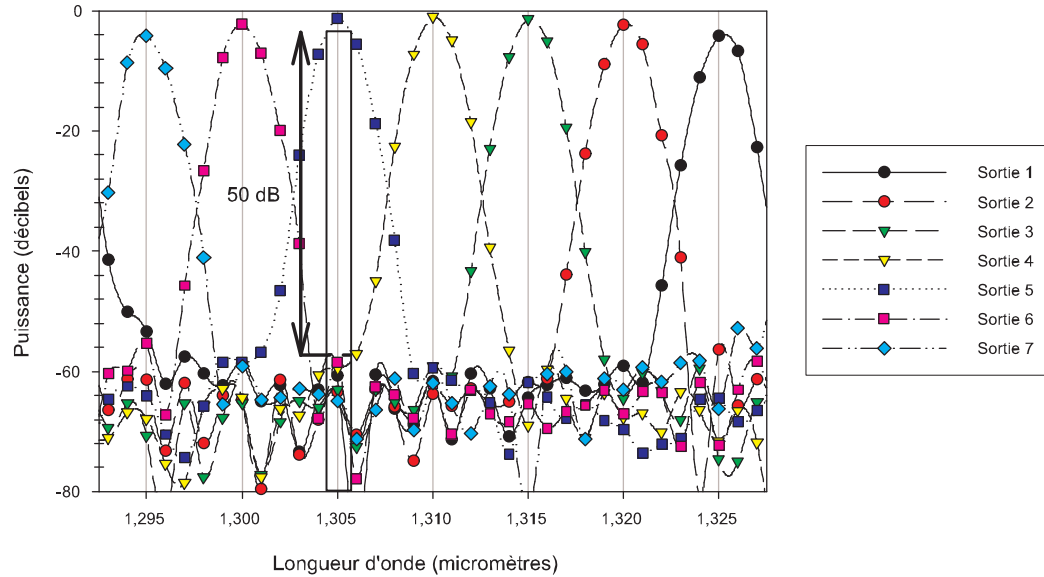


Figure 5.12 – Spectre de sortie simulé d'un démultiplexeur à coupleurs en étoile  $7 \times 7$ . Illustration de la diaphotie.

- Une autre source de diaphotie est liée à l'échantillonnage du faisceau incident par le réseau de guides. Des lobes secondaires peuvent apparaître de part et d'autre de l'image et se coupler sur des sorties adjacentes.
- Dans le cas où les guides déphaseurs ne sont pas monomodes, une dispersion intermodale apparaît. On observe une image double.
- Les distorsions du front d'onde en entrée et en sortie du réseau de guides déphaseurs décale la focalisation et déforment l'image. Ceci peut-être causée par un couplage entre les bras du réseau de guides déphaseurs ou à un mauvais contrôle ou calcul de la longueur des bras [80].
- Enfin, l'apparition d'un guide plan, dûe à un mauvais confinement ou à des pertes lors des jonctions ou dans les courbures, peut être la cause d'une diaphotie.

Le graphique 5.12 représente une simulation d'un démultiplexeur à coupleurs en étoile  $7 \times 7$  [74]. On peut voir que la diaphotie maximale atteint un niveau d'environ 50 dB.

### 5.1.8 Dépendance à la polarisation

Une dépendance à la polarisation est causée par le phénomène de biréfringence entre les modes TE et TM. Celle-ci se manifeste sous la forme d'une translation en longueur d'onde de la courbe de dispersion. La translation en fréquence peut-être obtenue en calculant pour quelles fréquences les indices effectifs ou les longueurs d'ondes effectives sont égales :

$$\lambda_{TM}(f) = \lambda_{TE}(f - \Delta f) \quad (5.16)$$

$$\text{avec } \lambda(f) = \frac{c}{f \cdot n_{eff}(f)}$$

On obtient la valeur du décalage en fréquence :

$$\Delta f_{pol} = f \cdot \frac{n_{TE} - n_{TM}}{\tilde{n}_{TE}} \quad (5.17)$$

$\tilde{n}_{TE}$  est l'indice effectif de groupe du mode TE.  $n_{TE}$  et  $n_{TM}$  sont les indices effectifs respectifs des polarisation TE et TM à la fréquence  $f$ .

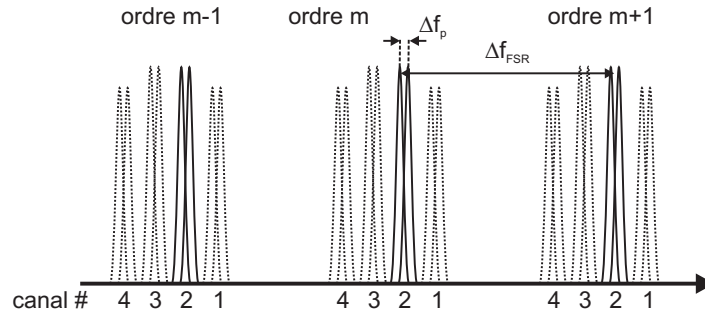


Figure 5.13 – Spectre de sortie, observation de la dispersion de polarisation.

La figure 5.13 illustre le phénomène de dispersion d'un composant WDM dont le fonctionnement dépend de la polarisation. Nous mettons en évidence la déformation du profil de sortie qui est alors composée de deux pics d'intensité résultant d'une focalisation décalée des composantes spectrales selon TE et TM.



## 5.2 Conception d'un WDM à coupleurs en étoile

Après exploration de paramètres intervenant dans la conception d'un dispositif WDM, nous détaillons ici la méthode de conception et les paramètres choisis pour réaliser nos composants.

### 5.2.1 Paramètres de fonctionnement

Les grandeurs importantes sont :

- $N$  est le nombre de voies multiplexées
- $\Delta f_{ch}$ ,  $(\Delta \lambda_{ch})$  et  $f_c(c)$  définissent l'espacement fréquentiel (en longueur d'onde) entre les voies et la fréquence (longueur d'onde) centrale
- $\Delta f_L$  : bande passante à L-dB
- $\Delta f_{FSR}$  : bande spectrale libre
- $L_0$  : perte d'insertion maximale de la longueur d'onde centrale
- $L_u$  : non-uniformité maximale
- Le niveau de diaphotie maximal
- La dépendance en polarisation maximale

### 5.2.2 Etapes de la conception

On calcule tout d'abord l'écartement entre les sorties afin de déterminer où doit se focaliser le faisceau. On définit un espacement minimal  $d_{min}$  afin de minimiser la diaphotie due au couplage entre les sorties. Une fois celle-ci fixée, il n'est plus possible d'améliorer l'uniformité en déplaçant les sorties. Il faut donc trouver un compromis lors du design ou favoriser soit la diaphotie soit l'uniformité.

A partir d'une étude préliminaire des guides de sorties (indice effectif, largeur avec et sans taper), on détermine l'écartement centre à centre entre les sorties (voir courbes 5.11).

On détermine ensuite la longueur des coupleurs en étoile : le taux d'uniformité nous permet d'en déduire celle-ci. Plus le coupleur est court, plus le profil en champ lointain intercepté par le réseau déphaseur sera resserré. On choisit une longueur minimale  $R_a$  afin de ne pas avoir une uniformité trop faible.

On peut déterminer l'angle de dispersion maximal  $\theta_0$  à partir des équations 5.13 et 5.14, tel que la sortie externe correspondante ne soit pas trop écartée du centre de l'enveloppe

gaussienne en fonction de l'uniformité désirée. On peut donc en déduire la longueur minimale des coupleurs en étoile qui est  $R_a = \frac{S_{\max}}{\theta_{\max}}$  avec  $S_{\max}$  l'abscisse curviligne de la sortie externe.

Les caractéristiques de dispersion qui permettent de réaliser le démultiplexage en longueur d'onde est régit par la valeur  $\Delta L$  qui correspond à l'écart de longueur entre deux bras adjacents du réseau déphaseur. Lorsqu'on incrémente la fréquence du signal de  $\Delta f_{ch}$ , on doit déplacer le spot d'une valeur  $d_s$  correspondant à l'écart entre les sorties. On a donc  $D = \frac{d_s}{\Delta f_{ch}}$ . Connaissant  $\Delta\alpha = \frac{d_a}{R_a}$  (angle formé par deux guides adjacents en approximation faibles angles - voir figure 5.8), ainsi que les indices et la fréquence centrale on peut calculer  $\Delta L$  en utilisant la relation 5.7.

La dernière étape est le choix du nombre de guides présents dans le réseau déphaseur. Le choix d'un espacement minimal entre les guides du réseau déphaseur le plus faible possible permet de reconstruire le plus fidèlement le profil de champ incident lointain.

On choisit une largeur du réseau déphaseur suffisamment grande pour ne pas perdre trop de puissance lors de la récupération du signal incident. Cela permet en outre, de ne pas trop tronquer le profil du signal incident et de diminuer la diaphotie (*crosstalk*) du aux lobes secondaires diffractés. On définit cette largeur en concordance avec la largeur du coupleur. Une fois ce paramètre défini et l'espacement entre guides fixé, on obtient le nombre de guides dont sera constitué notre réseau déphaseur.

### 5.2.3 Conception pratique d'un composant WDM à coupleur en étoile

On peut distinguer plusieurs phases dans la conception d'un circuit WDM à coupleur en étoile (*AWG array of waveguides*) : une phase physique (modes) et une phase géométrique (implémentation concrète du circuit).

#### 5.2.3.1 Paramètres physiques

L'élément essentiel d'un AWG est le réseau de guides déphaseurs. Il faut donc étudier/concevoir ces guides. Ils doivent être unimodaux aux longueurs d'onde de travail, afin que chaque guide apporte un déphasage unique pour une longueur d'onde donnée au faisceau qu'il propage. Les méthodes exposées au chapitre deux : méthode de l'indice effectif ou calcul numérique des modes.

Par exploration des indices effectifs pour les longueurs d'ondes voisines, on évalue la variation d'indice effectif par unité de variation de longueur d'onde. Cette variation de la

longueur d'onde physique (distance sur laquelle on observe un déphasage de  $2\pi$ ) est à la base du filtrage en longueur d'onde.

Nos guides sont unimodaux pour des longueurs d'onde centrées en  $1.31 \mu m$  si leur section est de  $5 \mu m \times 5 \mu m$  pour des indices de 1.506 et 1.520. Le logiciel jWDM donne un indice pour le mode fondamental de 1.5145898 et un mode 1 à la limite de la coupure. La variation  $dn/d\lambda$  est évaluée à  $-0.0054/\mu m$ .

A partir de ces données, on peut évaluer le différentiel de longueur (et le différentiel de déphasage) entre les guides en fonction du FSR voulu ou de l'ordre de diffraction.

Reste à définir la largeur des coupleurs en étoile (diviseurs et recombineurs) qui doit être suffisante pour qu'on y connecte d'une part les guides déphaseurs, d'autre part les guides de sorties. Les guides ne doivent être trop espacés, sinon on perd de l'énergie aux interstices, ni trop serrés auquel cas un couplage apparaît. La largeur conditionne la longueur, puisque le but du coupleur d'entrée est d'étaler le faisceau d'entrée de façon à arroser tous les guides déphaseurs.

Nous avons principalement considéré pour nos dernières réalisations quarante guides espacés de  $12.9 \mu m$ , les guides étant dotés de "tapers" qui leur donnent une largeur à l'extrémité de  $10 \mu m$ . Ceci implique une largeur des coupleurs de l'ordre de  $500 \mu m$ , et la longueur nécessaire pour étaler le faisceau (obtenue par calcul ou par simulation) est de  $2800 \mu m$ , le cercle de Rowland est donc de  $1400 \mu m$ .

Selon le logiciel jWDM, le panneau de dialogue est présenté en figure 5.14, un ordre  $m=10$  combiné aux données de nos guides donne un  $\Delta L$  de  $8.649206 \mu m$ . Les choix sont en fait limités par la faisabilité géométrique, en testant différents ordres, largeur, longueur des coupleurs diviseurs et recombineurs etc... Les données précisées permettent le calcul quasi-analytique donc rapide de la propagation à travers tout le dispositif pour différentes longueurs d'onde. Notre logiciel jWDM construit un script enchaînant les calculs de propagation [82]. Le script contient les actions élémentaires qu'il faudrait faire à l'aide de la souris, clavier et boutons, par exemple saisie d'une largeur de guide et calcul d'un mode ou propagation sur une distance ou récupérer un profil de champ et l'injecter. Un résultat possible de cette simulation [83] rapide est montrée sur la figure 5.15. La connaissance du profil du champ électrique en fonction de l'abscisse curviligne sur l'arc de sortie du coupleur-recombineur 5.15 permet le positionnement des guides de sortie. Cette figure montre aussi les lobes latéraux qui correspondent à de l'énergie perdue, et la limite d'extension du FSR lorsqu'un lobe latéral se superpose avec un lobe principal.

Parameter	Value
lambda*	1.31
FSR*	-1
delta_lambda*	0.0032
ng*	1.5171984114900
ne*	1.5145898450545
dn2dlambda*	-0.0054
order	10
delta_L	8.649206
nb_guides*	21
guide_spacing*	15.0
in_taper_width	10.0
guide_taper_width	10.0
out_taper_width	10.0
output_spacing*	0.0
star_width	375.0
half_angle	0.034446016
long_R	2740.4
short_R	1370.2
star_length	2740.4
nb_outputs	21
steps_per_out	1

Figure 5.14 – Panneau de saisie et calculs des paramètres d'un AWG

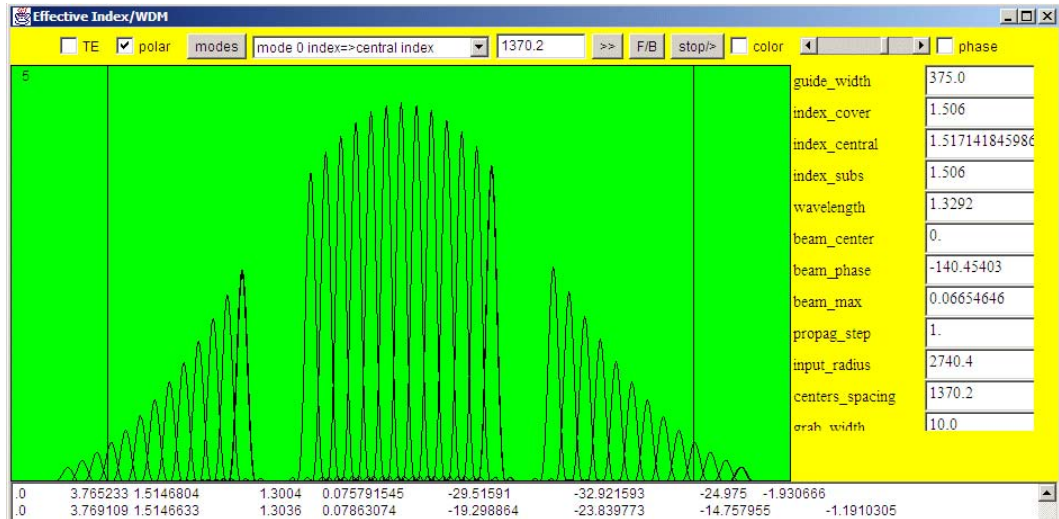


Figure 5.15 – Evaluation des profils d'énergie en sortie d'un AWG à différentes longueurs d'onde, pour le positionnement des sorties (simulation sur jWDM)

Cette simulation peut-être complétée par des calculs BPM (résolution tranche par tranche de l'équation de Helmholtz), voir [84] ou le logiciel job [85] du laboratoire présenté au chapitre 2.

Cette étape de calcul optique (modes, propagation, diffraction,...) permet le choix des paramètres essentiels à prendre en compte dans le dessin géométrique du dispositif.

### 5.2.3.2 Paramètres géométriques

Une fois les valeurs physiques obtenues, il faut réaliser le dessin du circuit correspondant. Nous avons développé un logiciel jDesign [86] à base d'éléments simples (arcs, lignes) et d'éléments composés sur plusieurs niveaux : guides déphaseurs (ensemble d'arcs et de lignes droites), réseaux de guides (ensemble de guides déphaseurs). Le circuit possède donc une structure d'arbre. Le logiciel se charge des calculs géométriques pour répondre aux contraintes qu'impose la phase antérieure du design. Il construit les "chemins" : ensemble d'éléments connectés dont l'écriture sera enchaînée.

jDesign utilise en entrée un fichier description des composants simples ou non, et des entrées directes par souris et clavier. Il peut générer trois types de fichiers en sortie : fichier d'entrée pour une réutilisation, fichier pour logiciel KLOE-SoftWave ou fichier XML compatible avec laser writing (suite de description d'arcs et de segments), le logiciel développé au laboratoire de commandes des moteurs de déplacement.

On donne ici quelques indications sur le dessin des trois types d'éléments complexes dans un AWG.

- "roundbox" pour les coupleurs : la largeur, la longueur et les arcs d'entrée et de sortie des coupleurs, conditionnent directement le dessin. Nous avons développé une stratégie de dessin en spirale (voir figure 5.16) à base d'arcs grossièrement parallèles et tels que les derniers soient conformes. Il est nécessaire toutefois de couper le dessin d'un coupleur, la platine de commande ne pouvant enchaîner plus de quelques 120 éléments simples (arcs) soit 18 boucles, alors qu'un coupleur de 2800  $\mu m$  de long demande 280 boucles si l'épaisseur du trait est de 5  $\mu m$ . La figure montre un élément (roundbox) partiel de 13 boucles sous la forme de deux dessins. Les segments droits supérieurs (un d'entrée, un de sortie pour chaque dessin) sont nécessaires pour la stabilisation de la vitesse d'écriture et le déclenchement de l'obturateur : il est en effet commandé par le franchissement d'une valeur sur une coordonnée : allumage ou extinction lorsque  $x =$  telle valeur.
- "guideArray" pour le réseau de guides déphaseurs. Les longueurs des guides sont un élément essentiel du dessin, ce sont elles qui assurent le déphasage. L'élément "guideaux" est composé de sous-éléments "guides" eux-mêmes constitués à priori d'un

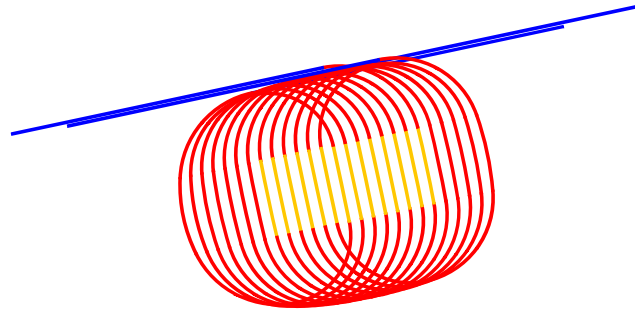


Figure 5.16 – Ecriture en spirale d'un coupleur diviseur

taper, d'un segment droit, d'un s-bend (virage en S constitué de deux arcs) pour ajuster la longueur, un arc de cercle, et le symétrique de chacun de ces éléments. La figure 5.17 montre un réseau de 17 guides avec courbures exagérées. Nos calculs et expériences montrent que les rayons de courbures doivent être supérieurs à 5 mm (marge de sécurité comprise), le logiciel indique les rayons trop faibles par une coloration des arcs. Les rayons des arcs sont calculés de façon à satisfaire les contraintes de longueurs et de positionnement sur les arcs d'entrées et de sorties des coupleurs. L'équation est non linéaire et est résolue numériquement par une méthode de sécante par approximations successives.

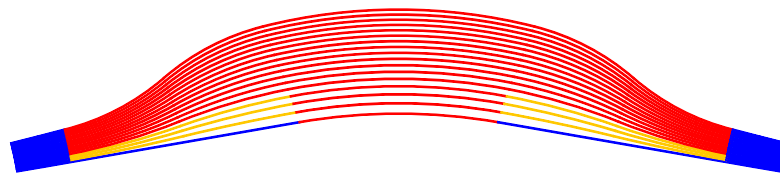


Figure 5.17 – Réseau de guides déphaseurs générés par jDesign

Lorsque le nombre de bras est important et l'incrément de longueur faible, il est difficile de trouver une solution avec un rayon de courbure compatible, des guides qui ne se recouvrent pas etc. Les calculs sont repris jusqu'à l'obtention d'une solution satisfaisante.

- "input guides" et "output guides" pour les guides d'entrées et de sortie. Le problème

est ici non sur la longueur, mais sur les rayons de courbures et les espacements entre extrémités de façon à rendre possible les connexions avec des fibres optiques. Là aussi une équation non-linéaire est résolue numériquement pour calculer les courbures et le positionnement des guides.

- "particularités", jDesign permet aussi le dessin contrôlé de guides présentant des aspects spécifiques. Notre codeur CDMA (voir 5.35), que nous verrons dans les prochains paragraphes, est constitué d'un AWG suivi d'un croisement de certaines sorties et d'un regroupement de sorties. Le fonctionnement du système exige que les guides se croisent avec un angle supérieur à une vingtaine de degrés : le logiciel fournit la tangente en chaque point des éléments (arcs ou lignes) permettant le calcul de l'angle de croisement. De même le regroupement de sorties nécessite une approche tangentielle (angle des guides tendant vers 0).

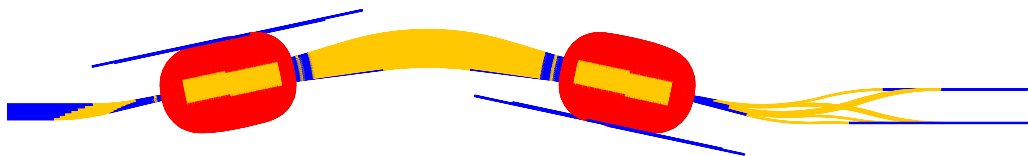


Figure 5.18 – Circuit AWG avec sorties reliées pour codeur CDMA spectral

La figure 5.18 illustre le dessin global d'un encodeur CDMA spectral à partir d'un d'AWG calculé par jDesign.

Les démultiplexeurs WDM sont conçus à partir des composants détaillés précédemment. Ils sont tous optimisés pour être utilisés à la longueur d'onde  $1,31 \mu m$ .

## 5.3 Réalisation d'un WDM à coupleurs en étoile

### 5.3.1 Réalisation de Tapers

On utilise pour l'injection dans les coupleurs en étoile et pour la récupération, des guides de largeur progressivement variable *entonnoirs* dits *tapers* (voir figure 5.19). La longueur du taper nécessaire à son changement de largeur, doit être étudiée, elle doit être suffisante pour effectuer un transfert de puissance entre modes fondamentaux de manière adiabatique. La largeur maximale des tapers influe sur l'étalement du faisceau dans le premier coupleur, le

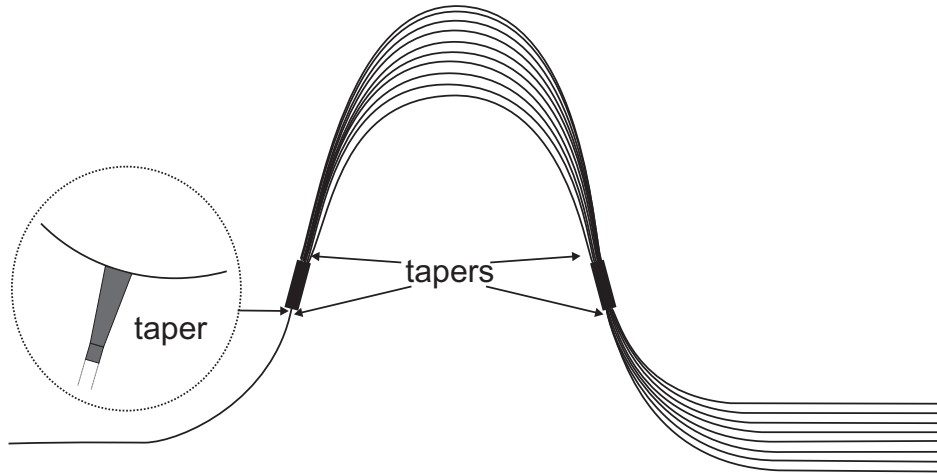


Figure 5.19 – Démultiplexeur optique à coupleur en étoile : emplacement des tapers

transfert d'énergie vers le réseau de guide, la reconstruction du front d'onde à l'entrée du second coupleur et le transfert d'énergie en fonction de la longueur d'onde en sortie.

Nous avons testé différentes façons de réaliser des tapers. Les différentes simulations et essais nous ont montré qu'une largeur de  $10\ \mu\text{m}$  à la base (coté coupleur en étoile) était correcte pour récupérer l'énergie incidente.

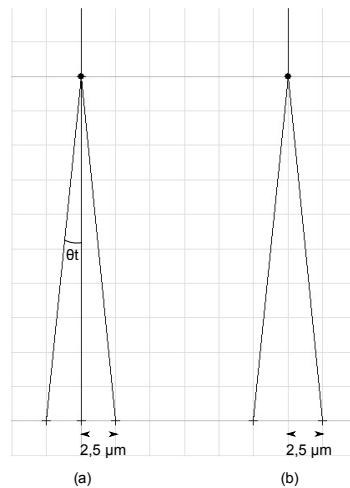


Figure 5.20 – Représentation des différentes techniques de tracé de tapers testés

Au niveau de la fabrication le taper est réalisé par le tracé d'un guide droit sur lequel viennent se greffer avec un angle  $\theta_t$  deux autres guides droits. On peut voir sur la figure 5.20- (a) que les guides permettant de dessiner l'entonnoir sont espacés de  $2,5\ \mu\text{m}$  du guide central. La largeur des guides d'ondes lors de l'inscription étant de  $5\ \mu\text{m}$ , on obtiendra un cône de



10  $\mu m$  de large. Cette méthode simple à réaliser entraîne des surexpositions au point de jonction des trois guides : le passage trois fois au même endroit entraîne un élargissement de la zone d'intersection.

La deuxième méthode (voir figure 5.20-b) est fondée sur la précision d'écriture et la maîtrise à reproduire des guides de même largeur. On trace un guide droit (guide d'entrée ou de sortie). A son extrémité on y rajoute les deux guides permettant de dessiner l'entonnoir. On évite ainsi de passer 3 fois au point de jonction ce qui diminue les effets de surexposition. Pour cette technique on utilise la fonction *on/off* du modulateur acousto optique ce qui n'entraîne pas de problèmes d'accélération ou décélération du fait de la non continuité du tracé. La figure 5.21, nous permet d'observer un test réalisé traçant l'évolution de la largeur du cône pour des angles  $\theta_t$  différents.

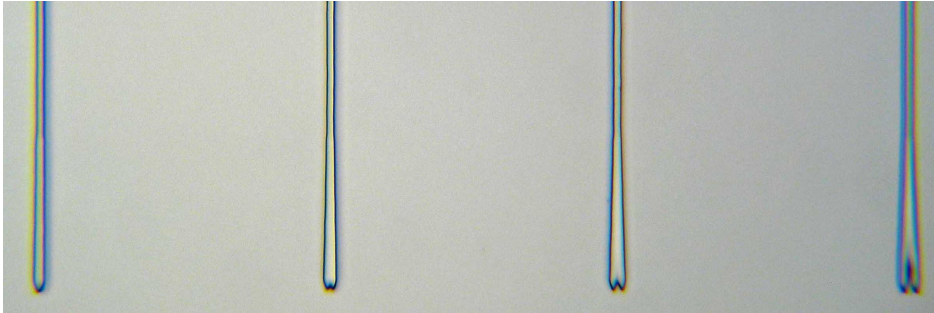


Figure 5.21 – Réalisation de tapers pour des largeurs de cônes différentes

L'avantage de la première méthode est que l'on peut réaliser des tapers dont la largeur peut atteindre 15  $\mu m$  contrairement à la deuxième méthode où l'on est limité à une largeur de 10  $\mu m$ . L'évolution du banc d'écriture vers une focalisation motorisée permettra de pallier à ce problème : on pourra ainsi se positionner à une focalisation définie pour avoir un spot de taille voulue ce qui nous permettra de réaliser des guides de largeurs 5  $\mu m$  pour le reste du composant et des tapers plus larges en jouant seulement sur la focalisation. On peut aussi jouer sur la puissance du laser qui peut aussi être automatisée.

La figure 5.22, nous permet d'apprécier la précision de gravure des tapers. Les tapers réalisés sont espacés de 2  $\mu m$  et la gravure pénètre verticalement sur une profondeur de 5  $\mu m$ .

### 5.3.2 Réalisation de Coupleurs en étoile

Nous avons exploré différentes manières de polymériser une zone de surface importante telle que celle des coupleurs en étoile. Une méthode utilisée auparavant consistait à effectuer

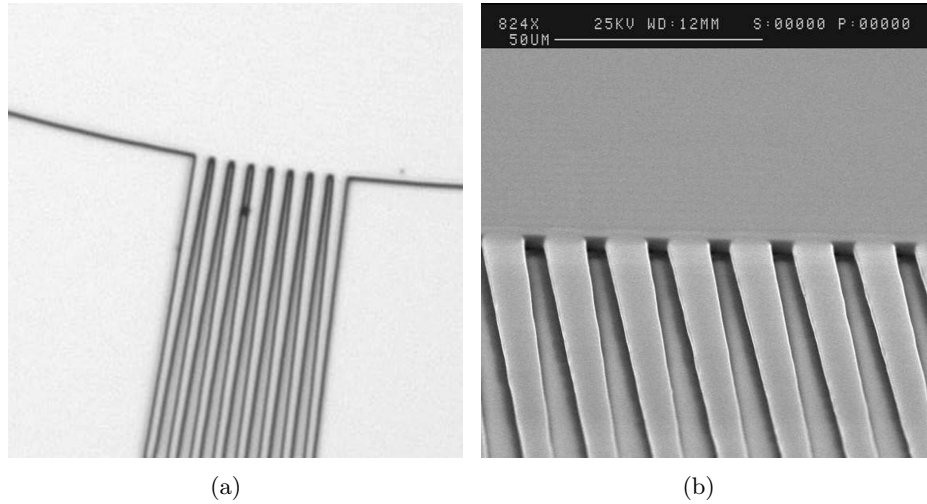


Figure 5.22 – Homogénéité d'écriture de tapers : réalisation de tapers avec un écartement de  $2 \mu m$  entre chaque. Observation par microscopie optique (a) et par MEB (b)

des aller-retours pour dessiner et remplir la zone de propagation libre de notre coupleur (rectangle arrondi). Un lissage est nécessaire en bout de trajectoire. Il repose sur l'inscription de guides courbes de rayons  $R_a$  ou  $R_a/2$  afin d'obtenir les cercles de Rowland sur lesquels viennent se positionner les tapers. Pour éviter les problèmes d'oscillations lors de l'écriture, allumer et éteindre le faisceau en bout de chaque ligne, ce qui induit un risque de dérive et d'imprécision et implique un temps d'écriture très important atteignant l'heure. On trace le rectangle en effectuant un décalage de l'ordre de  $4 \mu m$  afin d'avoir un recouvrement entre chaque passage (voir figure 5.23).

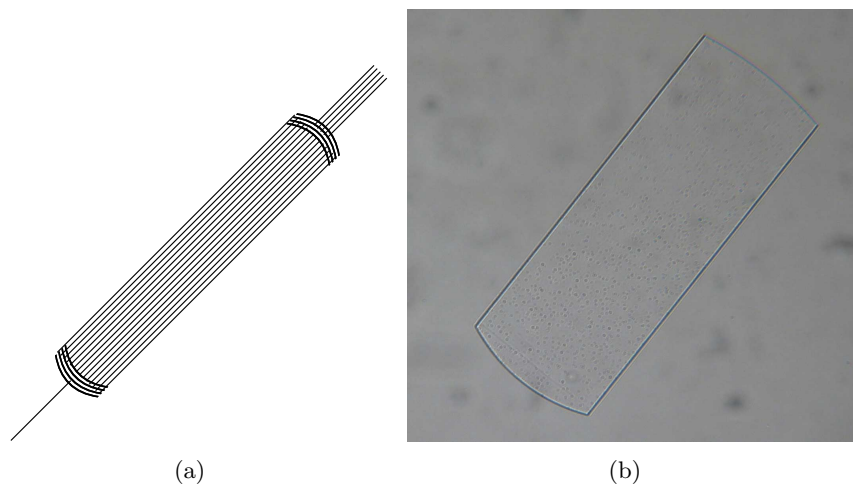


Figure 5.23 – Design du tracé d'une zone de propagation libre par la méthode des aller/retours (a) puis représentation des premiers essais de coupleurs en étoile par cette méthode

Nous avons développé une autre technique consistant à balayer en continu et en spirale (voir 5.2.3.2 et figure 5.24-a). Le modulateur acousto-optique est déclenché en un point hors de la zone de propagation. Après une accélération puis une stabilisation de la vitesse, le circuit est dessiné sous la forme de boucles décalées. Le buffer de la carte de commande des moteurs limite à une centaine d'éléments l'ampleur du dessin exécutable en continu, ce qui correspond à quelques dix huit boucles, le coupleur complet correspond donc plusieurs ensembles de boucles décalées. Le modulateur acousto-optique est contrôlé par un module positionné sur un seul des deux axes des tables de micro-déplacements. Dès qu'on franchit une des ordonnées prédéfinies l'obturateur bascule. Afin d'éviter une extinction au milieu du tracé on déclenche donc le modulateur sur des zones dont l'ordonnée n'est pas balayée durant le tracé.

La photo 5.24-(b) permet d'apprécier la précision d'écriture et de gravure. Elle représente un zoom sur la réalisation partielle d'un coupleur en étoile réalisé pour un test d'écriture.

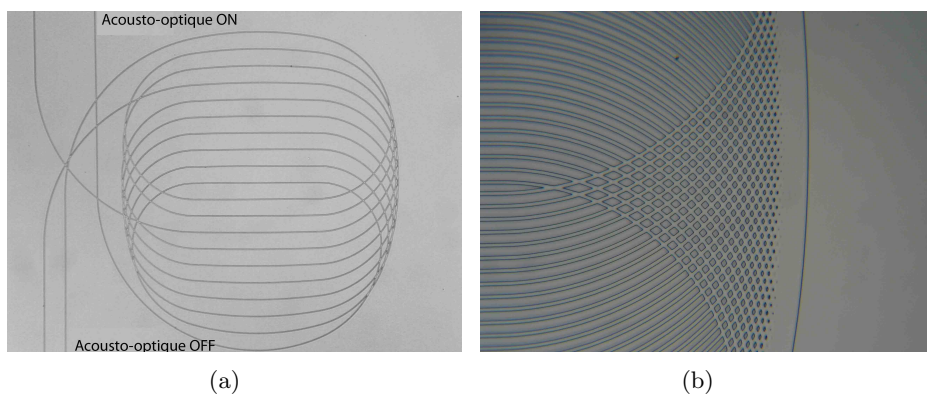


Figure 5.24 – Premiers essais de tracés de coupleurs en étoile par la méthode de remplissage en serpent

Les dispositifs, écrits à des vitesses de  $1,5 \text{ mm/s}$ , nécessitent un temps d'écriture de l'ordre de  $10 \text{ minutes}$ . La précision d'écriture nous a donné entière satisfaction. La photo 5.25-(a) représente un coupleur en étoile dans sa version finale. La photo 5.25-(b) représente la propagation de la lumière pour une injection en entrée extrême du coupleur.

### 5.3.2.1 Contrôle du coupleur-diviseur

Afin de contrôler l'alimentation des guides déphaseurs, des coupleurs en étoile munis d'entrées et de sorties ont été caractérisés. La caractérisation des coupleurs en étoile à la

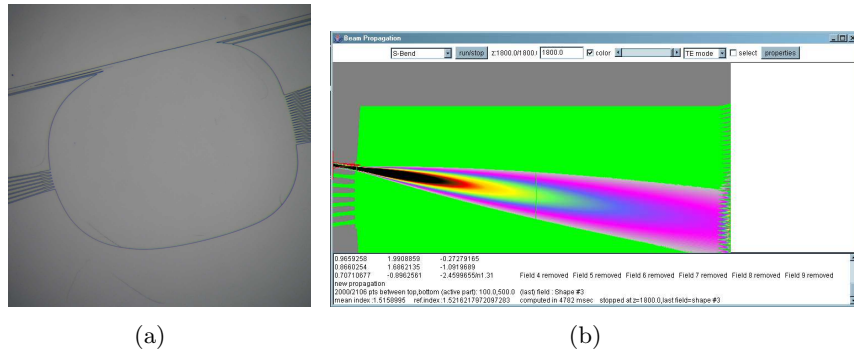


Figure 5.25 – Figure (a) : Zone d'étalement du faisceaux injecté dans le coupleur d'entrée d'un dispositif WDM. Figure (b) : Simulation BPM d'un coupleur en étoile avec une injection sur une entrée extrême

longueur d'onde  $1,31 \mu m$  passe par l'observation des sorties à l'aide d'une caméra Vidicon.

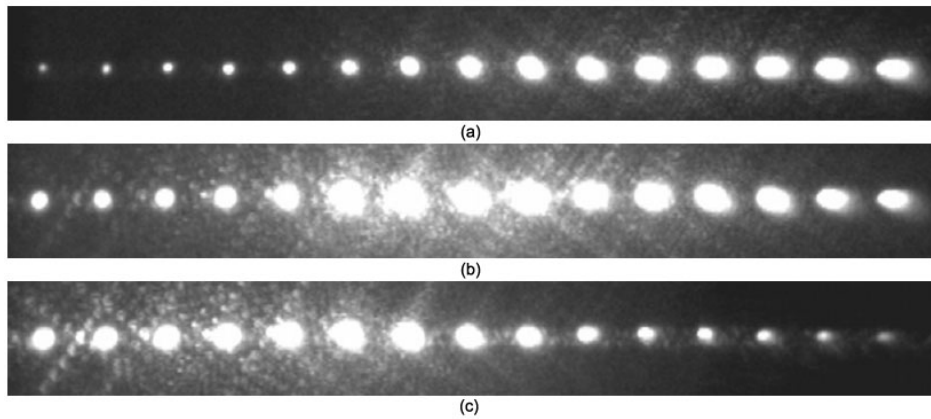


Figure 5.26 – Observation du profil de sortie d'un coupleur en étoile. Les figures (a) et (c) correspondent aux entrées respectives 1/7 et 7/7 du coupleur en étoile. La figure (b) correspond à l'entrée centrale 4/7.

On peut voir sur les photos (a) (b) et (c) de la figure 5.26 la répartition du profil gaussien en fonction de l'injection choisie sur une entrée parmi sept pour ce coupleur en étoile.

Afin d'observer le bon fonctionnement de notre coupleur en étoile, nous avons caractérisé celui-ci en injectant dans chaque entrées une longueur d'onde de  $1,31 \mu m$  puis en observant les différentes sorties (voir figure 5.28). Afin de visualiser le bon décalage du profil Gaussien, nous avons relié deux sorties (les sorties 9 et 10) grâce à un coupleur en Y dessiné sur la même puce que le coupleur en étoile. Les autres sorties sont indépendantes. Le design du coupleur en étoile est représenté sur la figure 5.27 avec un zoom sur les tapers. On peut

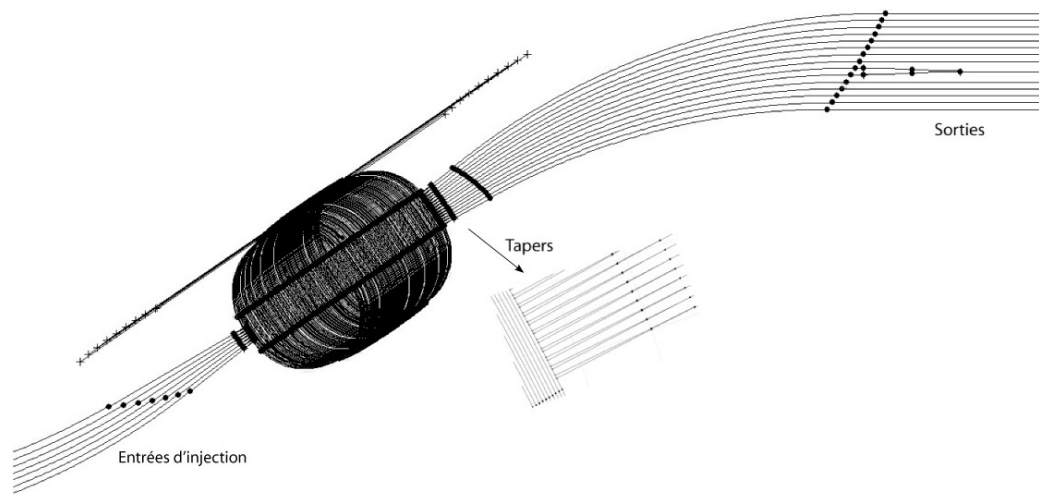


Figure 5.27 – Design du coupleur en étoile caractérisé

voir les sorties 9 et 10 reliés par un coupleur en Y.

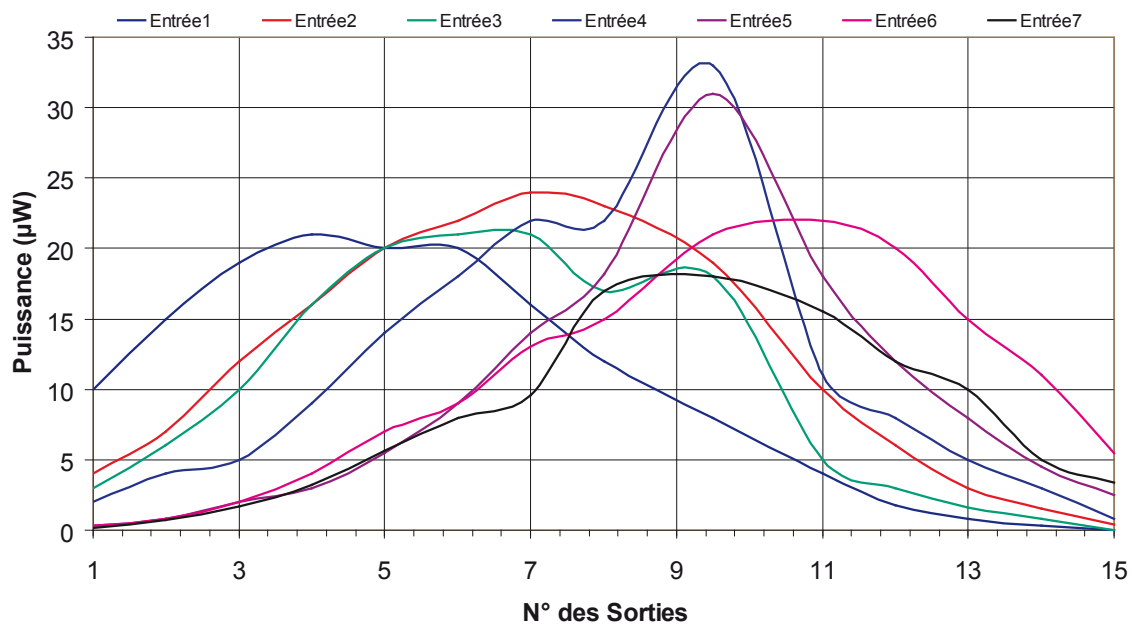


Figure 5.28 – Tracé des puissances de sortie du coupleur en étoile en fonction de l'entrée d'injection

Nous observons pour des injections dans les différentes entrées le décalage du profil gaussien en sortie. Les pics observables sur les entrées 4 et 5 sont probablement dûs à des interférences constructives.

### 5.3.3 Réalisation du réseau déphaseur

Le réseau déphaseur (voir figure 5.3-c) est constitué de plusieurs guides courbes dont le rayon de courbure n'est pas fixe. Afin de réaliser la focalisation sur les différentes sorties du coupleur de sortie, les guides n'ont pas la même longueur. Leur réalisation doit être faite avec la plus grande précision possible afin de ne pas modifier l'écart de longueur entre deux bras adjacents du réseau ( $\Delta L$ ). Le  $\Delta L$  étant de  $10 \mu m$ , une erreur d'une fraction de quelques microns peut entraîner une erreur de déphasage atteignant quelques degrés.

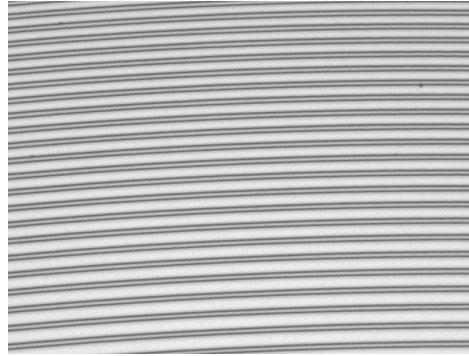


Figure 5.29 – Tracé d'un réseau déphaseur pour la réalisation d'un WDM

La figure 5.29 nous permet d'observer le résultat de l'écriture d'un réseau déphaseur après optimisation de l'asservissement PID (Proportionnel Intégral Dérivé) des moteurs de déplacement.

### 5.3.4 Réalisation du composant complet

Nous avons réalisé des démultiplexeurs optiques à 7 entrées et 8 sorties. On retrouve sur les 8 canaux de sortie de nos composants les longueurs d'onde réparties de la façon suivante :

Sortie n°	Longueur d'onde (nm)
1	1281,031
2	1289,965
3	1298,9
4	1307,834 ( $\lambda_c$ )
5	1316,769
6	1325,704
7	1334,638
8	1343,573

La focalisation dans le coupleur de sortie, orchestrée par le réseau déphaseur, doit se décaler de  $12,9 \mu m$  pour chaque passage d'une longueur d'onde à la longueur d'onde adjacente. Pour avoir une récupération de l'énergie maximum sans pour autant observer du couplage entre guides, la largeur de la base des tapers doit être de  $10 \mu m$ , soit un écart de  $2,9 \mu m$  entre chaque tapers, à la jonction "tapers - coupleur de sortie".

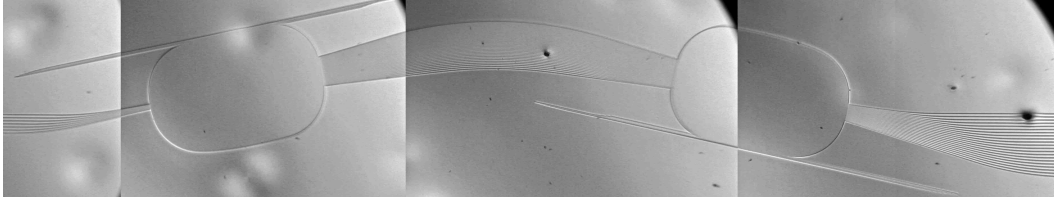


Figure 5.30 – Observation de notre WDM (assemblage de différentes vues)

La version centrale du WDM que nous avons conçue, simulée puis réalisée est représentée sur la figure 5.30. On peut compter 7 entrées dont la 4<sup>e</sup> est l'injection centrale dans le coupleur d'entrée et 21 sorties permettant d'observer le bon fonctionnement du WDM. De nombreuses variantes ont permis le test ou la confirmation de choix tels que largeurs de tapers, écartement de sorties etc.

## 5.4 Caractérisation d'un WDM à coupleurs en étoile

### 5.4.1 Critères de caractérisation

Tout les composants WDM sont développés autour d'une longueur d'onde nominale centrale. Lors des simulations de nos composants on a choisi les longueurs d'ondes que l'on souhaitait retrouver en fonction des choix de paramètres de fabrication. La vérification du spectre lors des caractérisations nous permet de valider notre design. La caractérisation spectrale de nos composants est fondée sur l'étude de différents paramètres :

- La longueur d'onde du maximum de puissance :  
Elle est définie comme la longueur d'onde pour laquelle on observe la plus petite perte d'insertion entre l'entrée et la sortie du dispositif. Elle correspond au centre de l'enveloppe gaussienne reconstruite en sortie.
- La longueur d'onde centrale :  
Celle-ci est définie (voir figure 5.31) comme étant la moyenne des deux longueurs d'onde obtenue à partir de la puissance à  $-1 \text{ db}$  du maximum. Dans un cas idéal

(uniformité du pic de la longueur d'onde) elle correspond à la longueur d'onde du maximum de puissance.

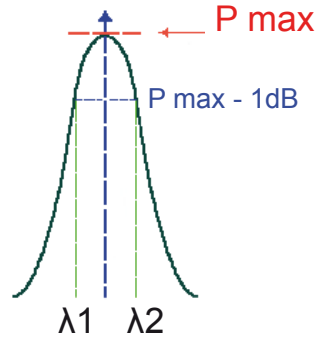


Figure 5.31 – Longueur d'onde centrale

- Uniformité : Ce paramètre nous permet de nous rendre compte de la disparité de puissance entre les différentes sorties : on le défini comme la différence de puissance maximale entre le canal le plus puissant et le canal le moins puissant (voir figure 5.32).
- Pertes d'insertion :  
Elles correspondent à la différence en  $dB$  entre la puissance optique d'entrée et la puissance optique de sortie (voir figure 5.32).

$$I_L(dB) = P_{in}(dBm) - P_{out}(dBm) \quad (5.18)$$

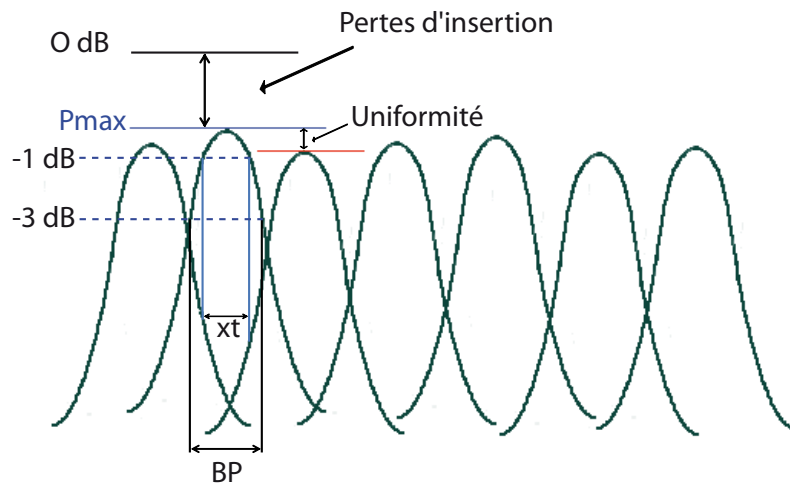


Figure 5.32 – Uniformité du spectre

Cette grandeur nous permet de quantifier les pertes de puissances pour une longueur



d'onde spécifique. On peut ainsi repérer un défaut sur une sortie ou un problème sur la focalisation des coupleurs en étoile.

- Espacement entre les canaux (Channel spacing) : On le définit comme la distance séparant deux canaux adjacents sur le spectre de sortie de composants. On peut calculer cette valeur théoriquement en dérivant la relation  $\lambda = \frac{c}{\nu}$  :

$$d\lambda = \frac{\lambda^2}{c} d\nu \quad (5.19)$$

- Bande passante : On définit la bande passante comme la largeur spectrale calculé généralement à  $-1 \text{ dB}$ ,  $-3 \text{ dB}$  ou  $-10 \text{ dB}$  du maximum de puissance d'un spectre (voir figure 5.32). Ce paramètre est fonction du design du composant
- Diaphotie : Ce paramètre permet de quantifier la quantité de puissance reçue, à la longueur d'onde d'un canal, par des canaux qui lui sont adjacents ou non. On défini ce paramètre sur une bande à  $-1 \text{ dB}$  de la puissance maximale du canal en question.
- Isolation : Ce paramètre est quantifiable de la même manière que pour la diaphotie. Dans le cas de l'isolation, on ne prend en compte que les canaux adjacents (voir figure 5.32-Xt) alors que dans le cas de la diaphotie on considère tous les canaux afin de déterminer cette valeur.

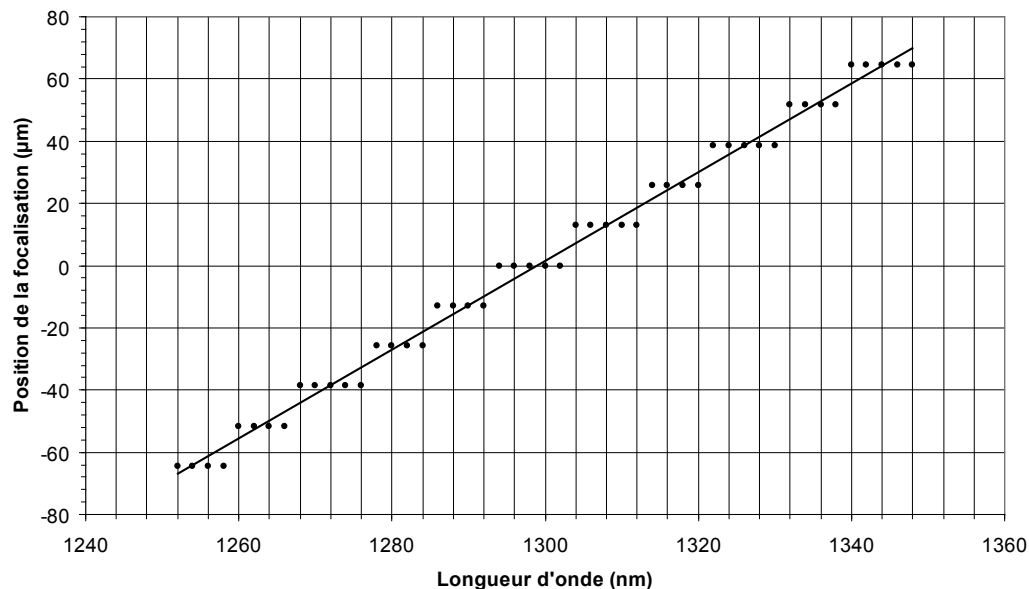


Figure 5.33 – Focalisation sur les sorties du WDM en fonction de la longueur d'onde d'injection

Le graphique 5.33 représente la distribution des longueurs d'onde en fonction de la position de la focalisation dans le coupleur de sorties du WDM.

### 5.4.2 Résultats de caractérisation

Le spectre de sortie de notre WDM est représenté sur la figure 5.34. Le fonctionnement reste correct malgré les pertes de propagation élevées. A ces pertes s'ajoutent les pertes de configuration provenant de la qualité du système d'imagerie limitée par l'échantillonnage du réseau de guides déphaseurs et estimées à 2 *dB* lors des simulations.

Les pertes de couplage sont de 2 *dB*. Les pertes d'insertion correspondent à la somme des pertes précédemment citées et sont de 12 *dB*. Pour un circuit de 4 *cm* de long, les pertes d'insertion devraient être de 10 *dB*. Il reste donc 2 *dB* de pertes imputables à la qualité de fabrication, ce qui est relativement faible et montre la qualité de la technologie développée pour la fabrication de circuits optiques intégrés complexes.

Nous reproduisons dans le tableau 5.4.2, les résultats de caractérisation spectrale d'un WDM.

- Les pertes d'insertions *IL* relevés en *dB*
- La longueur d'onde centrale *CW* des différents canaux
- La bande passante *BW* relevé à 1 *dB* et 3 *dB*
- L'uniformité *UNIF* en *dB* entre les sommets et l'écart *CHSP* entre canaux en *nm*
- Le crosstalk *XT* relevé à 1 *dB*

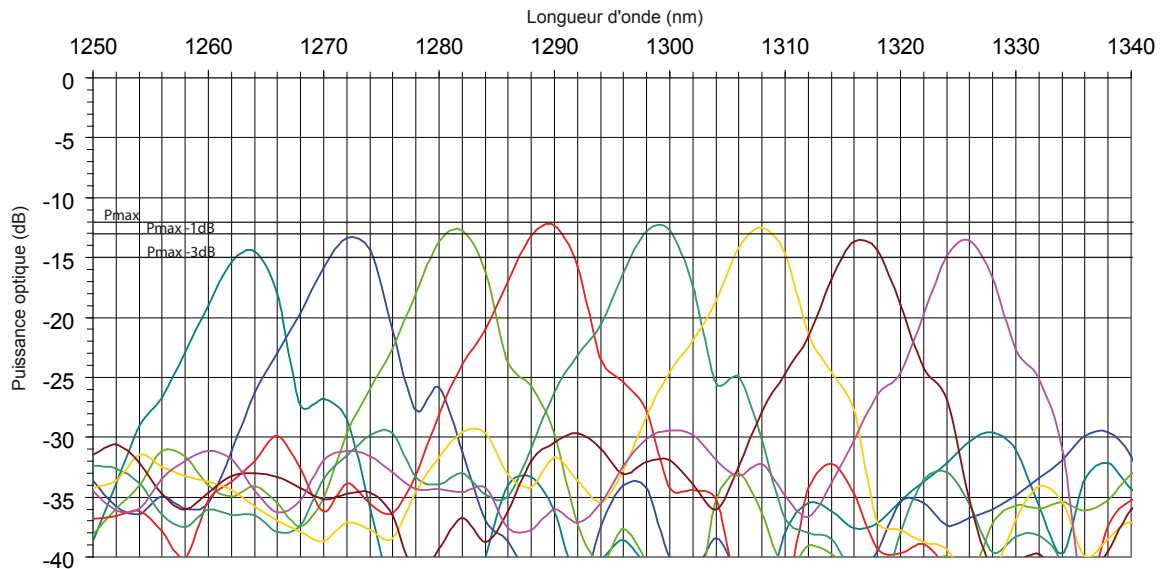


Figure 5.34 – Spectre de sortie d'un WDM à 8 canaux

Le *crosstalk* relevé à  $-1$  *dB* de la puissance maximale est de l'ordre de 12,28 *dB* pour la valeur la plus haute. Il est donc trop élevé. La suppression des lobes secondaires

	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>7</sub>	C <sub>8</sub>
IL (dB)	14,5	13,45	12,72	12,27	12,54	12,54	13,63	13,63
CW (nm)	1263,8	1272,4	1281,8	1289,6	1299,2	1308	1316,8	1325,8
BW (1 dB)	2,69	2,88	2,69	3,65	3,07	2,69	2,69	2,69
BW (3 dB)	5	5,19	4,81	5	5	5	5	4,81
UNIF(dB)/CHSP(nm)	2,23	8,6	9,4	7,8	9,6	8,8	8,8	9
XT (1 dB)	9,65	11,67	9,65	11,93	10,53	12,28	11,23	11,28

et l'amélioration des pertes du matériau devraient permettre d'obtenir un crosstalk d'une vingtaine de dB ce qui est plus accessible pour des applications moins exigeantes que les réseaux de télécommunication longue distance.

La bande passante relevée à  $-3$  dB est de l'ordre de 5 nm. Une étude en polarisation n'ayant pu être faite au laboratoire, ces mesures seront effectuées par la suite avec des sources polarisables afin d'évaluer la PDL.

## 5.5 Étude, réalisation et caractérisation de composants pour l'accès multiple par codes : CDMA

La fabrication d'un composant de type WDM à coupleurs en étoile nous a permis de valider notre procédé de fabrication. Même si les pertes restent élevées et le fonctionnement n'est pas optimal, nous avons pu démontrer la possibilité de réaliser ce type de composant par écriture laser pulsée et sur un matériau nouveau de type epoxy. Les composants pour le moment ne sont développés et optimisés que pour une utilisation autour de la longueur d'onde 1,31  $\mu$ m.

La qualité de fabrication de nos WDM nous a poussé à aller plus loin dans le développement de composants innovants et à réaliser des codeurs CDMA (*Code Division Multiple Acces - Accès Multiple à répartition par code*). Ce type de démultiplexeur est développé sur la base d'un circuit original [80] constitué d'un WDM avec des sorties regroupées.

### 5.5.1 Qu'est-ce que le CDMA ?

Le CDMA est une technique relativement récente où l'on ne transmet plus un simple "1" ou "0" à un instant donné pour chaque utilisateur (Multiplexage temporel), ni un simple "1" ou "0" porté par une longueur d'onde donnée (Multiplexage en longueur d'onde) mais un

signal complexe qui sera mélangé aux signaux complexes des autres utilisateurs. Le choix de ces signaux complexes (codes orthogonaux) est tel qu'il permet leur séparation à la réception.

Historiquement, on retrouve les techniques de CDMA en radio fréquence dans les télécommunications mobiles de troisième génération, le WiFi ... associé à l'étalement de spectre pour le partage de ressources (l'accès multiple).

### 5.5.2 Codage et décodage grâce à un composant optique

La transposition en optique reprend les techniques de radio-fréquences et en particulier les deux modes - temporel et spectral - ou leur combinaison [87][88][89][90]. Il existe aussi des technologies hybrides de CDMA mêlant l'optique et l'électronique[91]. Nous avons travaillé sur deux dispositifs [92][80] adaptant le CDMA spectral à la technologie de l'optique intégrée.

#### 5.5.2.1 Codage spectral

Le schéma de principe du système d'encodage dans lequel notre codeur doit prendre place est représenté sur la figure 5.35. On utilise une source large bande pour l'injection dans le démultiplexeur en longueur d'onde. Le principe est de séparer en sortie les longueurs d'ondes afin de former deux spectres complémentaires qui correspondront pour l'un au bit "1" et pour l'autre au bit "0". Dans un démultiplexeur de type phasar, contrairement au dispositif de type MMI [28], les longueurs d'onde sont distribuées en sorties selon les valeurs croissantes ou décroissantes. Il faut donc réagencer les longueurs d'onde :  $\frac{N}{2}$  longueurs d'ondes participeront à la constitution du bit "0" et les autres participeront à la constitution du bit "1". Ce réagencement est assuré par des croisements de guides, et des coupleurs en Y.

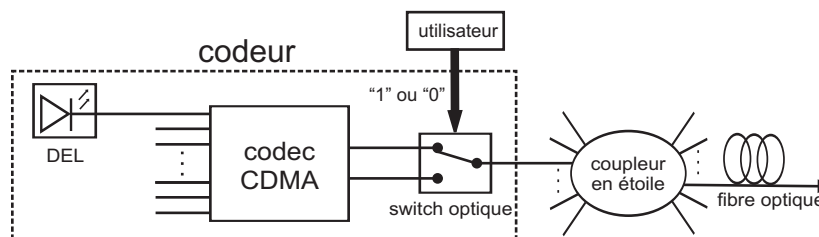


Figure 5.35 – Schéma de principe du système d'encodage spectral

On peut construire un ensemble de codes orthogonaux en concevant un type de circuit par code : les croisements et regroupements étant ce qui différencie les codes. Pour un bon décodage, les codes doivent être orthogonaux deux à deux (produit scalaire nul), ce qui se

traduit sur des codes à  $N$  longueurs d'onde par  $N/2$  longueurs d'onde communes et  $N/2$  longueurs d'onde non communes . Le produit scalaire nul est alors la somme de  $N/2$  produits égaux à  $-1$  (longueurs d'onde différentes), et  $N/2$  produits égaux à  $+1$  (longueurs d'onde communes).

On peut aussi utiliser le même circuit pour plusieurs codes ( $M-1$ ), en jouant sur la propriété des  $m$ -séquences : en permutant circulairement les  $M$  bits d'une  $m$ -séquence, on obtient une famille de codes quasi-orthogonaux. La longueur  $M$  des  $m$ -séquences étant impaire ( $2^q - 1$ ), le produit scalaire ne sera pas égal à  $0$  mais à  $-1$  ou  $+1$ , à distinguer à la réception de  $+M$  ou  $-M$  correspondant à la parfaite corrélation.

Cette permutation circulaire peut être judicieusement obtenue en changeant d'entrée [80]. Chaque utilisateur utilisant une entrée qui lui est attribuée, code son message avec une clé qui lui est propre. Les messages codés sont alors couplés sur une fibre optique.

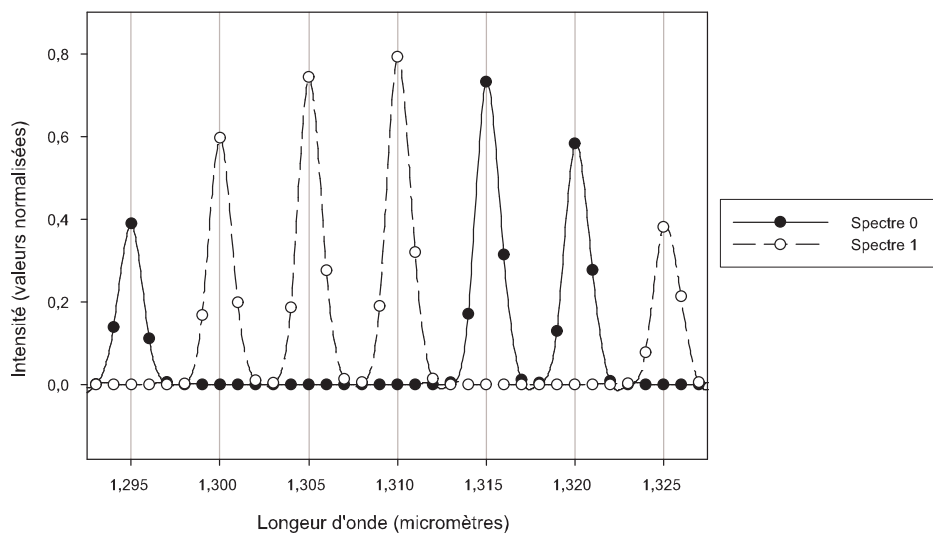


Figure 5.36 – Exemple du spectre de sortie représentant le bit "1" et le bit "0"

Quelque soit le mode de construction des messages codés (circuit unique avec décalage ou circuit spécifique, un commutateur commandé par le message à émettre transmet le spectre du "1" ou le spectre du "0". Les spectres complémentaires sur les deux sorties sont du type représenté sur la figure 5.36. Ici les spectres de l'état "1" et de l'état "0" sont codés sur 8 longueurs d'onde présentes ou absentes dans le spectre.

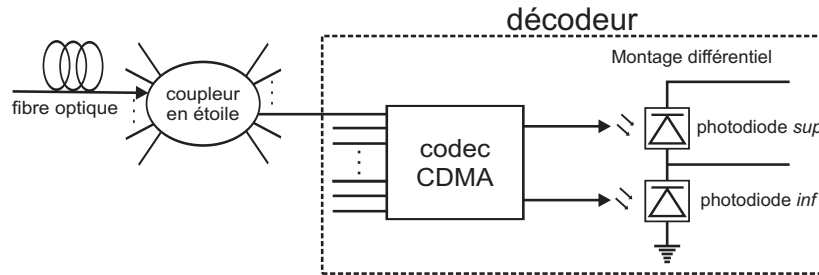


Figure 5.37 – Schéma de principe du décodeur CDMA spectral

### 5.5.2.2 Décodage

Le décodeur doit être conçu pour extraire les données correspondant aux codes de l'utilisateur. Le composant décodeur est identique au composant codeur. Il reçoit successivement (selon la succession de 1 et de 0) les  $N/2$  longueurs d'ondes codant les bits d'information sur une de ses entrées. Comme dans le codeur, la focalisation des différentes longueurs d'ondes est faite sur les  $N$  sorties du composant. Si le décodeur correspond au codage reçu, les paquets de longueurs d'onde sont entièrement regroupés sur une des deux sorties (détection d'un "1" ou d'un "0") : on obtient un différentiel d'intensité qu'on peut détecter grâce à deux photodiodes en série en montage différentiel. Les messages utilisant un code différent sont répartis sur les deux sorties et apparaissent comme du bruit.

## 5.5.3 Réalisation du regroupement des sorties du CDMA

### 5.5.3.1 Croisements des guides de sorties

Afin de regrouper les longueurs d'onde composant les spectres de codage, les sorties du composant WDM (voir figure 5.38) doivent s'entrecroiser. L'angle de croisement ne doit pas être inférieur à une angle limite afin d'éviter le couplage entre les sorties.

La réalisation des croisements est délicate (géométrie difficile, écriture précise). Si l'écriture des guides d'onde et la gravure de ceux-ci ne sont pas optimum, l'énergie d'un bras peut passer dans un autre bras : on observe alors une même longueur d'onde sur le spectre du code "1" et "0". La figure 5.38 représente le dessin des sorties d'un composant CDMA. La photo de ce même composant réalisé est représentée sur la figure 5.39. Le code de la sortie haute correspond au code 10011100. Ainsi le code complémentaire, le code de la la sortie basse est : 01100011.

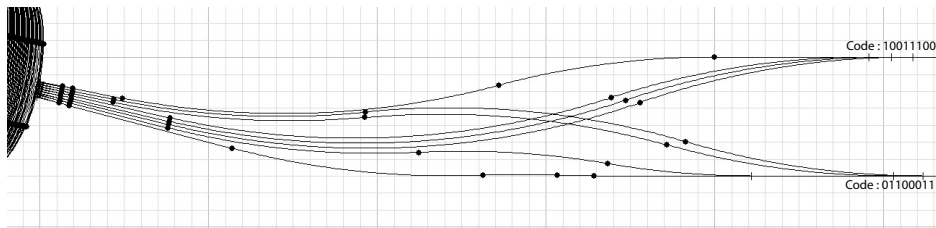


Figure 5.38 – Design d'un codeur CDMA réalisé et caractérisé

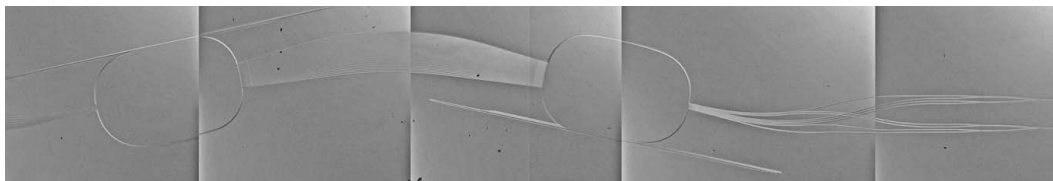


Figure 5.39 – Photo d'un codeur réalisé (design représenté sur la figure 5.38)

La figure 5.40 nous permet d'apprécier la qualité de gravure des croisements des sorties du composant représenté sur la figure 5.38.

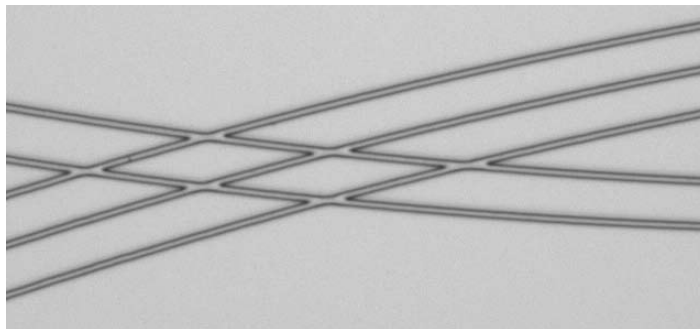


Figure 5.40 – Observation du croisement des sorties du composant CDMA représenté sur la figure 5.38

Nous avons réalisé des simulations par BPM de croisements afin d'observer la manière dont se répartit l'énergie dans les guides d'ondes. On observe, figure 5.41 de la diaphotie pour des angles inférieurs à  $6^\circ$ . Pour des angles supérieurs à  $2^\circ$ , le couplage entre les guides devient de plus en plus faible et la diaphonie décroît de façon importante.

Si l'angle est trop fort, on accroît la longueur de notre dispositif. La longueur des substrats utilisés en fabrication ne dépasse pas les 40 *mm*.

Nous avons aussi réalisé de nombreux circuits pour tester les croisements de guides d'ondes. Un guide est alimenté par une source de longueur d'onde  $1,31 \mu m$ , l'énergie restant dans le guide d'injection et celle couplée dans le guide croisant est mesurée pour différents

angles. Le résultat de ce test est présenté sur la figure 5.41.

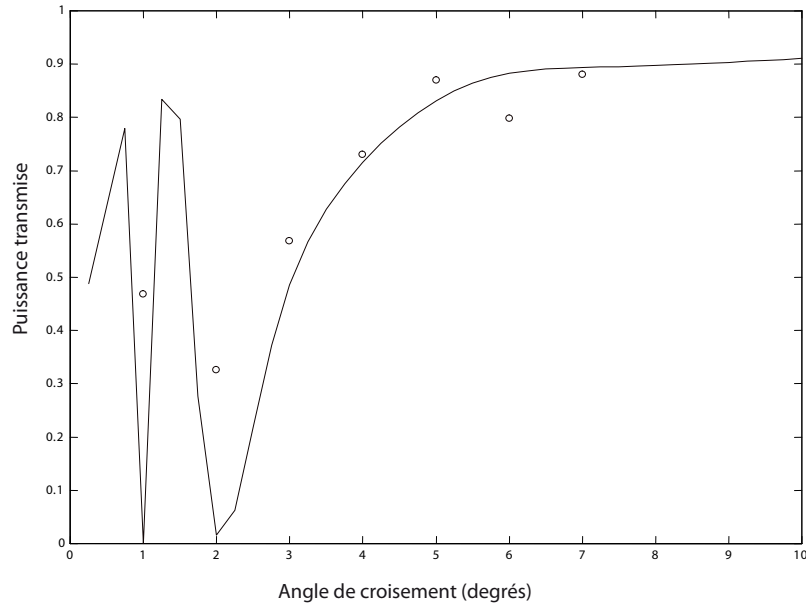


Figure 5.41 – Observation de l'énergie transmise dans des guides d'ondes croisés par d'autres guides d'ondes sous un certain angle : relevé des points expérimentaux et représentation de la simulation

On peut apprécier sur la courbe 5.41 la bonne adéquation entre théorie (courbe) et pratique (relevé de points).

Afin d'éviter tout problème de couplage entre les guides, nous avons choisi des angles supérieurs à 15°.

### 5.5.3.2 Regroupement des guides de sortie

Le regroupement des sorties du composant a été testé pour deux configurations. Dans le premier cas le regroupement est effectué de façon dissymétrique en rapprochant le guide le plus interne du guide plus extérieur (voir figure 5.38). Dans le deuxième cas (voir figure 5.42) le regroupement est symétrique comme lors de la fabrication des coupleurs de puissance à -3dB en Y.

## 5.5.4 Caractérisation du composant CDMA

Les composants CDMA ont été réalisés sur la base des AWGs des sections précédentes, avec un  $\Delta L = 8,639\mu m$  (incrément de longueur des guides déphaseurs). Les 8 sorties sont



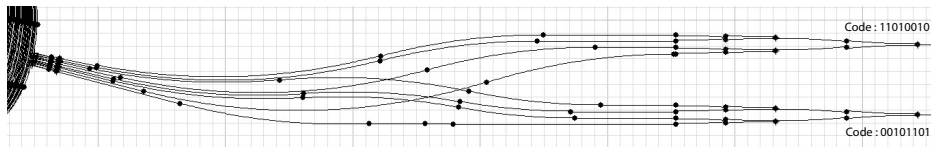


Figure 5.42 – Design d'un codeur CDMA réalisé et caractérisé

espacés de  $12,9 \mu m$ . Les longueurs d'onde correspondant aux différentes sorties sont détaillées dans le tableau du paragraphe 5.2.3.2.

Les composants CDMA ont été réalisés avec des regroupements par coupleur en Y symétriques et par rapprochements tangentiels jusqu'à superposition. Nous avons réalisé des codeurs avec différents codes afin de valider le principe de séparation par codage en longueur d'onde. On les appellera codeur 1 et codeur 2.

Les codes des codeurs 1 et 2 sont les suivant :

	Bits	Codeur 1	Codeur 2
Sortie Haute	1	11010010	10011100
Sortie Basse	0	00101101	01100011

Les sorties "hautes" et "basses" sont représentées en fonction de la position (abscisse) sur le codeur pour une propagation de la gauche vers la droite.

Le codeur 1 et le codeur 2 sont construits sur la base du démultiplexeur WDM dont les résultats de caractérisation ont été présentés précédemment. A partir de ce composant, nous avons regroupé les sorties pour générer les codes. Les regroupements du codeur 1 se font par rapprochement tangentiel et superposition des sorties vers une seule. Le codeur 2 a été réalisé afin d'obtenir un code orthogonal à celui du codeur 1, avec un regroupement des sorties via des coupleurs en Y symétriques, le but étant de simuler deux utilisateurs transmettant chacun un bit.

Le spectre des sorties du codeur 1 mesuré est représenté sur la figure 5.43. Nous avons représenté sur la figure l'état 1 ou 0 correspondant au code souhaité. On peut constater un défaut sur la longueur d'onde  $1325,7 nm$  de la sortie basse. Celle-ci est à l'état 0 alors qu'elle devrait apparaître à l'état 1. Ce défaut est dû à la présence d'une poussière source de perte par diffraction.

Nous avons représenté le spectre des sorties du codeur 2 sur la figure 5.44. Des défauts similaires au spectre du codeur 1 sont apparus.

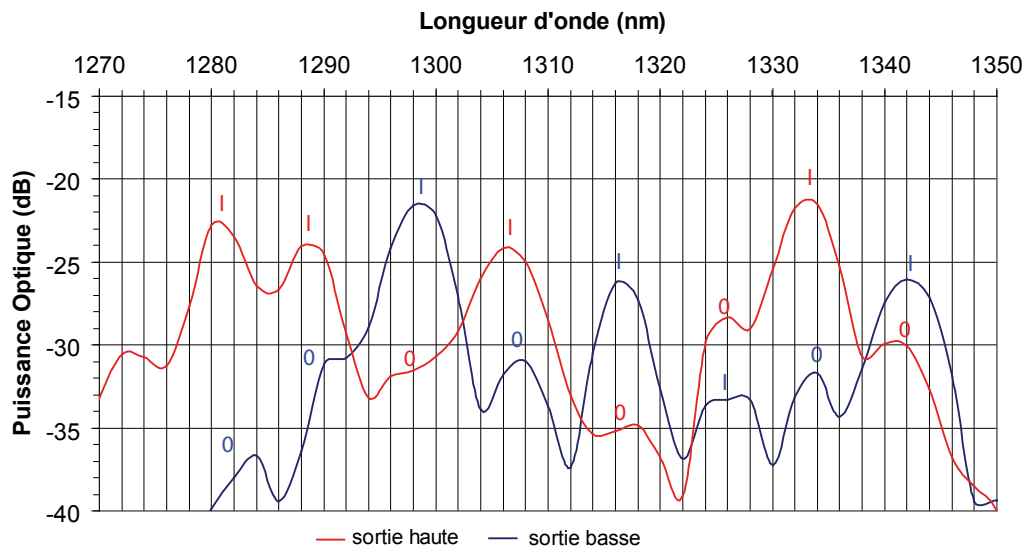


Figure 5.43 – Spectre de sortie du codeur 1 - Regroupement des sorties par superposition

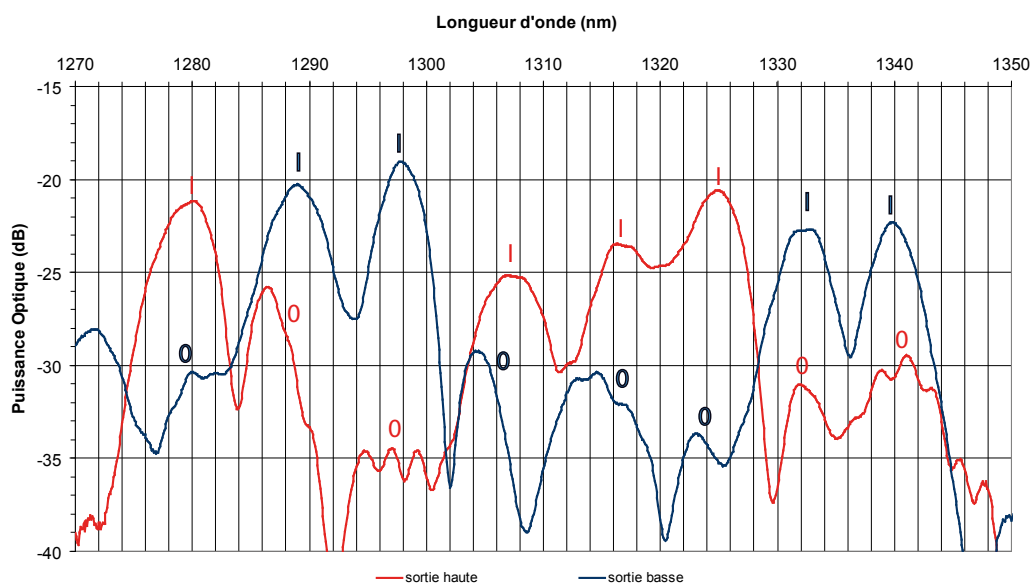


Figure 5.44 – Spectre de sortie du codeur 2 - Regroupement des sorties grâce à des coupleurs en Y

Des problèmes ponctuels de technologie ont empêché momentanément la réalisation de nouveaux codeurs, néanmoins les différents spectres relevés révèlent la faisabilité de ce composant.

## 5.6 Conclusion

Nous avons présenté dans ce dernier chapitre, deux types de circuits complexes réalisés : des démultiplexeurs de type WDM et des codeurs optiques originaux pour le CDMA optique spectral. Ces circuits ont été développés alors que la technologie du matériau nouveau, était elle-même en train d'être développée.

Les résultats de caractérisations sur les WDM confirment la validation avec des circuits simples de notre banc d'inscription. La technologie directe d'inscription par laser UV pulsé, a montré, par rapport à une technologie de masque, la relative rapidité avec laquelle on peut expérimenter de nouveaux design pour des circuits complexes.

Malgré des problèmes récurrents d'appareillage (laser UV, variation d'épaisseur des substrats demandant de nouveaux réglages), nous avons obtenu des résultats encourageants dans la réalisation de composants innovants de type codeurs optiques. Au vu des spectres de sortie des codeurs, la possibilité de réaliser un codage CDMA spectral sur la base d'un démultiplexeur en longueur d'onde a été démontrée.

Les caractérisations de nos composants nous ont permis de relever les pertes de fabrication s'élevant à 2 *dB*. La relative faiblesse des pertes traduit la qualité de fabrication des composants fabriqués, et de façon plus générale la qualité de la technologie développée pour la fabrication de circuits optiques intégrés.

# Conclusion générale et perspectives

Les matériaux organiques-inorganiques ont la particularité d'être polymérisables par simple insolation UV, tout en présentant une relative facilité de mise en oeuvre. Cette polymérisation qui peut être très localisée permet en optique intégrée soit la constitution directe de guides due au renforcement de l'indice soit la constitution de guides par gravure sélective après augmentation de la résistance des parties insolées à certains solvants.

Un nouveau matériau organique-inorganique a été développé qui possède un groupement de type époxy connu pour permettre une meilleure adhérence, une synthèse simplifiée améliorant la reproductibilité. Sur le matériau, en cours de développement lors de ces travaux, des essais d'inscription de circuits optiques ont été perpétrés grâce à un nouveau bâti à base d'un laser UV à semi-conducteurs pulsé. Ce bâti laser a demandé une mise au point complète au niveau de nombreux détails qui cumulés conditionnent la qualité de l'écriture.

Le choix des différents composants du banc optique a été satisfaisant, et nous a permis de construire un bâti d'inscription capable de dessiner des guides d'onde simples dans un premier temps. Les dimensions transverses de  $5 \mu m$  sur  $5 \mu m$  sont adaptées à une propagation unimodale aux longueurs d'onde des télécommunications.

Les illustrations tout au long de ce rapport nous permettent d'apprécier la qualité de gravure obtenue grâce au développement de notre banc d'écriture laser pulsé associé à notre nouveau matériau. Malgré des pertes aux longueurs d'ondes d'utilisation de  $1,31 \mu m$  et  $1,55 \mu m$  peut-être trop élevées, nous avons démontré la validation de notre procédé d'inscription à travers la réalisation de diviseurs en Y par 2 (répartition de l'énergie de 49,9 % et 50,1 % sur les deux branches), de coupleurs directionnels et de coupleurs en étoile.

Dans un deuxième temps des circuits beaucoup plus complexes ont été conçus, réalisés avec une fidélité d'inscription et une reproductibilité de fabrication en croissance permanente. Différents circuits de type multiplexeurs WDM à coupleurs en étoile ont été réalisés. La faisabilité de ces derniers a été démontrée. Nous avons pu prouver qu'il était possible de

réaliser un composant optique intégré, capable de faire de la sélection en longueurs d'onde.

Ces succès nous ont permis de réaliser un circuit nouveau assurant le codage et le décodage pour le CDMA optique spectral. Sa faisabilité a été montrée, il reste à améliorer le dispositif pour le rendre fonctionnel.

Le matériau est développé avec l'aide du GES (*Groupe d'Etude des Semiconducteurs*) de l'Université Montpellier II. L'étude d'un nouveau matériau étant longue, celui-ci n'a pu être optimisé à son maximum. Néanmoins, la plupart des objectifs fixés ont été remplis : l'adhérence entre la couche inférieure (couche tampon) et la couche guidante est largement supérieure à celle du matériau à photo-polymérisation radicalaire utilisée précédemment. Les propriétés mécaniques de ce matériau en font un matériau plus résistant que le précédent. Les pertes en lignes mesurées lors des différentes caractérisations aux longueurs d'ondes  $1,31 \mu m$  et  $1,55 \mu m$  n'ont pas permis d'obtenir des valeurs plus faibles : une étude sur la diminution des groupements OH soupçonnés est en cours. La mise en oeuvre a été simplifiée : ce matériau bas coût devrait donc être compatible avec une production de masse de circuits intégrés optiques.

Les étapes de fabrication du matériau ont été réduites. L'utilisation du banc d'écriture laser a été simplifiée notamment grâce au développement d'interfaces informatiques. Plusieurs logiciels sont utilisés pour la réalisation de circuits intégrés optiques. Tous les logiciels utilisent des fichiers contenant un langage commun (MCCL) ; cela permet ainsi d'intervenir sur la fabrication si un problème est détecté (sur l'interface de commande *LaserWritting*, sur le logiciel de design (jDesign) ou de modélisation (jBPM)) lors des phases de *simulation et conception*. Ce procédé d'inscription rendu plus flexible et réactif nous permet donc de réduire le cycle de développement : concevoir un circuit, le fabriquer puis le caractériser est possible en une journée. La flexibilité de notre approche est un avantage certain, notamment dans un contexte de développement de nouveaux circuits.

Parallèlement au banc d'inscription, un autre banc a été monté pour la caractérisation. Le développement des deux bancs optiques (banc d'écriture laser pulsé et banc de caractérisation) associé au nouveau matériau offrent de belles perspectives. La réalisation de codeurs optiques de type CDMA devra être menée à son terme jusqu'aux tests en conditions d'utilisation réelle. Pour cela, une adaptation du banc de caractérisation (modulateurs optique hautes fréquence, détection associée, ...) sera nécessaire afin de réaliser des tests multi-utilisateurs de codage-décodage.

Un projet de mesure en temps réel de l'inscription est en cours de réalisation : il permettra à terme de mesurer la polymérisation des matériaux de façon dynamique. Le

banc d'écriture va s'adapter à la réalisation de réseau de diffraction et être couplé à un banc de lecture du réseau. Ce dernier utilisera la diffraction d'un faisceau laser visible sur le réseau en cours d'inscription. Cette étude devrait nous permettre de mieux comprendre les mécanismes de photopolymérisation de ce nouveau matériau et de maîtriser de façon plus flexible la répartition d'indice de réfraction dans nos circuits (zone de différents indices, gradients d'indice, ...).

La souplesse de notre approche nous permet d'envisager le développement rapide de nouveaux prototypes de circuits sur divers support tels que, par exemple, des leviers de microscopie en champ proche optique afin de fonctionnaliser ces derniers et de les adapter à de nouvelles applications (lecture ADN). La fabrication de réseaux de diffraction et/ou de réseaux de Bragg dans les guides d'onde permet la fabrication de capteurs à haute sensibilité pour la détection de cellules, de gaz, ... que nous avons commencé à étudier.

Deux technologies ont été combinées : d'une part un nouveau matériau (sol-gel hybride de type époxy) et d'autre part un nouveau procédé d'inscription en optique (écriture laser pulsée). Cette combinaison s'avère prometteuse autant en terme de qualité, qu'en terme d'adaptabilité à des domaines aussi variés que les télécommunications, les capteurs chimiques, biologiques...



# Bibliographie

- [1] Arcep MÉDIAMÉTRIE : Février 2007.
- [2] Photonics 21 : *Towards a bright future for Europe*. Strategic research agenda in photonics.
- [3] T. SMY : Photonique au canada : Un aperçu des capacités industrielles et de recherche actuelles. [http : //www.photonics.ca/documents/final\\_f.pdf](http://www.photonics.ca/documents/final_f.pdf), 2002.
- [4] J. P. GOURE : Rapport de la société française d'optique. Rapport technique, 2004.
- [5] S. Bénet P. Suzanne B. CLAUDET, O. Faugerox : Mesure de propriétés thermophysiques de matériaux par interférométrie holographique en flux modulé. *Congrès annuel de la Société Française de Thermique, Grenoble, 3-6 juin, 2003*.
- [6] W. Denk et M. Lanz D. W. POHL : Optical stethoscopy : Image recording with resolution  $\lambda/20$ . *Applied Physics Letters*, 44(7) : 651653, 1984.
- [7] M. Isaacson et A. Lewis E. BETZIG : Collection mode near-field scanning optical microscopy. *Applied Physics Letters*, 51 : 20882090, 1987.
- [8] T. Ohtani et H. Muramatsu J. M. KIM : 25 nm resolution single molecular fluorescence imaging by scanning near-field optical / atomic force microscopy. *Surface Science*, 549 : 273280, 2004.
- [9] S. Hagiwara et al. T. YOSHINO, S. Sugiyama : Nano-scale imaging of chromosomes and dna by scanning near-field optical/atomicforce microscopy. *Ultramicroscopy*, 97 :8187, 2003.
- [10] S. MAILFERT : *Mise en place d'un microscope de champ proche optique dédié à la Biologie*. Thèse de doctorat, Université Montpellier II, 2006.
- [11] F. Lambert Y. Lecarpentier C. COIRAULT, J.C. Pourny : Les pinces optiques en biologie et en médecine. *In Medecine/Sciences*. 19 : 364-7, 2003.
- [12] JOINDOT : *Les télécommunications par fibres optiques*. 1996.
- [13] Telcité : Opérateur de réseau OPTIQUE : [http : //www.telcite.fr/fibre.htm](http://www.telcite.fr/fibre.htm). Rapport technique, septembre 2007.



- [14] P. LECOY : *Télécommunications optiques*. Télécommunications optiques, Paris, 1992.
- [15] France Telecom R&D : "tour d'horizon des solutions optiques". Rapport technique, <http://www.francetelecom.com/fr/groupe/rd>.
- [16] S. Hagiwara et al. T. YOSHINO, S. Sugiyama : Physique et technologie des fibres optiques. *Ultramicroscopy*, 97 :8187, 2003.
- [17] Histoire et caractéristiques des fibres optiques. Rapport technique, [www.la-fibre-optique.com](http://www.la-fibre-optique.com).
- [18] Z. TOFFANO : *Optoélectronique : Composants photoniques et fibres optiques*. 2001.
- [19] A. CARENCO : Systèmes optiques. G. Roblin, éditeur scientifique, EDP Sciences, 2002.
- [20] P. FERDINAND : La technologie des capteurs à fibres optiques à réseaux de bragg. *Séminaire DAPNIA / SACM, CEA*, 2006.
- [21] T. Suhara H. NISHIHARA, M. Haruna : *Optical Integrated Circuits*.
- [22] J.J. CLAIR : *Introduction à l'optique intégrée*. 1997.
- [23] VASSALO : *Théorie des guides d'ondes électromagnétiques*. 1985.
- [24] D. Lauvernier M. CARETTE : Fabrication de nanofils optiques à fort contraste d'indice en semiconducteur iii-v (gaas ou inp) / benzocycobutène(bcb). *JNRDM, Rennes*, 2006.
- [25] J.L. MEYZONNETTE : *Optique géométrique et propagation*. 2003.
- [26] D. MARCUSE : Solution of the vector wave equation for general dielectric waveguides by the galerkin method. *I.E.E.E. Journal of Quantum Electronics*, vol. 28, no. 2, February 1992.
- [27] J. Rossettos P. TONG : Finite element method. *MIT Press, Cambridge, Mass*, 1978.
- [28] Y. MOREAU : <http://www.cem2.univ-montp2.fr/moreau/modappl>. Rapport technique.
- [29] G. Touzot G. DHATT : Une présentation de la méthode des éléments finis. *Maloine. S.A. Ed., Paris*, 1981.
- [30] S. Schlöpke F. BUSS : Programmation java, micro applications. Paris, 1997.
- [31] S. Perrot K. Kribich P. Coudray P. Etienne Y. MOREAU, N. Brillouet : Simulation rapide et accessible sur internet de dispositifs d'accès multiple en longueur d'onde : phasars et mmi. *Proc.Optix 2001, Marseille*, nov-01.
- [32] K. Kribich J. Jabbour S. Gatti G. PILLE, Y. Moreau et J. GALY : From photonic components to optical network : an online simulation of a spectral cdma system. *European symposion on simulation tools for research and education in optical networks (STREON'05), CD Rom ENST Bretagne - 5.03, Brest, 27 octobre 2005*.

- 
- [33] S.I. NAHAFI : *Introduction to glass integrated optics*, volume Chapter 6, pp. 139. Boston, 1992.
- [34] I. VASILIEF : *Guides d'ondes canaux amplificateurs en verres de fluorures dopés erbium spectroscopie et amplification optique*. Thèse de doctorat, Université Claude Bernard - Lyon I, Novembre 2003.
- [35] D. Leclerc J. Decobert L. GOLDSTEIN, C. Ougier : Optical semiconductor component and method of fabrication. *Demande de Brevet Européen*, Alactel, 2003.
- [36] Y. DESIERES : *Conception et études optiques de composants micro-photoniques sur matériaux III-V à base de structures à bande interdite de photon*. Thèse de doctorat, INSA lyon, 2001.
- [37] E. Kapon R.J. DERI : Low loss iii-v semiconductor optical waveguides. *I.E.E.E. Journal Of Quantum Electronics*, vol. 27, no. 3, March 1991.
- [38] L. Di Cioccio J.M. FEDELI : Fabrication of an optical interconnection layer on an electronic circuit. *Demande de Brevet Européen*, CEA, 2005.
- [39] I. HAYASHI : Ulsi optical interconnection-technologies for future photo-electronic integrated systems. *Integrated Optics and Optoelectronics, Proceeding of SPIE*, vol. CR 45, 1993.
- [40] S. Yegnanarayanan F. Coppinger B. JALABI, P.D. Trinh : Guide-wave optics in silison-on-insulator technology. *I.E.E. Proc. Optoelectron.*, vol. 143, n°5, October 1996.
- [41] G. T. Reed A. G. Rickman F. Namavar C. K. TANG, A. K. Kewell : Development of a library of low loss silicon on insulator optoelectronic devices. *I.E.E. Proc. Optoelectron.*, vol. 143, no 5, October 1996.
- [42] C.H. Henry Y.P. LI : Silica-based optical integrated circuits. *Optoelectronics, IEE Proceedings*, vol. 143, Issue 5, pp. 263 - 280, 1996.
- [43] Y. Hibino Y. Ohmori T. KITAWA, K. Hattori : Neodymium-doped silica-based planar waveguide lasers. *Journal of Lightwave Technology*, vol. 12;p. 436–442, 1994.
- [44] S. Shuto M. Yasu M. Kobayashi T. KITAWA, K. Hattori : Amplification in erbium-doped silica-based planar lightwave circuit. *Electronic Letters*, vol. 28;pp. 1818–1819, 1992.
- [45] K. Cooper C.A. JONES : Hybrid integrated onto silison motherboards with planar silica waveguides. *I.E.E.E. Proc. Optoelectron.*, vol. 143, no 5, 1996.
- [46] G. Youping B. BOULARD : Vapour-phase deposition of multicomponent fluoride glasses. *Chimie du verre*, vol. 5, no 11, pp. 673-811, pp. 675-678, 2002.
-

- [47] T. Yoshizawa K. CHIDA, R. Arioka : Optical fiber fabrication and splicing techniques. *Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering (Bull. Jpn. Soc. Precis. Eng.)* ISSN 0582-4206, vol. 18, no2, pp. 132-138, 1984.
- [48] G.W. Scherer C.J. BRINKER : *Sol-Gel science*. 1990.
- [49] J. LIVAGE : The sol-gel process. *Revue Verre*, vol. 6, no. 5, October 2000.
- [50] W. Huang A.S. Holmes R.R.A. SYMS, V. Scheinder : Low loss achieved in sol-gel based silica-on-silicon integrated optics using borophosphosilicate glass. *Electronic Letter*, vol. 31, no. 21, October 1995.
- [51] V. Scheinder R.R.A. SYMS, W. Huang : Optimisation of borophosphosilicate glass composition for silicon integrated optical circuits fabricated by sol gel process. *Electronic Letters*, vol. 32, no. 13, June 1996.
- [52] C. CORNIC : *Réalisation par gravure RIBE de guides optiques en polyimide. Contribution à leur caractérisation dans un modulateur electro-optique*. Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2003.
- [53] P. ETIENNE : Phd thesis. 1993.
- [54] K. O. Hill et AL. : Photosensitivity in optical fiber waveguides : Application to reflection filter fabrication. *Appl. Phys. Lett.*, vol. 32(10), pp. 647-649, 1978.
- [55] M. SVALGAARD : *Ultraviolet et light induced refractive index structures in germanosilica*. Thèse de doctorat, Ph.D.Thesis, Mikroelektronik centret, Technical university of Denmark, March 1997.
- [56] G. Meltz et AL. : Formation of bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method. *Opt.Lett.*, vol. 14(15), 823-825, 1989.
- [57] V. Mizrahi et AL. : Ultraviolet laser fabrication of ultrastrong optical fiber gratings and of germania-doped channel waveguides. *Appl. Phys. Lett.*, vol. 63, no. 13, 1727-1729, 1993.
- [58] S. Pelli et AL. : Direct laser writing of ridge optical waveguides in silica-titania glass sol-gel films. *Optical Materials 5, Elsevier*, vol. 119-126, 1996.
- [59] J.L. Lee J. Org S.R. AKHTAR, J.V. Crivello : *Chem. 55*, vol. 4222, 1990.
- [60] J.V. Crivello K. SURESH RAJARAMAN, A. William Mowers : *J. polym.science : Part a : Polymer chemistry*. vol. 37:pp. 4007-4018, 1999.
- [61] B. Luther-Davies R. CHARTERS : Laser written mode evolution couplers. *SPIE's 44th Annual Meeting, Denver*, Paper no. 3799C-36, July 1999.

- 
- [62] J. Schwider TH. DRESEL : Fabrication of optical components by laser lithography. *Appl. Surf. sci.*, vol. 106, pp. 379-382, 1996.
- [63] J. Zyss I. LEDOUX, R. Pinsard-Levenson : Matériaux organiques pour les réseaux de communication optiques : de la molécule aux composants. *L'Echo des Recherches*, no. 162, 4ème trimestre 1995.
- [64] K. RONSE : Optical lithographya historical perspective. *Comptes Rendus Physique, Volume 7, Issue 8, October 2006, Pages 844-857*, vol. 7, issue 8, PP 844-857, 2006.
- [65] P. William Oliveira H. Schimdt H. KRUG, F. Tiefensee : organic-inorganic composite materials : optical properties of laser patterned and protective waveguides. *SPIE, Sol-Gel optics II*, vol. 1758, 1992.
- [66] M. Andrews J. Chisham P. lefevre J. D. Mackenzie N. Peyghambarian S.I. NAJAFI, C.Y. Li : Integrated optics devices by ultraviolet light imprinting in sol-gel silica glass. *conf. on functional Photonic Integrated Circuits, San Jose, SPIE, Proc.*, vol. 2401, 1995.
- [67] Y. Moreau J. Porque P. ETIENNE, P. Coudray : Ceramics, hybrids and nanocomposites from gels. *9th international Workshop on Glasses, Sol-gel 97*, Sheffield, UK, Sept 1997.
- [68] J. Porque Y. Moreau P. ETIENNE, P. Coudray : *Optics Comm 174*, vol. 413, 2000.
- [69] P. Etienne P. Coudray Y. Moreau M. OUBAHA, M. Smaïhi : J. non-cryst. *Solids 318*, 2003.
- [70] D.P.Gaur D.C. BRADLEY, R.C. Mehrotra : Metal alkoxides. *Academic Press, London*, 1978.
- [71] T. JERMOUMI : Thèse de doctorat, Université de Montpellier 2, 1994.
- [72] C. DECKER : *chimia 47, Pages 378-382*, 1993.
- [73] J. JABBOUR : *Synthèse et caractérisation d'un matériau hybride organique-inorganique à base d'un époxysilane : Application à la réalisation de circuits photoniques*. Thèse de doctorat, Université Montpellier II, 2007.
- [74] K. KRIBICH : *Développement et fabrication par écriture laser de circuits optiques intégrés pour les télécommunications*. Thèse de doctorat, Université Montpellier II, 2002.
- [75] Diffraction acousto-optique. 26 nov 2002.
- [76] F. W. Sears P. DEBYE : On the scattering of light by supersonic waves. *Proc. Natl. Acad. Sci. (USA)*, vol. 18, pp. 409, 1932.
- [77] P. Etienne K. Kribich Y. MOREAU, P. Coudray : Index change evaluation in organo-mineral optical circuits. *invited paper, 5ème optical Fibre Measurement Conference, Nantes*, pp. 87-91, 22-24 Septembre 1999.
-

- [78] Ramu V. Ramaswamy HSING CHIEN CHENG : Symmetrical directional coupler as a wavelength multiplexer-demultiplexer : theory and experiment. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 27, no 3, March 1991.
- [79] A. YARIV : Coupled mode theory for guided wave optics. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. QE-9, pp. 919-933, 1973.
- [80] G. PILLE : *Multiplexage optique à répartition par codes spectraux en optique intégrée*. Thèse de doctorat, Université Montpellier 2, 2005.
- [81] H. Hoda H. TAKAHASHI, K. Oda : Impact of crosstalk in an arrayed-waveguide multiplexer on nxn optical interconnection. *Journal of lightwave technology*, vol. 14 (6), 1097, 1996.
- [82] S. Perrot K. Kribich P. Coudray P. Etienne Y. MOREAU, N. Brillouet : Simulation rapide et accessible sur internet de dispositifs d'accès multiple en longueur d'onde : phasars et mmi. *Proc. Optix 2001, Marseille (France)*, nov - 2001.
- [83] Y. MOREAU : [www.ies.univ-montp2.fr/moreau/jwdm/](http://www.ies.univ-montp2.fr/moreau/jwdm/).
- [84] c2V (Concept of VOLUME) : Software : design, simulation and mask layout platform. 2000.
- [85] Y. MOREAU : <http://www.ies.univ-montp2.fr/photon/jbpm>. 1998.
- [86] Y. MOREAU : <http://www.ies.univ-montp2.fr/photon/jdesign>. 2005.
- [87] J.A.SALEHI : Code division multiple access techniques in optical fiber networks - part i and ii. *IEEE Trans. Commun.*, 37 n°8:pp.42-46, aug, 1989.
- [88] C. Aupetit-Berthelemot J.P. Cances J.M.Dumas C.GOURSAUD, A. Julien-Vergonjeanne : Ds-ocdma receivers based on parallel interference cancellation and hard limiters. *IEEE Trans. Commun.*, 54 n°9, sep, 2006.
- [89] M.KAVEHRAD et D. ZACCARIN : Optical code-division-multiplexed systems based on spectral encoding of non coherent sources. *J. Lightwave Tech.*, 13(3):pp. 534-545, mar, 1995.
- [90] M.Wu-E. Yablonovitch C.LAM, R.Vrijien : Multi wavelength optical code division multiplexing. *ed.,SPIE Optical engineering press*, 1999.
- [91] K. IVERSEN et D. HAMPICKE : Comparison and classification of all optical cdma systems for future telecommunications networks. *SPIE Proc.*, 2614:pp. 110-121, oct, 1995.
- [92] P. Coudray P. Etienne J.Galy Y. MOREAU, K.Kribich : Code division multiple access (cdma) with mmi mineral-organic circuits. *International Conference SPIE : Photonics West, San Jose U.S.A.*, OE-4640, 60, jan, 2002.

# Table des figures

1.1	Plateforme Optique pour un capteur de gaz . . . . .	10
1.2	Levier de SNOM avec guide d'onde, démultiplexeur et photodiodes intégrées .	11
1.3	Principe de manipulation d'un objet microscopique avec une pince optique . .	12
1.4	Architecture de transmission mixte "fibre optique-cuivre" (Source France Télécom - RD). . . . .	14
1.5	Représentation de la coupe d'une fibre Optique (a) et de son profil d'indice .	15
1.6	Schéma d'un coupleur directionnel . . . . .	16
1.7	Réalisation d'un réseau de Bragg dans une fibre optique . . . . .	17
1.8	Principe d'une liaison WDM . . . . .	17
2.1	Guide d'onde 3D . . . . .	24
2.2	Représentation de différents types de structures de guides d'onde 3D . . . . .	25
2.3	Représentation d'un guide plan . . . . .	27
2.4	Approche de la propagation guidée grâce à l'optique géométrique : réflexions totales et rayons en phase après une double réflexion (a), fuite dans la gaine (b)	28
2.5	Approche géométrique : Rayons en phase après deux réflexions . . . . .	28
2.6	Profils des modes TE dans un guide . . . . .	31
2.7	Simulation de la propagation d'un faisceau dans un star-coupleur . . . . .	37
2.8	Processus de fabrication par échange ionique d'un guide d'onde . . . . .	39

TABLE DES FIGURES

---

2.9	Guide d'onde réalisé sur substrat GaAs (pour exemple : $h \approx 0,3 \mu m$ , $W \approx 3 \mu m$ , $T \approx 1,45 \mu m$ ) . . . . .	40
2.10	Guide d'onde réalisé sur substrat de silicium . . . . .	41
2.11	Dépôt par hydrolyse à la flamme . . . . .	43
2.12	Structure de la silice (a) et défauts ponctuels liés à l'insertion d'un atome de germanium (b-f) . . . . .	48
2.13	Processus de densification et gravure sélective d'un polyimide . . . . .	49
2.14	Structure d'un polymère vinylique . . . . .	50
2.15	Structure d'un acrylate . . . . .	50
2.16	Formule développée du EETMOS (M représente le monomère) . . . . .	52
2.17	Tecnique de dépôt de couche de polymère sur tout type de substrat . . . . .	53
2.18	Banc de photoinscription Laser . . . . .	57
3.1	Fabrication d'un matériau Hybride . . . . .	62
3.2	Protocole de Synthèse . . . . .	65
3.3	Protocole de dépôt d'une structure transverse d'un guide d'onde 3D . . . . .	66
3.4	Représentation du banc d'écriture laser . . . . .	68
3.5	Laser UV pulsé YLF émettant à 262 nm . . . . .	69
3.6	Relevé du profil d'intensité du laser YLF en fonction de sa fréquence . . . . .	70
3.7	Diffraction d'une onde lumineuse par un modulateur acousto optique (a) - Diffraction d'un rayon incident à l'angle de Bragg (b) . . . . .	71
3.8	Courbe de réponse du modulateur acousto-optique fonction de sa modulation . . . . .	72
3.9	Réglage de l'asservissement des platines de micro-déplacements . . . . .	73
3.10	Logiciel Laser Writing . . . . .	74
3.11	Guides d'ondes tracés d'une seule traite pour des angles de jonction trop élevés (a) - Tracé de guides d'ondes avec périodes d'accélération-décélérations et modulateur acousto-optique (b) . . . . .	75

---

3.12	Observation du spot d'écriture avec le système de monitoring . . . . .	76
3.13	Photo de notre nouveau banc d'inscription laser pulsé . . . . .	77
4.1	Représentation d'un disque d'Airy et de sa répartition énergétique de forme Gaussienne (a) . Acquisition visuelle d'un disque d'Airy et de ses anneaux (b)	81
4.2	Observation de deux tests de vitesse d'écriture pour une même fréquence laser de 3 <i>KHz</i> . La vitesse $v_1$ du test (a) est inférieur à la vitesse $v_2$ du test (b) . .	82
4.3	Tests d'adhérence pour la réalisation de guides d'ondes à base de structure 3D de 5 $\mu m$ sur 5 $\mu m$ , pour différentes puissances laser et différentes vitesses d'écriture. Les paramètres optimaux sont le résultat d'un compromis. . . . .	82
4.4	Relevé de l'évolution de la polymérisation du matériau en fonction de l'énergie reçue à travers l'observation de la largeur des guides d'ondes . . . . .	83
4.5	Observation par microscopie électronique à balayage (MEB) de guides droits avant optimisation . . . . .	84
4.6	Observation de la section d'un guide trapèze (a) et de la section d'un guide carré de 5 $\mu m$ sur 5 $\mu m$ (b) . . . . .	84
4.7	Représentation de l'acquisition d'un tracé moteur (courbe pleine) et de l'erreur de positionnement relevée tout au long du tracé (courbe en pointillés) . . . .	85
4.8	Observation de l'erreur d'écriture sur le tracé de croisements avant réglages (a) et après réglages (b) : mauvais asservissement PID entraînant des dépassements de trajectoires . . . . .	86
4.9	Représentation schématique du banc de caractérisation optique . . . . .	87
4.10	Mesure des pertes d'un guide droit élaboré à partir de notre matériau. Mesures effectués pour une injection à la longueur d'onde 1,31 $\mu m$ . . . . .	88
4.11	Evolution des pertes de courbure en fonction de différents rayons de courbure pour un écart d'indice $\Delta n=0,014$ entre le guide d'onde et la couche de recouvrement . . . . .	89
4.12	Topographie d'un diviseur en Y . . . . .	91
4.13	Design d'un diviseur/recombineur en Y par 8 . . . . .	91
4.14	Principe de fonctionnement d'un diviseur/recombineur en Y . . . . .	92

---



TABLE DES FIGURES

---

4.15	Observation des défauts sur la réalisation de diviseur en Y . . . . .	92
4.16	Optimisation de diviseur en Y . . . . .	93
4.17	Observation de l'émission en sortie d'un Y diviseur par deux, en injectant une longueur d'onde de $1,31 \mu m$ en entrée . . . . .	93
4.18	Principe de fonctionnement d'un coupleur directionnel. $n_c$ est l'indice dans les couches inférieures et supérieures, $n_g$ est l'indice du guide, $n_{eff}$ est l'indice effectif . . . . .	94
4.19	Répartition de l'intensité lumineuse dans un coupleur direct, en fonction de la longueur de couplage . . . . .	95
4.20	Observation d'un coupleur directionnel dont l'écartement entre les deux branches est de $2 \mu m$ . (Photo 1 : représentation du coupleur en entier. Photo 2 : vue de dessus de la zone de couplage et de l'écartement des deux branches. Photos 3 : vue en coupe des deux branches) . . . . .	96
4.21	Caractérisation de différents coupleurs directionnels dont les bras pour chaque composant sont éloignés de $3 \mu m$ . Observation de l'énergie issue de chaque bras pour différentes longueurs de couplage . . . . .	97
5.1	Accès multiple à répartition en fréquence (FDMA) . . . . .	101
5.2	Accès multiple à répartition en longueur d'onde (WDMA) . . . . .	102
5.3	Démultiplexeur optique à coupleur en étoile . . . . .	103
5.4	Coupleur en étoile : représentation en 2D et 3D . . . . .	104
5.5	Propagation simulée d'un faisceau dans un coupleur en étoile pour différentes largeurs de tapers : $6 \mu m$ (a) et $10 \mu m$ (b) . . . . .	105
5.6	Configuration en cercles de Rowland visant à éliminer les aberrations de second ordre. . . . .	107
5.7	Topologie du coupleur en étoile de sortie, utilisé en recombineur. . . . .	108
5.8	Schéma des entrées du coupleur de sortie. Le contour du front d'onde $C$ est décalé en $C'$ lors d'un changement de longueur d'onde. . . . .	108
5.9	Illustration de la gamme spectrale libre $\Delta f_{FSR}$ . . . . .	110

---

5.10	Représentation graphique de la notion de bande angulaire libre. . . . .	112
5.11	Étapes de transformation du faisceau dans le démultiplexeur. . . . .	113
5.12	Spectre de sortie simulé d'un démultiplexeur à coupleurs en étoile $7 \times 7$ . Illustration de la diaphotie. . . . .	114
5.13	Spectre de sortie, observation de la dispersion de polarisation. . . . .	115
5.14	Panneau de saisie et calculs des paramètres d'un AWG . . . . .	119
5.15	Evaluation des profils d'énergie en sortie d'un AWG à différentes longueurs d'onde, pour le positionnement des sorties (simulation sur jWDM) . . . . .	119
5.16	Ecriture en spirale d'un coupleur diviseur . . . . .	121
5.17	Réseau de guides déphaseurs générés par jDesign . . . . .	121
5.18	Circuit AWG avec sorties reliées pour codeur CDMA spectral . . . . .	122
5.19	Démultiplexeur optique à coupleur en étoile : emplacement des tapers . . . . .	123
5.20	Représentation des différentes techniques de tracé de tapers testés . . . . .	123
5.21	Réalisation de tapers pour des largeurs de cônes différentes . . . . .	124
5.22	Homogénéité d'écriture de tapers : réalisation de tapers avec un écartement de $2 \mu m$ entre chaque. Observation par microscopie optique (a) et par MEB (b) . . . . .	125
5.23	Design du tracé d'une zone de propagation libre par la méthode des aller/retours (a) puis représentation des premiers essais de coupleurs en étoile par cette méthode . . . . .	125
5.24	Premiers essais de tracés de coupleurs en étoile par la méthode de remplissage en serpentín . . . . .	126
5.25	Figure (a) : Zone d'étalement du faisceaux injecté dans le coupleur d'entrée d'un dispositif WDM. Figure (b) : Simulation BPM d'un coupleur en étoile avec une injection sur une entrée extrême . . . . .	127
5.26	Observation du profil de sortie d'un coupleur en étoile. Les figures (a) et (c) correspondent aux entrées respectives 1/7 et 7/7 du coupleur en étoile. La figure (b) correspond à l'entrée centrale 4/7. . . . .	127
5.27	Design du coupleur en étoile caractérisé . . . . .	128

---

## TABLE DES FIGURES

---

5.28	Tracé des puissances de sortie du coupleur en étoile en fonction de l'entrée d'injection . . . . .	128
5.29	Tracé d'un réseau déphaseur pour la réalisation d'un WDM . . . . .	129
5.30	Observation de notre WDM (assemblage de différentes vues) . . . . .	130
5.31	Longueur d'onde centrale . . . . .	131
5.32	Uniformité du spectre . . . . .	131
5.33	Focalisation sur les sorties du WDM en fonction de la longueur d'onde d'injection	132
5.34	Spectre de sortie d'un WDM à 8 canaux . . . . .	133
5.35	Schéma de principe du système d'encodage spectral . . . . .	135
5.36	Exemple du spectre de sortie représentant le bit "1" et le bit "0" . . . . .	136
5.37	Schéma de principe du décodeur CDMA spectral . . . . .	137
5.38	Design d'un codeur CDMA réalisé et caractérisé . . . . .	138
5.39	Photo d'un codeur réalisé (design représenté sur la figure 5.38) . . . . .	138
5.40	Observation du croisement des sorties du composant CDMA représenté sur la figure 5.38 . . . . .	138
5.41	Observation de l'énergie transmise dans des guides d'ondes croisés par d'autres guides d'ondes sous un certain angle : relevé des points expérimentaux et représentation de la simulation . . . . .	139
5.42	Design d'un codeur CDMA réalisé et caractérisé . . . . .	140
5.43	Spectre de sortie du codeur 1 - Regroupement des sorties par superposition . . . . .	141
5.44	Spectre de sortie du codeur 2 - Regroupement des sorties grâce à des coupleurs en Y . . . . .	141

## Résumé

L'optique intégrée est une technique très prometteuse pour une fabrication de masse de circuits optiques pour les télécommunications et/ou l'instrumentation.

La technologie sol-gel a déjà démontré son potentiel. Un nouveau matériau sol-gel hybride à polymérisation cationique de type Epoxy a été développé dans le but de la simplification de la synthèse et de l'amélioration des performances en particulier l'adhérence.

Ce travail a pour objectif le développement d'un banc d'écriture laser UV dans une couche Epoxy et l'établissement du protocole de fabrication associé. Ce procédé de polymérisation locale est une alternative prometteuse aux techniques lithographiques par masque.

Ce nouveau banc utilise un laser pulsé travaillant à faible longueur d'onde pour une meilleure résolution et une meilleure polymérisation.

Ce travail a montré la faisabilité de circuits complexes de type multiplexeurs WDM avec un procédé d'inscription à faible coût. Nous avons réalisé les premiers prototypes de circuits dédiés à la sélection multiple de longueurs d'onde pour le (dé)codage du CDMA optique spectral.

**Mots-clés :** Photonique, Circuits intégrés optiques, WDM, CDMA, Procédé sol-gel, Matériau hybride organique-inorganique.

## Abstract

Integrated Optics is a promising technique for mass production of optical circuits for telecommunications and sensor applications.

Sol-Gel Technology has been proved to be efficient. A new hybrid material of epoxy type has been developed in order to simplify synthesis and improve performance such as adhesion.

This work is aimed to develop a new UV Laser setup in an epoxy layer and the definition of the associated protocol. This local polymerization process is a promising alternative to the conventional mask lithography techniques.

This new setup uses a pulsed UV Laser working at a low wavelength to get better resolution and stronger polymerization.

This work has shown the feasibility of complex circuits, WDM multiplexer type, at a low cost writing process. We have fabricated the first prototypes of circuits dedicated to the multiple selection of wavelengths for spectral optical CDMA coding.

**Key words :** Photonic, Optical integrated circuit, WDM, CDMA, Sol-gel process, Organic-inorganic hybrid material.

