

THESE



Présentée à

L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE

pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE

Spécialité : Microondes et Microtechnologies

par

Marie LESECQ

***Fonctionnalités actives en optique intégrée
à base de fils optiques en filière InP :
application à la commutation optique***

Soutenance prévue le 3 décembre 2007 devant la Commission d'Examen :

Président	Mr. Tuami Lasri	Professeur Université des Sciences et Technologies de Lille
Rapporteur	Mr. Jean Le Bihan	Professeur Ecole Nationale d'Ingénieurs de Brest
Rapporteur	Mr. Philippe Arguel	Maître de conférence - HDR - Université de Toulouse
Directeur de thèse	Mr. Jean-Pierre Vilcot	Directeur de Recherche IEMN
Examineur	Mr. Yves Hernandez	Ingénieur Multitel
Examineur	Mr. Francois Reptin	Ingénieur DGA

*A Thomas,
A ma mère,
A mes grands parents,
A Tatiana, Sylvain, Juliette, François, Camille et Antoine.*

Remerciements

Cette thèse de doctorat a été effectuée au Département Hyperfréquences et Semiconducteurs (DHS) de l'Institut d'Electronique, de Microélectronique et de Nanotechnologie (IEMN) de l'Université des Sciences et Technologies de Lille, dirigé par Monsieur le Professeur Alain Cappy.

Je tiens à remercier Monsieur Tuami Lasri, Professeur à l'USTL, de me faire l'honneur de présider la commission d'examen.

J'adresse mes plus sincères remerciements à Monsieur Jean Le Bihan, professeur à l'Ecole nationale d'Ingénieurs de Brest ainsi qu'à Monsieur Philippe Arguel, maître de conférence à l'université de Toulouse pour avoir accepté de juger ce travail et d'en être les rapporteurs. Je remercie également Monsieur François Reptin, ingénieur à la DGA, et Monsieur Yves Hernandez, ingénieur chez Multitel, de l'intérêt qu'ils portent à ce travail en acceptant de participer à ce jury de thèse.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur Jean-Pierre Vilcot, Directeur de recherche au CNRS, qui a encadré mes travaux de thèse. Je le remercie sincèrement pour toute l'attention qu'il a portée à mon travail. Thank you so much John-Peter !

Je remercie également Monsieur Didier Decoster, Professeur à l'USTL, pour m'avoir accueillie au sein du groupe Optoélectronique qu'il dirige.

Mes remerciements vont maintenant à toutes les personnes avec qui j'ai eu le plaisir de travailler durant ces années.

Je commencerai donc par remercier les deux premières dames de l'équipe : Sophie Maricot et Dorothee Bernard. Leur bonne humeur et leur amitié m'ont fait passer d'agréables moments. Je leur adresse tous mes remerciements pour leur aide précieuse en recherche comme en enseignement.

Je remercie sincèrement Maxime Beaugeois de l'équipe photonique du PhLAM pour notre sympathique collaboration pour la caractérisation des différents composants.

Je remercie ma collègue de bureau Michèle Carette pour notre amicale cohabitation.

Je tiens à remercier Christophe Lethien et Gwenn Ulliac, anciens thésards du groupe opto pour leur sympathie et leur soutien.

Je n'oublie pas toutes les personnes que j'ai pu rencontrer durant ces années en enseignement, en recherche, à la centrale de technologie ... Un merci particulier à Jean-René, Freddy, Elisabeth, Nargess, Nicolas, Anthony, Clarisse, ... thésards ou post-doctorants passés et présents. Merci également à Cathy Sion, Vincent Thomy, Jean-François Legier et Mohamed Bouazaoui. Qu'ils soient assurés de toute ma sympathie.

Un immense merci à l'ensemble du personnel de la centrale de technologie avec qui j'ai eu le plaisir de travailler et qui ont su me faire profiter de leur expérience. Je tiens à remercier tout particulièrement : Christiane Legrand, Marc François, Michel Muller, Pascal Tilmant, Annie Fattorini, André Leroy, Cristophe Coinon, Jean-Louis Codron, Cristophe Boyaval, Patricia Lefebvre, Bernard Verbeke, Karine Blary, Bertrand Grimbert, David Troadec, Thomas Gehin et Jean-Claude Pesant. Merci également à Didier Vandermoëre ainsi qu'à Elisabeth Delos,

Merci à Pierre Armant pour sa constante serviabilité et sa bonne humeur durant ces années.

J'adresse un immense merci à ma chère famille pour son soutien inconditionnel et pour tous les moments de bonheur que nous partageons. Un merci particulier à ma mère, mes grands parents et ma soeur, qu'ils trouvent ici l'expression de mon amour et de ma reconnaissance. Enfin, merci Thomas d'être à mes côtés tous les jours, le meilleur reste à venir !

L'ensemble des résultats de cette thèse n'aurait existé sans l'aide précieuse de Sophie Maricot durant ces trois années. Je tiens encore une fois à lui exprimer toute ma reconnaissance. Merci mille fois, mon amie, pour ce travail en duo des plus sympathiques !

LISTE DES ABREVIATIONS UTILISEES	1
INTRODUCTION	1
Bibliographie de l'introduction	8
CHAPITRE I : CONCEPTION DES STRUCTURES PASSIVES ET ACTIVES EN FILIERE MICROGUIDE	11
I Outils de modélisation	13
I.1 Principe des méthodes utilisées	13
I.1.a La méthode des faisceaux propagés ("BPM")	13
I.1.a.1 L'approximation scalaire	14
I.1.a.2 L'approximation paraxiale	14
I.1.a.3 Principe de la BPM basée sur les différences finies	14
I.1.b La méthode des différences finies dans le domaine temporel ("FDTD")	15
I.1.b.1 Principe de base de la méthode	15
I.1.b.2 Cas Transverse Magnétique à deux dimensions (2D TM)	16
I.2 Conditions de simulation	17
I.2.a Discrétisation du domaine spatial (cas de la BPM et de la FDTD)	17
I.2.b Discrétisation dans le domaine temporel (cas de la FDTD)	19
I.2.c Conditions aux limites	19
II Modélisation des différents éléments constitutifs d'un commutateur	21
II.1 Définition de la structure guidante	21
II.1.a Définition de la couche guidante	21
II.1.b Définition de la couche de confinement inférieur	22
II.1.c Définition de la couche de confinement supérieur	23
II.2 Modélisation des structures optiques passives	25
II.2.a Evaluation des pertes de propagation	25
II.2.b Evaluation des pertes en excès dues aux courbures	27
II.2.c Evaluation des pertes en excès dues aux jonctions	29
II.2.d Evaluation des pertes de couplage	32
II.2.e Amélioration des pertes de couplage avec l'utilisation de structures d'adaptation de mode	34
II.3 Conception du commutateur en technologie microguide	36
II.3.a Description générale du commutateur	36
II.3.a.1 L'effet de commutation	36
II.3.a.2 Principe de la commutation	37
II.3.b Définition de la structure de commutation élémentaire utilisée pour la technologie microguide	38
II.3.b.1 1 ^{ère} approche: structures de type MMI	38
II.3.b.2 Nouvelle structure de type DOS	39
II.3.c Optimisation de la structure de commutation	42
II.3.c.1 Influence de la longueur L_0	42
II.3.c.2 Influence de la variation d'indice	45
II.3.c.3 Influence de l'écart inter électrodes	47
II.3.c.4 Conclusion	48
II.3.d Vérification par BPM 3D du fonctionnement des commutateurs microguides	49
III Conclusion	50
Bibliographie du Chapitre I	52

CHAPITRE II : COMPOSANTS PASSIFS INTERVENANT DANS LA CONCEPTION D'UN COMMUTATEUR OPTIQUE OU D'UNE MATRICE DE COMMUTATION OPTIQUE EN TECHNOLOGIE MICROGUIDE SUR INP	55
I Mise au point de la technologie	57
I.1 Brève introduction au processus de fabrication	57
I.1.a Structure épitaxiale réalisée.	57
I.1.b Topologie des composants	57
I.1.c Récapitulatif des étapes technologiques	58
I.2 Résumé succinct de précédents travaux	59
I.2.a Les procédés de gravure	60
I.2.a.1 Procédés de gravure ICP	60
I.2.a.2 Procédés de gravure alternatifs	64
I.2.a.3 Conclusion des essais préliminaires: orientation du choix sur la technique de gravure qui sera utilisée	65
I.2.b Les masques de gravure	66
I.2.b.1 Masque métallique.	66
I.2.b.2 Masque diélectrique.	66
I.2.b.3 Conclusion : Choix du masque de gravure.	67
I.3 Optimisation des étapes de lithographie électronique et de gravure	68
I.3.a Lithographie	68
I.3.a.1 Rappel sur le procédé de lithographie électronique à développer.	68
I.3.a.2 Détermination du procédé de lithographie	68
I.3.b Mise au point du procédé de gravure des guides.	74
I.3.b.1 Optimisation du procédé de gravure.	74
I.3.b.2 Détermination du procédé de gravure.	77
II Description détaillée de la fabrication.	79
II.1 Traitement de surface préalable de l'épitanie	79
II.2 Réalisation du masque en résine HSQ	80
II.3 Gravure des guides	82
II.4 Amincissement	82
II.5 Clivage	83
II.6 Conclusion	84
III Caractérisation des composants passifs	85
III.1 Mesure des pertes de propagation	85
III.1.a Analyse en champ proche	86
III.1.b Détermination des pertes par la méthode Pérot Fabry	86
III.1.c Conclusion	88
III.2 Mesure des pertes liées aux jonctions.	88
III.2.a Mesures en champ proche	88
III.2.b Mesures fibre à fibre	89
III.3 Mesure des pertes liées aux courbures.	89
III.3.a Mesures en champ proche	90
III.3.b Mesures fibre à fibre sur guides courbes.	91
III.4 Conclusion générale sur les caractérisations des composants passifs	92
Bibliographie du Chapitre II	93

CHAPITRE III : REALISATION ET CARACTERISATION DES STRUCTURES DE COMMUTATION	95
I Présentation des dispositifs	97
I.1 Rappel de l'épitaxie	97
I.2 Structures de commutateurs à réaliser	98
I.2.a Géométrie d'un dispositif élémentaire de commutation	98
I.2.b Différentes topologies d'électrodes	98
II Réalisation technologique	101
II.1 Vue d'ensemble du procédé technologique	101
II.2 Détails des étapes	103
II.2.a Etape 1 : réalisation des électrodes réalisant le contact P	103
II.2.a.1 Séquence métallique à déposer	103
II.2.a.2 Technique de dépôt	103
II.2.b Etape 2 : définition des guides.	106
II.2.c Etape 3 : gravure des couches p+	108
II.2.c.1 Gravure de l'InGaAs p+	108
II.2.c.2 Gravure de la couche d'InP p+	108
II.2.c.3 Résultats obtenus pour la réalisation des composants	110
II.2.d Etape 4 : définition des plots de report	112
II.2.e Etape 5 : définition du support du pont d'interconnexion métallique	113
II.2.e.1 Enduction de la résine	113
II.2.e.2 Réalisation des ouvertures	114
II.2.f Etape 6: définition du pont d'interconnexion métallique	117
II.2.f.1 Métallisation pleine plaque	117
II.2.f.2 Définition du pont	117
II.2.g Etape 7: obtention des ponts à air	117
II.2.h Etapes 8 et 9: finalisation de la fabrication	118
III Premier run : caractérisation	118
III.1 Caractérisation électrique	118
III.2 Emission spontanée par injection de porteurs	119
III.3 Mesures électro-optiques	120
III.3.a Méthode de caractérisation	120
III.3.b Analyse en champ proche	121
III.3.c Mesure fibre à fibre	122
III.4 Conclusion - Objectifs de la nouvelle réalisation technologique	123
III.4.a Conclusion	123
III.4.b Objectifs de la nouvelle réalisation technologique	123
III.4.b.1 Problème de la rugosité des parois des guides	123
III.4.b.2 Problème de clivage	125
IV Nouvelle réalisation technologique: caractérisation	125
IV.1 Comparaison des performances en fonction de l'écart inter-électrode	126
IV.1.a Caractérisation du commutateur de type A	127
IV.1.a.1 Mesure en champ proche :	127
IV.1.a.2 Mesure fibre à fibre	127
IV.1.b. Caractérisation du commutateur de type B	128
IV.1.b.1. Mesure en champ proche	128
IV.1.b.2 Mesure fibre à fibre	129
IV.1.c Caractérisation du commutateur de type C	130
IV.1.c.1 Mesure en champ proche	130
IV.1.c.2 Mesure fibre à fibre.	130
IV.1.d Comparaison des différentes topologies d'électrodes	131
IV.2 Comparaison des performances en fonction de la longueur d'électrode	132
IV.2.a Caractérisation du commutateur avec une longueur d'électrode de 600µm	132
IV.2.a.1 Mesure en champ proche	132
IV.2.a.2 Mesure fibre à fibre	133
IV.3 Conclusion	134
Bibliographie du Chapitre III	136

CHAPITRE IV : AUTRES DISPOSITIFS EN TECHNOLOGIE MICROGUIDE : STRUCTURES RESONANTES	139
I Structure résonante à micro-disque ou micro-anneau	141
I.1 Principe du filtre à micro-disque (ou micro-anneau)	141
I.2 Etat de l'art	142
I.3 Réalisation technologique des filtres optiques passifs	143
I.4 Caractérisation des filtres optiques passifs	145
I.4.a Filtre optique à micro-anneau	145
I.4.a.1 Le guide droit et l'anneau sont tangents	145
I.4.a.2 Gap de 100nm entre l'anneau et le guide droit	146
I.4.a.3 Conclusion	147
I.4.b Filtre optique à micro-disque	147
I.4.b.1 Le guide droit et le disque sont tangents	147
I.4.b.2 Gap de 100nm entre disque et guide droit	148
I.4.b.3 Conclusion	149
I.5 Accordabilité "tout optique" d'un filtre optique passif à micro-disque par irradiation laser à 980nm	150
[7]	150
I.5.a Etat de l'art et introduction	150
I.5.b Banc de caractérisation	150
I.5.c Résultats	151
I.5.c.1 Mesures	151
I.5.c.2 Calcul de la puissance lumineuse absorbée par la couche de quaternaire	152
I.5.c.3 Calcul de la variation d'indice induite par irradiation laser	152
I.5.c.4. Origine de la variation d'indice : effet thermique ou injection de porteurs?	153
I.6 Accordabilité électrique d'un filtre optique à micro-disque	154
I.7 Conclusion	155
II Filtres optiques de type stub	155
II.1 Principe du filtre optique de type stub	155
II.2 Réalisation technologique des stubs métallisés	157
II.2.a Réalisation des stubs	157
II.2.b Métallisation des stubs	158
III Conclusion	161
Bibliographie du Chapitre IV	162

Table des matières

CONCLUSION GENERALE	165
ANNEXE 1 : PRINCIPE DE LA GRAVURE RIE-ICP	171
ANNEXE 2 : PRINCIPE DES METHODES DE CARACTERISATION UTILISEES	175
PARCOURS UNIVERSITAIRE	179
LISTE DES PUBLICATIONS ET RAPPORTS DE CONTRAT	181

Liste des abréviations utilisées

- **BPM** : Beam Propagation Method ; Méthode des faisceaux propagés
- **DOS** : Digital Optical Switch; Commutateur optique digital
- **EDI** : Eau DéIonisée
- **EJM** : Epitaxie par jets moléculaires (= MBE: Molecular Beam Epitaxy: GSMBE: Gas Source MBE)
- **FDTD** : Finite Difference Time Domain; Différences finies dans le domaine temporel
- **FIB** : Focus Ion Beam; Faisceau d'ions focalisés (l'équipement FIB disponible au laboratoire est aussi équipé d'un canon à électrons (fonction MEB), ce qui explique la dénomination "photographie réalisée au FIB" pouvant être rencontrée dans ce manuscrit).
- **FOx®** : Flowable Oxyde: Dénomination commerciale de la résine HSQ (Dow Corning)
- **GSMBE**: voir EJM
- **HF** : HydroFluoric acid; Acide Fluorhydrique
- **HMDS** : HexaMethylDiSilazane ; Promoteur d'adhérence déposé à la surface du substrat avant la résine photosensible pour permettre une meilleure adhérence de celle-ci.
- **HSQ** : HydrogenSilsesQuioxanes ; Résine photosensible négative.
- **ICP**: Inductively Coupled Plasma ; Plasma à couplage inductif : plasma à haute densité qui est utilisé en particulier pour la gravure des semi-conducteurs.
- **IPA** : IsoPropylique Alcohol ; Alcool isopropylique
- **KI** : Iodure de potassium ; utilisé pour la gravure chimique de l'or.
- **MBE**: voir EJM
- **MEB** : Microscope Electronique à Balayage
- **MIBK** : MéthylIsoButylKétone ; Révélateur des résines EL et MMA.
- **MMA** : MethylMethAcrylate ; Résine photosensible positive
- **NID**: Non Intentionnellement Dopé
- **PMGI** : PolyMethylGlutarImide ; polymère et résine photosensible positive
- **PML** : Primary Matched Layer ; Couches absorbantes utilisées aux limites des fenêtres de calcul pour simuler un espace infini.
- **PMMA** : PolyMethylMethAcrylate ; Résine positive

Liste des abréviations utilisées

- **RIE** : Reactive Ion Etching ; Gravure par ions réactifs
- **Rpm** : Rotation per minute: unité de vitesse (rpm/s: rpm per second: unite d'accélération)
- **SAL** : Résine photosensible négative à amplification chimique (Shipley)
- **sccm** : Standard Centimeter Cube per Minute. Unité de débit de gaz : 1 sccm correspond à un débit de 1cm³ de gaz par minute à 0°C et à la pression atmosphérique
- **SU 8** : Dénomination commerciale d'une résine photosensible négative (MicroChem)
- **TM** : polarisation Transverse Magnétique (Champ E perpendiculaire aux plans des couches épitaxiées)
- **TE** : polarisation Transverse Electric (Champ E parallèle aux plans des couches épitaxiées)
- **2D** : 2 dimensions
- **3D** : 3 dimensions

INTRODUCTION

Etat de l'art sur la commutation optique dans les dispositifs d'optique intégrée.

L'objectif de notre étude est d'évaluer l'apport des technologies de guides optiques à fort confinement pour les structures de commutation. Mais avant de voir les objectifs et les intérêts de cette nouvelle structure, il semble intéressant de passer en revue les différentes technologies de commutation optique disponibles. Nous nous intéressons particulièrement à la commutation optique induite par variation d'indice qui est à la base de notre étude.

Différents effets physiques sont utilisés pour modifier la trajectoire d'un faisceau optique, à l'intérieur d'une structure d'optique intégrée, en modifiant localement l'indice des matériaux la constituant: thermo-optique, acousto-optique, électro-optique. Nous en donnons ci-après l'état des performances.

L'effet thermo-optique traduit la dépendance d'un matériau à la température. Par l'intermédiaire du coefficient de dilatation, un gradient de température provoque une déformation locale du réseau cristallin; il en résulte une variation d'indice, typiquement de l'ordre de $1.10^{-5}/^{\circ}\text{C}$.

Une combinaison de matériaux très utilisée dans la conception de commutateurs thermo-optiques est la silice sur silicium. En 2006, Watanabe *et al* [1] présente une matrice 2*2 en silice sur silicium basée sur des interféromètres de Mach-Zehnder à très faible consommation; une diaphotie de -40dB pour une consommation de 30mW est rapportée. En 2007, M.P Earnshaw *et al* [2] réalise en silice sur silicium un commutateur thermo-optique présentant une diaphotie de -30dB pour une consommation de 25mW et un temps de commutation de 20ms.

L'effet thermo-optique est également utilisé sur des composants à base de polymères. En 2000, Ooba *et al* [3] présente un commutateur de type DOS (Digital Optical Switch) sur polymère; une diaphotie de -40dB pour une consommation de 400mW est rapportée avec un temps de commutation de 6ms. En 2006, Wang *et al* [4] présente une matrice 4*4 basée sur la commutation par réflexion interne totale sur polymère; une diaphotie de -23,3dB pour une consommation de 96mW et un temps de commutation de 2ms sont rapportés.

L'utilisation de l'effet thermo-optique pour la commutation est limité par le temps nécessaire au matériau pour arriver à l'équilibre thermique et ne permet donc pas d'envisager

des temps de commutation inférieurs à la milliseconde. La taille des commutateurs thermo optique est également un inconvénient: la matrice 4 x 4 de Wang mesure 39,3mm.

L'effet acousto-optique traduit la modification de l'indice de réfraction d'un matériau par l'application d'une onde acoustique. Les commutateurs acousto-optiques sont réalisés sur des matériaux piézo-électriques. Typiquement la variation d'indice obtenu est de 1.10^{-5} pour une tension appliquée de 1V.

Le dispositif présenté dans [5] est un commutateur acousto-optique réalisé sur LiNbO_3 . La variation d'indice est induite par l'application d'une onde acoustique. Une diaphotie de -32dB et un temps de commutation de 300ns sont rapportés.

L'effet électro-optique traduit la modification de l'indice d'un matériau semi conducteur par injection ou désertion de porteurs (effet Pockels, Kerr et plasma). Divers commutateurs ont été réalisés sur de nombreux matériaux tels que le niobate de lithium, les matériaux III-V (AsGa et InP), les polymères...

Plus particulièrement, l'effet plasma sur les matériaux III-V se traduit par une diminution de l'indice de réfraction du matériau; celle-ci est provoquée par l'augmentation de la densité d'électrons dans cette région. La polarisation en direct d'une diode PIN entraîne l'injection de porteurs dans la zone intrinsèque; la densité de ceux-ci est alors plus élevée; la diminution d'indice induite est proportionnelle à la variation de la densité de porteurs. L'utilisation de l'effet plasma pour la commutation est donc possible dès lors que le cœur du guide optique est dans la zone intrinsèque de la diode. Pour les semi-conducteurs, la variation d'indice obtenue est typiquement comprise entre 10^{-4} et 10^{-2} [6]. Pour la filière III-V, les premiers commutateurs électro-optiques ont été réalisés en AsGa: Inoue *et al* [7] propose un commutateur sur AsGa présentant une diaphotie de -22dB pour une tension appliquée de 22,5V. En filière InP, nous pouvons citer les travaux de J.F. Vinchant *et al* [8]: il propose un commutateur électro optique sur InP présentant une diaphotie de -20dB pour un courant injecté de quelques dizaines de milliampères. Plus récemment, K. Blary *et al* [9] propose un commutateur présentant une diaphotie de -26dB pour un courant injecté de 20mA et un temps de réponse de 4ns.

D'autres techniques sont aussi utilisées pour la commutation optique, ne faisant pas appel à la modification d'indice, mais plutôt basées sur une approche plus "mécanique"

(MOEMS: Micro-Opto-ElectroMechanical Systems); nous pouvons citer les commutateurs à base de miroirs mobiles ou de bulles (par exemple, Agilent).

Historique de la thématique au sein du laboratoire

Depuis maintenant plus d'une dizaine d'années, la commutation optique par effet électro-optique sur InP représente un thème de recherche du groupe Optoélectronique de l'ITEMN. Ces études, initiées à l'époque par une collaboration avec Dassault Electronique, sont actuellement menées en collaboration étroite avec Thales Systèmes Aéroportés.

L'application de cette technologie est la synthèse de retard de signaux hyperfréquences et, dans un cadre plus général, la reconfigurabilité d'architectures optiques de transport et distribution de porteuses microondes modulées ou non. Le transport de ces porteuses utilise une modulation analogique du faisceau optique. Leur domaine fréquentiel est étendu (plusieurs dizaines de gigahertz) et nous sommes donc résolument dans le monde des applications optique-microondes.

Dans le cadre des transmissions optiques numériques, de tels systèmes de commutation (rapides et à large bande passante) existent depuis longtemps via l'utilisation d'amplificateurs optiques à semiconducteurs qui sont alors utilisés en temps que "portes" optiques commandées électriquement. Pour ces applications, les notions de bruit supplémentaire ramené (par l'émission spontanée amplifiée au sein de l'amplificateur) et de puissance de commande sont, en première approche, secondaires de par la modulation digitale utilisée et l'utilisation fixe de ces équipements.

En revanche, concernant les systèmes opto-microondes, ces critères peuvent rapidement devenir bloquants pour les applications envisagées:

- le caractère analogique de l'information transmise requiert une dynamique (et donc un rapport signal/bruit) la plus élevée possible, toute source de bruit supplémentaire dans le trajet optique est donc à proscrire afin de conserver cette dynamique la plus élevée possible,

- dans le cas particulier de la synthèse de retard, prévue pour être utilisée dans des systèmes d'antennes à balayage électronique à formation de faisceaux optiques, le nombre de commutateurs peut être très important et, qui plus est, le système complet peut être embarqué; il est alors crucial de minimiser la consommation électrique.

Ces quelques points ont donc initié les travaux de recherche sur la commutation de faisceau optique appliquée aux signaux microondes par la thèse de I. Cayrefourcq [10, 11] vers 1995. Un premier type de commutateur optique sur InP basé sur la réflexion interne

totale (TIR: Total Internal Reflexion) est étudié et réalisé présentant une diaphotie inférieure à -20dB. Ce type de commutateur est ensuite abandonné principalement à cause d'une consommation trop importante (100mA) au profit d'une topologie originale baptisée "cascade" qui est basée sur des phénomènes de couplage de mode ou d'interférence successives (EODC: Electro Optical Directional Coupler). Il propose un commutateur cascade multibloc (les guides passifs et actifs sont séparés par gravure) présentant des caractéristiques optiques proches de celles du commutateur TIR mais ayant une plus faible consommation.

Ce travail a été poursuivi par Y. Hernandez [12] qui compléta cette étude en réalisant un commutateur cascade monobloc; il obtint une diaphotie de -15dB pour une consommation de 50mA. Toutefois, les performances du commutateur cascade se sont avérées très sensibles au procédé de fabrication technologique. Ses travaux se sont alors orientés vers les commutateurs de type DOS dont les premiers démonstrateurs avaient, par ailleurs, été reportés en 1993 par Alcatel [8] pour des applications en télécommunications optiques numériques.

Les travaux de Y. Hernandez ont été poursuivis par ceux de K. Blary [13] qui a montré la possibilité d'obtenir une faible diaphotie (-28dB) pour une relativement faible consommation (25mA) sur des commutateurs DOS 1→2. Des diaphoties de l'ordre de -20dB ont également été mesurées sur des matrices 1→4 ou 2→2 réalisées à partir de ces composants.

L'étude de ces commutateurs de type DOS s'est poursuivie par les travaux de thèse de M. Zegaoui [14]. Il propose une optimisation de la géométrie du DOS et obtient une diaphotie de -40dB pour une consommation d'environ 50mA.

A l'heure actuelle, N. Choueib [15] poursuit ce travail par notamment une optimisation de la topologie des zones passives de recombinaison de faisceau et plus généralement d'une matrice de commutation.

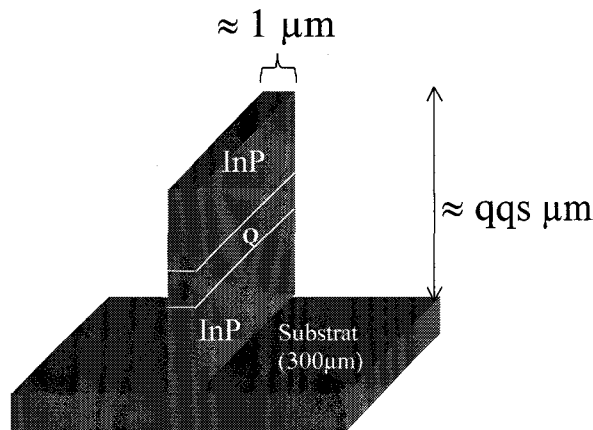
Parallèlement à ces études sur la commutation optique, une nouvelle thématique axée sur de la nanophotonique à base de fils optiques avait commencé au laboratoire vers les années 2002. Notamment les travaux de thèse de A. Beaurain [16] relatent les premières réalisations de microguides droits (fils optiques) passifs. Un projet interrégional de type Interreg III France-Wallonie "PREMIO" avait commencé en Janvier 2004 sur l'utilisation de ces structures à fils optiques dans les systèmes de filtrage pour télécommunications optiques.

Introduction

Dans ce contexte, mon activité a débuté en Septembre 2004 et avait pour objectif de réaliser les composants sujets d'une Etude Exploratoire DGA, démarrée en Septembre 2003, qui consistaient à "mixer" les deux thématiques précédemment énoncées, commutation optique et nanophotonique. La nanophotonique, notamment grâce à son confinement optique important, laissait entrevoir des possibilités de compacité et de faible puissance de commande qui sont des atouts importants dans la mise en œuvre des composants intégrés de commutation. Néanmoins, ce fort confinement pouvait tout aussi bien être un obstacle prohibitif à la réalisation de structures de commutation et cette étude avait pour but d'en démontrer la faisabilité. Mon travail a donc totalement couvert les activités de l'Etude Exploratoire DGA mais aussi, en partie, celles du projet "PREMIO".

Objectifs du travail

L'objectif de mon travail est donc d'évaluer l'apport des technologies de guides optiques à fort confinement pour les structures de commutation. Le composant basique à cette technologie est un microguide optique (filère matériau InP) dont la structure est présentée ci-dessous:



Dans ces structures, un important confinement latéral est obtenu par gravure profonde du matériau, le confinement vertical est inchangé. L'étude des structures microguides passives a débuté à l'IEMN par les travaux de thèse d'A. Beurain [16, 17]. A la suite de ces travaux, S.Dupont *et al* [18] propose en 2004, des structures microguides de largeur $0,5 \mu\text{m}$ présentant des pertes de $4,2 \text{dB/mm}$ à la longueur d'onde de $1,55 \mu\text{m}$.

Les structures à bases de micro-guides optiques, grâce à leur fort confinement, semblent être prometteuses quant à la densité d'intégration de fonctions optiques et donc à

l'intégration de matrices de commutation, cependant aucun effet de commutation n'a été, à ce jour, montré ni même modélisé. Quelques éléments de réflexion peuvent être avancés:

- quelques résultats expérimentaux internationaux semblent montrer que l'obtention de diviseurs de puissance en Y (structures DOS passives, sans électrodes) est possible avec des angles d'ouverture de plusieurs dizaines de degrés comparativement à quelques dixièmes pour les structures d'optique intégrée classique!

- les pertes de propagation reportées dans les quelques résultats expérimentaux laissent entrevoir des valeurs élevées de plusieurs dizaines de dB au centimètre. Une majeure partie de celles-ci devrait être due au procédé de gravure utilisé pour leur fabrication. Une étude technologique approfondie est donc nécessaire pour valider cet état de fait notamment au niveau de la définition obtenue par les procédés de lithographie et de la rugosité de surface amenée par le procédé de gravure. Toutefois, ces pertes de propagation, à première vue élevées, sont à modérer vis à vis de la taille réduite (d'environ un facteur 10) que devraient avoir les composants dans cette technologie,

- les problèmes d'injection optique, déjà cruciaux pour l'optique intégrée classique, le seront encore plus ici. Des structures d'adaptation de modes, déjà envisagées dans les travaux précédents devront être étudiées certainement parallèlement à des solutions alternatives d'injection optique,

- aucun composant actif n'a jusque maintenant été fabriqué dans cette technologie. Les effets de surface, déjà présents sur les composants d'optique intégrée classique vont ici être exacerbés par les dimensions ultimes des composants.

De ces quelques éléments et aussi des conclusions amenées par les études en optique intégrée classique, il semblerait que les structures de type DOS soient les plus à même d'apporter des résultats concluants.

Mon mémoire est scindé en quatre chapitres:

Le premier chapitre est consacré à la conception d'un commutateur 1→2 sur microguide. Nous commençons par présenter les outils de modélisation utilisés dans cette étude. Nous présentons ensuite les modélisations de composants passifs intervenant dans la conception de commutateurs: guides droits, guides courbes et jonctions Y. Nous proposons également une structure d'adaptation de mode permettant de limiter les pertes d'insertion dans le composant. Ensuite, par le biais de modélisations, nous proposons une structure originale de commutateur optique de type DOS sur microguides.

Introduction

Le deuxième chapitre est consacré à la réalisation technologique et à la caractérisation des structures microguides passives. Du point de vue technologique, une attention particulière est portée aux étapes de lithographie et de gravure pour limiter les rugosités de surface, principale origine des pertes de propagation. La caractérisation des structures passives contribuera à valider les potentialités de la filière microguide pour la réalisation de composants photoniques intégrés.

Le troisième chapitre s'attache à l'étude des structures actives. Nous abordons dans une première partie le procédé technologique complet de réalisation du commutateur optique sur InP. Nous détaillons en particulier le verrou technologique que constitue le procédé de reprise des contacts sur des composants fortement non planaires. Nous présentons dans une deuxième partie une amélioration du procédé de réalisation technologique tenant compte des défauts observés lors de la première réalisation. Les caractérisations électriques mettront en évidence le fonctionnement de type diode du composant et les caractérisations optiques à la longueur d'onde de $1,55\mu\text{m}$ donneront les premiers résultats en terme de performance de commutation sur microguide.

Le quatrième chapitre semble s'éloigner des aspects de commutation. En effet, la technologie microguide développée est adaptée à la réalisation de deux types de structures de filtres optiques (filtres à stubs ou à microdisque). Nous présentons également les mesures d'accordabilité tout-optique réalisée sur les filtres optiques à microdisque. Nous voyons donc que de telles structures peuvent aussi être assimilées à des structures de commutation à la condition express de travailler à longueur d'onde fixe (celle de la résonance du filtre) - les structures DOS ayant une bande passante optique large.

Bibliographie de l'introduction

- [1] K. Watanabe, Y. Hashizume, M. Kohtoku, M. Itoh, Y. Inoue
Optical Fiber Communication Conference and National Fiber Optics Engineers, 2006
"Ultra low power consumption silica-based PLC switch using tapered narrow ridge structures"

- [2] M. P Earnshaw, M. A Cappuzzo, E. Chen, L. Gomez, A. Wong-Foy
Electronics Letters, 2007, vol. 43, n°7
"Ultra-low power thermo-optic silica-on-silicon waveguide membrane switch"

- [3] N. Ooba, S. Toyoda, T. Kurihara
Japanese Journal of Applied Physics, 2000, vol.39, pp 2369-71
"Low crosstalk and low loss polymeric 1 * 8 digital optical switch"

- [4] X. Wang, B. Howley, M.Y. Chen, R.T. Chen
IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2006, vol.12, n°5, pp 997-00
"4 * 4 nonblocking polymeric thermo-optic switch matrix using the total internal reflection effect"

- [5] D. Enguang, W. Deming, X. Anshi
Optical Fiber Communication Conference, Baltimore, USA, 2000, vol.2, pp 139-41
"High speed integrated acousto-optic switch with high extinction ratio"

- [6] B.R. Bennet, R.A. Soref, J.A. Del Alamo
IEEE Journal of Quantum Electronics, 1990, vol. 26, n°1, pp 113-22
"Carrier-induced change in refractive index of InP, GaAs and InGaAsP"

- [7] H. Inoue, K. Hiruma, K. Ishida, H. Sato, H. Matsumura
Applied Optics, 1986, vol.25, n°9, pp 1484-90
"Switching characteristics of GaAs directional coupler optical switches"

- [8] J.F. Vinchant, M. Renaud, M. Erman, J.L. Peyre, P. Jarry, P. Pagnod-Rossiaux
IEE Proceedings journal, 1993, vol.140, n°5, pp 301-07
"InP digital optical switch: key element for guided-wave photonic switching"
- [9] K. Blary, S. Dupont, J.P. Vilcot, F. Mollot, D. Decoster, J. Chazelas
Electronics Letters, 2002, vol.38, n°25, pp 1697-99
"DOS optical switch for microwave optical links based applications"
- [10] I. Cayrefourcq
Thèse, Université de Lille1, 6 novembre 1998
"Conception et fabrication de matrices de commutation optiques en vue de la réalisation de modules de synthèse de retards temporels."
- [11] I. Cayrefourcq, M. Schaller, C. Fourdin, J.P. Vilcot, J. Harari, D. Decoster
IEE Proceedings Optoelectronics, 1998, vol. 145, n°1, pp 77-82
"Optical switch design for true time delay array antenna"
- [12] Y. Hernandez
Thèse, Université de Lille1, 18 décembre 2001
"Etudes technologiques, expérimentales et par simulation pour la commutation optique sur InP"
- [13] K. Blary
Thèse, Université de Lille 1, 5 décembre 2003
"Matrices de commutation optiques sur InP"
- [14] M. Zegaoui
Thèse, Université de Lille 1, 27 mai 2005
"Commutateurs électro-optiques à haute diaphotie sur InP"
- [15] N. Choueib
Thèse, Université de Lille 1, 2008
A paraître

- [16] A. Beaurain
Thèse, Université de Lille 1, 4 décembre 2003
"Etude de fonctions passives à base de nanostructures photoniques"
- [17] A. Beaurain, S. Dupont, H.W. Li, J.P. Vilcot, C. Legrand, J. Harari, M. Constant, D. Decoster
Microwave and Optical Technology Letters, 2003, vol.40, n°3, pp 216-18
"Characterization and fabrication of InGaAsP / InP deep-etched micro-waveguides"
- [18] S. Dupont, A. Beaurain, P. Miska, M. Zegaoui, J.P. Vilcot, H.W. Li, M. Constant, D. Decoster, J. Chazelas
Electronics Letters, 2004, vol.40, n°14
"Low-loss InGaAsP/ InP submicron optical waveguides fabricated by ICP etching"

Chapitre I

Conception des structures passives et actives en filière microguide

La première partie de ce chapitre est consacrée à la présentation des outils de modélisation utilisés pour la conception des composants. Une suite logicielle commerciale est utilisée et, après une brève description des algorithmes disponibles, nous en détaillerons plus particulièrement les conditions d'utilisation.

Puis la conception traite successivement de celle des structures passives et actives. Les structures microguides passives comprennent les guides droits, courbes, adaptateurs de mode... qui interviennent ensuite dans la réalisation d'un commutateur optique de type DOS. En particulier, une nouvelle topologie de commutateur électro-optique adapté à la filière microguide est présentée. Tout au long de ces modélisations, nous nous sommes efforcés de prendre en compte les différentes données (principalement dimensionnelles) liées à la technologie, de manière à ne pas déboucher sur une conception complexe si c'est infaisable. Pour cette première réalisation, notre but était de démontrer expérimentalement la fonction de commutation dans cette filière.

I Outils de modélisation

I.1 Principe des méthodes utilisées

La propagation de la lumière dans les structures microguides est modélisée grâce à une suite logicielle de chez Optiwave [1], et en particulier les modules OptiBPM et OptiFDTD. Ces codes de calcul, comme leur nom l'indique, reposent respectivement sur la méthode des faisceaux propagés, dite BPM (pour "Beam Propagation Method") et sur la méthode FDTD (pour "Finite Difference Time Domain"). Les paragraphes suivants n'ont ni pour but ni pour prétention de détailler ces méthodes et algorithmes de calcul, qui sont par ailleurs utilisés depuis longtemps dans le domaine de la conception en optique intégrée et que l'effervescence maintenant enterrée du domaine des télécommunications optiques en a suscité de nombreuses déclinaisons commerciales (Photon Design, Optiwave, Rsoft,..), mais d'en expliquer simplement les principes en soulignant toutefois les attentions particulières à apporter lors de l'utilisation de ces outils de modélisation.

I.1.a La méthode des faisceaux propagés ("BPM")

Parmi les méthodes numériques utilisées pour simuler la propagation dans des guides d'onde optiques, la méthode des faisceaux propagés, ("BPM") est parmi les plus utilisées et les plus anciennes. Cette méthode permet de calculer l'évolution d'un mode optique incident donné lors de sa propagation dans une structure. Ce calcul est effectué en divisant la structure, dans la direction de propagation, en tranches de largeur dz et en résolvant les équations de propagation dans chaque tranche, on obtient alors le champ en $z+dz$ à partir du champ connu en z (Figure I.1). Dans cette approche, la notion de temps est sous-jacente et directement reliée au déplacement spatial le long de la direction de propagation.

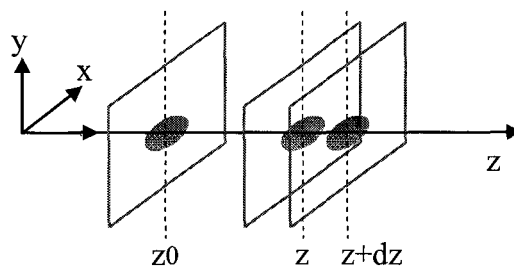


Figure I.1: Principe de la BPM

En toute rigueur, les équations de propagation à résoudre sont vectorielles mais en pratique, certaines approximations sont faites pour les simplifier et accélérer ainsi grandement le temps de calcul. Différentes versions de la méthode BPM existent alors; elles se caractérisent par les approximations considérées : paraxiale, grand angle, scalaire et vectorielle, ainsi que par la technique de résolution des équations de propagation utilisée: transformée de Fourier [2, 3], différences finies [4] ou éléments finis [5]. Le code de calcul BPM que nous avons employé est basé sur un algorithme utilisant la méthode des différences finies ainsi que les approximations scalaire et paraxiale. Cette méthode permet de considérer des structures à fort contraste d'indice.

I.1.a.1 L'approximation scalaire

L'approximation scalaire (par opposition à l'approche vectorielle) consiste à supposer qu'il n'y a pas de couplage entre les différentes composantes du champ. On supposera donc que si un faisceau polarisé dans une certaine direction entre dans une structure de guide optique, il reste polarisé dans la même direction tout au long de la propagation.

I.1.a.2 L'approximation paraxiale

L'approximation paraxiale (par opposition à l'approche grand angle) suppose que l'angle d'inclinaison du champ par rapport à l'axe de propagation est suffisamment petit et que les variations d'amplitude du champ pendant la propagation sont également faibles.

I.1.a.3 Principe de la BPM basée sur les différences finies

En tenant compte des approximations scalaire et paraxiale, l'équation de Fresnel s'écrit:

$$\overline{\Delta_{x,y}} E(x, y, z) - 2i\beta \frac{\partial E(x, y, z)}{\partial z} + (k_0^2 n^2(x, y, z) - \beta^2) E(x, y, z) = 0$$

où β est la constante de propagation et k le vecteur d'onde. La méthode des différences finies permet d'exprimer les dérivées d'un champ en un point par rapport aux valeurs de ce champ aux points voisins ; l'équation de Fresnel dans une structure discrétisée selon l'axe de propagation devient:

$$2i\beta \frac{E(x_l, y_m, z_{n+1}) - E(x_l, y_m, z_n)}{z_{n+1} - z_n} = \overline{\Delta_{x,y}} E(x_l, y_m, z_n) + (k_0^2 n^2(x_l, y_m, z_n) - \beta^2) E(x_l, y_m, z_n) = 0$$

avec $l = 1, 2, \dots, L$ (la largeur de la fenêtre de calcul est discrétisée en L points), $m = 1, 2, \dots, M$

(la hauteur de la fenêtre de calcul est discrétisée en M points) et n le pas de propagation selon z . Ainsi le champ en « $n+1$ » est déterminé à partir du champ connu au pas précédent « n ».

Cette méthode est relativement peu coûteuse en temps de calcul et en ressource informatique. Cette méthode nécessite des conditions de simulation rigoureuses que nous détaillerons dans le paragraphe suivant.

I.1.b La méthode des différences finies dans le domaine temporel ("FDTD")

La méthode FDTD (pour "Finite Difference Time Domain") est une méthode pour résoudre directement les équations de Maxwell sur une structure quelconque. Cette approche n'utilise pas d'approximation paraxiale comme la BPM et permet donc de considérer des changements brutaux de direction de l'onde propagée. La résolution des équations est réalisée dans le domaine temporel. L'inconvénient majeur de cette méthode réside dans son principe même: le calcul de toutes les composantes du champ en tout point de la structure nécessite des ressources informatiques et des temps de calcul très importants. L'avantage certain en est que toutes les structures sont potentiellement modélisables: virages à 90° , résonateurs en anneau,..., les aspects temporel et spatial étant ici décorrélés.

I.1.b.1 Principe de base de la méthode

La méthode FDTD repose sur une résolution directe des équations de Maxwell sous leur forme différentielle. Dans un repère cartésien (celui de la Figure I.1), ces équations s'écrivent de la façon suivante :

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \quad (5)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_{yz}}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) \quad (6)$$

où μ_0 est la perméabilité du vide, $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ est la permittivité du diélectrique où l'onde lumineuse se propage.

Les variations spatiales des composantes du champ magnétique \vec{H} régissent l'évolution temporelle des composantes du champ \vec{E} et inversement.

La réduction de ce système dans un plan (xOy) permet de diviser ce système en deux sous systèmes indépendants. Le premier fait intervenir les composantes de champ E_x , E_y et la composante normale du plan H_z ; ce cas est généralement appelé polarisation TM (pour Transverse Magnétique). Le second fait intervenir les composantes de champ restantes H_x , H_y et E_z , ce cas est généralement appelé polarisation TE (pour Transverse Electrique).

I.1.b.2 Cas Transverse Magnétique à deux dimensions (2D TM)

Dans un souci de clarté, nous ne présentons ici que la méthode FDTD dans le cas 2D TM. Les équations se limitent donc aux équations 3, 4 et 5. Des permutations circulaires sur les composantes de champ permettent d'obtenir les équations pour le cas TE.

La résolution de ce système d'équations s'appuie sur une discrétisation spatiale et temporelle aux différences finies. L'espace est ainsi discrétisé par un maillage de pas Δx et Δz . L'espace temps est aussi discrétisé avec un pas Δt . Les dérivées temporelles et spatiales des fonctions E_x , E_y et H_z sont approchées à partir de leur développement de Taylor au second ordre. L'algorithme de Yee propose une discrétisation des composantes de champ \vec{E} sur des grilles décalées par rapport à celle du champ \vec{H} ; la position des composantes de champ sur leur grille dans le cas 2D TM est présentée en Figure I.2. Un décalage temporel d'un demi pas est également introduit entre le calcul des champs \vec{E} et des champs \vec{H} .

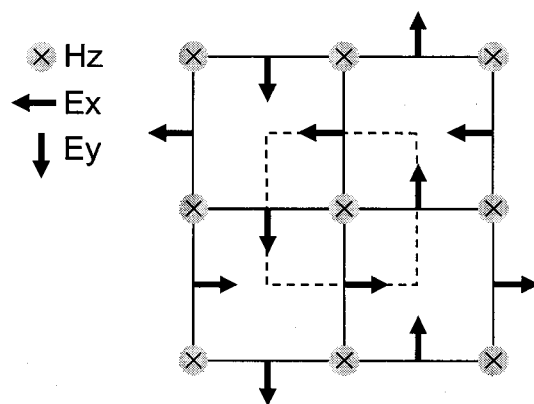


Figure I.2: Position des composantes des champs électrique et magnétique dans l'espace discrétisé selon la méthode de Yee

Les équations discrétisées dans l'espace et dans le temps permettent donc de calculer la valeur d'une composante de champ en un point de la grille (de maillage) à un instant $t + \Delta t$ en fonction :

- (i) de cette même composante au temps précédent t
- (ii) des valeurs des champs voisins

L'évolution des champs \vec{E} et \vec{H} avec le temps décrit la propagation de l'onde lumineuse dans la structure considérée.

Comme pour la BPM, la précision des résultats obtenus par FDTD repose sur des conditions de simulation rigoureuses que nous présentons ci-dessous.

I.2 Conditions de simulation

Dans le cas de la méthode des faisceaux propagés ou dans le cas de la méthode FDTD, l'échantillonnage de la fenêtre de calcul doit être soigneusement déterminé pour garantir la stabilité et la convergence des résultats. Des conditions doivent également être fixées aux limites des fenêtres de calcul.

I.2.a Discrétisation du domaine spatial (cas de la BPM et de la FDTD)

Pour la BPM et la FDTD, le domaine spatial est discrétisé dans les trois directions x , y , z , z étant la direction de propagation. Les pas de discrétisation Δx , Δy , Δz doivent être choisis largement inférieurs à la longueur d'onde propagée. Typiquement, on choisit ces valeurs de manière à vérifier la relation (7).

$$\min(\Delta x, \Delta y, \Delta z) \leq \frac{\lambda}{10n_{\max}} \quad (7)$$

Nous travaillons à la longueur d'onde $\lambda = 1,55\mu\text{m}$. Le matériau de plus fort indice considéré dans nos structures est le quaternaire InGaAsP de longueur d'onde de coupure $\lambda_c = 1,3\mu\text{m}$ présentant un indice optique égal à 3,42. Il s'ensuit le choix: $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 20\text{ nm}$.

Nous nous proposons maintenant d'illustrer l'importance de la discrétisation spatiale sur la précision des résultats avec l'étude de la propagation optique dans un guide courbe de rayon de courbure $5\mu\text{m}$.

Dans un premier temps, le pas de discrétisation spatiale est choisi égal à 100nm. Cette valeur ne vérifie pas la relation (7). Sur la Figure I.3, nous observons l'évolution du faisceau dans un guide courbe de largeur 800nm et de rayon $5\mu\text{m}$ défini avec ce maillage peu précis. Le guide est décrit par des "marches d'escalier" de 100nm. Cette "rugosité numérique" non intentionnelle vient fortement perturber la propagation et entraînera une erreur importante sur les résultats, qui plus est sur des structures plus complexes comme celles des commutateurs.

En choisissant maintenant un pas de discrétisation spatiale de 20nm, la relation (7) est vérifiée. Sur la Figure I.4, nous observons la propagation dans le même guide courbe défini avec ce maillage plus fin. Le guide courbe est décrit plus précisément, le faisceau est beaucoup moins perturbé.

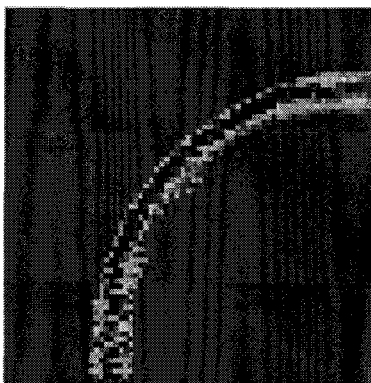


Figure I.3: Propagation dans un guide courbe avec un pas spatial de 100nm

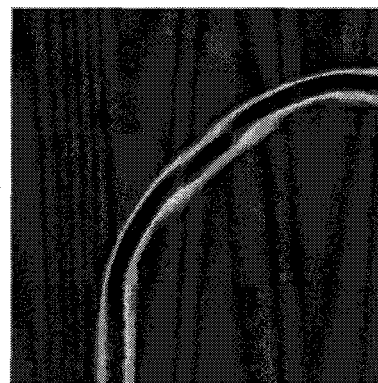


Figure I.4: Propagation dans un guide courbe avec un pas spatial de 20nm

On peut néanmoins remarquer que même en utilisant un pas de discrétisation de 20nm, une "rugosité numérique" non intentionnelle persiste. Un maillage plus fin est certes possible mais demande des capacités de calcul très importantes ainsi que des temps de calcul du même

acabit. Toutefois, la réalisation technologique des guides optiques montrera qu'une certaine rugosité existe sur les parois des guides gravés; le maillage informatique donne alors une première approche à la prise en compte de celle-ci en créant "involontairement" cet effet. Sa principale limite en est la périodicité des défauts simulés qui est, de loin, reproduite en réalité.

I.2.b Discrétisation dans le domaine temporel (cas de la FDTD)

La condition de stabilité de la méthode FDTD porte à la fois sur la discrétisation de l'espace et sur la discrétisation du temps. Le pas spatial est déterminé comme décrit précédemment. Le pas temporel assurant la stabilité des résultats est déterminé en utilisant la condition de Courant Friedrichs Levy (CFL). Pour les modélisations en trois dimensions, cette condition est donnée par la relation (8), où v est la vitesse de l'onde lumineuse dans le milieu étudié.

$$\Delta t \leq \frac{1}{v \sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2}}} \quad (8)$$

Nous obtenons donc un pas temporel $\Delta t \approx 10^{-17}$ s pour satisfaire cette condition.

I.2.c Conditions aux limites

Les ressources informatiques étant finies, il est nécessaire de restreindre spatialement le domaine de calcul. Ceci doit être fait de la manière la plus judicieuse possible: trop petit, le résultat sera faussé et trop grand, on augmentera le besoin en ressources nécessaires à la modélisation avec en prime le risque d'obtenir un "plantage" au beau milieu d'un processus de simulation. Il faut donc définir les conditions aux limites de la fenêtre de calcul, conditions telles que les ondes arrivant sur cette limite soient le moins possible réfléchies, simulant ainsi une propagation dans un milieu non borné. Sans cette précaution, les ondes réfléchies viendraient perturber les ondes propagées, ce qui serait néfaste pour la précision des résultats. Le logiciel de modélisation que nous utilisons permet de définir les conditions aux limites en fonction de la simulation menée.

Pour illustrer l'importance de ces conditions aux limites sur la précision des résultats, nous proposons un exemple de propagation d'un mode à profil gaussien entrant avec un angle d'incidence de 45° dans une fenêtre bornée par deux types de conditions.

Une première solution est de borner la fenêtre de calcul par les conditions aux limites de Dirichlet (ou conditions homogènes). Nous observons la propagation du mode sur la Figure I.5. Le faisceau incident sur le bord de la fenêtre est réfléchi. L'onde réfléchie peut alors venir perturber fortement le comportement de la structure étudiée.

La seconde solution consiste à utiliser des PMLs (Perfectly Matched Layers) [6,7] pour borner la fenêtre de calcul. Nous observons alors sur la Figure I.6 la propagation du mode. Le faisceau incident sur le bord sort virtuellement de la fenêtre en ne présentant aucune réflexion parasite. Ce type de conditions aux limites est le mieux adapté pour l'étude de la propagation guidée dans nos structures. Il faut toutefois prendre garde à ne pas dimensionner la fenêtre de calcul trop "juste" de manière à ne pas écarter ainsi une partie du champ qui serait important dans le fonctionnement de la structure. La précision des résultats dépend principalement du nombre de couches PML utilisé pour borner la fenêtre. Un nombre important empêchera toute réflexion mais augmentera le temps de calcul.

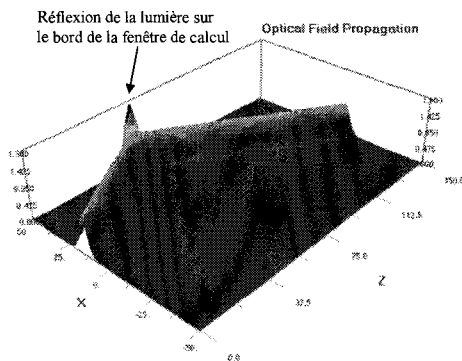


Figure I.5: Propagation d'un mode gaussien dans une fenêtre de calcul bornée par des conditions homogènes

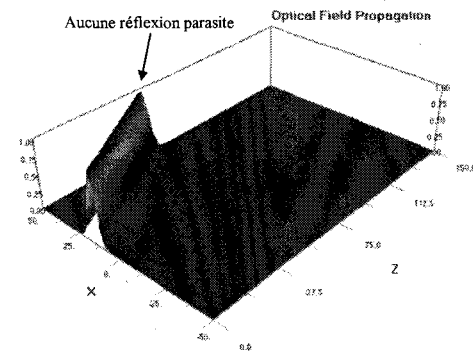


Figure I.6: Propagation d'un mode gaussien dans une fenêtre de calcul bornée par des PMLs

Comme nous venons de le voir, le dimensionnement de la fenêtre de calcul ainsi que ses conditions aux limites constituent une partie non négligeable du processus de simulation. Différents essais préliminaires sont nécessaires afin d'ajuster ces paramètres en fonction des structures à modéliser. Lors de nos calculs, par la méthode des faisceaux propagés ou par la méthode des différences finies, les fenêtres de calcul seront toujours bornées par des parois absorbantes contenant 10 PML's; cette valeur a été retenue comme un bon compromis entre efficacité et temps de calcul.

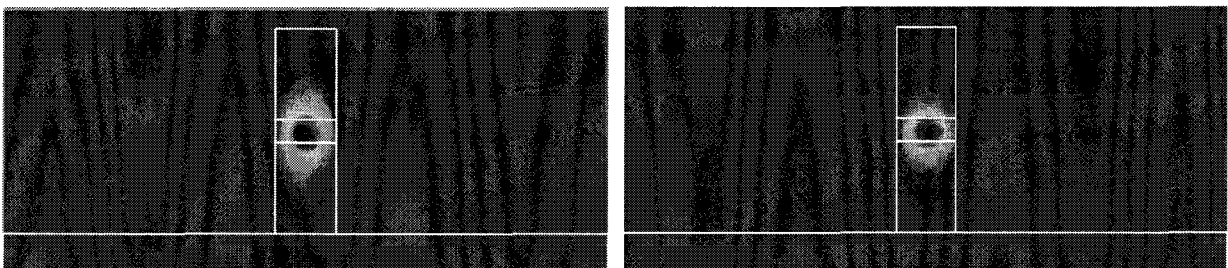
II Modélisation des différents éléments constitutifs d'un commutateur

II.1 Définition de la structure guidante

II.1.a Définition de la couche guidante

Lors des précédents travaux sur les microguides à l'IEMN [8], la couche de cœur des microguides était en quaternaire de longueur d'onde de coupure $1,15\mu\text{m}$. Le quaternaire 1,15 (ainsi qu'il est couramment dénommé) (Q1,15) présente un indice de réfraction de 3,315.

L'intérêt principal des structures microguides est le fort confinement latéral de la lumière. Ce confinement est dû au différentiel d'indice optique entre l'air et le guide. Il nous est donc apparu intéressant d'augmenter encore ce différentiel d'indice et donc, a priori, d'améliorer le confinement de la lumière dans le guide. Ceci passe par l'utilisation d'un quaternaire de longueur d'onde de coupure supérieure. Nous avons choisi le quaternaire de longueur d'onde de coupure $1,3\mu\text{m}$ (Q1,3) car la croissance de ce matériau est bien maîtrisée par le groupe Epitaxie du laboratoire. Ce quaternaire présente un indice de réfraction de 3,42. Les Figures I.7a et I.7b présentent le mode optique dans un guide de $0,8\mu\text{m}$ de largeur, tel qu'il a été reporté dans la thèse d'A. Beaurain [8], avec une couche de cœur respectivement en Q1,15 et en Q1,3 de $0,3\mu\text{m}$ d'épaisseur.



a) Guide en InP/Q1,15

b) Guide en InP/Q1,3

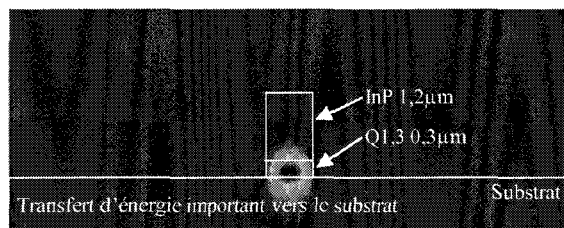
Figure I.7: Mode optique (TM) d'un guide de largeur $0,8\mu\text{m}$

Qualitativement, et comme la différence d'indice optique entre ces deux matériaux le laissait supposer, nous observons que le mode optique obtenu dans le guide InP/Q1,15 est moins confiné verticalement que celui obtenu dans le guide InP/Q1,3. Les pertes vers le

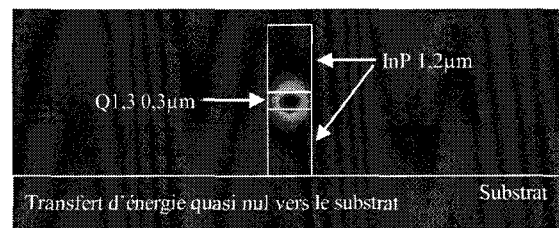
substrat lors de la propagation seront donc, toutes choses étant égales par ailleurs, moins importantes par l'utilisation d'un Q1,3.

II.1.b Définition de la couche de confinement inférieur

La couche de confinement inférieur est en InP non intentionnellement dopé. Elle sépare le cœur du guide du substrat (par abus de langage, cette couche de confinement inférieur représente la partie de matériau gravée se situant sous la couche guidante; en particulier, dans le cas des structures actives, cette couche de confinement inférieur peut s'avérer être composée de différents matériaux). Le mode guidé est confiné dans le quaternaire; en éloignant le mode du substrat, et donc en augmentant l'épaisseur de couche de confinement inférieur, les pertes vers celui-ci seront limitées. Pour illustrer, de manière probante, ce phénomène de transfert d'énergie du mode guidé vers le substrat, nous proposons de comparer le faisceau optique propagé dans un guide de $0,8\mu\text{m}$ de largeur possédant ou non une couche de confinement inférieur (la couche guidante est de $0,3\mu\text{m}$ d'épaisseur). Dans le premier cas (Figure I.8a), il n'y a pas de couche de confinement inférieur, le cœur du guide "repose" sur le substrat. Dans le second cas (Figure I.8b), une couche de confinement de $1,2\mu\text{m}$ d'épaisseur sépare le cœur du guide du substrat. Dans le premier cas, nous constatons une importante "fuite" du mode optique vers le substrat: le mode optique, moins confiné latéralement dans sa partie inférieure, laisse "échapper" une partie de l'énergie le constituant. Dans le second cas, ce phénomène disparaît presque complètement, seule une très faible quantité d'énergie est transmise vers le substrat. Nous visualisons ici, grâce à ces deux cas extrêmes, l'intérêt de l'utilisation d'une couche de confinement inférieur.



a) sans couche de confinement inférieur



b) avec couche de confinement inférieur

Figure I.8 a) b) Profils de mode optique dans une structure guidante

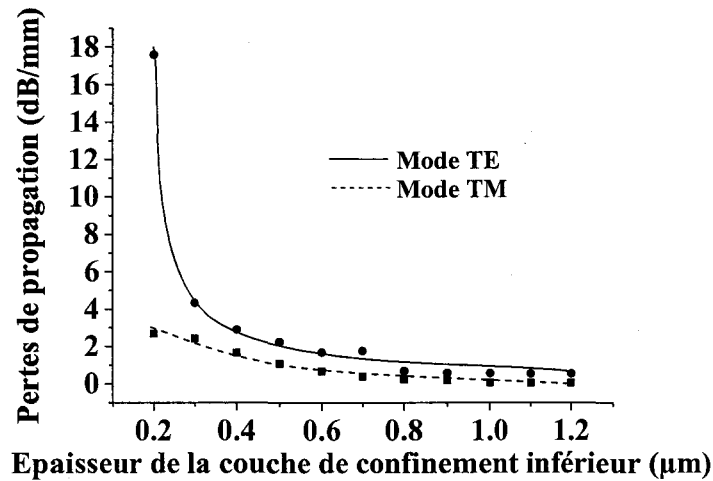


Figure I.8.c: Evolution des pertes en fonction de l'épaisseur de la couche de confinement inférieur

La conclusion la plus directe en est que plus l'épaisseur de la couche de confinement inférieur est importante, plus faibles en seront les pertes par diffusion dans le substrat (Figure I.8.c). Néanmoins, il faut tempérer cet état de fait car la fragilité des structures augmente alors considérablement. Nous limitons donc l'épaisseur de la couche de confinement inférieur à $1,2\mu\text{m}$, épaisseur qui ménage à la fois les pertes vers le substrat et la fragilité de la structure (d'autant plus, qu'il faudra par la suite prendre en compte le confinement supérieur).

II.1.c Définition de la couche de confinement supérieur

La couche de confinement supérieur est elle aussi en InP non intentionnellement dopé. Dans le cas de composants actifs, elle sépare le cœur du guide, où est confiné le mode optique, des couches supérieures de contact dopées p. Les études antérieures menées au laboratoire sur les commutateurs en optique intégrée "classique" nous ont appris que la position et la nature des électrodes doivent être optimisées de manière à perturber le moins possible la propagation optique dans le (micro)guide. Les électrodes métalliques sont constituées de différents métaux : l'or, le platine et le titane. Aux fréquences optiques (ici dans le domaine de longueurs d'ondes "télécom"), ces métaux présentent un indice de réfraction complexe :

- Or: $n = 0,18 - 10,2j$,
- Titane: $n = 4,04 - 3,82j$,
- Platine: $5,31 - 7,04j$,

la partie imaginaire traduisant leur fâcheuse tendance à l'absorption du faisceau optique! D'autre part, ces électrodes métalliques sont déposées sur un matériau ternaire InGaAs, absorbant lui aussi à la longueur d'onde de travail, permettant l'obtention de contacts ohmiques à faible résistivité.

Les parties actives des commutateurs peuvent donc absorber la lumière si le mode optique s'étend jusqu'aux électrodes. Nous avons donc défini la couche de confinement supérieur de manière à prendre en compte ce phénomène afin de minimiser les pertes par absorption sous les électrodes. La structure du guide passif découle donc de celle du guide actif et non l'inverse.

Nous avons effectué des simulations par BPM 2D en considérant une couche de métal de 350nm d'épaisseur déposée sur une couche de contact constituée de 0,2 μ m d'InP et d'une couche de 0,4 μ m d'InGaAs, toutes deux dopées p+. La topologie du guide est alors celle présentée en Figure I.9. En première approche, nous choisissons une épaisseur de couche de confinement de 1,2 μ m donc identique à celle du confinement inférieur ; cette épaisseur ayant suffi dans ce dernier cas à désensibiliser le profil du mode optique de la présence du substrat.

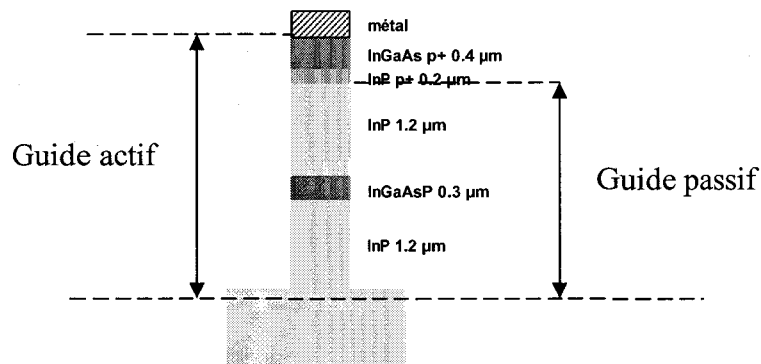


Figure I.9: Structure du guide sous les zones d'injection électrique

Les Figures I.10a et I.10b représentent les résultats de modélisation des pertes liées à la présence des électrodes métalliques. En mode TM, seul 1% de l'énergie du guide est perdu au cours de la propagation pour une longueur d'électrode de 500 μ m. En mode TE, ce pourcentage s'élève à environ 5% voire 15% pour le cas le plus défavorable du platine. Bien entendu, notre électrode n'est pas constituée d'un seul métal - le contact P sur InGaAs est un contact multicouche Pt/Ti/Pt/Au - mais cette modélisation nous permet principalement de statuer sur l'épaisseur de la couche de confinement supérieur. L'épaisseur de 1,2 μ m semble être suffisante pour minimiser les pertes liées à l'électrode tout en ajoutant un relief modéré à

la structure déjà existante, l'importance de ce relief compliquant les différentes opérations technologiques (uniformité du film de résine, profil de gravure,...).

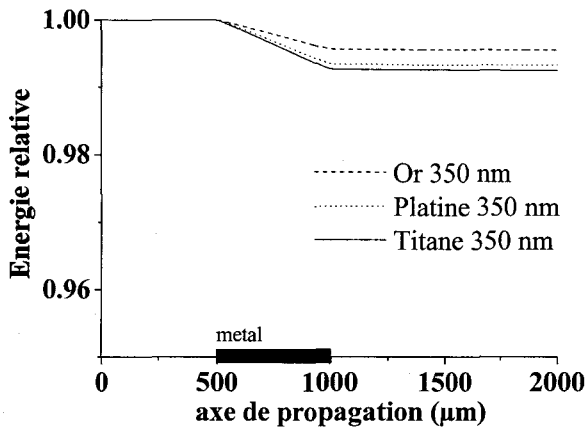


Figure I.10a: Energie relative véhiculée dans le cas d'une propagation sous une électrode de 350 nm d'épaisseur du métal considéré (mode TM)

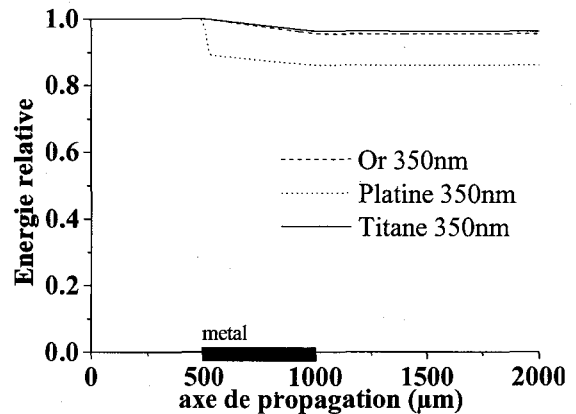


Figure I.10b: Energie relative véhiculée dans le cas d'une propagation sous une électrode de 350 nm d'épaisseur du métal considéré (mode TE)

Ces modélisations orientent notre choix pour l'épitaxie globale nécessaire à la réalisation des commutateurs en fixant les couches supplémentaires requises pour les composants actifs. Nous la retrouvons en Figure I.9.

II.2 Modélisation des structures optiques passives

Nous présentons la modélisation des composants passifs intervenant dans la conception d'un commutateur (ou d'une matrice de commutation optique) en technologie microguide: guides droits, guides courbes et jonctions Y. Nous nous intéresserons particulièrement aux pertes optiques induites par ces composants : pertes de propagation, pertes dues aux courbures et pertes dues aux jonctions. Nous présenterons également un adaptateur de mode basique permettant de faciliter le couplage des composants microguides avec une fibre pour la connexion vers l'extérieur.

II.2.a Evaluation des pertes de propagation

La modélisation de la propagation dans les structures microguides a été réalisée avec l'utilisation des deux logiciels commerciaux OptiBPM et OptiFDTD présentés au §I. La longueur d'onde de travail a été fixée à $1,55\mu\text{m}$.

Afin d'évaluer les valeurs de pertes linéiques pour les largeurs de guides submicroniques, une modélisation en trois dimensions (BPM-3D) a été effectuée pour la structure utilisant une couche guidante en quaternaire de longueur d'onde de coupure $1,3\mu\text{m}$, structure rappelée en Figure I.11a. Cette modélisation permet de rendre compte plus finement des phénomènes de propagation, son seul défaut est de nécessiter des temps de calcul plus longs. Les résultats en sont montrés en Figure I.11b. On s'aperçoit qu'un guide de largeur inférieure à $0,5\mu\text{m}$ présente des pertes de propagation très élevées, de l'ordre de 10dB/mm pour un guide de largeur $0,2\mu\text{m}$ dont le cœur est en matériau Q1,3, notamment pour le mode TE. Les pertes en mode TM restent faibles, de l'ordre du 1dB/mm même pour les dimensions de ruban très faibles. Ceci peut s'expliquer qualitativement en observant les profils de champs d'un guide de $0,5\mu\text{m}$ de largeur dans les deux polarisations (Figure I.11c). Le mode TM est plus confiné que le mode TE, qui a tendance à "s'étaler" sur les parois du guide.

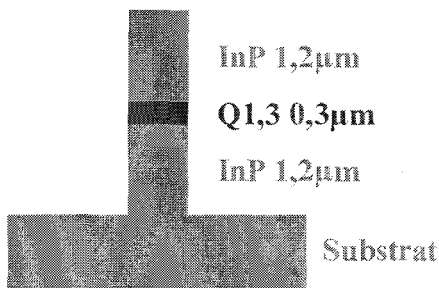


Figure I.11a: Structure du guide passif retenue

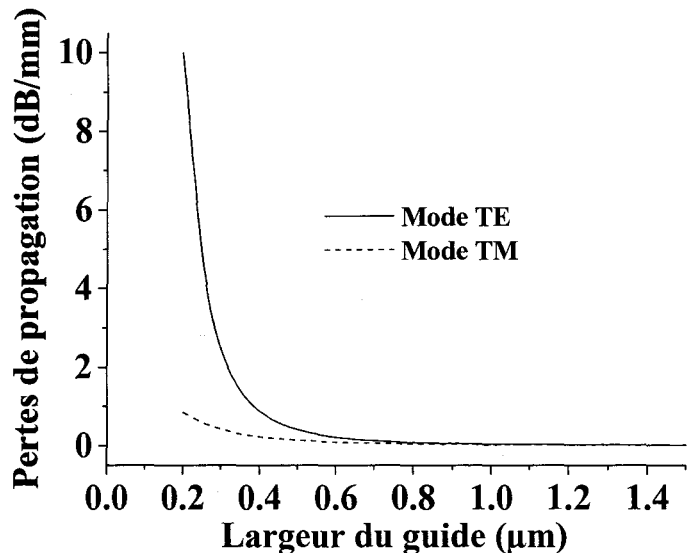


Figure I.11b: Pertes linéiques d'un micro guide (structure en Figure I.11a) en fonction de sa largeur (BPM-3D).

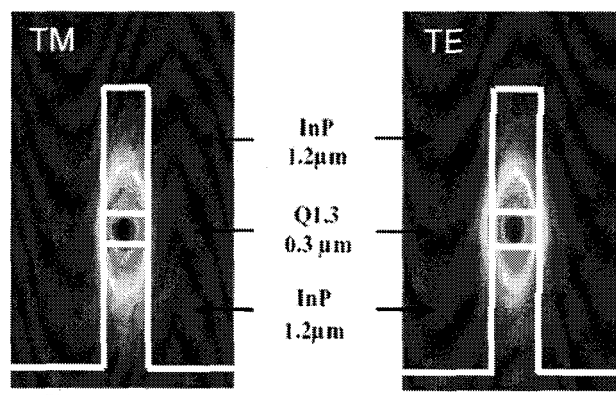


Figure I.11c: Profils des modes TM et TE d'un guide de $0,5\mu\text{m}$ de largeur

Pour limiter les pertes de propagation dans les structures passives ou de commutation, nous allons considérer des guides de taille faiblement sub-micrométrique voire micrométrique, c'est à dire de largeur égale à $0,8\mu\text{m}$ ou $1\mu\text{m}$, ce qui semble être un bon compromis entre pertes linéiques et confinement latéral (plus celui-ci est élevé, plus les changements de direction peuvent être abrupts et donc courts, limitant ainsi les pertes de propagation).

II.2.b Evaluation des pertes en excès dues aux courbures

La partie du faisceau optique suivant la trajectoire courbe est d'autant plus importante que le confinement dans le guide est important; ce principe avait déjà été mis en application dans les structures d'optique intégrée classique afin de minimiser les pertes dans une section de guide courbe. Une propriété intéressante de la technologie microguide est cet important confinement optique intrinsèque. On peut donc légitimement penser qu'il peut être mis à profit pour envisager des changements de direction de propagation avec des rayons de courbure très petits (inférieurs à $100\mu\text{m}$). Les courbures à faible rayon sont la source principale du gain de place dans la réalisation d'une matrice de commutation en technologie microguide. Mais cet avantage ne doit pas se faire aux dépens des pertes. Nous avons donc modélisé les pertes en excès dues à la présence d'une courbure; nous avons fixé l'angle de courbure à 90° .

Nous utilisons comme méthode de simulation numérique, la méthode des différences finies temporelles (FDTD) compte tenu des changements de direction "brutaux" considérés. Pour des raisons de volume de calcul et par conséquent de temps et de mémoire utilisés, nous limitons notre étude des guides courbes à une modélisation bidimensionnelle. Nous avons modélisé des structures de guides courbes permettant un changement de direction de 90° et

utilisant différents rayons de courbure (Figure I.12). Nous présentons les résultats pour le mode Transverse Magnétique.

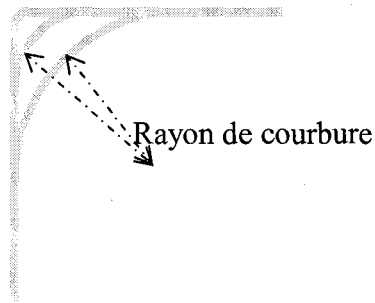


Figure I.12: Structure modélisée par FDTD pour un changement de direction à 90°

Sur la Figure I.13, nous observons l'évolution des pertes dues à la présence d'une courbure de 90° en fonction du rayon pour un guide de largeur 0,8µm.

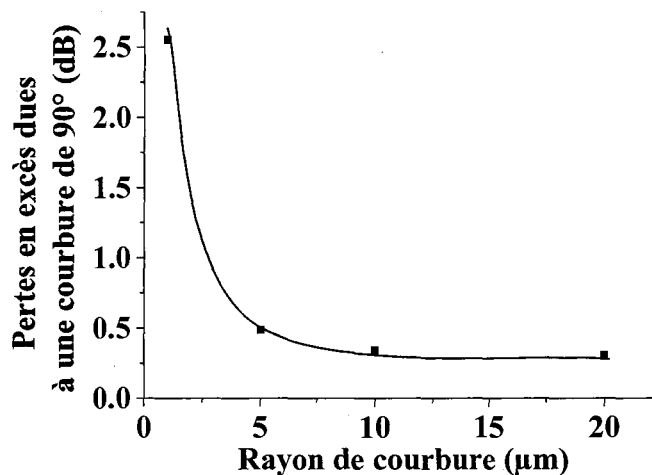
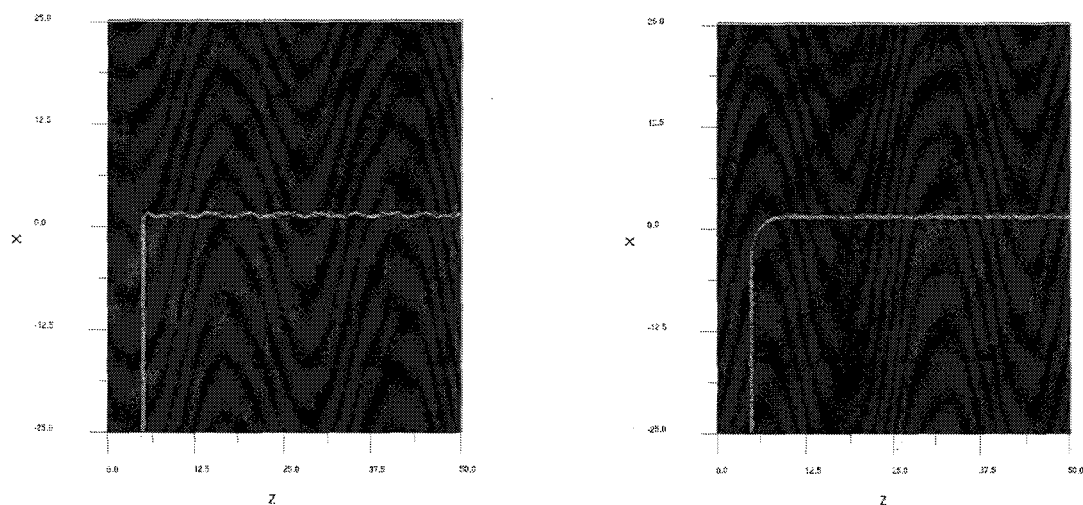


Figure I.13: Pertes en excès dues à la présence d'une courbure de 90° en fonction du rayon (mode TM) (guide de 0,8µm de large)

Un rayon de courbure de 1µm amène des pertes supplémentaires de l'ordre de 2,5dB. Il est à noter que ces pertes ne sont représentatives que des pertes en excès liées à la courbure, elles ne représentent pas les pertes totales qui incluent les pertes de propagation. Si on augmente le rayon de courbure jusque 5µm, les pertes observées sont de l'ordre de 0,5dB. Les Figures I.14a et I.14b représentent les résultats de la modélisation de la propagation pour respectivement un rayon de courbure de 1µm et 5µm.

a) rayon de courbure $1\mu\text{m}$ b) rayon de courbure $5\mu\text{m}$ Figure I.14: Aperçu de la propagation pour une courbure à 90° *(guide de $1\mu\text{m}$ de largeur, mode TM)*

Un rayon de courbure très faible ($1\mu\text{m}$) conduit à une perturbation importante de la trajectoire dans le guide droit de sortie. Les nombreuses oscillations qui apparaissent peuvent alors augmenter considérablement les pertes de propagation, le faisceau optique venant alors largement "côtoyer" les parois du microguide qui seront source, a priori, de pertes de propagation plus élevées dues à la rugosité de fabrication. Ce phénomène disparaît presque totalement lorsque le rayon de courbure est plus grand que $5\mu\text{m}$.

Les pertes dues aux courbures diminuent largement lorsque le rayon de courbure augmente; elles sont inférieures à $0,3\text{dB}$ pour un rayon de courbure aussi petit que $20\mu\text{m}$!

II.2.c Evaluation des pertes en excès dues aux jonctions

Les commutateurs de type DOS utilisent une structure de jonction Y symétrique. Dans la suite de ce chapitre, nous verrons que dans le cas de la technologie microguide, nous serons amenés à utiliser des jonctions Y dissymétriques. Toutefois, il nous est apparu intéressant d'étudier dans un premier temps une jonction Y symétrique en technologie microguide telle qu'elle est présentée en Figure I.15.

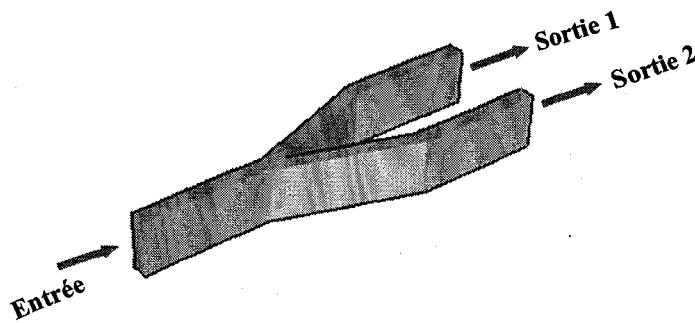
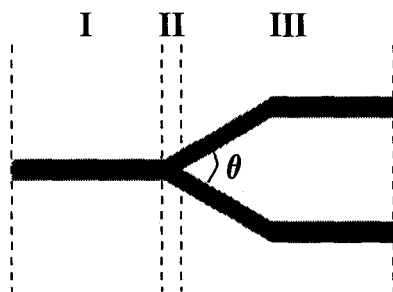


Figure I.15: Structure d'une jonction Y symétrique

La structure peut se diviser en trois régions.



- La région I est constituée d'un microguide d'entrée (de largeur $0,8\mu\text{m}$ ou $1\mu\text{m}$) qui assure le caractère monomode de la propagation.
- La région II permet le raccordement du guide d'entrée aux deux guides de sortie. Le guide

s'élargit et devient bimode.

- La région III est constituée de deux guides monomodes identiques séparés d'un angle θ .

Ainsi, si les deux branches de sortie sont identiques, la puissance optique injectée à l'entrée de la structure se divisera de façon égale dans les deux guides de sortie ; la jonction se comporte comme un diviseur de puissance.

Pour garantir un composant présentant de faibles pertes, l'un des paramètres essentiellement influant est l'angle séparant les deux branches de sortie. Nous présentons ici l'évolution des pertes induites par la jonction en fonction de l'angle d'ouverture θ (Figure I.16b). Les résultats sont présentés pour le mode Transverse Magnétique. Ces résultats ont aussi été obtenus par une modélisation tridimensionnelle. La Figure I.16a donne un aperçu de la propagation dans le plan (xOz) (vue du dessus). Les guides de sortie sont espacés d'une dizaine de microns, les rayons de courbure des deux guides de sortie sont suffisamment grands pour permettre d'en considérer les pertes intrinsèques négligeables ou tout au moins très faibles devant celles de la jonction. Les guides ont une largeur de $0,8\mu\text{m}$.

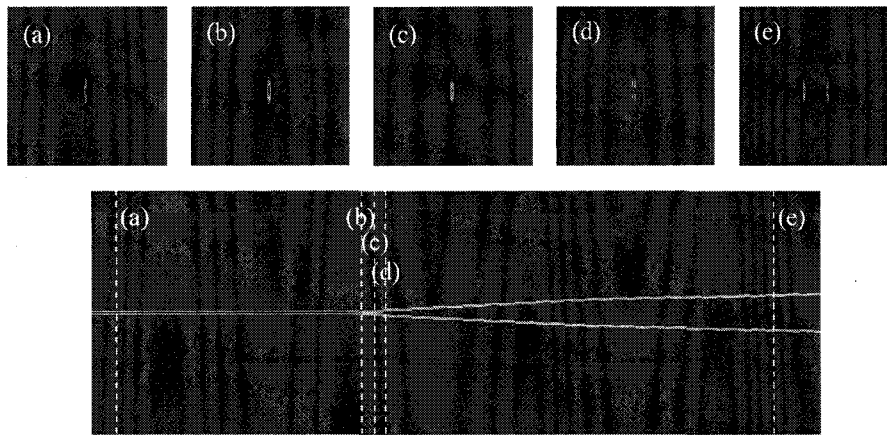


Figure I.16a: Aperçu de la propagation dans une structure en Y (guide de $0,8\mu\text{m}$ de largeur)

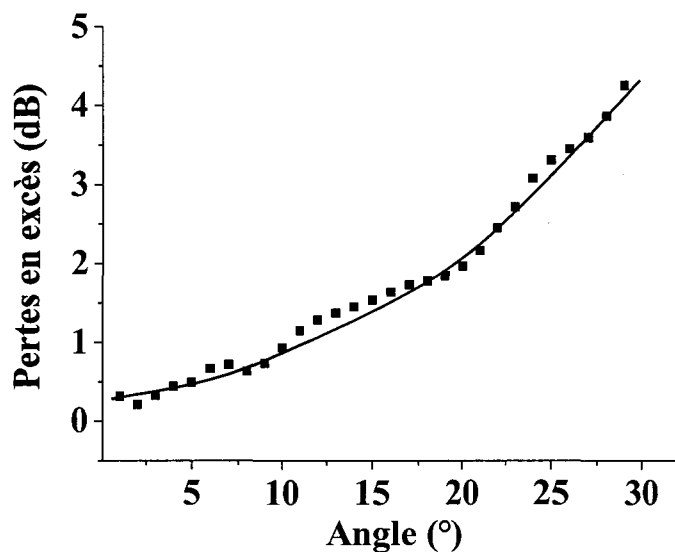


Figure I.16b: Evolution des pertes en excès dues à la jonction en fonction de l'angle d'ouverture θ (mode TM) (guide de largeur $0,8\mu\text{m}$)

Les pertes sont obtenues en additionnant les puissances de sortie des deux branches et en comparant cette valeur à la puissance de sortie d'un guide droit de référence. Les puissances en sortie des guides sont calculées suffisamment loin de la jonction pour s'affranchir des imprécisions liées aux oscillations du faisceau dans les microguides de sortie peu après la jonction.

Les pertes augmentent significativement avec l'angle. Toutefois, contrairement à l'optique intégrée traditionnelle, le fort confinement de la lumière obtenu en technologie microguide permet d'envisager des angles de quelques degrés en conservant un faible niveau

de pertes. Les pertes en excès sont inférieures à 0,5dB pour un angle inférieur à 5°. L'augmentation de l'angle des jonctions contribuera au gain de place de la technologie microguide pour la réalisation de matrice de commutation.

Par ailleurs, nous nous sommes contentés dans cette première approche que d'un "design" basique en ce qui concerne la jonction Y (et des courbures). Il va sans dire que, identiquement aux nombreuses études menées en optique intégrée classique, ces pertes pourraient être minimisées par une conception plus "sophistiquée" de la zone de séparation du Y ou d'entrée-sortie de la portion courbe.

II.2.d Evaluation des pertes de couplage

Nous nous intéressons ici au problème de l'injection de la lumière dans les guides optiques de largeur submicronique ou micronique. Les pertes de couplage trouvent leur origine dans les réflexions et les adaptations de mode qui s'opèrent à l'interface guide fibre. On peut intuitivement penser que ce point, déjà critique en optique intégrée classique, le sera encore plus en technologie microguide.

En optique intégrée traditionnelle, le coefficient de réflexion R de la lumière à l'entrée du guide est défini comme la réflectivité de Fresnel (Eq. 9) où n_{eff} est l'indice effectif du mode dans la structure guidante.

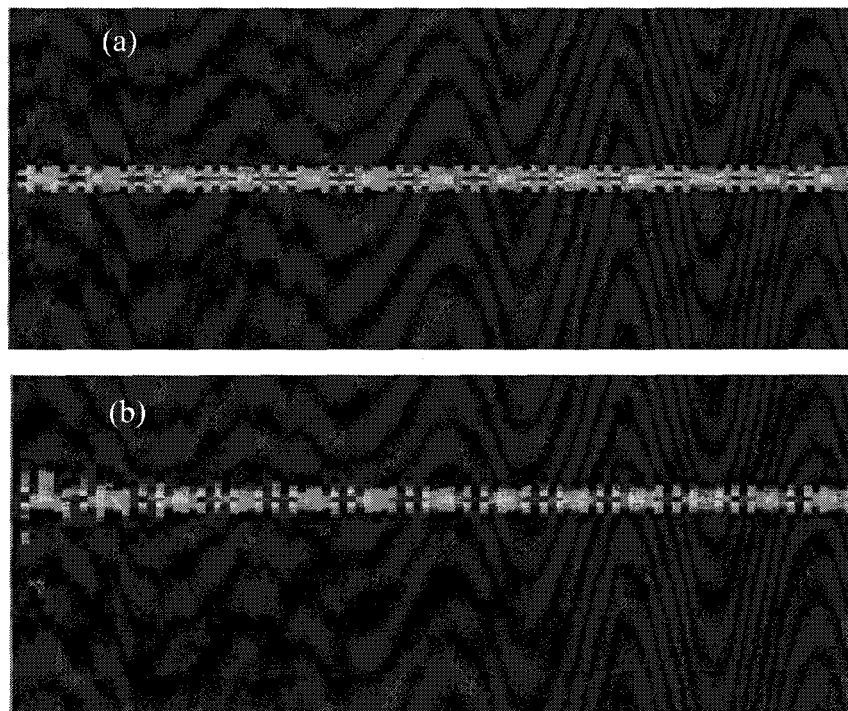
$$R = \frac{(n_{eff} - 1)^2}{(n_{eff} + 1)^2} \quad (9)$$

En première approximation, nous pouvons considérer la même formule dans le cas des structures microguides. Nous devons donc considérer une réflexion minimale d'environ 30% à l'entrée de nos structures.

Les pertes de couplage sont minimales lorsque le mode optique du guide est proche du mode circulaire de la fibre. Le mode circulaire émanant d'une fibre clivée est représenté par une gaussienne d'environ 9 μ m de largeur à mi-hauteur ; celui émanant d'une fibre lentillée par une gaussienne d'environ 2,5 μ m de largeur à mi-hauteur. Pour les guides à fort confinement, la largeur du mode optique correspond approximativement à la largeur du guide. Pour des guides de largeur variant de 0,8 μ m à 1 μ m, quelque soit le type de fibre utilisée, la différence de taille des modes est importante. Ce désaccord entre fibre et guide entraîne des pertes optiques d'injection à l'entrée du guide. Ces phénomènes sont illustrés en Figure I.17 et I.18;

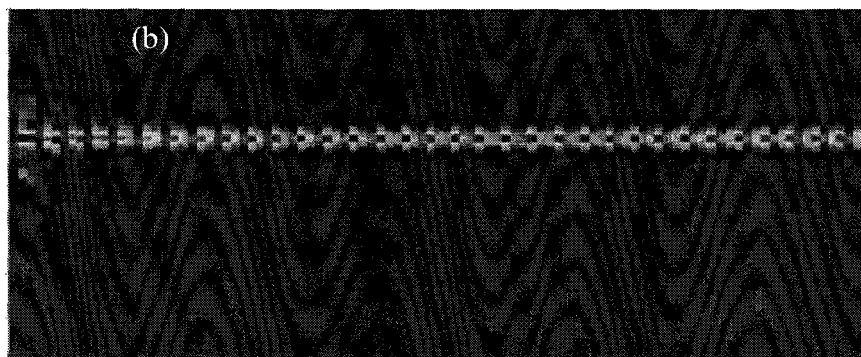
ces images sont issues d'une modélisation en BPM 3D. Sur la Figure I.17, nous observons l'injection de la lumière dans un guide de largeur $0,8\mu\text{m}$ à partir d'une fibre clivée et à partir d'une fibre lentillée sur la Figure I.18. Nous observons une fuite de la lumière vers l'extérieur du guide. Avec une fibre clivée, seule 15% de la puissance optique injectée est effectivement transmise au guide. Avec une fibre lentillée, ce pourcentage passe à 32%.

L'utilisation d'une fibre lentillée au lieu d'une fibre clivée apporte une amélioration du couplage fibre guide d'environ 3,3dB et s'impose donc pour les caractérisations de nos structures.



*Figure I.17: Illustration de la simulation par BPM-3D de l'injection de la lumière dans un guide de largeur $0,8\mu\text{m}$ à partir d'une fibre clivée.
a) section XZ (Vue de dessus) b) section YZ (Vue en coupe)*





*Figure I.18: Illustration de la simulation par BPM-3D de l'injection de la lumière dans un guide de largeur $0,8\mu\text{m}$ à partir d'une fibre lentillée
a) section XZ (Vue de dessus) b) section YZ (Vue en coupe)*

Sur ces figures, nous pouvons clairement noter l'effet de la discrétisation spatiale (ici 20 nm) sur l'aperçu des résultats. Pour ces calculs, le pas de discrétisation n'a pas été optimisé donc minimisé afin de ne pas accroître exagérément le temps de calcul. Par ailleurs, la structure étant linéaire, ceci présente une influence moindre que lors de la modélisation de structures plus complexes. Les résultats qui sont pris en compte pour trancher sur les valeurs finales sont les calculs de puissances relatives en entrée et sortie des structures.

II.2.e Amélioration des pertes de couplage avec l'utilisation de structures d'adaptation de mode

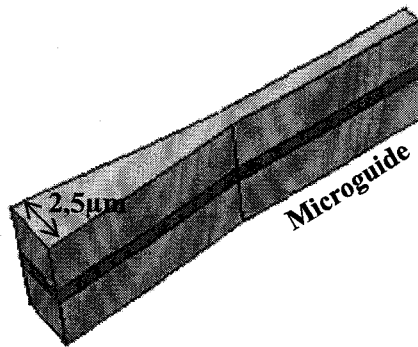
Pour répondre au problème du désaccord des profils de mode entre guide et fibre, nous avons étudié la possibilité d'insérer à l'entrée (et à la sortie) de nos microguides des adaptateurs de mode.

De nombreuses études d'adaptateurs de modes ont été menées, une grande partie d'entre elles est regroupée dans la référence [9]. Nous présentons ici l'étude d'un adaptateur de mode basique [10] qui permet de déconfiner latéralement le mode guidé du microguide¹.

Pour obtenir un couplage optimal entre la fibre et le guide, nous utilisons une structure de couplage en entonnoir qui évolue d'une largeur de $2,5\mu\text{m}$ correspondant au mode optique de sortie d'une fibre lentillée, vers la largeur du microguide à connecter (Figure I.19). Nous

¹ Ici aussi, comme dans le cas des jonctions Y, des structures plus complexes pourraient être étudiées à l'instar de ce qui est fait en optique intégrée classique. Pour ce premier essai de réalisation dont la vocation première est de tester les fonctionnalités actives, nous avons préféré garder un "design" simple ne compliquant pas trop la technologie. Il va donc sans dire que ces structures d'adaptation de modes pourraient elles aussi être optimisées lors d'essais ultérieurs.

déterminons les dimensions de cet adaptateur par une modélisation par BPM tridimensionnelle.



Face d'injection

Figure I.19: Structure d'adaptation de mode étudiée

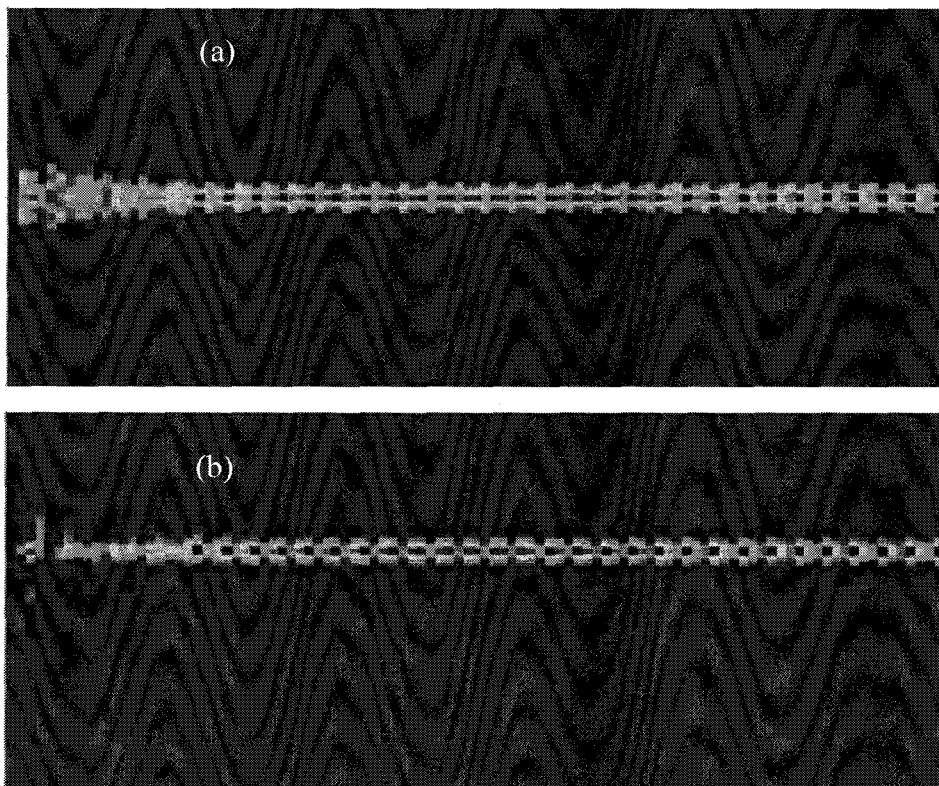


Figure I.20: Illustration de la simulation par BPM3D de l'injection de la lumière dans un guide de largeur $0,8\mu\text{m}$ précédé d'un taper à partir d'une fibre lentillée.

a) section XZ (Vue de dessus) b) section YZ (Vue en coupe)

Nous avons modélisé l'amélioration du couplage induite par l'utilisation d'un taper de forme trapézoïdale de $2,5\mu\text{m}$ de largeur à l'entrée et de largeur $0,8\mu\text{m}$ en sortie (coté microguide) de longueur $50\mu\text{m}$ tel qu'il est proposé dans [8] (Figure I.20). Les modélisations

prévoient une amélioration du couplage fibre guide de plus de 3,7 dB avec cette structure.

Notons que la même remarque que celle énoncée pour les Figures I.17 et I.18 peut être faite ici concernant le pas de discrétisation.

La structure d'adaptation de mode utilisée présente l'avantage de fonctionner sur une longueur relativement courte. Nous utiliserons donc une telle structure à l'entrée et à la sortie des microguides de manière à faciliter l'injection et la récupération de la lumière. La réalisation technologique des adaptateurs de mode sera intégrée au procédé de réalisation des microguides.

II.3 Conception du commutateur en technologie microguide

II.3.a Description générale du commutateur

II.3.a.1 L'effet de commutation

L'effet "plasma" se traduit par une diminution de l'indice de réfraction dans une région de matériau semiconducteur, causée par une augmentation de la densité de porteurs dans cette région. La polarisation en direct d'une diode PIN entraîne l'injection de porteurs de charge dans la zone intrinsèque. La densité de ces derniers y est alors beaucoup plus élevée et une variation d'indice négative, proportionnelle à la densité de porteurs, est alors observée dans la zone sous l'électrode polarisée. La variation d'indice par effet plasma s'exprime sous la forme:

$$\Delta n = - \frac{\lambda^2 q^2 dN}{8\pi^2 \varepsilon_0 c^2 \cdot n \cdot m_e} \quad [11,12]$$

Où λ est la longueur d'onde

q est la charge élémentaire

dN est la variation de densité de porteurs,

ε_0 est la constante diélectrique du vide,

c est la vitesse de la lumière dans le vide,

n est l'indice effectif de la région considérée,

m_e est la masse effective des électrons.

L'utilisation de l'effet plasma pour la commutation est possible dès lors que le cœur du guide optique est dans la zone intrinsèque.

L'épitaxie utilisée pour notre étude constitue une structure PIN, la couche intrinsèque est constituée de la couche guidante en Q1,3 et des couches de confinement supérieur et inférieur en InP.

La zone de variation d'indice est, en première approche, localisée sous l'électrode polarisée mais peut s'étendre au-delà en fonction de l'étalement latéral des porteurs.

En optique intégrée traditionnelle, les variations d'indices attendues peuvent varier de 10^{-4} à 10^{-2} dans les semi-conducteurs III-V [13,14]. Dans la référence [15], une variation d'indice d'environ 5.10^{-3} est reportée sur des structures PIN en guides rubans. Compte tenu d'une valeur de facteur de recouvrement plus élevée dans les structures microguides, nous nous attendons à une variation d'indice par effet plasma au moins similaire si ce n'est plus importante.

II.3.a.2 Principe de la commutation

Pour décrire le principe de la commutation, nous prenons l'exemple d'un commutateur classique de type DOS (Figure I.21).

Le dispositif possède des électrodes positionnées sur chaque bras de sortie pour permettre l'injection du courant. La polarisation en directe d'une des électrodes induit une diminution de l'indice optique dans le bras situé en dessous. Cette variation d'indice modifie la propagation du mode optique de sorte qu'il s'oriente préférentiellement vers la zone d'indice le plus élevé à savoir le guide dont l'électrode n'est pas polarisée. Ainsi, le choix de la sortie optique active ou commutée est lié au choix de l'électrode polarisée.

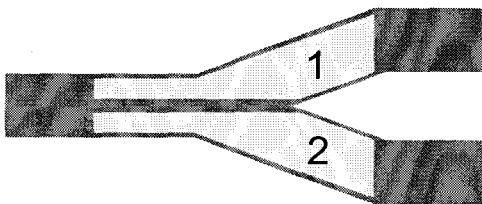


Figure I.21: Structure DOS classique

- Si on injecte un courant sur l'électrode 1, le faisceau optique d'entrée est dévié vers le bras sous l'électrode 2.
- Si on injecte un courant sur l'électrode 2, le faisceau optique d'entrée est dévié vers le bras sous l'électrode 1.

II.3.b Définition de la structure de commutation élémentaire utilisée pour la technologie microguide

II.3.b.1 1^{ère} approche: structures de type MMI

La première structure de commutateur envisagée est présentée en Figure I.22. Cette topologie est la réplique des structures multimodes à interférences (MMI) telles qu'utilisées en optique intégrée "traditionnelle".

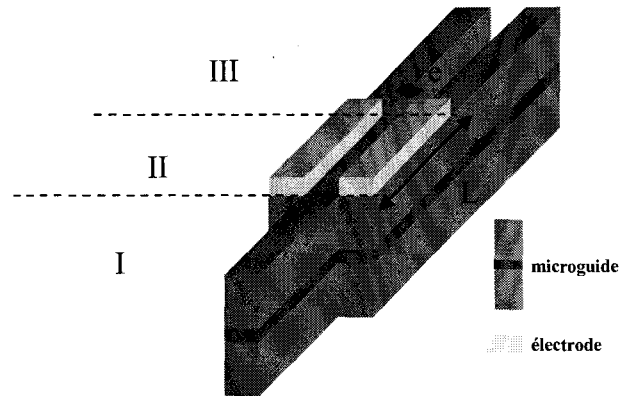


Figure I.22: Structure de commutateur de type MMI (électrodes en clair)

Cette structure comporte trois régions :

La région (I) est en fait le guide d'entrée, donc un guide de largeur $0,8\mu\text{m}$, qui assure un caractère monomode à la propagation.

La région (II) est constituée d'un guide multimode. Sur les deux parties extrêmes de ce guide sont placées les électrodes de longueur L , séparées d'une distance e . Il est à remarquer que la longueur L est un peu plus grande que la longueur de la zone II, ceci afin de diminuer la diaphotie en minimisant un éventuel couplage parasite en sortie de zone active.

La région (III) est constituée des deux microguides de sortie identiques à celui d'entrée.

Nous avons modélisé le fonctionnement de ce commutateur par FDTD.

Dans l'état passif, c'est à dire sans injection de porteurs, ce commutateur se comporte effectivement comme un diviseur de lumière, répartissant le faisceau optique d'entrée équitablement entre les deux sorties.

Dans l'état actif, la diaphotie calculée la plus faible, est obtenue pour la structure dont la partie active est constituée de deux électrodes longues de $240\mu\text{m}$ et espacées de $2\mu\text{m}$.

Le comportement de cette structure a été vérifié pour différentes variations d'indice: pour une variation d'indice de 5×10^{-3} , la diaphotie est de l'ordre de -10dB; pour une variation d'indice de 1×10^{-2} , la diaphotie est de l'ordre de -15dB.

Aucune des structures de commutateur à base de MMI simulées n'a donné de résultats satisfaisants en termes de performances de commutation. Nous ne donnerons pas plus de détails sur ces modélisations puisque notre choix s'est orienté vers une autre topologie de commutateur présenté dans la partie suivante.

II.3.b.2 Nouvelle structure de type DOS

Les valeurs de diaphotie calculées sur les structures de type MMI nous ont orientés vers la définition d'une deuxième structure présentée en Figure I.23. Celle-ci repose sur l'utilisation de deux coupleurs en Y dissymétriques disposés en série. Au départ, des topologies à base de coupleurs symétriques ont été modélisées. Le fort confinement optique des microguides n'a, ici aussi et identiquement aux structures de type MMI, pas permis d'obtenir de faibles diaphoties. L'utilisation de coupleurs dissymétriques a alors été exploitée. Des premiers résultats prometteurs nous ont confortés dans cette voie bien que les paramètres d'optimisation soient multiples.

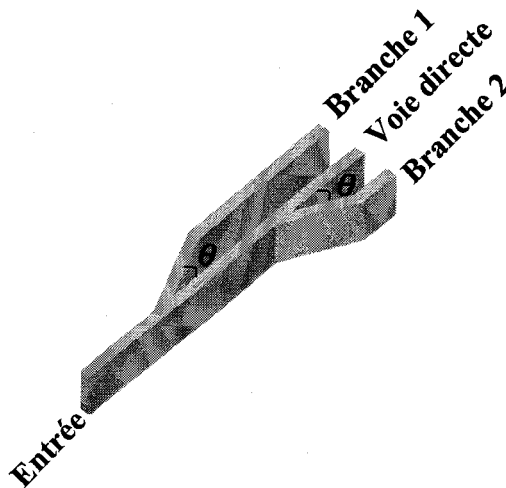


Figure I.23: Topologie à base de coupleurs en Y dissymétriques

En utilisant une BPM bidimensionnelle, nous avons modélisé le premier dispositif de commutation à base de microguides de largeur $0,8 \mu\text{m}$. Cette topologie est basée sur l'utilisation de changements de direction successifs (branche 1 et 2); la voie directe est considérée comme une voie "perdue" afin de diminuer la diaphotie entre les branches 1 et 2 de sortie.

Fonctionnement passif.

En fonctionnement passif, c'est à dire sans injection de courant, cette structure se comporte comme un diviseur de lumière. La répartition du faisceau optique d'entrée dans les branches de sortie et le niveau de pertes dépendent essentiellement de l'angle θ que forment les branches de sortie 1 et 2 avec le guide droit constituant la voie directe.

Comme nous avons pu le voir (§ II.2.c), le fort confinement optique obtenu dans les structures microguides est mis à profit pour augmenter l'angle θ par rapport à l'optique intégrée classique tout en conservant un faible niveau de pertes. Nous présentons ici l'évolution des pertes induites par la jonction dissymétrique en fonction de l'angle d'ouverture θ (Figure I.24b). Les résultats sont présentés pour le mode Transverse Magnétique. Ces résultats ont été obtenus par une modélisation tridimensionnelle. La Figure I.24a donne un aperçu de la propagation dans le plan $\langle xOz \rangle$ (vue du dessus).

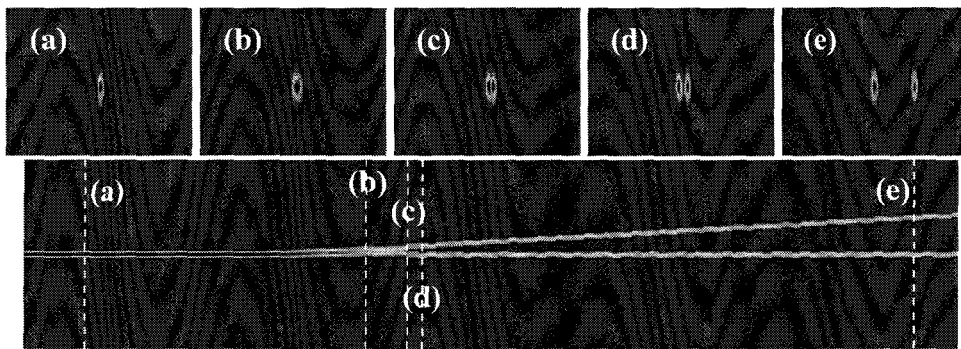


Figure I.24a: Aperçu de la propagation dans une structure en Y dissymétrique (angle 3,2°)

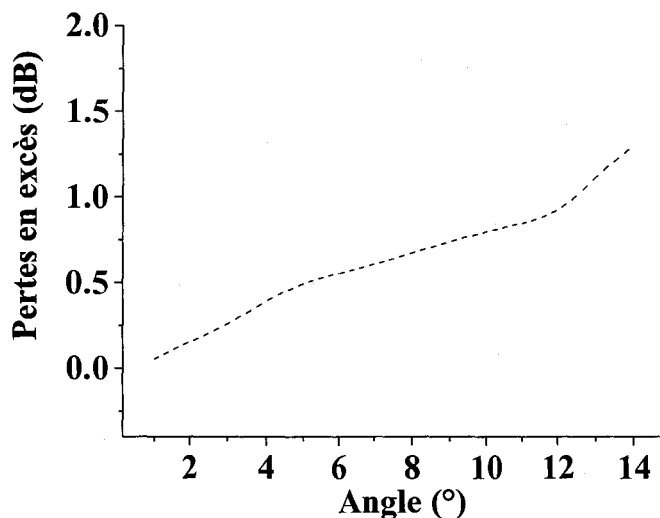
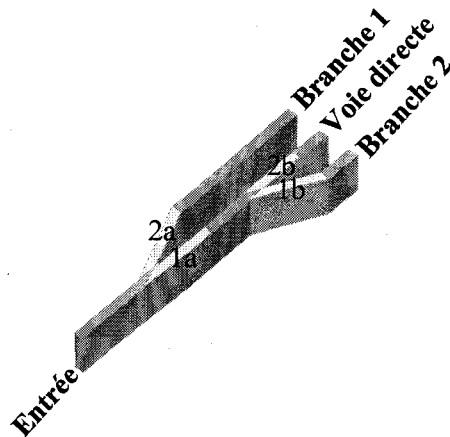


Figure I.24b: Evolution des pertes en excès dues à la jonction dissymétrique en fonction de l'angle d'ouverture θ (guide de largeur 0,8 μ m)

Pour la suite, nous avons choisi un angle relativement faible, de $3,2^\circ$ qui offre un bon compromis entre minimisation des pertes (inférieures à 0,5dB en fonctionnement passif) et faible diaphotie.

Fonctionnement actif

Pour assurer une fonction active de commutation, 2 couples d'électrodes concernant respectivement la première jonction (suffixe a) et la seconde (suffixe b) sont disposées sur la structure. La topologie des jonctions Y reste basique pour ce premier essai (Figure I.25).



*Figure I.25: Topologie des électrodes sur le commutateur
à base de coupleurs en Y dissymétriques*

Le fonctionnement est toujours basé sur l'effet plasma décrit précédemment. L'injection d'un courant sur une électrode induit une diminution d'indice locale sous celle-ci; le faisceau optique est alors dévié vers l'autre branche.

En injectant un courant sur l'électrode 1a, le faisceau optique est dévié vers la branche 1. En injectant simultanément un courant sur l'électrode 1b, le faisceau résiduel reste dans la voie directe, ce qui permet de diminuer la diaphotie entre les voies 1 et 2 de sortie.

De la même façon, en injectant simultanément un courant sur les électrodes 2a et 2b, le faisceau optique est dévié vers la branche 2 de sortie.

Nous avons modélisé le fonctionnement de ce commutateur par une BPM bidimensionnelle à la longueur d'onde de $1,55\mu\text{m}$ en considérant une variation d'indice sous l'électrode polarisée égale à 0,01.

L'effet de commutation n'est pas suffisamment marqué. En effet, les modélisations prévoient une diaphotie de l'ordre de -8dB à $1,55\mu\text{m}$. Afin d'améliorer la diaphotie, nous

avons recherché une géométrie de zone de commutation différente, nous présentons cette optimisation dans le paragraphe suivant.

II.3.c Optimisation de la structure de commutation

La portion de guide au niveau de la jonction est élargie de manière à ce que le changement de direction du faisceau optique soit plus progressif dans la structure de commutation. Afin d'améliorer encore la commutation, il est apparu intéressant de symétriser la structure (Figure I.26) de manière à ce que la commutation puisse se faire aussi facilement dans un sens ou dans l'autre. L'optimisation de l'effet de commutation passe donc par l'étude de la diaphotie en fonction de la longueur de l'élargissement L_0 . Nous étudierons ensuite l'influence de la variation d'indice et l'influence de la distance e entre les électrodes.

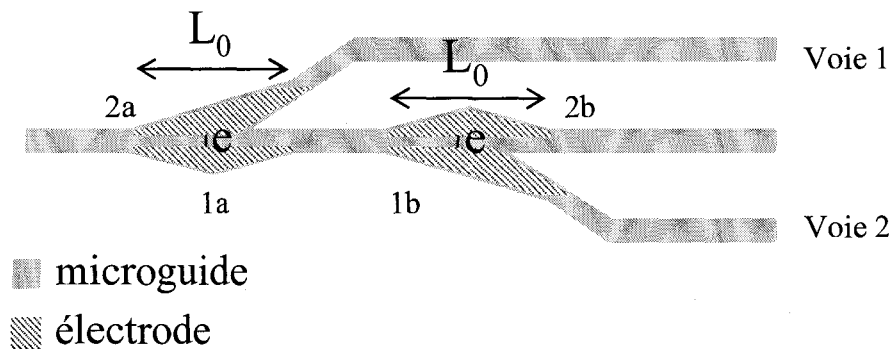


Figure I.26: Nouvelle topologie d'électrodes

II.3.c.1 Influence de la longueur L_0

Nous présentons ici la modélisation des nouvelles structures en jouant sur les paramètres géométriques, ici la longueur de l'élargissement L_0 au niveau des jonctions. L_0 correspond à la longueur des électrodes.

Nous utilisons une BPM bidimensionnelle à la longueur d'onde de $1,55\mu\text{m}$. Nous considérons que les zones d'injection de porteurs sont strictement délimitées sous l'électrode. La variation d'indice considérée sous les électrodes polarisées est de 0,01. Nous considérons ici un écart entre les électrodes nul, ce qui est en pratique irréalisable mais qui donnera la tendance des performances de commutation. A la fin de chaque simulation, les aperçus de propagation (vues de dessus) donnent une idée qualitative de l'efficacité de commutation en fonction de la longueur L_0 (Figure I.27).

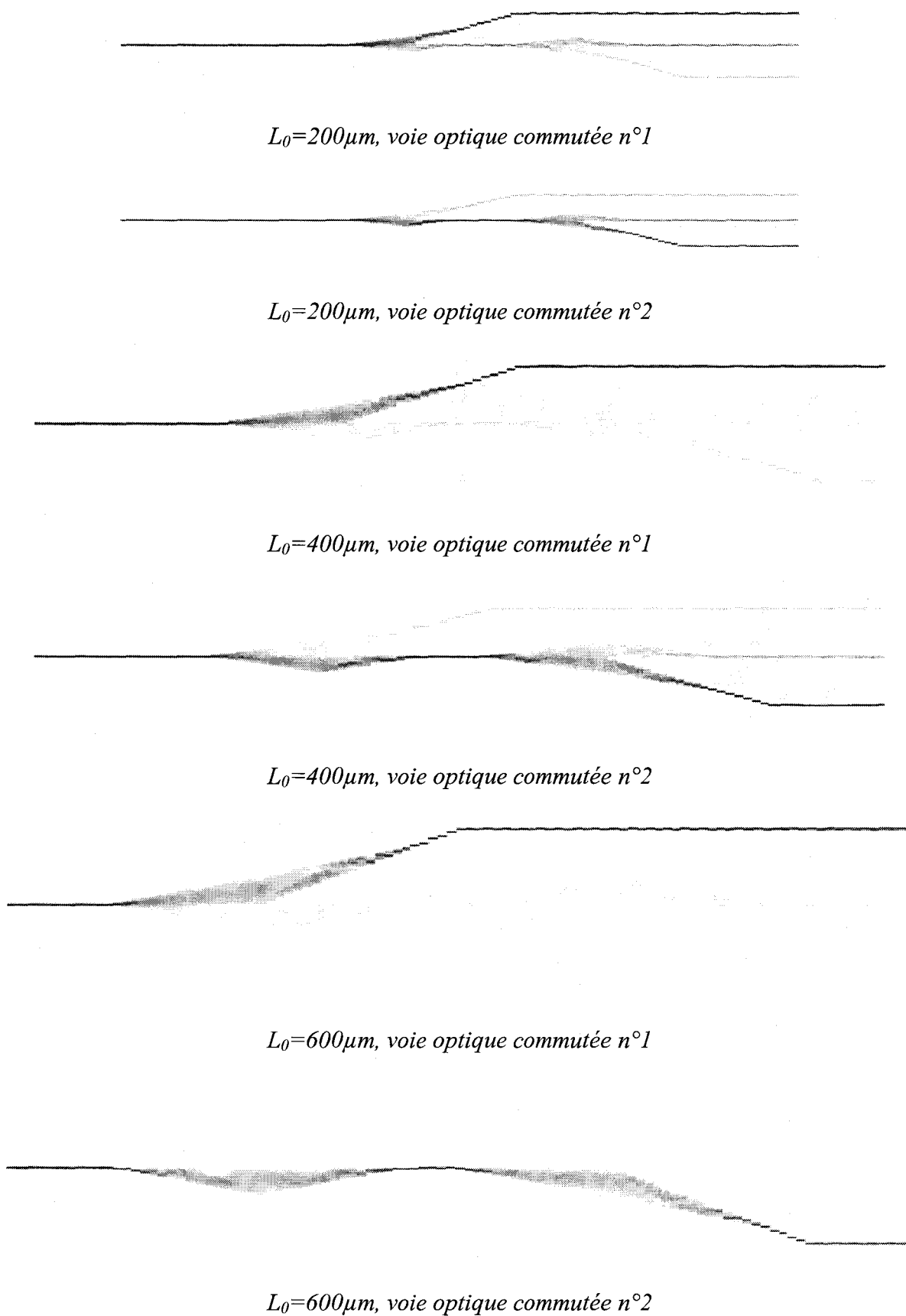


Figure I.27: Vue de dessus de la propagation dans des structures de commutateur pour différentes valeurs de L_0 (BPM-2D)

Devant ces aperçus, nous pouvons faire deux remarques:

- la première est que l'effet de commutation s'améliore lorsque la longueur d'électrodes, L_0 , augmente.
- la seconde est que la géométrie dissymétrique de la structure semble impliquer un fonctionnement non symétrique selon la sortie optique choisie. La structure pourrait donc souffrir d'un écart de performance selon le sens de commutation choisi.

A la fin des simulations, nous avons accès à la puissance à la sortie des deux branches utiles (voies 1 et 2). Nous pouvons alors calculer la diaphotie théorique, correspondant au rapport de puissance des deux sorties. Nous reportons sur le graphique de la Figure I.28 les résultats de diaphotie en fonction de la longueur L_0 dans les deux sens de commutation. A titre de comparaison, un commutateur composé d'une seule jonction présente une diaphotie d'environ -18dB pour une longueur L_0 de 1000 μm .

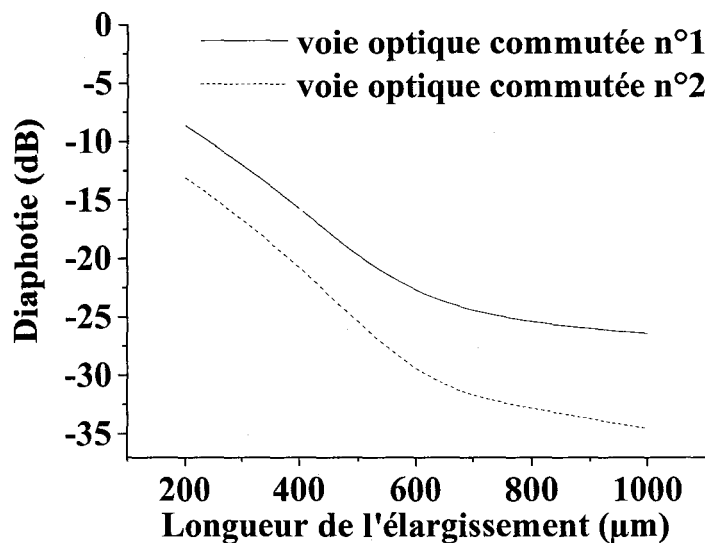


Figure I.28: Diaphotie en fonction de L_0 pour une variation d'indice de 0,01

Nous constatons une différence d'efficacité de commutation selon la sortie optique choisie. Pour une longueur L_0 de 600 μm , nous calculons une diaphotie d'environ -25dB si la voie optique n°1 est commutée et d'environ 30dB pour la voie optique n°2. La longueur d'électrode peut donc être réduite d'un facteur 2 à 3 par rapport à l'optique intégrée classique.

Par ailleurs, le rapport de la somme des puissances en sortie des trois guides et de la puissance d'entrée nous donne une évaluation des pertes dans la structure en fonction de la longueur L_0 (Figure I.29a). Ces pertes augmentent considérablement avec l'augmentation de

L_0 et amèneront donc à la définition d'un compromis entre diaphotie et pertes. Néanmoins, cette mesure sera difficilement réalisable en pratique puisque s'ajoutent à la mesure les pertes d'injection (et de récupération) qui seront difficilement chiffrables ; nous présentons donc sur la Figure I.29b les pertes dues à la commutation. Celles-ci sont déterminées en effectuant le rapport de la puissance en sortie de la voie commutée et de la somme des puissances en sortie des trois guides. Ces pertes pourront plus facilement être comparées aux résultats expérimentaux du chapitre 3.

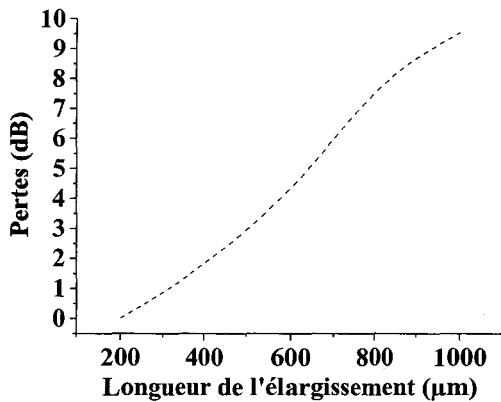


Figure I.29 a: Pertes optiques dans la structure en fonction de L_0

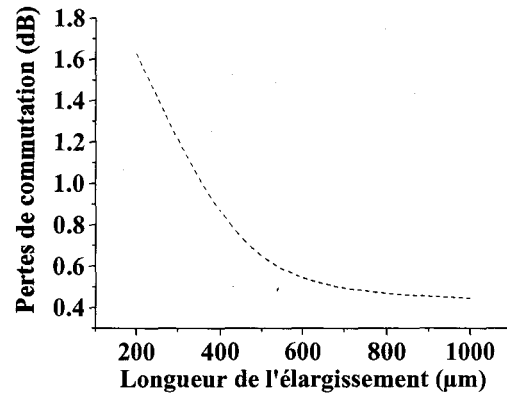


Figure I.29 b: Pertes de commutation en fonction de L_0

II.3.c.2 Influence de la variation d'indice

Dans ce paragraphe, nous présentons les résultats théoriques de commutation en fonction de la variation d'indice sous l'électrode polarisée.

En optique intégrée traditionnelle, la variation d'indice maximum obtenue par effet plasma est de l'ordre de 0,005. Compte tenu du facteur de recouvrement plus important pour les structures microguides, nous nous attendons à une variation d'indice plus élevée. C'est pourquoi les premières simulations ont été faites en considérant une variation d'indice sous l'électrode polarisée égale à 0,01. Toutefois, il est intéressant d'observer l'évolution des performances du commutateur en fonction de cette variation d'indice.

Pour ces modélisations, nous considérons une longueur d'électrodes L_0 de 600 μm ou de 400 μm . Nous présentons en Figures I.30 et I.31 les résultats de simulation donnant la diaphotie en fonction de la variation d'indice dans les deux sens de commutation.

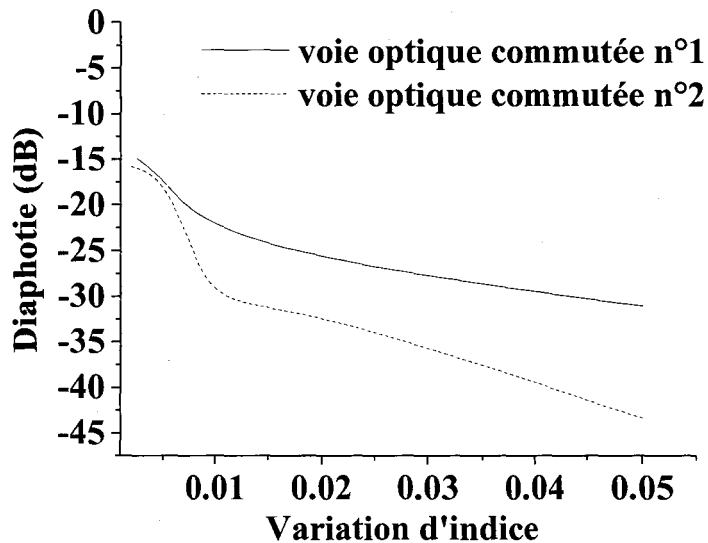


Figure I.30: Diaphotie en fonction de la variation d'indice ($L_0=600\mu\text{m}$)

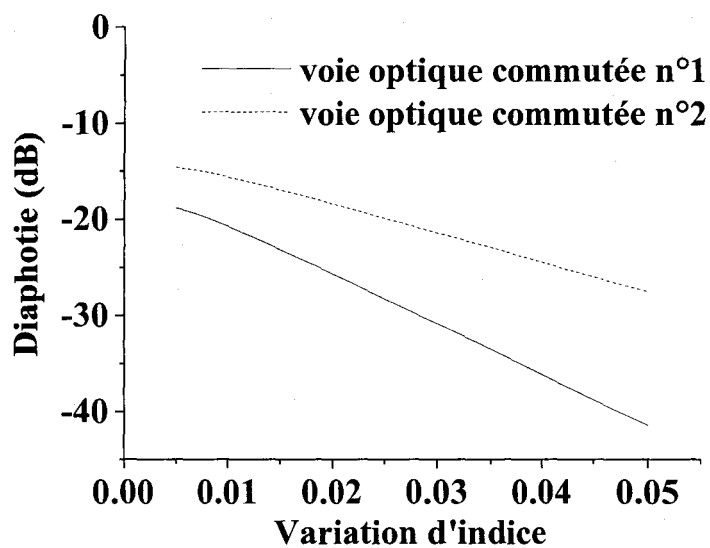


Figure I. 31: Diaphotie en fonction de la variation d'indice ($L_0=400\mu\text{m}$)

Les performances du commutateur sont, comme on pouvait s'y attendre, très sensibles à la variation d'indice. Si on passe d'une variation d'indice de 0,01 à une variation de 0,005, la diaphotie est alors de seulement -16dB dans les deux sens de commutation pour une longueur L_0 de $600\mu\text{m}$ par exemple.

II.3.c.3 Influence de l'écart inter électrodes

Pour une longueur L_0 d'électrodes donnée, ici $600\mu\text{m}$, une variation d'indice égale à $0,01$, nous étudions l'évolution de la diaphotie en fonction de la distance entre les électrodes de commutation (Figure I.32). Notons que cet écart inter-électrode géométrique permet artificiellement de juger de l'influence d'un potentiel étalement latéral de porteurs dans la structure puisque l'on délimite différemment la zone d'influence de ceux-ci.

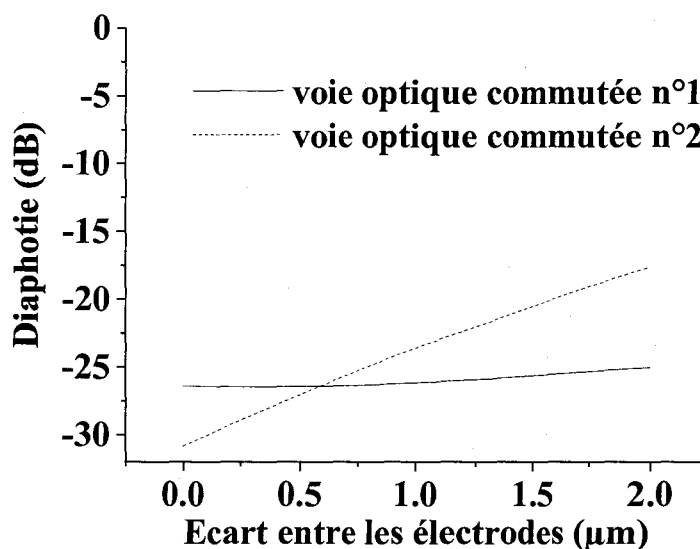


Figure I.32: Diaphotie en fonction de l'écart entre les électrodes ($L_0=600\mu\text{m}$, $\Delta n=0,01$)

Comme il a déjà été rencontré précédemment, les diaphoties dans les deux sens de commutation ne suivent pas la même évolution. Un équilibre de fonctionnement est néanmoins obtenu dans les deux sens de commutation au point de croisement des deux courbes. Ce point d'équilibre dépend par ailleurs fortement des autres paramètres de la structure.

Afin de mieux en discerner le comportement, nous étudions alors la diaphotie dans différentes configurations mais sur une seule jonction (une voie directe et une voie déviée) afin de limiter les temps de calcul. La courbe donnée en Figure I.33 présente la diaphotie entre la voie directe et la voie déviée obtenue sur une jonction pour une longueur L_0 de $600\mu\text{m}$ et une variation d'indice de $0,01$. La courbe donnée en figure I.34 présente la diaphotie entre la voie directe et la voie déviée obtenue sur une jonction pour une longueur L_0 de $600\mu\text{m}$ et une variation d'indice de $0,02$.

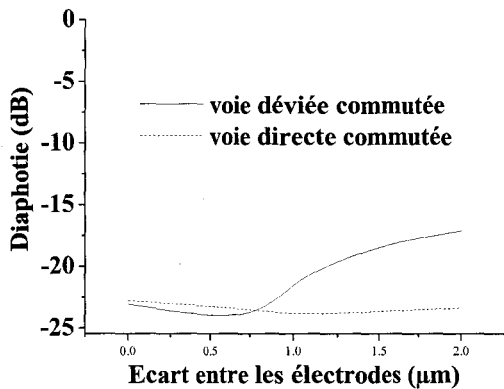


Figure I.33: Diaphotie en fonction de l'écart entre les électrodes ($L_0=600\mu\text{m}$, $\Delta n=0,01$) pour une jonction

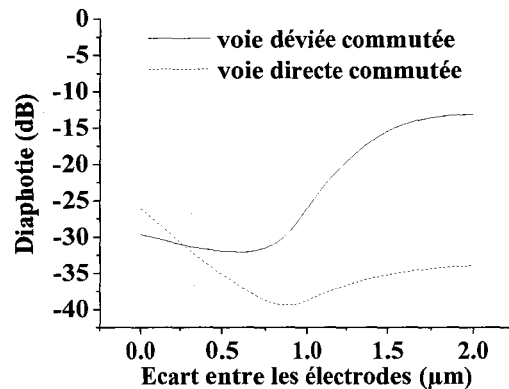


Figure I.34: Diaphotie en fonction de l'écart entre les électrodes ($L_0=600\mu\text{m}$, $\Delta n=0,02$) pour une jonction

De ces quelques calculs, nous pouvons déduire qu'il est possible de réaliser un commutateur équilibré suivant les paramètres géométriques choisis et la variation d'indice induite par effet plasma en ce plaçant au point de croisement des deux courbes.

II.3.c.4 Conclusion

Plusieurs inconnues de la technologie microguide vont nous empêcher de cibler une géométrie optimisée de commutateur.

En effet, les modélisations sont effectuées en supposant la variation d'indice confinée sous l'électrode polarisée. Cependant, l'étalement des porteurs induit un étalement de la zone de variation d'indice. Nous ne connaissons pas exactement la valeur de cet étalement mais une idée de son influence peut être obtenue par la modélisation de l'influence de l'écart inter-électrode.

D'autre part, nous ne connaissons pas avec précision la variation d'indice que nous obtiendrons par injection du courant. Celle-ci régit, en interaction avec la longueur de l'électrode et l'écart inter-électrode, la diaphotie et l'équilibre de la jonction.

Nous déciderons donc de réaliser différentes géométries de commutateur: nous ferons varier la longueur L_0 et l'écart inter-électrode. Les différentes topologies de commutateur sur microguides réalisées seront explicitement données dans le Chapitre 3.

II.3.d Vérification par BPM 3D du fonctionnement des commutateurs microguides

Pour des raisons de temps de calcul, les premières modélisations ont été effectuées par une BPM bidimensionnelle. Celles-ci nous ont permis d'établir une topologie de commutateur sur microguides. Une modélisation 3D plus fine a été faite lorsque les valeurs des paramètres étaient pratiquement cernées.

Sur la Figure I.35, nous présentons la décomposition de la propagation du faisceau optique dans le cas d'une longueur d'électrode de $200\mu\text{m}$ et d'une variation d'indice de $0,01$. Les électrodes polarisées sont les 1a et 1b (voir Figure I.25).

(a) Nous observons le faisceau optique à l'entrée de la structure (la largeur du guide est de $0,8\mu\text{m}$)

(b) Le guide s'élargit, la variation d'indice est localisée sur la moitié droite de celui-ci. Le mode optique se déforme et est dévié vers la partie gauche du guide.

(c) Nous observons les deux faisceaux optiques en sortie de la première jonction active.

(d) Le faisceau non commuté restant dans la voie directe traverse la deuxième jonction active dans laquelle la variation d'indice imposée par la seconde électrode polarisée le maintient dans la voie directe.

(e) Nous observons les trois faisceaux optiques de sortie: les deux faisceaux utiles, aux extrémités, et le faisceau de la voie directe non utilisé.

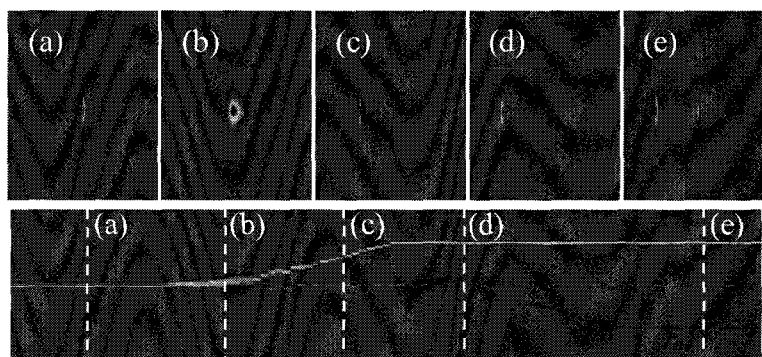


Figure I.35: Modélisation d'un commutateur sur microguide

avec $L_0=200\mu\text{m}$, $e=0\mu\text{m}$, $\Delta n=0,01$ (BPM-3D).

(La partie gauche sur les vues du haut correspond à la partie haute de la vue du bas)

Nous pouvons discerner la diaphotie entre la voie commutée (sortie 1) et la voie non commutée (sortie 2); cette diaphotie est meilleure que celle existant entre la voie commutée et la voie directe.

Sur la Figure I.36, nous présentons le même type de résultats pour une longueur L_0 de $600\mu\text{m}$.

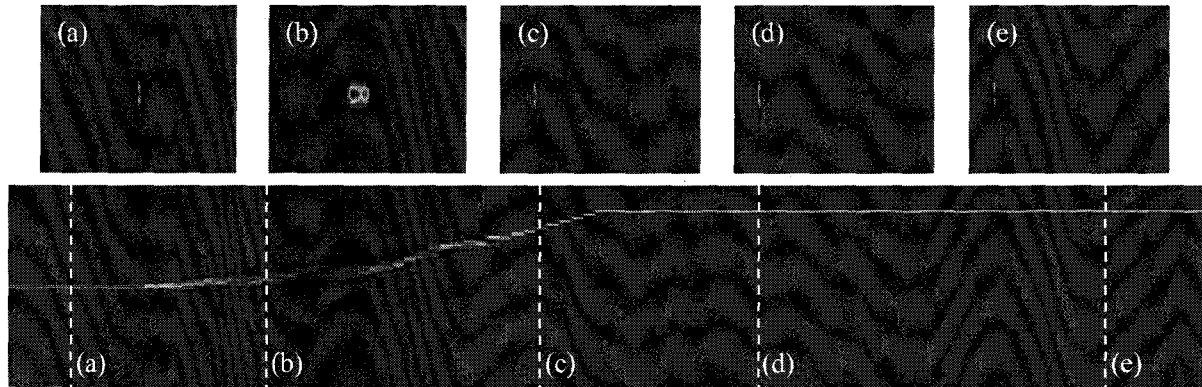


Figure I.36: Modélisation d'un commutateur sur microguide

avec $L_0=600\mu\text{m}$, $e=0\mu\text{m}$, $\Delta n=0,01$ (BPM 3D)

(La partie gauche sur les vues du haut correspond à la partie haute de la vue du bas)

Les modélisations par BPM 3D prévoient pour cette structure une diaphotie de $-23,3$ dB, soit une variation d'environ 5% par rapport à la BPM 2D.

III Conclusion

Une topologie originale de commutateur optique basée sur l'utilisation de 2 jonctions dissymétriques placées en série permet d'obtenir une diaphotie inférieure à -20dB pour une variation d'indice comprise entre 5×10^{-2} et 10^{-3} . Cette topologie a été rendue nécessaire par la diaphotie obtenue sur des structures à base de jonctions symétriques.

Des longueurs de zones actives (longueurs d'électrodes) de 200 à $600\mu\text{m}$ ont été simulées sur des structures guidantes de largeurs $0,8\mu\text{m}$ et $1\mu\text{m}$. Les longueurs les plus grandes donnent, comme on pouvait s'y attendre, les meilleurs résultats en terme de diaphotie mais ceux-ci sont contrebalancés par des pertes plus importantes.

Différents écarts inter-électrodes ont eux aussi été simulés. Ils permettent, entre autres, de traduire l'étalement latéral des porteurs dans la zone de commutation (sous l'électrode).

L'obtention d'une faible diaphotie ainsi que d'un équilibre entre les deux voies de commutation résulte d'un savant compromis entre de nombreux paramètres dont une partie

(étalement des porteurs, variation d'indice) est encore peu bornée dans cette technologie, et compte tenu des dimensions, dépendante du processus de fabrication. Différents composants seront donc fabriqués, dont la variation des paramètres de dessin permettra de couvrir un éventail assez large des paramétrages théoriques reportés ici.

Bibliographie du Chapitre I

- [1] OptiBPM – OptiFDTD, Optiwave System Inc, <http://www.optiwave.com>
- [2] J. Van Roey, J. Van Der Donk, P.E. Lagasse
Optical Society of America, 1981, vol. 71, n°7, pp 803-10
"Beam Propagation Method: analysis and assessment"
- [3] M.D. Feit, J.A. Fleck
Applied Optics, 1978, vol. 17, n°24, pp 3990-98
"Light propagation in graded-index optical fibers "
- [4] Y. Chung, N. Dagli
IEEE Journal of Quantum Electronics, 1990, vol. 26, n°8, pp 1335-39
"An assessment of finite difference BPM"
- [5] D. Schulz, C. Glingener, M. Bludszuweit, E. Voges
Journal of Lightwave Technology, 1998, vol.16, n°7, pp 1136-42
"Mixed Finite Element Beam Propagation Method"
- [6] J.P. Bérenger
Journal of computations Physics, 1994, vol. 114, pp 185-200
"A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves"
- [7] S.D Gedney
IEEE transactions on Antennas and Propagation, 1996, vol. 44, n°12, pp 1630-39
"An anisotropic Perfectly Matched Layer Absorbing Medium for the truncation of FDTD Lattices"
- [8] A. Beaurain
Thèse de l'Université de Lille 1, 4 décembre 2003
"Étude de fonctions passives à base de nanostructures photoniques"

- [9] I. Moerman, P.P Van Daele, P.M Demeester
IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 1997, vol.3, n°6, pp.308-20
"A review on fabrication technologies for the monolithic integration of tapers with III-V semiconductor devices"
- [10] K. Kasaya, O. Mitomi, M. Naganuma, Y. Kondo, Y. Noguchi
IEEE Photonics Technology Letters, 1993, vol.5, n°3, pp. 345-47
"A simple laterally tapered waveguide for low-loss coupling to single-mode fibers"
- [11] Hunsperger
Springer Series in Optical Sciences, Second Edition, 1985
Integrated Optics: Theory and Technics
- [12] F. Fiedler, A. Schlachetz
Solid State Electronics, 1987, vol.30, n°1, pp 77-83
"Optical parameters of InP based Waveguides"
- [13] B.R Bennett, R.A. Soref, J.A Del Alamo
IEEE Journal of Quantum Electronics, 1990, vol. 26, n°1, pp 113-22
"Carrier-induced change in refractive index of InP, GaAs, and InGaAsP"
- [14] K. Ishida, H. Nakamura, H. Matsumura
Applied Physics Letters, 1987, vol.50, n°3, pp 141-42
"InGaAsP/InP optical switches using carrier induced refractive index change"
- [15] M. Zegaoui, J. Harari, J.P. Vilcot, F. Mollot, D. Decoster, H.W. Li, J. Chazelas
Electronics Letters, 2004, vol.40, n°16
"Determination of carrier-induced optical index and loss variations in GaInAsP/InP heterostructures from static and dynamic Mach-Zehnder interferometer measurements"

Chapitre II

Composants passifs intervenant dans la conception d'un commutateur optique ou d'une matrice de commutation optique en technologie microguide sur InP.

La technologie sur semi-conducteur permettant la réalisation de guides optiques rubans classiques n'est pas appropriée à la définition de nos structures. En effet, en optique intégrée traditionnelle, les largeurs des rubans des guides sont de l'ordre de quelques microns pour une hauteur maximale de l'ordre du micron (la valeur typique étant plutôt de l'ordre de la moitié). Dans notre cas, la largeur des guides atteindra une valeur minimale de l'ordre de $0,5 \mu\text{m}$ et une profondeur de gravure de près de $3 \mu\text{m}$. La réalisation de nos composants à haut rapport d'aspect repose donc sur la mise au point et l'optimisation de différents procédés technologiques.

Dans ce chapitre, nous présentons en première partie les résultats de précédents travaux menés au laboratoire. Ces résultats orienteront notre choix quant au procédé technologique à mettre en œuvre pour la fabrication de nos structures. Nous détaillerons ensuite la mise au point et l'optimisation de deux procédés spécifiques à la technologie utilisée: le procédé de masquage utilisant une résine électronique épaisse comme masque de gravure et le procédé de gravure profonde des guides.

Nous présenterons ensuite la fabrication des structures passives intervenant dans la conception d'un commutateur ou d'une matrice de commutation, tels que les guides droits, les jonctions Y ou les guides courbes; fabrication utilisant les deux procédés précédents.

Dans une dernière partie, les caractérisations optiques de ces composants permettront de mettre en évidence les performances de la technologie microguide et de valider le procédé.

I Mise au point de la technologie

I.1 Brève introduction au processus de fabrication

I.1.a Structure épitaxiale réalisée.

La détermination de la structure épitaxiale, rappelée dans le Tableau II-I, est le résultat des modélisations présentées dans le chapitre précédent. Cette structure a été réalisée au sein du groupe Epitaxie de l'IEMN par épitaxie par jets moléculaires sources gaz (GSMBE).

Afin de se placer dans des conditions technologiques proches de celles que nous rencontrerons pour la réalisation des composants actifs, nous choisissons de travailler sur un substrat d'InP dopé n+.

Couche	Matériau	Dopage	Epaisseur
Confinement supérieur	InP	nid	1,2 μm
Cœur du guide	InGaAsP ($\lambda_c=1,3\mu\text{m}$)	nid	0,3 μm
Confinement inférieur	InP	nid	0,3 μm
Substrat	InP	n+	350 μm

Tableau II-I: Epitaxie réalisée à l'IEMN pour la fabrication des composants passifs

Gardons en mémoire que ce qui sera gravé en tant que confinement inférieur représente la couche d'InP nid de 0,3 μm et environ 0,9 μm d'InP n+, l'ensemble correspondant donc à une épaisseur totale d'environ 1,2 μm .

I.1.b Topologie des composants

Pour la réalisation des composants passifs, la structure microguide utilisée est présentée Figure II.1. Les largeurs de guide envisagées sont comprises entre 0,5 μm et 1 μm . Nous réaliserons les éléments basiques nécessaires à la réalisation de commutateurs optiques,

à savoir, des guides droits, des guides courbes, des jonctions Y et des structures d'adaptation de mode.

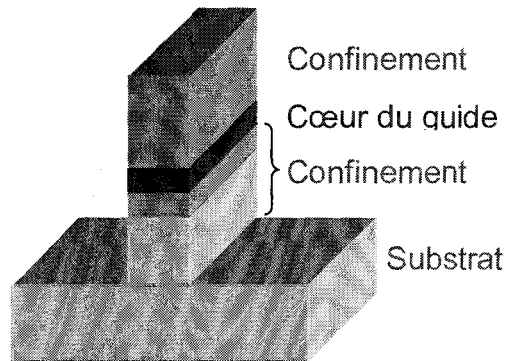
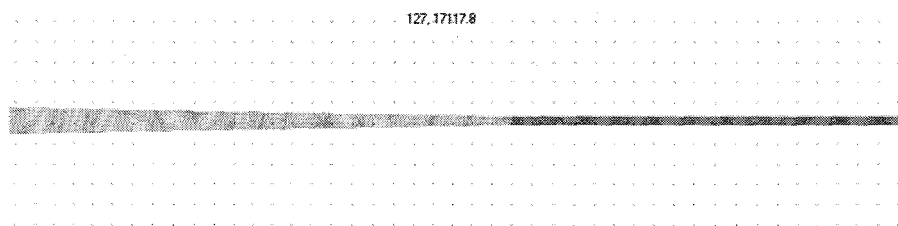
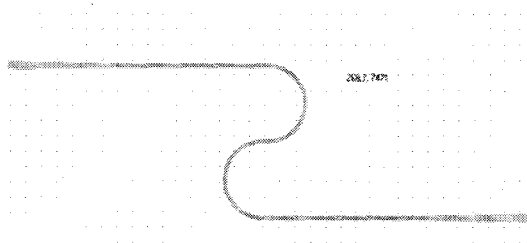


Figure II.1: Représentation de la structure microguide passive

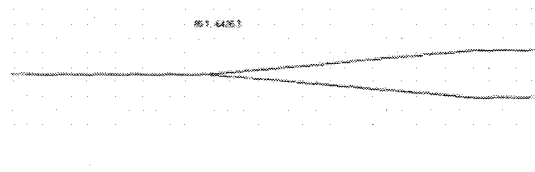
Les principales géométries de ces structures sont présentées en Figure II.2 (ces schémas sont issus du logiciel de dessin clewin).



a) Guide droit de largeur $0,8 \mu\text{m}$ précédé d'un "taper" de forme triangulaire passant d'une largeur de $2,5 \mu\text{m}$ à une largeur de $0,8 \mu\text{m}$ sur une longueur de $50 \mu\text{m}$



b) Guide courbe de largeur $0,8 \mu\text{m}$ de rayon de courbure $5 \mu\text{m}$



c) Jonction Y d'angle 10° , largeur de guide $0,8 \mu\text{m}$

Figure II.2: Quelques géométries de structures réalisées

I.1.c Récapitulatif des étapes technologiques

Dans le Tableau II-II, nous présentons les principales étapes technologiques nécessaires à la réalisation des structures microguides passives avant de donner, dans le paragraphe suivant, une description plus détaillée de chacune d'entre elles.

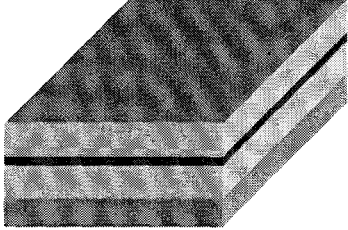
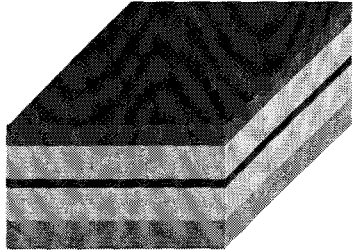
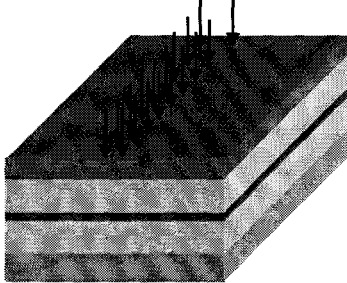
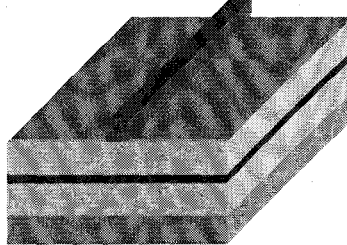
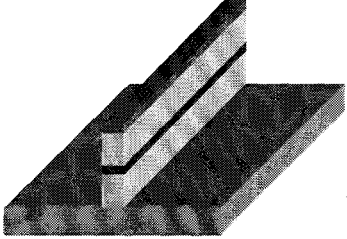
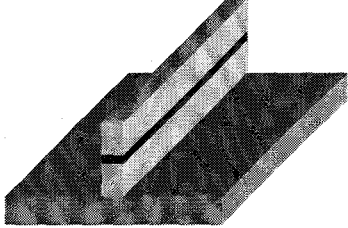
	
Etape 1 : choix de l'épitaxie	Etape 2 : enduction de la résine
	
Etape 3 : lithographie électronique	Etape 4 : définition du masque
	
Etape 5 : gravure des guides	Etape 6 : retrait de la HSQ

Tableau II-II: Etapes technologiques de fabrication des structures passives

La réalisation des structures microguides a principalement nécessité l'optimisation de deux procédés importants: celui constitué de la définition des masques (étapes 2 à 4) et celui lié à la gravure des guides (étapes 5 et 6). Ce sont ces procédés que nous détaillons par la suite.

I.2 Résumé succinct de précédents travaux

Nous présentons ici les différents résultats, préliminaires à notre étude, qui ont permis d'orienter notre choix parmi les solutions potentielles pour le développement du procédé de fabrication. Ces résultats sont principalement issus des travaux de doctorat de A. Beaurain [1]

et D. Lauvernier [3] en ce qui concerne respectivement la gravure sèche et la définition du masque de gravure.

I.2.a Les procédés de gravure

I.2.a.1 Procédés de gravure ICP

Les premiers tests sur les procédés de gravure ont été menés sur un bâti de gravure ICP (équipementier: Trion) disponible, à l'époque, à l'IEMN. Celui-ci possédait deux chambres de gravure, une réservée aux procédés à base de chlore (Cl_2) et l'autre à ceux à base de méthane/argon (CH_4/Ar). Cette première série de tests a été effectuée en utilisant un masque métallique soit de nickel (Ni) soit de germanium (Ge) déposé par procédé lift-off (résine PMMA, lithographie électronique). Le masque métallique avait été choisi pour sa facilité de dépôt et les deux métaux retenus pour leur facilité de retrait lors de procédés de gravure sèche de type RIE. L'équipement de gravure ci-dessus mentionné ayant montré un fonctionnement ainsi qu'une reproductibilité des résultats des plus aléatoires, nous ne reportons ici que les résultats les plus "utilisables" permettant d'orienter notre choix.

Les paramètres de gravure sont donnés ici à titre informatif; ceux-ci étant très fortement dépendants de l'équipement de gravure.

Gravure avec masque métallique en nickel

Les premières gravures ont été réalisées en chimie Cl_2 . Les paramètres de gravure sont les suivants :

- mélange Cl_2/He : 4/26 sccm
- pression: 10 mTorr
- puissance RIE: 100 W
- puissance ICP: 400 W
- durée: 240 s

Une vue en coupe d'un guide de largeur $0,6 \mu\text{m}$ réalisé avec ce procédé est donnée Figure II.3.a La profondeur de gravure atteinte est comprise entre 2 et $2,6 \mu\text{m}$. Le profil de gravure est vertical mais les flancs sont entachés d'une rugosité importante (Figure II.3.b), celle-ci pouvant être attribuée soit au procédé de gravure soit à la qualité du masque métallique utilisé.

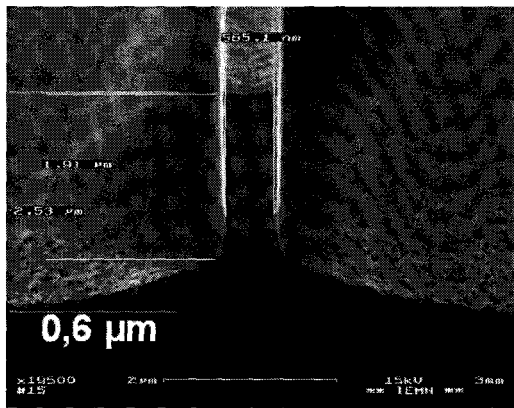


Figure II.3.a: Microguide de largeur 0,6 μm

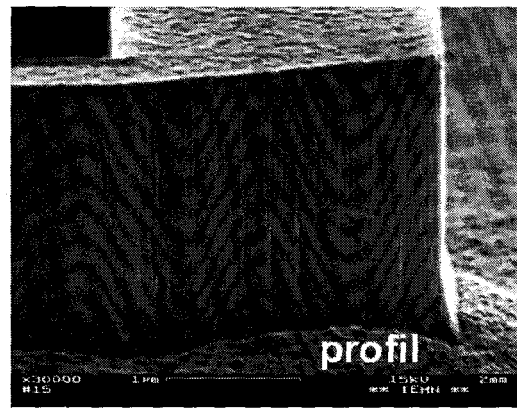


Figure II.3.b: Profil de gravure

Une seconde série de tests a été menée en chimie $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Ar}$. Les paramètres de gravure sont les suivants:

- mélange: $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Ar}$: 24/50/10 sccm
- pression: 30 mTorr
- puissance RIE: 100 W
- puissance ICP: 300 W
- durée: 300 s

La profondeur gravée est ici de l'ordre de 1,2 μm (Figure II.4.a). Nous remarquons de suite que nous avons perdu la verticalité des flancs de gravure obtenue avec le plasma chloré précédent. Par contre, comme nous pouvons l'observer sur la Figure II.4.b, le fond de gravure est assez perturbé sur cet essai, ce qui résulte d'un dysfonctionnement du bâti de gravure utilisé (la chimie méthane argon amenant normalement à un fond de gravure "propre", se reporter pour cela à la présentation des résultats avec masque germanium).

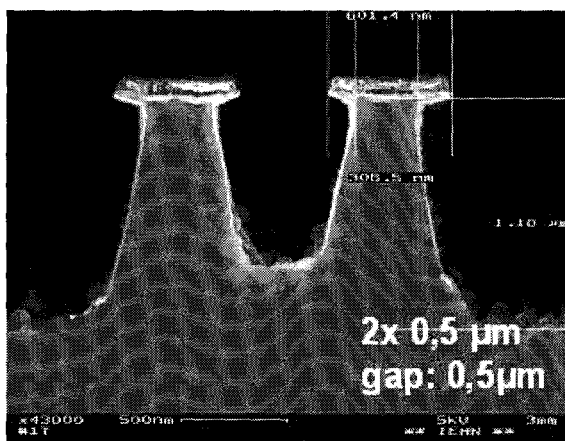


Figure II.4.a: Profil de gravure obtenu avec

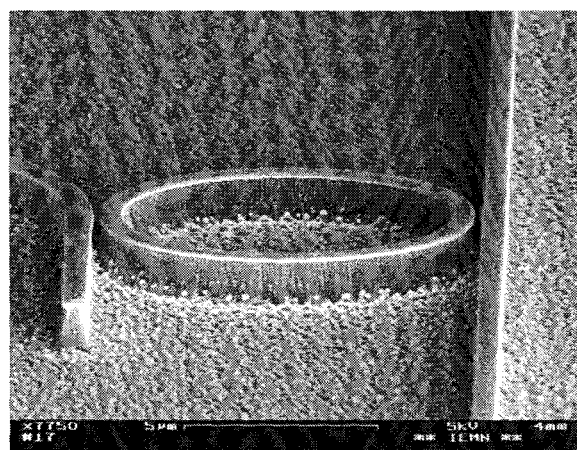


Figure II.4.b: Vue globale d'un motif gravé.

un procédé méthane argon.

Malgré quelques problèmes de fonctionnement sur le bâti de gravure durant ces essais, il est apparu:

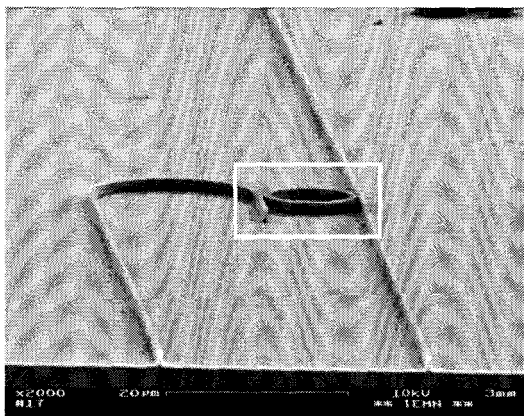
- que des flancs de gravure verticaux peuvent être obtenus en chimie chlorée, les motifs obtenus présentant alors une pente douce à leur pied,
 - qu'un fond de gravure "propre" ainsi qu'un pied de gravure "droit" peuvent être obtenus en chimie méthane/argon au détriment de la verticalité des flancs de gravure,
 - que le masque en nickel ne peut être ôté (après gravure) sans détériorer les motifs réalisés.
- Nous avons alors utilisé un masque en germanium.

Gravure avec masque métallique en germanium

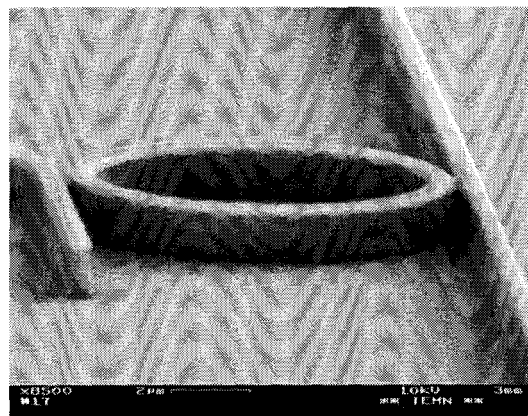
Le procédé de gravure développé a les paramètres suivants:

- mélange: CH₄/H₂/Ar: 24/50/10 sccm
- pression: 65 mTorr
- puissance RIE: 225 W
- puissance ICP: 100 W
- durée: 600 s

Nous pouvons observer en Figures II.5.a & II.5.b que le fond de gravure est propre, c'est ici effectivement le résultat "normal" obtenu en utilisant la chimie méthane argon.



*Figure II.5.a: Vue globale d'un motif gravé.
Le fond de gravure est ici très propre.*



*Figure II.5.b: Détail de l'encadré de la
Figure II.5.a.*

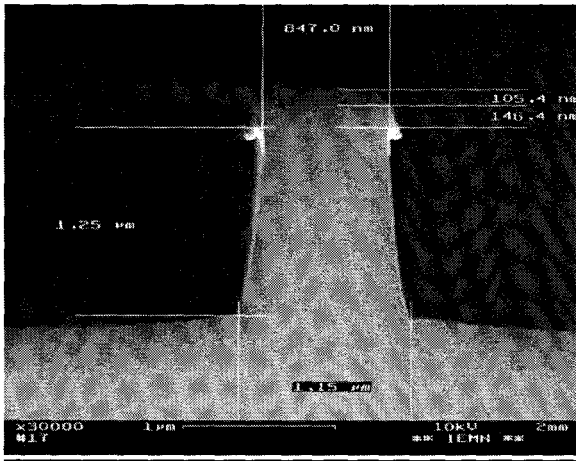


Figure II.5.c: Profil de gravure obtenu avec un procédé méthane argon ($\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Ar}$: 24/50/10 sccm).

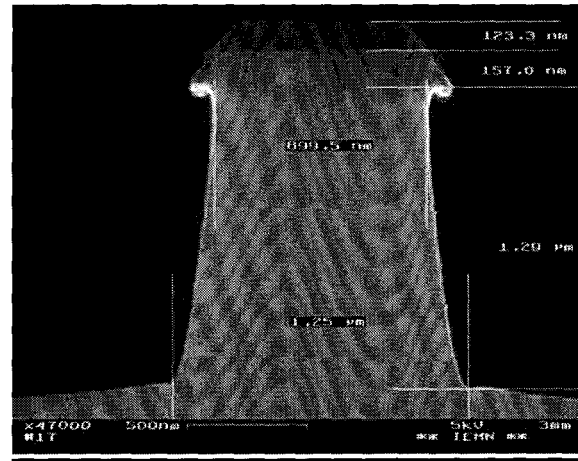


Figure II.5.d: Profil de gravure obtenu avec un procédé méthane argon ($\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Ar}$: 30/50/10 sccm).

Confirmant les essais précédents, la verticalité de la gravure n'est pas assurée (Figure II.5.c). La profondeur gravée est de l'ordre de 1,2 μm avec un "pied" de gravure légèrement en pente douce (Figure II.5.c). Un affaissement du masque métallique, lié à la sous gravure, peut aussi être discerné, ce qui est lié à une résistance plus faible du germanium par rapport au nickel (à comparer avec la Figure II.4.a).

Les proportions de méthane ($\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Ar}$: 30/50/10 sccm) ont été modifiées afin d'en déterminer l'influence sur la gravure des motifs (Figure II.5.d). Hormis une augmentation du dépôt des polymères carbonés lors du processus de gravure, aucune modification tangible n'a été observée sur le résultat.

Ces essais avec masques en germanium ont validé le fait que le fond de gravure est propre par cette chimie. Néanmoins, ce type de masque, métallique, a lui aussi posé problème lors de son retrait.

De ces différents essais, nous pouvons spécialement retenir:

- qu'un masque de gravure métallique est à proscrire, son retrait étant impossible (ou dommageable pour le composant) après le procédé de gravure ICP (bien que cela ne posait pas de problème particulier en RIE),
- qu'une chimie chlorée amène des flancs de gravure verticaux mais un pied de gravure en pente douce,

- qu'une chimie méthane/argon amène un fond de gravure propre ainsi qu'un pied de gravure bien défini au détriment d'une sous-gravure (non-verticalité) des flancs.

Dans le paragraphe suivant, nous présentons quelques autres résultats préliminaires toujours afin de pouvoir définir notre procédé.

I.2.a.2 Procédés de gravure alternatifs

Une méthode de gravure sèche de type RIE (Reactive Ion Etching) a aussi été testée par A.Beaurain [1]; cette technique a été employée du fait de la non-reproductibilité des résultats obtenus sur le bâti ICP disponible à l'époque. Un masque de silice de 300nm d'épaisseur était utilisé; il était réalisé par une technique de "double masque": le motif était premièrement défini dans une résine électronique négative (SAL601), il était ensuite transféré par gravure sèche de type RIE sur un film de silice, préalablement déposé. Par rapport à la technique ICP, la technique RIE donne des vitesses de gravure plus faibles. Pour la réalisation des guides submicroniques dont la profondeur de gravure est importante (de l'ordre de $3\mu\text{m}$), ceci amène un temps de gravure très long. La Figure II.6 montre l'exemple de la gravure d'un guide de largeur théorique $1\mu\text{m}$ (largeur du masque). On observe une sous gravure importante, une rupture de pente au niveau du matériau quaternaire et, en conséquence, des dimensions finales ne constituant qu'un piètre reflet de celles désirées. On peut toutefois noter une bonne résistance du masque en silice à la gravure, masque facilement retiré par voie chimique (HF).

Les résultats obtenus montrent qu'il est difficile de graver une telle profondeur de matériau de manière parfaitement anisotrope en utilisant la gravure RIE.

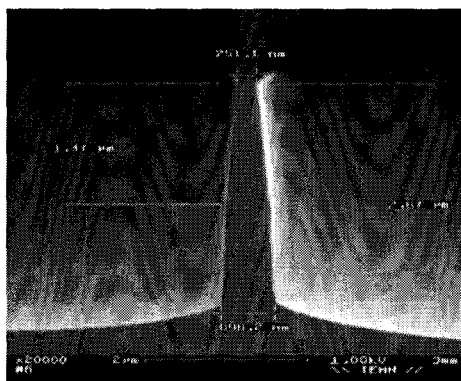


Figure II.6: Image MEB d'un guide de largeur théorique $1\mu\text{m}$ réalisé par gravure RIE

Pour palier aux inconvénients de la gravure RIE, une nouvelle méthode de gravure RIE-ICP (Reactive Ion Etching – Inductively Coupled Plasma) a été testée. Cette méthode est plus rapide et, a priori, anisotrope. Ces gravures ont été réalisées par la société Oxford pendant les phases d'essais préliminaires servant à l'évaluation d'un nouvel équipement; procédure effectuée au sein du laboratoire avant acquisition d'un nouvel équipement remplaçant l'équipement Trion précédemment utilisé. Les résultats de gravure obtenus sont de meilleure qualité que ceux obtenus par gravure RIE. La gravure est rapide (quelques minutes) et les flancs de gravure sont verticaux comme on peut le voir sur la Figure II.7 représentant un guide de 0,5 μm de largeur théorique.



Figure II.7: Image MEB d'un guide de largeur théorique 0.5 μm réalisé par gravure RIE-ICP

Nous constatons toutefois une érosion du masque de silice par cette méthode de gravure (un masque de silice de 300nm d'épaisseur est utilisé ici identiquement à celui utilisé pour la gravure précédente par la méthode RIE). Ceci entraîne une déformation au sommet des flancs de gravure et une certaine rugosité de ceux-ci. Ces défauts devraient pouvoir être réduits voire supprimés en utilisant un masque plus épais. L'amélioration des flancs de gravure passera donc par une optimisation du masque de gravure au niveau soit du matériau, soit de son épaisseur ou encore par une combinaison des deux solutions précédentes.

I.2.a.3 Conclusion des essais préliminaires: orientation du choix sur la technique de gravure qui sera utilisée

Nous avons opté pour une gravure sèche de type RIE-ICP (Reactive Ion Etching - Inductively Coupled Plasma). En effet la gravure RIE-ICP permet d'effectuer des gravures profondes et anisotropes présentant une faible rugosité, ce que nous cherchons tout particulièrement pour la réalisation des microguides. Bien que celles-ci puissent

éventuellement être obtenues avec une gravure de type RIE, leur optimisation est beaucoup plus délicate, a fortiori sur des matériaux de nature différente. Par ailleurs les chimies Cl_2 et CH_4 ont montré des caractéristiques complémentaires quant aux profils de gravure obtenus. Un procédé alliant ces deux chimies sera donc préférentiellement envisagé.

I.2.b Les masques de gravure

I.2.b.1 Masque métallique.

Comme nous l'avons vu précédemment, les premiers essais de gravure ont été réalisés en utilisant un masque métallique en nickel ou en germanium. Même si la tenue à la gravure de ce masque s'est révélée satisfaisante, le problème s'est posé lors du retrait de celui-ci après le procédé de gravure notamment ICP. L'utilisation d'un masque métallique pour nos gravures a donc définitivement été écartée.

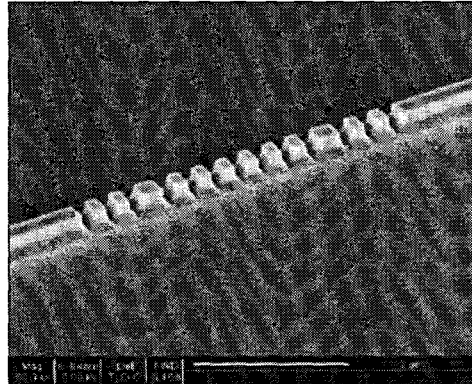
I.2.b.2 Masque diélectrique.

Le masque en silice n'a montré aucune difficulté particulière quant à son retrait que ce soit suite à un procédé de gravure RIE ou ICP. Néanmoins, en ce qui concerne la gravure ICP, son érosion est la source d'un profil mal maîtrisé (§ Figure II.7). Par ailleurs, sa réalisation par un procédé "classique", en deux étapes, nécessite l'utilisation d'une résine électronique négative dont la résolution ne peut, de prime abord, être que peu compatible avec les dimensions de nos structures.

Un procédé utilisant une résine non organique de type HSQ (Hydrogen SielsesQuioxane) [2] a alors été développé lors des travaux de thèse de D. Lauvernier [3]. Ce procédé a paru dès le départ très prometteur pour la réalisation de structures submicroniques par les résultats qui en avaient été reportés sur substrat Si. Il fallait alors le valider sur la filière des matériaux III-V.

Un procédé de lithographie amenant à la définition de motifs largement submicroniques a donc été défini [4]; des guides de 300nm de large (sur 300 nm de haut) ont été réalisés sur GaAs. Une épaisseur de HSQ de 160nm environ et une gravure RIE peu profonde (300nm) ont été utilisées avec succès pour la définition de ces guides [5]. La Figure II.8 montre un tel guide dans lequel une structure périodique a été insérée. Les résultats obtenus montrent que l'utilisation de la résine HSQ est tout à fait appropriée pour la définition de nos structures:

- l'obtention de structures de dimensionnalité largement submicronique est possible,
- la réalisation du masque ne nécessite qu'une seule étape d'insolation-révélation, si on lui administre un post-traitement adéquat, la HSQ peut présenter une résistance améliorée au procédé de gravure, presque équivalente à celle d'un masque en silice,
- son retrait par voie humide (acide fluorhydrique) n'a montré aucune difficulté particulière et n'interfère en rien avec les matériaux semiconducteurs utilisés.



*Figure II.8: Nanoguide structuré par un réseau (300nm de large)
réalisé par masque en HSQ de 160 nm*

I.2.b.3 Conclusion : Choix du masque de gravure.

Les premiers essais montrent que l'utilisation d'un masque de gravure métallique est à proscrire, son retrait complet étant impossible ou, tout au moins, incompatible avec la conservation de l'intégrité des matériaux utilisés. Les essais suivants ont été réalisés avec un masque de silice de 300nm; une érosion du masque a pu être constatée amenant une rugosité supplémentaire aux flancs de gravure.

La mise au point et l'utilisation d'un masque utilisant une résine électronique de type HSQ pour la gravure peu profonde de structures nanométriques sur GaAs en ont démontré les potentialités pour la réalisation de nos structures.

Compte tenu des différentiels de vitesse de gravure observés précédemment, une épaisseur de résine HSQ de 700nm d'épaisseur a été déterminée comme suffisante pour la définition de nos masques. Nous utiliserons donc la HSQ sous sa dénomination commerciale FOx® (Flowable Oxide) 16 (Dow Corning), parente de la FOx®12 utilisée précédemment lors des travaux de D. Lauvernier. Elle présente la même formulation mais une dilution différente par rapport à cette dernière et permet d'obtenir des dépôts plus épais. Il nous faudra

donc adapter et optimiser le procédé de lithographie mis au point pour la FOx®12 à la FOx®16.

I.3 Optimisation des étapes de lithographie électronique et de gravure

Nous présentons ici l'optimisation des deux procédés primordiaux (lithographie et gravure) nécessaires à la fabrication des structures microguides sur la base des résultats préliminaires (§I.2).

I.3.a Lithographie

I.3.a.1 Rappel sur le procédé de lithographie électronique à développer.

Comme nous l'avons vu précédemment, une épaisseur de 700 nm de résine électronique négative de type HSQ devrait a priori suffire pour l'étape de gravure des microguides. Rappelons qu'une épaisseur trop faible ne permettra évidemment pas de mener complètement à bien l'étape de gravure et qu'une épaisseur trop importante compliquera voire empêchera l'obtention de motifs (sub)microniques bien définis avec une verticalité des flancs satisfaisante. Comme décrit dans [5], le révélateur utilisé sera l'AZ400.

Nous devons donc déterminer les paramètres de lithographie nécessaires pour l'obtention de motifs (sub)micrométriques sur un film de 700nm de résine HSQ. Pour ce faire, il faut définir la dose d'insolation (quantité d'électrons reçus par unité de surface lors de l'écriture), la concentration du révélateur et le temps de révélation. La tension d'accélération du faisceau électronique est de 50kV, la résolution de l'écriture électronique utilisée pour les essais est de 10nm [6]; ces valeurs sont issues des essais préliminaires.

I.3.a.2 Détermination du procédé de lithographie

Dans un premier temps, un film de 700nm de HSQ est déposé sur le substrat.

La résine est déposée "classiquement" par centrifugation; les paramètres du dépôt (vitesse, accélération et temps) ainsi que la viscosité de la résine vont régir l'épaisseur finale obtenue, cette épaisseur ainsi que l'uniformité de celle-ci sur le substrat régissant elles-mêmes la dimension finale des objets.

Par rapport à la FOx®12 utilisée précédemment, la dilution de la HSQ FOx®16 est différente et un étalonnage adéquat a dû être fait. Plusieurs essais ont permis d'établir l'évolution de l'épaisseur de résine en fonction des paramètres de dépôt. Une accélération suffisante doit être appliquée pour favoriser la formation d'une couche de résine uniforme sur

toute la surface, nous fixons donc celle-ci à 1000 rpm/s. Nous fixons également le temps de dépôt à 30 secondes. L'évolution de l'épaisseur de résine déposée en fonction de la vitesse de rotation est présentée Figure II.9.

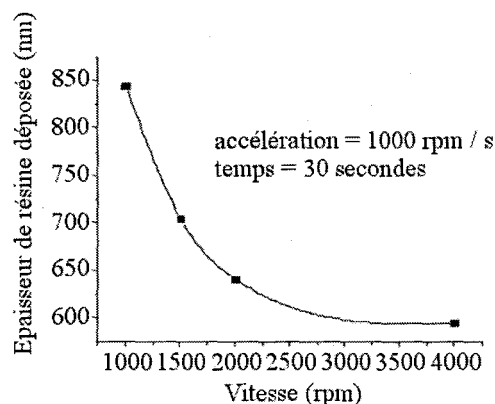


Figure II.9: Evolution de l'épaisseur de HSQ déposée en fonction de la vitesse de rotation pour une accélération de 1000 rpm/s et un temps de 30 secondes

Pour obtenir un film de 700 nm d'épaisseur de HSQ FOx®16, les paramètres de dépôt à utiliser sont résumés dans le Tableau II-III. Le dépôt se fait capot ouvert de manière à favoriser l'uniformité.

	vitesse	accélération	temps	capot
HSQ FOx®16	1500 rpm	1000 rpm/s	30 secondes	Ouvert

Tableau II-III: Paramètres de dépôt pour l'obtention d'un film de 700 nm de résine HSQ FOx®16

La résine ainsi déposée sur le substrat nécessite ensuite un recuit qui permet l'évaporation des solvants. Le recuit s'effectue immédiatement après la centrifugation sur une plaque chauffante.

Nous réalisons deux recuits successifs, de 150°C et 220°C, sur plaque de deux minutes chacun.

L'étape suivante est celle de définition des masques. Les motifs réalisés sont des guides droits de largeur comprise entre 500nm et 2,5µm, des jonctions Y avec différents angles d'ouverture, des guides courbes et des adaptateurs de mode, en fait tous les éléments passifs rentrant dans la composition d'un commutateur ou d'une matrice de commutation.

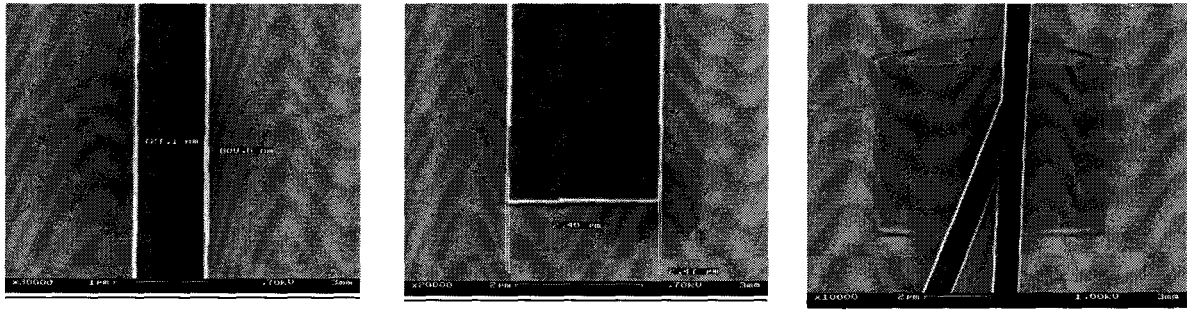
Nous avons réalisé quatre essais, dits de variation de dose, en adoptant différentes concentrations de révélateur et différents temps de révélation. Les paramètres des trois premiers essais sont résumés dans le Tableau II-IV.

	Essai 1	Essai 2	Essai 3
Concentration du révélateur (AZ400 / EDI)	1 / 3,5	1 / 2,5	1 / 1,5
Temps de révélation	2mn + 1mn	2mn + 30s	2mn

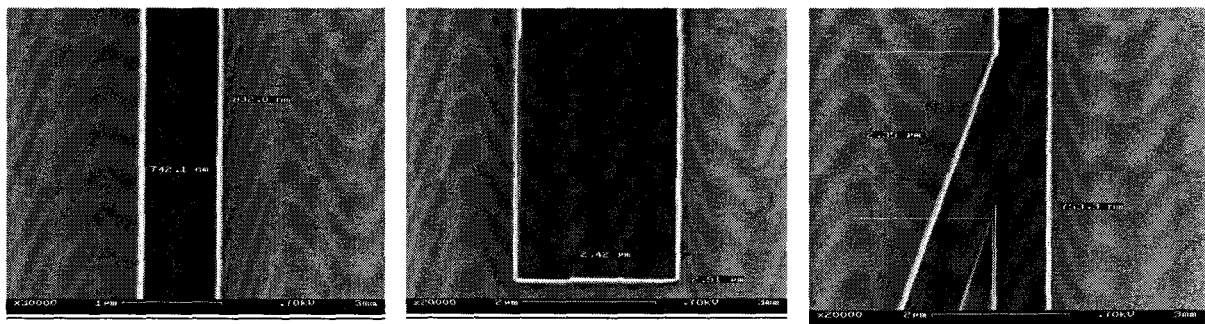
Tableau II-IV: Paramètres de révélation des premiers tests d'écriture électronique

Des observations au microscope électronique à balayage ont été effectuées afin de visualiser l'influence de ces paramètres sur le profil des masques pour les différentes doses d'écriture. Celles-ci sont reportées dans le Tableau II-V.

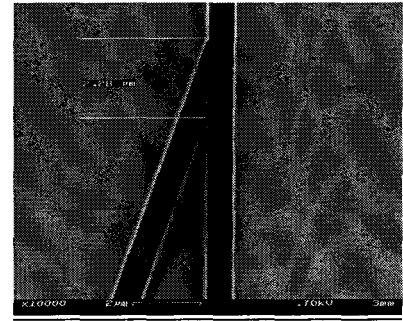
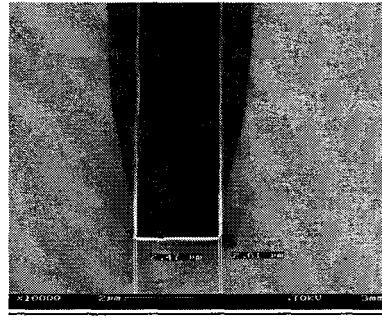
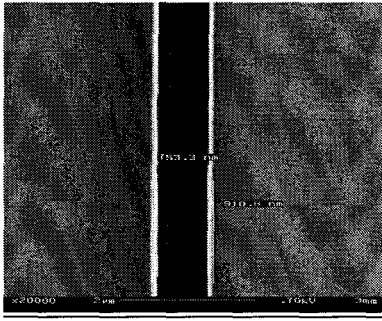
Essai 1 :



Dose = 1000µC/cm² (guide droit, taper, jonction Y de 20°)

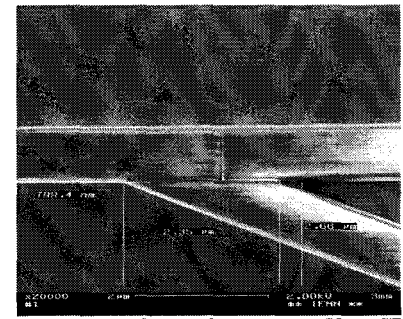
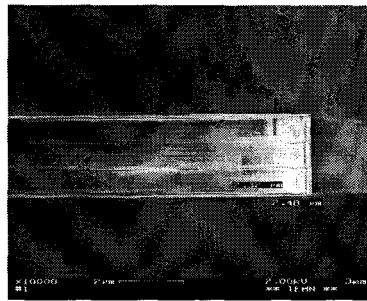
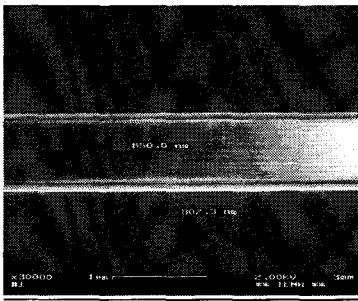


Dose = 1400µC/cm² (guide droit, taper, jonction Y de 20°)

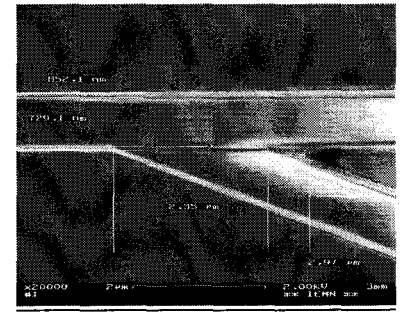
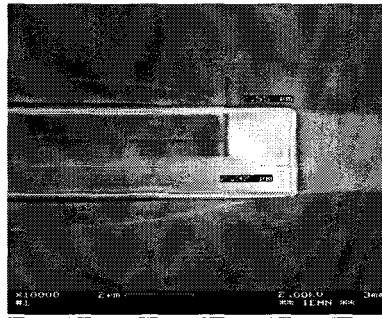
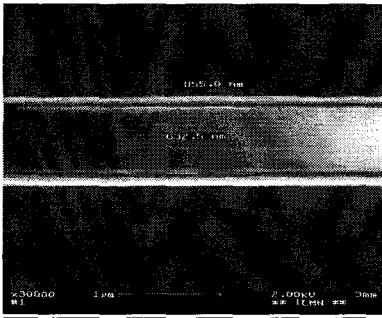


$Dose = 1800\mu C/cm^2$ (guide droit, taper, jonction Y de 20°)

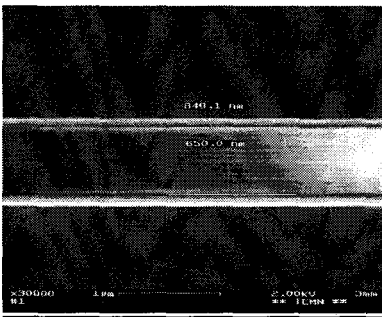
Essai 2 :



$Dose = 1000\mu C/cm^2$ (guide droit, taper, jonction Y de 20°)

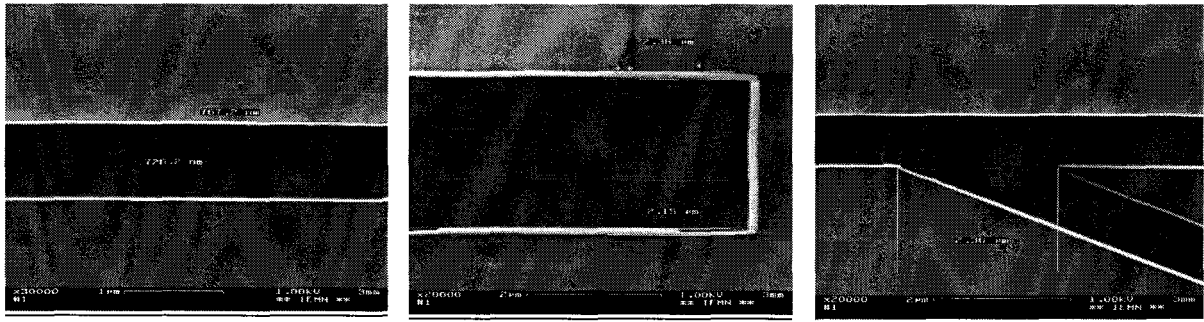


$Dose = 1400\mu C/cm^2$ (guide droit, taper, jonction Y de 20°)

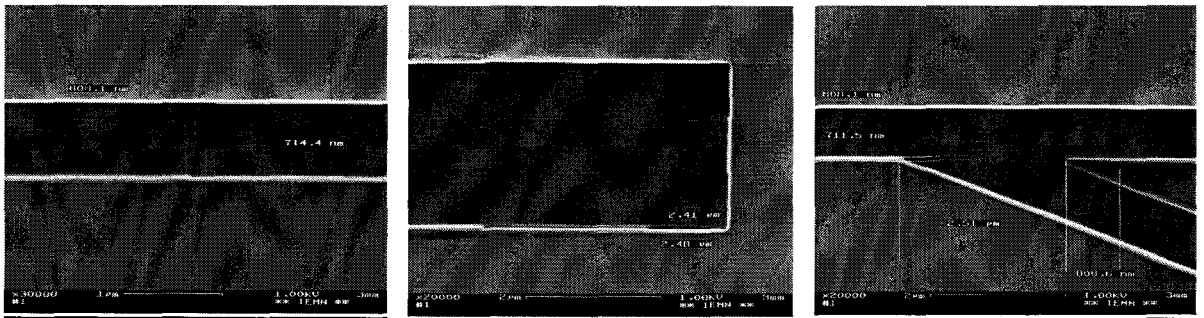


$Dose = 1800\mu C/cm^2$ (guide droit)

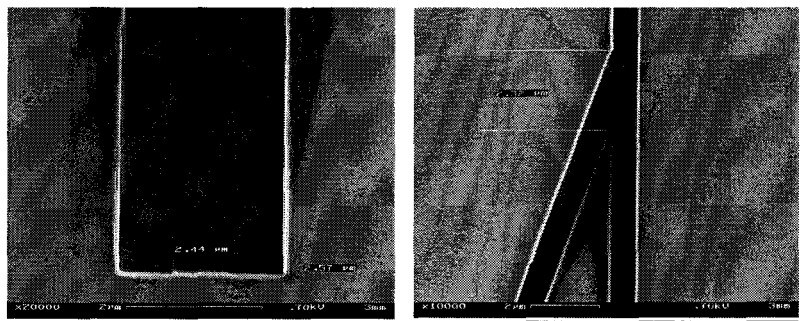
Essai 3 :



Dose = 1000μC/cm² (guide droit, taper, jonction Y de 20°)



Dose = 1400μC/cm² (guide droit, taper, jonction Y de 20°)



Dose = 1800μC/cm² (taper, jonction Y de 20°)

Tableau II-V : Résultats des différents essais d'écriture des masques en résine HSQ.

De ces observations, nous constatons que les flancs des motifs présentent un aspect oblique. Cet effet tend à augmenter avec la dose et à diminuer avec la concentration du révélateur.

Pour des doses élevées, les guides ne sont pas bien définis et notamment l'ouverture des jonctions Y. La dose optimale d'écriture se situe aux alentours de 1000μC/cm².

Un dernier essai est donc réalisé en effectuant une variation plus fine de doses autour de 1000μC/cm² et en augmentant la concentration du révélateur à 1 : 0,5 (AZ400 / EDI). Les

motifs sont révélés pendant deux minutes puis une immersion dans un bain d'EDI permet de stopper la révélation.

La combinaison des différents paramètres est présentée dans le Tableau II-VI.

Dose d'écriture ²	1000 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$
Concentration du révélateur	AZ400 / EDI : 1/0,5
Temps de révélation	2 minutes

Tableau II-VI: Paramètres optimisés pour la définition des masques par lithographie électronique

Ces paramètres permettent d'obtenir une bonne définition des masques en HSQ. La Figure II.10 représente une image du profil du masque de gravure en HSQ obtenue après une coupe réalisée au FIB (Focus Ion Beam). La forme en "champignon" s'explique par le fait que la résine a été recouverte de platine pour éviter sa déformation lors du bombardement d'ions pendant la gravure localisée au FIB. Nous pouvons en particulier apprécier la bonne verticalité des flancs.

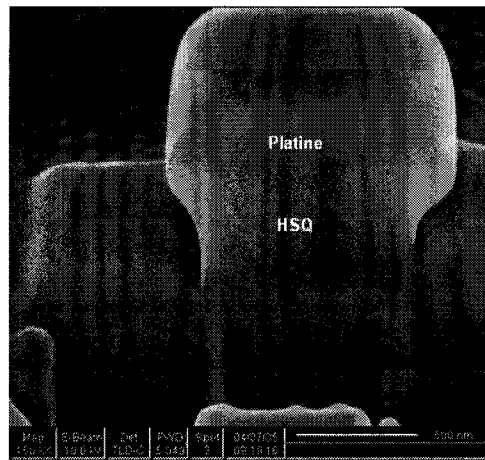


Figure II.10 : Image du masque en HSQ (gravure localisée)

² Cette dose est la dose dite "de base". Etant donné les dimensions et topologies des structures à réaliser, cette dose de base est modifiée localement lors de l'écriture en fonction de la conformation du dessin afin d'uniformiser la dose reçue. Cette modification s'effectue par l'application d'un coefficient multiplicateur sur les différentes parties du motif qui est alors divisé en "sous-motifs", chacun d'entre-eux ayant un coefficient différent. Celui-ci est calculé en fonction du dessin pour prendre en compte les effets de proximité des différentes zones à insoler. Ce calcul de coefficients est réalisé, au laboratoire, par l'utilisation conjointe de deux logiciels commerciaux (Synopsys®): le premier, Sceleton™ calcule la répartition spatiale d'électrons dans la structure multicouche résine(s)-matériau(x) et le second Proxecco™ calcule les coefficients à appliquer aux différentes zones du dessin en fonction de sa conformation et du résultat obtenu par Sceleton™.

I.3.b Mise au point du procédé de gravure des guides.

Ce paragraphe est consacré à la mise au point du procédé de gravure profonde des guides de taille submicronique. Pour cela, une gravure sèche par plasma de type RIE-ICP est utilisée. Celle-ci est effectuée sur le bâti RIE-ICP Oxford de l'IEMN (qui a remplacé entre-temps le bâti Trion précédemment mentionné) et pour lequel les premiers essais étaient très prometteurs (§ Figure II.7).

Ici aussi, une campagne d'essais a été réalisée afin de déterminer les paramètres optimaux du procédé de gravure. Une explication rapide du principe de gravure sèche et de ces différents paramètres est présentée en Annexe 1.

I.3.b.1 Optimisation du procédé de gravure.

Nous présentons ici les différents essais de gravure effectués sur le bâti ICP avec un masque de 700nm de HSQ. Le processus de définition du masque a été présenté précédemment. Nous cherchons à définir les paramètres de gravure (débit des gaz, puissance RIE et ICP, pression de travail et temps de gravure) de manière à obtenir des flancs verticaux présentant une faible rugosité.

1^{er} essai.

Le premier essai est effectué sur un substrat d'InP non épitaxié. Les paramètres de gravure utilisés sont résumés dans le Tableau II-VII :

Gaz	Cl ₂ – CH ₄ – H ₂ : 6 / 8 / 12 sccm
Puissance RIE	100 W
Puissance ICP	1250 W
Pression	4 mTorr
Temps de gravure	7 minutes

Tableau II-VII: Paramètres de gravure du 1er essai

Le profil de gravure obtenu est présenté Figure II.11.

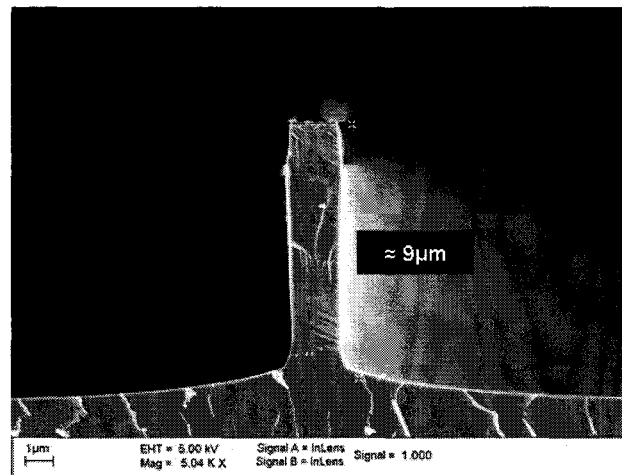


Figure II.11: 1er essai : profil de gravure obtenu

Le profil de gravure obtenu sur ce premier essai est encourageant : on constate une bonne verticalité des flancs et une bonne tenue à la gravure du masque de HSQ.

Toutefois, une mesure au profilomètre nous permet de constater que la profondeur de gravure est beaucoup trop importante: 9 μm au lieu des 2,7 μm attendus. Ceci donne une vitesse de gravure de l'ordre de 1,3 $\mu\text{m}/\text{min}$.

Nous décidons de reproduire ce procédé sur un substrat épitaxié InP/InGaAsP/InP en ajustant le temps de gravure.

2^{ème} essai.

Les paramètres de gravure sont identiques et le temps de gravure est réduit à 2 minutes, ce qui devrait permettre d'avoisiner une profondeur de gravure de l'ordre de 2,6 μm . Le profil de gravure obtenu est présenté Figure II.12.

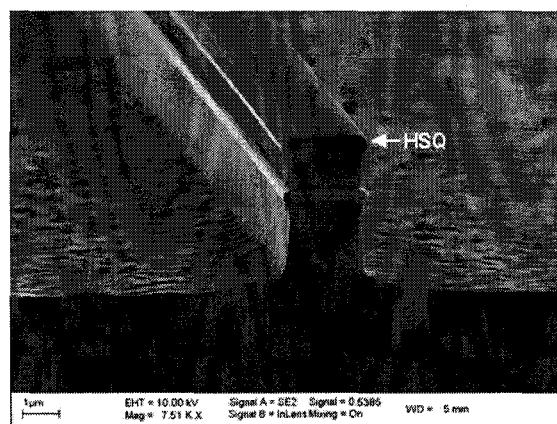


Figure II.12: Profil de gravure obtenu sur épitaxie

La profondeur de gravure attendue est bien obtenue, le masque de HSQ a résisté à la gravure.

Toutefois, deux problèmes majeurs apparaissent sur le profil de gravure :

1) Trois zones correspondant à l'empilement des couches épitaxiées peuvent être identifiées sur ce profil de gravure. On constate un retrait important des couches d'InP (couches supérieure et inférieure) devant la couche de quaternaire définissant le coeur du guide. Ceci est attribué au différentiel de vitesse de gravure entre l'InP et son composé. Ce phénomène est lié à la prépondérance de la composante chimique de la gravure. Une solution pouvant alors être envisagée est de diminuer la puissance ICP de manière à réduire le taux de dissociation des espèces chimiques.

2) Un léger effet de "bowing" ou "effet tonneau" peut également être observé sur les couches supérieure et inférieure d'InP. Pour corriger ce problème, il faut diminuer légèrement la puissance RIE.

Compte tenu de ces observations, pour l'essai suivant, la puissance ICP et la puissance RIE sont diminuées. L'anisotropie étant acceptable, nous décidons de ne pas modifier la pression de la chambre. Le temps de gravure est augmenté afin de compenser la diminution de la vitesse de gravure inhérente à la diminution globale des puissances utilisées.

3^{ème} essai

Cet essai est effectué sur un substrat épitaxié. Les paramètres de gravure utilisés sont résumés dans le Tableau II-VIII.

Gaz	Cl ₂ – CH ₄ – H ₂ : 8 / 7 / 8 sccm
Puissance RIE	75 W
Puissance ICP	500 W
Pression	4 mTorr
Temps de gravure	9 minutes

Tableau II-VIII: Paramètres de gravure du 3^{ème} essai.

Le profil de gravure obtenu est présenté en Figure II.13.

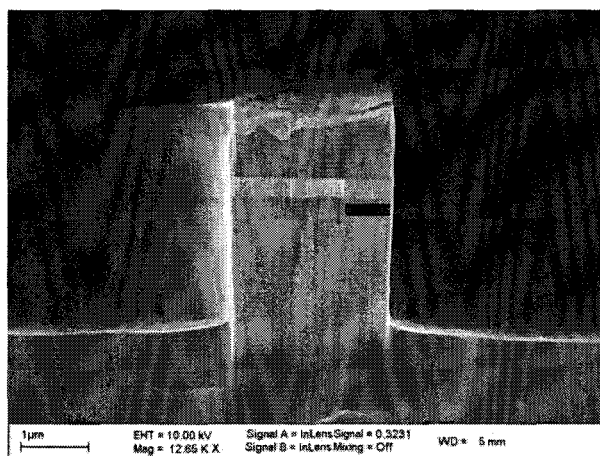


Figure II.13: Profil de gravure obtenu à l'essai 2 (sur épitaxie)

Les défauts observés sur le profil de gravure de l'essai précédent sont corrigés :

- 1) Nous n'observons plus de décrochement des flancs de gravure au niveau de la couche de quaternaire. Les parois des guides sont verticales.
- 2) L'effet de "bowing" observé à l'essai précédent sur les couches supérieure et inférieure d'InP a largement diminué.

Le temps de gravure avait été augmenté à cause de la diminution des puissances RIE et ICP. La profondeur de gravure obtenue est trop importante: $3,3 \mu\text{m}$ au lieu des $2,7 \mu\text{m}$ attendus (vitesse moyenne de gravure de $0,37 \mu\text{m}/\text{mn}$).

Hormis la profondeur de gravure trop importante, le profil de gravure obtenu à cet essai est très satisfaisant. Nous entérinons les valeurs des paramètres de gravure avec un dernier essai tout en ajustant la durée de gravure de manière à obtenir la profondeur désirée.

I.3.b.2 Détermination du procédé de gravure.

Cet essai est effectué sur un substrat épitaxié. Les paramètres de gravure (Tableau II-IX) utilisés sont identiques à ceux de l'essai précédent et le temps de gravure est réduit à 7 minutes 30 secondes afin d'obtenir une profondeur de gravure de l'ordre de $2,7 \mu\text{m}$.

Gaz	$\text{Cl}_2 - \text{CH}_4 - \text{H}_2 : 8 / 7 / 8 \text{ sccm}$
Puissance RIE	75 W
Puissance ICP	500 W
Pression	4 mTorr
Temps de gravure	7 minutes 30 secondes

Tableau II-IX: Paramètres de gravure du 4^{ème} essai

Le profil de gravure obtenu est présenté en Figure II.14.

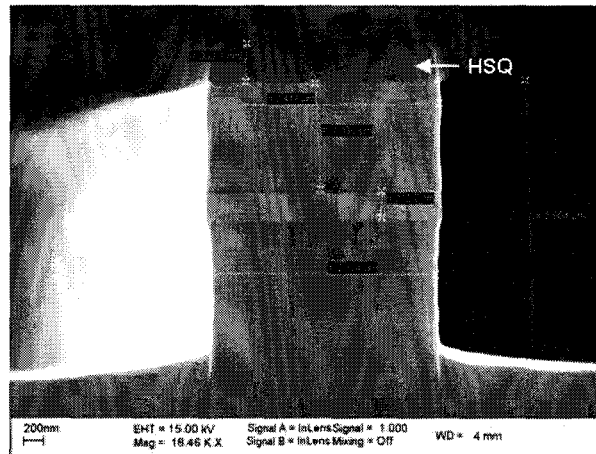


Figure II.14: Profil de gravure obtenu à l'essai 3 (sur épitaxie)

Les flancs de gravure sont verticaux, la profondeur de gravure obtenue ($2,9 \mu\text{m}$) est proche de celle visée ($2,7 \mu\text{m}$), le masque de HSQ a résisté à la gravure. Un léger effet de "bowing" peut néanmoins être observé.

Sur la Figure II.15, nous présentons une image MEB permettant l'observation de la rugosité des flancs gravés.

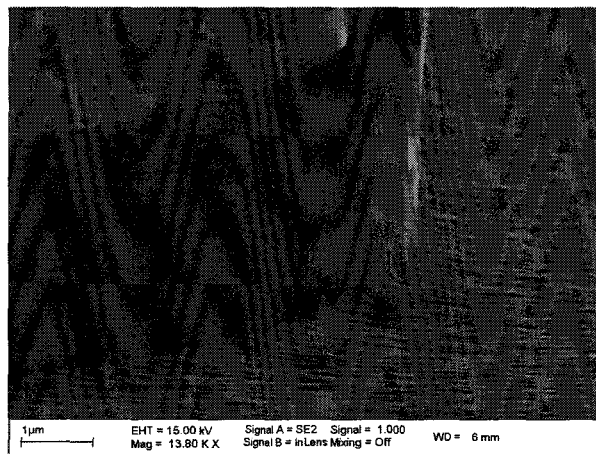


Figure II.15: Observation des rugosités de gravure

Une certaine rugosité persiste sur les flancs gravés des structures. Celle-ci est notamment discernable sur la partie la plus haute du guide et reste de faible importance; nous adoptons donc ce procédé de gravure pour la réalisation de nos structures. Il est à noter que les ruptures verticales de profil visibles sur la Figure II.15 sont la reproduction du masque:

nous sommes ici sur un essai de guide courbe avec un découpage grossier de la partie courbe en sections de droites.

Sur les images précédentes, nous observons le profil de gravure sur des guides relativement larges ($2,5 \mu\text{m}$) correspondant à la partie la plus large d'une structure d'adaptation de mode. La même qualité de gravure peut être observée sur des guides plus étroits ; les Figures II.16 & II.17 présentent des vues en coupe de guides de largeur respective $0,5 \mu\text{m}$ et $0,8 \mu\text{m}$.

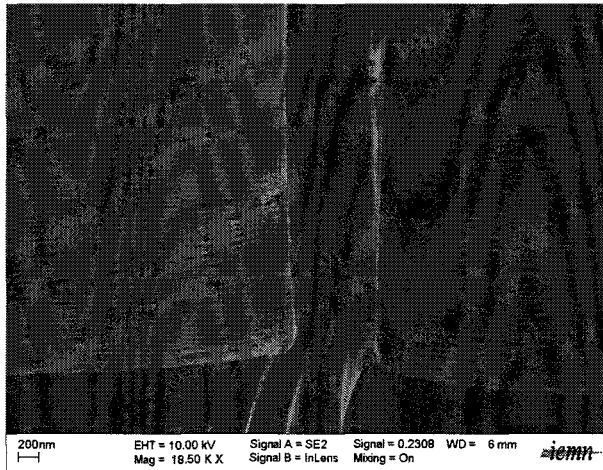


Figure II.16: Vue en coupe d'un guide de $0,5 \mu\text{m}$ de largeur

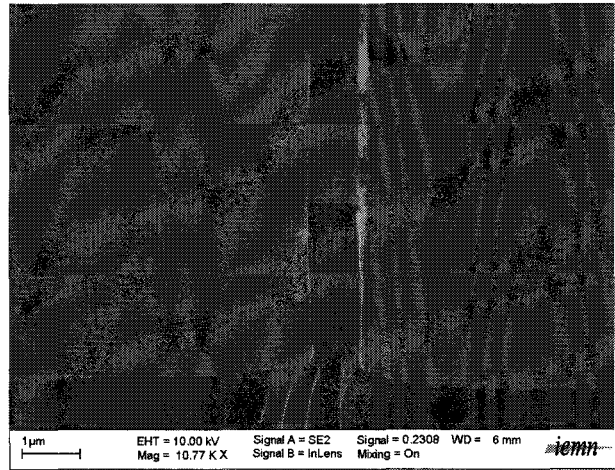


Figure II.17: vue en coupe d'un guide de $0,8 \mu\text{m}$ de largeur

II Description détaillée de la fabrication.

Nous présentons ici le processus de fabrication par le détail des différentes étapes de réalisation des structures microguides passives.

II.1 Traitement de surface préalable de l'épitaxie

L'adhérence de la résine utilisée sur le substrat est globalement faible, ce qui est susceptible de causer de sérieux problèmes lors des étapes de gravure où les procédés utilisés peuvent être agressifs pour la résine (voire même lors de l'étape de révélation). L'adhérence de la résine est primordiale pour obtenir une bonne définition de nos motifs micrométriques.

Afin de favoriser l'adhérence de la résine sur l'épitaxie, deux traitements servant à préparer la plaquette à l'application de la résine ont été envisagés : d'une part l'utilisation d'un promoteur d'adhérence et d'autre part une déshydratation du substrat.

La première solution envisagée est l'utilisation d'un promoteur favorisant l'adhérence résine / substrat. Le composé utilisé est classiquement de l'hexamethyldisilazane (HMDS). Les paramètres de dépôt de celui-ci sont résumés dans le Tableau II-X.

	vitesse	accélération	temps	capot
HMDS	3000 rpm	1000 rpm/s	20 secondes	Fermé

Tableau II-X: Paramètres de dépôt du promoteur d'adhérence HMDS.

La deuxième solution consiste à déshydrater le substrat en effectuant un recuit sur plaque à 200°C pendant au moins quinze minutes. L'opération de déshydratation améliore notablement l'adhérence de la résine en évacuant l'humidité présente à la surface de l'échantillon. L'étape de déshydratation est précédée d'un bref nettoyage du substrat dans une solution d'acide fluorhydrique.

Les deux solutions envisagées donnent de bons résultats quant à l'adhérence de la résine sur le substrat. Toutefois, la déshydratation est plus simple de mise en œuvre, ce procédé sera donc utilisé dans la réalisation de nos structures. L'étape de déshydratation doit être effectuée immédiatement avant l'étape de dépôt de résine, car la réabsorption d'humidité par le substrat est très rapide.

II.2 Réalisation du masque en résine HSQ

Le procédé de lithographie a été décrit en §I.3.a.2 et les différents paramètres de dépôt, insolation et révélation sont respectivement donnés dans les tableaux II-III et II-VI.

Après révélation, la sélectivité de gravure de la HSQ vis à vis d'un semiconducteur III-V (en l'occurrence l'AsGa) est de l'ordre de 3 [5]. Deux traitements sont proposés pour améliorer la sélectivité.

La première solution consiste à recuire la HSQ après l'étape de révélation à une température très élevée (> 400°C). Cette méthode appliquée avec succès en filière Silicium ne donne pas de résultats significatifs dans notre cas puisque des recuits à température élevée sur des matériaux de la filière III-V (et en particulier InP) dégradent très rapidement ceux-ci. En

se limitant pour cette raison à des températures de recuit inférieures à 400°C, la sélectivité de la HSQ par rapport à l'AsGa n'est alors que de 4 [5].

La deuxième solution est un traitement par plasma O₂ des motifs révélés. En utilisant les paramètres résumés dans le Tableau II-XI, une amélioration de la sélectivité jusqu'à 7 a été obtenue sur matériau GaAs [5].

	Gaz	Puissance	Pression	DC Bias	Temps
Durcissement HSQ FOx®16	O ₂ 50sccm	80 W	50 mTorr	380 V	10 minutes

Tableau II-XI: Paramètres du plasma O₂

Ce traitement est donc reproduit sur nos motifs en HSQ d'épaisseur 700nm afin d'en améliorer leur résistance à la gravure. Nous constaterons a posteriori la sélectivité effective de la HSQ par rapport à l'InP dans le cas d'une gravure RIE-ICP.

Les motifs submicroniques en HSQ FOx®16 sont présentés en Figure II.18, ces images ont été prises au MEB. Une bonne définition ainsi que le respect des dimensions sont obtenus.

L'ombre blanche que l'on peut discerner autour des guides sur les deux premières images pourrait traduire une légère pente du profil de résine. Nous évaluons cette pente à moins de 5%. Compte tenu de l'épaisseur importante de résine déposée, nous jugeons ce résultat acceptable pour la suite du procédé.

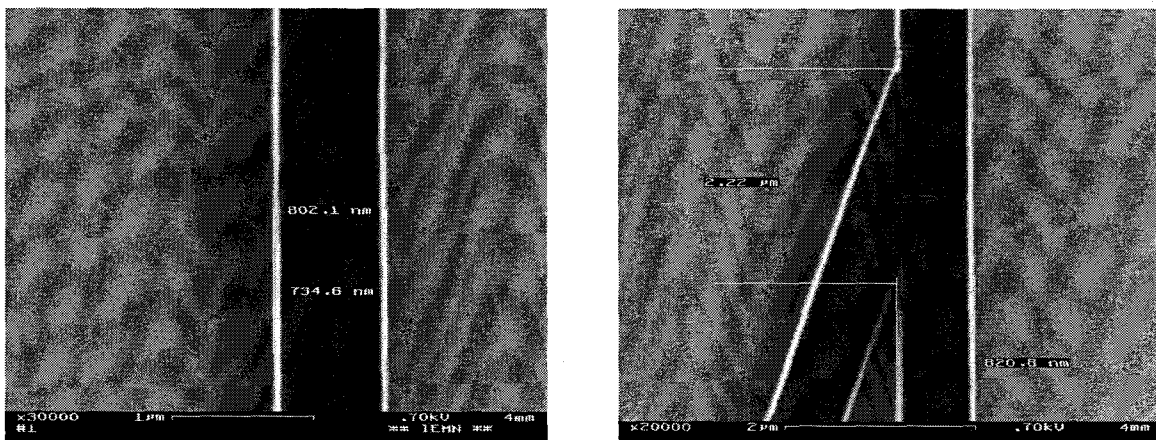


Figure II.18: Images MEB des motifs en HSQ après révélation et phase de durcissement

Par ailleurs, nous présentons en Figure II.19 des images MEB avec une prise de vue légèrement inclinée qui permet d'observer le profil du masque de résine. Celui-ci est vertical et présente une faible rugosité. Les ouvertures des jonctions Y sont très bien définies.

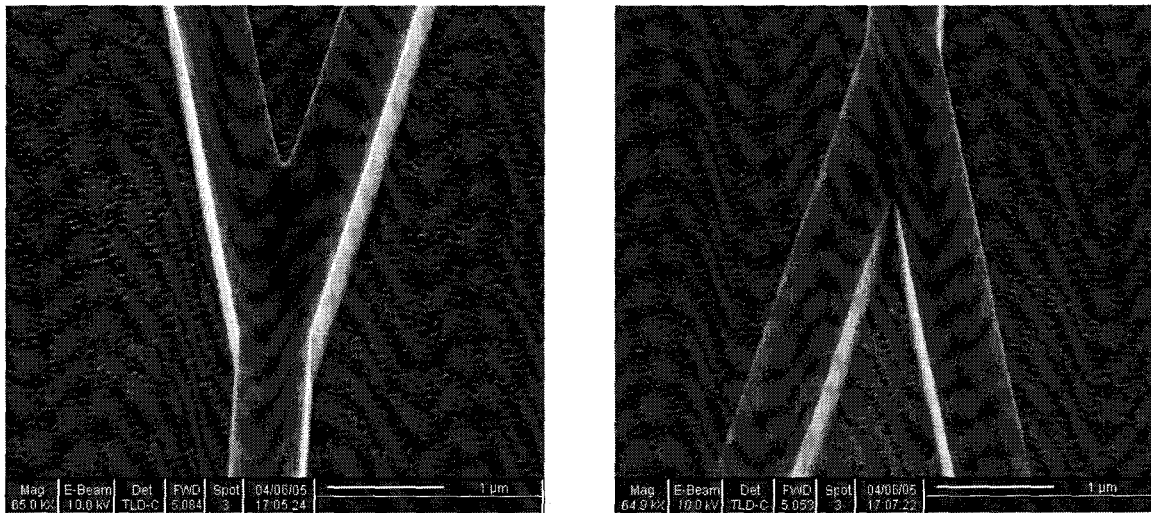


Figure II.19: Jonctions Y en HSQ après révélation et phase de durcissement

II.3 Gravure des guides

A cette étape, les motifs à réaliser sont définis en HSQ, nous devons les transférer sur l'épithaxie grâce à une gravure profonde de $2,7\mu\text{m}$. Les différentes étapes de ce procédé ont été présentées précédemment (§I.2.3.b, et plus particulièrement dans le Tableau II-IX). Après l'étape de gravure, la hauteur du film de HSQ restant en surface de l'échantillon est d'environ 400nm , ce qui conduit à une vitesse de gravure de l'ordre de $0,04\mu\text{m}/\text{min}$. Une sélectivité de gravure de la HSQ par rapport au semiconducteur de l'ordre de 9 est donc obtenue. Le reste du masque en HSQ est retiré par une brève gravure dans une solution de HF à 50%.

A ce stade, la fabrication des microguides est terminée. Il reste néanmoins à amincir le substrat de manière à pouvoir cliver les composants.

II.4 Amincissement

Pour permettre un clivage correct des composants, il est nécessaire d'amincir le substrat de son épaisseur initiale d'environ $350\mu\text{m}$ à une épaisseur finale de l'ordre de $120\mu\text{m}$.

Les composants sont protégés par un film de résine (AZ9260) d'une dizaine de microns. Ceci a pour effet d'une part de protéger les structures (fragiles) des microguides durant l'étape de polissage (tout en assurant une "planarisation" de la surface du wafer) et d'autre part de permettre un nettoyage aisé de l'échantillon à l'issue de cette étape. L'échantillon est ensuite collé (à l'aide de cire) face avant (celle protégée par le film de résine épais) sur un support en silice. Ce support est maintenu par aspiration dans le support mécanique de la machine de polissage. Le polissage se fait par un rodage mécanique sur un disque de quartz à l'aide d'une poudre d'alumine en suspension dans de l'eau désionisée. Le substrat est ensuite poli sur un plateau recouvert de feutrine à l'aide d'une solution d'hypochlorite de soude de manière à relâcher les contraintes issues de l'étape d'amincissement. A la fin de cette étape, nous obtenons par ailleurs une face arrière "miroir".

Le décollage de l'échantillon du substrat en silice se fait par dissolution de la cire dans une solution spécifique (EcoClear de chez Logitech) chauffée à 70°C ; l'échantillon est ensuite plongé (délicatement!!) dans une solution d'acétone pour dissoudre la couche de résine épaisse protégeant les composants.

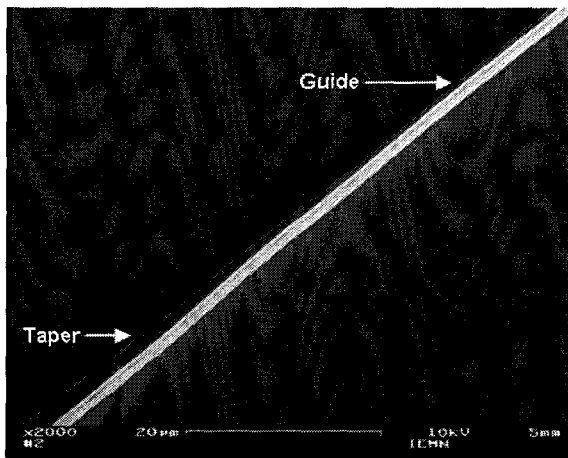
II.5 Clivage

Afin d'assurer une bonne injection de la lumière dans les guides, nous devons définir des faces d'entrée et de sortie des guides les plus parfaites possible. Ces faces sont obtenues par clivage.

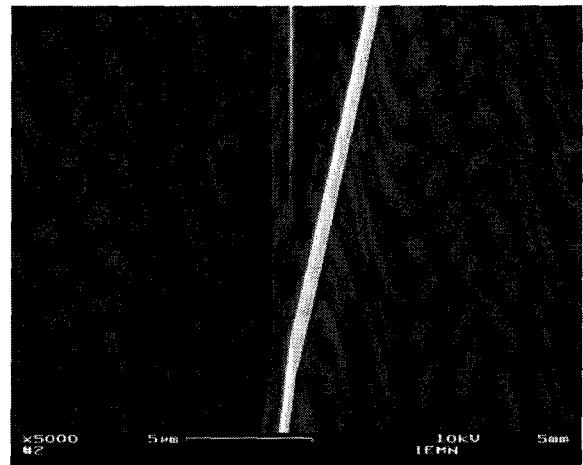
L'acquisition récente d'une cliveuse automatique a grandement simplifié cette étape critique. Le principe de fonctionnement de celle-ci est simple. Le substrat est placé sur un film autocollant. Une amorce de clivage est faite en face avant (coté "composant") à l'aide d'une pointe diamant; la position de l'amorce sur l'échantillon, la force de la pointe diamant et la longueur de l'amorce sont des paramètres ajustables sur la machine. Une lame vient ensuite exercer une contrainte en face arrière de façon à ce que l'amorce se propage à travers le substrat dans le plan souhaité. Si tant est que l'amincissement ait été suffisant, nous obtenons des faces d'entrée (ou sortie) de qualité "miroir" contrairement à ce que l'on peut observer sur les Figures II.16 & II.17 où, sur ces tests, aucun amincissement n'avait été effectué avant clivage.

II.6 Conclusion

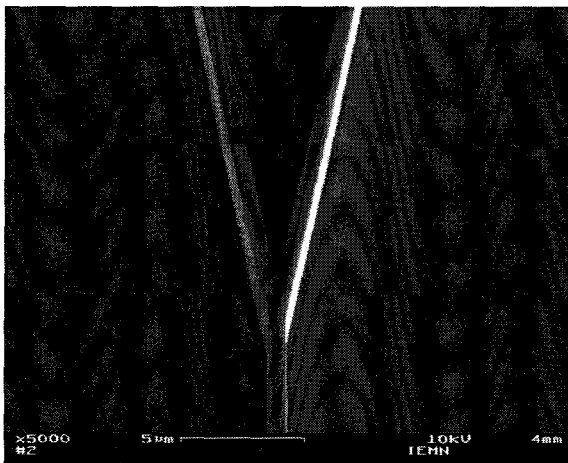
Nous avons réalisé des guides droits de différentes largeurs comprises entre $0,5 \mu\text{m}$ et $2,5 \mu\text{m}$. Nous avons également réalisé des jonctions Y, composant à la base du commutateur de type DOS, avec différents angles d'ouverture. Des angles importants (jusque 90°) ont été réalisés. Nous avons également réalisé des guides courbes qui permettront la liaison entre les différents éléments d'une matrice de commutation. Des rayons de courbure très faibles ont été réalisés. Enfin, des structures d'adaptation de mode ont également été réalisées. Les images MEB de ces différentes structures sont reportées Figure II.20.



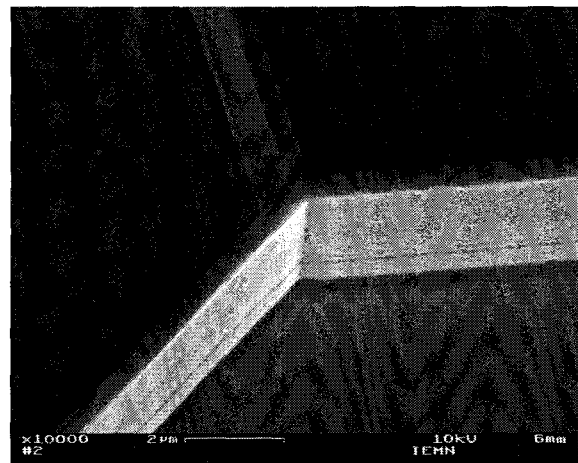
a) Guide droit de largeur $0,5 \mu\text{m}$
précédé d'un taper



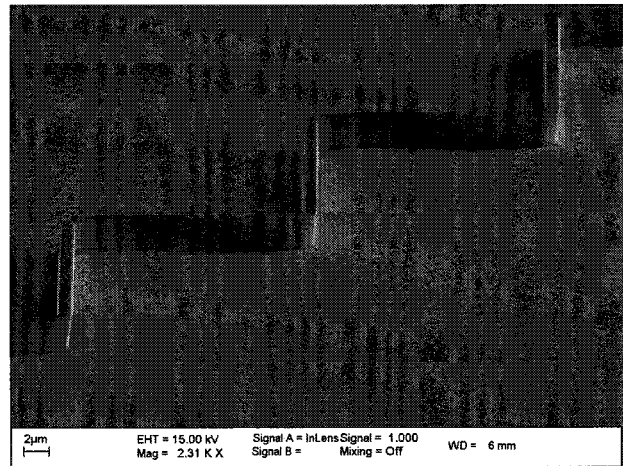
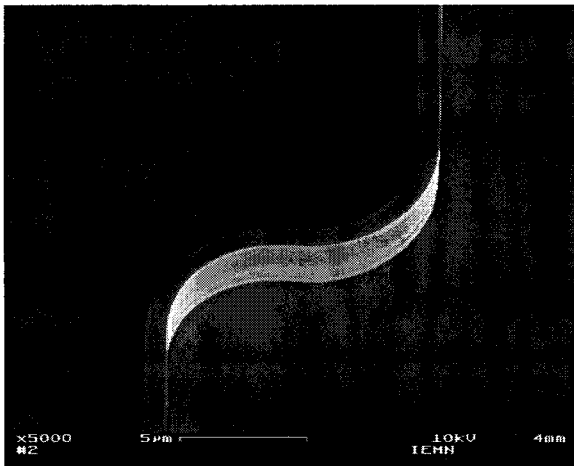
b) Jonction Y d'angle 15° réalisée à
partir de guides de largeur $0,8 \mu\text{m}$



c) Jonction Y d'angle 25° réalisée à
partir de guides de largeur $0,8 \mu\text{m}$



d) jonction Y d'angle 90° réalisée à
partir de guides de largeur $0,8 \mu\text{m}$



e) guide courbe de rayon $5\mu\text{m}$ réalisé à partir de guides de largeur $0,8\mu\text{m}$

f) succession de guides courbe de rayon $1\mu\text{m}$ réalisés à partir de guides de largeur $1\mu\text{m}$

Figure II.20: Images MEB des composants passifs réalisés en technologie microguide

Le procédé de réalisation technologique des structures microguides nous permet de conclure sur plusieurs points :

- le procédé en résine épaisse mis au point pour une utilisation en lithographie électronique nous permet d'obtenir une très bonne définition des masques de gravure.
- le film de 700nm de résine résiste bien à l'étape de gravure des microguides puisqu'à l'issue de cette étape il en reste encore une épaisseur de l'ordre de 370nm.
- le procédé RIE-ICP développé permet d'obtenir des flancs de gravure verticaux et une faible rugosité.

Les structures passives ainsi réalisées et clivées peuvent maintenant être caractérisées de manière à en déterminer les principaux paramètres caractéristiques que sont les différentes pertes, de propagation, liées aux jonctions et aux courbures.

III Caractérisation des composants passifs

Le banc de caractérisation et le détail de la mesure des pertes par la méthode Pérot-Fabry peuvent se retrouver en Annexe 2.

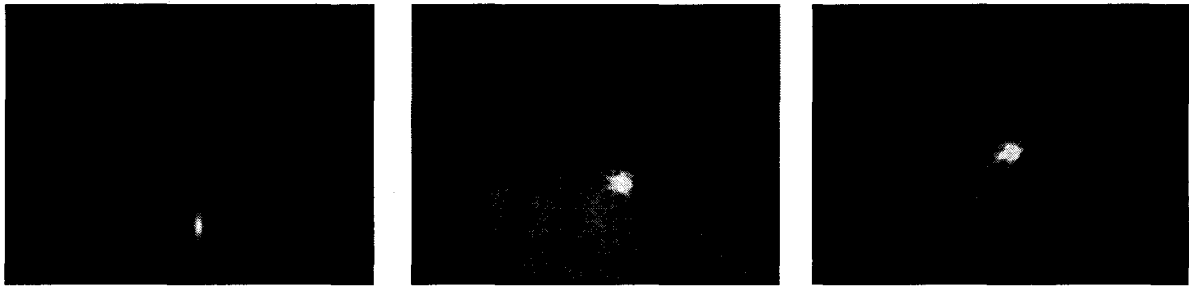
III.1 Mesure des pertes de propagation

Afin de déterminer les pertes de propagation de nos structures, les premières mesures ont été effectuées sur des guides droits de différentes largeurs.

III.1.a Analyse en champ proche

Les caractérisations des guides droits ont tout d'abord été effectuées en champ proche. Nous travaillons à la longueur d'onde de 1550 nm.

Les observations à la caméra infrarouge des faisceaux optiques en sortie des guides sont présentées Figure II.21. Ces faisceaux sont obtenus pour une même puissance optique d'entrée.



Faisceau en sortie d'un guide de largeur 0,8μm

Faisceau en sortie d'un guide de largeur 1μm

Faisceau en sortie d'un guide de largeur 1,5μm

Figure II.21: Observation en champ proche en sortie des guides droits

Ce type de caractérisation nous permet d'avoir un aperçu qualitatif rapide des propriétés de guidage de nos guides : le nombre de modes se propageant et l'intensité de confinement latéral des guides. Nous constatons que les guides sont monomodes. Qualitativement, nous observons que l'intensité lumineuse du faisceau optique en sortie du guide de 0,8μm est plus faible que celle en sortie du guide de largeur 1μm. Les faisceaux optiques en sortie des guides de largeur 1μm et de largeur 1,5μm semblent équivalents. Ceci peut être directement lié à l'évolution des pertes mais aussi à la qualité de l'injection. Une mesure fibre à fibre nous permettra de confirmer cette analyse qualitative.

III.1.b Détermination des pertes par la méthode Pérot Fabry

Sur la Figure II.22, nous présentons le spectre Pérot Fabry réalisé sur une plage de longueur d'onde allant de 1540nm à 1550nm. Cette mesure a été obtenue sur un guide de largeur 0,5μm et de longueur 1mm. Des structures d'adaptation de mode sont utilisées en entrée et en sortie du guide pour faciliter l'injection et la récupération de la lumière.

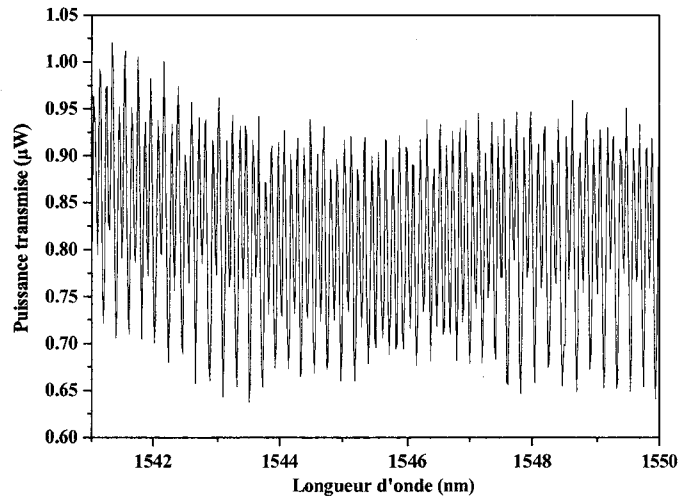


Figure II.22: Spectre Périot Fabry obtenu sur un guide de $0,5\mu\text{m}$ de largeur et de 1mm de longueur

Nous calculons le contraste de puissance représentant l'amplitude du spectre Périot Fabry. Nous obtenons un contraste de puissance moyen égal à 0,231. En appliquant la formule (1), (voir Annexe 2) on calcule des pertes de 4,07dB pour ce guide de 1mm de longueur.

Pour un guide de $0,5\mu\text{m}$ de largeur, les pertes de propagation sont donc estimées à environ 4 dB/mm.

La même méthode est appliquée pour mesurer les pertes de propagation sur des guides de différentes largeurs. Les mesures des pertes de propagation en fonction de la largeur du guide sont résumées en Figure II.23.

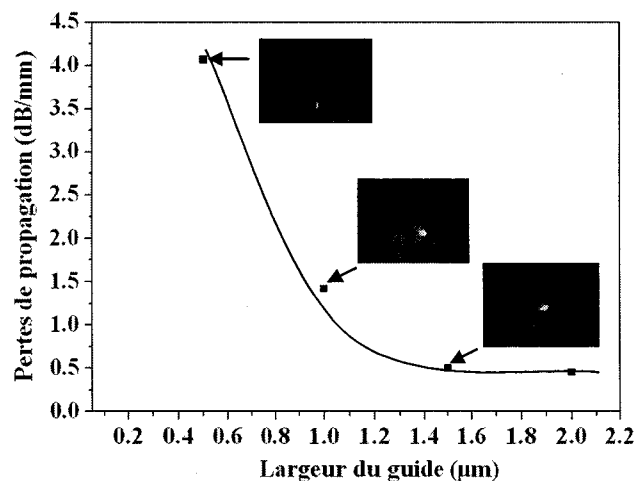


Figure II.23: Evolution des pertes de propagation en fonction de la largeur du guide

III.1.c Conclusion

Les pertes de propagation sont inférieures à 1dB/mm pour des guides de largeur supérieure à 1 μ m. Les modélisations prévoient des pertes inférieures à 1dB/mm pour des guides de largeur supérieure à 0,5 μ m. La différence observée pour les guides les plus étroits est certainement liée à la rugosité des flancs de guides qui n'est pas prise en compte dans les modélisations. Cette rugosité influe davantage sur les pertes de propagation pour les guides les plus étroits. En effet, comme l'étude théorique du chapitre précédent nous le montre, le mode optique correspondant à des structures très étroites s'étend jusqu'aux parois des guides (Figure II.24 gauche). Pour des guides plus larges (Figure II.24 droite), le mode optique ne fait qu'effleurer les parois des guides, les rugosités auront donc beaucoup moins d'importance et les pertes leur étant inhérentes n'en seront que plus faibles.

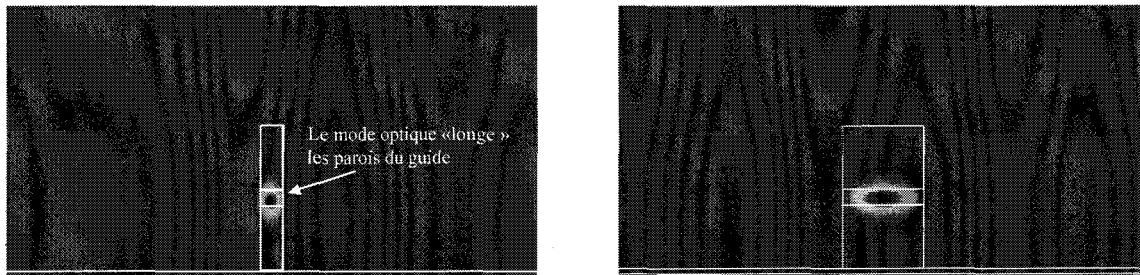


Figure II.24: Profil du mode optique d'un guide de 0,8 μ m de largeur (gauche) et d'un guide de 1,5 μ m de largeur (droite)

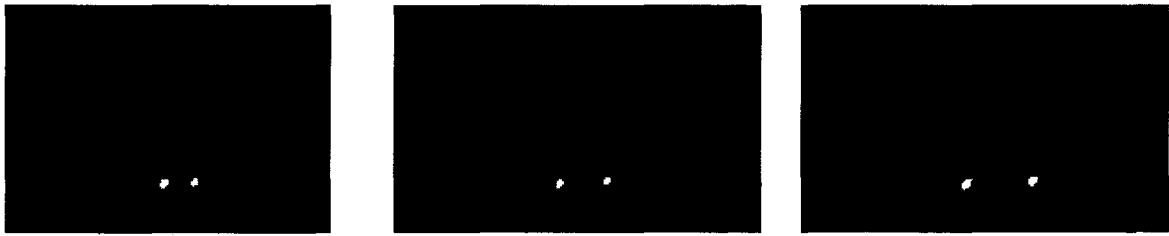
Dans le cas des guides étroits, il y a une interaction importante entre le mode optique et les parois du guide.

III.2 Mesure des pertes liées aux jonctions.

Ces mesures ont été faites sur des jonctions Y réalisées à partir de microguides de largeur 1 μ m.

III.2.a Mesures en champ proche

Cette première approche permet de conclure qualitativement sur l'équilibre de la jonction. Sur la Figure II.25, nous observons les spots optiques en sortie de jonctions Y. Qualitativement, nous observons que les jonctions sont bien équilibrées, les luminosités des deux sorties sont équivalentes.

Jonction d'angle 5° Jonction d'angle 10° Jonction d'angle 20° *Figure II.25: Observation en champ proche des sorties de jonctions Y*

III.2.b Mesures fibre à fibre

Pour caractériser ce type de structures, la difficulté majeure réside dans l'alignement de la fibre. En effet, un premier alignement est fait sur une des deux sorties, un déplacement selon le seul axe longitudinal serait suffisant pour mesurer l'intensité du deuxième spot. Cependant compte tenu du parallélisme imparfait des déplacements relatifs du substrat et de la fibre, un réalignement est nécessaire. Il est alors très délicat d'apprécier quantitativement l'équilibre de la jonction. Néanmoins, en réajustant l'alignement de manière à détecter la puissance maximale, les mesures montrent des pertes en excès inférieures à 2dB pour des jonctions d'angle d'ouverture inférieur à 20° .

III.3 Mesure des pertes liées aux courbures.

Nous venons de mesurer les pertes de propagation et d'évaluer les pertes dues aux jonctions. Il nous reste à mesurer les pertes dues aux courbures. Les guides courbes sont utilisés par exemple dans une matrice pour permettre le changement de direction du faisceau optique pour relier les dispositifs élémentaires de commutation.

En outre, le fort confinement latéral des guides submicroniques est mis à profit pour réaliser des courbures de très faible rayon. Les modélisations de ces guides prévoient de faibles pertes par courbure pour de petits rayons. Des guides de rayons de courbure variant entre $5\mu\text{m}$ et $30\mu\text{m}$ ont pu être réalisés et caractérisés.

La méthode de caractérisation est basée sur le schéma présenté en Figure II.26; la puissance optique en sortie du guide courbe est comparée à la puissance optique en sortie d'un guide droit de référence.

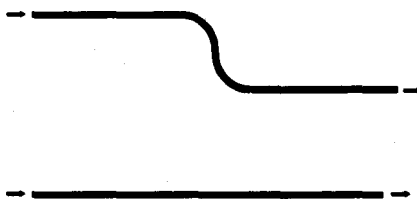
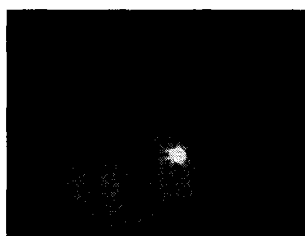


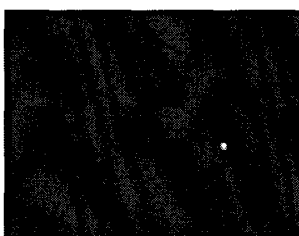
Figure II.26: Guide en S à caractériser et guide droit de référence

III.3.a Mesures en champ proche

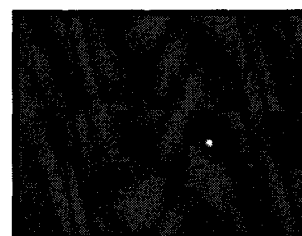
Les premières mesures ont été effectuées en champ proche. Nous présentons Figure II.27 les observations en champ proche correspondant aux sorties des guides avec différents rayons de courbure.



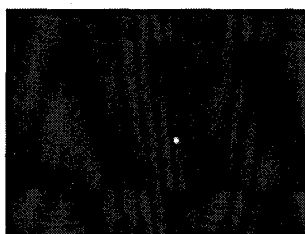
*Guide droit de référence
(largeur 1 μm)*



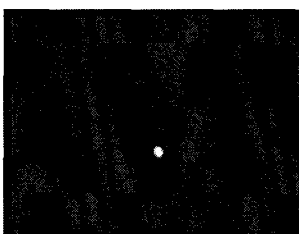
Rayon de courbure 5 μm



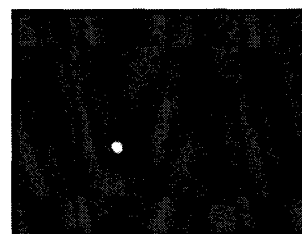
Rayon de courbure 10 μm



Rayon de courbure 15 μm



Rayon de courbure 20 μm



Rayon de courbure 30 μm

Figure II.27: Observation en champ proche des sorties de guides courbes de différents rayons

De manière qualitative, nous pouvons observer sur ces photos l'influence d'un rayon de courbure important sur la luminosité du spot de sortie des différents guides en S; il est d'autant plus lumineux que le rayon de courbure augmente. Cela se voit nettement si on compare le spot de sortie d'un guide de rayon de courbure de 5 μm et d'un guide de rayon de courbure de 30 μm.

III.3.b Mesures fibre à fibre sur guides courbes.

Sur la Figure II.28, l'évolution des pertes en excès liées à la courbure des guides est représentée en fonction du rayon de courbure de ceux-ci pour un guide de largeur $1\ \mu\text{m}$. La contribution des pertes de propagation supplémentaires amenées par la structure en S est prise en compte sur la base des pertes linéiques mesurées auparavant (voir Figure II.23), en l'occurrence $1\text{dB}/\text{mm}$.

Conformément à l'analyse qualitative précédente, nous observons que les pertes diminuent lorsque le rayon de courbure augmente pour un mode de propagation donné.

Nous constatons une dépendance importante à la polarisation et notamment pour les plus faibles rayons de courbure. Quelque soit le rayon de courbure considéré, les pertes sont plus importantes en mode TE qu'en mode TM. Cette dépendance à la polarisation a déjà été évoquée dans [7]. Nous pouvons attribuer cette dépendance à une plus grande interaction du mode TE avec les parois du guide; le mode est donc plus fortement perturbé par les rugosités des parois du guide.

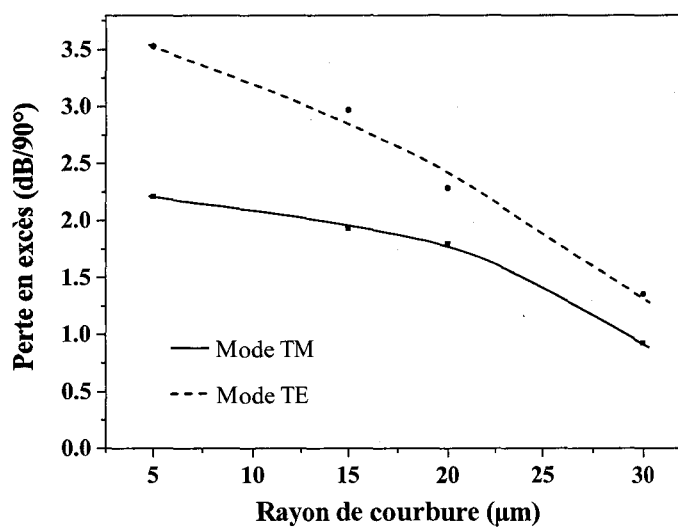


Figure II.28: Evolution des pertes en fonction du rayon de courbure (guide de largeur $1\ \mu\text{m}$)

Les pertes mesurées sont plus élevées que celles obtenues en modélisation. Les différences de valeurs constatées peuvent être dues aux phénomènes de diffusion surfacique, liés à la rugosité des flancs des guides, qui ne sont pas pris en compte dans les modélisations par FDTD. Ce phénomène est d'autant plus accentué dans les guides courbes; en effet, dans un guide courbe, le mode optique se délocalise vers la paroi externe du guide et est alors davantage perturbé par ses rugosités.

III.4 Conclusion générale sur les caractérisations des composants passifs

Afin de mettre en évidence les performances de nos composants, nous pouvons faire une comparaison avec l'optique intégrée traditionnelle [8].

En utilisant des guides classiques rubans (largeur du ruban de l'ordre de $4\mu\text{m}$), les pertes de propagation sont très faibles, $3,5\text{dB/cm}$. En technologie microguide, nous mesurons des pertes de propagation de l'ordre de 1dB/mm pour des guides de largeur $1\mu\text{m}$. Il faut toutefois noter que les caractéristiques de ces guides sont très sensibles à la polarisation: la polarisation TM confère, à la fois théoriquement et pratiquement, un meilleur comportement à la structure (la majorité de nos caractérisations ont d'ailleurs eu lieu sous cette polarisation). Les performances de la technologie microguide semblent encore loin de celles de l'optique intégrée traditionnelle. Toutefois, cette technologie permet un gain important sur la dimensionnalité des structures (jonction, courbure).

En effet, en utilisant des guides classiques en ruban, les angles sont choisis inférieurs à 2° pour maintenir un faible niveau de pertes. En technologie microguide, les pertes sont aussi évidemment proportionnelles à l'angle d'ouverture de la jonction mais des pertes inférieures à 2dB ont été obtenues pour des angles inférieurs à 20° ; ce qui est certes trop important pour bon nombre d'applications mais encore dans le domaine du possible. Qui plus est, aucune optimisation particulière de la jonction Y n'a été faite, ce qui pourrait éventuellement améliorer son comportement.

D'autre part, en utilisant des guides classiques en ruban, il faut considérer des courbures d'une dizaine de degrés associées à des rayons de l'ordre de la dizaine de millimètres pour limiter les pertes en excès. En technologie microguide nous mesurons des pertes en excès inférieures à $1\text{dB}/90^\circ$ pour des rayons de courbure supérieurs à $30\mu\text{m}$.

Un des atouts de la technologie microguide, et donc du fort confinement latéral, est de présenter, à fonctionnalité équivalente, des dimensions 10 à 100 fois moindres.

Bibliographie du Chapitre II

- [1] A. Beaurain
Thèse de l'Université des Sciences et Technologies de Lille, 4 décembre 2003
"Etude de fonctions passives à base de nanostructures photoniques"
- [2] www.dowcorning.com
- [3] D. Lauvernier
Thèse de l'université des Sciences et Technologies de Lille, 9 septembre 2005
"Nanofils optiques à base de GaAs insérés dans une matrice polymère"
- [4] D. Lauvernier, J-P. Vilcot, M. François, D. Decoster
Microelectronic Engineering, 2004, vol.75, pp 177-82
"Optimization of HSQ resist e-beam processing technique on GaAs material"
- [5] D. Lauvernier, S. Garidel, C. Legrand, J-P. Vilcot
Microelectronic Engineering, 2005, vol.77, pp 210-16
"Realization of sub-micron patterns on GaAs using a HSQ etching mask"
- [6] B.E Maile, W. Henschel, H. Kurz, B. Rienks, R. Polman, P. Kaars
Journal Applied Physics, 2000, vol. 39, p 6836
"Sub-10nm linewidth and overlay performance achieved with fine-tuned EBPG-5000 TFE electron beam lithography system"
- [7] S. Dupont, A. Beaurain, P. Miska, M. Zegaoui, J.P Vilcot, H.W Li, M. Constant, D. Decoster, J. Chazelas
Electronics Letters, 2004, vol. 40, n°14, pp 865-866
"Low loss InGaAsP/InP submicron optical waveguides fabricated by ICP etching"
- [8] K. Blary
Thèse de l'Université des Sciences et Technologies de Lille, 5 décembre 2003
"Matrice de commutation optique sur InP"

Chapitre III

Réalisation et caractérisation des structures de commutation

Dans ce chapitre, nous présentons dans un premier temps les étapes technologiques de réalisation des structures de commutation. Par rapport aux structures passives, cette réalisation a nécessité la mise au point d'un procédé de report de contact sur nos structures à haut rapport d'aspect. Nous donnons ensuite les premiers résultats de caractérisations électriques et électro-optiques sur des commutateurs simples, à une jonction.

L'amélioration des performances de commutation passe alors par l'amélioration du procédé de définition des commutateurs. Ce procédé permet d'obtenir de nouvelles structures dont nous présentons les performances.

I Présentation des dispositifs

Dans cette partie, nous rappelons l'épitaxie utilisée pour la fabrication des commutateurs sur microguides. Nous exposons ensuite les différentes topologies de commutateur que nous réaliserons.

I.1 Rappel de l'épitaxie

Le choix de la structure épitaxiale est le résultat des modélisations présentées dans le Chapitre 1. Cette structure épitaxiale est réalisée sur un substrat dopé n+ de deux pouces de diamètre. Elle est fabriquée par épitaxie par jets moléculaires (EJM) dans le groupe Epitaxie de l'IEMN. Le détail de cette structure est présenté en Figure III.1.

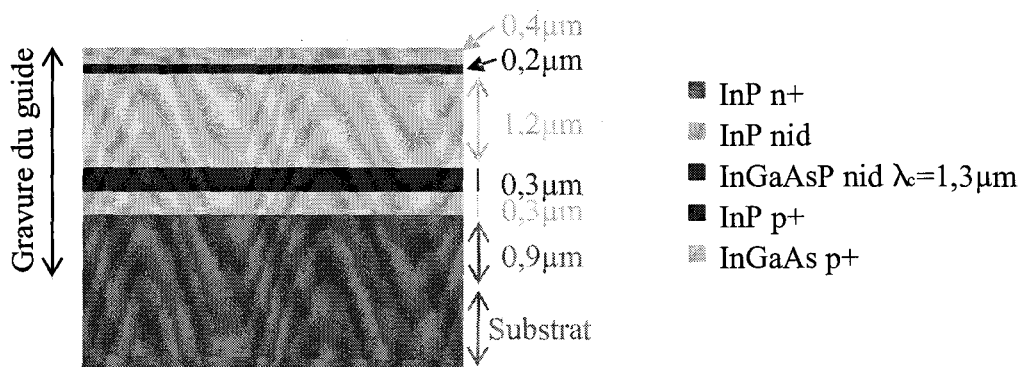


Figure III.1: Epitaxie utilisée pour la fabrication des commutateurs

Si l'on compare cet empilement à celui de la Figure I.9, nous pouvons voir que l'épaisseur de la couche d'InP inférieure qui servira de confinement inférieur après gravure est ici constituée de 0,3 μm d'InP non intentionnellement dopé et de 0,9 μm d'InP n+ faisant partie du substrat. Cette solution permet de diminuer l'épaisseur de la zone intrinsèque de la diode et donc d'en diminuer a priori le temps de réponse par la diminution du volume et du temps de transit des porteurs dans cette zone tout en ne pénalisant pas trop fortement les pertes liées aux porteurs libres. Deux couches fortement dopées p+ sont ajoutées; la première en InP permet de réaliser l'homojonction de la diode, la seconde en matériau ternaire permet d'améliorer la qualité du contact ohmique de type P.

I.2 Structures de commutateurs à réaliser

I.2.a Géométrie d'un dispositif élémentaire de commutation

La modélisation présentée dans le Chapitre 1 montre que l'utilisation d'une structure en Y, digne descendante des structures utilisées en optique intégrée classique et étudiée par ailleurs au laboratoire (voir Introduction), ne présente pas une faible diaphotie en technologie microguide. La structure d'un commutateur 1 vers 2 élémentaire a alors été modifiée et une vue schématique en est rappelée en Figure III.2. Elle consiste en la mise en série de deux commutateurs en Y dissymétriques. Il en résulte ainsi trois voies de sortie, les deux voies utiles se situent aux extrêmes, la voie centrale récupère la partie non commutée du faisceau optique et diminue ainsi la diaphotie existant entre les sorties n° 1 et 2. Les commutateurs ont été réalisés à partir de guides de largeur $0,8\mu\text{m}$ et $1\mu\text{m}$.

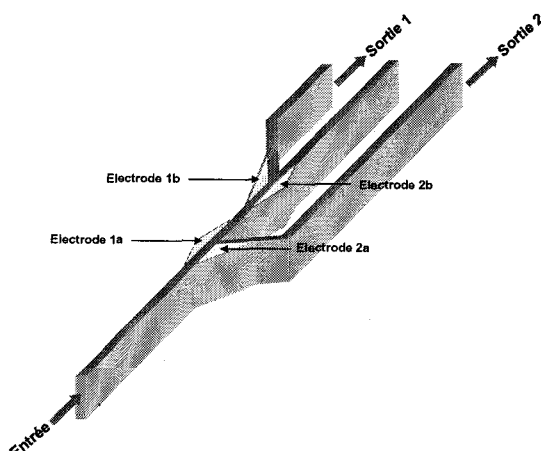


Figure III.2: Topologie retenue pour le commutateur à base de microguides

I.2.b Différentes topologies d'électrodes

La variation d'indice obtenue par injection de porteurs dans nos structures a été évaluée par rapport aux résultats obtenus sur les structures classiques en optique intégrée [1]. Ces valeurs devraient être du même ordre de grandeur, voire peut-être légèrement sous-estimées puisque le facteur de recouvrement optique/électrique des microstructures est plus important que celui des structures classiques. Néanmoins, comme il a été mentionné dans le Chapitre 1 §II.3.c.3, la plus grande incertitude concerne l'étalement des porteurs dans la structure et donc l'étalement de la zone de variation d'indice. Cet étalement avait été évalué à environ $1\mu\text{m}$ dans les structures classiques mais les structures épitaxiales sont ici différentes et cette valeur, qui n'est déjà qu'une estimation, ne peut ici donner qu'un ordre de grandeur.

Différentes topologies d'électrodes sont donc envisagées, elles prennent en compte une étendue différente de la zone de variation d'indice; elles présentent donc un écart inter-électrode (e) différent. La problématique est illustrée en Figure III.3 où l'on voit que l'étalement latéral des porteurs implique une zone de variation d'indice différente spatialement de la simple projection géométrique de la forme des électrodes.

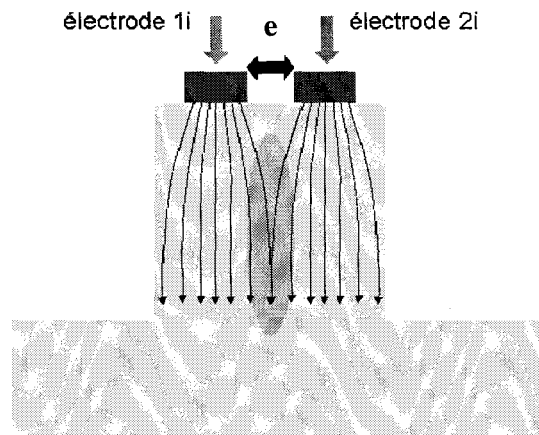


Figure III.3: La zone grisée, centrale, représente la zone d'étalement latéral des porteurs, donc de variation d'indice, non prise en compte directement par la modélisation,

La Figure III.4 représente la topologie générale des commutateurs. Deux jonctions dissymétriques sont placées en série; la longueur des électrodes (L_0) ainsi que leur écartement (e) prennent différentes valeurs qui constituent autant de composants finaux différents dont les paramètres sont donnés dans le Tableau III-I. En fonction de l'écartement des électrodes, 3 topologies génériques (nommées A, B, et C) sont fixées. Le cas particulier concerne la topologie C, pour laquelle e vaut 0; dans cette topologie seule une électrode est réalisée dont l'extrémité se situe sur le milieu du guide.

Pour tous les composants réalisés, l'angle des jonctions est invariant et est égal à $3,2^\circ$ et le rayon de courbure des guides en sortie de commutateur est de $120\mu\text{m}$, ce qui permettra de négliger la valeur de leurs pertes en excès sur les valeurs totales des pertes mesurées.

Par ailleurs, les électrodes 1a et 1b ainsi que 2a et 2b (voir Figure III.2) seront reliées par le pont d'interconnexion (Etape 6 du procédé de fabrication). Ceci facilitera grandement les étapes de caractérisation, une seule connexion électrique étant alors nécessaire pour polariser les deux électrodes.

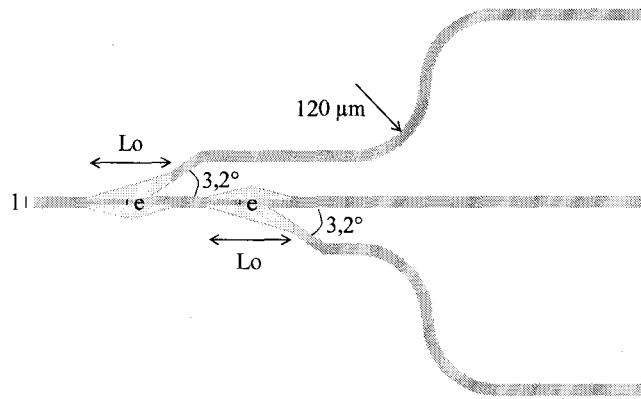


Figure III.4: Topologies des commutateurs réalisés

Paramètres invariants	Largeur des guides	Ecart inter-électrodes	Longueur des électrodes
$\theta = 3,2^\circ$ $R=120\mu\text{m}$	$l = 0,8\mu\text{m}$	$e = 0,8\mu\text{m}$ (topologie A)	$Lo = 100\mu\text{m}$
			$Lo = 200\mu\text{m}$
			$Lo = 400\mu\text{m}$
			$Lo = 600\mu\text{m}$
			$Lo = 800\mu\text{m}$
		$Lo = 1000\mu\text{m}$	
		$e = 2\mu\text{m}$ (topologie B)	$Lo = 400\mu\text{m}$
			$Lo=600\mu\text{m}$
			$Lo=800\mu\text{m}$
			$Lo=1000\mu\text{m}$
	$Lo = 100\mu\text{m}$		
	$l = 1\mu\text{m}$	$e = 0\mu\text{m}$ (topologie C)	$Lo = 200\mu\text{m}$
			$Lo = 400\mu\text{m}$
			$Lo = 600\mu\text{m}$
			$Lo = 800\mu\text{m}$
			$Lo = 1000\mu\text{m}$
		$e = 1\mu\text{m}$ (topologie A)	$Lo = 100\mu\text{m}$
			$Lo = 200\mu\text{m}$
			$Lo = 400\mu\text{m}$
			$Lo = 600\mu\text{m}$
$Lo = 800\mu\text{m}$			
$e = 2\mu\text{m}$ (topologie B)	$Lo = 1000\mu\text{m}$		
	$Lo = 400\mu\text{m}$		
	$Lo=600\mu\text{m}$		
	$Lo=800\mu\text{m}$		
	$Lo=1000\mu\text{m}$		
$e = 0\mu\text{m}$ (topologie C)	$Lo = 100\mu\text{m}$		
	$Lo = 200\mu\text{m}$		
	$Lo = 400\mu\text{m}$		
	$Lo = 600\mu\text{m}$		
	$Lo = 800\mu\text{m}$		
$Lo = 1000\mu\text{m}$			

Tableau III-I: Paramètres géométriques des commutateurs réalisés

II Réalisation technologique

Cette partie est dédiée à la description du procédé technologique utilisé pour la réalisation des commutateurs en technologie microguide. Nous allons tout d'abord donner une vue d'ensemble des étapes technologiques nécessaires à la réalisation des composants, avant de décrire plus exhaustivement chacune d'entre elles.

II.1 Vue d'ensemble du procédé technologique

Par souci de clarté, nous récapitulons ici les principales étapes nécessaires à la réalisation des composants, sans mentionner, dans un premier temps, les paramètres technologiques mis en jeu. Le procédé de fabrication comporte sept étapes principales: le dépôt des contacts ohmiques p face avant, la gravure profonde des guides, l'isolation des électrodes, le dépôt des plots de reprise des contacts, la définition du support du pont d'interconnexion, la définition du pont d'interconnexion métallique et le dépôt du contact n en face arrière. Nous présentons schématiquement dans le Tableau III-II ces principales étapes technologiques, afin de représenter plus facilement dès maintenant le déroulement du procédé de fabrication.

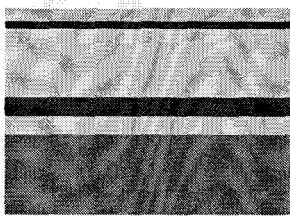
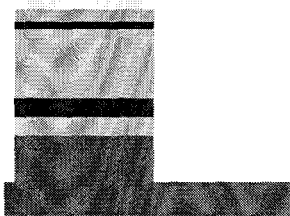
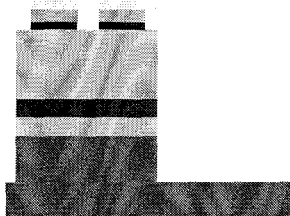
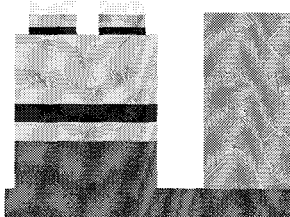
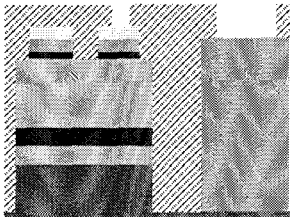
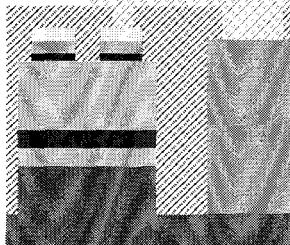
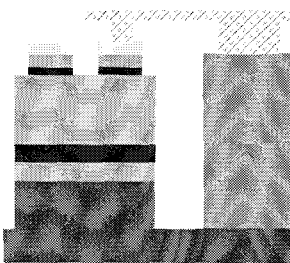
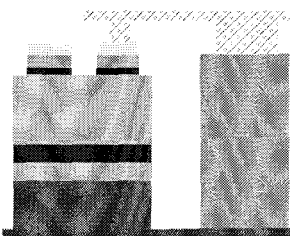
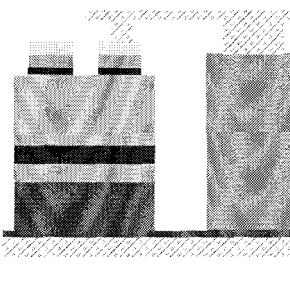
		
<i>Etape 1 : Définition des électrodes</i>	<i>Etape 2 : Gravure des guides</i>	<i>Etape 3 : Gravure des couches p+</i>
		
<i>Etape 4 : Définition du plot de reprise des contacts</i>	<i>Etape 5 : Définition du support du pont d'interconnexion</i>	<i>Etape 6 : Définition du pont d'interconnexion métallique</i>
		
<i>Etape 7 : Définition du pont à air</i>	<i>Etape 8 : Amincissement du substrat</i>	<i>Etape 9 : Dépôt du contact n en face arrière</i>
<ul style="list-style-type: none"> ■ InP n+ ■ InP nid ■ InGaAsP nid $\lambda_c=1,3\mu\text{m}$ ■ InP p+ ■ InGaAs p+ ■ Pt/Ti/Pt/Au ■ SU8 ■ PMGI ■ Ti/Au 		
<i>Légende</i>		

Tableau III-II: Vue d'ensemble du procédé technologique

II.2 Détails des étapes

II.2.a Etape 1 : réalisation des électrodes réalisant le contact P

Il s'agit d'un procédé technologique permettant de réaliser les contacts ohmiques de type p. Il s'agit d'un contact séquentiel non allié.

II.2.a.1 Séquence métallique à déposer

L'épaisseur des couches métalliques de platine et de titane a été optimisée lors d'études antérieures au laboratoire [2]. L'épaisseur du film d'or donnée dans [2], 3000 Å, est quant à elle adaptable en fonction du procédé technologique et de la topologie du composant. Elle sert à diminuer la résistance linéique du contact. Pour la gravure des guides, nous utiliserons le procédé décrit pour la réalisation des composants passifs. Il faut donc une épaisseur de résine (HSQ) suffisante pour recouvrir les électrodes jusqu'à la fin de l'étape de gravure. Nous avons vu que l'épaisseur de résine restante après gravure est légèrement inférieure à 400nm. En considérant la séquence de métallisation suivante : Pt/Ti/Pt/Au: 100Å/100Å/200Å/1600 Å (donc 200nm au total), nous nous assurons du recouvrement des électrodes par la résine jusqu'à la fin du cycle de gravure. En effet, afin d'éviter toute pollution du bâti de gravure ICP utilisé, le contact d'aucune surface métallique avec le plasma de gravure n'est autorisé. Les métaux constituant les contacts ohmiques sont déposés par évaporation sous vide.

II.2.a.2 Technique de dépôt

Les dimensions des électrodes à réaliser nous dirigent vers l'utilisation d'une lithographie par écriture électronique. Nous utilisons la technologie du lift-off qui consiste en la réalisation d'un profil casquette permettant de provoquer une rupture du dépôt métallique entre la zone à métalliser et la zone où le métal doit être retiré. La Figure III.5 représente la succession des étapes technologiques pour la réalisation des contacts.

Pour réaliser le profil casquette, nous utilisons un procédé standard au laboratoire qui consiste en la réalisation d'un bicouche de résines électroniques. Nous utilisons deux résines, une résine copolymère et une résine PMMA, la première résine déposée étant la résine copolymère. L'épaisseur de cette première couche est déterminée en fonction de l'épaisseur de métal désirée. Les deux résines ne sont pas sensibles de la même façon aux électrons retro-diffusés. Les électrons se réfléchissant à la surface du substrat, la première couche est plus

largement exposée aux électrons, tandis que la seconde couche est révélée selon les dimensions exactes du masque.

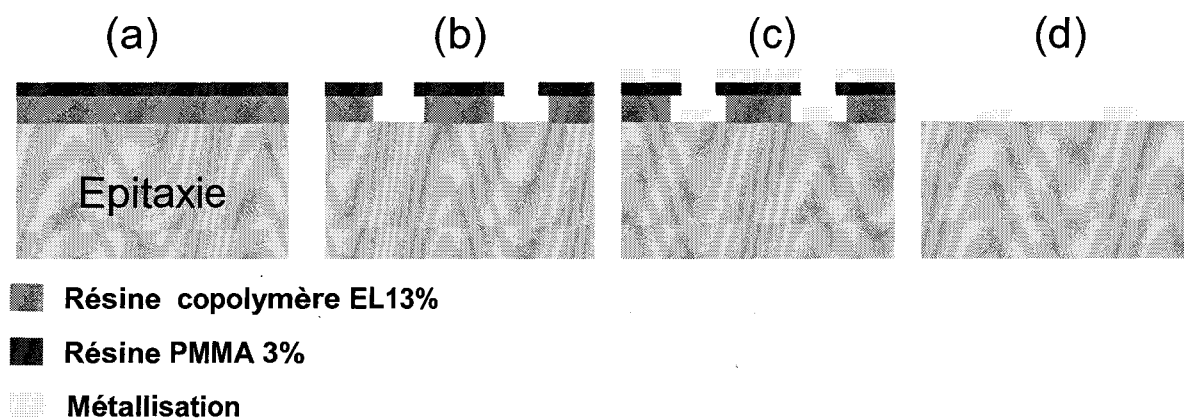


Figure III.5: Procédé du dépôt par technique « lift-off »

a) dépôt du bicouche

b) insolation (réalisation du profil en casquette)

c) dépôt par évaporation

d) retrait de la résine et du métal superflu (« lift-off »)

a) Les paramètres d'enduction des deux résines sont décrits dans le Tableau III.III. Pour la première couche, nous utilisons la résine EL13% (MMA 8.5) en épaisseur suffisante pour le contact métallique envisagé. Nous déposons ensuite la PMMA 3% (495K).

	Enduction	Recuit	Epaisseur
EL 13% (MMA 8.5)	v = 2900 rpm a = 1000 rpm / s t = 12 sec	1min sur plaque à 80°C 30min en étuve à 170°C 10min à température ambiante	6680 Å
PMMA 3% (495K)	v = 3400 rpm a = 1000 rpm / s t = 12 sec	1min sur plaque à 80°C 30min en étuve à 170°C 10min à température ambiante	630 Å

Tableau III.III: Paramètres d'enduction des résines EL et PMMA

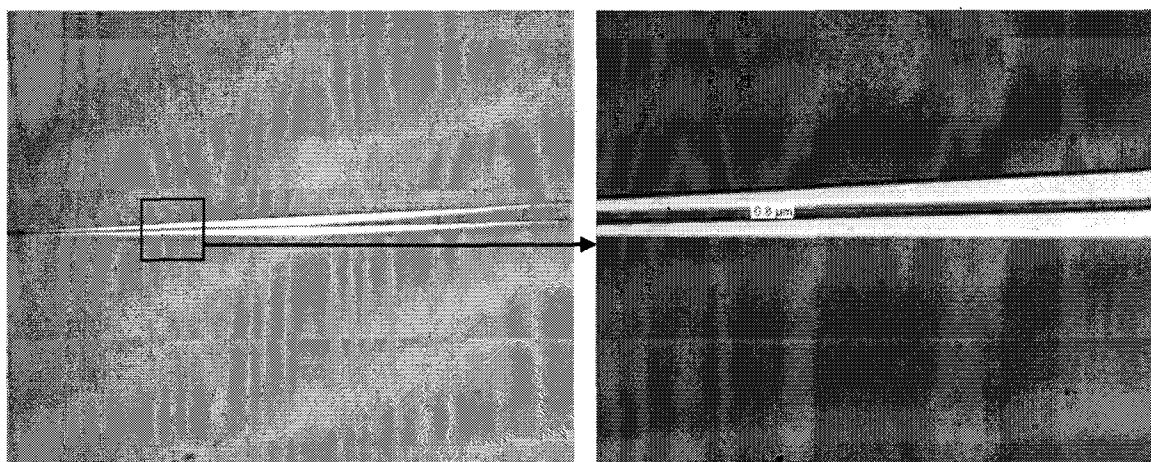
b) Les motifs sont écrits au masqueur électronique (tension=50kV, résolution=12,5nm, dose=182 μ C/cm²). La solution de révélation est un mélange de MIBK (methyl-isobutyl-

ketone) et d'alcool isopropylique (IPA) dans les proportions 1:3. Le développement se fait avec agitation (110tr/min) pendant 1 minute. Le rinçage se fait à l'IPA pendant 30 secondes.

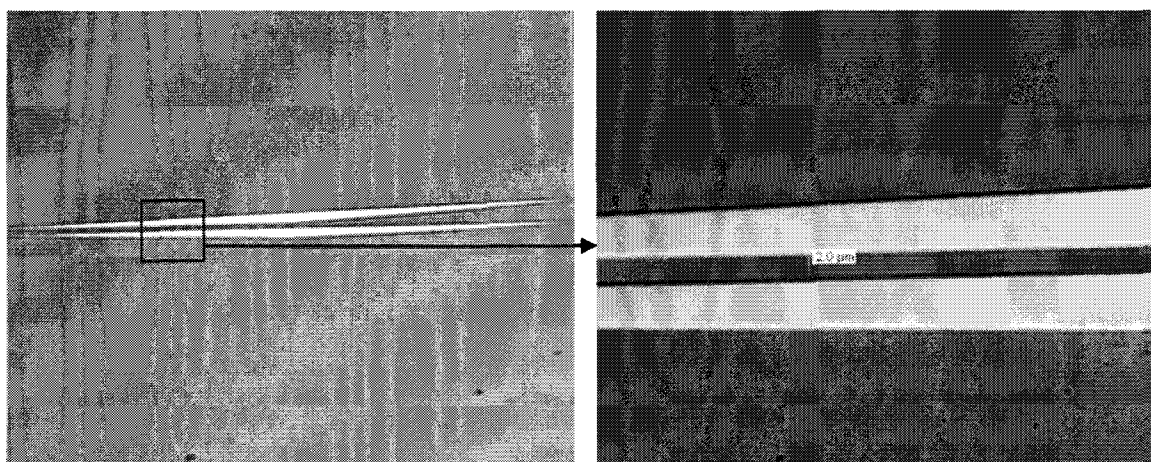
c) Avant le dépôt de la séquence métallique, un etching d'argon est effectué pour enlever toute trace de résine sur la surface de l'épitaxie au niveau des ouvertures et améliorer l'accroche du contact. La séquence métallique mentionnée au §II.2.a.1 est ensuite déposée par évaporation.

d) Pour le lift-off, nous utilisons l'acétone qui est le solvant des résines utilisées pour le bicouche. Après 45 minutes d'immersion dans un bain d'acétone, la plaque est libérée des résines et du métal s'y étant déposé; il ne reste du métal qu'aux endroits désirés.

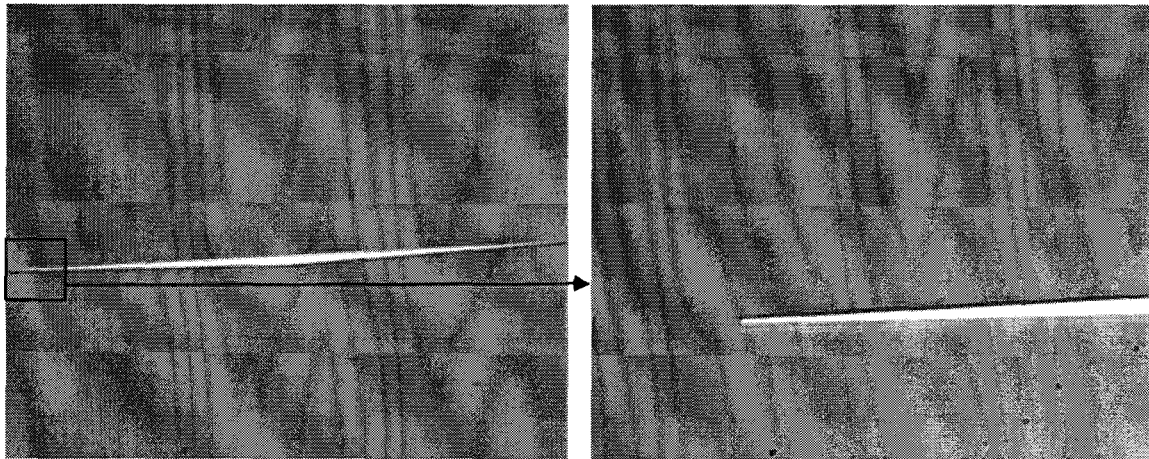
Nous présentons en Figure III.6 les différentes topologies d'électrodes réalisées avec ce procédé technologique.



Topologie A: Electrodes séparées de la largeur du guide (ici 0,8μm)



Topologie B: Electrodes séparées de 2μm



Topologie C: Composant à une seule électrode

Figure III.6: Différentes topologies d'électrodes utilisées (microscope optique)

A cette étape les électrodes sont définies à la surface de l'épithaxie. L'étape suivante est la gravure des guides.

II.2.b Etape 2 : définition des guides.

Cette étape consiste à définir les guides optiques. Il s'agit ici de définir la partie passive du commutateur et les guides autour des électrodes (zone active).

La partie passive comprend différentes structures microguides citées ci-dessous :

- Les guides droits d'entrée et de sortie
- Les guides courbes permettant la séparation de $250\mu\text{m}$ (correspondant à l'écartement inter-fibre) des sorties
- Les structures d'adaptation de mode à chaque entrée et sortie

Les guides des parties actives sont définis autour des électrodes (une règle de dessin de $0,3\mu\text{m}$ a été prise). Le procédé de dépôt de résine et d'insolation est celui présenté au chapitre II concernant la réalisation des guides passifs. Néanmoins, une optimisation supplémentaire a du être faite car une partie de l'écriture se fait ici au dessus des zones métalliques (électrodes). De nouvelles modélisations par le logiciel de simulation de répartition d'électrons (Proxecco) et de doses d'écriture ainsi que les essais correspondants ont été faits. Sans prendre en compte ce paramètre, un élargissement notable des guides apparaît autour des électrodes.

Sur la Figure III.7, nous présentons les images prises au microscope optique du masque de HSQ définis autour des électrodes, une fois le procédé d'optimisation de l'écriture réalisé. L'alignement avec le niveau précédent (les électrodes) est primordial.

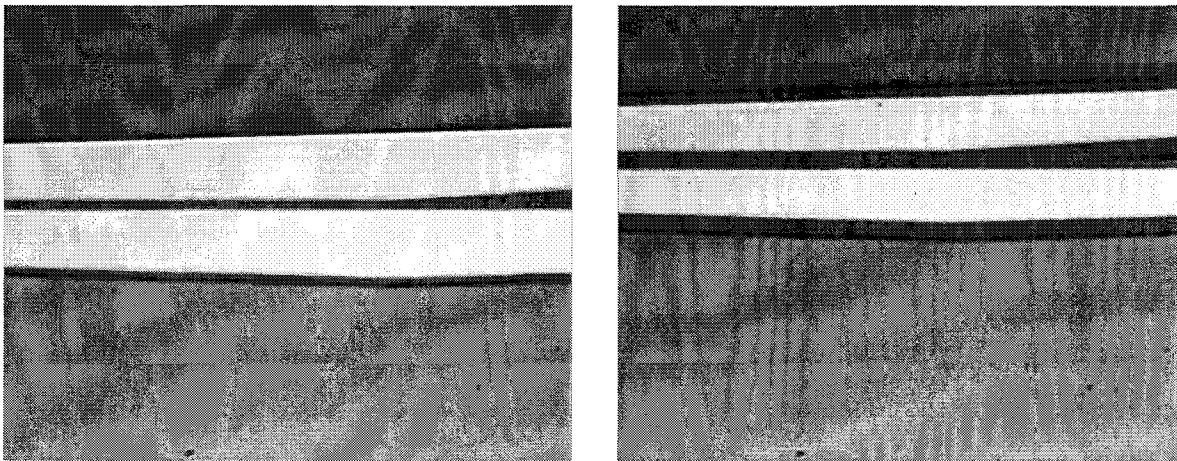


Figure III.7: Définition du masque en HSQ au niveau des zones actives

Gauche: topologie A

Droite: topologie B

Le procédé de gravure est aussi identique à celui utilisé pour la réalisation des structures passives. Toutefois, le temps de gravure est un peu plus long, les couches supérieures dopées p+ (et notamment la couche de matériau ternaire) se gravent moins rapidement. Là encore, nous ne pouvons utiliser le contrôle in situ par interférométrie compte tenu de la dimension des structures. La profondeur de gravure est mesurée a posteriori au profilomètre. Quelques essais préliminaires ont permis d'ajuster les paramètres de gravure.

Sur la Figure III.8, nous présentons les images MEB des structures après gravure.

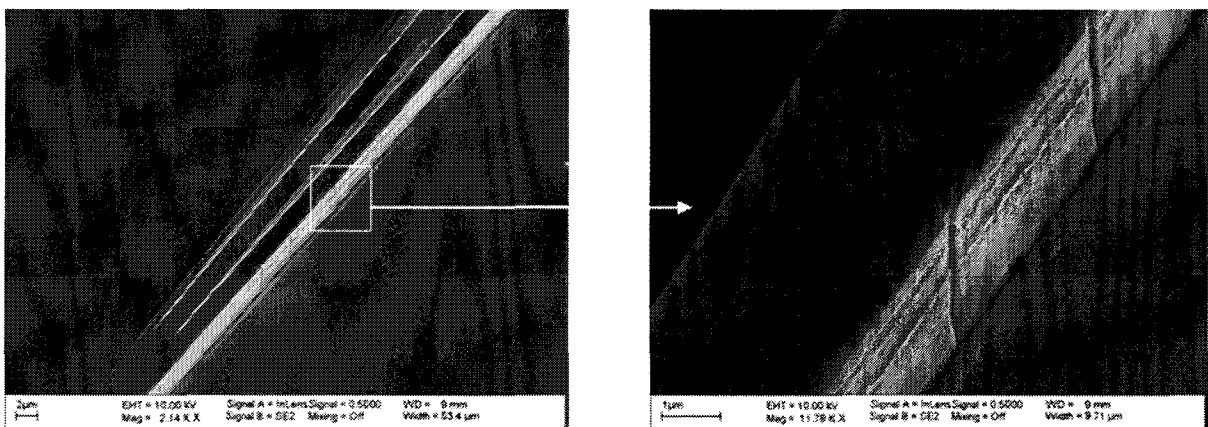


Figure III.8: Définition des guides autour de la zone de commutation (images MEB)

Un agrandissement de la paroi du guide (photo de droite) dénote la présence de défauts réguliers au niveau de certaines parties de la zone de commutation. Cet aspect aussi régulier

ne peut être dû au hasard; un problème de recouvrement de champ au niveau du processus d'écriture a expliqué ce phénomène; ce problème va être corrigé par la suite.

II.2.c Etape 3 : gravure des couches p+

Cette étape permet l'isolation électrique entre les deux branches du commutateur et délimite géométriquement les zones d'injection.

Pour cette étape aucune lithographie n'est nécessaire, la gravure se fait de façon auto-alignée avec les contacts ohmiques de type p définis à l'étape 1. Les matériaux à graver correspondent aux couches épitaxiées ajoutées pour la réalisation de la jonction et du contact ohmique de type P, à savoir 0,4 μ m d'InGaAs dopé p et 0,2 μ m d'InP dopé p; soit une épaisseur totale de 0,6 μ m. La gravure de ce ruban est faite en deux étapes: une gravure chimique de l'InGaAs et une gravure sèche de l'InP. Ce procédé en deux étapes est couramment utilisé pour atténuer les effets de la gravure par RIE [3, 4], la gravure sèche du ternaire étant beaucoup plus lente que celle du binaire InP.

II.2.c.1 Gravure de l'InGaAs p+

La couche supérieure de ternaire InGaAs dopé p est gravée par une solution de H₃PO₄ / H₂O₂ / H₂O, dans les proportions 5 / 1 / 40, sélective par rapport à l'InP [5]. Cette solution autorise des vitesses de gravure assez élevées, environ 150 nm par minute. Nous procédons en plusieurs étapes pour la gravure des 0,4 μ m d'InGaAs; une mesure au profilomètre entre chaque étape nous permet de contrôler la hauteur gravée. Bien que la gravure soit sélective, une exposition trop longue dans la solution sous-graverait les structures et, étant données leurs dimensions, leur désolidarisation serait inévitable.

II.2.c.2 Gravure de la couche d'InP p+

Une gravure de type RIE-ICP serait préférée de manière à conserver la verticalité et la faible rugosité des flancs; malheureusement le masque métallique (contact ohmique) nous interdit toute utilisation de ce bâti; nous avons donc utilisé un procédé de type RIE.

Deux procédés ont été testés pour la gravure de la couche d'InP p+: le premier utilise un mélange d'hydrogène et de méthane, le second utilise un mélange d'hydrogène, de méthane et d'argon. Dans les deux cas, l'utilisation de méthane entraîne la formation de polymères qu'il faut retirer par plasma oxygène après la gravure. La gravure s'effectue donc en trois temps :

- Pompage jusqu'à la pression de base
- Gravure des matériaux par plasma (CH₄/H₂ ou CH₄/H₂/Ar)

- Retrait des polymères par plasma oxygène

Le plasma oxygène permettant le retrait des polymères est identique pour les deux procédés, ses paramètres sont résumés dans le Tableau III-IV.

Plasma	Débit (sccm)	Puissance (Watts)	Pression (mTorr)
O ₂	80	100	90

Tableau III-IV: Paramètres du plasma oxygène pour le retrait des polymères

Ce premier essai utilise une chimie CH₄/H₂ dont les paramètres du procédé sont donnés dans le Tableau III-V.

Plasma de gravure	Débit (sccm)	Puissance (Watts)	Pression (mTorr)	Tension (Volts)
CH ₄	10	200	35	184
H ₂	80			

Tableau III-V: Paramètres du plasma de gravure à base d'hydrogène et de méthane

Sur la Figure III.9, nous présentons une image MEB de la gravure RIE avec chimie CH₄/H₂.

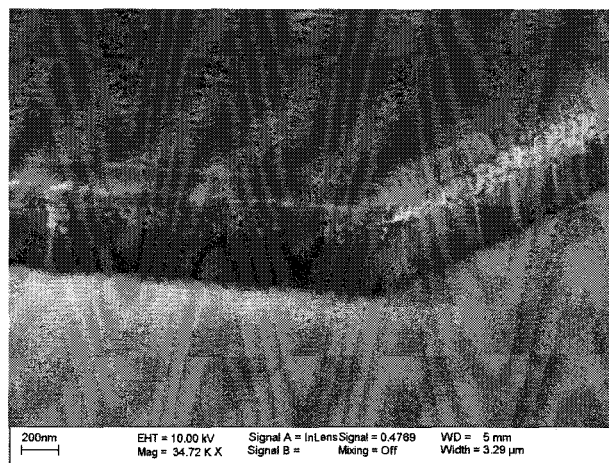


Figure III.9: Image MEB de la gravure RIE avec chimie CH₄/H₂

Sur cette image, nous pouvons remarquer la présence de rugosités verticales importantes. Ce phénomène va se répercuter sur les flancs des guides gravés par RIE-ICP à l'étape précédente et qui ne sont pas protégés. Un deuxième essai est alors réalisé pour tenter de réduire les rugosités de la RIE en utilisant une chimie CH₄ / H₂ / Ar.

Le Tableau III-VI résume les paramètres du plasma utilisé.

Plasma de gravure	Débit (sccm)	Puissance (Watts)	Pression (mTorr)	Tension (Volts)
CH4	10	200	35	184
H2	80			
Ar	10			

Tableau III-VI: Paramètres du plasma de gravure à base d'hydrogène, de méthane et d'argon

Sur la Figure III.10, nous présentons une image MEB de la gravure RIE avec chimie CH₄/H₂/Ar.

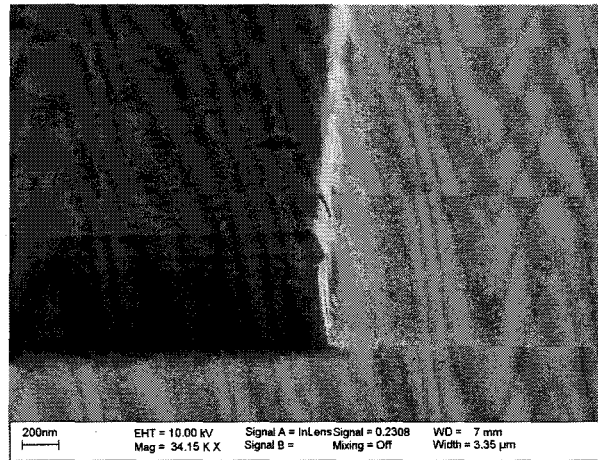
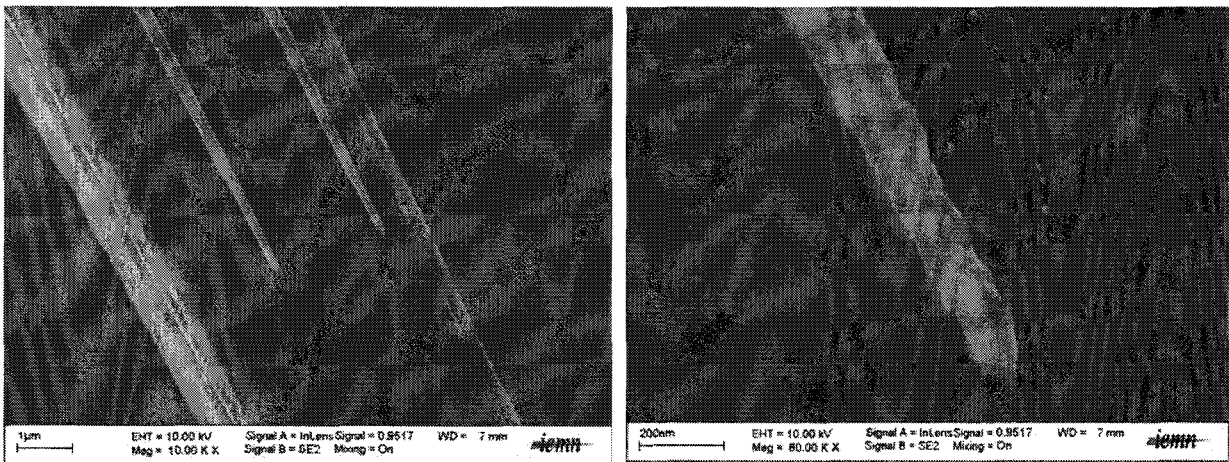


Figure III.10: Image MEB de la gravure RIE avec chimie CH₄/H₂/Ar

Les défauts sont sensiblement réduits. Une rugosité inhérente au procédé RIE et à l'utilisation du masque métallique persiste. Toutefois, celle-ci apparaît acceptable, nous adoptons ce procédé pour la fabrication de nos composants. Nous verrons, en conclusion de ce chapitre, les possibilités technologiques envisagées pour palier à ce problème.

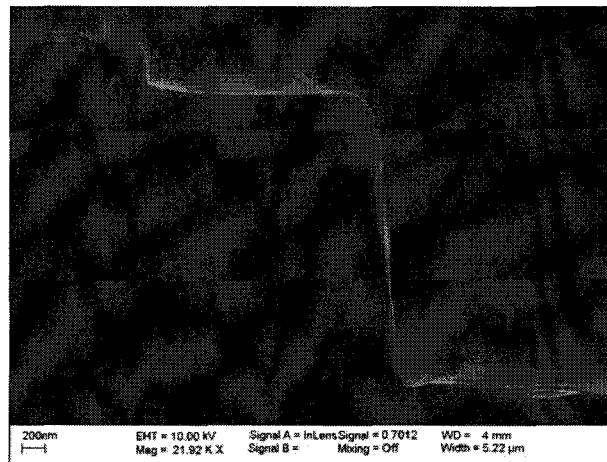
II.2.c.3 Résultats obtenus pour la réalisation des composants

La gravure RIE est donc réalisée sur nos structures. Sur la Figure III.11, nous présentons les images MEB prises après cette étape.



(a) Début des électrodes (topologie B)

(b) Début d'une électrode



(c) Profil de gravure

Figure III.11: Images MEB prises après l'étape de gravure des couches p+

Sur les Figures III.11.a et III.11.b, nous observons le début des électrodes; elles ont bien résisté à la gravure. Nous ne constatons pas de sous gravure importante. Toutefois, nous constatons une rugosité supplémentaire sur les flancs des guides gravés par ICP.

La Figure III.11.c présente le profil de gravure obtenu: la verticalité des flancs des guides n'a pas été détériorée par les gravures humide et sèche.

A cette étape, les électrodes sont disponibles en surface des guides optiques. Les branches du commutateur sont isolées électriquement. Du point de vue de leur fonctionnalité, les commutateurs sont donc terminés. Néanmoins la faible dimension des électrodes ne permet aucunement la prise de contact par un fil de thermo-compression ni même par une pointe de test. Il nous faut alors réaliser la reprise des contacts.

II.2.d Etape 4 : définition des plots de report

Etant donné que le substrat est dopé n+, les plots de report de contact supérieur (P) ne peuvent être reportés directement sur celui-ci. Nous créons donc des structures artificielles de report qui vont soutenir les plots de contacts. Les exigences pour ces plots sont:

- une bonne tenue mécanique,
- une insensibilité aux solvants (acétone, alcool, révélateurs de résine photosensible) pouvant être utilisés dans la suite du processus technologique,
- une compatibilité avec le contact de fils de connexion par thermo-compression sans arrachement ou décollement de la métallisation.

Pour ce faire, nous avons retenu un polymère de type SU-8 (Microchem) [6] qui a aussi l'avantage d'être une résine photosensible négative. Cette résine, en fait, est couramment utilisée dans la technologie des microsystèmes pour sa robustesse et convient donc parfaitement pour notre application.

Nous avons utilisé la formulation SU8-2002 de cette résine qui permet de déposer un film dont l'épaisseur est comprise entre 2,5 μm et 5 μm suivant les paramètres d'enduction. Cette gamme d'épaisseur permet de répondre à l'ensemble des besoins que l'on pourrait avoir; néanmoins, des formulations différentes permettent d'obtenir des films plus épais, le cas échéant.

Le procédé technologique est simple et suit le procédé préconisé par le fournisseur :

- enduction du film de SU-8 par centrifugation.
- insolation en UV.
- révélation.
- post recuit pendant 5 minutes à 200°C sur plaque.

Les paramètres d'enduction utilisés pour obtenir un film de 3 μm d'épaisseur de SU8 sont résumés dans le tableau III-VII.

Résine	Vitesse	Accélération	Temps	Recuit
SU8-2002	3500 rpm	2000 rpm/s	30 sec	1 min à 65°C sur plaque 2 min à 95°C sur plaque

Tableau III-VII: Paramètres d'enduction de la SU8-2002

Le masque utilisé pour définir les plots de reprise des contacts est constitué de carrés de $100\mu\text{m}$ de côté. Les motifs sont insolés pendant 7 secondes (aligneur optique; i-line 365nm). La révélation se fait dans un bain de SU8-developper pendant 1 minute.

A la suite de ce procédé, des plots de report en SU-8 sont disponibles en surface (Figure III.12) du semiconducteur pour le dépôt des métallisations de connexion. Ils sont espacés de la zone à contacter d'environ une dizaine de microns, cette distance n'étant pas critique.

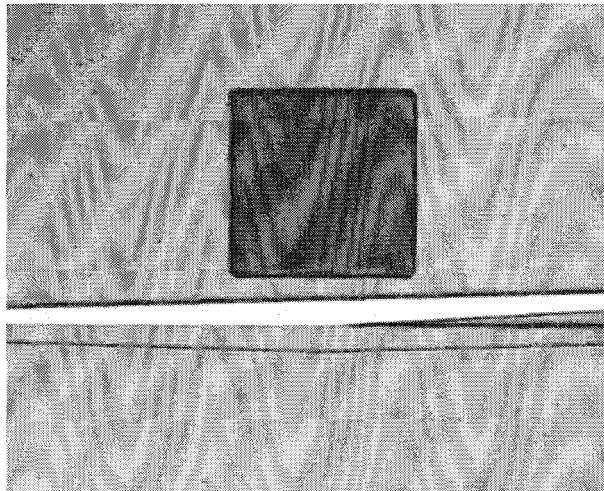


Figure III.12: Plot de reprise de contact à proximité de la zone à connecter (composant à une électrode)

II.2.e Etape 5 : définition du support du pont d'interconnexion métallique

Compte tenu des dimensions de nos guides et donc des électrodes, le procédé technologique de fabrication du pont diélectrique décrit dans [7, 8] n'est pas directement utilisable. En effet, ce procédé est utilisé sur des guides et des électrodes de largeur $4\mu\text{m}$. Sur des guides et des électrodes de taille micrométrique, ce procédé s'est montré difficilement réalisable. Le procédé a donc été modifié.

II.2.e.1 Enduction de la résine

Pour définir le support du pont d'interconnexion métallique, le matériau polymère utilisé est la résine positive (Microchem) de type nanoPMGI SF19 [9].

L'enduction de la résine se fait par centrifugation, les paramètres de dépôt sont résumés dans le Tableau III-VIII.

Résine	Vitesse	Accélération	Temps	Recuit
PMGI SF19	1000 rpm	1500 rpm/s	6 sec	3 min à 180°C sur plaque

Tableau III-VIII: Paramètres d'enduction de la PMGI SF19

L'épaisseur obtenue est de l'ordre de 5,5 μm . Des essais de dépôt de PMGI ont été faits sur des structures silicium. Nous avons effectué une coupe dans un guide recouvert de PMGI en utilisant un faisceau d'ions focalisé (FIB) afin de vérifier le bon recouvrement du guide par la résine (Figure III.13). Nous observons un recouvrement satisfaisant du guide ainsi que l'effet de planarisation obtenu.

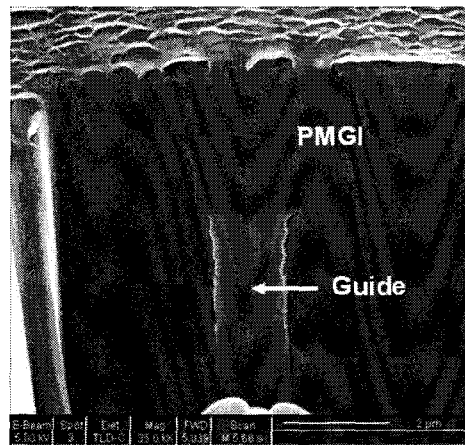


Figure III.13: Résine PMGI recouvrant le guide

(ici essai sur guide en Si, ne pas tenir compte de la rugosité des flancs gravés)

II.2.e.2 Réalisation des ouvertures

Afin de définir le pont d'interconnexion entre le composant et le plot de SU8, la résine PMGI doit être ouverte au dessus des électrodes et au dessus des plots de SU8. Compte tenu de la précision, nous avons utilisé une écriture électronique.

Les premiers essais ont été réalisés avec des doses d'insolation supérieures à 200 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$. Une coupe a également été réalisée au FIB pour observer l'ouverture de la PMGI. Il apparaît clairement que les doses d'insolation sont trop importantes, l'ouverture débordant largement de l'électrode (Figure III.14).

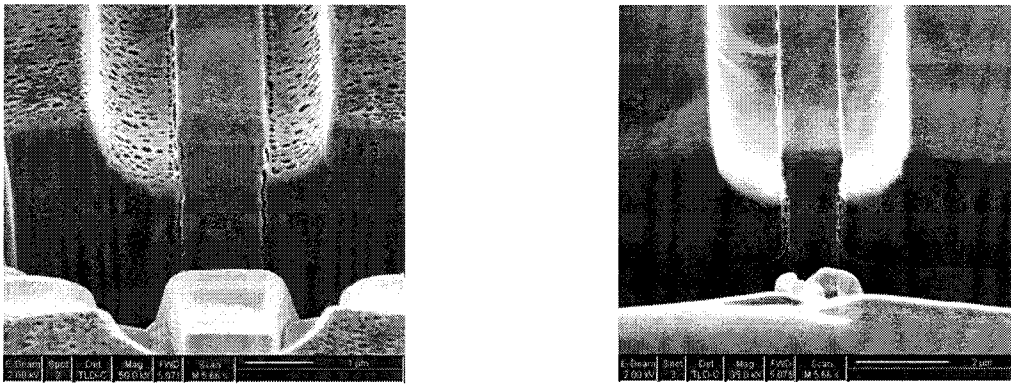
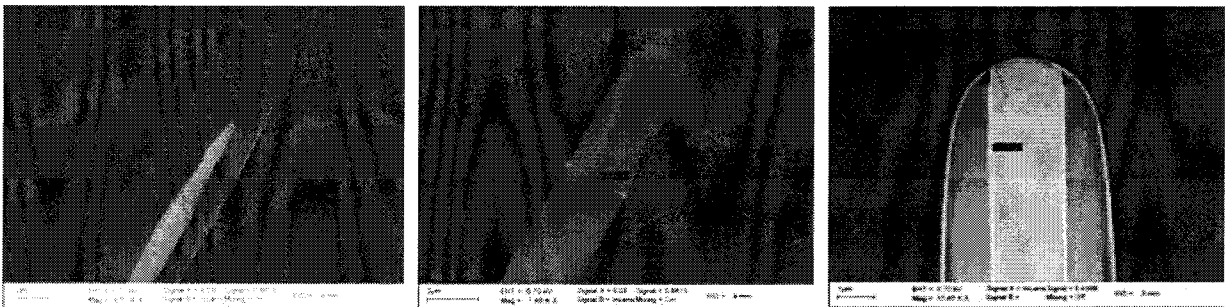


Figure III.14: Photos FIB de l'ouverture de la PMGI:

dose = $200\mu\text{C}/\text{cm}^2$ et dose = $300\mu\text{C}/\text{cm}^2$

Les doses d'insolation et les temps de révélation ont donc dû être optimisés. Les résultats obtenus pour différentes doses d'écriture plus faibles sont reportés sur la Figure III.15.



Dose d'insolation trop faible

Dose d'insolation correcte

Dose d'insolation trop élevée

Figure III.15: Photos MEB de l'ouverture de la PMGI au dessus des électrodes

La dose convenant pour l'ouverture de nos motifs est relativement faible, $52\mu\text{C}/\text{cm}^2$. Sur la Figure III.16, nous pouvons observer une coupe au FIB de l'ouverture de la PMGI au dessus d'une électrode avec une dose d'insolation de $52\mu\text{C}/\text{cm}^2$. L'ouverture est correctement centrée sur l'électrode. Sur la Figure III.17, nous observons une coupe au FIB des ouvertures au dessus du plot de SU8 et au dessus de l'électrode à connecter.

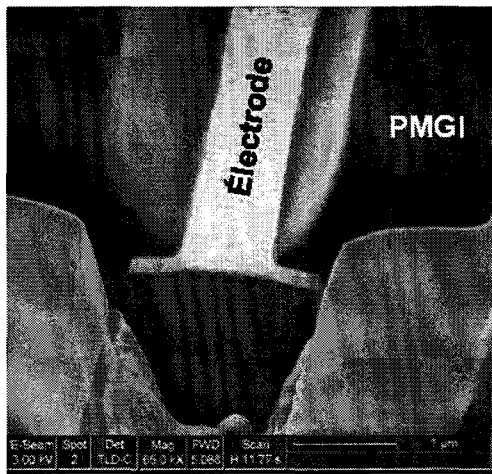


Figure III.16: Ouverture de la PMGI sur une électrode (photo FIB)

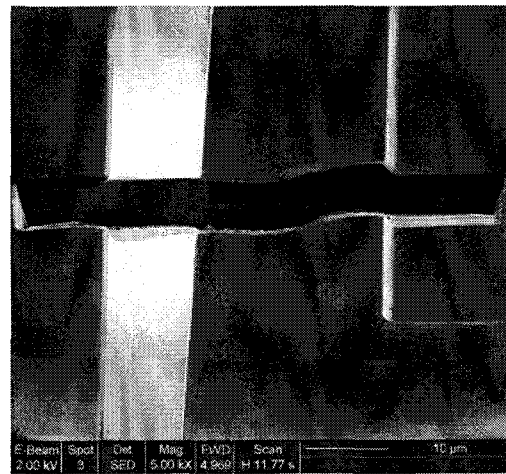


Figure III.17: Ouverture de la PMGI sur une électrode et sur un plot de SU8 (photo FIB)

Sur la Figure III.18, nous observons une image prise au microscope optique d'un composant (topologie C) à ce stade de la fabrication.

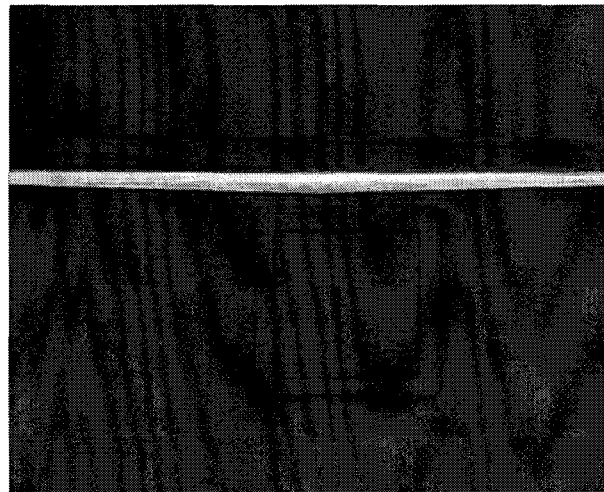


Figure III.18: Ouverture de la PMGI (microscope optique)

A ce stade, le pont en PMGI est formé, la résine recouvre entièrement les plaquettes et les ouvertures sont faites au dessus des zones à connecter (plots SU8 et électrodes).

Une fois le pont diélectrique réalisé, il reste à faire le report de contact électrique.

II.2.f Etape 6: définition du pont d'interconnexion métallique

II.2.f.1 Métallisation pleine plaque

Un dépôt de titane et d'or est effectué par pulvérisation sur la plaque entière. La couche de titane sert de couche d'accroche et, comme nous le verrons par la suite, de protection lors du retrait du film d'or; son épaisseur est de 10nm. L'épaisseur du dépôt d'or est de 500nm afin d'assurer la continuité du film sur les dénivelés potentiellement importants au niveau des marches de PMGI.

II.2.f.2 Définition du pont

Le pont d'interconnexion et le plot de report sont définis par lithographie optique, une précision importante n'étant pas demandée à ce niveau. Leur réalisation est effectuée par gravure du film métallique de Ti/Au aux endroits non désirés. Le masque est défini par une résine épaisse de type AZ4562 au-dessus de la surface métallique que l'on veut protéger. Le métal non protégé par l'AZ4562 est alors gravé par voie humide en 2 temps. Une première gravure à base d'iodure de potassium (KI) grave le film d'or et s'arrête sur le film de titane. Une seconde gravure à base d'acide fluorhydrique (HF) est alors utilisée pour retirer le film de titane. Le masque de résine de type AZ4562 est alors retiré par voie humide dans son solvant (acétone).

II.2.g Etape 7: obtention des ponts à air

Ce procédé permet de réaliser très facilement des ponts à air. La résine PMGI est retirée par voie humide par immersion dans un bain du solvant adapté (Remover PG [10]) dégageant ainsi l'interstice entre l'électrode et le plot de report. La Figure III.19 présente une vue d'un composant finalisé (topologie C) et plus particulièrement le détail du pont d'interconnexion.

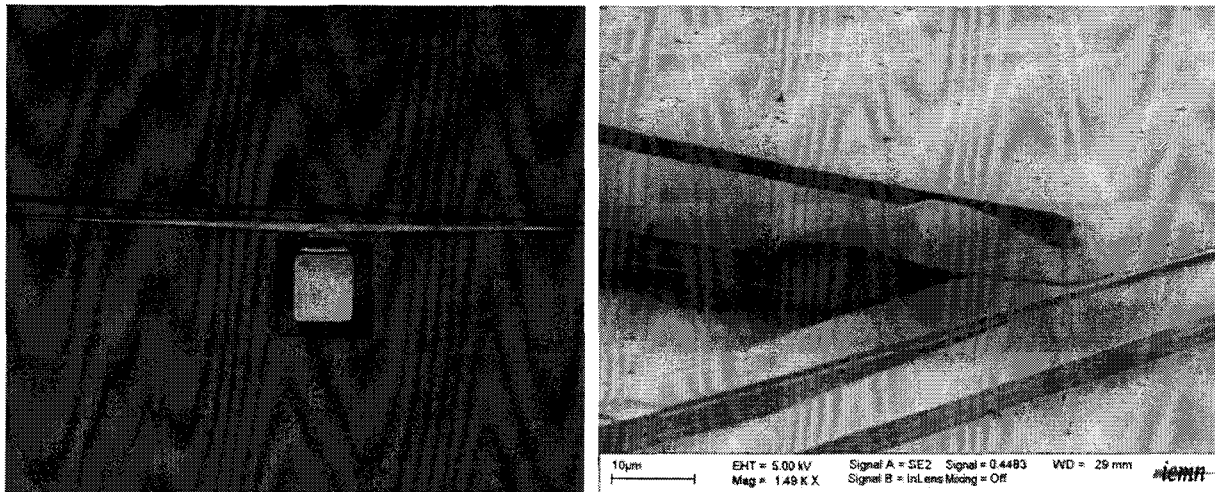


Figure III.19: Détails du pont d'interconnexion (topologie C)

II.2.h Etapes 8 et 9: finalisation de la fabrication

La tranche de semiconducteur est amincie à une épaisseur d'environ $120\mu\text{m}$. Une métallisation en face arrière (10nm de titane et 500nm d'or) est ensuite déposée afin de réaliser le contact N (rappelons que le substrat est dopé n). Enfin, les composants sont clivés. Les techniques d'amincissement et de clivage sont identiques à celles présentées dans le Chapitre 2 sur la technologie des composants passifs.

III Premier run : caractérisation

Nous présentons ici les résultats de caractérisations électriques et optiques effectuées sur les composants issus du premier run technologique. Les résultats obtenus nous permettront de mettre en évidence les défauts technologiques à corriger pour améliorer les performances de commutation sur un second run.

III.1 Caractérisation électrique

Nous avons effectué des mesures sous pointes $I(V)$ (Figure III.20) afin de nous assurer du bon fonctionnement de la diode qui constitue le composant actif du commutateur. La caractérisation électrique des composants n'est possible qu'en toute fin de fabrication, lorsque les plots de report sont effectués, les électrodes étant trop petites pour pouvoir y poser une pointe de test durant le processus de fabrication. Par ailleurs, cette caractérisation permet de valider le procédé de report d'électrodes.

Sous polarisation directe (Figure III.20-gauche), la courbe obtenue montre un comportement tout à fait classique de jonction P-N avec une tension de seuil de l'ordre de

0,85V. La Figure III.20-droite représente la caractérisation sous polarisation inverse. Aucun comportement anormal ne peut être remarqué, la détermination exacte du courant inverse ne peut être obtenue avec ce type de mesure, réalisée sous éclairage. Néanmoins, la valeur obtenue, qui est de l'ordre de $1\mu\text{A}$ pour une tension de -5 Volts, est tout à fait acceptable compte tenu des conditions de mesure.

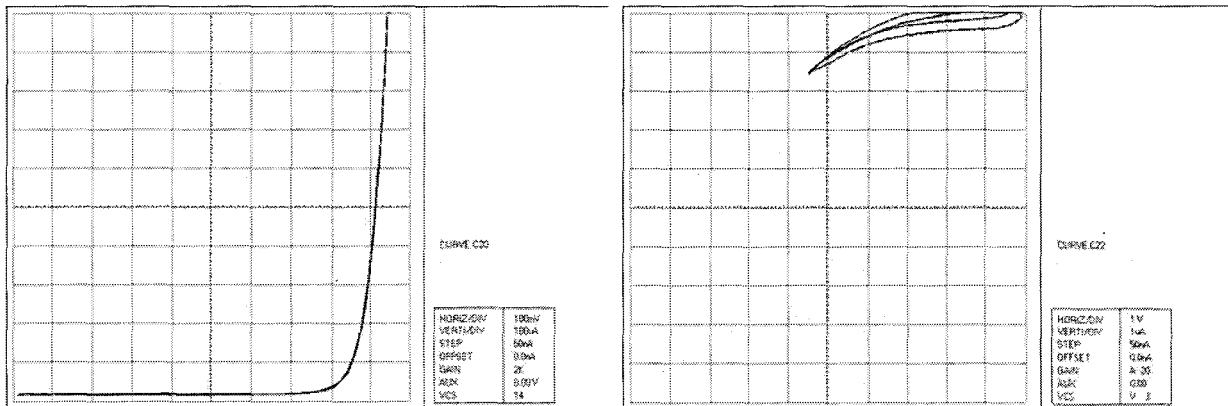


Figure III.20: Caractéristique I(V) d'une diode

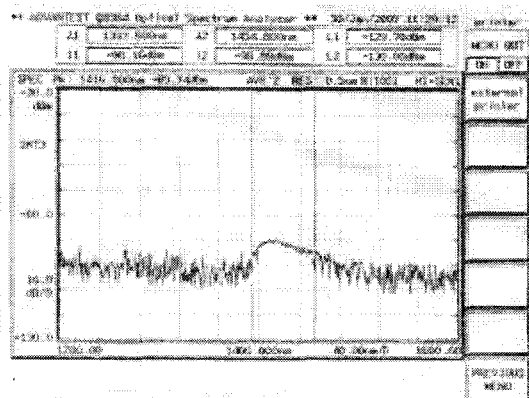
gauche: sous polarisation directe (échelle horizontale : 100mV, échelle verticale : 100 μA)

droite: sous polarisation inverse (échelle horizontale: 1V, échelle verticale : 1 μA)

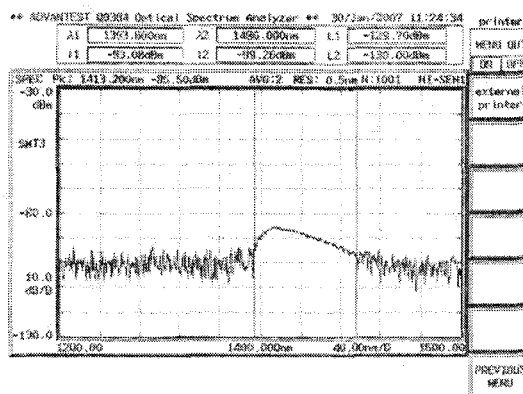
A ce stade nous savons donc que les zones de commutation (diodes) fonctionnent correctement au niveau électrique.

III.2 Emission spontanée par injection de porteurs

Lorsque l'on polarise une jonction PN dans le sens direct, les électrons majoritaires dans la région de type n sont injectés dans la région de type p où ils deviennent excédentaires par rapport à l'équilibre et diffusent en se recombinant. Si les recombinaisons sont radiatives, cette partie de la jonction pn est siège d'une émission spontanée de rayonnement. Sur la Figure III.21, nous observons le spectre de l'émission spontanée obtenue sur nos structures pour un courant injecté de 20mA (image de gauche) et un courant injecté de 40mA (image de droite). Notre structure de zone active, qui n'est ni plus ni moins qu'une diode, émet spontanément un rayonnement dont la valeur maximale est centrée autour de $\lambda=1,42\mu\text{m}$ pour les différents courants injectés; l'émission est plus importante lorsque le courant augmente mais sa valeur maximale est de l'ordre de -86dBm aux densités de courant les plus élevées.



Courant injecté : 20mA



Courant injecté : 40mA

Figure III.21: Spectre d'émission spontanée d'une structure microguide assimilable à une diode

L'émission spontanée couvre un domaine spectral allant d'environ 1390nm à 1490nm. Le commutateur est conçu pour fonctionner dans le domaine des longueurs d'onde des télécommunications optiques ($\lambda=1,55\mu\text{m}$), l'émission spontanée ne devrait donc pas venir perturber les performances de commutation, ni ajouter un bruit supplémentaire sur les signaux transportés.

III.3 Mesures électro-optiques

La caractérisation s'est donc naturellement poursuivie par le test du fonctionnement électro-optique du commutateur. Celui-ci a été effectué à la longueur d'onde de $1,55\mu\text{m}$. En fait nous ne testons ici qu'une demi-partie de commutateur (Figure III.22), à savoir l'équivalent d'une seule jonction Y (le commutateur complet en comprend 2).

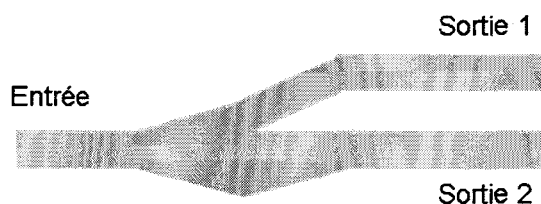


Figure III.22: Structure testée

III.3.a Méthode de caractérisation

Le banc de caractérisation utilisé est identique à celui présenté pour la caractérisation des composants passifs. Toutefois, dans le cas des composants actifs, un système d'injection de courant doit être ajouté. Nous utilisons un support d'échantillon doré; le contact en face

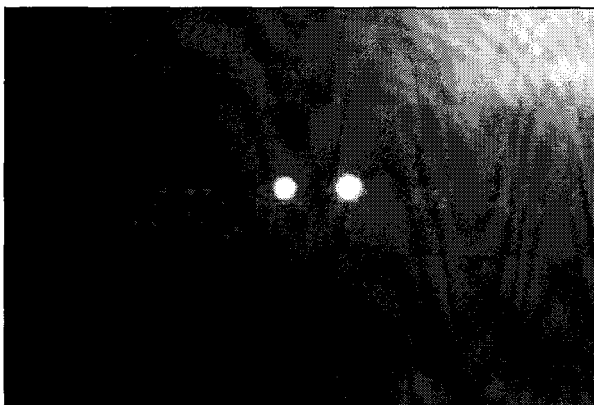
arrière des composants peut alors être repris par l'intermédiaire d'un fil conducteur soudé à la surface du porte échantillon. L'injection de courant se fait sur le contact supérieur (électrode), celui-ci est pris par une pointe dorée déposée sur les reports localisés sur les plots de SU8.

Deux types de caractérisation sont présentés: les mesures en champ proche et les mesures fibre à fibre. Les mesures en champ proche donnent une approche qualitative des performances. Les mesures fibre à fibre permettent d'obtenir des données plus quantitatives sur le fonctionnement du commutateur (voir Annexe 2).

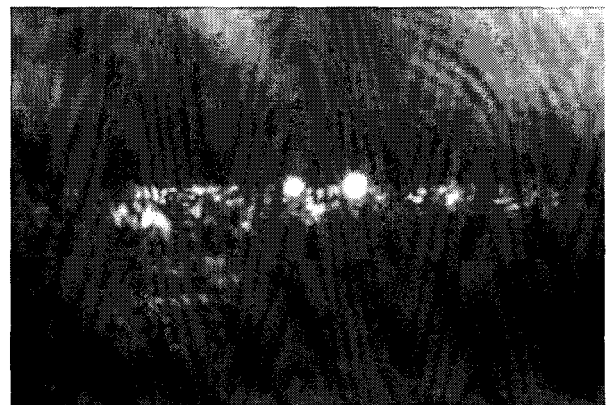
III.3.b Analyse en champ proche

Nous présentons sur la Figure III.23 les faisceaux optiques en sortie d'un commutateur 1→2 (avec une topologie d'électrodes de longueurs 1000 μm de type B et une largeur de microguide de 1 μm) dans différentes configurations.

- Figure III.23.a : sans injection de courant, le commutateur se comporte comme un diviseur de puissance.
- Figure III.23.b : avec injection d'un courant de 20mA: la branche non-commutée commence à s'éteindre.
- Figure III.23.c : avec injection d'un courant de 40mA: la branche non-commutée continue de s'éteindre.
- Figure III.23.d : avec injection d'un courant de 50mA: le taux d'extinction semble se stabiliser.



(a) sans injection de courant



(b) injection d'un courant de 20 mA



(c) injection d'un courant de 40 mA



(d) injection d'un courant de 50 mA

Figure III.23: Observations en champ proche en sortie de commutateur

III.3.c Mesure fibre à fibre

Sur la Figure III.24 sont présentés les premiers résultats de commutation sur une telle structure. Les résultats sont normalisés par rapport à la puissance de sortie sans injection de courant, correspondant à la Figure III.23.a.

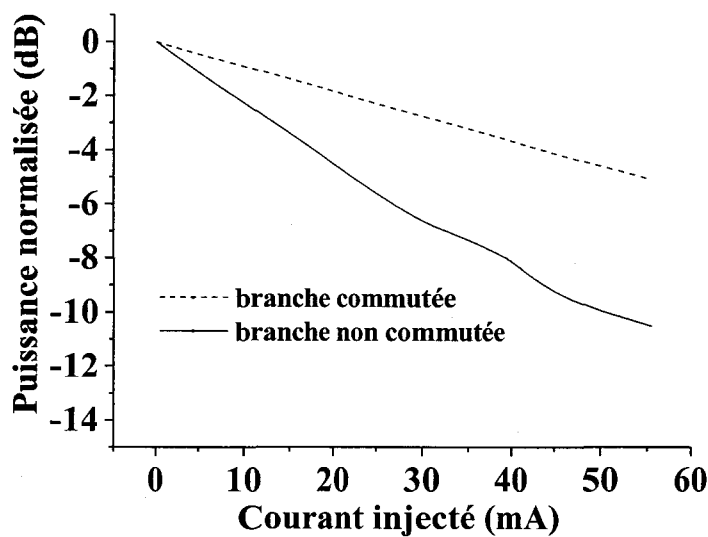


Figure III.24: Evolution des puissances de sortie en fonction du courant d'injection (topologie B, électrodes de $1000\mu\text{m}$, $\lambda=1,55\mu\text{m}$)

Lors de l'injection de porteurs, nous observons deux phénomènes distincts :

- le premier est normal et correspond à la diminution de la puissance de sortie dans la branche non commutée. Sous un courant d'injection de 55 mA, la diminution de puissance en sortie atteint -11 dB.

- le second, lui, est anormal et correspond à la diminution simultanée de la puissance de sortie dans la branche commutée. Sous un courant d'injection de 55 mA, la diminution de puissance en sortie atteint -4dB.

Il en résulte une diaphotie effective de l'ordre de -7dB.

La diminution de la puissance dans la voie commutée ne nous a pas semblé être totalement imputable aux rugosités des flancs de gravure, qui bien que présentes et un peu augmentées par rapport aux composants passifs du Chapitre 2 par la gravure RIE des couches de contact P n'en semblaient pas pour autant destructrices à un tel point des performances. Un examen plus détaillé des zones de commutation nous a montré un défaut répétitif de définition des flancs sur des parties non rectilignes des zones de commutation (Figure III.8-droite). Ce défaut relativement important peut alors augmenter fortement les pertes par diffusion. On peut en avoir un aperçu qualitatif en comparant les vues en champ proche sans injection de courant (Figure III.23.a) et sous injection de courant (Figures III.23.b III.23.c et III.23.d): sur ces dernières, de la lumière parasite peut être observée dans le substrat (sur la gauche), ce qui n'existe pas sans injection de courant.

III.4 Conclusion - Objectifs de la nouvelle réalisation technologique

III.4.a Conclusion

La caractérisation du dispositif de commutation 1→2 a montré des performances prometteuses, nous mesurons une diaphotie effective de -7dB. La limitation des performances a principalement été attribuée aux défauts existants sur les flancs des guides. En prenant une valeur "normale" relative de puissance sur la voie commutée d'environ +3dB, on obtient une valeur proche de 14dB (à comparer avec la valeur théorique de 18dB).

III.4.b Objectifs de la nouvelle réalisation technologique

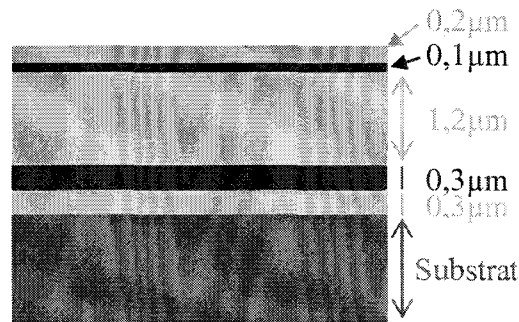
III.4.b.1 Problème de la rugosité des parois des guides

La principale cause des pertes de commutation semble être le défaut ponctuel lié à la lithographie électronique et à moindre échelle la rugosité des parois des guides gravés. Rappelons à quelle étape du procédé technologique apparaît ce défaut.

Les guides sont d'abord gravés profondément par une technique RIE-ICP. Cette technique a été préférée à une technique RIE simple puisqu'elle permet d'obtenir une gravure anisotrope amenant à une faible rugosité de surface. Cependant, cette étape est suivie d'une étape de gravure RIE pour isoler les électrodes des deux branches du commutateur. Cette gravure est relativement longue (23 minutes) puisqu'il faut graver 400nm d'InP dopé P (le ternaire étant gravé en voie humide). Les rugosités amenées par ce procédé se retrouvent sur les flancs des guides gravés.

Différentes solutions peuvent être envisagées pour limiter cette rugosité supplémentaire.

- La plus simple est de graver la couche d'InP dopé p par une technique RIE-ICP. Toutefois, ceci s'avère impossible pour cause de pollution du bâti de gravure ICP par l'utilisation d'un masque métallique (gravure auto-alignée avec les électrodes).
- La deuxième est d'inverser les deux procédés de gravure: commencer par une gravure RIE pour isoler les contacts et terminer par la gravure RIE-ICP pour graver les guides optiques. Malheureusement, ceci s'avère difficilement faisable sans une redéfinition totale du procédé de fabrication. En effet, la lithographie électronique utilisée pour définir le masque de gravure a été optimisée pour une épaisseur de résine HSQ de 700nm. Cette épaisseur est insuffisante pour assurer la couverture des électrodes métalliques tout au long du cycle de gravure ICP, le film de résine étant déposé sur une surface n'étant maintenant plus plane (sur-épaisseur due aux électrodes). La redéfinition du procédé demanderait notamment une nouvelle optimisation du procédé de lithographie électronique de manière à définir un masque de gravure en résine HSQ encore plus épais (au moins $1\mu\text{m}$) pour lequel certaines dimensions seraient peut-être délicates à obtenir. Nous préférons envisager une autre solution.
- La dernière idée est de limiter l'épaisseur des couches de contact. Ainsi, l'épaisseur à graver est moins importante, le temps de gravure a fortiori moins long et a priori les rugosités moins importantes. Une nouvelle épitaxie est donc utilisée, celle ci est présentée Figure III.25. Les épaisseurs des couches de ternaire et d'InP dopés P sont amenées de respectivement $0,4\mu\text{m}$ à $0,2\mu\text{m}$ et $0,2\mu\text{m}$ à $0,1\mu\text{m}$.



- InP n+
- InP nid
- InGaAsP nid $\lambda_c = 1,3 \mu\text{m}$
- InP p+
- InGaAs p+

Figure III.25: Epitaxie utilisée pour le second run

III.4.b.2 Problème de clivage

Sur de nombreux composants issus de la première réalisation technologique et notamment sur des structures complètes de commutateurs, nous avons observé la destruction d'un ou plusieurs guides de sortie à l'étape de clivage (Figure III.26).

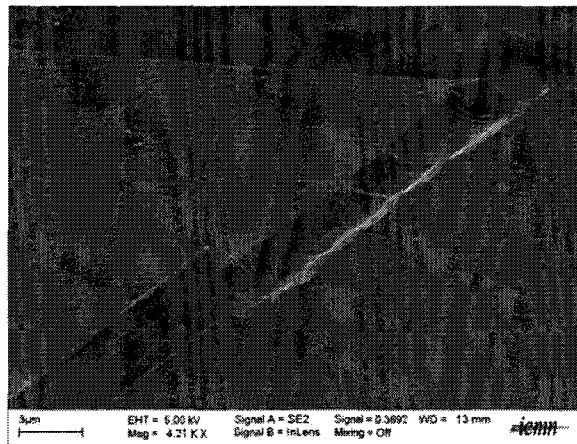


Figure III.26: Destruction de la sortie d'un guide après clivage

Ce problème est dû à la fragilité des structures qui présentent un haut rapport d'aspect. Pour palier à ce problème, nous réaliserons sur le prochain essai des plots de renforcement autour des guides au niveau de la zone à cliver.

IV Nouvelle réalisation technologique: caractérisation

L'épitaxie présentée dans le paragraphe précédent (Figure III.25) est utilisée pour réaliser les nouveaux commutateurs. En diminuant de moitié l'épaisseur de la couche d'InP

dopé P, nous diminuons de moitié le temps de gravure par RIE pour isoler les contacts. A priori, nous pensons diminuer la rugosité supplémentaire amenée sur les parois des guides gravés par ICP. De plus, nous définissons des plots de renforcement des guides au niveau des zones de clivage ; ceux-ci sont réalisés en même temps que les guides par gravure ICP (Figure III.27). Ces structures sont donc aussi hautes que les microguides et ont une largeur de $80\mu\text{m}$ environ. Elles permettront d'obtenir une rigidité accrue lors de l'étape de clivage.

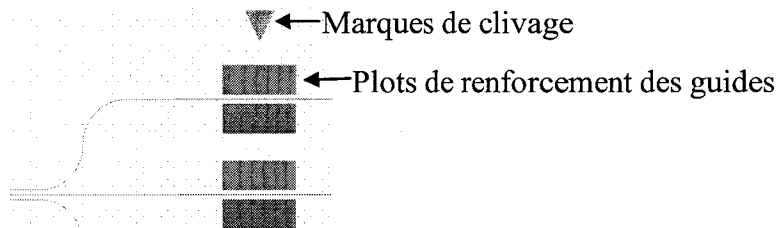


Figure 27: Masque des plots de renforcement des guides

Suite à la nouvelle réalisation technologique, nous disposons de plusieurs commutateurs complets (à deux jonctions). La technique de caractérisation électro-optique est identique à celle utilisée pour les précédents composants: une mesure en champ proche permet une analyse qualitative des performances de commutation, une mesure fibre à fibre nous donne la diaphotie.

IV.1 Comparaison des performances en fonction de l'écart inter-électrode

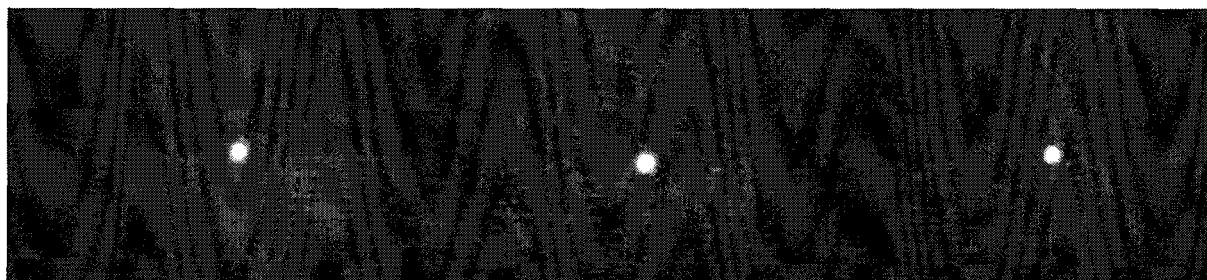
Nous présentons les mesures effectuées sur des commutateurs complets (2 jonctions) réalisés à partir de guide de largeur $1\mu\text{m}$ et ayant une longueur d'électrodes de $800\mu\text{m}$. Les différentes topologies d'électrodes (A, B ou C) sont testées. Rappelons que :

- La topologie A correspond à un écart inter électrodes e de la largeur du guide (ici $1\mu\text{m}$).
- La topologie B correspond à un écart inter électrodes e de $2\mu\text{m}$.
- La topologie C correspond à un écart inter électrodes nul mais une seule électrode est disponible.

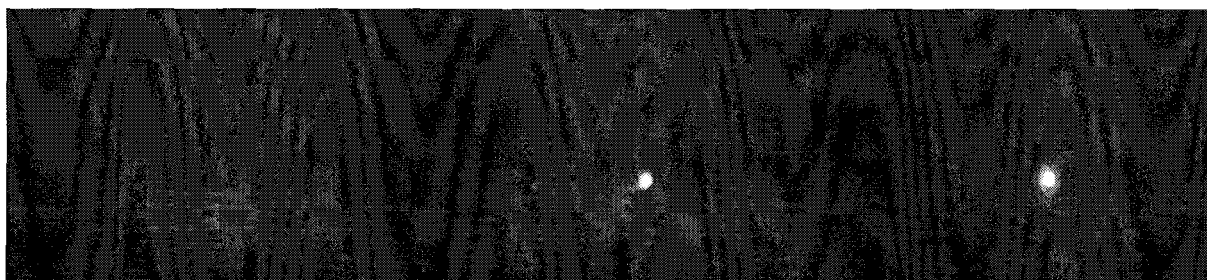
IV.1.a Caractérisation du commutateur de type A

IV.1.a.1 Mesure en champ proche :

Nous présentons sur la Figure III.28, les deux configurations offertes par le commutateur de type A: les trois sorties sans injection de courant et les sorties avec injection de courant (la voie n°2 est commutée).



Sorties optiques du commutateur à 1,55µm sans injection de courant



*Sorties optiques du commutateur à 1,55µm avec injection d'un courant de 50mA
(la voie n°2 est commutée)*

Figure III.28: Sorties optiques du commutateur de type A

Sans injection de courant, les faisceaux optiques issus des sorties 1 et 2 sont équivalents. Avec injection de courant, le faisceau optique issu de la voie 1 s'éteint. Une partie de la puissance reste néanmoins visible dans la voie centrale destinée à ne pas être utilisée. Aucune lumière parasite n'apparaît franchement dans le substrat (comparaison avec Figure III.23), ce qui laisse présager un meilleur comportement du commutateur.

IV.1.a.2 Mesure fibre à fibre

Nous présentons sur la Figure III.29 les puissances optiques en sortie des trois voies en fonction du courant injecté. Les puissances sont normalisées par rapport à la puissance transmise dans l'état initial, c'est-à-dire sans injection de courant.

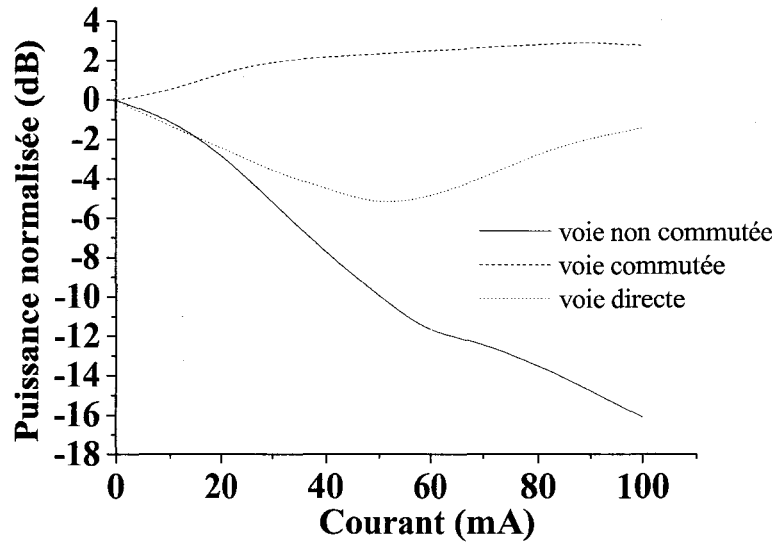


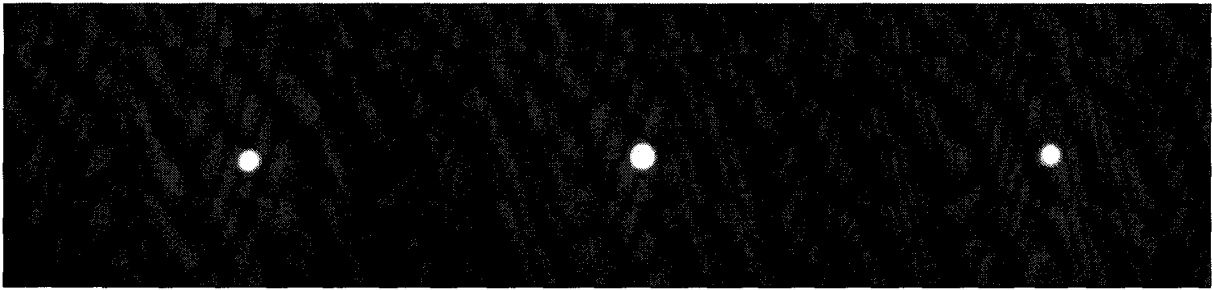
Figure III.29: Mesure de puissances normalisées en sortie d'un commutateur de type A

Nous constatons que la diaphotie entre la voie commutée et la voie non commutée est bien meilleure que celle entre la voie commutée et la voie directe. L'intérêt de l'utilisation de deux jonctions en série est démontré. De plus, nous mesurons une perte de puissance de l'ordre de 16dB dans la voie non commutée et une augmentation de la puissance de l'ordre de 3dB dans la voie commutée. Il en résulte une diaphotie effective de -19dB pour un courant de 100mA (deux jonctions actives donc 50mA par jonction) sur un commutateur de longueur totale 2mm, soit un résultat bien meilleur que celui obtenu lors des précédentes caractérisations.

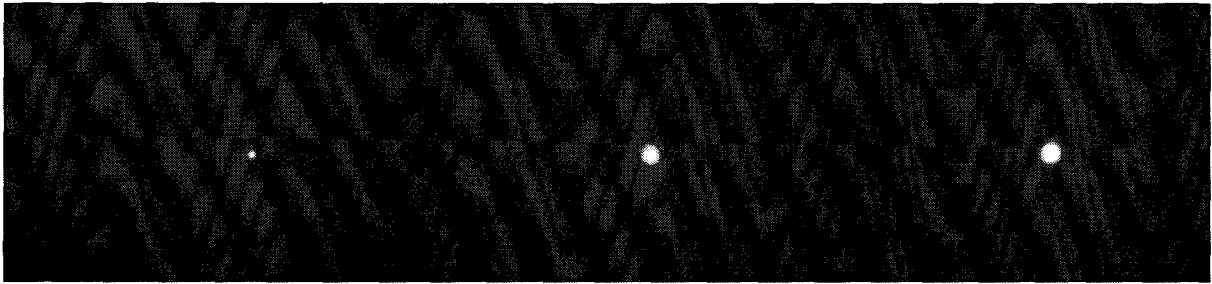
IV.1.b. Caractérisation du commutateur de type B

IV.1.b.1. Mesure en champ proche

Nous présentons sur la Figure III.30 les deux configurations offertes par le commutateur de type B: les trois sorties sans injection de courant et les sorties avec injection de courant (la voie n°2 est commutée).



Sorties optiques du commutateur à $1,55\mu\text{m}$ sans injection de courant



Sorties optiques du commutateur à $1,55\mu\text{m}$ avec injection d'un courant total de 50mA
(la voie n°2 est commutée)

Figure III.30: Sorties optiques du commutateur de type B

IV.1.b.2 Mesure fibre à fibre

Nous présentons sur la Figure III.31 les puissances optiques en sortie des deux voies utiles en fonction du courant injecté.

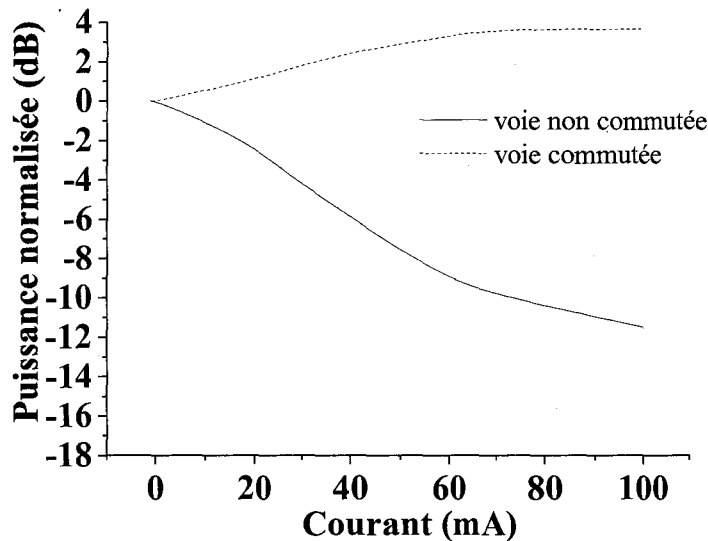


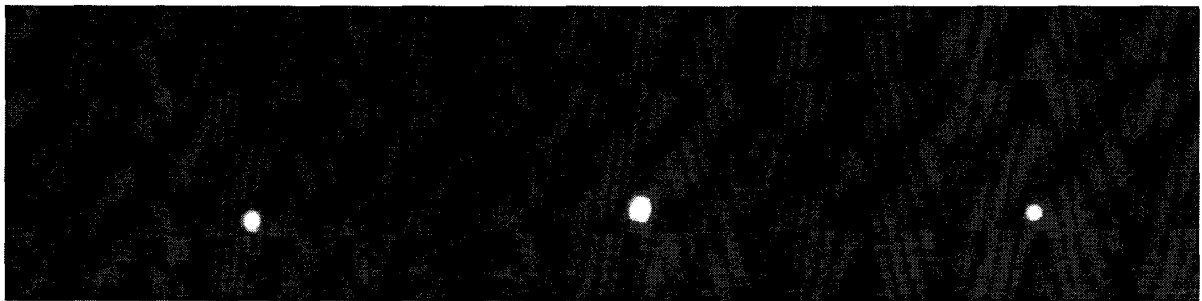
Figure III.31: Mesure de puissances normalisées en sortie du commutateur de type B

Sur cette topologie de commutateur, nous mesurons une diaphotie effective de -15,2dB pour un courant de 100mA.

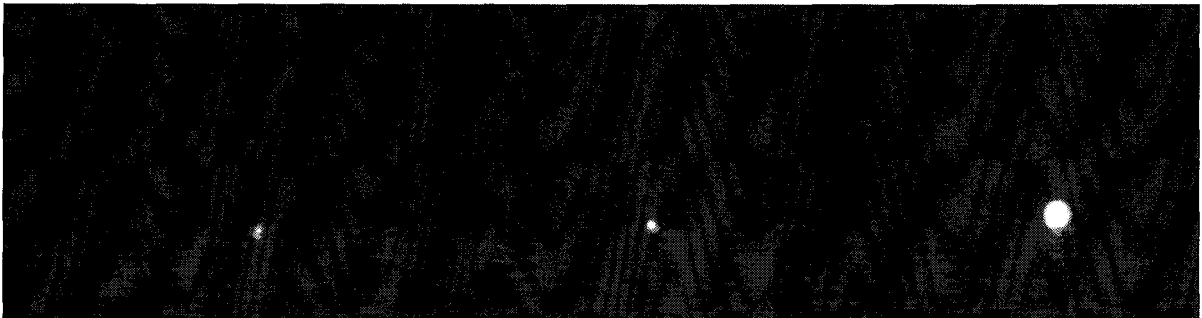
IV.1.c Caractérisation du commutateur de type C

IV.1.c.1 Mesure en champ proche

Nous présentons sur la Figure III.32, les deux configurations offertes par le commutateur de type C: les trois sorties sans injection de courant et les sorties avec injection de courant (la voie n°2 est commutée).



Sorties optiques du commutateur à 1,55µm sans injection de courant



*Sorties optiques du commutateur à 1,55µm avec injection d'un courant de 50mA
(la voie n°2 est commutée)*

Figure III.32: Sorties optiques du commutateur de type C

IV.1.c.2 Mesure fibre à fibre.

Nous présentons sur la Figure III.33 les puissances optiques en sorties des deux voies utiles en fonction du courant injecté.

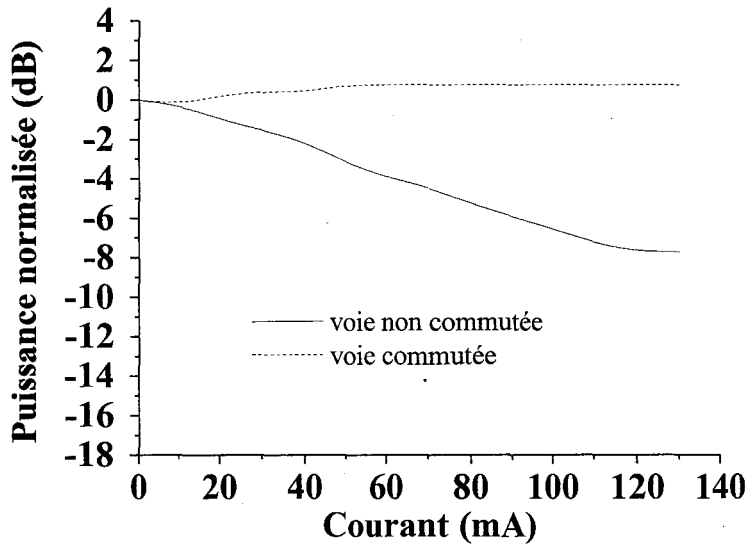


Figure III.33: Mesure de puissances normalisées en sortie du commutateur de type C

Sur cette topologie de commutateur, nous mesurons une diaphotie effective de -8,5dB pour un courant de 100mA.

IV.1.d Comparaison des différentes topologies d'électrodes

Les commutateurs de type B et C donnent de moins bonnes performances en terme de diaphotie que le commutateur de type A. Ceci peut être expliqué par l'étalement latéral du flux de porteurs. En effet, l'étalement des porteurs définit une zone supplémentaire de variation d'indice autour de la zone située sous l'électrode. Nous pouvons supposer la largeur de cette zone de l'ordre du micron comme en optique intégrée traditionnelle.

Dès lors, en topologie C, la variation d'indice s'étale sur l'ensemble du guide dès le début de la jonction (Figure III.34.a). Le faisceau optique subit globalement cette variation d'indice. Il faut attendre un élargissement de la jonction pour que le faisceau optique "voit" deux zones d'indice différent. En topologie B, la variation d'indice n'a lieu qu'après l'élargissement de la jonction (Figure III.34.b). Le faisceau optique n'est a priori pas suffisamment repoussé vers l'extérieur du guide. En topologie A, la variation d'indice a lieu dès le début de la jonction (Figure III.34.c), le faisceau optique "voit" deux zones d'indice différent et est repoussé vers l'extérieur du guide ; d'où une meilleure performance pour le commutateur de type A.

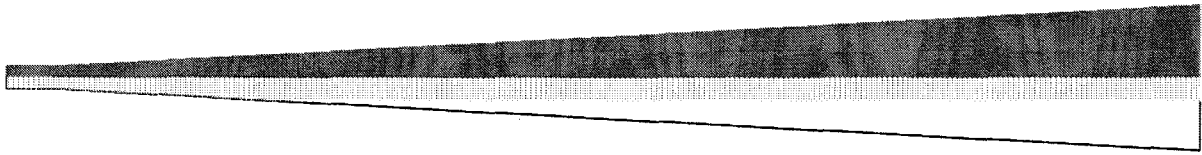


Figure III.34.a: Zone d'étalement des porteurs pour la topologie C d'électrode



Figure III.34.b: Zone d'étalement des porteurs pour la topologie B d'électrode

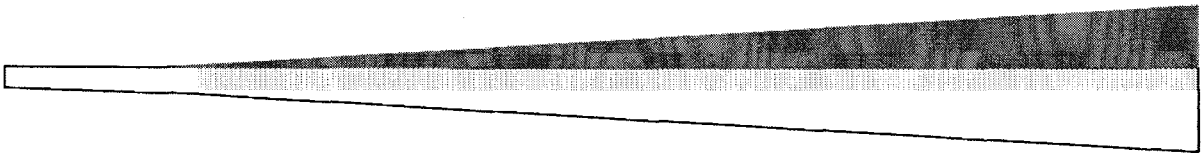
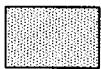


Figure III.34.c: Zone d'étalement des porteurs pour la topologie A d'électrode



Zone de variation d'indice supposée comprenant un étalement latéral



Electrode



Guide optique

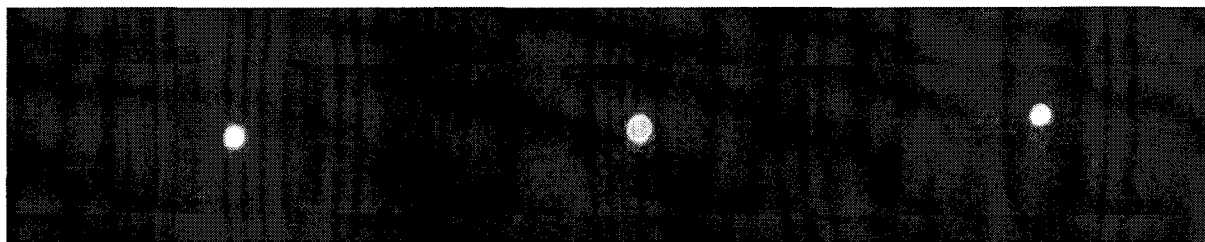
IV.2 Comparaison des performances en fonction de la longueur d'électrode

Nous comparons ici les performances des commutateurs en fonction de la longueur d'électrode. Nous disposons de deux commutateurs de type B réalisés à partir de microguide de largeur $1\mu\text{m}$. Le premier (présenté plus haut) a une longueur d'électrode de $800\mu\text{m}$ et présente une diaphotie de $-15,2\text{dB}$. Le second a une longueur d'électrode de $600\mu\text{m}$, nous présentons ci-dessous les mesures effectuées sur celui-ci.

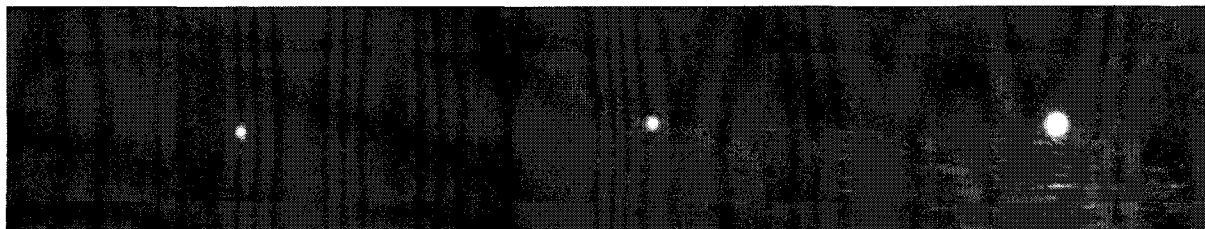
IV.2.a Caractérisation du commutateur avec une longueur d'électrode de $600\mu\text{m}$

IV.2.a.1 Mesure en champ proche

Nous présentons sur la Figure III.35 les deux configurations offertes par le commutateur de type B avec une longueur d'électrode de $600\mu\text{m}$: les trois sorties sans injection de courant et les sorties avec injection de courant (la voie n°2 est commutée).



Sorties optiques du commutateur à 1,55µm sans injection de courant



*Sorties optiques du commutateur à 1,55µm avec injection d'un courant de 50mA
(la voie n°2 est commutée)*

Figure III.35: Sorties optiques du commutateur de longueur d'électrode 600µm

IV.2.a.2 Mesure fibre à fibre

Nous présentons sur la Figure III.36 les puissances optiques en sorties des trois voies en fonction du courant injecté.

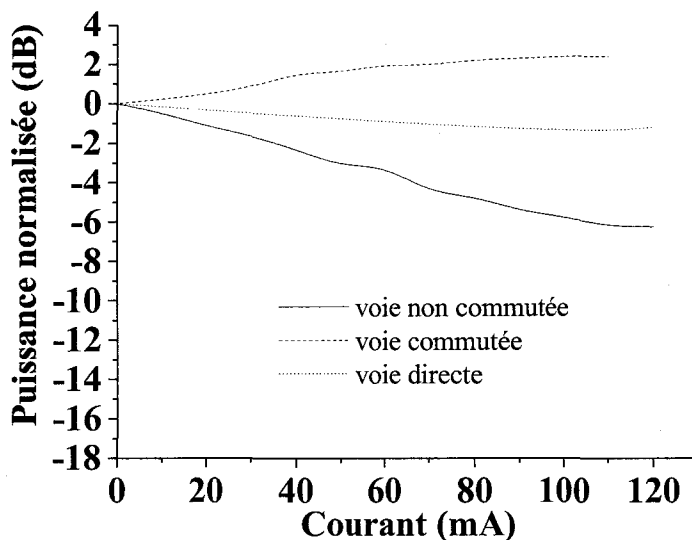


Figure III.36: Mesure de puissances normalisées en sortie du commutateur de type B

Sur cette topologie de commutateur, nous mesurons une diaphotie de -8,65dB pour un courant de 100mA.

Comme le prévoyaient les modélisations, plus la longueur d'électrode augmente et meilleure est la diaphotie.

IV.3 Conclusion

Nous présentons dans le Tableau III.IX un récapitulatif des résultats de caractérisation obtenus sur les composants issus des deux réalisations technologiques.


	Caractéristiques	Longueur des électrodes	Topologie des électrodes	Diaphotie mesurée (100mA)
1 ^{ère} réalisation	<ul style="list-style-type: none"> •Guides de largeur 1µm •1 jonction (1/2 commutateur) 	1000 µm	B	-7dB
2 ^{ème} réalisation	<ul style="list-style-type: none"> •Guides de largeur 1µm •2 jonctions 	800 µm	A	
			B	-15,2dB
			C	-8,5dB
		600 µm	B	-8,65dB

Tableau III-IX: Bilan des performances mesurées à 1,55µm pour les composants issus des deux réalisations technologiques

Les principales conclusions que nous pouvons tirer des ces caractérisations sont les suivantes :

- Les diaphoties mesurées sur les composants issus de la deuxième réalisation technologique sont bien meilleures. Ceci s'explique par plusieurs points :
 - Les diaphoties mesurées pour la deuxième réalisation le sont sur des composants complets à deux jonctions, nous n'avons obtenu que des structures élémentaires à une jonction à l'issue de la première réalisation. L'intérêt de l'utilisation de deux jonctions en série est démontré.
 - De plus, le renforcement des guides au niveau des zones de clivage a permis d'augmenter le nombre de composants "caractérisables" pour la deuxième réalisation technologique.

- Enfin, pour les composants issus de la deuxième réalisation technologique, nous constatons une augmentation normale de la puissance d'environ 3dB dans la voie commutée. Pour les premiers composants, nous constatons une diminution anormale de cette puissance, diminution imputée aux défauts présents sur les flancs des guides. La diminution de l'épaisseur des couches de contact et conjointement la diminution du temps de gravure par RIE (amenant les rugosités) ont permis d'améliorer les valeurs de diaphotie.
- Les mesures effectuées sur les composants issus de la deuxième réalisation technologique montrent que :
 - Une longueur d'électrodes importante donne de meilleurs résultats en terme de diaphotie, ce qui confirme la tendance observée sur les résultats théoriques obtenus dans le chapitre 1.
 - Le commutateur de topologie A, à savoir un écart entre les électrodes de $1\mu\text{m}$, donne les meilleurs résultats expérimentaux (diaphotie minimale). En revanche, la diaphotie théorique est minimale pour la topologie C correspondant à un écart nul entre les deux électrodes (Figure I.32). En première approche, un étalement de porteurs de l'ordre de $0,5\mu\text{m}$ est donc au minimum présent dans ces structures.
 - Une diaphotie proche de -20dB pour un courant de 100mA est mesurée sur un commutateur à deux jonctions (donc 50mA par jonction) réalisé à partir de microguides de largeur $1\mu\text{m}$ présentant une longueur d'électrodes de $800\mu\text{m}$ et une distance inter électrodes de $1\mu\text{m}$. D'après les courbes théoriques données en Figure I.29b et I.30, et en prenant en compte que les résultats obtenus l'ont été sur une structure de $800\mu\text{m}$ (variation théorique de la diaphotie de l'ordre de quelques dB (Figure I.28)) par rapport à une structure de $600\mu\text{m}$), une variation d'indice comprise entre 5.10^{-3} et 10^{-2} est obtenue.
 - Enfin, les mesures de puissance à la base de la courbe en Figure III.29 nous permettent de calculer les pertes relatives à la commutation pour un courant de 100mA sur le commutateur de type A ($L_0=800\mu\text{m}$, $e=1\mu\text{m}$). Celles-ci sont de l'ordre de 3dB. Celles-ci avaient été théoriquement évaluées à 0,5dB environ. Bien évidemment, il faut ajouter à ces pertes les pertes de propagation dans les structures.

Bibliographie du Chapitre III

[1] M. Zegaoui, J. Harari, J-P. Vilcot, F. Mollot, D. Decoster, H-W. Li, J. Chazelas

Electronics Letters, Vol 40, n°16, August 2004

"Determination of carrier-induced optical index and loss variations in GaInAsP/InP heterostructures from static and dynamic Mach-Zehnder interferometer measurements"

[2] R. Hamelin

Thèse, Université Lille1, 17 Novembre 1995

"Etude et réalisation d'émetteurs optiques intégrés sur matériaux III-V"

[3] S-B. Phatak, G. Kelner

Journal of Electrochemical Society, Vol 126, n°2, 1979, pp 287-292

"Material-selective chemical etching in the system InGaAsP/InP"

[4] M. Tong, K. Nummila, A-A. Ketterson, I. Adesida

Journal of Electrochemical Society, Vol 139, n°10, 1992

"Selective wet etching characteristics of lattice-matched InGaAs/InAlAs/InP"

[5] A. Stano

Journal of Electrochemical Society, Vol 134, n°2, 1987

"Chemical etching characteristics of InGaAs/InP and InAlAs/InP heterostructures"

[6] www.microchem.com/products/pdf/SU8_2002-2025.pdf

[7] S. Garidel, J-P. Vilcot, M. Zaknoune, P. Tilmant

Microelectronic Engineering, Vol 71, 2004, pp358-362

"Versatile bondpad report process for non planar compound semiconductor devices"

[8] G. Ulliac, S. Garidel, J-P. Vilcot, P. Tilmant

Microelectronic Engineering, Vol 81, 2005, pp53-58

"Air-bridge interconnection and bondpad process for non-planar compound semiconductor devices"

[9] www.microchem.com/products/pdf/pmgi-resist.pdf

[10] www.microchem.com/products/pdf/abr.pdf

Chapitre IV – *Autres dispositifs en technologie microguide : – Chapitre IV*
structures résonantes

Chapitre IV

Autres dispositifs en technologie microguide: structures résonantes

Le procédé technologique de fabrication des microguides sur InP a été utilisé pour la réalisation de structures résonantes. Ces structures s'apparentent de prime abord à des filtres optiques et leur étude a été entreprise dans le cadre du projet "PREMIO"³. Deux types de structures filtrantes ont été réalisés:

- des résonateurs circulaires de type disque et anneau, déjà rencontrés dans les filières GaAs et Si [2-3].
- des résonateurs plus innovants et aussi beaucoup plus compacts qui ont été dénommés stubs par leur similitude de conception avec leurs homologues dans le domaine microonde.

La modélisation des résonateurs circulaires a été effectuée par le groupe "Photonique" du laboratoire PhLAM (principalement à l'aide de l'outil FDTD-2D de chez Optiwave présenté au chapitre I), et en particulier par Maxime Beaugeois doctorant au sein de l'équipe du Professeur M. Bouazaoui. Celle des structures en stubs a été réalisée par le groupe "EPHONI" du laboratoire en étroite collaboration avec l'équipe du Professeur J-P. Vigneron de l'Université de Namur. J'ai effectué la réalisation technologique des composants et je ne présente ici que les résultats expérimentaux auxquels j'ai participé activement. Une étude expérimentale plus exhaustive est reportée dans les travaux de doctorat de M. Beaugeois [1].

³ "PREMIO" pour "Pole de Recherche en Micro-Optique" est un projet transfrontalier franco-belge de type INTERREG regroupant l'université de Lille (laboratoires IEMN et PhLAM) et celle de Namur. L'université de Namur intervient principalement dans la mise au point d'outils de modélisation en partenariat avec un groupe de recherche de l'IEMN (EPHONI), celle de Lille dans la fabrication (IEMN) et caractérisation (PhLAM) de structures en fils optiques.

**Chapitre IV – *Autres dispositifs en technologie microguide* : – Chapitre IV
*structures résonantes***

I Structure résonante à micro-disque ou micro-anneau

I.1 Principe du filtre à micro-disque (ou micro-anneau)

L'énergie électromagnétique du mode optique se propageant dans un guide droit est couplée, par ondes évanescentes, à une structure résonante de type micro-disque ou micro-anneau; ce procédé est utilisé à la fois en entrée et en sortie de la structure résonante. Le micro-disque (ou micro-anneau) agit alors comme une cavité Fabry-Pérot et permet ainsi de réaliser des filtres dont les longueurs d'onde de résonance (λ_{res}) sont données, en première approche, par l'équation 1:

$$\lambda_{res} = \frac{n_{eff} \pi D}{m} \quad (\text{éq. 1})$$

où n_{eff} représente l'indice effectif du mode, D le diamètre du disque ou de l'anneau et m un entier.

En associant un micro-disque résonant et deux guides droits (Figure IV.1), il est possible de réaliser un filtre optique élémentaire [2, 3]. Ce type de filtre est qualifié de "add-drop" car il permet d'ajouter ou de retrancher un signal d'une longueur d'onde donnée d'un spectre de longueurs d'onde se propageant dans le guide d'entrée.

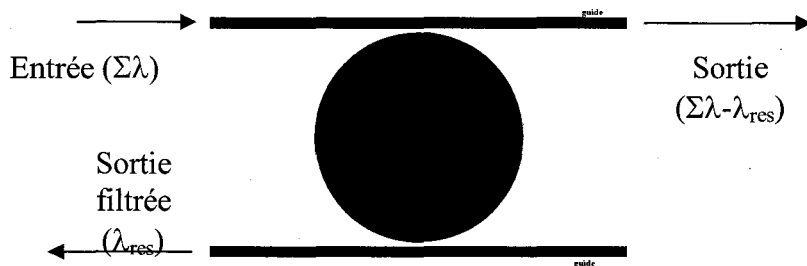


Figure IV.1: Filtre optique à micro-disque (fonction "drop")

La fonction de transfert typique d'un résonateur à micro-disque est présentée Figure IV.2.

On appelle ISL, Intervalle Spectral Libre, la distance spectrale entre deux fréquences de résonance successives. La largeur spectrale des pics de résonance est définie par le coefficient de qualité Q de la structure (cf. équation 2) (défini à mi-hauteur). Le contraste K (l'amplitude des franges) est également un indicateur important des performances du filtre (cf. équation 3), il donne une idée du "pouvoir filtrant" de la structure.

$$Q = \frac{\lambda_{res}}{\Delta\lambda_{res}} \quad (\text{éq. 2})$$

$$K = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max} + T_{\min}} \quad (\text{éq. 3})$$

T_{\max} et T_{\min} sont respectivement les valeurs maximale et minimale de transmission

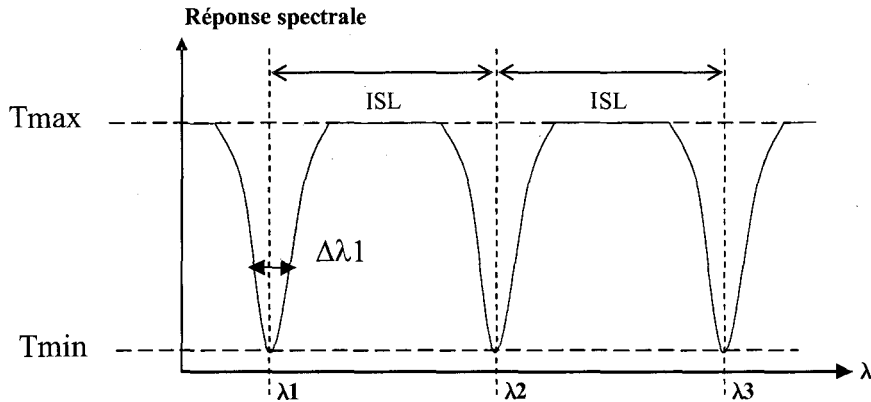


Figure IV.2: Fonction de transfert typique d'un filtre à micro disque

Il est possible de relier l'ISL aux caractéristiques géométriques du micro-disque grâce à l'équation 4.

$$ISL = \frac{\lambda_{res}^2}{n_{eff} \pi D} \quad (\text{éq. 4})$$

I.2 Etat de l'art

Plusieurs études ont été menées sur les filtres optiques à micro-disque ou micro-anneau sur différents matériaux.

En 1997, *Rafizadeh & al* présentent des filtres optiques à micro-disque ou micro-anneau réalisés sur AlGaAs/ GaAs [4]. Le micro-disque (ou micro-anneau) présente un diamètre de 10,5 µm. Un intervalle spectral libre de 21,6 nm et un facteur de qualité supérieur à 8500 ont été mesurés. Le contraste à la résonance est de 40%.

En 2001, *Grover & al* présentent un filtre optique à micro-anneau à couplage vertical réalisé en GaInAsP/InP [5]. Des micro-anneaux de diamètres 5 µm et 10 µm ont été réalisés. Pour le micro-anneau de diamètre 5 µm, un intervalle spectral libre de 24 nm et un coefficient de qualité supérieur à 2500 ont été mesurés. Pour le micro-anneau de diamètre 10 µm, un intervalle spectral libre de 13 nm et un coefficient de qualité supérieur à 2500 ont été mesurés. Le contraste à la résonance est supérieur à 90%.

En 2003, *Paloczi & al* présentent un filtre optique à micro-disque en polymère SU8 [6]. Un intervalle spectral libre de 2.4 nm est obtenu. Le contraste à la résonance est supérieur à 99%.

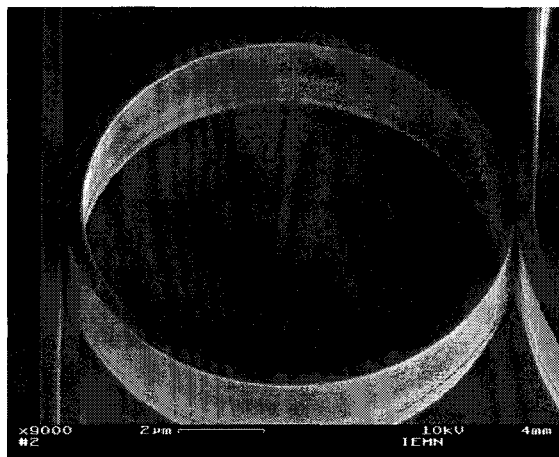
I.3 Réalisation technologique des filtres optiques passifs

Le procédé technologique de fabrication des structures microguides passives, décrit dans le chapitre 2, est utilisé pour la réalisation des filtres optiques passifs à micro-disque ou à micro-anneau, nous ne reviendrons pas sur sa description. Différentes géométries de filtres ont été réalisées: des disques ou anneaux de diamètre 10 μ m, 15 μ m ou 20 μ m ont été fabriqués. Les microguides d'entrée et de sortie couplés au micro-disque ont une largeur de 0,5 μ m. Certaines structures ont été conçues de telle manière que les guides d'entrée et de sortie soient tangents au résonateur (l'intervalle guide-anneau ou guide-disque est nul). D'autres présentent un gap de 100nm entre les guides d'entrée et de sortie et le résonateur. La Figure IV.3 présente quelques images prises au MEB des composants réalisés:

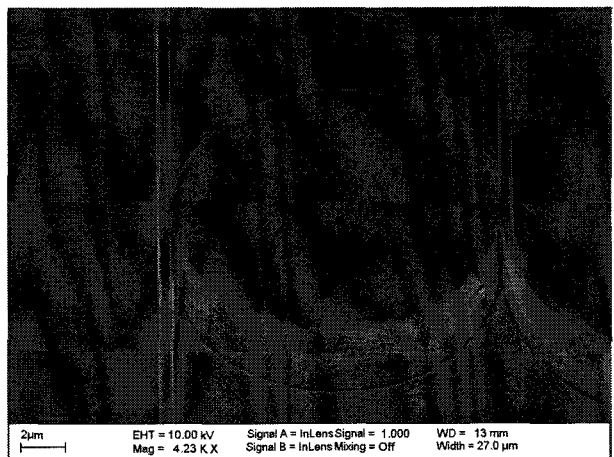
- Figure IV.3a: structure en anneau tangente aux guides d'entrée et de sortie
- Figure IV.3b: structure en disque tangente aux guides d'entrée et de sortie
- Figure IV.3c: structure en anneau avec un gap de 100nm entre guides d'entrée et de sortie
- Figure IV.3d: structure en disque avec un gap de 100nm entre guides d'entrée et de sortie
- Figure IV.3e: structure en disque lors du procédé d'optimisation des paramètres de gravure. On peut particulièrement observer sur ce cliché la bonne tenue du masque en résine HSQ ainsi que sa définition.
- Figure IV.3f: détail d'une structure en anneau montrant plus particulièrement le gap de 100nm

On peut noter sur ces différentes photographies qu'un des guides (celui de sortie) est recourbé. Cela ne modifie en rien les processus de couplage, en revanche cela amène les guides d'entrée et de sortie à 180° (donc un sur chaque côté de l'échantillon clivé), ce qui donne une beaucoup plus grande facilité pour les caractérisations.

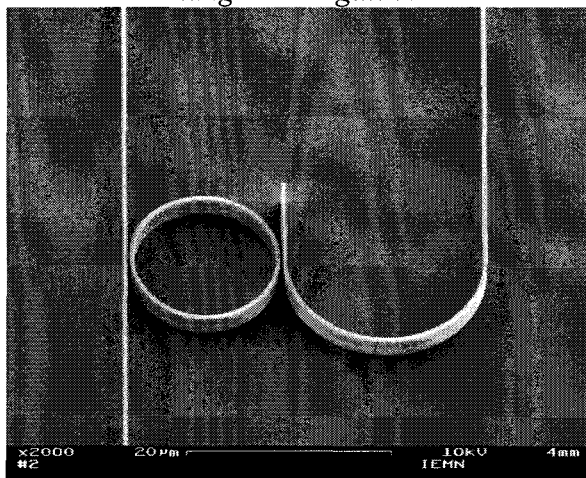
Chapitre IV – Autres dispositifs en technologie microguide : – Chapitre IV
structures résonantes



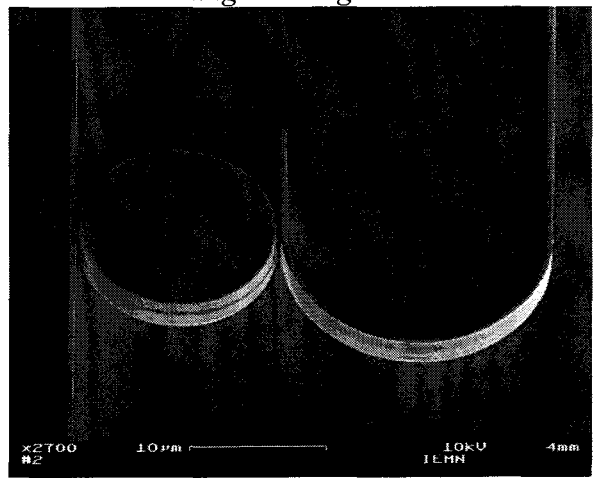
a) anneau de diamètre 10 μm tangent aux guides



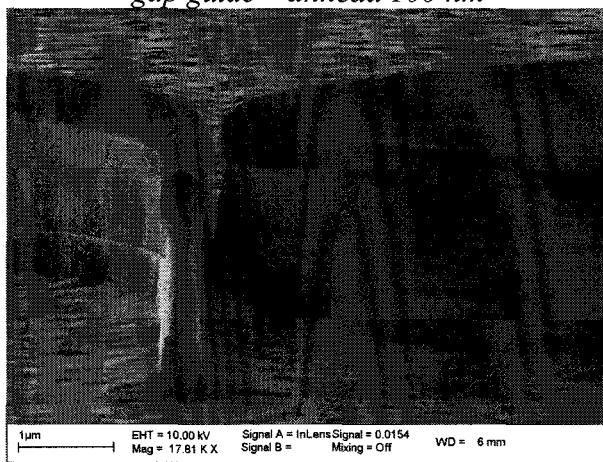
b) disque de diamètre 15 μm tangent aux guides



c) anneau de diamètre 15 μm gap guide – anneau 100 nm



d) disque de diamètre 15 μm gap guide - disque 100 nm



e) Observation du gap de 100nm séparant le disque du microguide



f) Observation du gap de 100nm séparant l'anneau du microguide

Figure IV.3: Images MEB de structures réalisées

I.4 Caractérisation des filtres optiques passifs

Le dispositif expérimental est décrit en Annexe 2. La fibre clivée de sortie, reliée au mesureur de puissance optique est placée successivement devant le guide de sortie principal et devant le guide de sortie secondaire (Figure IV.4).

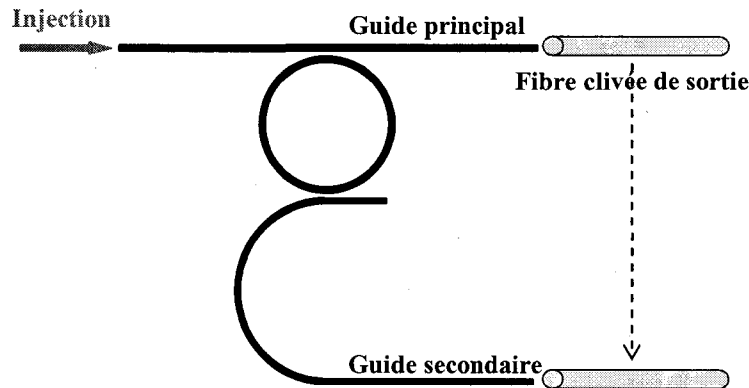


Figure IV.4: Schéma de principe de la caractérisation des résonateurs circulaires. La fibre de sortie est placée en sortie de guide principal ou de guide secondaire

Nous présentons les mesures de transmission ci-dessous pour la polarisation TM.

I.4.a Filtre optique à micro-anneau

I.4.a.1 Le guide droit et l'anneau sont tangents

La Figure IV.5 regroupe les courbes de transmission obtenues sur des filtres optiques à micro-anneau de diamètre 10 μm (a) et 15 μm (b). Pour l'anneau de diamètre 10 μm , nous mesurons un intervalle spectral libre de 20nm, un facteur de qualité de 223 et un contraste de 97%. Pour l'anneau de diamètre 15 μm , nous mesurons un intervalle spectral libre de 13,2nm, un facteur de qualité de 232 et un contraste de 95%. Aucun filtre à micro-anneau de diamètre 20 μm n'a pu être caractérisé. Les filtres réalisés présentent un faible facteur de qualité devant ceux présentés par Rafizadeh *et al* [4]. En revanche, le contraste observé est bien meilleur.

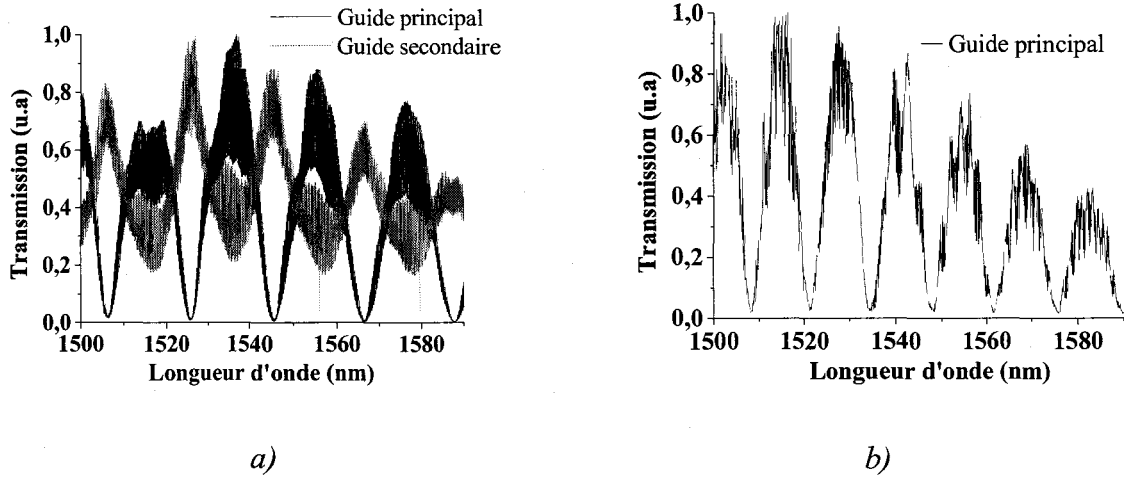


Figure IV.5: Courbes de transmission des filtres à micro-anneau (anneau et guide droit tangents) de diamètre 10µm (a) et 15µm (b)

1.4.a.2 Gap de 100nm entre l'anneau et le guide droit

La Figure IV.6 regroupe les courbes de transmission obtenues sur des filtres optiques à micro-anneau de diamètre 10 µm (a) et 15µm (b). Pour l'anneau de diamètre 10µm, nous mesurons un intervalle spectral libre de 21,3nm, un facteur de qualité de 345 et un contraste de 97%. Pour l'anneau de diamètre 15µm, nous mesurons un intervalle spectral libre de 14,2nm, un facteur de qualité de 467 et un contraste de 98%. Aucun filtre à micro-anneau de diamètre 20µm n'a pu être caractérisé.

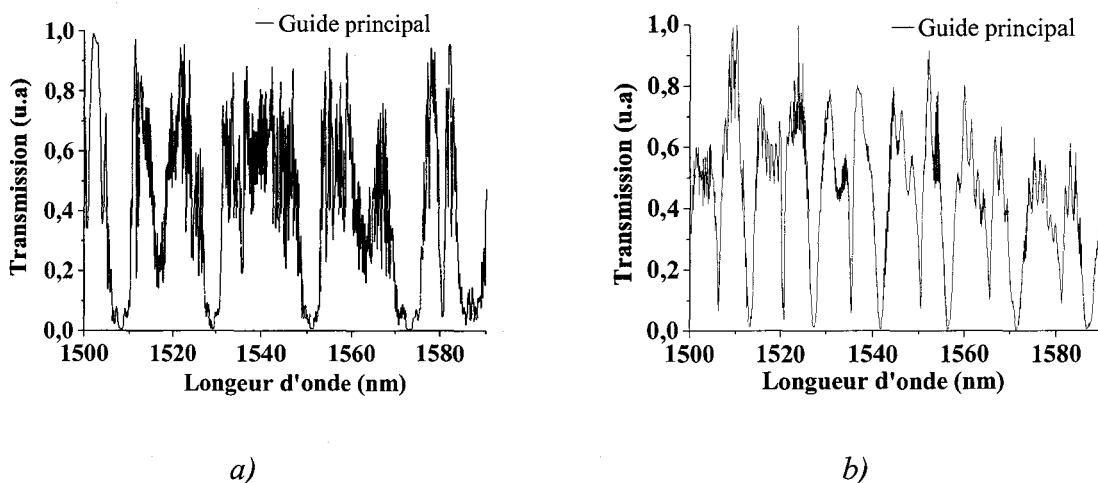


Figure IV. 6: Courbes de transmission des filtres à micro-anneau (gap de 100nm entre l'anneau et le guide droit) de diamètre 10µm (a) et 15µm (b)

I.4.a.3 Conclusion

Un résumé des caractéristiques théoriques et expérimentales du résonateur à micro-anneau de diamètre 15µm est proposé dans le Tableau IV.1. Nous constatons un accord satisfaisant concernant l'intervalle spectral libre. A l'analyse de ce tableau, nous pouvons également vérifier que la présence d'un gap entre le résonateur et les guides permet d'obtenir des résonances marquées et plus fines d'où un meilleur facteur de qualité. Le fait d'avoir un couplage évanescent plutôt qu'un couplage direct semble donc être plus efficace.

Diamètre	Gap	ISL théorique	Q théorique	K théorique	ISL mesuré	Q mesuré	K mesuré
15µm	0nm	15,3nm	483	89%	13,2nm	232	95%
	100nm	15nm	3863	64%	14,2nm	467	98%

Tableau IV.1: Caractéristiques du résonateur à micro-anneau de diamètre 15µm

De plus, pour les structures présentant un gap de 100nm, nous observons sur les courbes une superposition de deux séries de pics avec le même intervalle spectral libre, décalé de ISL/2. Cet effet peut être expliqué par la mauvaise gravure du gap. En effet, en regardant l'image MEB (Figure IV.3e), nous voyons que le gap n'a été gravé qu'à moitié. Cela crée une distorsion du mode optique au moment où la lumière arrive à la jonction. Une partie se couple par la partie inférieure où le gap n'est pas creusé et l'autre partie se couple par la partie supérieure par onde évanescente. Le gap étant mal défini, il en résulte une forme un peu asymétrique des résonances fines de largeur à mi-hauteur $\Delta\lambda \sim 0,9\text{nm}$. Cela est notable dans le cas du diamètre 15µm pour les résonances à $\lambda \sim 1535 \text{ nm}, 1550 \text{ nm}, 1565\text{nm}$ et a pour conséquence de réduire l'efficacité de filtrage.

I.4.b Filtre optique à micro-disque

I.4.b.1 Le guide droit et le disque sont tangents

La Figure IV.7 regroupe les courbes de transmission obtenues sur des filtres optiques à micro-disque de diamètre 10 µm (a), 15µm (b) et 20µm (c). Pour le disque de diamètre 10µm, nous mesurons un intervalle spectral libre de 20,1nm, un facteur de qualité de 385 et un contraste de 72%. Pour le disque de diamètre 15µm, nous mesurons un intervalle spectral libre de 13,1nm, un facteur de qualité de 393 et un contraste de 82%. Pour le disque de

diamètre $20\mu\text{m}$, nous mesurons un intervalle spectral libre de $10,6\text{nm}$, un facteur de qualité de 355 et un contraste de 93%.

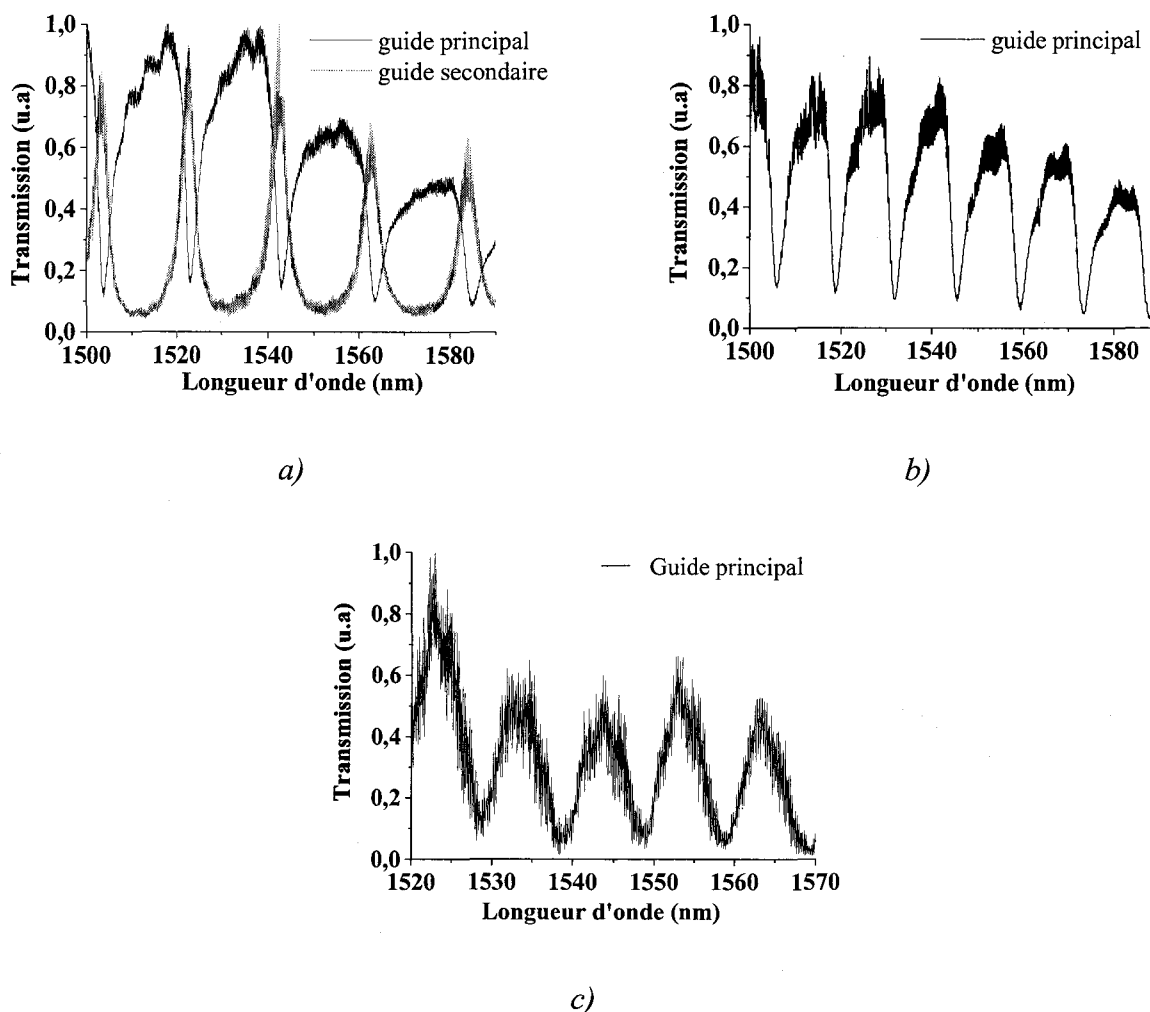


Figure IV.7: Courbes de transmission des filtres à micro-disque (disque et guide droit tangents) de diamètre $10\mu\text{m}$ (a), $15\mu\text{m}$ (b) et $20\mu\text{m}$ (c)

I.4.b.2 Gap de 100nm entre disque et guide droit

La Figure IV.8 regroupe les courbes de transmission obtenues sur des filtres optiques à micro-disque de diamètre $10\mu\text{m}$ (a) et $15\mu\text{m}$ (b). Pour le disque de diamètre $10\mu\text{m}$, nous mesurons un intervalle spectral libre de 21nm , un facteur de qualité de 462 et un contraste de 93%. Pour le disque de diamètre $15\mu\text{m}$, nous mesurons un intervalle spectral libre de 9nm , un facteur de qualité de 1700 et un contraste de 95%.

**Chapitre IV – Autres dispositifs en technologie microguide : – Chapitre IV
structures résonantes**

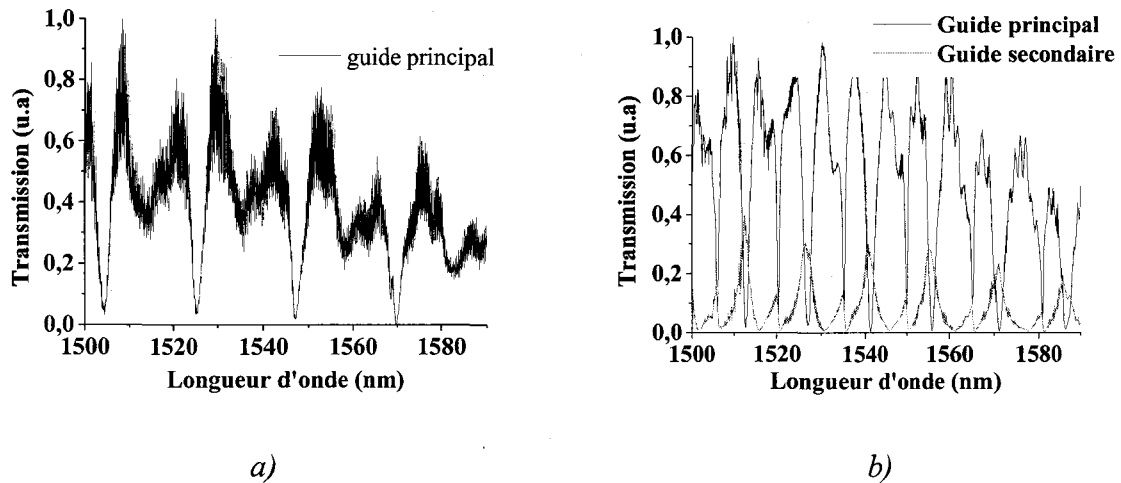


Figure IV.8: Courbes de transmission des filtres à microdisque

(gap de 100nm entre le disque et le guide droit) de diamètre 10µm (a) et 15µm (b)

I.4.b.3 Conclusion

Le Tableau IV.2 présente un résumé des caractéristiques théoriques et expérimentales du résonateur à micro-disque de diamètre 15µm. Nous pouvons faire les mêmes observations que pour les anneaux. Nous constatons un bon accord concernant l'intervalle spectral libre. La présence d'un gap d'air entre le disque et les guides est favorable à l'affinement des résonances.

Diamètre	Gap	ISL théorique	Q théorique	K théorique	ISL mesuré	Q mesuré	K mesuré
15µm	0nm	6,2nm	821	86%	13,1nm	393	82%
	100nm	6nm	1724	81%	9nm	1700	95%

Tableau IV.2: Caractéristiques du résonateur à micro-disque de diamètre 15µm

De plus, on observe une nouvelle fois le mauvais couplage entre résonateur et guides dû à la mauvaise gravure du gap, ce qui provoque l'apparition d'un couplage mixte et donc l'apparition de deux séries de résonances superposées. Il est à noter que l'effet est faiblement marqué pour le diamètre 10µm, bien marqué pour le diamètre 15µm et pour le diamètre 20µm, les deux pics de résonance ne sont plus écartés de ISL/2 mais leur proximité crée une sorte de pic très large, les regroupant tous les deux.

I.5 Accordabilité "tout optique" d'un filtre optique passif à micro-disque par irradiation laser à 980nm [7]

I.5.a Etat de l'art et introduction

Le premier anneau résonant accordable a été réalisé à partir de guide LiNbO_3 avec diffusion de titane par *Tietgen* en 1984 [8].

Rafizadeh et al ont montré un phénomène d'accordabilité thermique sur filtre optique à micro-disque sur GaAs/AlGaAs en 1997 [9]; un décalage en longueur d'onde des résonances de 1,3nm vers le bleu a été mesuré pour une augmentation de température de 10°C.

En 2004, *Grover et al* ont présenté le premier résonateur III-V accordable électro-optiquement [10]; un décalage en longueur d'onde de 0,8 nm a été obtenu par l'application d'une tension de 8Volts.

Almeida et al [11] ont présenté en 2004 le premier contrôle tout optique de la lumière sur puce silicium et ont mesuré un décalage en longueur d'onde de 0,36nm.

Nous présentons ici un filtre optique InP-InGaAsP à micro-disque accordable tout optiquement par irradiation laser infrarouge à 980nm. La structure caractérisée comporte un micro-disque de diamètre 15 μm séparé de 100nm du guide droit. Bien que le principe de cette manipulation soit tout à fait applicable à un micro-anneau, il est en revanche très délicat, sur ces structures, de venir y faire une injection optique efficace par le dessus.

I.5.b Banc de caractérisation

L'injection de la lumière dans la structure se fait de façon identique à celle présentée dans l'Annexe 2. La lumière est injectée à l'entrée de la structure via une fibre lentillée connectée à un laser accordable. La puissance lumineuse en sortie de la structure est collectée dans une fibre clivée reliée à un mesureur de puissance.

La chaîne d'excitation pour l'irradiation de la structure est composée d'une diode laser à 980nm (Figure IV.9). L'irradiation est réalisée grâce à une fibre lentillée placée au dessus de la structure résonante.

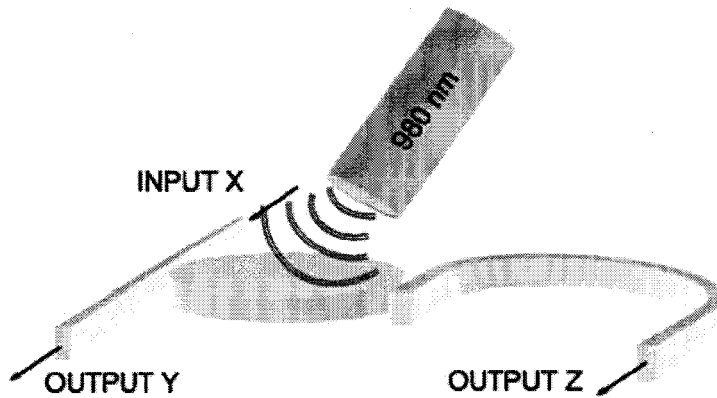


Figure IV.9: Schéma de principe de l'excitation

La longueur d'onde 980 nm se situe dans la bande d'absorption de la couche guidante en quaternaire de longueur d'onde de coupure 1,3 μm . L'irradiation à 980nm de la structure entraîne donc une variation de l'indice de réfraction du quaternaire par génération de photoporteurs. Cette variation d'indice du matériau induit alors une variation de l'indice effectif. Les résonances étant fonction de cet indice (éq.1), un décalage spectral de celles-ci est attendu.

I.5.c Résultats

I.5.c.1 Mesures

La courbe de transmission sans irradiation laser est présentée en Figure IV.10 en trait pointillé. Le contraste des résonances est de 98%.

La courbe de transmission sous irradiation laser à 980 nm est présentée en trait plein. Nous observons un décalage de 3nm de la résonance vers les longueurs d'onde inférieures (vers le bleu).

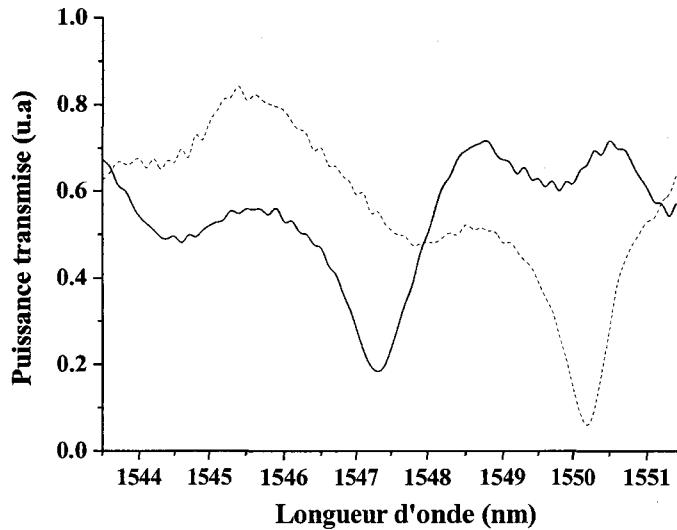


Figure IV.10: Longueur d'onde de résonance sans (trait pointillé) ou avec (trait continu) irradiation laser à 980nm du micro-disque

1.5.c.2 Calcul de la puissance lumineuse absorbée par la couche de quaternaire

La puissance du faisceau à 980 nm focalisée sur la structure est de 70mW. Cependant, l'InP constituant les couches de confinement supérieure et inférieure, transparent à la longueur d'onde 980 nm, présente un indice de réfraction important, une réflexion significative, de l'ordre de 30%, se produit donc à l'interface air/InP. Le coefficient d'absorption du Q1,3 est $\alpha = 2.10^4 \text{ cm}^{-1}$. La puissance absorbée par la couche de quaternaire est donnée par l'équation (5).

$$\begin{aligned}
 P_{abs} &= P_{inc} - P_{ref} - P_{trans} \\
 &= P_{inc} - P_{inc} * \frac{30}{100} - P_{inc} * \frac{70}{100} * e^{-\alpha z} \quad (\text{éq. 5})
 \end{aligned}$$

où P_{abs} est la puissance absorbée par le quaternaire, P_{inc} la puissance incidente sur la structure (70mW), P_{trans} la puissance transmise dans le quaternaire et z l'épaisseur de la couche de quaternaire (0,3 μm).

La puissance lumineuse absorbée par la couche guidante en quaternaire est estimée à 24mW.

1.5.c.3 Calcul de la variation d'indice induite par irradiation laser

Le domaine d'accordabilité obtenu par irradiation laser est $\Delta\lambda = 3 \text{ nm}$. Nous pouvons calculer la variation d'indice effectif induite par l'irradiation laser à partir de l'équation (6).

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta n_{eff}}{n_{eff}} \quad (\text{éq. 6})$$

où λ est la longueur d'onde de résonance et n_{eff} l'indice effectif de la structure.

Le décalage spectral mesuré de 3 nm correspond donc à une variation d'indice effectif $\Delta n_{eff} = -6.10^{-3}$.

I.5.c.4. Origine de la variation d'indice : effet thermique ou injection de porteurs?

La variation d'indice optique pourrait être attribuée soit à un effet thermique tel qu'il est décrit par *Rafizadeh et al* [7] soit à une injection de porteurs.

Etant donné la puissance injectée dans la structure, on peut se poser la question d'une influence d'une éventuelle élévation de température du matériau. Pour les matériaux composés de la filière InP, l'effet thermique décale les résonances dans le rouge [12], ce qui n'est pas le cas ici.

De plus, l'augmentation de la température à la surface du disque a été évaluée par un thermocouple positionné à la place du disque sous l'irradiation laser. L'augmentation de la température sous irradiation laser est estimée à $\Delta T = 3K$. Le coefficient thermo-optique du quaternaire est $K_{TO} = 2.10^{-4} K^{-1}$. La relation (7) nous donne la variation d'indice due à l'effet thermique Δn_{therm} .

$$\Delta n_{therm} = K_{TO} * \Delta T \quad (\text{éq. 7})$$

Nous calculons donc une variation d'indice induite par la montée en température de la structure $\Delta n_{therm} = 6.10^{-4}$.

Pour poursuivre l'analyse du phénomène observé, l'excitation laser à 980 nm est modulée à une fréquence de 1kHz, et le laser d'injection est placé à une longueur d'onde de résonance de la structure. La Figure IV.11 montre la puissance modulée du laser d'excitation et la puissance mesurée en sortie en fonction du temps. A l'état haut, la structure résonante est irradiée ce qui n'est pas le cas à l'état bas. Les temps de montée et de descente des créneaux sont estimés à environ 4 μs . La puissance mesurée en sortie suit la modulation du laser de pompe et notamment le passage entre les états hauts et bas. Le temps de réponse du système n'a pu être mesuré avec précision, mais nous l'estimons inférieur à 4 μs . L'effet thermique n'a pas un temps de réponse si court.

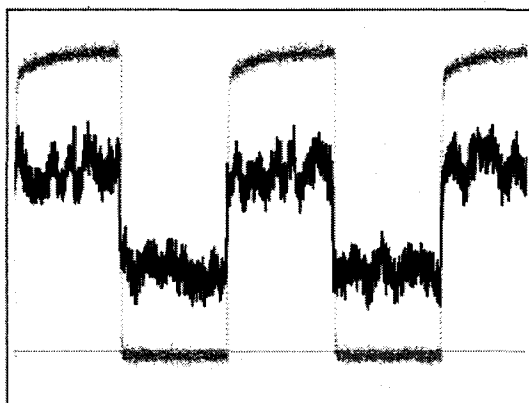


Figure IV.11: Puissance modulée du laser de pompe (courbe bleue) et puissance en sortie de la structure (courbe noire) en fonction du temps.

La période est de 1ms et les temps de montée et de descente des crêteaux sont de 4 μ s

Compte tenu de ces différentes observations, nous pouvons conclure que la variation d'indice globale, et donc le décalage spectral des résonances du filtre à micro-disque, sont dus à l'augmentation des porteurs dans la structure obtenue par photogénération.

I.6 Accordabilité électrique d'un filtre optique à micro-disque

La technologie de réalisation des commutateurs sur microguides a été utilisée pour la réalisation des filtres optiques accordables électriquement. Nous avons donc réalisé des filtres à micro-disque de diamètre 10, 15 ou 20 μ m avec électrode centrée sur le disque pour permettre l'injection du courant. Sur la Figure IV.12, nous présentons des images prises au microscope électronique à balayage d'un de ces composants. Nous observons le disque et le report d'électrode.

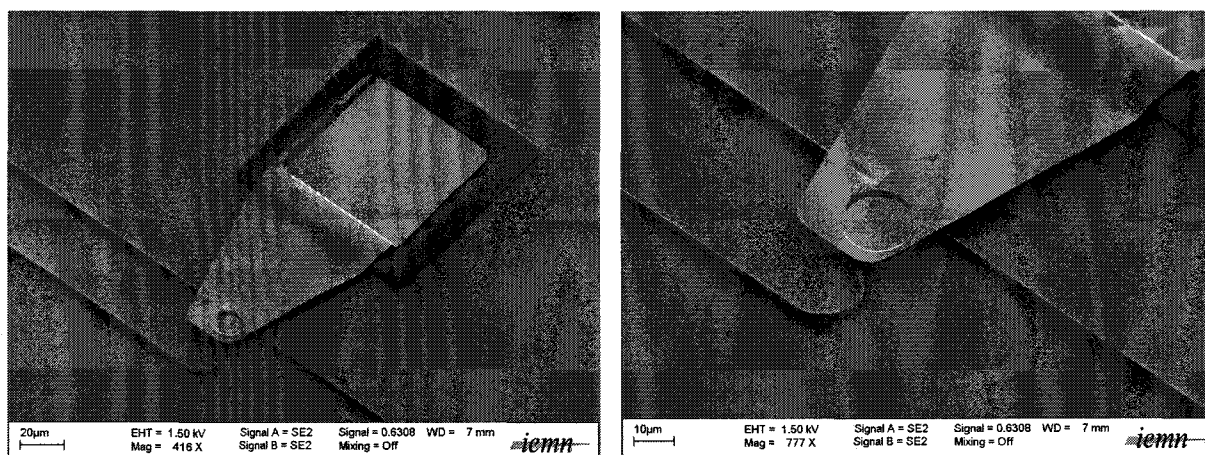


Figure IV.12: Filtre optique à micro-disque avec commande d'accordabilité électrique

L'injection de courant sur l'électrode va induire une diminution de l'indice effectif de manière similaire à ce qui a été obtenu par injection optique. Un comportement identique devrait alors être obtenu. Les caractérisations sur ce type de composant sont en cours.

I.7 Conclusion

Tous les filtres à résonateur circulaire (micro-disque ou micro-anneau) ont montré un contraste important, généralement supérieur à 90%. Les résonateurs ayant le plus grand diamètre ont également montré un facteur de qualité supérieur, phénomène lié à la diminution des pertes de courbure lorsque le rayon de courbure augmente (voir Chapitre 2). Les structures avec gap entre résonateur circulaire et guides droits ont présenté un facteur de qualité plus grand que ceux sans gap. Ces derniers ont par ailleurs une réponse beaucoup plus nette en ce qui concerne les pics de résonance, correspondant aux modélisations théoriques; les structures avec gap présentent un "double pic" plus ou moins marqué lié à la gravure non complète du gap de 100nm (voir Figure IV.3e). Le couplage entre guide et résonateur s'effectue alors de manière "mixte"; une structure équivalente à une structure sans gap pour la partie inférieure du guide et une structure avec gap pour la partie supérieure.

La solution serait évidemment de graver un peu plus les structures (augmentant ainsi un peu leur fragilité) de manière à ce que la partie non gravée n'affecte plus les parties du guide où le champ est présent, l'effet "micro-loading" étant difficilement maîtrisable dans ce gap.

II Filtres optiques de type stub

II.1 Principe du filtre optique de type stub

La technologie microguide a été adaptée à la réalisation d'un nouveau type de filtre optique dénommé "stub" pour sa ressemblance de conception avec son homologue dans le domaine hyperfréquence. Il consiste en un morceau de guide droit placé perpendiculairement au guide d'injection (Figure IV.13). L'intérêt de ce type de structure est le gain de place. Le résonateur latéral (ou stub) a une longueur de l'ordre du micron, sa largeur étant celle du guide.

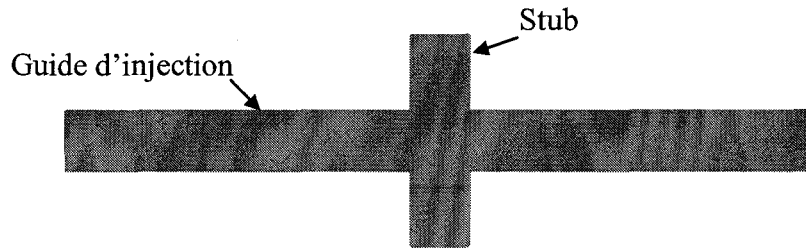


Figure IV.13: Schéma d'un filtre optique de type stub

L'influence d'un résonateur latéral sur le spectre de transmission d'un micro-guide est présentée dans [13]. Les conclusions principales en sont les suivantes:

- La présence du résonateur conduit à des zéros dans le spectre de transmission (Figure IV.14), identiquement au résonateur circulaire; cependant, ces zéros de transmission sont de faible ampleur lorsque le stub est directement en contact avec l'air (guide simplement gravé).

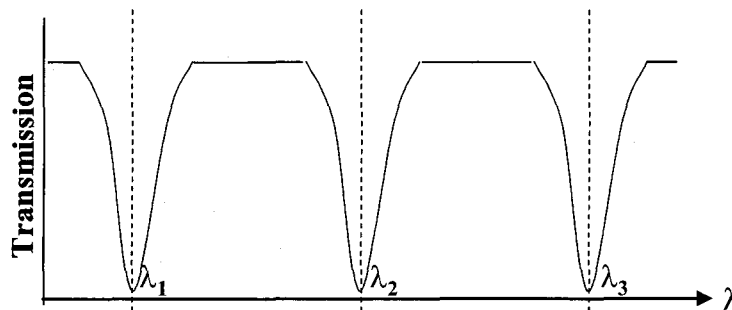


Figure IV.14: Courbe de transmission théorique d'un filtre optique de type stub

- On peut en augmenter le contraste et le facteur de qualité en recouvrant le stub d'une couche métallique parfaite. En effet, cette couche permet de confiner la lumière à l'intérieur du stub et d'éviter qu'elle s'échappe vers l'extérieur. On reproduit alors l'équivalent d'un stub court-circuité dans le domaine microonde. La Figure IV.15 illustre clairement ce comportement.
- En considérant le cas du stub recouvert d'une couche métallique, l'influence des dimensions géométriques du stub sur les longueurs d'onde des zéros de transmission a été étudiée: celles-ci se déplacent vers les longueurs d'onde supérieures lorsqu'on augmente soit la largeur, soit la longueur du stub.
- Il est également possible d'augmenter le facteur de qualité des zéros de transmission en séparant le stub du microguide par un gap très étroit (de l'ordre de quelques dizaines de nanomètres), identiquement à ce que nous avons observé sur les résonateurs circulaires.

- Enfin, il est possible d'élargir les zéros de transmission en bandes interdites en considérant un ensemble de stubs disposés de façon périodique sur le guide d'injection.

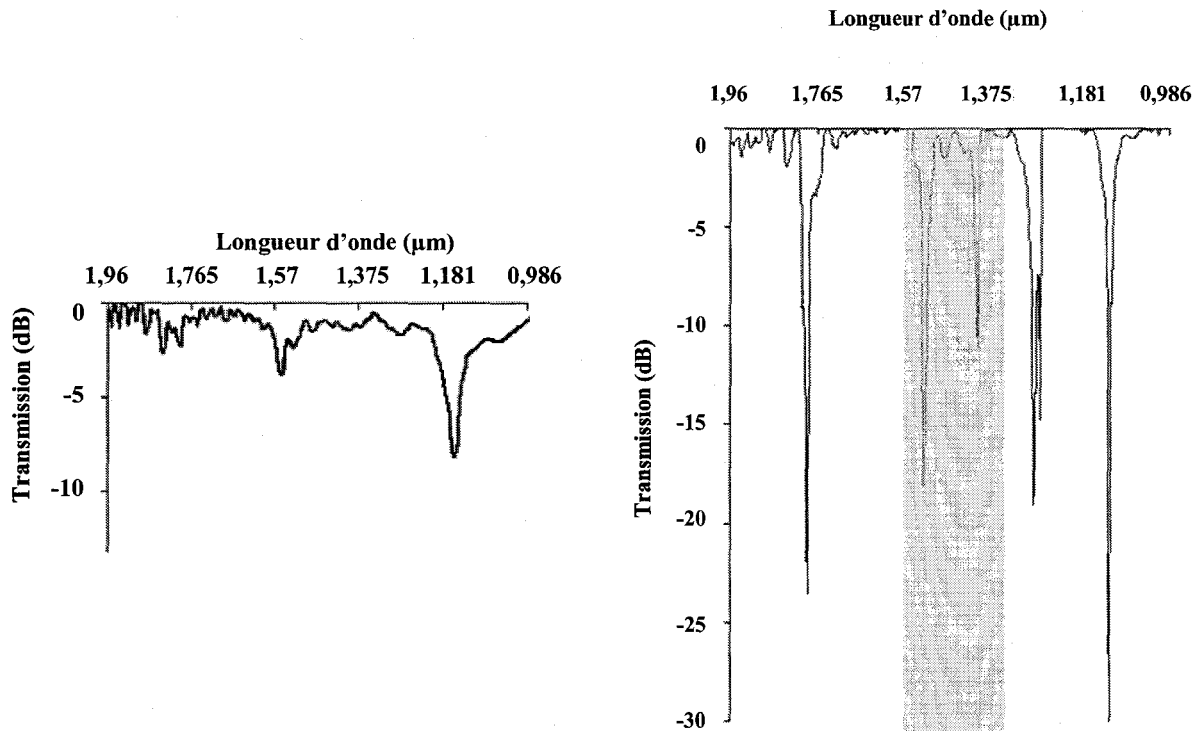


Figure IV.15: Effet de la métallisation des parois sur les caractéristiques en résonance d'une structure stub
a) transmission normalisée d'un stub non métallisé
b) transmission normalisée d'un stub métallisé

II.2 Réalisation technologique des stubs métallisés

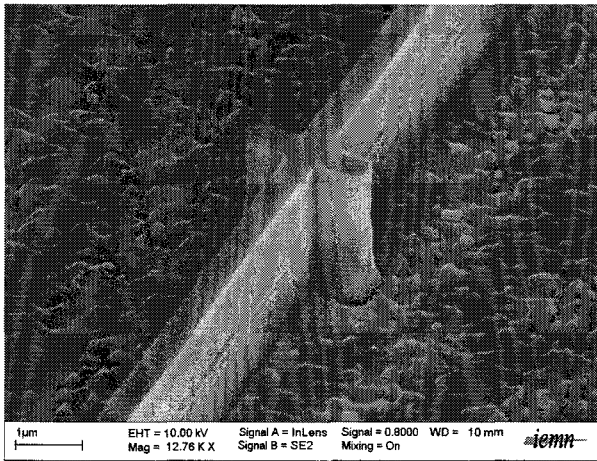
Nous présentons dans ce paragraphe le procédé technologique de fabrication des filtres optiques de type stub. La métallisation des stubs a requis le développement d'une étape technologique spécifique et nous présentons ici le procédé optimisé permettant la réalisation des structures métallisées.

II.2.a Réalisation des stubs

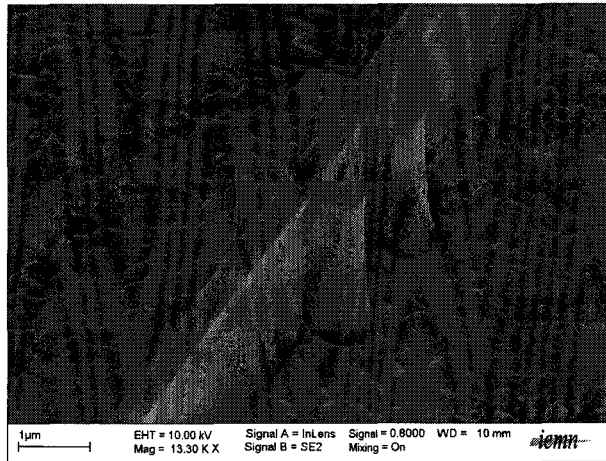
Les stubs sont réalisés avec le même procédé technologique que celui utilisé pour la réalisation des composants passifs intervenant dans la conception d'une matrice de commutation (voir Chapitre 2). La Figure IV.16 présente des images MEB de quelques structures réalisées. Nous notons une importante rugosité du fond de gravure sur ce run technologique. Toutefois, cette rugosité n'existe pas sur les parois des guides. Le mode

Chapitre IV – Autres dispositifs en technologie microguide : – Chapitre IV structures résonantes

optique de ces structures est confiné au milieu du guide et ne devrait donc pas a priori être perturbé par les rugosités du fond de gravure.

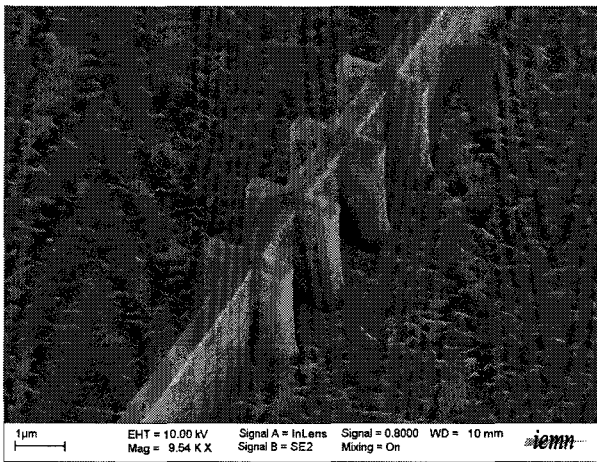


1 stub couplé au microguide



2 stubs couplés au microguide

Ecart entre stubs : $1,5\mu\text{m}$



4 stubs couplés au microguide.

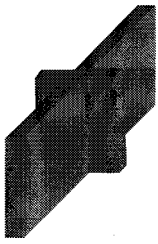
Ecart entre stubs : $1,5\mu\text{m}$ (gauche) et $0,8\mu\text{m}$ (droite)

Figure IV.16: Images MEB des structures stubs (guide de $0,5\mu\text{m}$)

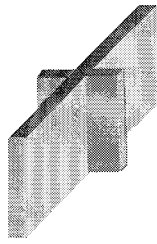
II.2.b Métallisation des stubs

Des essais de métallisation des stubs avec une technique lift-off classique ont été entrepris mais aucun n'a donné de résultats satisfaisants. Nous avons alors développé une technique de dépôt par gravure. Le Tableau IV-3 reprend les étapes technologiques du procédé de fabrication des stubs. Nous en donnons ensuite le détail des différentes étapes.

**Chapitre IV – Autres dispositifs en technologie microguide : – Chapitre IV
structures résonantes**



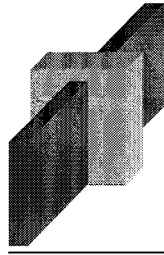
*(a) Réalisation des stubs
couplés au microguide*



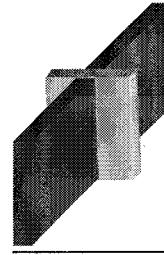
*(b) Métallisation pleine
plaque par pulvérisation*



*(c) Définition des plots
de résine protégeant la
métallisation sur les stubs*



*(d) Gravure du métal
des zones non protégées*



(e) Retrait de la résine

Tableau IV-3: Etapes technologiques de la fabrication des stubs métallisés

Après la première étape, désormais "classique", de définition de la structure guidante (Tableau IV-3a), la plaque est entièrement recouverte de métal par pulvérisation (Tableau IV-3b). Un "etching" d'argon est préalablement effectué afin de favoriser l'accroche du film d'or de 300nm d'épaisseur. Sur la Figure IV.17, nous présentons une image MEB d'un stub couplé au microguide après l'étape de pulvérisation pleine plaque. Nous pouvons constater que le dépôt métallique par pulvérisation recouvre de manière isotrope les structures. Une coupe réalisée au FIB confirme l'isotropie du dépôt (Figure IV.18).

**Chapitre IV – Autres dispositifs en technologie microguide : – Chapitre IV
structures résonantes**

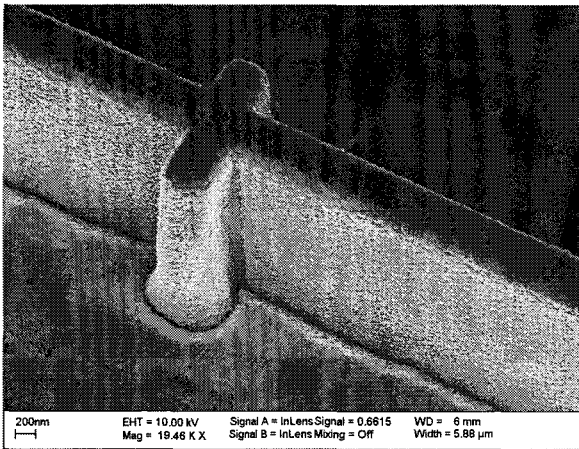


Figure IV.17: Image MEB d'un stub après métallisation pleine plaque

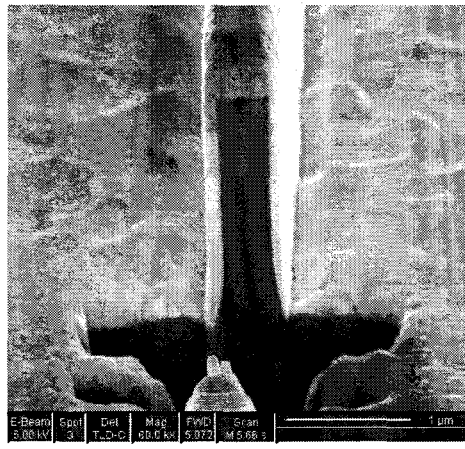


Figure IV.18: Coupe d'un guide métallisé

Des plots de résine (AZ® *n*LOF™) sont ensuite définis de manière à recouvrir les zones qui doivent rester métallisées (c'est-à-dire les stubs) (Tableau IV-3c). La résine *n*LOF™ est couramment utilisée en lithographie optique. Compte tenu de la taille des motifs à réaliser, un procédé de lithographie électronique a été développé; nous regroupons dans le Tableau IV-4 les paramètres de définition des plots en résine *n*LOF.

Résine	Dépôt	Ecriture électronique	Révélation
AZ® <i>n</i> LOF™ 2070	a=1000 rpm/s v=4000 rpm t=30s Recuit 90s à 110°C Epaisseur 5,6μm	Dose d'insolation : 10μC/cm ² Résolution : 10nm Recuit 1min à 110°C	Révéléateur : MIF726 Temps: 1 min

*Tableau IV-4: Paramètres technologiques de définition des plots de *n*LOF*

Les zones métalliques non recouvertes par la *n*LOF™ sont alors gravées par une attaque chimique à base d'iodure de potassium (Tableau IV-3d). La *n*LOF™ est ensuite retirée par immersion dans un bain de Remover PG chauffé à 60°C (Tableau IV-3e). La Figure IV.19 présente une image MEB d'une structure finalisée.

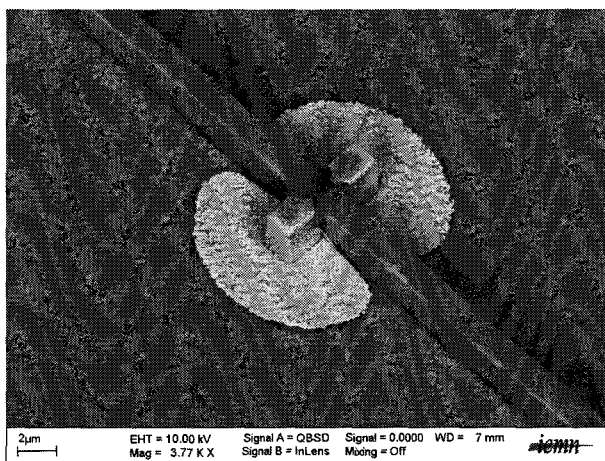


Figure IV.19: Image MEB d'une structure finalisée

Nous pouvons voir que les stubs sont quasiment intégralement métallisés. Les débordements de la métallisation sur tout autre partie du microguide ont été minimisés de manière à ne pas augmenter les pertes par absorption dans le métal. Nous observons néanmoins un dépôt métallique sur le substrat autour de chaque stub. Celui-ci devrait avoir une influence négligeable puisqu' aucune propagation optique n'est présente dans cette partie. Identiquement aux structures micro-résonateurs à commande électrique, les caractérisations optiques des résonateurs de type stubs métallisés sont en cours.

III Conclusion

Dans cette partie, nous avons décrit la fabrication de structures de filtrage à base de micro-résonateurs circulaires ou, de manière plus novatrice, à base de stubs. Ces dernières présentent l'avantage d'être très compactes; en contrepartie, leur définition requiert une grande précision dimensionnelle de manière à être calée sur les fréquences désirées.

Les structures à micro-disque ont montré une accordabilité tout-optique. Un premier run de fabrication a été fait, basé sur le procédé technologique du Chapitre 3 mis au point pour les commutateurs, permettant de réaliser le contrôle électrique d'une telle structure. Ces composants sont actuellement en cours de caractérisation. En supposant une excitation optique à longueur d'onde figée, un tel composant peut aussi être envisagé comme commutateur (si tant est que le résonateur soit centré sur cette longueur d'onde).

Ce principe d'accordabilité peut théoriquement être étendu aux structures en anneau voire en stubs mais sa mise en œuvre pratique en est alors des plus périlleuse au vu de la faible dimensionnalité de ces structures.

Bibliographie du Chapitre IV

[1] M. Beaugeois

Thèse de l'Université des sciences et technologies de Lille, 5 Octobre 2007

"Modélisation et caractérisation de composants optiques submicroniques pour le démultiplexage en longueur d'onde; application de la résonance de plasmon de surface à la détection d'espèces biologiques en goutte"

[2] B.E Little, S.T Chu, H.A Haus, J. Foresi, J.P Laine

Journal of Lightwave Technology, 1997, vol. 15, n°6, pp 998-1005

"Microring resonator channel dropping filters"

[3] B.E Little, J.S Foresi, G. Steinmeyer, E.R Thoen, S.T Chu, H.A Haus, E.P Ippen, L.C Kimerling, W. Greene

IEEE Photonics Technology Letters, 1998, vol.10, n°4, pp 549-51

"Ultra-compact Si-SiO₂ microring resonator optical channel dropping filter"

[4] D. Rafizadeh, J.P Zhang, S.C Hagness, A. Taflove, K.A Stair, S.T Ho

Optics Letters, 1997, vol. 22, n°16, pp 1244-46

"Waveguide-coupled AlGaAs/GaAs microcavity ring and disk resonators with high finesse and 21.6 nm free spectral range"

[5] R. Grover, P.P Absil, V. Van, J.V Hryniewicz, B.E Little, O. King, L.C Calhoun, F.G Johnson, P.T Ho

Optics Letters, 2001, vol. 26, n°8, pp 506-8

"Vertically coupled GaInAsP/InP microring resonators"

[6] G.T Paloczi, Y. Huang, A. Yariv

Electronics Letters, 2003, vol. 39, n°23

"Free-standing all-polymer microring resonator optical filter"

[7] M. Beaugeois, M. Leseq, S. Maricot, B. Pinchemel, M. Bouazaoui, J.P. Vilcot

Optics Letters, 2007, vol.32, n°1, pp.35-37

"All-optical tunability of InGaAsP/InP microdisk resonator by infrared light irradiation"

[8] K. H Tietgen

7th Topical Meeting on Integrated and Guided Wave Optics, Kissimmee, Florida, 1984

"Tunable integrated optical ring resonator"

[9] D Rafizadeh, J-P Zhang, Hagness S-C, Taflove A, Stair K-A, Ho S-T

Laser and Electro Optics Society annual meeting (LEOS), 10th Annual Meeting, Conference Proceedings IEEE Vol2 pp 162-163, San Francisco, USA, 10-13 November 1997.

"Temperature tuning of microcavity ring and disk resonators at 1.5 μ m"

[10] R. Grover, A. Ibrahim, S. Kanakaraju, L. Lucas, L.C Calhoun, P.T Ho

IEEE Photonics Technology Letters, 2004, vol 16, n°2, pp 467-69

"A tunable GaInAsP-InP Optical Microring Notch Filter"

[11] V. R. Almeida, C. A. Barrios, R. R. Panepucci, M. Lipson

Nature, 2004, vol.431, pp 1081-1084

"All-optical control of light on a silicon chip"

[12] M.V Kotlyar, L. O'Faolain, A. B. Krysa, T. F. Krauss

IEEE Photonics Technology Letters, 2005, vol.17, n°4, pp 837-39

"Electrically Tunable Multiquantum-Well InGaAsP-InGaAsP Microphotonic Filter"

[13] Y. Pennec, B. Djafari-Rouhani, A. Akjouj, L. Dobrzynski, J. P. Vilcot, M. Beugeois, M.

Bouazaoui, R. Fikri, J. Pol Vigneron

Applied Physics Letters, 2006, vol. 89, pp 101-13

"Transmission filtering of a waveguide coupled to a stub microresonator"

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de cette thèse était d'évaluer les potentialités de la nanophotonique pour la réalisation de la fonction de commutation à $1,55\mu\text{m}$. La technologie microguide sur InP associée à une variation d'indice localisée obtenue par injection de porteurs a été utilisée. Ce travail a permis de valider la faisabilité du principe de commutation électro-optique en micro-optique et nous en proposons, dans cette conclusion, un bref récapitulatif. Rappelons que ce travail faisait partie intégrante d'une Recherche Exploratoire DGA en ce qui concerne la fonctionnalité de commutation ainsi que d'un projet transfrontalier franco-belge pour la partie que l'on pourrait qualifier de plus "passive". Nous situons aussi notre étude vis-à-vis de l'optique intégrée traditionnelle puisque l'objectif était de diminuer la taille des composants existants en conservant leurs performances en terme de diaphotie et de consommation électrique.

La première étape de ce travail a consisté en la conception aussi bien des structures passives qu'actives qui entreront dans la composition d'une matrice de commutation. Les outils commerciaux de type BPM et FDTD ont permis d'appréhender la conception de ces structures. Les structures passives modélisées (guides droits, guides courbes et jonctions Y) présentent des performances intéressantes en terme de compacité et de pertes. D'autre part, la modélisation des structures actives a montré qu'une structure en Y simple (symétrique ou dissymétrique) ne permet pas d'obtenir une faible valeur de diaphotie. Une structure originale dans laquelle deux structures Y dissymétriques (1 branche droite, 1 branche oblique) se faisant suite a alors été développée. Sur les 3 voies de sortie ainsi obtenues, deux sont réellement utilisées, la troisième ne l'est pas et ne sert qu'à diminuer la valeur de la diaphotie existant entre les deux autres. Etant donné le confinement latéral important des structures microguides, la zone de commutation a elle aussi nécessité une conception particulière afin de diminuer la valeur de la diaphotie. Nous proposons donc différentes topologies de commutateur à réaliser; ces différentes géométries sont fonction de la longueur des électrodes, de la distance entre les électrodes ou encore de la largeur des micro-guides utilisés. Enfin, des structures d'adaptation de mode sont nécessaires de manière à minimiser les pertes de couplage avec la fibre optique. Néanmoins, à ce stade, le couplage n'a été optimisé que pour l'injection par fibre lentillée. L'utilisation d'une fibre clivée, au moins pour l'injection reste illusoire. Le passage via une seconde structure d'adaptation de mode semble inévitable.

Il ressort par ailleurs que les outils de modélisation utilisés sont tout à fait aptes à modéliser ces structures. La faible dimensionnalité de ces dernières nécessite néanmoins des maillages très fins, et comme on a pu le voir, les structures (au moins actives) restent néanmoins de longueur importante, il en résulte des capacités et des durées de calcul importantes.

Le deuxième chapitre est consacré à la réalisation et la caractérisation des structures passives pouvant intervenir dans la réalisation d'une matrice de commutation: guides droits, guides courbes et jonctions Y. Un procédé de fabrication simple a été mis au point, il est basé sur l'utilisation d'un masque unique en résine épaisse HSQ amenant à l'obtention de motifs microniques. Ce masque de résine résiste à la gravure relativement agressive car longue des microguides. L'étape de gravure a, elle aussi, nécessité une mise au point importante: nous avons développé un procédé de type RIE-ICP amenant à l'obtention de profils verticaux et d'une faible rugosité. Rappelons que la mise au point de ce procédé a été menée sur un équipement de gravure acquis lors de ma période de doctorat au laboratoire et que la réalisation de ces structures microguides en constituait la réelle première utilisation en technologie InP. La profondeur de gravure est tolérante quant aux performances de guidage lié au fort confinement des structures. Une sous-gravure va néanmoins avoir tendance à augmenter les fuites vers le substrat et donc les pertes de propagation. Une sur-gravure n'affecte en rien les performances du système (effet inverse de celui mentionné pour une sous-gravure), par contre elle contribue à augmenter la fragilité du composant et peut poser des problèmes de tenue du masque en résine HSQ.

Différentes géométries de structures passives ont ainsi été obtenues. Nous avons mesuré, dans des conditions favorables de guidage (mode TM), des pertes de propagation inférieures à 1dB/mm pour des guides de largeur 1 μ m. Nous avons également mesuré des pertes en excès dues à la présence d'une courbure inférieures à 2dB sur des jonctions d'angles inférieures à 20°. Enfin, nous avons mesuré des pertes en excès inférieures à 1dB/90° pour des rayons de courbures supérieurs à 30 μ m. En optique intégrée traditionnelle, les angles des jonctions Y sont limités à quelques degrés, les rayons de courbures sont de l'ordre du millimètre et les changements de direction sont doux (de l'ordre de la dizaine de degrés) afin de minimiser les pertes. Un des atouts de la technologie microguide est donc, pour un niveau de perte équivalent, la possibilité de réduire fortement les dimensions: nous allons pouvoir considérer des jonctions présentant des angles de quelques degrés et, surtout, considérer des

changements de direction brutaux à 90° (avec des rayons de courbure de l'ordre de la centaine de microns) qui permettront un gain de place considérable.

Le troisième chapitre est consacré à la réalisation et à la caractérisation des structures de commutation. Nous avons notamment développé un procédé de report de contact sur nos guides à haut rapport d'aspect. La caractérisation des premières structures de commutation montre de faibles performances puisque nous ne mesurons sur une jonction simple qu'une diaphotie de l'ordre de -7dB. Cette faible performance est attribuée aux pertes linéiques de propagation qui restent importantes et qui sont notamment liées à la rugosité des faces gravées du microguide, rugosité qui est amplifiée par le procédé de retrait (RIE) des couches dopées p+ servant à la reprise des contacts. Par ailleurs, des problèmes ont été observés lors du clivage. Nous proposons alors une amélioration du procédé de fabrication des structures actives. L'épaisseur des couches dopées P est diminuée de moitié et conjointement le temps de gravure RIE, gravure à l'origine d'une augmentation des rugosités de surface. Nous avons également placé des plots de renforcement au niveau des zones de clivage. Nous sommes alors en mesure de caractériser des structures complètes de commutateur (2 jonctions). Nous constatons des résultats bien meilleurs. En effet, nous mesurons une diaphotie de -20dB pour un courant total de 100mA sur un commutateur à deux jonctions (50mA par jonction) réalisé sur des microguides de largeur $1\mu\text{m}$ présentant une longueur d'électrode de $800\mu\text{m}$ et un écart inter-électrode de $1\mu\text{m}$.

Maintenant, nous pouvons essayer de comparer globalement les résultats obtenus sur cette première étude de réalisation d'un commutateur en micro-optique à ceux résultant des études, sur ce type de composant en optique intégrée classique, effectuées au laboratoire depuis maintenant plus de 10 ans (la première thèse sur le sujet a commencé en 1995). L'obtention d'une faible diaphotie ne semble pas pouvoir être obtenue avec une simple jonction: le fort confinement rend délicat le compromis diaphotie-pertes et quand celui pourrait être obtenu, une forte sensibilité aux dimensions l'est aussi; l'utilisation de deux jonctions en série permet d'obtenir des résultats intéressants. Une optimisation des zones de commutation⁴, au vu des résultats obtenus ici, devrait pouvoir permettre d'obtenir une diaphotie équivalente à celle des commutateurs "classiques". Néanmoins, au moins en ce qui

⁴ Rappelons que dans ce travail, nous nous sommes efforcés d'obtenir des topologies de zones de commutation et d'injection/récupération de lumière "simples" afin de minimiser les problèmes lors de la retranscription technologique des structures modélisées; le but principal étant de valider la fonctionnalité ainsi que, via les résultats expérimentaux, l'adéquation des outils de modélisations.

Conclusion générale

concerne les parties actives, aucun gain appréciable ni en longueur de composant ni en courant de commande n'est franchement mis en évidence, phénomène également lié à l'utilisation de deux jonctions. Toutefois, le principal atout de la technologie des composants microguides réside dans le faible encombrement des structures passives. En effet, des courbures de très faible rayon ($100\mu\text{m}$) à 90° ou même 180° vont pouvoir être utilisées et permettent d'envisager des matrices de commutation par repliement de la topologie (Figure 1). Rappelons qu'en optique intégrée classique, la partie passive de reconstruction du faisceau occupait plus de la moitié de l'espace d'une matrice 4×4 (Figure 2)! De plus, dans cet exemple, l'écartement des guides de sortie ne permet pas un fibrage direct par un ruban. La technologie microguide, grâce à son fort confinement latéral, pourrait donc présenter, à fonctionnalité équivalente (voire supérieure puisque le fibrage en sortie par un ruban pourrait directement être fait), un gain en surface compris entre 2 et 10 par rapport à l'optique intégrée classique.

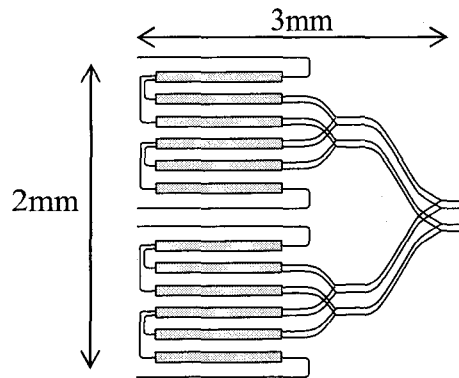


Figure 1: Schéma d'une matrice 4x4 en technologie microguide

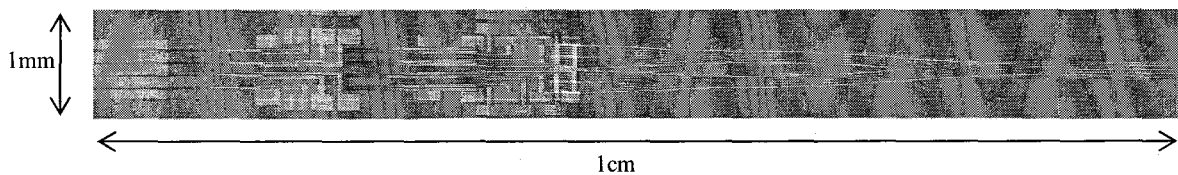


Figure 2: Matrice 4x4 en optique intégrée traditionnelle

Au niveau de la fabrication, la rugosité des flancs des guides reste la principale source de pertes de cette technologie. Toute amélioration sensible de celles-ci passera indubitablement par l'obtention d'une faible rugosité de surface. Dans notre procédé, cette rugosité est aggravée par l'étape de gravure RIE (minimisée dans le second run) nécessaire à la séparation électrique des électrodes. Comme mentionné dans le mémoire, une redéfinition de la succession des étapes pourrait éventuellement répondre à ce besoin mais aurait nécessité une refonte totale du processus de fabrication incompatible avec les échéances temporelles.

Néanmoins, si tant est que la profondeur de gravure soit suffisante, les performances sont très tolérantes vis-à-vis de la profondeur de gravure des guides qui est en fait la seule étape de définition des structures. Le procédé de report des électrodes a été validé sur des topologies et reliefs très différents, son adaptation à toute nouvelle structuration ne semble pas poser de problèmes particuliers.

La technologie microguide a, en outre, été utilisée pour la fabrication de deux types de filtre optique, ce qui fait l'objet du dernier chapitre. Les premiers sont des résonateurs à micro-anneau ou micro-disque. Nous proposons la caractérisation de ces différents filtres. De plus, nous avons démontré l'accordabilité «tout-optique» des résonances du disque en l'irradiant avec un faisceau laser infrarouge à 980nm. Nous avons ainsi une variation d'indice effectif de -6.10^{-3} ; nous avons montré que ce résultat était dû aux porteurs photogénérés, et non à un effet thermique. Le temps de réponse est estimé inférieur à 4 μ s. Des dispositifs ont été fabriqués, basés sur le procédé technologique d'élaboration des commutateurs, afin d'accorder électriquement les résonances d'une structure à disque; nous voyons en effet que la variation d'indice nécessaire est compatible avec celle évaluée expérimentalement sur les structures de commutation.

Outre ces résonateurs circulaires, nous avons étudié un nouveau système de filtre de type stub. L'avantage majeur de ce type de structure est la compacité, puisque les dimensions des stubs dans notre cas avoisinent le micron. Pour obtenir des résonances profondes avec un facteur de qualité important, il est nécessaire de métalliser les parois du stub, un procédé de dépôt métallique spécifique a été développé.

Si tant est que l'on considère une application à longueur d'onde fixe, la variation de la fréquence de résonance peut s'avoisiner à une fonction de commutation, ces structures sont alors potentiellement intéressantes pour réaliser un commutateur optique. Néanmoins, les caractérisations effectuées montrent une très grande sensibilité dimensionnelle des performances:

1) l'obtention d'un facteur de qualité élevé (donc d'une diaphotie équivalente si l'on considère la fonction de commutation) nécessite un couplage par ondes évanescentes entre le guide et la structure résonante, le gap doit alors être défini très précisément et sur toute la hauteur du microguide,

2) la précision de la longueur d'onde de résonance, et ceci est particulièrement vrai pour les structures à stubs, est elle aussi très sujette à la précision de définition des structures. C'est certainement le prix à payer entre compacité et performances.

Annexe 1

Principe de la gravure RIE-ICP (Reactive Ion Etching – Inductively Coupled Plasma)

La gravure RIE-ICP [1] ou gravure ionique réactive est la combinaison de deux types de gravure : la gravure réactive qui constitue la composante chimique et la gravure ionique qui constitue la composante physique. Nous expliquons ici le procédé de gravure dans le cas particulier de l'InP et de son composé InGaAsP.

La composante chimique

Le substrat est placé dans une enceinte contenant des gaz réactifs sous forme de plasma dont les espèces chimiques réagissent avec l'InP ou son composé pour donner un produit de réaction. La condition pour qu'il y ait gravure du matériau est que le produit de réaction soit volatil aux conditions de température et de pression de travail et désorbe spontanément de la surface vers la phase gazeuse pour être éliminé par le système de pompage connecté à l'enceinte. On parle ici de gravure réactive ou spontanée.

Dans le cas de la gravure de l'InP, la vitesse de gravure est relativement lente et la gravure est isotrope. De plus, ce type de gravure est dédié à un type de matériau et est donc sélectif. Cette technique seule ne pourra donc pas être utilisée pour la réalisation de nos structures. En effet la verticalité des flancs de gravure est un point essentiel sur les performances des microguides.

La composante physique

Une autre méthode de gravure des matériaux est le bombardement ionique : un flux de particules accélérées entre en collision avec les atomes de la surface et produit des collisions en cascade. Certains atomes gagnent alors assez d'énergie pour quitter la surface du substrat ; on parle de pulvérisation physique par impact ionique. La vitesse de gravure est relativement faible. Ce procédé est peu sélectif mais anisotrope.

Ainsi, la vitesse de gravure et l'anisotropie obtenues par gravure chimique peuvent être nettement améliorées lorsque la surface à graver est soumise à un flux d'ions qui constitue la composante physique de la gravure.

Combinaison des deux composantes physique et chimique.

La combinaison des deux composantes est plus efficace. En effet, le bombardement ionique favorise la dissociation d'une molécule absorbée, moyennant l'apport d'énergie. Il facilite également la désorption en phase gazeuse des produits de réaction. On parle ici de gravure RIE pour Reactive Ion Etching. Ce procédé permet d'obtenir des vitesses de gravure plus élevées.

Dans le cas d'une gravure RIE simple, le plasma est créé par la polarisation du porte substrat, sur lequel l'échantillon à graver est placé. Le champ électrique créé permet de diriger les ions vers l'échantillon avec suffisamment d'énergie pour que ceux-ci viennent percuter les atomes et les retirer du matériau. Aux pressions classiques de travail (quelques millitorrs), la réaction chimique n'intervient que très peu ; ce mécanisme est très physique. Une vue schématique de la chambre de gravure RIE est donnée en Figure 1. En raison de l'inhomogénéité des lignes de champ, cette gravure peut introduire certains défauts tels qu'un problème de verticalité ou un différentiel de vitesse de gravure entre les différents matériaux.

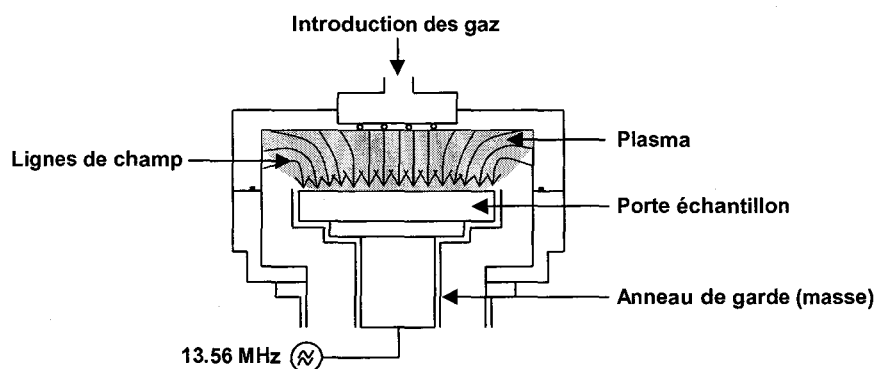


Figure 1 : Vue schématique de la chambre de gravure RIE

Dans le cas de la gravure mixte RIE-ICP [2], le plasma d'ions créé est délocalisé du porte substrat. Le champ magnétique permet une meilleure dissociation des espèces chimiques, on parle alors de plasma dense. La vitesse de gravure des matériaux est alors améliorée. De plus, de par la géométrie de la chambre, les ions suivent une trajectoire plus rectiligne, offrant ainsi une meilleure verticalité des flancs de gravure. Toutefois, afin de ne pas avoir une gravure trop chimique (isotropie), il convient de contrôler le taux de

dissociation des espèces chimiques (densité du plasma). Une vue schématique de la chambre de gravure RIE-ICP est donnée en Figure 2.

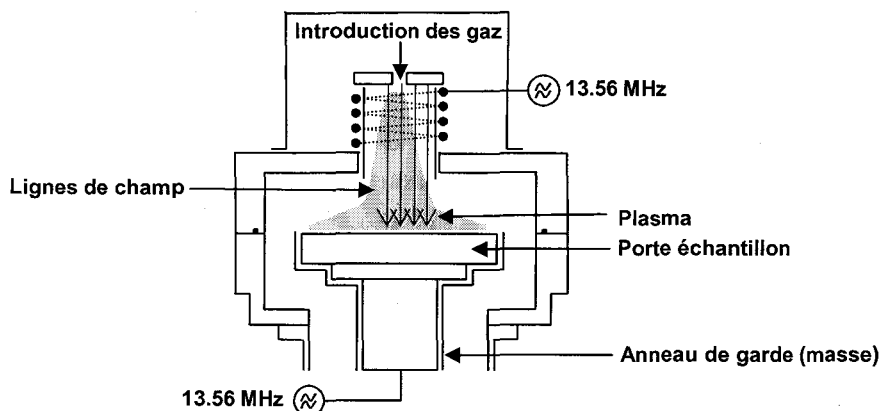


Figure 2 : Vue schématique de la chambre de gravure RIE-ICP

Conclusion : Le mécanisme de gravure RIE-ICP résulte de la combinaison d'une gravure chimique par des espèces réactives (composante chimique) et d'une pulvérisation physique due à un bombardement ionique (composante physique). De cet équilibre entre les deux composantes, physique et chimique, dépendra la verticalité et la faible rugosité des structures.

Les paramètres de gravure

Les composantes physique et chimique interviennent sur le profil de gravure.

La composante physique va influencer la verticalité et la qualité des flancs de gravure. La composante chimique (choix des gaz) va influencer le différentiel de vitesse de gravure de l'InP par rapport à son composé [3]. Leur combinaison intervient pour régler la vitesse de gravure.

Différents paramètres sont ajustables, ceux-ci déterminent l'orientation physique ou chimique de la gravure. Les différents paramètres d'opération sont : le débit des gaz, la puissance RIE, la puissance ICP, la pression de travail et le temps de gravure. Ce sont ces paramètres qu'il faudra optimiser au regard du procédé de gravure désiré.

Annexe 2

Principe des méthodes de caractérisation utilisées

A. L'analyse en champ proche

La topologie du banc de caractérisation en champ proche sera présentée ultérieurement.

La méthode d'analyse en champ proche se fait à l'aide d'une caméra infrarouge. Elle permet de visualiser sur un écran les faisceaux optiques en sortie des guides. Cette méthode de mesure permet d'obtenir rapidement un résultat qualitatif quant aux propriétés de guidage des structures.

B. La méthode Pérot Fabry

Une première évaluation des performances des guides optiques consiste à en mesurer les pertes de propagation. Pour cela, nous utilisons la méthode de mesure par résonance Pérot Fabry [4].

Le guide optique est assimilé à une cavité Pérot Fabry et la méthode de mesure est basée sur l'étude des interférences dans cette cavité. La mise en évidence de l'interférence s'effectue en modifiant la longueur du chemin optique par changement d'un paramètre (température, longueur d'onde...). La mesure permet d'obtenir les pertes de propagation sans tenir compte de la valeur absolue de la puissance injectée à l'entrée du guide [5]. Cette méthode permet donc de s'affranchir de l'efficacité de l'injection, nous la préférons donc à la méthode fibre à fibre pour la mesure des pertes de propagation.

Pour chaque guide, nous faisons varier la longueur d'onde autour de la longueur d'onde de fonctionnement (ici 1550nm). Les pertes de propagation (en dB/mm) sont alors données par la relation (1), où L est la longueur du guide (ou de la cavité) en millimètres, R le

coefficient de réflexion (0,3) et t le contraste de puissance $\frac{P_{\max}}{P_{\min}}$.

$$Pertes (dB/mm) = \frac{10}{L} \log \left(\frac{1}{R} \left(\frac{\sqrt{t} + 1}{\sqrt{t} - 1} \right) \right) \quad (1)$$

C. La méthode fibre à fibre

La puissance lumineuse en sortie des guides est déterminée à l'aide d'un mesureur de puissance optique. Pour un guide, la diminution de puissance lumineuse, après une propagation entre z_0 et $z = z_0 + dz$ est proportionnelle à la puissance $P_0 = P(z_0)$ et à la distance parcourue, soit $P(z) = P_0 \exp(-\alpha dz)$ avec α le coefficient d'absorption. Les pertes en dB sont alors données par la relation (2).

$$Pertes (dB) = -10 \log_{10} \frac{P}{P_0} \quad (2)$$

Nous utiliserons principalement cette méthode pour les mesures des pertes en excès dans les jonctions Y et dans les guides courbes. Pour la mesure des pertes de propagation dans les guides droits, nous préférons utiliser la méthode Pérot Fabry.

Description du banc de mesure

Un laser émet un signal lumineux à la longueur d'onde $\lambda = 1550\text{nm}$. En entrée de la structure, l'injection de la lumière se fait via une fibre lentillée. En sortie des structures, un objectif (x 40) est placé dans l'axe de la caméra et des structures (guides). La caméra est reliée à un système d'acquisition informatique permettant de visualiser le champ proche en sortie des structures. Afin d'obtenir un alignement précis de la fibre et du guide, la fibre optique d'entrée est placée sur micro déplacements à trois axes linéaires et l'échantillon à tester est placé sur un positionneur quatre axes (1 axe linéaire et 3 axes angulaires). Un polariseur permet d'orienter la polarisation du faisceau incident. Le banc de mesure en champ proche est schématisé Figure 3.

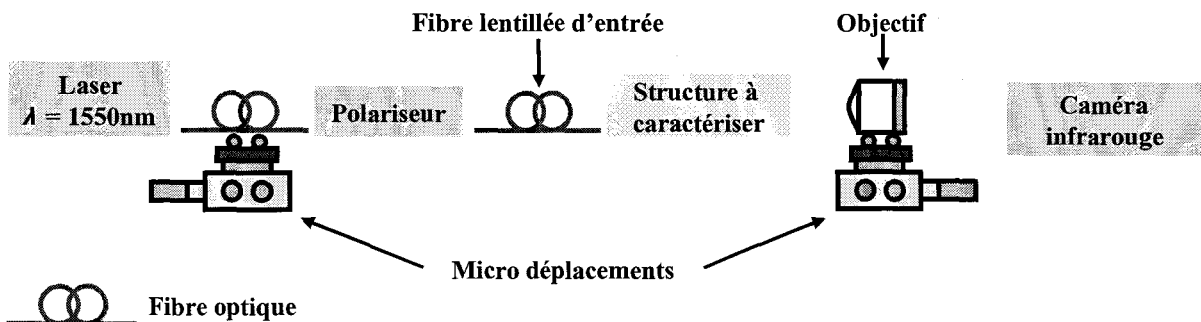


Figure 3 : schéma du banc de mesure en champ proche

Pour les mesures Pérot-Fabry, le banc de mesure utilisé est identique à celui présenté ci-dessus, l'objectif placé en sortie des guides est alors remplacé par une fibre clivée. La puissance optique sortant des guides est couplée à cette fibre et mesurée à l'aide d'un mesureur

de puissance optique. La fibre de sortie est également placée sur micro déplacements piézo-électriques à trois axes linéaires.

- [1] C. Cardinaud, M.C Peignon, P.Y Tessier
Applied Surface Science, 2000, n°164, pp72-83
"Plasma etching: principles, mechanisms, application to micro-and nano-technologies"

- [2] J.W Lee, E.S Lambers, C.R Abernathy, S.J Pearton, R.J Shul, F. Ren, W.S Hobson, C. Constantine
Materials Science in Semiconductor Processing 1, 1998, pp65-73
"Inductively coupled plasma etching of III-V semiconductors in Cl₂-based chemistries"

- [3] Y.B Hahn, D.C Hays, H. Cho, K.B Jung, C.R Abernathy, S.J Pearton, R.J Shul
Applied Surface Science, 1999, n°147, pp215-221
"Effect of inert gas additive species on Cl₂ high density plasma etching of compound semiconductors. Part II. InP, InSb, InGaP and InGaAs"

- [4] R.G Walker
Electronic Letters, 1985, Vol 21, n°13, pp 581-583
"Simple and accurate loss measurements technique for semiconductor optical waveguides"

- [5] T. Feuchter and C. Thirstrup
IEEE Photonics Technology Letters, 1994, Vol 6, n°10, pp 1244-1247
"High precision planar waveguide propagation loss measurement technique using a Fabry Perot Cavity"

Parcours universitaire

2007-2008 **Attachée Temporaire d'Enseignement et de Recherche**

Université des Sciences et Technologies de Lille, Villeneuve d'Ascq

Service prévisionnel:

- Cours et travaux dirigés de mise à niveau en Mathématiques (Licence 3, 9 heures cours et 9 heures TD)
- Travaux pratiques en électronique analogique (Licence 1, 36 heures TP ; licence 2, 20 heures TP ; licence 5, 36 heures TP)
- Travaux pratiques en théorie du signal (Licence 5, 13 heures TP)
- Travaux pratiques en traitement de signal (Master 1, 20 heures TP)
- Travaux dirigés et pratiques en électronique numérique (Ecole d'ingénieurs Telecom Lille 1, 12 heures TD, 24 heures TP)

Thématique de recherche

Institut d'Electronique de Microélectronique et de Nanotechnologie (IEMN),
UMR CNRS-8520, Villeneuve d'Ascq, France

Poursuite des travaux sur la microphotonique sur InP, sujet de mon doctorat

2004-2007 **Thèse d'Electronique spécialité Microondes et Microtechnologies
(soutien MESR)**

Institut d'Electronique de Microélectronique et de Nanotechnologie (IEMN),
UMR CNRS-8520, Villeneuve d'Ascq, France

"Fonctionnalités actives en optique intégrée à base de fils optiques en
filière InP: application à la commutation optique"

Vacataire à Polytech'Lille (Ecole d'ingénieurs)

Université des Sciences et Technologies de Lille, Villeneuve d'Ascq

- Travaux dirigés de mise à niveau en électronique (20 heures TD)
- Travaux pratiques en électronique analogique (100 heures TP)
- Travaux pratiques de traitement du signal (30 heures TP)

Vacataire à Telecom Lille1 (Ecole d'ingénieurs)

Université des Sciences et Technologies de Lille, Villeneuve d'Ascq

- Travaux dirigés et pratiques en électronique numérique (9 heures TD, 45 heures TP)

2003-2004 **DEA spécialité Microondes et Microtechnologies,**

Université des Sciences et Technologies de Lille (USTL), Villeneuve d'Ascq

Composants microondes, composants optiques, matériaux, antennes, microsystèmes, télécommunications

Stage à l'Institut d'Electronique de Microélectronique et de Nanotechnologies dans le groupe Optoélectronique : « Etude de nouvelles structures d'électrodes pour modulateurs électro-optiques sur matériau polymère »

2001-2004 **Ingénieur Polytech'Lille, département Informatique, Microélectronique et Automatique (IMA), Villeneuve d'Ascq**

Electronique, microélectronique, télécommunications, électronique de puissance, automatique, informatique technique, réseaux.

Stage de deuxième année : Française de Mécanique, Douvrin, France

Stage de première année : Institut d'Electronique de Microélectronique et de Nanotechnologie, cellule de valorisation IEMN transfert, Villeneuve d'Ascq

Liste des publications et rapports de contrat

Revues internationales avec comité de lecture

M. Beaugeois, **M. Leseq**, S. Maricot, B. Pinchemel, M. Bouazaoui, J-P. Vilcot
"All-optical tunability of InGaAsP-InP microdisk resonator by infrared light irradiation"
Optics Letters, 2007, Vol. 32, Issue 1, pp. 35-37

M. Leseq, M. Beaugeois, S. Maricot, J-P. Vilcot, M. Beaugeois
"Passive photonic components using InP optical wire technology"
IET Optoelectronics, à paraître

M. Leseq, S. Maricot, J-P. Vilcot, M. Beaugeois
"First optical switch using InP optical wire technology and electrical control"
Optics Letters, en soumission

Congrès nationaux avec comité de lecture et actes

M. Leseq, S. Maricot, C. Legrand, M. François, M. Muller, J-P. Vilcot
"Commutateur optique en technologie microguide sur InP"
Journées Nationales d'Optique Guidée (JNOG), Metz, France, 7-9 Novembre 2006

M. Beaugeois, **M. Leseq**, S. Maricot, B. Pinchemel, M. Bouazaoui, J-P. Vilcot
"Accordabilité spectrale d'un microdisque InP-InGaAsP par irradiation laser infrarouge"
Journées Nationales d'Optique Guidée (JNOG), Metz, France, 7-9 Novembre 2006

Congrès internationaux avec comité de lecture et actes

M. Leseq, S. Maricot, J-P. Vilcot
"Passive photonic components using InP optical wire technology for nano optics based optical switches and matrices"
1st ISIS Workshop, Boppard am Rhein, Germany, 29 Mai-1 Juin 2006

M. Leseq, S. Maricot, C. Legrand, M. François, M. Muller, C. Boyaval, J-P. Vilcot

"Optical switch using InP optical wire technology"

SPIE Europe, Microtechnologies for the New Millennium 2007, Maspalomas, Gran Canaria, Spain, 2-4 Mai 2007

Communications sans actes

M. Leseq, J-P. Vilcot, S. Maricot

"Composants photoniques passifs en technologie microguide sur InP"

Club Optique et Microondes, Rouen, France, 24 Mars 2006

M. Leseq, S. Maricot, J-P. Vilcot

"Composants photoniques passifs en technologie microguide sur InP : conception, fabrication et caractérisation"

11èmes Journées Nano-Micro Electronique et Optoélectronique (JNMO), Aussois, France, 4-7 Avril 2006

M. Leseq, S. Maricot, J-P. Vilcot

"Passive photonic components using InP optical wire technology: design, fabrication and characterization"

Semiconductor and Integrated Optoelectronics Conference (SIOE), Cardiff, UK, 10-12 Avril 2006

M. Leseq, J-P Vilcot, S. Maricot, M. François, C. Legrand, F. Mollot

"Optical switching: towards nanophotonics"

1st France-Singapore Optical Switching Seminar, Singapour, Singapore, 27-29 Novembre 2006

M. Leseq, S. Maricot, M. Beaugeois, C. Legrand, M. François, M. Muller, J-P. Vilcot

"Commutateur optique en technologie microguide sur InP"

Telecom 2007 et 5^{ème} JFMMA, Fes, Maroc, 14-16 Mars 2007

M. Beaugeois, **M. Leseq**, S. Maricot, B. Pinchemel, M. Bouazaoui, J-P. Vilcot

« Filtrage et démultiplexage en longueur d'onde dans les structures microguides InP-InGaAsP »

Telecom 2007 et 5^{ème} JFMMA, Fes, Maroc, 14-16 Mars 2007

M. Beaugeois, **M. Leseq**, S. Maricot, B. Pinchemel, M. Bouazaoui, J-P. Vilcot

« Filtrage et démultiplexage en longueur d'onde dans les structures microguides InP-InGaAsP »

Journées nationales du Réseau Doctoral en Microélectronique, Lille, France, 14-16 Mai 2007

Articles de vulgarisation

M. Beaugeois, **M. Leseq**, S. Maricot, B. Pinchemel, M. Bouazaoui, J-P. Vilcot

« Microdisk resonance is tuned with optical signal – Photoinduced free carriers change refractive index on InP microdisk »

Photonic Spectra, Février 2007

Rapports de contrat



Participation à la rédaction des :

- Rapports semestriels (à partir de décembre 2004) d'avancement du projet interreg européen PREMIO (Pôle de REcherche en MIcro Optique). Début du projet : janvier 2004 ; fin du projet : décembre 2007.

- Rapports semestriels (à partir de février 2005) d'avancement du projet exploratoire (convention 02 60 65 092) pour la DGA sur la commutation optique à haute diaphotie. Début du projet : septembre 2003 ; fin du projet : septembre 2006