



HAL
open science

Conception, fabrication et caractérisation de structures de guidage en optique intégrée pour le domaine du visible

Régis Robles

► **To cite this version:**

Régis Robles. Conception, fabrication et caractérisation de structures de guidage en optique intégrée pour le domaine du visible. Electronique. Université de Bordeaux; Université de Sherbrooke (Québec, Canada), 2022. Français. NNT : 2022BORD0154 . tel-04428851

HAL Id: tel-04428851

<https://theses.hal.science/tel-04428851>

Submitted on 31 Jan 2024

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

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

THÈSE EN COTUTELLE PRÉSENTÉE

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR DE

L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX

ET DE L'UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

ÉCOLE DOCTORALE Sciences pour l'Ingénieur (SPI) – Université de Bordeaux

Faculté de Génie – Université de Sherbrooke

SPÉCIALITÉ PHOTONIQUE/GÉNIE ÉLECTRIQUE

Par Régis ROBLES

**CONCEPTION, FABRICATION ET CARACTÉRISATION DE
STRUCTURES DE GUIDAGE EN OPTIQUE INTÉGRÉE POUR LE
DOMAINE DU VISIBLE**

Sous la direction de M. Laurent BECHOU et Paul G. CHARETTE

Soutenue le 28 Avril 2022 à Bordeaux

Membres du jury :

Maria-Pilar BERNAL

Directrice de Recherche CNRS

Institut FEMTO-ST

Université de Franche-Comté

Monique THUAL

Professeur / *Rapporteur*

Institut FOTON

Université de Rennes 1

Véronique BARDINAL-DELAGNES

Directrice de Recherche / *Rapporteur*

LAAS – CNRS

Université de Toulouse III Paul Sabatier

Paul G. CHARETTE

Professeur / *Examineur*

LN2/3IT, Université de Sherbrooke

Laurent BECHOU

Professeur / *Examineur*

Laboratoire IMS

Université de Bordeaux

Simon JOLY

Maître de conférences / *Examineur*

Laboratoire IMS

Université de Bordeaux

Denis BARBIER

Docteur / *Examineur*

Société Teem Photonics

Meylan-Grenoble

Abdelatif JAOUAD

Professeur associé / *Invité*

LN2/3IT, Université de

Sherbrooke

Julien SYLVESTRE

Professeur / *Invité*

LN2/3IT, Université de

Sherbrooke

Titre : Conception, fabrication et caractérisation de structures de guidage en optique intégrée pour le domaine du visible

Résumé : Depuis de nombreuses années, l'intégration monolithique sur puce a permis de fortement miniaturiser et transformer les systèmes optiques "sur table" en circuits photoniques, tout en améliorant leurs performances, en garantissant leur fiabilité opérationnelle et en réduisant les coûts de fabrication.

A ce jour, les applications visées adressent massivement le domaine des télécommunications et notamment les transmissions à très haut débit. Cependant, à mesure que la technologie évolue sur ces marchés, des applications émergentes apparaissent dans des domaines à très fort potentiel comme la santé, la détection, les systèmes LIDAR ou encore l'imagerie.

Par les résultats obtenus, cette thèse ambitionne de participer à cette évolution technologique en utilisant un matériau transparent dans le visible (SiON) et compatible avec les technologies de fabrication déjà existantes, pour une application d'imagerie haute résolution appelée synthèse d'ouverture et fonctionnant dans le domaine du visible. Cette dernière consiste en la mise en interférence de signaux sources afin de reconstruire l'image d'un objet. Une telle technique a la capacité d'atteindre des résolutions aussi élevées que des dispositifs très encombrants déployés pour l'astrophysique dans le domaine de l'IR, et doit pouvoir bénéficier des avantages de la miniaturisation offerte par les techniques actuelles de fabrication de la microélectronique.

Toutefois, un tel projet de recherche impose de lever des verrous en termes de conception et de fabrication de briques de base (guides optiques et coupleur MMI) pour obtenir des performances compatibles avec les exigences imposées par un système complet d'imagerie opérant sur le principe de la synthèse d'ouverture.

Les travaux exposés dans cette thèse, qui s'inscrivent dans ce projet de recherche, portent principalement sur la modélisation des structures réalisées qui ont permis d'optimiser leur design final, la mise au point des procédés technologiques de leur fabrication (dépôt, lithographie, gravure plasma), et l'analyse des performances obtenues à partir de caractérisations dédiées.

Mots clés : Matériaux diélectriques, Optique intégrée, Photonique, Guides d'onde, Coupleurs, Fabrication, Caractérisation, Synthèse d'ouverture.

Title : Design, fabrication and characterization of waveguiding structures using integrated optics for the visible range

Abstract : Since many years, monolithic on-chip integration has made it possible to strongly miniaturize and convert "Lab-made" optical systems into photonic circuits, while improving their performance, guaranteeing their operating reliability as well as reducing manufacturing costs.

Nowadays, the targeted applications have massively focused on the field of telecommunications and particularly for high-rate data transmissions. However, as technology evolves in these markets, new emerging applications appear in high potential areas such as healthcare, sensing, LIDAR systems and imaging.

From obtained results, this thesis aims to participate to this technological evolution by using a transparent material in the visible range (SiON) and compatible with already existing fabrication technologies, for an application of high resolution imaging called aperture synthesis and operating in the visible range. The latter consists in the interference of source signals in order to reconstruct the image of an object. Such a technique enables to reach resolution as high as very sophisticated systems deployed for astrophysics in the IR range, and must benefit from the advantages of the miniaturization offered by the techniques currently used in microelectronics.

However, this project requires to overcome challenges regarding design and fabrication of building blocks (optical waveguides and MMI couplers) to obtain performance compatible with the requirements imposed by a complete aperture synthesis imaging system.

These PhD works, developed in the framework of this large project, mainly report on the modeling of the addressed structures which made it possible to optimize their final design, the optimization of the technological processes for their fabrication (deposition, lithography, plasma etching), and finally the analysis of performance obtained from dedicated characterizations.

Keywords : Dielectric materials, Integrated optics, Photonics, Waveguides, Couplers, Fabrication, Characterization,, Aperture synthesis.

Unité de recherche

[Unité Mixte de Recherche n°5218 Laboratoire de l'Intégration du Matériau au Système,

International Research Laboratory n°3463 Laboratoire Nanotechnologies et Nanosystèmes]

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION.....	1
Généralités	1
Mise en contexte du projet.....	2
Plan du document	4
CHAPITRE 1 : ÉTAT DE L'ART	7
1.1 État de l'art : photonique sur silicium	8
1.1.1 Contexte d'étude	8
1.1.2 Photonique sur silicium : généralités	15
1.2 État de l'art : optique intégrée pour le domaine visible.....	20
1.2.1 Passage de la plateforme SOI à l'utilisation de matériaux diélectriques	20
1.2.2 Plateforme SiO _x N _y	22
1.2.3 Performances de guidage et de division de puissance en optique intégrée du visible et proche infrarouge.....	26
1.3 Conclusion	28
CHAPITRE 2 : MODELISATION DES STRUCTURES PASSIVES : GUIDES D'ONDE ET COUPLEURS A INTERFERENCES MULTIMODES	30
2.1 Brefs rappels théoriques : optique guidée et effet d'auto-imagerie.....	31
2.1.1 Notions de réflexion totale et d'angle d'acceptance dans un guide d'onde	31
2.1.2 Équation de propagation – Notion de fréquence de coupure d'un guide d'onde.....	36
2.1.3 Pertes optiques dans les guides d'onde	46
2.1.4 Principe de l'auto-imagerie pour la modélisation d'un coupleur à interférences multimodes.....	51
2.2 Modélisation des structures de guidage.....	58
2.2.1 Contraintes de simulation pour les guides d'onde monomode enterrés à base de SiO _x N _y	58
2.2.2 Définition du modèle dans l'environnement de simulation	59
2.2.3 Dimensionnement des guides d'ondes monomode sur une large plage spectrale d'opération	66
2.2.4 Modélisation des coupleurs MMI 50/50	74
2.3 Conclusion	80

CHAPITRE 3 : DESCRIPTION DES ÉTAPES OPTIMISÉES DE FABRICATION DES DISPOSITIFS DE GUIDAGE RETENUS.....	81
3.1 Développement technologique du matériau guidant	82
3.1.1 Revue des principales techniques de dépôt de matériaux : plateforme SOI et matériaux diélectriques	82
3.1.2 Description du protocole de dépôt du SiO_xN_y par PECVD.....	89
3.2 Développement et optimisation du protocole de fabrication des guides et coupleurs MMI par photolithographie large bande UV (220 à 436 nm)	99
3.2.1 Optimisation du procédé de gravure du cœur des guides et coupleurs MMI... 100	
3.2.2 Vérifications dimensionnelles des structures réalisées	110
3.3 Méthodes de réalisation des facettes d'injection	112
3.3.1 Approche mécanique – clivage par pointe diamantée.....	113
3.3.2 Approche mécano-chimique : polissage.....	114
3.3.3 Approche physique : gravure par plasma	119
3.3.4 Comparaison des techniques de fabrication de facette étudiées	126
3.4 Conclusion.....	130
CHAPITRE 4 : CARACTÉRISATION DES PERFORMANCES OPTIQUES DES GUIDES ET DES COUPLEURS MMI.....	132
4.1 Description des bancs de caractérisation	133
4.1.1 Caractéristiques des sources laser émettant dans le visible.....	133
4.1.2 Caractéristiques des composantes d'injection et de collecte.....	138
4.1.3 Méthode d'injection lumineuse	139
4.2 Analyse des données de mesures des performances optiques	148
4.2.1 Configurations des structures mesurées	148
4.2.2 Sources de pertes additionnelles et erreurs potentielles de mesure.....	158
4.2.3 Présentation et analyse des données mesurées sur les guides	164
4.2.4 Performances optiques des coupleurs MMI	173
4.3 Conclusion	178
CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES.....	180
Conclusion générale	180
Perspectives	184
RÉFÉRENCES	188

TABLE DES FIGURES

Figure 1.1 – Vue schématique du principe d'un interféromètre à synthèse d'ouverture idéal... 9	9
Figure 1.2 – Vue schématique du dispositif de combinaison de faisceau développée par Haguener et al [13]. La lumière de deux télescopes est couplée au combineur de faisceaux par des fibres monomode à maintien de polarisation (fibres). Le composant d'optique intégrée se comporte comme un combineur de faisceaux à deux télescopes (sortie interférométrique) après la jonction Y inversée avec deux signaux de calibration extraits avec des jonctions Y (sortie photométrique). 10	10
Figure 1.3 – Vue schématique du montage en espace libre mis en place pour la démonstration de la technique de synthèse d'ouverture à $\lambda = 632,8$ nm issue des travaux de Bravo et al [10]. 12	12
Figure 1.4 – Variation de phase moyenne en fonction du déplacement horizontal d'un point source placé à 1,4 m d'un système de synthèse d'ouverture réalisé en espace libre..... 13	13
Figure 1.5 – Profils d'interférences obtenus à l'aide du montage de synthèse d'ouverture en espace libre (a) d'une diode laser émettant à 633 nm et (b) d'une source de lumière blanche. 13	13
Figure 1.6 – Figure d'alignement des fronts d'onde des deux ouvertures du système de synthèse d'ouverture provenant d'un point source laser à 632,8 nm. 14	14
Figure 1.7 – Prévisions de marché des puces en photonique sur silicium entre 2019 et 2026, basées sur l'étude de « Silicon Photonics Report - Yole Développement » [21]..... 15	15
Figure 1.8 – Vue schématique (modifiée) présentant les structures passives et actives issues de la plateforme en photonique sur silicium 30 GHz disponible à l'IME (« Institute of MicroElectronics ») extraite d'un travail d'étude de [23]. 16	16
Figure 1.9 – Vue schématique de la configuration traverse des guides à ruban et à bande en technologie SOI. 17	17
Figure 1.10 – Vues (modifiées) d'un commutateur intégrée basé sur un interféromètre Mach-Zehnder (MZI) réalisé sur plateforme photonique sur silicium (a) en microscopie optique et (b) en microscopie électronique (MEB), extraites de [24]. 18	18
Figure 1.11 – Vue schématique simplifiée des configurations transverse de deux guides d'onde en Si_3N_4 fabriqués et caractérisés à 633 et 800 nm dans l'étude de Garces et al [27] 20	20
Figure 1.12 – Vue schématique des plages d'utilisation des principaux matériaux utilisés en photonique intégrée sur silicium en fonction de la longueur d'onde et de leurs applications [28].	

[Les définitions d'acronymes sont les suivantes : Ultra-Violet (UV) ; Visible (VIS) ; Proche Infra-Rouge (NIR) ; Moyen Infra-Rouge (MIR) ; Infrarouge Lointain (FIR)].	21
Figure 1.13 – Spectre de transmission UV-visible de couches minces de SiO_xN_y déposées par pulvérisation cathodique réactive [29]. La composition des couches diffèrent par leurs rapports $\text{O}/(\text{O}+\text{N})$ où O et N sont les concentrations atomiques d'oxygène et d'azote, respectivement.	23
Figure 1.14 – Spectre de transmittance UV-visible de couches minces de SiO_2 et SiO_xN_y avec et sans recuit haute température déposées par PECVD [30].	23
Figure 1.15 – Vue (a) schématique de la configuration enterrée et (b) au MEB du cœur des guides d'onde fabriqués en SiO_xN_y par Tzuchizawa et al [32].	24
Figure 1.16 – Vue (a) de la distribution de champ simulé en environnement FIMMPROP et (b) dimension obtenues par analyse dimensionnelle au MEB du coupleur MMI 50/50 conçu et fabriqué par Tsuchozawa et al [32].	25
Figure 1.17 – (a) Vue optique de la structure développée utilisant les guides d'onde, les coupleurs MMI et une nano-photodiode Si. (b) Réponse électrique de cette dernière à une impulsion laser de 2ps à 780 nm.	25
Figure 2.1 – Vue en coupe des deux configurations traditionnelles de guides d'onde. Les régions en couleur sombre correspondent au matériau possédant l'indice de réfraction le plus élevé.	32
Figure 2.2 – Vue schématique du principe de réflexion totale interne dans un guide plan. La propagation de l'onde est matérialisée par deux grandeurs : le vecteur d'onde k_x décrivant le confinement latéral et le vecteur β décrivant la propagation longitudinale.	32
Figure 2.3 – Représentation schématique de la propagation des modes dits Transverse Électrique (TE) et Transverse Magnétique (TM).	33
Figure 2.4 – Illustration de la différence de chemin optique entre les rayons PQ et RS. Pendant la propagation de ces rayons, le front d'onde doit être conservé.	35
Figure 2.5 – Profils des premiers modes TE et TM pour un guide d'onde plan en considérant $n_{\text{cœur}} = 3.35$, $n_{\text{gaine}} = 1$ et $d = 240$ nm pour une longueur d'onde $\lambda = 2.2$ μm . Les dimensions de la couche de cœur sont délimitées par la partie en gris foncé. La discontinuité du champ H_y du mode de propagation TM à l'interface cœur/gaine est signalée en rouge.	42
Figure 2.6 – Vue schématique (coupe transversale) du mécanisme de pertes par diffusion en volume.	47
Figure 2.7 - Vue schématique (coupe transversale) du mécanisme de pertes par diffusion en surface.	47

Figure 2.8 – Vue simplifiée des niveaux d'énergie dans un matériau cristallin semi-conducteur ou isolant présentant la bande de valence d'énergie E_v , la bande de conduction d'énergie E_c et la bande interdite (où « gap » en anglais) d'énergie E_g	49
Figure 2.9 – Vue schématique en vue de dessus d'un guide d'onde enterré à courbure.....	50
Figure 2.10 - Vue schématique en vue de dessus de d'un guide d'onde multimodes à saut d'indice. L'indice de réfraction du cœur est $n_{\text{cœur}}$, l'indice de réfraction de la gaine est n_{gaine} et la largeur du guide multimode est l_{MMI}	52
Figure 2.11 - Profils d'amplitude latéraux normalisés ψ_{uy} des 9 premiers modes guidés dans un guide d'onde multimode. La largeur effective des modes latéraux dans le guide d'onde multimode est notée l_e . Le vecteur de propagation est selon l'axe z	53
Figure 2.12 – Vue schématique d'un guide d'onde multimodes avec un champ d'entrée $\psi_y, 0$. L'image miroir se produit pour $z = 3L_\pi$, l'image directe se produit pour $z = 2(3L_\pi)$ et des images « double » se produisent pour $z = 1/2(3L_\pi)$ et $z = 3/2(3L_\pi)$	55
Figure 2.13 – (a) Vue schématique de la fenêtre de simulation (encadrée en rouge) d'un guide d'onde enterré rectiligne et (b) de la distribution du champ E_x du mode TE_0 d'un guide d'onde rectiligne en vue contour à 633 nm à l'aide du solveur FMM. Le contraste d'indice cœur/gaine est de 0,1.....	61
Figure 2.14 – (a) Vue schématique de la fenêtre de simulation (encadrée en rouge) d'un guide d'onde enterré à courbure et (b) de la distribution du champ E_x du mode TE_0 d'un guide d'onde à courbure ($R = 50 \mu\text{m}$) en vue contour à 633 nm à l'aide du solveur FDM. Le contraste d'indice cœur/gaine est de 0,1.....	62
Figure 2.15 - Effet de la largeur de la demi-fenêtre de simulation sur l'indice effectif des modes TE_0 et TM_0 pour un guide d'onde enterré rectiligne de dimensions 200 x 1000 nm avec un contraste d'indice cœur/gaine égal à 0,1.	63
Figure 2.16 - Effet de la hauteur de la demi-fenêtre de simulation sur l'indice effectif des modes TE_0 et TM_0 pour un guide d'onde enterré rectiligne de dimensions 200 x 1000 nm avec un contraste d'indice cœur/gaine égal à 0,1.	63
Figure 2.17 - Effet de la largeur de la PML sur l'indice effectif des modes TE_0 et TM_0 pour un guide d'onde à courbure de rayon $R=250 \mu\text{m}$	64
Figure 2.18 – Exemple de distributions d'intensité (a) d'un mode « physique » (TE_0) et (b) d'un mode « non physique » à 633 nm dans un guide d'onde d'épaisseur 200 nm, de largeur 1000 nm et dont le contraste d'indice est de $\Delta n_{\text{cœur/gaine}} = 0,1$	64
Figure 2.19 - Distribution d'intensité du mode TE_0 d'un guide d'onde rectiligne à $\lambda = 633 \text{ nm}$ à l'aide du solveur FMM. Le contraste d'indice cœur/gaine est de 0,1. La fenêtre de simulation est délimitée dans l'encadrée en rouge.....	66

Figure 2.20 – Résultats de simulations du nombre de modes de propagation autorisés pour des configurations de contraste d'indice cœur-gaine de $\Delta n = [0,8 : 0,15]$ en fonction la longueur d'onde et la largeur d'un guide d'onde enterré.	67
Figure 2.21 – Effet sur la plage spectrale d'opération monomode en fonction du contraste d'indice de réfraction cœur/gaine pour un guide d'onde rectiligne de largeur $1 \mu\text{m}$ et d'épaisseur 200 nm	69
Figure 2.22 – Distribution d'intensité du mode TE_0 d'un guide d'onde à courbure de rayon $R = 500 \mu\text{m}$ à $\lambda = 633 \text{ nm}$ à l'aide du solveur FDM. Le contraste d'indice cœur/gaine est de $0,1$. La fenêtre de simulation est délimitée dans l'encadrée en rouge.	70
Figure 2.23 – Evolution des pertes par courbure en fonction du rayon de courbure pour 3 configurations de contraste d'indice et pour le mode TE_0	71
Figure 2.24 – Evolution des pertes par courbure en fonction du décalage entre un guide rectiligne et à courbure pour différents rayons de courbure et pour le mode TE_0	71
Figure 2.25 – Distribution de l'intensité du champ électromagnétique au sein d'un coupleur MMI simulé en environnement FIMMPROP.	75
Figure 2.26 – Effet de la longueur de la partie multimodes L_{MMI} du coupleur MMI sur la transmission pour le mode TE_0	76
Figure 2.27 – Effet de la distance de séparation d_{MMI} des guides en biseau de sortie sur la transmission pour le mode TE_0	77
Figure 2.28 – Evolution des pertes de transmission d'un coupleur MMI optimisé en fonction de la longueur d'onde d'opération pour le mode TE_0	78
Figure 3.1 – Vue schématique du procédé d'évaporation par faisceau d'électrons matérialisé en rouge, vaporisant le matériau d'un creuset [58].	83
Figure 3.2 – Vue schématique du procédé de pulvérisation cathodique. Des ions d'argon frappent les atomes de la cible. Les atomes éjectés se déposent ensuite sur le substrat [58]...	85
Figure 3.3 – Vue schématique du procédé de dépôt chimique en phase vapeur. Les molécules de gaz source s'adsorbent et réagissent à la surface pour former un film. Les produits de réaction sont désorbés, diffusés et pompés [58].	86
Figure 3.4 – Vue schématique du principe de fonctionnement de base de la technique de dépôt par PECVD [58].	87
Figure 3.5 – Représentation schématique du principe de mesure par ellipsométrie.	93
Figure 3.6 - Image de l'équipement de mesure utilisé au LN2/3IT (image modifiée de l'appareil extraite de [65]).	93

Figure 3.7 – Graphe de mesure par ellipsométrie spectroscopique pour un angle de 70° d'un échantillon composé d'un substrat de silicium et d'une monocouche de SiO _x N _y fabriqué par PECVD (couche de gaine). Les données expérimentales pour ψ et Δ sont tracées en traits pleins et la concordance avec le modèle de Cauchy en traits discontinus.	96
Figure 3.8 – Graphe de mesure par ellipsométrie spectroscopique pour un angle de 70° d'un échantillon composé d'un substrat de silicium et d'une bicouches de SiO _x N _y fabriqué par PECVD (couche de gaine + cœur). Les données expérimentales pour ψ et Δ sont tracées en traits pleins et la concordance avec le modèle de Cauchy en traits discontinus.	96
Figure 3.9 – Mesure par ellipsométrie spectroscopique pour un angle de 70° d'un échantillon composé d'un substrat de silicium et d'un film de SiO _x N _y fabriqué par PECVD.	97
Figure 3.10 – Représentation schématique des trois positions de mesure par ellipsométrie spectroscopique des couches de SiO _x N _y sur tranches 100 mm fabriquées par PECVD.	98
Figure 3.11 – Vue en coupe (a) d'une tranche après les deux premiers dépôts PECVD et (b) d'un guide d'onde enterré après le procédé de photolithographie (à droite). Les termes e et L correspondent à l'épaisseur et à la largeur du cœur du guide.	99
Figure 3.12 – Vue schématique du procédé d'énrésinement : (a) dépôt de la résine sur le substrat de verre, (b) étalement de la résine et (c) évaporation du solvant par rotation de la tournette.	101
Figure 3.13 – Vue schématique de l'étape de nettoyage au plasma d'oxygène ; la fréquence de la source RF utilisée est égale à 13,56 MHz.	102
Figure 3.14 – Vue schématique de l'étape de traitement de la surface par HMDS en phase gazeuse dans un four d'apprêt dans le but d'améliorer l'adhérence de la résine photosensible sur le substrat de SiO _x N _y . Le temps d'exposition du substrat à la vapeur est de 4 minutes. L'épaisseur de la couche de HMDS est négligeable.	103
Figure 3.15 – Vue schématique de la structure après l'étape d'énrésinement et de recuit des échantillons.	103
Figure 3.16 – Vue schématique de la structure lors de l'exposition de la résine au rayonnement UV à travers le masque en chrome.	105
Figure 3.17 – Vue schématique de la structure après l'étape d'exposition au rayonnement UV. Seules les parties en bleu clair ont été insolées.	105
Figure 3.18 – Vue au microscope optique de la résine AZ MiR 29 cps à un grossissement de 20x (a) et de 50x (b) montrant un reste de produits de la réaction de développement après l'étape de développement utilisant un seul bain de développement . Les lignes horizontales sont des guides d'onde de largeur 1 μ m.	107

Figure 3.19 - Photographie au microscope optique de la résine AZ MiR 29 cps à un grossissement de 50x après l'étape de développement utilisant deux bains de développement	108
Figure 3.20 – Représentation schématique de la structure après l'étape de développement de la résine. Les résidus de résine développés sont enlevés par une étape de plasma oxygène peu puissante.	108
Figure 3.21 – Vue schématique de la structure après l'étape de gravure sèche réalisée par AOE.	109
Figure 3.22 – Vue au MEB de la couche de cœur de deux guides d'onde après l'étape de gravure par AOE avec la résine AZ 1505 (a) d'un défaut observé dans le guide et (b) d'un profil dit « en oreilles ».	111
Figure 3.23 - Vue au MEB de la couche de cœur d'un guide d'onde après l'étape de gravure par AOE avec la résine AZ MiR 701 29cps (a) en coupe et (b) vue de dessus.....	111
Figure 3.24 – Vue schématique de la structure après le dépôt par PECVD de la couche de gaine supérieure.	112
Figure 3.25 – Représentation schématique de la méthode de clivage des échantillons à l'aide d'une pointe diamantée.	113
Figure 3.26 – Vue schématique de la composition et du dimensionnement du profil transverse d'une puce enrobée.....	115
Figure 3.27 – Vue schématique d'un composant de positionnement utilisé dans le cylindre d'enrobage.....	115
Figure 3.28 – Vue schématique d'une puce enrobée dans un bloc de résine dont les découpes des méplats de positionnement horizontal (plan y, z) sont réalisées. Les composants de positionnement ne sont pas représentés par souci de clarté.	116
Figure 3.29 – Vue schématique de la méthode de manipulation des échantillons lors de l'étape de pré-polissage. Les flèches colorées en rouge et noir représentent le déplacement du bloc de résine et du plateau tournant respectivement.	117
Figure 3.30 – Photographie d'un bloc de résine avec une puce enrobée avec les facettes d'injection et de collecte disposant d'un polie de qualité optique.	119
Figure 3.31 – Vue optique d'une tranchée de largeur 200 μm après l'étape de développement de la résine AZ 4903.	121
Figure 3.32 – Vue schématique de la structure à la fin du protocole de photolithographie de la résine AZ 4903.	122

Figure 3.33 – Représentation schématique de la structure à la fin de la gravure sèche par AOE des trois couches de SiO_xN_y	122
Figure 3.34 – Vue schématique de la structure présentant l'étape de gravure à l'aide de SF_6 du premier cycle du procédé Bosch.	124
Figure 3.35 – Vue schématique de la structure présentant l'étape de passivation à l'aide de C_4F_8 du premier cycle du procédé Bosch.	124
Figure 3.36 - Vue schématique de la structure à la fin des 410 cycles de gravure par le procédé Bosch et le nettoyage de l'échantillon par solvants/plasma O_2	126
Figure 3.37 – Photographie au MEB d'un essai de facette par clive mécanique à l'aide d'une pointe diamantée.	127
Figure 3.38 – Vue au MEB d'une facette polie à un grossissement de 15 Kx. Le contraste élevé du cliché permet de voir l'empilement des couches ainsi que la finition du poli-optique.	128
Figure 3.39 – Vue d'une facette polie par observation (a) au microscope optique à un grossissement de 1000x et (b) au MEB à un grossissement de 1620x. Il est clairement mis en évidence un arrachement de la couche guidante de la puce par la résine d'enrobage lors du procédé de polissage mécanique.	128
Figure 3.40 – Vue optique de dessus d'une injection laser à 633 nm à l'aide d'une fibre monomode dans un guide d'onde, dont la facette a été fabriquée par le procédé de polissage mécano-chimique.	129
Figure 3.41 – Photographie au MEB (a) du profil de gravure par le procédé Bosch après 30 cycles et (b) de la rugosité de la facette d'injection/collecte en SiO_xN_y sur un échantillon d'essai.	130
Figure 4.1 – Vue schématique simplifiée du montage expérimental de caractérisation des dispositifs intégrés en configuration de mesure. Une fibre optique est utilisée pour l'injection et placée sur un nanositionneur piézoélectrique 3 axes. La puce et l'objectif de microscope sont placés sur des plateformes 2 / 3 axes, respectivement. La distance de travail de l'objectif de microscope est égale à 9 mm.....	133
Figure 4.2 – (a) Photographie du cristal monolithique utilisant la technologie DPSSL constituant la diode laser à 532,3 nm du laboratoire et (b) la vue d'ensemble schématique avec asservissement contrôlé en température (TEC).....	135
Figure 4.3 – Vue schématique de la diode laser dans son montage fibré à 633 nm. Le faisceau est injecté dans une fibre monomode avec un angle de 8° . Le connecteur de sortie est de type FC/PC.....	136
Figure 4.4 – Vue schématique en coupe d'une diode laser DFB en boîtier « butterfly ».	137

Figure 4.5 – Vue schématique d’un boîtier de type « butterfly ».....	137
Figure 4.6 – Vue schématique de la fibre microlentillée d’injection composée des 2 segments de la compagnie IDIL [72]. Le parcours des rayons lumineux est présenté en rouge.	139
Figure 4.7 – Vue schématique du principe d’action d’une lame $\lambda/2$ sur une polarisation d’entrée linéaire.	140
Figure 4.8 – Vue schématique du montage de caractérisation des dispositifs intégrés en configuration de calibration.	141
Figure 4.9 – Vue schématique du montage de caractérisation des dispositifs intégrés en configuration d’étalonnage de la polarisation d’injection. Dans cet exemple, la polarisation $P \perp$ (TM) est choisie en sortie de la lame demi-onde ($\lambda/2$). La lumière en sortie de cette fibre est imagée par un objectif de microscope de grossissement 20x puis le faisceau résultant est filtré par un cube séparateur de polarisation afin de mesurer les composantes de polarisation principale ($P \perp \perp$) et résiduelle ($P \perp \parallel$).	143
Figure 4.10 – (a) Vue de dessus du plan d’injection entre la fibre microlentillée et un guide d’onde à 633 nm et (b) photographie de la binoculaire d’observation verticale placée au-dessus de la puce à caractériser.....	146
Figure 4.11 –(a) Vue de dessus à l’aide d’une binoculaire d’observation d’un coupleur MMI pour une longueur d’onde d’opération de 532 nm et (b) photographie d’ensemble du montage avec la fibre d’injection à droite, la puce à caractériser au milieu et l’objectif de microscope de collection à gauche.	147
Figure 4.12 – Vue schématique de la méthode de caractérisation des pertes par propagation par la méthode dite de « cutback » pour des guides rectilignes.	149
Figure 4.13 – Vue schématique de la méthode de caractérisation des pertes par propagation sur un lot de guides en « S » de différentes longueurs.....	149
Figure 4.14 – Vue schématique du principe de mesure des pertes par propagation dans un guide d’onde par observation de la décroissance exponentielle du champ.....	150
Figure 4.15 – Vue schématique de la méthode de caractérisation des pertes par propagation par la différence de chemin optique entre deux bras de coupleur 50/50. Les discontinuités en L_1 , L_2 et L_3 symbolisent des longueurs différentes du bras de référence.	151
Figure 4.16 – Vue schématique du masque de répartition des 6 différentes configurations de puce fabriquées sur une tranche 100 mm. Les puces identiques sont encadrées par la même couleur.....	152
Figure 4.17 – Configuration de motifs à l’aide du logiciel Layout Editor faisant varier le nombre de courbures ($R = 500 \mu\text{m}$) dans le bras inférieur de chaque coupleur MMI dans le cas de	

mesures différentielles. Ce rayon de courbure est répété en rouge dans le cas des mesures directes.	153
Figure 4.18 – Configuration de motifs à l’aide du logiciel Layout Editor faisant varier les rayons de courbure ($R = 400 ; 500 ; 700 ; 1000 \mu\text{m}$) dans le bras inférieur de chaque coupleur MMI dans le cas de mesures différentielles. La longueur de la partie multimodes des coupleurs MMI varie de $1 \mu\text{m}$ autour de la valeur optimisée par simulation (soit L_{MMI} égal à $91,46, 92,46$ et $93,46 \mu\text{m}$).	154
Figure 4.19 – Configuration de motifs à l’aide du logiciel Layout Editor faisant varier la longueur des tapers ($L_{\text{taper}} = 10 ; 50 ; 100 \mu\text{m}$) d’entrée et de sortie des coupleurs MMI pour deux rayons de courbure ($R = 500 \mu\text{m}$ et $R = 1000 \mu\text{m}$).	155
Figure 4.20 – Configuration des motifs à l’aide du logiciel Layout Editor faisant varier la longueur du bras inférieur des coupleurs MMI ($\Delta L_1 = 29,94 \text{ mm}$ et $\Delta L_2 = 63,98 \text{ mm}$). L’écart entre les deux sorties des coupleurs MMI varie de 500 nm autour de la valeur optimisée par simulation ($d_{\text{MMI}} = 3,82 ; 4,32 ; 4,82 \mu\text{m}$).	156
Figure 4.21 – Configuration des motifs à l’aide du logiciel Layout Editor faisant varier la longueur de bras inférieur d’un coupleur MMI ($\Delta L_3 = 118,04 \text{ mm}$). Les coupleurs MMI, présentant un écart entre les deux sorties à $+500\text{nm}$ et -500 nm autour de la valeur optimisée par simulation, sont fabriqués sur deux puces distinctes ($d_{\text{MMI}} = 3,82 ; 4,82 \mu\text{m}$).	157
Figure 4.22 – Variations de la transmission totale mesurée sur un guide rectiligne à l’aide la méthode par « cutback ». Le point en encadré rouge (en bas à droite) représente le premier point de mesure effectuée à partir d’une facette gravée ($L \approx 16,6 \text{ mm}$).	163
Figure 4.23 – Variations de la transmission totale mesurée successivement sur un guide rectiligne à l’aide la méthode « cutback ». Les deux points de mesure encadrés en rouge correspondent à des mesures atypiques.	164
Figure 4.24 – Etude statistique des performances en transmission totale des guides rectilignes, caractérisées à 532 nm pour les modes de propagation TE_0 et TM_0	167
Figure 4.25 – Etude statistique des performances en transmission totale des guides rectilignes, caractérisées à 633 nm pour les modes de propagation TE_0 et TM_0	167
Figure 4.26 – Etude statistique des performances en transmission totale des guides rectilignes, caractérisées à 760 nm pour les modes de propagation TE_0 et TM_0	168
Figure 4.27 – Graphique des pertes par courbure en fonction du rayon de courbure du mode de propagation TE_0 dans un guide d’ondes enterré d’épaisseur 200 nm et de largeur 1000 nm à une longueur d’onde de 633 nm pour deux contrastes d’indice de réfraction de $\text{RIC} = [0,1 ; 0,15]$. La zone en vert clair représente la partie dans laquelle les pertes par courbures attendues pour un contraste d’indice de réfraction de $\text{RIC} = 0,12$ doivent être comprises. Les croix en mauve	

représentent les valeurs de pertes par courbures obtenus par des mesures différentielles pour un rayon de courbure de 500 μm	169
Figure 4.28 – Vue MEB de la coupe transverse de trois guides enterrés en SiO_xN_y PECVD. Une vue de la position approximative du cliché au niveau de la tranche est indiquée en haut à droite. Les valeurs de l'épaisseur du cœur de deux guides sont rapportées avec la présence de deux défauts nettement visibles.	170
Figure 4.29 - Vue MEB de la coupe transverse de 3 guides enterrés en SiO_xN_y PECVD. Une vue de la position approximative du cliché au niveau de la tranche est indiquée en haut à droite. Les valeurs de l'épaisseur du cœur de deux guides sont rapportées.	171
Figure 4.30 – Vue au MEB de l'état d'une facette d'injection gravée de la tranche P490. L'aspect de « coulure » après gravure est observé sur toute les facettes d'injection/collecte.	172
Figure 4.31 – Valeurs de transmission totale vis-à-vis du paramètre d'écart entre les sorties de trois coupleurs MMI à 532 nm. Le mode de propagation TE_0 est coloré en noir et le mode TM_0 en rouge. Les croix représentent les mesures effectuées sur les bras du dessous (bot) et les points sur les bras du dessus (ref).	174
Figure 4.32 - Valeurs de transmission totale vis-à-vis du paramètre d'écart entre les sorties de trois coupleurs MMI à 633 nm. Le mode de propagation TE_0 est coloré en noir et le mode TM_0 en rouge. Les croix représentent les mesures effectuées sur les bras du dessous (bot) et les points sur les bras du dessus (ref).	175
Figure 4.33 - Valeurs de transmission totale vis-à-vis du paramètre d'écart entre les sorties de trois coupleurs MMI à 760 nm. Le mode de propagation TE_0 est coloré en noir et le mode TM_0 en rouge. Les croix représentent les mesures effectuées sur les bras du dessous (bot) et les points sur les bras du dessus (ref).	175
Figure 4.34 – Histogramme issu de l'étude statistique des performances de débalancement en transmission totale des coupleurs MMI 50/50 à 532 nm et pour les modes de propagation TE_0 et TM_0	177
Figure 4.35 – Histogramme issu de l'étude statistique des performances de débalancement en transmission totale des coupleurs MMI 50/50 à 633 nm pour les modes de propagation TE_0 et TM_0	177
Figure 4.36 –(a) vue optique de dessus d'un exemple de défaut critique lors d'une mesure de transmission totale d'un guide rectiligne et (b) vue au MEB de la facette gravée d'une puce caractérisée.	179
Figure 5.1 – Vue schématique (a) de la ligne de conduite suivie dans la conception du masque de photolithographie de notre étude et (b) d'une voie d'amélioration permettant de limiter la proportion de résine à exposer.	186

Figure 5.2 – Vue MEB (de dessus) d'un coupleur MMI ultra large bande fabriqué sur plateforme SOI et dont la plage spectrale d'opération est comprise entre 1250 et 1750 nm [78]..... 187

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 – Synthèse (modifiée de [28]) des briques de base disponibles de 5 grandes fonderies. Le code couleur utilisé est : code = disponible/possible, code = non disponible/possible. [Les significations des abréviations sont : RWVG = rib waveguide (guide en ruban) ; SWVG = strip waveguide ; Y-B = Y-branch (jonction Y) ; DC = directionnal coupler ; MMI = multimode interference ; PSGC = single polarization grating coupler ; PSGC = polarization splitting grating coupler ; SSC = spot-size converter ; SOA = semiconductor optical amplifieur ; DFB = distributed feedback ; DBR = distributed Bragg reflector].	22
Tableau 2 – Synthèse des performances de guides d’onde conçus et fabriqués pour opérer dans le domaine du visible et du proche IR. H et L correspondent à la hauteur et largeur du cœur des guides recensés.	27
Tableau 3 – Synthèse des performances de dispositifs de division de puissance conçus et fabriqués pour opérer dans le domaine du visible et du proche IR.	27
Tableau 4 – Synthèse des caractéristiques du mécanisme d’interférences générales, jumelée et symétrique. Le mécanisme d’interférences jumelées et symétriques sont deux cas particuliers du mécanisme d’interférences restreintes.	57
Tableau 5 – Principaux environnements proposés et largement utilisés pour la modélisation de guides d’onde en optique intégrée.	60
Tableau 6 – Synthèse des valeurs de dimensionnement des simulations réalisées dans cette étude.	64
Tableau 7 – Synthèse des grandeurs de décalage appliquées sur les guides d’onde pour 4 rayons de courbure.	72
Tableau 8 – Synthèse des modes autorisés dans les différentes configurations simulées à 633 nm en considérant une étude dite de « <i>corner analysis</i> ».	73
Tableau 9 – Synthèse des paramètres géométriques optimisés des coupleurs MMI.	77
Tableau 10 – Synthèse des performances en transmission des modes TE ₀ /TM ₀ pour les différentes configurations simulées à 632,8 nm en considérant une étude dite de « <i>corner analysis</i> ».	79
Tableau 11 – Paramètres de dépôt utilisés pour la fabrication des couches de SiO _x N _y déposées par PECVD. La fréquence de la source RF utilisée est de 13,56 MHz.	91
Tableau 12 – Paramètres de nettoyage et de conditionnement utilisés dans le réacteur de dépôt par PECVD. La fréquence de la source RF utilisée est de 380kHz.	92

Tableau 13 – Valeurs mesurées par ellipsométrie spectroscopique moyennées sur les trois positions de mesure illustrées en Figure 3.10. Les deux tranches 100 mm fabriquées sont identifiées par le numéro spécifique permettant un suivi des étapes de fabrication.	98
Tableau 14 – Paramètres optimums de dépôt à la tournette de la résine AZ MiR 701 29 cps.	104
Tableau 15 – Paramètres optimums de gravure sèche par AOE de la couche de cœur en SiO_xN_y	110
Tableau 16 – Tailles des billes diamantées dans les différents liquides utilisés lors de l'étape de polissage de finition des facettes d'injection et de collecte.....	118
Tableau 17 – Paramètres de dépôt à la tournette de la résine de protection AZ 4903.	120
Tableau 18 – Paramètres optimums utilisés pour la gravure par le procédé Bosch.	125
Tableau 19 – Synthèse des caractéristiques techniques des trois sources laser utilisées pour la caractérisation des structures fabriquées.	138
Tableau 20 – Données caractéristiques de l'objectif de microscope utilisé dans la caractérisation.....	139
Tableau 21 – Synthèse des caractéristiques techniques des composants retenus pour le contrôle de polarisation.	141
Tableau 22 – Synthèse des caractéristiques techniques de la photodiode de mesure retenue.	142
Tableau 23 – Synthèse des objectifs, des paramètres et des grandeurs des mesures des structures adressées en fonction des prérequis de mesure nécessaires pour les réaliser.....	158
Tableau 24 – Synthèse des valeurs des cols latéraux des modes de propagation TE_0 et TM_0 dans un guide d'onde enterré dont les dimensions sont de 200 nm en épaisseur, 1000 nm en largeur et de contraste d'indice $\Delta n = 0,12$	160
Tableau 25 – Calcul du facteur de transmission à l'interface air/SiON et des pertes totales entrée/sortie d'un guide.	161
Tableau 26 – Synthèse des valeurs de puissance optique mesurées avec et sans objectif de microscope (x20) et des facteurs de transmission.	161
Tableau 27 – Synthèse des facteurs de transmission des différents types de polariseur utilisés sur le banc de caractérisation.	162
Tableau 28 – Synthèse des pertes par propagation extraites sur dix guides rectilignes.	165
Tableau 29 – Nombre de guides rectilignes fabriqués et caractérisés aux trois longueurs d'onde et pour les deux modes de polarisation TE et TM.....	166

Tableau 30 – Synthèse des transmissions totale médiane et moyenne ainsi que les écarts-type obtenues à partir des populations de guides rectilignes caractérisés à 532, 633 et 760 nm... 168	
Tableau 31 – Synthèse des écarts d'épaisseur de la couche de SiO_xN_y déposée par PECVD extraits des mesures par ellipsométrie et MEB. 171	
Tableau 32 - Nombre de coupleurs MMI 50/50 fabriqués et caractérisés aux trois longueurs d'onde et pour les deux modes de polarisation TE et TM. 176	
Tableau 33 - Synthèse des grandeurs obtenues à partir des populations de coupleurs MMI 50/50 caractérisés à 532et 633 nm. 177	

INTRODUCTION

Généralités

Depuis plus de 30 ans, les technologies de l'optique intégrée permettent de miniaturiser de nombreux systèmes optiques opérant généralement en espace libre, en les intégrant dans des circuits photoniques en augmentant considérablement la densité d'intégration et en améliorant leurs performances et leur robustesse, tout en réduisant les coûts de fabrication.

Bien que la majorité des applications ont adressé et continue d'adresser le domaine de la transmission de données à moyen et à très haut débit (opérant généralement dans le domaine du proche IR : $1 - 1,55\mu\text{m}$), et à mesure que la technologie évolue sur ces marchés, des applications émergentes apparaissent dans les domaines de la santé, de la détection biochimique ou encore de l'imagerie. A ce titre, de l'instrumentation de tomographie par cohérence optique (OCT) aux diagnostics de laboratoire sur puce (lab-on-chip), à la spectrométrie ou à la cytométrie en flux, de nombreuses nouvelles plateformes et dispositifs d'intégration sont en cours de démonstration, d'amélioration où même de commercialisation.

L'optique intégrée s'est avérée utile en démontrant que de nombreuses fonctions optiques peuvent être réalisées de manière beaucoup plus compacte, efficace et rentable en intégrant les fonctionnalités requises sur une puce unique. Les circuits intégrés photoniques ou PIC (« Photonic Integrated Circuit » en anglais) ont considérablement fait évoluer le paysage de la transmission de données et des télécommunications au cours des 20 dernières années grâce à l'implémentation compacte sur puce des émetteurs, des optiques de couplage dans la fibre optique, de l'électronique de pilotage et d'asservissement, des détecteurs et de son électronique de conditionnement.... Des réseaux de transport optique à très longues distances aux interconnexions optiques à courte portée, les PIC ont révolutionné le marché des communications optiques en apportant des systèmes plus intégrés, plus performants et plus complexes tout en ayant un coût global de fabrication réduit.

Il apparaît donc un engouement pour les PIC conçus et fabriqués à partir de matériaux largement usités par la microélectronique et ses applications (silicium, diélectriques...), visant la chimie & la biodétection, l'instrumentation médicale ou encore l'imagerie au sens large ; cette dernière étant l'application principalement adressée par cette thèse de doctorat.

Mise en contexte du projet

Les premiers développements des techniques d'interférométrie remontent aux travaux de Michelson de 1890 et 1920 [1], [2] et de Michelson et Pease en 1921 [3]. Il s'agit du premier instrument optique qui a introduit la technique interférométrique consistant à utiliser deux ouvertures séparées pour mesurer l'amplitude des franges d'interférences obtenues en vue de déterminer une largeur angulaire. De cette façon, disposant d'une résolution angulaire suffisamment fine, les diamètres de certaines des étoiles les plus proches et les plus grandes comme Arcturus et Bételgeuse, ont pu être mesurés. Ces développements se sont poursuivis avec les travaux de Ryles et Vonberg en 1946 [4] focalisés sur la construction d'un interféromètre radio utilisant un réseau d'antennes à une fréquence de 175 MHz et disposant d'une ligne de base, i.e. la distance de séparation entre les antennes, pouvant varier de 17 m à 240 m.

Ces travaux en interférométrie se sont poursuivis avec de multiples améliorations en termes d'implémentation de dispositifs plus complexes tels des corrélateurs utilisés pour la combinaison des signaux d'antennes ou encore dans la calibration des instruments par l'accumulation progressive de positions précises pour les sources radio de petits diamètres à partir d'identifications optiques, au cours des années 1950 et 1970.

A partir de 1974, le développement d'ordinateurs de calculs a permis l'utilisation de techniques de traitements d'image utilisant notamment la transformée de Fourier appliquée aux signaux analogiques et numériques. La fermeture de phase et d'amplitude ainsi que la déconvolution linéaire font partie des plus connues.

Du fait des contraintes imposées de réalisation technologique, ce n'est qu'à partir du milieu des années 80 que des instruments d'observation astronomique aux longueurs d'ondes millimétriques (100 – 300 GHz), puis submillimétriques (300 GHz – 1 THz) à partir des années 1990, ont connu un développement significatif.

De nos jours, les technologies de fabrication ont permis la miniaturisation ainsi que l'opération à des longueurs micrométriques de systèmes dits à « synthèse d'ouverture ». Plusieurs équipes de recherche travaillent sur le développement de ce type de systèmes aux longueurs d'onde télécoms autour de 1,55 μm (170 – 210 THz), notamment en utilisant les technologies de l'optique intégrée [5].

Rappelons que la synthèse d'ouverture est une technique d'imagerie interférométrique consistant à corrélérer le signal lumineux, provenant de deux ouvertures ou plus, permettant de reconstruire l'image de l'objet observé grâce au profil d'interférences obtenu. L'intérêt majeur de cette technique est de s'affranchir du fameux critère de Rayleigh, limitant la résolution latérale obtenue avec une seule ouverture, en créant un diamètre d'ouverture synthétique qui

permet d'atteindre une résolution largement supérieure à celle produite par les techniques conventionnelles d'imagerie.

Cette méthode d'imagerie est déjà largement implémentée en astronomie car elle permet d'observer et de mesurer des astres lointains avec une résolution de l'ordre de la milliseconde d'arc [6]–[9] ; ceci restant impossible avec les techniques classiques associées aux télescopes standards.

Le projet de recherche, dans lequel s'inscrit cette thèse de doctorat, ambitionne donc la complète intégration de cette technique d'imagerie sur puce en vue d'une utilisation dans un système portable de type tablette numérique, téléphonie mobile, etc. Plus particulièrement, deux principales briques de base sont ciblées : la fonction de couplage (fibre-puce et division de puissance) et celle de modulation de phase. Cette thèse vise donc à développer, en optique intégrée, des guides d'onde fonctionnant en régime monomodal ainsi que des coupleurs de division de puissance ; tous deux opérant dans la plus large plage possible du domaine visible.

Néanmoins, la bibliographie, adressant les fonctions optiques nécessaires à l'interférométrie dans le domaine visible, est somme toute peu exhaustive. Par conséquent, il s'agit d'un projet original conduisant à relever plusieurs défis en termes de conception, de fabrication et de caractérisation.

Pour cela, le manuscrit se décompose en deux grandes parties. La première décrit la phase de conception et de fabrication des deux structures retenues : les guides d'onde ainsi que les coupleurs MMI 50/50 en vue de leur utilisation dans un montage de synthèse d'ouverture.

Notons qu'un tel système a déjà été conçu et caractérisé en espace libre par un post-doctorant au LN2/3IT de l'Université de Sherbrooke, et a permis d'atteindre une sensibilité au déplacement latéral de $1,89 \mu\text{m}$ à une distance de $1,4 \text{ m}$ [10]. Le second s'attache à donner les résultats de caractérisation et d'analyse des performances optiques des structures fabriquées.

La phase de conception et fabrication a été principalement réalisée au LN2/3IT, qui est pourvu d'une salle blanche de micro et nanofabrication de classe 100. Les équipements de pointe mis à disposition au 3IT disposent de caractéristiques techniques à l'état de l'art actuel.

Sur la durée de cette thèse, cette infrastructure a permis de réaliser le développement technologique des structures retenues à partir de l'oxynitride de silicium (SiO_xN_y), retenu comme matériau guidant et dont les propriétés seront détaillées dans ce manuscrit. Ce matériau est utilisé dans une configuration particulière pour le guidage dans le visible en composant à la fois le cœur et la gaine des structures guidantes. Ce choix a été motivé par l'objectif de réaliser des guides d'onde à faibles pertes par propagation et capables d'opérer sur la large plage possible du domaine visible.

La deuxième phase a été réalisée au laboratoire d'Intégration du Matériau au Système (IMS) disposant d'équipements de caractérisation de dispositifs photoniques du visible au proche IR.

Ce travail a permis d'associer les expertises des deux laboratoires pour conduire une étude complète des structures optiques développées.

Enfin, ce manuscrit a pour but d'ouvrir des perspectives sur les verrous technologiques rencontrés en partant de l'élaboration du matériau jusqu'à la caractérisation des structures définitives.

Plan du document

Ce travail de thèse est divisé en 4 principaux chapitres, suivis d'une conclusion générale et de perspectives.

Dans le premier chapitre, un état de l'art axé sur les performances des briques technologiques visées est présenté. Pour cela, une mise en contexte de l'étude vis-à-vis de la technique de synthèse d'ouverture permet de focaliser cet état de l'art sur les structures de guidage et de division de puissance existantes. Les technologies de fabrication des matériaux guidants de ces briques de base sont décrites et analysées en vue de leur utilisation dans le visible. Les performances des deux briques sont présentées sous la forme de tableaux récapitulatifs en vue de situer les résultats obtenus vis-à-vis de l'état de l'art actuel.

Dans le second chapitre, les principes physiques permettant de réaliser le guidage de la lumière dans un guide d'onde intégré sont d'abord brièvement rappelés. Il en est de même pour la fonction de division de puissance par le biais d'interférences multimodes. Les paramètres, ainsi rappelés, sont utilisés pour définir un cahier des charges de contraintes opérationnelles de fonctionnement à respecter dans la modélisation des structures visées. Cela permet de présenter la méthodologie de simulation à l'aide de l'outil de simulation retenu (FIMMWAVE[®] de Photon Design) ainsi que les performances susceptibles d'être atteintes en considérant les tolérances de fabrication.

Le troisième chapitre s'attache à présenter la méthodologie et les techniques usitées dans la fabrication des structures modélisées. Cette partie porte exclusivement sur le développement technologique. Dans un premier temps, le procédé de fabrication du matériau guidant découle d'une brève vue d'ensemble des techniques de fabrication du matériau guidant et permet de justifier le choix de fabrication par PECVD. Il s'en suit deux étapes de fabrication distinctes qui sont : la fabrication du cœur des guides et des coupleurs puis celui des facettes d'injection et de collecte de la lumière aux extrémités des puces. Plusieurs voies d'élaboration sont explorées et sont mises en perspective par rapport aux paramètres identifiés dans le cahier des charges du Chapitre 2. Cette étude permet de justifier les différents choix technologiques de fabrication respectant les contraintes opérationnelles de fonctionnement.

Enfin, le **quatrième et dernier chapitre** est chargé de présenter la campagne de caractérisations optiques effectuée sur les dispositifs fabriqués. Dans un premier temps, la présentation du banc de mesure ainsi que la méthodologie utilisée sont exposées. Ensuite, les résultats des performances optiques obtenues sur les guides d'onde et les coupleurs MMI 50/50 sont présentés et comparés aux simulations du Chapitre 2. Pour terminer, les problématiques technologiques rencontrées sont discutées dans le but de proposer des solutions correctives tant sur le plan de la conception des structures que de leur fabrication.

CHAPITRE 1 : ÉTAT DE L'ART

Ce chapitre vise à présenter l'état de l'art des principales technologies et des principaux dispositifs de l'optique intégrée en vue du développement d'un système d'imagerie opérant par synthèse d'ouverture dans le domaine du visible. Contrairement à la technique d'imagerie conventionnelle, la technique de synthèse d'ouverture apparaît comme un outil intéressant vis-à-vis de l'espace disponible limité et du gain en résolution angulaire pour des applications mobiles, tel qu'un téléphone intelligent ou encore une tablette.

- Dans un premier temps, une introduction sur les travaux déjà réalisés dans ce domaine de recherche permettra de comprendre et d'en établir les différentes contraintes de conception.
- Dans un second temps, une étude bibliographique sur le développement technologique de la photonique sur silicium justifiera le choix de la plateforme matériau, des différentes briques de base retenues dans le contexte de ce doctorat, des types d'intégration ainsi que la limite de cette technologie.
- Pour terminer, une étude focalisée sur les travaux réalisés à l'aide de matériaux diélectriques développés pour des applications du domaine visible permettra de justifier le choix de réalisation d'un guide d'onde monomode et d'un coupleur MMI 50/50 à base du composé SiO_xN_y . Cette étude sera conclue par une comparaison des performances de ces deux briques de base en vue d'évaluer et de positionner les performances vis-à-vis de l'état de l'art des structures obtenues dans ce travail de doctorat.

1.1 État de l'art : photonique sur silicium

Tant au niveau national qu'euro péen, la photonique sur silicium est, à présent, largement reconnue comme une technologie clé dans les systèmes de communications, d'interconnexions de données de nouvelle génération ou encore d'imagerie haute résolution. Cette section s'attache donc à l'état de l'art de cette technologie en termes d'applications et de limitations vis-à-vis du contexte d'étude de ce projet.

1.1.1 Contexte d'étude

Ce travail de doctorat, mené en cotutelle entre le Laboratoire de Nanotechnologie et Nanosystèmes (LN2) de l'Université de Sherbrooke (Qc-Canada) et le Laboratoire de l'Intégration du Matériau au Système (IMS) de l'Université de Bordeaux (France), s'inscrit dans un projet plus large dont l'objectif est de réaliser un système miniaturisé de synthèse d'ouverture dans le visible et de développer les premières briques de base.

La Figure 1.1 montre une vue schématique du principe général de synthèse d'ouverture composée de deux ouvertures illuminées par une source ponctuelle. La principale caractéristique de cette technique réside dans la séparation spatiale des différentes ouvertures appelée « ligne de base ». Cette distance peut être interprétée comme un diamètre d'ouverture virtuel plus grand que celui des ouvertures 1 et 2. Cela permet de dépasser la limite de diffraction d'un seul télescope et d'atteindre une résolution angulaire bien supérieure.

En admettant que la source est suffisamment éloignée des ouvertures pour que le front d'onde soit considéré comme plan, ce dernier atteint les ouvertures à des temps différents créant donc une différence de chemin optique ou OPD¹. La ligne à retard (calibration) a pour utilité de compenser le décalage de phase des deux signaux d'entrée pour les rendre cohérents. Ensuite, en faisant varier la longueur de la ligne à retard (balayage), il est possible de balayer la succession d'interférences destructives et constructives et obtenir le profil de franges d'interférences entre les deux signaux.

¹ OPD ou « Optical Path Difference »

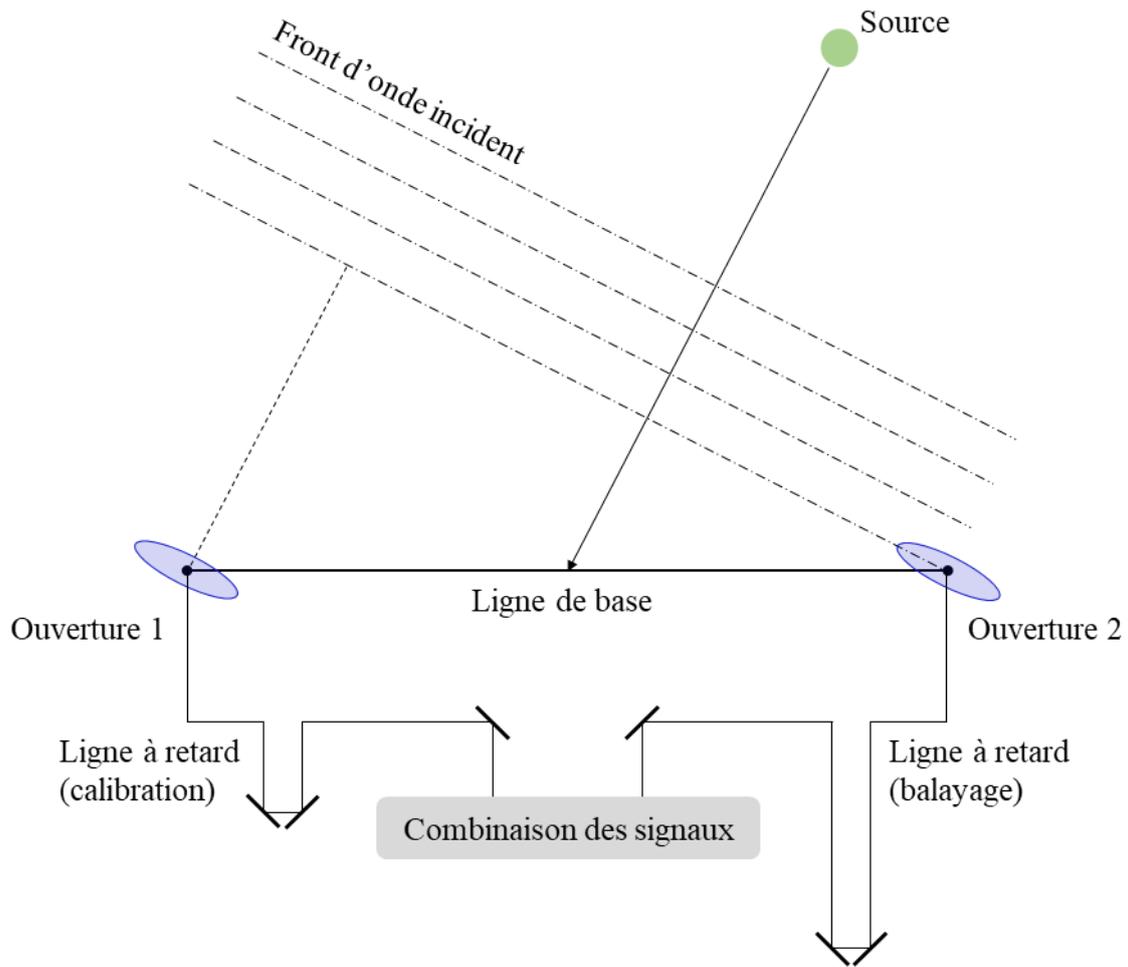


Figure 1.1 – Vue schématique du principe d'un interféromètre à synthèse d'ouverture idéal.

Il est à noter que ce projet ambitionne la mise en place de cette technique d'imagerie dans une large plage du domaine visible voire en lumière blanche. Cela impose un traitement de signaux à très faible cohérence et rend le système d'imagerie extrêmement sensible aux imprécisions de type alignement de composant ou encore sensibilité à l'environnement, parmi les plus notables.

L'interférométrie multi-ouvertures dans le visible et l'infrarouge nécessite la combinaison de nombreuses fonctions optiques (filtrage spatial, combinaison de faisceaux, calibration photométrique, contrôle de polarisation) pour détecter des signaux astronomiques à très haute résolution angulaire. Les technologies de l'optique intégrée pour les applications de télécommunication ont permis l'élaboration de multiples fonctions optiques comme la division de puissance, le couplage ou encore le multiplexage. De nombreux travaux ont ainsi pu profiter de ces développements pour proposer de nouveaux concepts instrumentaux utilisant la technique d'imagerie par synthèse d'ouverture.

Ainsi, la Figure 1.2 présente un exemple d'interféromètre monomode optique sur puce à longue ligne de base développé par une équipe de chercheurs de l'Université de Grenoble [11]–[16]

qui a démontré l'intérêt de l'utilisation de l'optique intégrée pour l'interférométrie astronomique. L'instrumentation développée a été testée lors de l'observation à $\lambda = 1,6 \mu\text{m}$ de deux étoiles dont le diamètre angulaire était de $9,65 \pm 0,5 \text{ mas}^2$ pour 199 Tau et de $11,08 \pm 0,57 \text{ mas}$ pour U Ori. La comparaison des diamètres mesurés a permis de valider cette instrumentation.

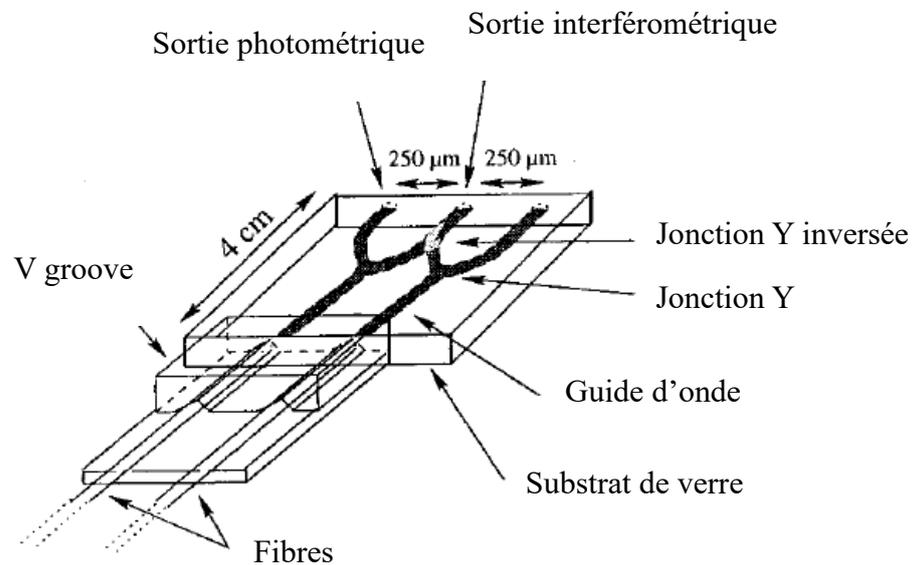


Figure 1.2 – Vue schématique du dispositif de combinaison de faisceaux développée par Haguenauer et al [13]. La lumière de deux télescopes est couplée au combineur de faisceaux par des fibres monomodes à maintien de polarisation (fibres). Le composant d'optique intégrée se comporte comme un combineur de faisceaux à deux télescopes (sortie interférométrique) après la jonction Y inversée avec deux signaux de calibration extraits avec des jonctions Y (sortie photométrique).

Outre la maturité industrielle de l'optique intégrée, d'autres avantages par rapport à l'imagerie optique en espace libre peuvent être mis en lumière :

- Petite taille : un instrument complet peut être intégré sur une puce de dimensions typiques de 5 mm à 20 mm ;
- Stabilité : l'instrument est complètement stable lorsqu'il est intégré dans un substrat ;
- Faible sensibilité aux contraintes extérieures : température, pression, contraintes mécaniques ;

² milli-arc-seconde

- Peu de montages opto-mécaniques et peu d'alignement requis : la seule préoccupation est de coupler la lumière dans les guides d'onde ;
- Simplicité : Pour un instrument complexe, les efforts majeurs sont reportés sur la conception du masque et non sur la phase de construction ;
- Capacités de polarisation intrinsèque : la propagation monomode impose une polarisation fixée du fait de la géométrie et du dimensionnement du cœur de la structure ;
- Faible coût : l'optique intégrée fournit des composants et une configuration d'instrumentation à très faible coût. De plus le prix est le même pour un ou plusieurs composants puisque le coût principal est dans la conception et la réalisation initiale du masque.

Plus récemment, la mise en œuvre de cette technique par une équipe de chercheurs de l'Institut Max Planck (Allemagne) a permis d'obtenir une image des émissions radio de la galaxie OJ 287 à une résolution angulaire de 12 microsecondes d'arc (5,8 prad), qui est actuellement la résolution la plus élevée obtenue dans les observations astronomiques. Cela a été rendu possible grâce à la combinaison de douze radiotélescopes répartis dans le monde entier et une antenne de 10 mètres en orbite à bord du satellite Spektr-R. Le diamètre effectif du télescope résultant atteint les 193 000 km et a été utilisé pour scruter le cœur de la galaxie OJ 287 qui est censée héberger plusieurs trous noirs supermassifs [17].

La littérature existante sur les développements et l'application de cette technique d'imagerie utilisant la technologie d'optique intégrée est très exhaustive aux longueurs d'onde radio (millimétriques) et de télécommunications (sub-millimétriques). En revanche, il n'existe que peu de travaux conduits dans le domaine visible.

Pour cela, une étude préliminaire a été menée dans notre projet [10] et a permis d'établir une preuve de concept d'un système d'imagerie par synthèse d'ouverture en espace libre dans le domaine du visible. Une vue schématique du montage mis en place pour cette démonstration est présentée en Figure 1.3. La configuration était composée de deux collimateurs d'ouverture de 2,54 cm de diamètre avec une séparation centre à centre de 5 cm. L'objet était constitué de la sortie d'une fibre optique connectée à un laser He-Ne et située à 1,4 m de distance des ouvertures dont les caractéristiques principales étaient les suivantes : $\lambda = 632,8$ nm, cohérence spatiale = 30 cm et puissance de sortie = 0,5 mW.

Les faisceaux collimatés sont dirigés par des miroirs et combinés par un séparateur de faisceau (BS³) pour les interférences. L'un des trajets est compensé par une ligne à retard pour égaliser les longueurs de trajet au début d'une expérience. La ligne à retard comprend également un

³ « Beam Splitter »

actionneur piézoélectrique (PS⁴) pour moduler la différence de longueur de trajet pour la génération des interférogrammes.

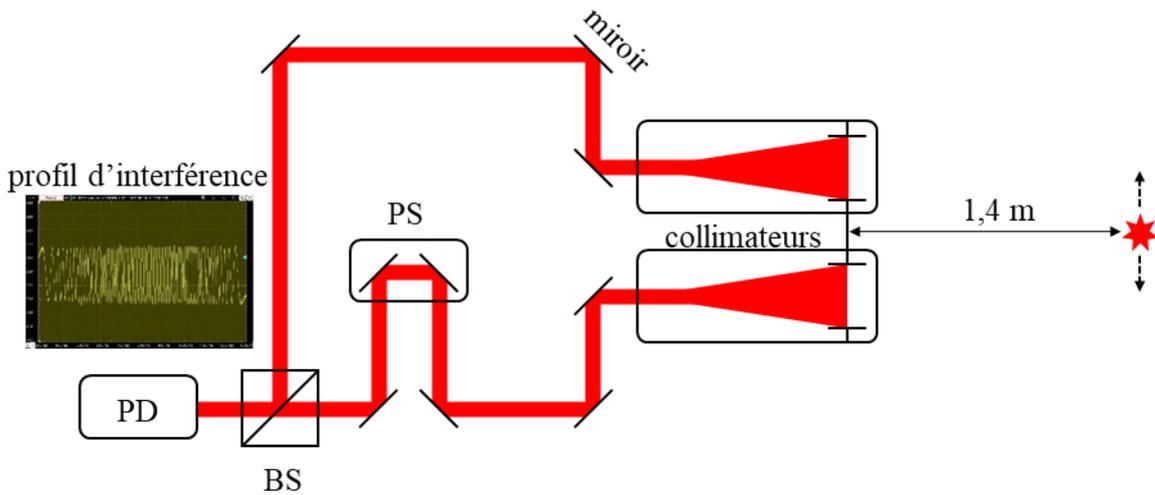


Figure 1.3 – Vue schématique du montage en espace libre mis en place pour la démonstration de la technique de synthèse d'ouverture à $\lambda = 632,8 \text{ nm}$ issue des travaux de Bravo et al [10].

Le tracé de la phase dans l'espace de Fourier du profil d'interférence obtenu en fonction du déplacement de la sortie d'une fibre optique clivée a permis d'obtenir une sensibilité de $0,14 \text{ rad}/\mu\text{m}$ avec une incertitude de mesure de $0,35 \text{ rad RMS}$, soit une résolution de $1,89 \mu\text{m}$ à une distance de $1,4 \text{ m}$ sur le déplacement de la sortie de fibre. Le graphique, présentant cette variation de phase moyenne en fonction du déplacement horizontal d'un point source laser (sortie de fibre clivée) par rapport aux deux ouvertures collimatées du système, est donné en Figure 1.4.

⁴ « Phase Shifter »

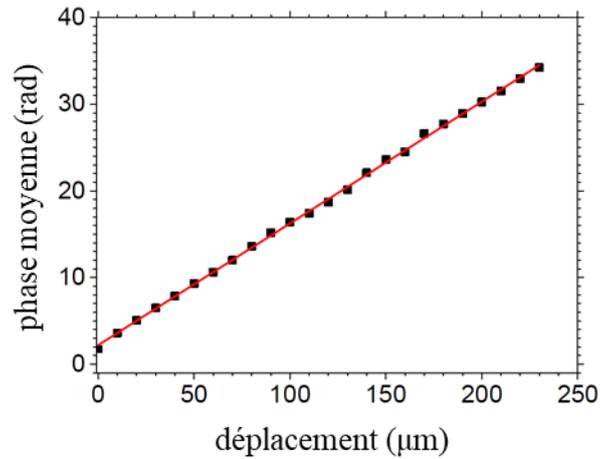


Figure 1.4 – Variation de phase moyenne en fonction du déplacement horizontal d'un point source placé à 1,4 m d'un système de synthèse d'ouverture réalisé en espace libre.

De plus, les profils d'interférences ont aussi été obtenus pour des sources à forte cohérence telles qu'une diode laser à 633 nm et pour une source de lumière à large cohérence et sont présentés en Figure 1.5.

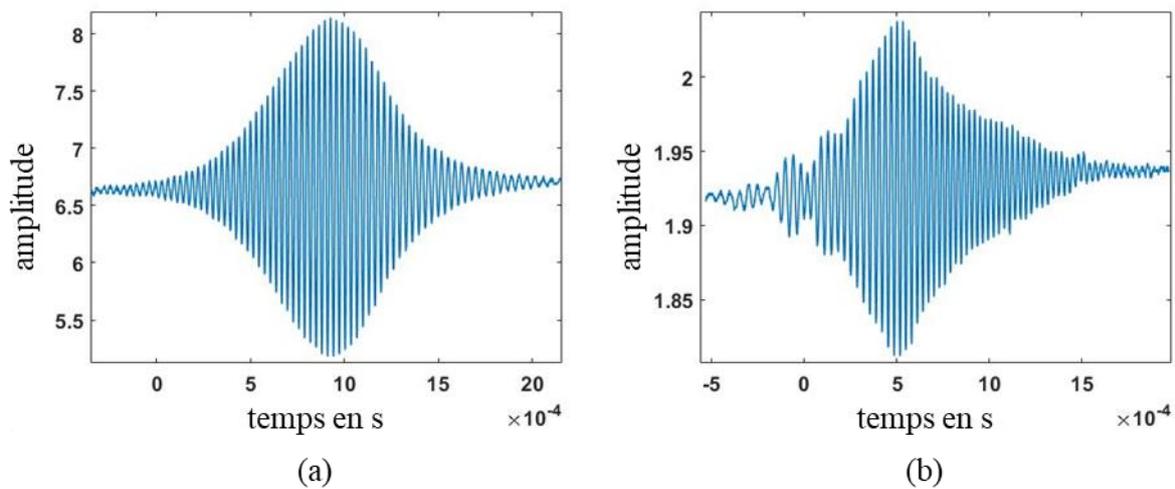


Figure 1.5 – Profils d'interférences obtenus à l'aide du montage de synthèse d'ouverture en espace libre (a) d'une diode laser émettant à 633 nm et (b) d'une source de lumière blanche.

Ce travail préliminaire a permis de démontrer une première étape de miniaturisation d'un système de synthèse d'ouverture à l'aide d'optique en espace libre et a aussi soulevé une problématique importante. L'alignement des fronts d'ondes des faisceau lumineux obligatoirement nécessaire pour obtenir les profils d'interférences est extrêmement précis et impose des techniques plus ou moins complexes pour rendre le montage moins sensible aux

erreurs d'alignement. La Figure 1.6 présente cette problématique d'alignement des fronts d'onde. L'optimisation de l'alignement a pu être réalisée en comparant la taille des périodes d'interférences entre les 2 signaux. Plus la période spatiale des interférences entre ceux-ci est courte (à gauche) et plus les fronts d'ondes sont « désalignés », et réciproquement (à droite).

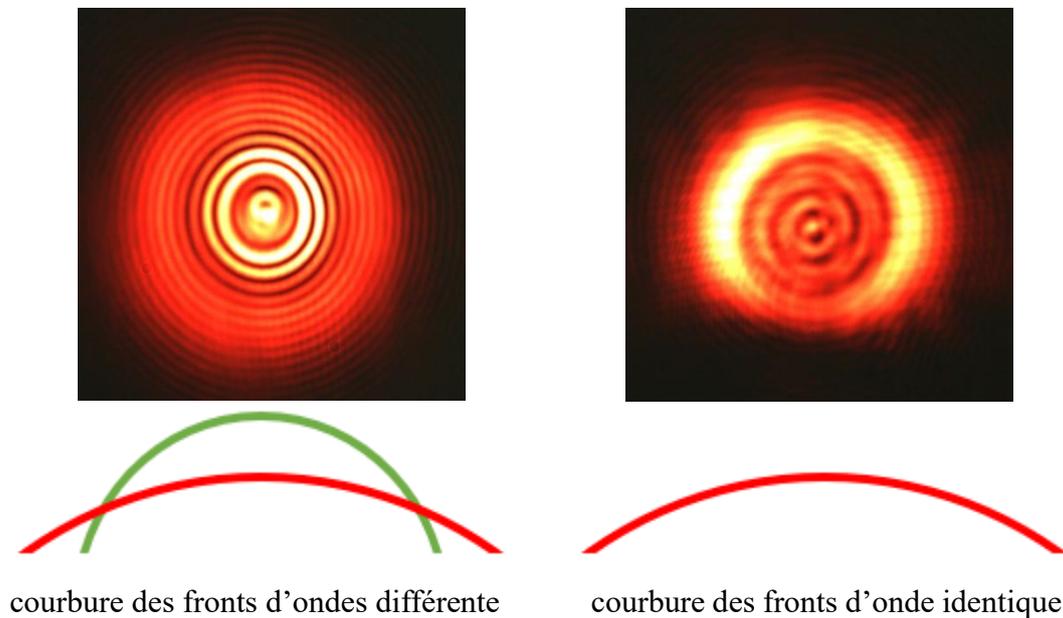


Figure 1.6 – Figure d'alignement des fronts d'onde des deux ouvertures du système de synthèse d'ouverture provenant d'un point source laser à 632,8 nm.

Le contexte de cette étude se focalise donc sur les technologies d'optique intégrée appliquées au domaine du visible afin de poursuivre et de profiter des avantages que celle-ci propose. A ce titre, un état de l'art sur les fonctions de guidage et de division de puissance utilisant les matériaux issus du développement technologique de la photonique sur silicium permettra de réaliser le choix le plus judicieux dans l'élaboration des briques de base que ce projet ambitionne de mettre en œuvre.

1.1.2 Photonique sur silicium : généralités

La photonique sur silicium est une technologie permettant un haut niveau d'intégration de composants photoniques sur substrat de silicium et, bien que celle-ci soit déjà mature, elle suscite toujours un fort engouement. En témoigne le prévisionnel de marché prévu par les mégacentres de données et les sociétés HPC⁵ en termes de déploiement d'interconnexions à grande échelle basées sur la photonique sur silicium dans les prochains cycles de remplacement du matériel à partir de 2019 comme illustré en Figure 1.7.

Le potentiel de cette technologie est à présent largement reconnu depuis les premières études de guides d'onde fabriqués à partir de structures sur la plateforme SOI⁶ en 1985 [18], [19]. Par ailleurs, les développements technologiques de différentes compagnies, telles que Luxtera ou encore Acacia Communications [20], ont conduit à l'élaboration des principales briques de base telles les fonctions de guidages, de division de puissance, de commutation ou encore de multiplexage pour les applications de télécommunications optiques à haut débit.

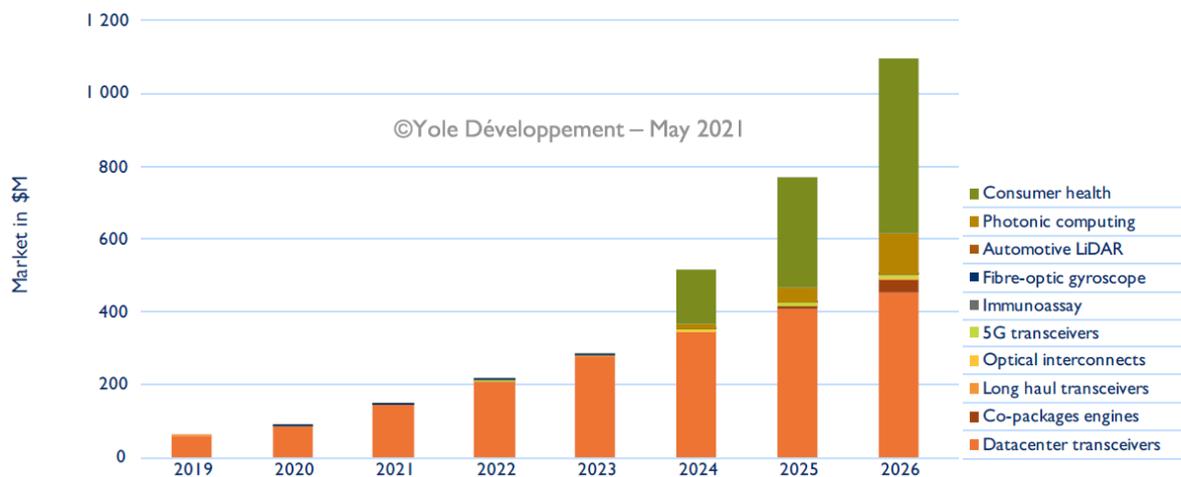


Figure 1.7 – Prévisions de marché des puces en photonique sur silicium entre 2019 et 2026, basées sur l'étude de « Silicon Photonics Report - Yole Développement » [21].

Cette technologie est basée sur la fabrication de composants typiquement réalisés dans une couche de silicium de 180 à 220 nm d'épaisseur placée au-dessus d'un matériau isolant de 1 à 3 μm d'épaisseur [22]. Ces structures passives sont formées à l'aide d'un masque de lithographie suivi par des étapes de gravure partielles et/ou complètes du silicium. Les fonctions

⁵ « High Performance Computing »

⁶ « Silicon On Insulator »

de couplage sont réalisées via des coupleurs de bord (avec des pertes typiques de 1 dB/facette) ou encore verticalement, via des coupleurs en réseaux de surface (avec des pertes typiques de 2 dB/coupleur et une bande passante de 40 à 70 nm @ 3 dB).

Des structures actives ont aussi été développées, notamment, pour la photo-détection à base de germanium. Cependant, les structures optiques actives ne seront pas développées dans notre étude, qui se focalisera uniquement sur les structures passives. Une vue schématique des principales briques de base pour la réalisation d'un circuit en photonique intégrée (PIC⁷) est illustrée sur la Figure 1.8.

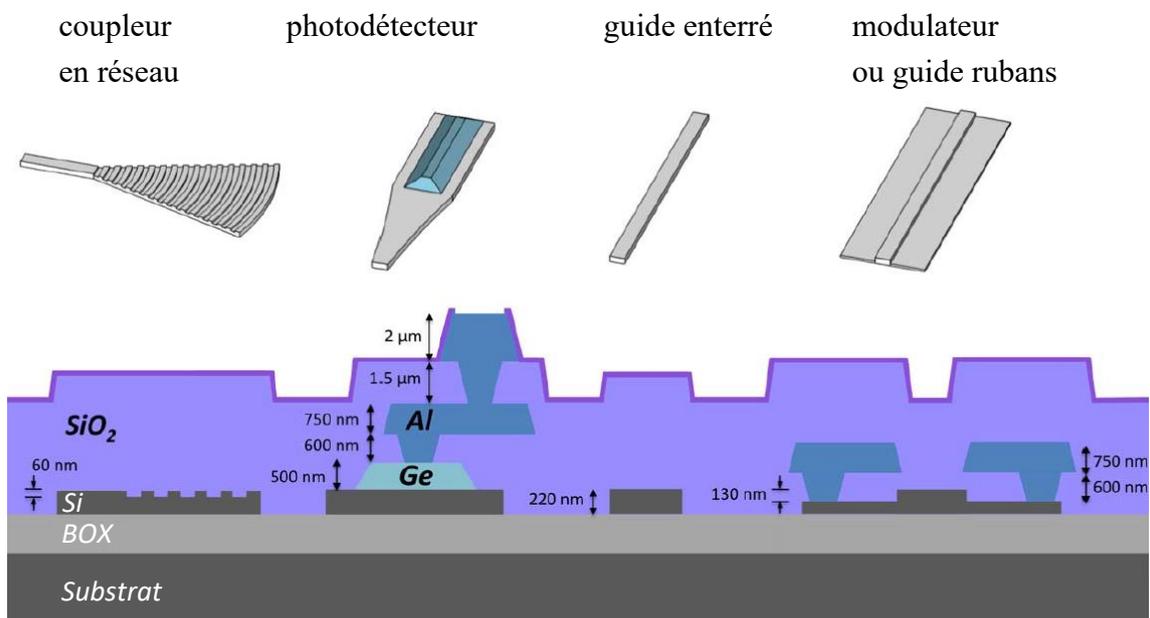


Figure 1.8 – Vue schématique (modifiée) présentant les structures passives et actives issues de la plateforme en photonique sur silicium 30 GHz disponible à l'IME (« Institute of MicroElectronics ») extraite d'un travail d'étude de [23].

Le principal avantage de la technologie SOI réside dans sa grande compatibilité avec les procédés de fabrication CMOS⁸ dérivés de la microélectronique et, par conséquent, dans sa compatibilité en termes de capacité d'intégration sous la forme de « System on Chip » (SoC) ou « System in Package » (SiP), de reproductibilité et de coût.

⁷ « Photonic Integrated Circuit »

⁸ « Complementary Metal Oxide Semi-conductor »

La différence (ou contraste) d'indice de réfraction typique entre le cœur et la gaine des structures est supérieure à 100 % ($n_{\text{Si}} = 3,4$ et $n_{\text{SiO}_2} = 1,45$ @ $\lambda=1550$ nm) permettant une conception de circuits avec une très forte densité d'intégration.

Notre étude visant au développement des premières briques de guidage optique passives, deux configurations principales sont proposées :

- d'une part, les guides dits à ruban (de largeur de 1 à 8 μm) qui présentent des pertes par propagation relativement faibles (0,1 à 0,5 dB.cm^{-1}) mais dont le rayon de courbure est limité à environ 100 μm

et

- d'autre part, les guides dits à bande (de largeur 500 nm) qui présentent des pertes par propagation plus élevées (1 à 3 dB.cm^{-1}) mais présentent des rayons de courbure minimum plus faible compris entre 5 et 20 μm . Ces deux configurations sont illustrées sur la Figure 1.9.

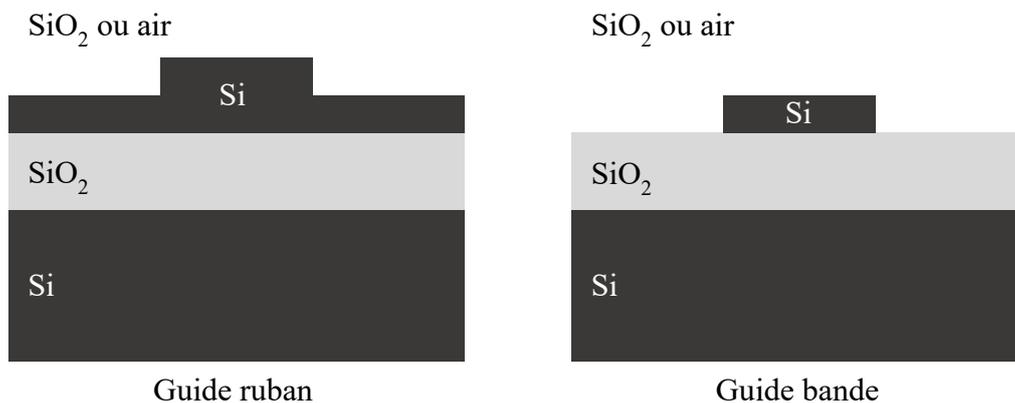


Figure 1.9 – Vue schématique de la configuration traverse des guides à ruban et à bande en technologie SOI.

D'autres briques de base permettant la réalisation de fonctions plus complexes que le guidage sont aussi disponibles en photonique sur silicium. Par exemple, la Figure 1.10 met en exergue la fonction de division de puissance comme fonction optique de base dans un commutateur optique en configuration d'interféromètre de Mach-Zehnder (MZI). Le principe de fonctionnement d'un MZI est basé sur la division d'un signal d'entrée dans deux guides distincts. Le signal d'un des guides subit ensuite un déphasage généré par la brique de base de modulation. Les signaux des deux bras sont ensuite corrélés et, en fonction du déphasage appliqué, l'interférence entre les signaux peut être choisie constructive ou destructive.

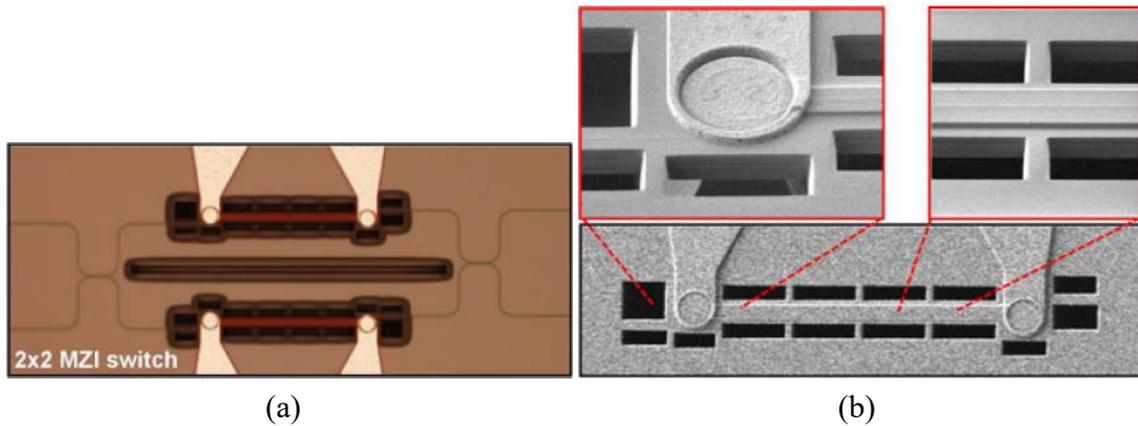


Figure 1.10 – Vues (modifiées) d'un commutateur intégrée basé sur un interféromètre Mach-Zehnder (MZI) réalisé sur plateforme photonique sur silicium (a) en microscopie optique et (b) en microscopie électronique (MEB), extraites de [24].

Il est établi que des composants photoniques clé peuvent être intégrés parallèlement aux composants électroniques sur un même substrat (ou « monolithique ») [25]. Actuellement, la densité d'intégration sur une puce dépasse le milliard de composants et cette tendance d'intégration ne cesse de dépasser la loi de Moore [26].

Bien que ce type d'intégration offre des avantages pour la photonique sur silicium, elle introduit également une complexité dans l'intégration des procédés de fabrication et dans la conception des circuits photoniques/électroniques. En général, les dimensions critiques des transistors sont bien inférieures à 100 nm (atteignant aujourd'hui le nm) alors que celles des dispositifs photoniques restent de l'ordre de 0,1 à 1 μm . Par conséquent, ce fort décalage d'ordre de grandeur entre les conceptions électronique et photonique est un défi technologique important en vue de leur optimisation sur un même substrat.

Pour cela, une grande partie de la recherche en photonique sur silicium se concentre actuellement sur des puces « uniquement photoniques », tout en utilisant des outils compatibles avec la technologie CMOS. Le principal avantage est d'éviter la complexité d'intégration de deux besoins technologiques en termes de dimensions de fabrication trop différentes. A ce titre, l'intégration hybride de la photonique et de l'électronique apparaît comme une approche plus convaincante [27].

La majorité des technologies en photonique sur silicium se base sur les performances du silicium en termes de haute transmission dans le domaine infrarouge. Cette technologie a donc pu disposer d'une large optimisation dans le domaine du proche IR (1300-1600nm).

Il est à noter que la longueur d'onde de fonctionnement est directement liée aux applications dépendant de la plage de transparence des matériaux utilisés. Le développement de nouveaux besoins pour des applications dans le domaine du proche infrarouge (NIR) et du visible (VIS),

telles que la biodétection, l'instrumentation médicale ou encore l'imagerie, ont conduit à l'utilisation de matériaux performants à ces longueurs d'onde avec un vif intérêt pour les matériaux diélectriques.

Ce travail de thèse ayant pour vocation de développer des briques de base en optique intégrée en vue de leur utilisation dans un système d'imagerie par synthèse d'ouverture opérant dans le domaine visible, la section suivante sera donc consacrée à la revue d'état de l'art des différents matériaux et des structures disponibles en optique intégrée pour le domaine du visible.

1.2 État de l'art : optique intégrée pour le domaine visible

1.2.1 Passage de la plateforme SOI à l'utilisation de matériaux diélectriques

Pour la photonique, Stulius et Streifer ont rapporté en 1977 [15] la première fabrication de films de Si_3N_4 ($n_{\text{Si}_3\text{N}_4} \approx 2,03$) sur un tampon de SiO_2 ($n_{\text{SiO}_2} \approx 1,46$) sur des tranches de Silicium, pour la propagation de la lumière dans la longueur d'onde visible rouge (632 nm). Après quelques travaux dans les années 1980 sur la propagation de la lumière visible (VIS) à travers des guides d'onde rectilignes enterrés en Si_3N_4 , une contribution fondamentale sur l'application de ce matériau dans un dispositif fonctionnel a été réalisée par Heideman et al en 1993 [28] avec un interféromètre Mach-Zehnder partiellement intégré pour la réalisation de tests d'immunodétection. Les deux bras du MZI étaient en fait des guides d'onde composés de $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$. Néanmoins, les coupleurs optiques du MZI étaient externes à la puce photonique.

La technologie SiN_x est basée sur une combinaison d'un cœur composé de nitrure de silicium stœchiométrique (Si_3N_4), encapsulées ou non d'une gaine composée de silice (SiO_2). Plusieurs géométries transversales de guides sont disponibles et les configurations de ces derniers sont directement dérivées de celles de la plateforme SOI comme illustré sur la Figure 1.11.

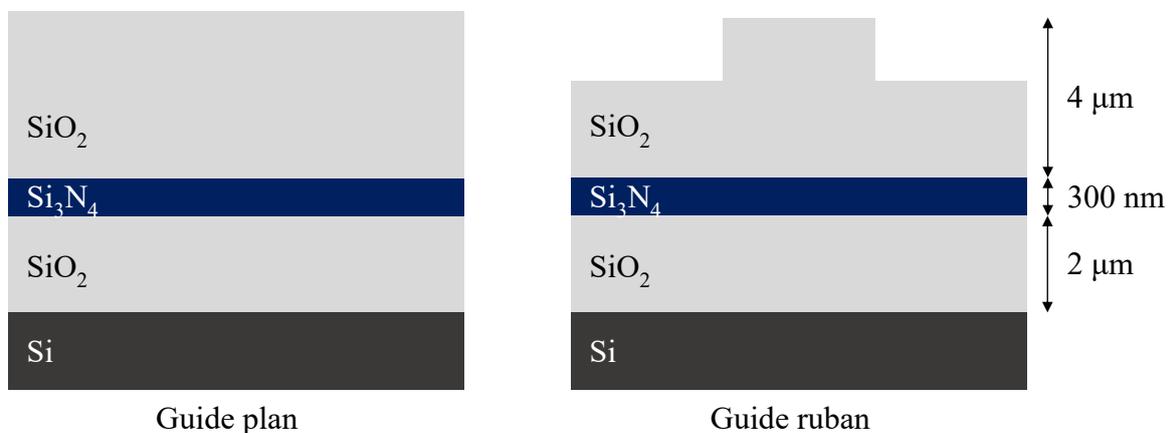


Figure 1.11 – Vue schématique simplifiée des configurations transversales de deux guides d'onde en Si_3N_4 fabriqués et caractérisés à 633 et 800 nm dans l'étude de Garces et al [29]

L'application visée est étroitement liée à la longueur d'onde et impose donc un choix de matériau guidant présentant de bonnes performances en termes de transmission dans le domaine du visible. La Figure 1.12 propose une vue schématique permettant de situer les principales applications en optique intégrée et les trois principaux matériaux en fonction de la longueur d'onde. Dans la majorité des cas, les couches de SiO_2 et Si_3N_4 sont fabriquées à l'aide de

techniques compatibles CMOS telles que l'oxydation thermique ou encore par dépôt CVD⁹ basses pressions et/ou plasma.

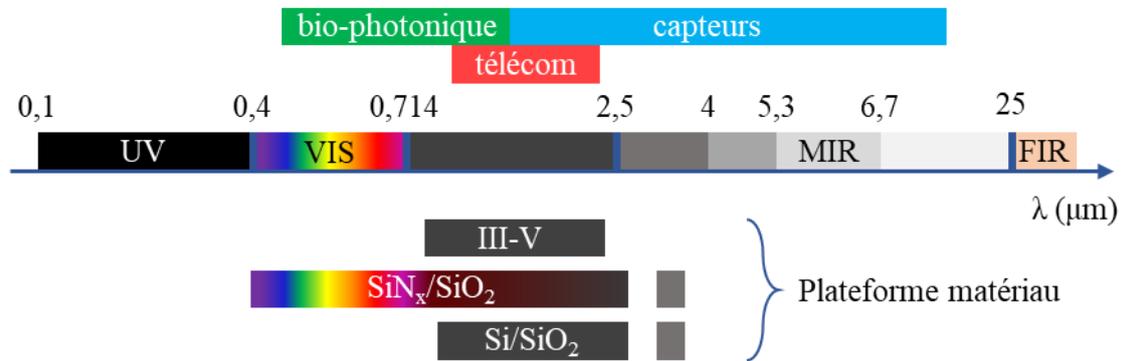


Figure 1.12 – Vue schématique des plages d'utilisation des principaux matériaux utilisés en photonique intégrée sur silicium en fonction de la longueur d'onde et de leurs applications [30]. [Les définitions d'acronymes sont les suivantes : Ultra-Violet (UV) ; Visible (VIS) ; Proche Infra-Rouge (NIR) ; Moyen Infra-Rouge (MIR) ; Infrarouge Lointain (FIR)].

De nombreuses briques de base sont déjà disponibles, notamment les guides, les coupleurs directionnels ou encore les coupleurs à interférences multimodes. Le Tableau 1 présente les principales dispositifs actifs et passifs disponibles à base de SOI et SiN_x.

Le principal inconvénient de la technologie SiN_x est qu'il n'existe aucune source optique, détecteur, amplificateur et modulateur encore disponibles dans les processus génériques des principales fonderies. Cependant, la gamme de longueurs d'onde d'opération s'étend du visible à l'infrarouge moyen et présente de bonnes performances en transmission dans cette gamme de longueur d'onde. L'intégration de briques de base actives est possible mais nécessite une approche hybride ou « hétérogène » avec des puces (issues de plateforme InP ou silicium) fabriquées séparément.

⁹ « Chemical Vapor Deposition »

Fonderie		Imec	CEA-LETI	IME	LioniX	IMB-CNM
Plateforme		SOI	SOI	SOI	SiN _x	SiN _x
Guides	RWVG	■	■	■	■	■
	SWVG	■	■	■	■	■
Coupleurs	Y-B	■	■	■	■	■
	DC	■	■	■	■	■
	MMI	■	■	■	■	■
Entré/sortie	SPGC	■	■	■	■	■
	PSGC	■	■	■	■	■
	SSC	■	■	■	■	■
Actif	SOA	■	■	■	■	■
	Laser DFB	■	■	■	■	■
	Laser DBR	■	■	■	■	■
	PD	■	■	■	■	■

Tableau 1 – Synthèse (modifiée de [30]) des briques de base disponibles de 5 grandes fonderies. Le code couleur utilisé est : ■ = disponible/possible, ■ = non disponible/possible. [Les significations des abréviations sont : RWVG = rib waveguide (guide en ruban) ; SWVG = strip waveguide ; Y-B = Y-branch (jonction Y) ; DC = directionnal coupler ; MMI = multimode interference ; PSGC = single polarization grating coupler ; PSGC = polarization splitting grating coupler ; SSC = spot-size converter ; SOA = semiconductor optical amplifier ; DFB = distributed feedback ; DBR = distributed Bragg reflector].

1.2.2 Plateforme SiO_xN_y

L'oxynitride de silicium ou SiO_xN_y est un matériau plus récent profitant des développements en technologie SiN_x. Il bénéficie donc de propriétés optiques et des techniques de fabrication très similaires.

Plusieurs travaux sur les propriétés du SiO_xN_y dans plusieurs gammes de longueur d'onde ont été menés. A titre d'exemple, pour le domaine du visible, une étude de Rebib et al., publiée en 2008 [31], propose une caractérisation de différentes compositions de films minces en SiO_xN_y, déposés par pulvérisation cathodique réactive. Un graphique modifié et extrait de cette étude est présenté en Figure 1.13. Une autre étude dans la même gamme de longueurs d'onde a été réalisée à l'aide de la technique de dépôt par PECVD¹⁰ par Jung et al en 2007 [32]. Le facteur de transmission a été mesuré et présenté sous forme graphique en Figure 1.14. Les résultats attestent d'un facteur de transmission de 60 à plus de 90% pour le SiO_xN_y dans la plage du visible.

¹⁰ « Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition »

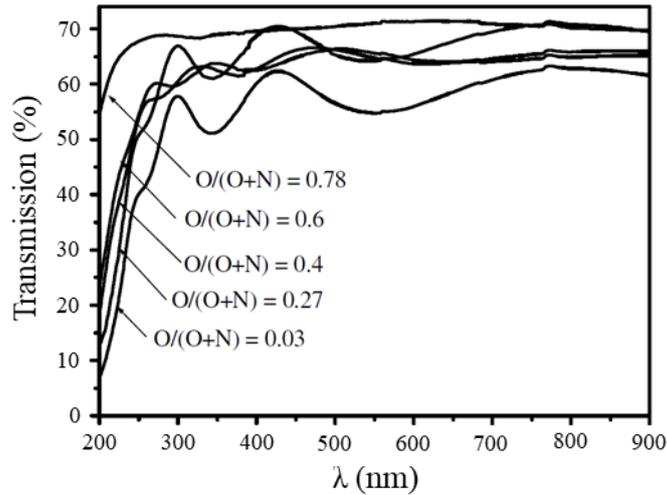


Figure 1.13 – Spectre de transmission UV-visible de couches minces de SiO_xN_y déposées par pulvérisation cathodique réactive [31]. La composition des couches diffère par leurs rapports $\text{O}/(\text{O}+\text{N})$ où O et N sont les concentrations atomiques d’oxygène et d’azote, respectivement.

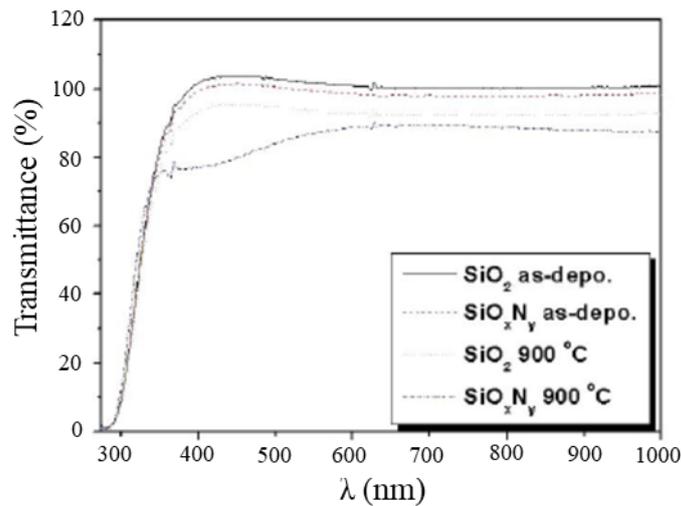


Figure 1.14 – Spectre de transmittance UV-visible de couches minces de SiO_2 et SiO_xN_y avec et sans recuit haute température déposées par PECVD [32].

L’attractivité du SiO_xN_y se justifie en partie par une large accordabilité de l’indice de réfraction n_{SiON} sur une large plage comprise entre $n_{\text{SiO}_2} = 1,46$ et $n_{\text{Si}_3\text{N}_4} = 2,01$ à $\lambda = 633$ nm permettant une grande flexibilité dans la conception des structures optiques. Cette plateforme permet donc d’ajuster la géométrie des guides et les propriétés de propagation à la fois pour des applications à faible contraste d’indice (convertisseur de mode fibre-puce) ou à plus fort contraste pouvant permettre de réaliser des applications à plus haute densité d’intégration (égalisateur de gain dynamique [33]).

La technologie SiO_xN_y est basée sur une combinaison d'un cœur composé d'oxynitride de silicium non stœchiométrique, encapsulées d'une gaine composée de silice (SiO_2). La géométrie transversale de guides d'ondes la plus utilisée est une configuration en guides enterrés. Une vue schématique de la configuration transversale utilisé dans les travaux de Tsuchizawa et al [34] d'un guide d'onde faible pertes ($\alpha_{\text{linéique}} = 0,3 \text{ dB.cm}^{-1}$) développés à 850 nm est présentée en Figure 1.15. L'obtention de telles pertes s'explique par la très faible différence d'indice de réfraction cœur/gain (3%). Pour cela, les épaisseurs des couches déposées de SiO_2 ($> 6\mu\text{m}$) de gaine et de SiO_xN_y ($1,1 \mu\text{m}$) de cœur ainsi que la largeur des guides ($2,2 \mu\text{m}$) doivent être beaucoup plus grandes que sur la plateforme SiN_x ou même SOI. Néanmoins, ce dimensionnement n'autorise pas un fonctionnement monomode à cette longueur d'onde même si des travaux très récents ont été rapportés des configurations non enterrées avec une gaine d'air permettant une propagation monomode dans des guides en SiO_xN_y [35].

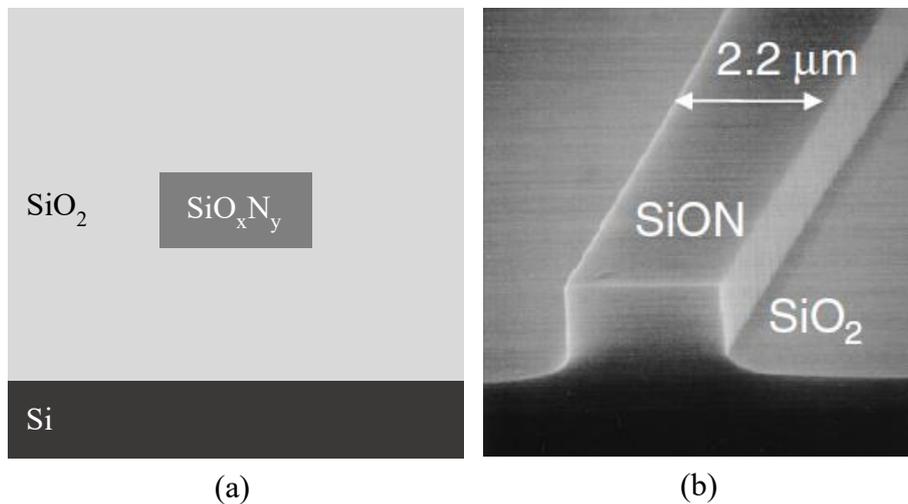


Figure 1.15 – Vue (a) schématique de la configuration enterrée et (b) au MEB du cœur des guides d'onde fabriqués en SiO_xN_y par Tsuchizawa et al [34].

Sur cette base, des structures de division de puissance par interférences multimodes ont aussi été conçues et fabriquées. De tels dispositifs ont montré des pertes d'insertion aussi basses que 0,3 dB/coupleur. Une vue d'ensemble de la distribution de champ et une vue optique du coupleur MMI est présentée en Figure 1.16.

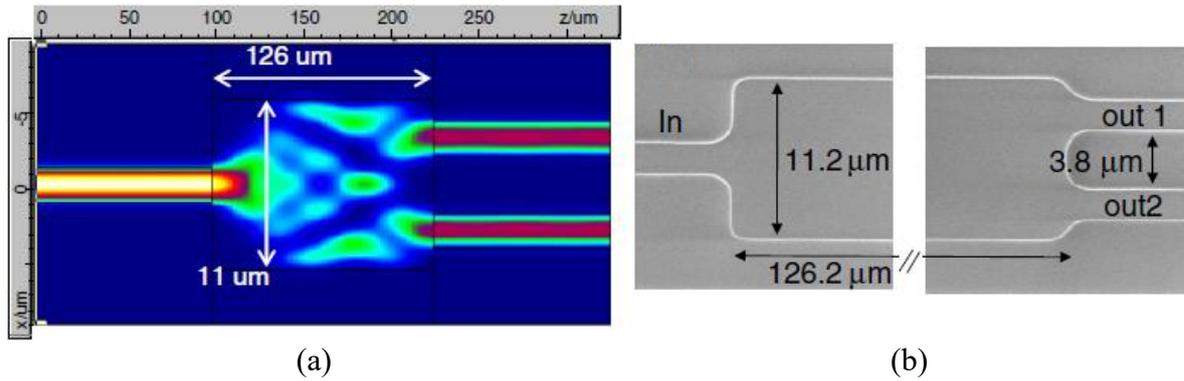


Figure 1.16 – Vue (a) de la distribution de champ simulé en environnement FIMMPROP et (b) dimension obtenues par analyse dimensionnelle au MEB du coupleur MMI 50/50 conçu et fabriqué par Tsuchizawa et al [34].

Cette étude a aussi permis de prouver la possibilité d'intégration de composants actifs fabriqués sur plateforme SOI avec des structures de base en SiO_xN_y . La Figure 1.17 illustre une nano-photodiode Si avec une antenne à plasmon de surface qui a pu être intégrée dans une structure en H mettant en œuvre les guides et coupleurs MMI 50/50 en SiO_xN_y . De plus, les pertes par propagation, qui ont été obtenues avec cette plateforme, atteignent $0,2 \text{ dB}\cdot\text{cm}^{-1}$. Dans la plupart des travaux présentés dans la littérature, la bande passante des coupleurs MMI est de l'ordre de 50 nm autour de la longueur d'onde d'opération. La fabrication des motifs de la couche de cœur des guides et des coupleurs a été réalisée à partir d'un procédé de photolithographie i-line. Les coupleurs MMI développés ont pu montrer une robustesse élevée aux dérives de fabrication.

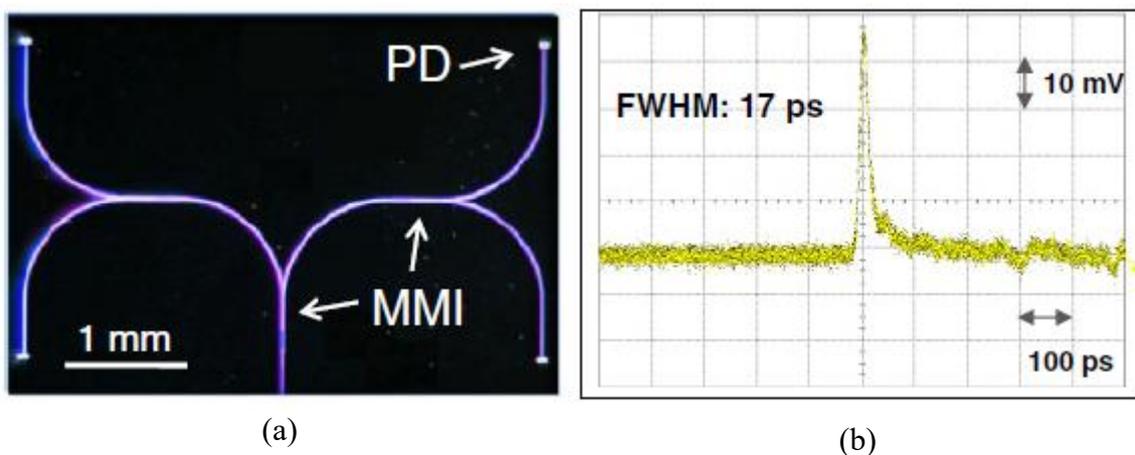


Figure 1.17 – (a) Vue optique de la structure développée utilisant les guides d'onde, les coupleurs MMI et une nano-photodiode Si. (b) Réponse électrique de cette dernière à une impulsion laser de 2ps à 780 nm.

D'autres travaux autour de l'utilisation du SiO_xN_y ont été menés en utilisant les propriétés d'accordabilité de son indice de réfraction pour des applications de biodétection. Par exemple, dans une étude de Guider et al publiée en 2015 [36], des structures photoniques à base de micro-anneaux en SiO_xN_y ont été conçues et fabriquées mettant en lumière des pertes par propagation (régime monomode) de $1-2,7 \text{ dB.cm}^{-1}$ à $\lambda = 850 \text{ nm}$.

1.2.3 Performances de guidage et de division de puissance en optique intégrée du visible et proche infrarouge

Il est important de rappeler que les contraintes de ce projet sont déterminées par l'application d'imagerie dans une large plage du domaine visible et se situent sur le régime de propagation, les pertes par propagation, le dimensionnement du cœur de guidage et, enfin les pertes d'insertion et le déséquilibre de puissance des coupleurs MMI.

Afin de déterminer les voies à suivre en termes de développement technologique des briques de base que ce projet propose de développer, une vue globale des critères pertinents de comparaison entre nos travaux et ceux d'études déjà publiées pour les guides et les coupleurs MMI est présentée sous la forme de tableau de synthèse.

A ce titre et en s'appuyant sur une revue la plus exhaustive possible de la littérature sur le sujet, le Tableau 2 recense les performances des guides développés en SiN_x et SiO_xN_y . Par comparaison, nous avons choisi de ne reporter que deux études opérant dans le proche IR. Notons que l'état de l'art recense de très nombreux travaux utilisant les deux plateformes dans ce domaine spectral.

Le Tableau 3 recense les performances de structures de division de puissance notables en SiN_x et SiO_xN_y . Un constat très similaire a pu être fait vis-à-vis de la quantité de travaux effectués dans le domaine du proche IR en comparaison du visible. De plus, peu de données quantitatives en termes de pertes de déséquilibre de puissance (DP) et de plage d'opération ($\Delta\lambda_{op}$) sont présentées dans ce domaine.

Réf.	λ (nm)	Plateforme	Propagation	H (nm)	L (nm)	$\alpha_{\text{linéique}}$ (dB/cm)
[37]	532	SiN _x	mono	180	300	1,5
			multi	180	400	<1
			multi	180	700	<1
[38]	660	SiN _x	mono	100	700	0,51
[37]	780	SiN _x	mono	180	500	4
			multi	180	1000	<1
[34]	850	SiO _x N _y	multi	1100	2200	0,2-0,3
[36]	850	SiO _x N _y	mono	300	900	<2,7
			mono	300	1000	<1
[33]	1480+	SiO _x N _y	-	1300	3000	0,2
[39]	1550	SiO _x N _y	-	320	2000	4,07

Tableau 2 – Synthèse des performances de guides d’onde conçus et fabriqués pour opérer dans le domaine du visible et du proche IR. H et L correspondent à la hauteur et largeur du cœur des guides recensés.

Réf.	λ (nm)	Plateforme	Configuration	$\alpha_{\text{insertion}}$ (dB)	DP (dB)	$\Delta\lambda_{\text{op}}$ (nm)
[40]	532	SiN _x	MMI 2 × 2	0,6 à 1,2	0,04 (1%)	-
[34]	850	SiO _x N _y	MMI 2 × 2	0,3	0,1 à 0,2	-
[41]	1550	SOI	Y	0,28	-	80
[42]	1550	SOI	MMI 1 × 2	0,06	-	100
[43]	1550	SOI	MMI SWG 2 × 2	1	0,6	450

Tableau 3 – Synthèse des performances de dispositifs de division de puissance conçus et fabriqués pour opérer dans le domaine du visible et du proche IR.

Les performances recensées permettent d’identifier deux principaux verrous que ce projet souhaite lever. En effet, à notre connaissance, il n’existe pas de travaux portant sur la conception et la fabrication de guides maintenant un régime de propagation monomode dans la totalité du domaine visible (400-800 nm). De plus, la configuration de guidage est toujours limitée par l’utilisation de deux matériaux différents, soit SiN_x/SiO₂, soit SiO_xN_y/SiO₂.

La technique de dépôt par PECVD étant dans un état de maturité avancée, un procédé optimisé permettrait de réaliser un guidage mono-matériau et de profiter encore plus de l'atout d'accordabilité de l'indice de réfraction du SiO_xN_y .

Par ailleurs, le LN2 porte un effort significatif depuis de nombreuses années notamment en étudiant l'effet de la fréquence plasma mise en œuvre dans la technique de dépôt par PECVD [44], [45]. Par exemple, cela a permis d'établir des relations entre la fréquence du plasma de dépôt par PECVD et l'absorption pour le Si_xN_y . Cette étude a été étendue jusqu'à la fabrication de guides plan pour l'excitation de fluorophores par champ évanescent et appuie donc le potentiel d'un prototypage rapide de couches de SiO_xN_y déposées par PECVD ; technique que ce projet ambitionne d'utiliser.

1.3 Conclusion

Les différentes sections de ce chapitre ont permis de situer ce projet de thèse dans le contexte de la collaboration des deux laboratoires en vue de la conception et la fabrication de briques de base en optique intégrée pour une application d'imagerie dans le domaine du visible. Une technique d'imagerie très haute résolution a été choisie et des travaux préliminaires réalisés en espace libre ont permis de démontrer la faisabilité d'un tel système en espace libre.

Un état de l'art sur la photonique sur silicium a permis de situer les technologies les plus avancées en termes de niveau d'intégration, de techniques, de matériaux utilisés et de technique de fabrication. Cependant, la plateforme SOI met en œuvre le silicium qui est un matériau incompatible avec le domaine du visible.

Les besoins en applications aux longueurs d'onde du visible, des matériaux déjà utilisés sur la plateforme SOI et présentant de hautes performances de transmission dans le visible, ont été étudiées. Pour cela, les plateformes SiN_x et SiO_xN_y ont fait l'objet d'une présentation plus détaillée et notamment du point de vue des structures passives de guidage et de division de puissance optique.

Parmi les matériaux utilisables dans le domaine visible, le SiO_xN_y présente de nombreux atouts directement en lien avec les contraintes de conception et de fabrication compatibles avec la technologie CMOS. Une étude sous la forme d'un recensement des performances des structures de guidage et de division de puissance de l'état de l'art dans le visible et le proche infrarouge ont permis de mettre en exergue des lacunes que ce projet s'attachera à combler.

En effet, ce projet propose de concevoir et fabriquer les guides d'onde et les coupleurs MMI 50/50 capables de fonctionner dans le visible et dont l'originalité se situera dans la composition matérielle des couches guidantes. L'utilisation du SiO_xN_y comme seul matériau pour le développement d'une plateforme « tout SiON » ($\text{SiO}_x\text{N}_y/\text{SiO}_x\text{N}_y$) permettra de profiter d'une

accordabilité accrue par rapport à la plateforme SiO_xN_y standard ($\text{SiO}_x\text{N}_y/\text{SiO}_2$) en offrant une plus grande liberté dans le dimensionnement des structures.

Une attention particulière sera portée sur le maintien du régime de propagation monomode dans une large plage du domaine visible ainsi que sur les pertes par propagation vis-à-vis de la technologie de fabrication disponible.

Le Chapitre 2 va s'attacher à préciser les choix technologiques et de conception, qui seront effectués pour répondre aux contraintes du projet en prenant appui sur l'état de l'art réalisé.

CHAPITRE 2 : MODELISATION DES STRUCTURES PASSIVES : GUIDES D'ONDE ET COUPLEURS A INTERFERENCES MULTIMODES

Ce deuxième chapitre s'attache à présenter la méthodologie de modélisation de deux briques de base retenues et explicitées dans le premier chapitre, à savoir les guides d'onde et les coupleurs à interférences multimodes (MMI¹¹) en vue de leur utilisation dans un système interférométrique miniaturisé à synthèse d'ouverture, opérant dans le visible et sur la plus large bande spectrale possible. Cette méthodologie objective de prédire les performances de ces deux briques de base en tenant compte des spécificités de leur structure.

Ce chapitre se décompose en trois grands volets :

- Tout d'abord, de brefs rappels théoriques sur la propagation de la lumière en milieu guidé, en prenant appui sur une approche géométrique puis ondulatoire, sont présentés afin de rappeler les mécanismes et grandeurs physiques liées aux propriétés des guides d'onde. Le principe de l'effet d'auto-imagerie fait ensuite l'objet d'une courte introduction afin de présenter ses caractéristiques physiques et de comprendre de façon intuitive les mécanismes d'interférences mis en œuvre dans les coupleurs MMI.
- Dans un second temps, les différentes contraintes associées au projet sont présentées. Elles sont différenciées en deux catégories : contraintes propres aux choix du projet et contraintes liées aux procédés de fabrication des briques de base. Cette section est suivie par la présentation du modèle de simulation utilisé pour le dimensionnement des guides d'onde et des coupleurs MMI.
- Dans un troisième temps, il s'en suit une présentation et une analyse des résultats de simulation au regard du modèle et des contraintes pour les guides d'onde rectilignes et à courbure. De la même manière, les résultats de simulation du dimensionnement des coupleurs MMI 50/50 retenus sont également détaillés.

¹¹ « Multi Mode Interférences »

2.1 Brefs rappels théoriques : optique guidée et effet d'auto-imagerie

2.1.1 Notions de réflexion totale et d'angle d'acceptance dans un guide d'onde

De façon générale, l'étude de la propagation de la lumière dans un guide d'onde optique peut se faire de deux manières différentes : soit par une approche dite d'optique géométrique, soit par une approche dite ondulatoire ; cette dernière faisant appel à la théorie électromagnétique en prenant appui sur les célèbres équations de Maxwell.

Cette section est dédiée à des rappels traitant du cas d'un guide d'onde plan, en se basant sur une description simplifiée combinant les deux approches. Bien qu'accessible à partir de nombreux ouvrages généraux déjà publiés, elle permet au lecteur de ce manuscrit de comprendre rapidement les paramètres clé caractéristiques de la propagation d'une onde dans un guide plan et plus particulièrement d'aider à la compréhension de la propagation dans un guide d'onde enterré ; objet de notre étude.

Il est important de rappeler que l'approche par l'optique géométrique permet une compréhension très intuitive du principe des guides d'onde. Cependant, cette approche atteint ses limites lorsque les dimensions d'un guide d'onde sont de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde. Dans ce cas particulier, l'expérience indique que seulement certains modes de propagation sont autorisés alors que l'approche géométrique indique qu'une infinité de rayons de propagation sont possibles. La limitation de cette approche descriptive est liée à la non-consideration du comportement ondulatoire de la lumière. Cette section est donc conçue pour présenter cette limitation par une approche hybride entre une description géométrique et ondulatoire pour la compréhension de la propagation de la lumière dans un guide d'onde plan.

La propagation de la lumière dans un milieu se base sur le confinement transverse d'une onde électromagnétique dans un cœur d'indice de réfraction n entouré d'une gaine dont l'indice de réfraction est généralement inférieur ($n_{\text{gaine}} < n_{\text{cœur}}$). La gaine peut être composée d'un matériau diélectrique de composition différente comme par exemple, une structure poreuse [46], un dopage différencié du matériau de cœur [47] ou d'un autre matériau, comme de l'air [48]. A ce titre, différentes configurations de guides d'onde cœur et gaine sont illustrées en Figure 2.1.

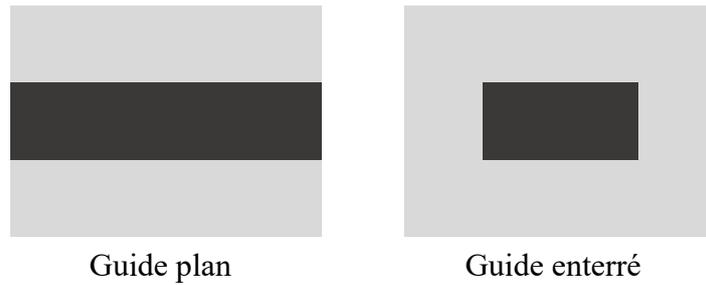


Figure 2.1 – Vue en coupe des deux configurations traditionnelles de guides d’onde. Les régions en couleur sombre correspondent au matériau possédant l’indice de réfraction le plus élevé.

Lorsque la lumière interagit avec l’interface cœur/gaine, la différence de contraste d’indice entre les deux matériaux impose une réflexion totale interne de l’onde pour des angles d’incidence plus grands que $\theta_c = \arcsin(n_{\text{gaine}} / n_{\text{cœur}})$. Cette condition de réflexion est schématisée en Figure 2.2 par application de la loi de Snell-Descartes bien connue en optique géométrique.

Elle permet de définir l’angle dit d’acceptance d’un guide par la relation $\varphi_A = \arcsin \sqrt{n_{\text{cœur}}^2 - n_{\text{gaine}}^2}$ ou encore par la relation d’ouverture numérique $NA = \sin(\varphi_A)$. Lorsque l’approximation aux petits angles est possible, la relation sur l’ouverture numérique devient : $NA \approx \varphi_A \approx \sqrt{n_{\text{cœur}}^2 - n_{\text{gaine}}^2}$.

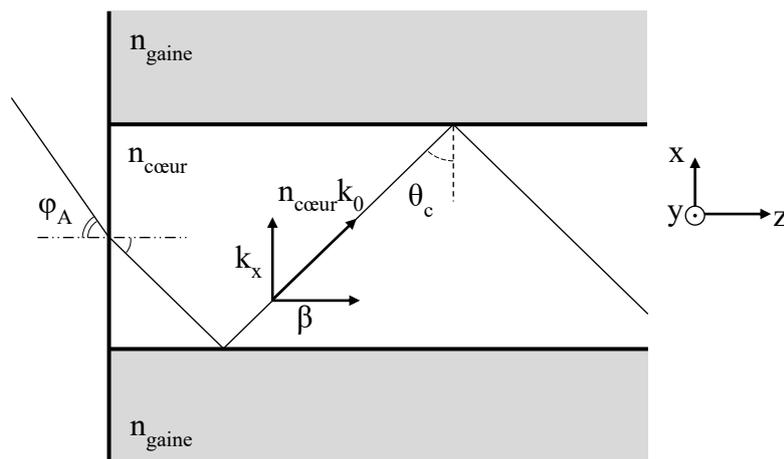


Figure 2.2 – Vue schématique du principe de réflexion totale interne dans un guide plan. La propagation de l’onde est matérialisée par deux grandeurs : le vecteur d’onde k_x décrivant le confinement latéral et le vecteur β décrivant la propagation longitudinale.

La notion de polarisation des modes propagés constitue également un point fondamental dans l'étude des guides d'onde et doit être prise en compte lors de la modélisation des guides en SiO_xN_y . Celle-ci sera contrôlée lors de la caractérisation optique des structures.

Il existe deux états différents de polarisation pour les modes guidés dans un guide plan : le mode Transverse Électrique dit TE et le mode Transverse Magnétique dit TM [49]. Ceux-ci sont représentées sur la Figure 2.3.

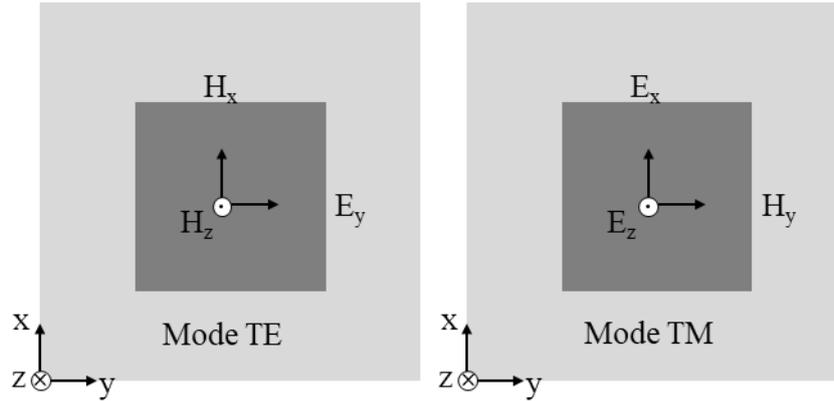


Figure 2.3 – Représentation schématique de la propagation des modes dits Transverse Électrique (TE) et Transverse Magnétique (TM).

La notion de réflexion est importante en propagation et se doit d'être quantifiée. A ce titre, elle se caractérise particulièrement par le coefficient de réflexion totale pour une polarisation TE (ou TM), correspondant au champ électrique (magnétique) perpendiculaire au plan d'incidence.

Ce coefficient de réflexion totale peut être obtenu par le développement des équations de Fresnel (dérivées des équations de Maxwell) en considérant les conditions de continuité des champs électrique et magnétique aux interfaces. Il est défini comme le rapport des amplitudes du champ réfléchi sur le champ incident. En fonction de la polarisation, le coefficient de réflexion (valeur complexe) s'exprime sous la forme suivante :

$$r_{\text{TE}} = \frac{n_{\text{cœur}} \cos \theta_c - i \sqrt{n_{\text{cœur}}^2 \sin^2 \theta_c - n_{\text{gain}}^2}}{n_{\text{cœur}} \cos \theta_c + i \sqrt{n_{\text{cœur}}^2 \sin^2 \theta_c - n_{\text{gain}}^2}} = e^{-i\phi_{\text{TE}}} \quad (2.1)$$

$$r_{\text{TM}} = \frac{i \frac{n_{\text{cœur}}}{n_{\text{gain}}} \sqrt{n_{\text{cœur}}^2 \sin^2 \theta_c - n_{\text{gain}}^2} - n_{\text{gain}} \cos \theta_c}{i \frac{n_{\text{cœur}}}{n_{\text{gain}}} \sqrt{n_{\text{cœur}}^2 \sin^2 \theta_c - n_{\text{gain}}^2} + n_{\text{gain}} \cos \theta_c} = e^{-i\phi_{\text{TM}}} \quad (2.2)$$

L'amplitude de ces coefficients est unitaire et cela montre que la totalité de la puissance du champ électromagnétique reste confiné dans le cœur, en accord avec le phénomène de réflexion totale interne. Le champ électromagnétique subit seulement un déphasage qui peut s'écrire en fonction de la polarisation selon les relations suivantes :

$$\phi_{\text{TE}} = 2 \arctan \left(\frac{\sqrt{n_{\text{cœur}}^2 \sin^2 \theta_c - n_{\text{gaine}}^2}}{n_{\text{cœur}} \cos \theta_c} \right) = 2 \arctan \left(\frac{\gamma_x}{k_x} \right) \quad (2.3)$$

$$\phi_{\text{TM}} = 2 \arctan \left(\frac{n_{\text{cœur}}}{n_{\text{gaine}}} \frac{\sqrt{n_{\text{cœur}}^2 \sin^2 \theta_c - n_{\text{gaine}}^2}}{n_{\text{gaine}} \cos \theta_c} \right) = 2 \arctan \left(\frac{n_{\text{cœur}}^2}{n_{\text{gaine}}^2} \frac{\gamma_x}{k_x} \right), \quad (2.4)$$

avec $k_x = n_{\text{cœur}} k_0 \cos \theta_c$ et $k_{\text{cœur}} = n_{\text{cœur}} k_0$ définissant la composante perpendiculaire du vecteur de propagation (voir Figure 2.2) et $\gamma_x = k_0 \sqrt{n_{\text{cœur}}^2 \sin^2 \theta_c - n_{\text{gaine}}^2}$ qui apparaît comme la constante de décroissance du champ évanescents dans la gaine du guide d'onde.

La définition d'un terme constant permettant de décrire un mode guidé est importante. Elle permettra ensuite de différencier entre eux les différents modes guidés. Pour cela, la constante de propagation effective β du mode guidé et son indice effectif n_{eff} sont décrits par les relations suivantes :

$$\beta = n_{\text{cœur}} k_0 \sin \theta_c \quad (2.5)$$

$$n_{\text{eff}} = \frac{\beta}{k_0}. \quad (2.6)$$

L'indice effectif est une notion très importante attachée aux propriétés de guidage d'une onde. Il peut être interprété comme l'indice de réfraction d'un matériau équivalent qui donnerait des propriétés de propagation identiques à celles obtenues pour un guide d'onde. Cette notion est particulièrement importante car elle permet de comprendre, de façon relativement intuitive, la propagation d'un mode dans un guide d'onde.

Une façon d'expliquer la présence de modes discrets dans un guide d'onde est d'étudier la propagation d'une onde plane dans un guide plan comme rapporté en Figure 2.4. En effet, cela

implique une quantification des valeurs accessibles pour la constante de propagation effective β .

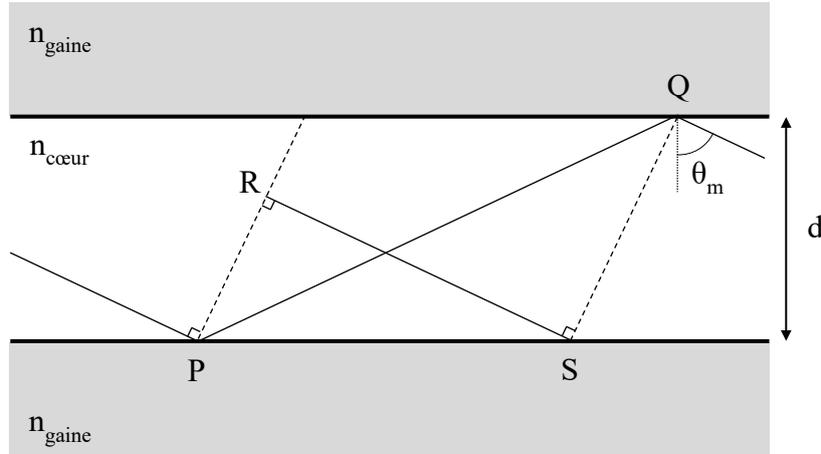


Figure 2.4 – Illustration de la différence de chemin optique entre les rayons PQ et RS. Pendant la propagation de ces rayons, le front d'onde doit être conservé.

Pour un mode de propagation TE, en admettant que le mode m puisse se décrire en une propagation rectiligne sur les droites, (P, Q) et (R, S), de telle façon que P et R ainsi que Q et S appartiennent aux mêmes fronts d'onde, la différence de chemin optique entre les deux rayons de ce mode m peut se décrire avec les relations suivantes :

$$\begin{aligned}
 n_1 k_0 PQ - 2\phi_{\text{TE}}[\theta_m] - n_1 k_0 RS &= 2m\pi \\
 n_1 k_0 PQ - 2\phi_{\text{TE}}[\theta_m] - n_1 k_0 PQ \sin\left(2\theta_m - \frac{\pi}{2}\right) &= 2m\pi \\
 n_1 k_0 PQ(2 \cos^2 \theta_m) - 2\phi_{\text{TE}}[\theta_m] &= 2m\pi \\
 2n_1 k_0 d \cos \theta_m - 2\phi_{\text{TE}}[\theta_m] &= 2m\pi \tag{2.7}
 \end{aligned}$$

Le premier terme de cette dernière équation correspond à un aller-retour de l'onde dans la direction transverse. La condition d'accord de phase correspond de manière équivalente au principe de confinement transversal. En insérant les relations (2.3) et (2.5) dans (2.7), la relation pour β_m pour une polarisation TE s'écrit :

$$d \sqrt{n_1^2 k_0^2 - \beta_m^2} - 2 \arctan\left(\frac{\sqrt{\beta_m^2 - n_2^2 k_0^2}}{\sqrt{n_1^2 k_0^2 - \beta_m^2}}\right) = m\pi . \tag{2.8}$$

Pour une polarisation TM, l'expression suivante est obtenue :

$$d \sqrt{n_1^2 k_0^2 - \beta_m^2} - 2 \arctan \left(\frac{n_1^2}{n_2^2} \sqrt{\frac{\beta_m^2 - n_2^2 k_0^2}{n_1^2 k_0^2 - \beta_m^2}} \right) = m\pi. \quad (2.9)$$

Ces équations permettent d'accéder de façon implicite à la relation entre β_m et k_0 . Cependant, les équations (2.8) et (2.9) ne donnent pas de solutions analytiques pour déterminer la valeur des constantes de propagation β_m .

A ce stade, une approche hybride par une description géométrique et ondulatoire a permis de mettre en exergue l'existence d'une quantification de la propagation à l'intérieur d'un guide d'onde que l'approche géométrique seule ne peut pas expliquer. Il est donc nécessaire d'utiliser l'approche ondulatoire afin de décrire rigoureusement les mécanismes de propagation qui constituent les fondements théoriques utilisés pour la modélisation et la simulation des guides d'onde. Cette approche est décrite dans la section suivante. Elle constitue un support important pour notre étude et, à ce titre, de brefs rappels des principales équations et paramètres clés caractérisant la propagation d'une onde dans un guide plan y sont présentées.

2.1.2 Équation de propagation – Notion de fréquence de coupure d'un guide d'onde

2.1.2.1 Équation de propagation en régime harmonique

La description par l'optique ondulatoire de la propagation d'ondes lumineuses dans un guide d'onde diélectrique est basée sur l'utilisation des équations de Maxwell, et quatre équations aux dérivées partielles, très connues, en constituent le fondement :

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon} \quad (2.10)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0 \quad (2.11)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (2.12)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} . \quad (2.13)$$

avec $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$ où ε_0 représente la permittivité diélectrique du vide et ε_r la permittivité relative du milieu et enfin μ_0 la perméabilité magnétique du vide.

Dans le cas de matériaux diélectriques supposés parfaits, ces équations peuvent être simplifiées. En effet, la valeur de densité de charge ρ et la contribution du vecteur densité de courant \vec{J} dans ces matériaux sont négligées. Avec cette simplification et en combinant les équations (2.12) et (2.13), la relation suivante est obtenue :

$$\Delta \vec{U} - \varepsilon \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{U}}{\partial t^2} = 0 . \quad (2.14)$$

Cette expression est appelée équation de propagation, obtenue en utilisant l'identité $\nabla \times \nabla \times \vec{U} = \nabla \cdot (\nabla \cdot \vec{U}) - \Delta \vec{U}$ où le vecteur \vec{U} peut représenter le vecteur de champ électrique \vec{E} ou magnétique \vec{H} .

En considérant le régime harmonique, les solutions de l'équation (2.14) sont de la forme $\vec{U} = \vec{A}(x, y)e^{i(\beta z - \omega t)}$ et permettent d'obtenir l'équation de Helmholtz suivante :

$$\Delta_T \vec{A} + (n^2 k_0^2 - \beta^2) \vec{A} = 0. \quad (2.15)$$

L'opérateur Δ_T est défini comme le Laplacien transverse s'appliquant sur les composantes (x, y) . D'après l'expression (2.15), les seules valeurs possibles de β permettant la propagation de modes confinés dans un guide d'onde plan sont comprises entre $n_{\text{gaine}} k_0$ et $n_{\text{cœur}} k_0$. Dans ces cas, les solutions sont de nature oscillatoire dans le cœur et exponentielles dans la gaine. La forme exponentielle du champ dans la gaine prend l'appellation de partie évanescente. Pour les valeurs de β plus petites que $n_{\text{gaine}} k_0$, les solutions sont oscillatoires partout dans le guide d'onde plan et la lumière n'est alors plus confinée dans le cœur du guide. Ces modes de propagation sont dits radiatifs.

Dans le cas d'une propagation en mode TE, seules les contributions des champs E_y , H_x et H_z sont non nulles. En considérant une propagation selon la direction z avec le vecteur de propagation β et une fréquence ω , les équations de Maxwell se réduisent de la manière suivante :

$$-i\beta E_y = i\omega\mu_0 H_x \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} = i\omega\mu_0 H_z \quad (2.17)$$

$$i\beta H_x - \frac{\partial H_z}{\partial x} = -i\omega\varepsilon E_y \quad (2.18)$$

En combinant ces équations et toujours en régime harmonique, l'équation d'onde suivante est obtenue :

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = i\omega\mu_0 (i\beta H_x + i\omega\varepsilon E_y) = (\beta^2 - k^2) E_y \quad (2.19)$$

Dans l'équation (2.19), la valeur de k dépend de la région du guide d'onde d'intérêt. Pour un guide d'onde plan d'épaisseur de cœur d , l'indice de réfraction du cœur $n_{\text{cœur}}$ et de la gaine n_{gaine} , les expressions du champ E_y sont les suivantes :

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} - \gamma_x^2\right)E_y = 0 \quad \text{pour } \left(x < -\frac{d}{2}; x > \frac{d}{2}\right) \quad (2.20)$$

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + k_x^2\right)E_y = 0 \quad \text{pour } \left(-\frac{d}{2} < x < \frac{d}{2}\right) \quad (2.21)$$

À l'aide des relations sur γ_x et k_x comme présenté dans la précédente section, les solutions de l'équation (2.20) sont exponentielles réelles alors que celles de l'équation (2.21) sont exponentielles imaginaires. Ces solutions peuvent s'écrire en utilisant la symétrie d'un guide d'onde plan sur le champ E_y :

$$E_y = Ae^{-\gamma_x(x-\frac{d}{2})} \quad \text{pour } \left(x > \frac{d}{2}\right) \quad (2.22)$$

$$E_y = B \frac{e^{ik_x x} \pm e^{-ik_x x}}{2} \quad \text{pour } \left(-\frac{d}{2} < x < \frac{d}{2}\right) \quad (2.23)$$

Les champs transverse E_y et H_z sont continus à l'interface cœur/gaine impliquant la continuité de E_y et $\frac{\partial E_y}{\partial x}$. Cette propriété est utilisée pour calculer la relation entre A et B et les deux équations suivantes montrent cette relation :

$$A = B \frac{e^{\frac{ik_x d}{2}} \pm e^{-\frac{ik_x d}{2}}}{2} \quad (2.24)$$

$$-\gamma_x A = -k_x B \frac{e^{\frac{ik_x d}{2}} \mp e^{-\frac{ik_x d}{2}}}{2i} \quad (2.25)$$

En associant ces deux expressions, les équations suivantes sont obtenues :

$$N = \frac{A}{B} = \frac{e^{\frac{ik_x d}{2}} \pm e^{-\frac{ik_x d}{2}}}{2} \quad (2.26)$$

$$N = \frac{k_x e^{\frac{ik_x d}{2}} \mp e^{-\frac{ik_x d}{2}}}{\gamma_x 2i} \quad (2.27)$$

$$N^2 = \frac{1}{1 + \frac{\gamma_x^2}{k_x^2}} = \frac{n_1^2 - n_{eff}^1}{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.28)$$

En injectant l'expression (2.28) dans les équations (2.22) et (2.23), les relations pour le champ E_y suivantes sont obtenues :

$$E_y = E_{y0} \sqrt{\frac{n_1^2 - n_{eff}^2}{n_1^2 - n_2^2}} e^{-\gamma_x(x-\frac{d}{2})} \quad \text{pour } \left(x > \frac{d}{2}\right) \quad (2.29)$$

$$E_y = E_{y0} \cos(k_x x) \text{ et } E_{y0} \sin(k_x x) \quad \text{pour } \left(-\frac{d}{2} < x < \frac{d}{2}\right) \quad (2.30)$$

Les relations (2.29) et (2.30) sont valables pour les modes pairs et impairs.

Les autres composantes relatives aux composantes du champ magnétique s'écrivent :

$$H_x = -\frac{n_{eff}}{Z_0} E_y \quad (2.31)$$

$$H_z = -\frac{i}{k_0 Z_0} \frac{\delta E_y}{\delta x}$$

Le terme Z_0 désigne l'impédance en espace libre avec $Z_0 = \mu_0 c$. Il est important de noter qu'aucune restriction n'a été appliquée sur la constante de propagation β .

Dans le cas d'une propagation en mode TM, un développement similaire peut être effectué. Le mode TM étant orthogonal au mode TE, les seules contributions non nulles des champs sont H_y , E_x et E_z . Les équations de Maxwell s'écrivent alors comme suit :

$$-i\beta H_y = -i\omega\varepsilon E_x \quad (2.32)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} = -i\omega\varepsilon E_z \quad (2.33)$$

$$i\beta E_x - \frac{\partial E_z}{\partial x} = i\omega\mu_0 H_y \quad (2.34)$$

Cela se réduit à une équation de propagation similaire aux expressions (2.20) et (2.21) pour H_y . Cependant, les conditions de continuité des champs H_y et E_z à l'interface impliquent une discontinuité de la dérivée de H_y :

$$\left[\frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial H_y}{\partial x} \left(\pm \frac{d}{2} \right) \right]_{\text{gainé}} = \left[\frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial H_y}{\partial x} \left(\pm \frac{d}{2} \right) \right]_{\text{coeur}} \quad (2.35)$$

Cette discontinuité du gradient de champ magnétique se traduit par une proportion de champ évanescent plus importante que pour les modes TE. Le développement de l'équation de propagation avec ces conditions aux limites permet de trouver les profils des modes TM :

$$H_y = H_{y0} \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{n_1^4}{n_2^4} \frac{n_1^2 - n_{eff}^2}{n_{eff}^2 - n_2^2}}} e^{-\gamma x \left(x - \frac{d}{2} \right)} \quad \text{pour } \left(x > \frac{d}{2} \right) \quad (2.36)$$

$$H_y = H_{y0} \cos(k_x x) \quad \text{et} \quad H_y = H_{y0} \sin(k_x x) \quad \text{pour } \left(-\frac{d}{2} < x < \frac{d}{2} \right) \quad (2.37)$$

Les autres composantes de champs s'écrivent :

$$E_x = \frac{n_{eff} Z_0}{n^2} H_y \quad (2.38)$$

$$E_z = \frac{iZ_0}{k_0 n^2} \frac{\partial H_y}{\partial x} \quad (2.39)$$

Les relations analytiques présentées dans cette section permettent de représenter le profil de champ des modes de propagation TE et TM.

A titre d'exemple, la Figure 2.5 représente la variation qualitative de l'amplitude des champs E_y et H_y des modes de propagation TE et TM, respectivement. Pour une raison pédagogique, les indices de réfraction, l'épaisseur et la longueur d'onde d'opération du guide d'onde plan ont été choisis de façon à mettre en lumière la discontinuité du champs H_y en propagation TM par rapport à E_y en propagation TE.

L'indice de réfraction de la couche de cœur est $n_{\text{cœur}} = 3,35$, celui de la gaine est $n_{\text{gaine}} = 1$, l'épaisseur de la couche de cœur illustrée en gris foncé est de $d = 240$ nm et la longueur d'onde d'opération est de $\lambda = 2,2$ μm . La différence d'indice relativement élevée entre le cœur et la gaine permet de mieux illustrer la discontinuité du champ H_y .

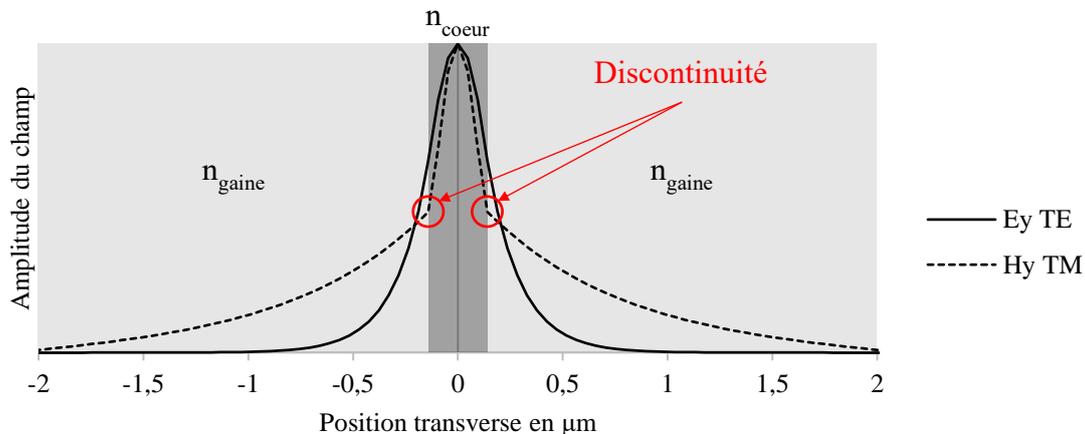


Figure 2.5 – Profils des premiers modes TE et TM pour un guide d'onde plan en considérant $n_{\text{cœur}} = 3.35$, $n_{\text{gaine}} = 1$ et $d = 240$ nm pour une longueur d'onde $\lambda = 2.2$ μm . Les dimensions de la couche de cœur sont délimitées par la partie en gris foncé. La discontinuité du champ H_y du mode de propagation TM à l'interface cœur/gaine est signalée en rouge.

A ce stade, les développements mathématiques permettent une meilleure compréhension de la propagation sous forme de modes discrets dans un guide d'onde décrits par l'équation de Helmholtz. De plus, cette équation illustre de façon explicite la forte dépendance de la constante de propagation β à l'indice de réfraction du guide d'onde. La quantification du nombre de modes autorisés dans un guide d'onde, dont chaque mode de propagation est décrit par sa

constante de propagation effective, aidera à la compréhension des interactions du contraste d'indice de réfraction cœur/gaine et du dimensionnement du cœur avec la propagation modale dans les guides d'onde. Ces derniers sont modélisés ultérieurement dans ce chapitre.

2.1.2.2 Équation de dispersion – Fréquence de coupure

Les courbes de dispersion constituent un outil essentiel pour des travaux en optique intégrée. En effet, elles donnent une compréhension directe des propriétés de propagation et des mécanismes de couplage associés.

La relation de dispersion pour le mode TE dans un guide plan peut être déduite par simplification des termes A et B en utilisant les équations (2.24) et (2.25) :

$$-\gamma_x \left(e^{ik_x \frac{d}{2}} \pm e^{-ik_x \frac{d}{2}} \right) = ik_x \left(e^{ik_x \frac{d}{2}} \mp e^{-ik_x \frac{d}{2}} \right) \quad (2.40)$$

$$\left[\frac{ik_x + \gamma_x}{ik_x - \gamma_x} e^{ik_x d} \right] = \pm 1 = e^{im\pi} \quad (2.41)$$

Les paramètres γ_x et k_x peuvent être remplacés par leur expression en fonction de β et ω afin d'obtenir la relation de dispersion suivante :

$$d \sqrt{n_1^2 \frac{\omega^2}{c^2} - \beta_m^2} - 2 \arctan \sqrt{\frac{\beta_m^2 - n_2^2 \frac{\omega^2}{c^2}}{n_1^2 \frac{\omega^2}{c^2} - \beta_m^2}} = m\pi \quad (2.42)$$

Le même développement est applicable au mode TM :

$$d \sqrt{n_1^2 \frac{\omega^2}{c^2} - \beta_m^2} - 2 \arctan \frac{n_1^2}{n_2^2} \sqrt{\frac{\beta_m^2 - n_2^2 \frac{\omega^2}{c^2}}{n_1^2 \frac{\omega^2}{c^2} - \beta_m^2}} = m\pi \quad (2.43)$$

Ces équations présentent un cas particulier pour lequel le confinement du mode de propagation n'est plus possible. Ce cas se produit lorsque la fréquence, dite fréquence de coupure, est atteinte. Celle-ci peut être calculée en utilisant les équations (2.42) ou (2.43) pour, respectivement, les modes TE ou TM lorsque la constante de propagation prend pour valeur $\beta = n_2 \frac{\omega}{c}$:

$$\left[\frac{\omega_m}{c} \right]_{\text{coupure}} = \frac{m\pi}{d\sqrt{n_1^2 - n_2^2}} \quad (2.44)$$

En dessous de $\frac{\omega}{c} = \frac{\pi}{d\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}$, le guide d'onde est strictement monomode.

Il est possible de réécrire ces équations en utilisant des termes normalisés [50]. La fréquence et la constante de propagation normalisée s'écrivent :

$$V = \frac{\omega}{c} d \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.45)$$

$$b = \frac{\beta^2 - k_2^2}{k_1^2 - k_2^2} \quad (2.46)$$

Les relations décrivant l'indice effectif n_{eff} , le vecteur de propagation projeté k_x ainsi que le facteur d'atténuation γ_x peuvent se réécrire en fonction des termes normalisés :

$$n_{eff} = \sqrt{n_2^2 + b(n_1^2 - n_2^2)} \quad (2.47)$$

$$k_x = \frac{V\sqrt{1-b}}{d} \quad (2.48)$$

$$\gamma_x = \frac{V\sqrt{b}}{d} \quad (2.49)$$

En injectant ces relations dans l'équation (2.42), les relations analytiques de propagation des modes TE et TM dans un guide d'onde plan peuvent s'écrire :

$$V\sqrt{1-b} - 2 \arctan \sqrt{\frac{b}{1-b}} = m\pi \quad \text{pour TE} \quad (2.50)$$

$$V\sqrt{1-b} - 2 \arctan \left(\frac{n_1^2}{n_2^2} \sqrt{\frac{b}{1-b}} \right) = m\pi \quad \text{pour TM} \quad (2.51)$$

A ce stade, il est important de tenir compte que la détermination de l'indice effectif, de la fréquence de coupure et du nombre de modes guidés ont été présentés dans le cas du guide plan, soit, en d'autres termes, dans le cas d'un guide d'onde où la couche de cœur est considérée comme infinie selon l'axe y (largeur de la couche de cœur).

La forme des équations énoncées dans cette section ne permet pas la description de la propagation dans une configuration de guide d'onde enterré. Il est seulement possible de calculer numériquement des solutions, qui seront obtenues dans un environnement de simulation par la méthode des différences finies dans la section 2.2.2 de ce chapitre. A ce stade, les configurations de guides d'onde enterrés sont utilisées.

De plus, il est également important de tenir compte d'un paramètre qui peut fortement limiter la transmission dans un guide d'onde, à savoir les pertes. Plusieurs mécanismes physiques susceptibles de contribuer aux pertes se produisent lors de la propagation de la lumière dans un guide d'onde enterré. Leur description est donc importante en vue de comprendre leur impact sur les performances attendues. La section suivante sera donc dédiée à leur description physique.

2.1.3 Pertes optiques dans les guides d'onde

Un des paramètres les plus importants à prendre en considération dans la modélisation d'un guide d'onde, compte tenu de l'application visée, est l'atténuation intrinsèque du mode guidé. Dans le cas le plus extrême, cette atténuation peut être trop importante et empêcher la propagation d'un mode au travers d'un guide d'onde. L'atténuation intrinsèque de la puissance lumineuse est plus communément appelée : pertes par propagation.

Les quatre principales sources de pertes par propagation sont les suivantes :

- pertes par diffusion ($\alpha_{\text{diffusion}}$)
- pertes par absorption ($\alpha_{\text{absorption}}$)
- pertes par radiation ($\alpha_{\text{radiation}}$)
- pertes par couplage directionnel (α_{couplage})

Les pertes par propagation dans un guide d'onde correspondent donc à la somme de ces quatre types de perte. L'unité de mesure la plus utilisée pour exprimer ces pertes est en dB/cm⁻¹ (on parle également de pertes linéiques) ou parfois seulement en dB pour caractériser un niveau d'atténuation. Ainsi, les pertes totales s'expriment par la somme des différentes pertes comme suit :

$$\alpha_{\text{pertes}} = \alpha_{\text{diffusion}} + \alpha_{\text{absorption}} + \alpha_{\text{radiation}} + \alpha_{\text{couplage}} \quad (2.52)$$

2.1.3.1 Pertes par diffusion

Les pertes par diffusion peuvent se décrire par deux principales contributions : les pertes par diffusion en volume et les pertes par diffusion en surface. Ces deux mécanismes sont illustrés en Figure 2.6 et Figure 2.7.

Les pertes par diffusion en volume sont liées aux imperfections, telles que des impuretés, des défauts cristallins ou encore des lacunes, pouvant être présentes dans le guide d'onde. La technique de dépôt par PECVD du matériau guidant qui sera mise en œuvre dans le cas de cette étude est suffisamment maîtrisée pour négliger cette contribution de perte par diffusion. De plus, dans le cas de guides d'ondes enterrés, les pertes par diffusion en volume sont négligeables devant les pertes générées par la rugosité des flancs de la couche de cœur.

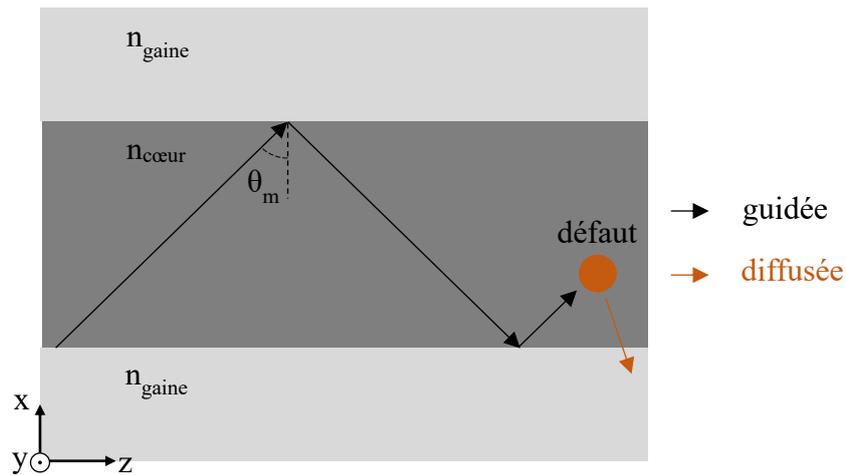


Figure 2.6 – Vue schématique (coupe transversale) du mécanisme de pertes par diffusion en volume.

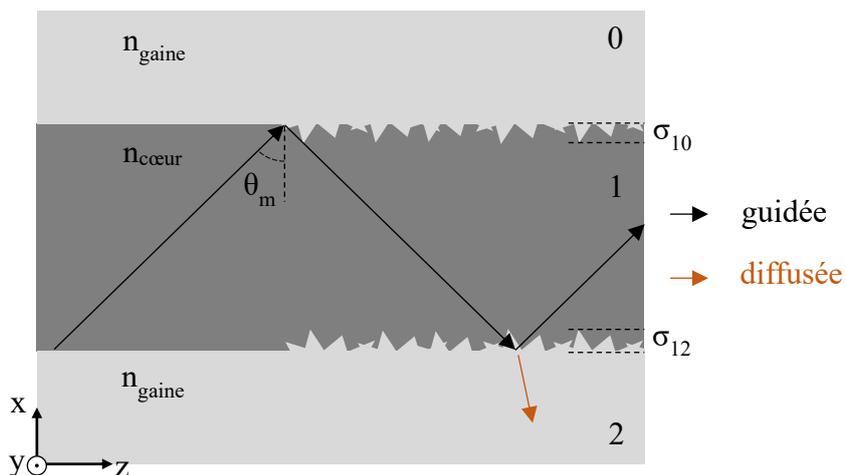


Figure 2.7 - Vue schématique (coupe transversale) du mécanisme de pertes par diffusion en surface.

Les pertes par diffusion en surface sont générées par la rugosité présente à l'interface cœur/gaine. Dans le cas du guide enterré, cette rugosité peut être présente dans les plans (\vec{y}, \vec{z}) et (\vec{x}, \vec{z}) représentant les flancs verticaux et horizontaux du guide (voir Figure 2.1). Dans la majorité des applications, la contribution la plus importante est la rugosité présente sur les flancs du guide d'onde après sa fabrication. Pour cela, l'interaction de diffusion surfacique dans le plan (\vec{x}, \vec{z}) est négligée dans la plupart des études.

Dans la section 2.1.1, le concept de réflexion totale interne a été introduit et, à ce titre, la lumière est soumise aux pertes optiques par diffusion en surface induites par chaque réflexion à l'interface cœur/gaine du guide d'onde. Ces pertes optiques dues à la rugosité peuvent être analytiquement décrites par la relation suivante [49] :

$$\alpha_{\text{diff}} \left(\frac{\text{dB}}{\text{cm}} \right) = 4.34K^2 \left(\frac{1 \cos^3 \theta_m}{2 \sin \theta_m} \right) \left[\frac{1}{d + \left(\frac{1}{p_{10}} \right) + \left(\frac{1}{p_{12}} \right)} \right] \quad (2.53)$$

Le terme θ_m représente l'angle entre le rayon incident et la normale à l'interface cœur/gaine du mode de propagation m , $p_{10} = p_{12} = \sqrt{\beta_m^2 - k_0^2 n_2^2}$ et d l'épaisseur de la couche de cœur du guide d'onde. Le terme K obéit à la relation suivante :

$$K = \frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{\sigma_{10}^2 + \sigma_{12}^2} \quad (2.54)$$

Les termes σ_{10} et σ_{12} représentent la variance de rugosité aux interfaces gaine/cœur et cœur/gaine respectivement, comme indiqué en Figure 2.7.

2.1.3.2 Pertes par absorption

De même que pour les pertes par diffusion, il y a deux principales contributions aux pertes par absorption : celles dues aux transitions électroniques et celles dues aux vibrations des liaisons atomiques.

Les niveaux d'énergie de transitions électroniques dans un matériau cristallin forment des bandes telles que représentées sur la Figure 2.8.

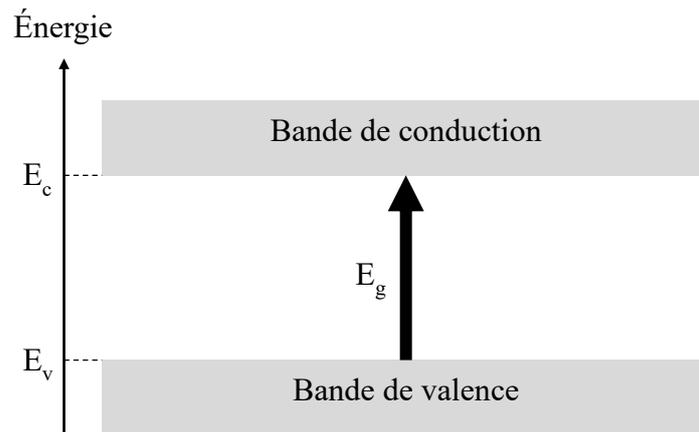


Figure 2.8 – Vue simplifiée des niveaux d'énergie dans un matériau cristallin semi-conducteur ou isolant présentant la bande de valence d'énergie E_v , la bande de conduction d'énergie E_c et la bande interdite (ou « gap » en anglais) d'énergie E_g .

L'énergie lumineuse contribuant à la propagation du mode guidé peut subir deux mécanismes d'absorption, soit par la transformation d'une partie en énergie de transition électronique, soit par l'excitation de niveaux vibrationnels des liaisons atomiques du matériau. Ce dernier est d'autant plus important que la fréquence de l'onde électromagnétique est proche de la fréquence des oscillations des liaisons atomiques du matériau.

Dans ce travail de thèse, la gamme de longueurs d'onde utilisée est comprise entre 532 nm et 760 nm, et une étude a déjà montré que les pertes par absorption dans le SiO_xN_y [31] et des matériaux proches du SiO_xN_y sont peu élevées [44], [45], justifiant que ce type de pertes soit alors négligé dans notre étude.

2.1.3.3 Pertes radiatives

La lumière subit aussi une perte par effet radiatif (propagation dans la gaine). En général, le dimensionnement des guides d'onde limite cet effet en choisissant un confinement du ou des modes de propagation dans le cœur. Pour cette raison, cet effet est négligé pour la plupart des guides d'onde rectilignes [51]. Cependant, cet effet doit être pris en compte lorsque la courbure d'un guide d'onde devient significative. Généralement, un guide courbe est précédé ou suivi d'un guide rectiligne. Dans cette configuration, les pertes radiatives peuvent être séparées en deux contributions : d'une part, une contribution due au non-recouvrement modal entre la partie rectiligne et la partie courbée du guide d'onde et d'autre part, une contribution purement liée à la courbure du guide [52].

Dans le cas des pertes directement dues à la courbure, une partie du champ guidé est perdue pour chaque réflexion sur les bords extérieurs de la courbure du guide d'onde. Ces pertes de fuite sont directement reliées à la partie imaginaire du vecteur d'onde β dans la direction de propagation de l'onde guidée. A titre d'exemple (voir Figure 2.9), l'expression retenue pour les pertes par courbure pour un guide à courbure circulaire en coude à 90° de rayon R_2 est la suivante :

$$\alpha_{\text{courbure}}(\text{dB}) = 4.34\pi\text{Im}(\beta) \quad (2.55)$$

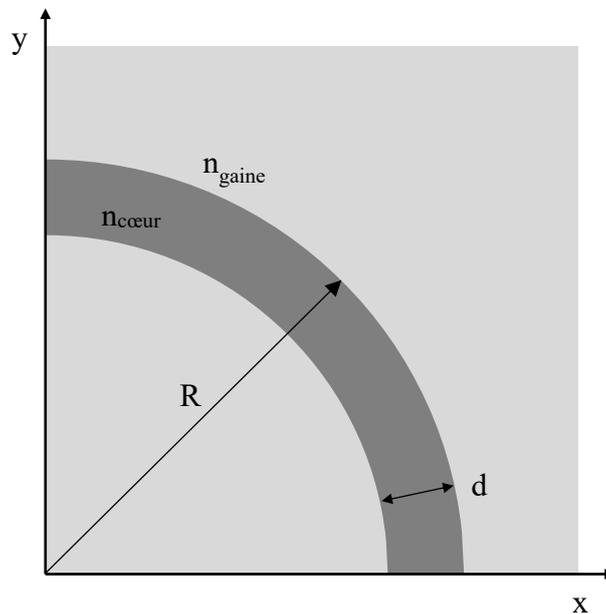


Figure 2.9 – Vue schématique en vue de dessus d'un guide d'onde enterré à courbure.

2.1.3.4 Pertes par communication croisée ou phénomène « cross talk »

Les pertes par phénomène dit de « cross talk » sont liées à la partie évanescente du champ de l'onde électromagnétique se propageant dans le cœur du guide. Ce type de pertes peut apparaître lorsque le substrat dispose d'un indice de réfraction supérieur à celui du cœur du guide. Lorsque l'épaisseur de la couche de gaine inférieure est suffisamment fine pour que la proportion de champ évanescent soit significative dans le substrat, ce champ va fuir. Cette contribution aux pertes totales peut être négligée si la couche de gaine inférieure du guide d'onde est suffisamment épaisse afin que la proportion de champ évanescent dans le substrat soit quasiment nulle.

Le couplage directionnel d'un guide d'onde vers un autre est basé sur un processus identique à celui du couplage d'un guide d'onde vers le substrat. En effet, si la distance entre deux guides d'ondes est suffisamment faible, une partie du champ évanescent sera significative dans le guide adjacent et la lumière sera couplée dans celui-ci.

Ce mécanisme de pertes sera donc pris en compte dans le dimensionnement des structures guidantes afin d'en minimiser ses effets.

2.1.4 Principe de l'auto-imagerie pour la modélisation d'un coupleur à interférences multimodes

La structure centrale d'un coupleur à interférences multimode est généralement constituée d'un guide d'onde permettant la propagation d'un grand nombre de modes (typiquement > 3). Un certain nombre de guides d'accès sont placés en entrée et en sortie afin d'injecter et de collecter la lumière du guide multimode. De tels dispositifs sont appelés coupleurs MMI $N \times M$, où N et M représentent le nombre de guides en entrée et en sortie respectivement.

Une analyse en termes de propagation modale est un outil théorique très complet pour décrire les phénomènes d'auto-imagerie dans les guides d'ondes multimodes. Celle-ci fournit non seulement la base de la modélisation et de la conception numériques mais également un aperçu du mécanisme des interférences multimodes. D'autres approches utilisent l'optique géométrique [53], des méthodes hybrides [54] ou des simulations de type BPM¹² [55].

L'effet d'auto-imagerie peut exister dans les structures multimodes tridimensionnelles, pour lesquelles une analyse en propagation de mode guidé (MPA¹³) combinée à des calculs de section efficaces bidimensionnels (méthodes des éléments finis ou des différences finies) peut fournir un outil de simulation utile [56]. Cette technique a été proposée pour la première fois par R. Ulrich en 1975 [57] pour la formulation de l'imagerie périodique.

¹² « Beam Propagation Method »

¹³ « guided-Mode Propagation Analysis »

2.1.4.1 Hypothèse de modélisation d'un guide d'onde multimode

Le moyen employé pour obtenir un guide d'onde multimodes consiste à augmenter la largeur du cœur des guides. En considérant que cette largeur est bien plus grande que l'épaisseur de la couche de cœur, il est légitime de supposer que les modes aient le même comportement transversal (selon l'épaisseur) partout dans le guide multimode. La modélisation de ce type de guide peut donc être réalisée en considérant une structure en deux dimensions (latérale et longitudinale). La Figure 2.10 représente un guide d'onde multimodes à saut d'indice avec une largeur de cœur l_{MMI} , un indice de réfraction du cœur $n_{\text{cœur}}$ et un indice de réfraction de la gaine n_{gaine} .

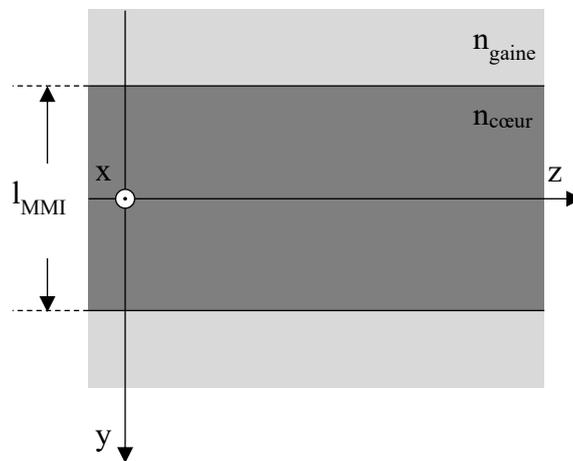


Figure 2.10 - Vue schématique en vue de dessus d'un guide d'onde multimodes à saut d'indice. L'indice de réfraction du cœur est $n_{\text{cœur}}$, l'indice de réfraction de la gaine est n_{gaine} et la largeur du guide multimode est l_{MMI} .

Un tel guide d'onde multimodes est capable de supporter un certain nombre de modes latéraux m . La Figure 2.11 représente les 9 premiers modes v pour une longueur d'onde en espace libre λ_0 . Le nombre d'onde latérale k_{yv} et la constante de propagation β_v sont principalement liés à l'indice de réfraction du cœur n_1 par l'équation de dispersion suivante :

$$k_{yv}^2 + \beta_v^2 = k_0^2 n_1^2 \quad (2.56)$$

avec

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0} \quad (2.57)$$

$$k_{yv} = \frac{(v + 1)}{l_{ev}} \quad (2.58)$$

La largeur effective l_e prend en compte la profondeur de pénétration latérale (dépendante de la polarisation) de chaque mode de propagation. Celle-ci est associée aux décalages dits de Goos-Hähnchen aux limites du cœur du guide multimodes.

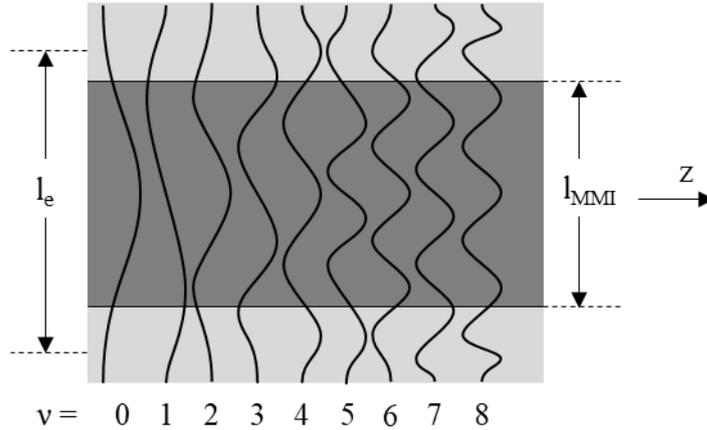


Figure 2.11 - Profils d'amplitude latéraux normalisés $\psi_v(y)$ des 9 premiers modes guidés dans un guide d'onde multimode. La largeur effective des modes latéraux dans le guide d'onde multimode est notée l_e . Le vecteur de propagation est selon l'axe z .

Pour les guides d'onde dont la différence d'indice de réfraction cœur/gaine (ou contraste d'indice) est élevée, la profondeur de pénétration est très faible de sorte que $l_{ev} \approx l_{MMI}$. En général, les largeurs effectives l_{ev} peuvent être approchées par la largeur effective l_{e0} , correspondant au mode fondamental, et peut être écrite l_e pour simplifier :

$$l_{ev} \approx l_e = l_{MMI} + \left(\frac{\lambda_0}{\pi}\right) \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^{2\sigma} (n_1^2 - n_2^2)^{-\left(\frac{1}{2}\right)} \quad (2.59)$$

où $\sigma = 0$ pour les modes de propagations TE et $\sigma = 1$ pour les modes de propagations TM.

En utilisant le développement binomial avec $k_{yv}^2 \ll k_0^2 n_1^2$, les constantes de propagation β_v obéissent à la relation suivante :

$$\beta_v \approx k_0 n_1 - \frac{(v+1)^2 \pi \lambda_0}{4 n_1 l_e^2} \quad (2.60)$$

Les constantes de propagation dans un guide multimodes à saut d'indice présentent donc une dépendance quasi-quadratique vis-à-vis du nombre de mode v .

En définissant L_π la longueur de battement entre les deux premiers modes de propagation, la relation suivante est obtenue :

$$L_\pi = \frac{\pi}{\beta_0 - \beta_1} \approx \frac{4 n_1 l_e^2}{3 \lambda_0} \quad (2.61)$$

et la relation donnant la séparation entre les constantes de propagations peut s'écrire de la façon suivante :

$$(\beta_0 - \beta_1) \approx \frac{v(v+2)}{3 L_\pi} \quad (2.62)$$

2.1.4.2 Analyse de la propagation en mode guidé (MPA)

Une vue schématique de la propagation modale dans un guide d'onde multimodes est présentée sur la Figure 2.12 . Un profil de champ $\psi(y, 0)$ est imposé en entrée (à $z = 0$) et totalement contenu dans la largeur effective du cœur du guide d'onde multimodes l_e . Ce champ d'entrée est décomposé dans une distribution modale de différents champs $\psi_v(y)$ pour tous les modes et s'écrit de la façon suivante :

$$\psi(y, 0) = \sum_v c_v \psi_v(y) \quad (2.63)$$

Cette relation est interprétée comme la sommation de tous les modes guidés ainsi que les modes radiatifs du guide multimodes.

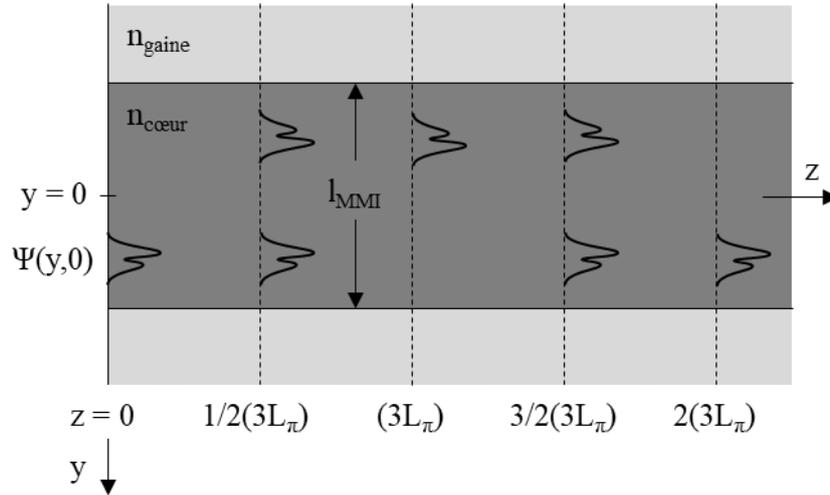


Figure 2.12 – Vue schématique d'un guide d'onde multimodes avec un champ d'entrée $\psi(y, 0)$. L'image miroir se produit pour $z = 3L_\pi$, l'image directe se produit pour $z = 2(3L_\pi)$ et des images « double » se produisent pour $z = 1/2(3L_\pi)$ et $z = 3/2(3L_\pi)$.

Les termes c_v représentent les coefficients d'excitation de champ. Ceux-ci peuvent s'écrire sous la forme d'intégrales de recouvrement basées sur la relation d'orthogonalité des champs de la façon suivante :

$$c_v = \frac{\int \psi(y, 0) \psi_v(y) dy}{\sqrt{\int \psi_v^2(y) dy}} \quad (2.64)$$

Dans une configuration où le champ d'entrée $\psi(y, 0)$ est suffisamment étroit pour ne pas exciter les modes non guidés du guide multimodes, celui-ci peut être décomposé en mode guidés seulement. De cette façon, l'expression du champ d'entrée $\psi(y, 0)$ peut s'écrire :

$$\psi(y, 0) = \sum_{v=0}^{m-1} c_v \psi_v(y) \quad (2.65)$$

Le profil de champ à une distance de propagation z peut alors s'écrire comme la superposition de tous les modes guidés de la façon suivante :

$$\psi(y, z) = \sum_{v=0}^{m-1} c_v \psi_v(y) e^{i(\omega t - \beta_v z)} \quad (2.66)$$

En prenant la phase du mode fondamental comme facteur commun de la somme, en la supprimant et en supposant la dépendance temporelle $e^{i\omega t}$ implicite dans les relations qui suivront, le profil de champ $\psi(y, z)$ devient :

$$\psi(y, z) = \sum_{v=0}^{m-1} c_v \psi_v(y) e^{i(\beta_0 - \beta_v z)} \quad (2.67)$$

Ce développement mathématique permet d'aboutir à une expression pratique du champ à une distance de propagation L . Celle-ci peut s'écrire de la façon suivante :

$$\psi(y, L) = \sum_{v=0}^{m-1} c_v \psi_v(y) e^{i\left(\frac{v(v+2)}{3L\pi} L\right)} \quad (2.68)$$

La forme de $\psi(y, L)$, et par conséquent les configurations des images formées, seront déterminées par l'excitation modale c_v et les propriétés du facteur de phase du mode :

$$e^{i\left(\frac{v(v+2)}{3L\pi} L\right)} \quad (2.69)$$

Dans des conditions particulières, le champ $\psi(y, L)$ sera une reproduction exacte du champ d'entrée $\psi(y, 0)$ par l'effet d'auto-imagerie. Il existe deux types de mécanisme d'auto-imagerie par interférences multimodes.

Le premier est dit « générale » dans le cas où le mécanisme d’auto-imagerie est indépendant de l’excitation modale et le second est dit « restreint » dans le cas où celui-ci en est dépendant. Cependant, en n’excitant que les modes symétriques pairs, une configuration de coupleurs MMI en $1 \times N$ peut être obtenue. Ce cas particulier de restriction sur l’excitation modale est dit « symétrique ».

Dans ce travail de thèse, les coupleurs MMI modélisés seront dimensionnés pour réaliser un mécanisme d’interférences symétriques avec un champ d’excitation monomode à une position centrale ($y = 0$) en entrée du guide multimodes (voir Figure 2.12). Ceci permettra la modélisation d’un coupleur MMI 1×2 pour le développement technologique de la brique de base de division de puissance. Les caractéristiques des mécanismes d’interférences générales et symétriques sont reportées dans le Tableau 4.

Mécanisme d’interférence	Générale	Symétrique
Entrée \times Sortie	$N \times N$	$1 \times N$
Distance de la 1 ^{ère} image	$(3L_\pi)$	$(3L_\pi)/4$
Distance des 1 ^{ères} N-images	$(3L_\pi)/N$	$(3L_\pi)/4N$
Position des entrées	Toutes	$y = 0$

Tableau 4 – Synthèse des caractéristiques du mécanisme d’interférences générales, jumelée et symétrique. Le mécanisme d’interférences jumelées et symétriques sont deux cas particuliers du mécanisme d’interférences restreintes.

Dans le cadre de notre étude, il n’est pas utile de poursuivre le développement mathématique de ces mécanismes d’interférences, qui a déjà été détaillé par Soldano et Pennings [58]. Notons que l’effet d’un décalage du guide d’entrée ($y,0$) a été étudié et démontre un impact significatif sur la transmission totale du coupleur modélisé et notamment sur le débalancement de puissance, terme qui sera défini dans la section 4.2.4.2. Cependant, cet effet de décalage latéral est largement minimisé par la technique de fabrication par photolithographie UV qui ne peut induire que des variations de facteur d’échelle sur les dimensions latérales des motifs obtenus. La réalisation des motifs d’un masque de photolithographie disposant d’une précision nanométrique, un tel effet peut donc être négligé.

2.2 Modélisation des structures de guidage

Après avoir rappelé les principes généraux du guidage optique et le fonctionnement des coupleurs MMI, cette section va décrire la modélisation des structures de guidage. Celle-ci sera dédiée aux guides d'ondes enterrés monomode et aux coupleurs MMI pour leur réalisation en SiO_xN_y . Une attention particulière est portée sur le dimensionnement des guides enterrés et les coupleurs MMI en vue de maximiser leur transmission aux longueurs d'onde d'opération du domaine visible et en particulier à $\lambda = 633 \text{ nm}$.

2.2.1 Contraintes de simulation pour les guides d'onde monomode enterrés à base de SiO_xN_y

L'objectif principal de ce travail de thèse est de se placer dans le domaine du visible afin de rendre exploitable des applications de type imagerie très haute résolution, et en particulier par synthèse d'ouverture à ces longueurs d'onde. Ce choix impose de se confronter à des défis technologiques pour réaliser de tels dispositifs, tant sur le plan de la conception que celui de la fabrication qui ont été discutés dans le Chapitre 1.

Une contrainte sous-jacente réside dans le mode de propagation de la lumière dans les guides. Dans l'exemple de l'utilisation de structures photoniques pour l'imagerie interférométrique, le nombre de modes de propagation utilisés dans l'obtention d'un profil d'interférences doit être soigneusement choisi afin de maximiser le contraste des franges d'interférences. En effet, plus le nombre de modes est élevé et plus le contraste des franges d'interférences est faible, et plus il est difficile d'extraire l'information nécessaire à la reconstruction de l'image. Pour répondre à cette contrainte, les seuls modes de propagation autorisés seront les modes TE_0 et TM_0 .

Afin de garantir des performances suffisantes sur l'ensemble de la puce fabriquée, les pertes totales doivent être minimisées. Comme vu dans les sections précédentes, celles-ci sont directement reliées au choix de conception des guides d'onde et à la qualité de fabrication de ces derniers.

Dans ce travail de thèse, la configuration d'un guide d'onde avec cœur enterré a été retenue. L'intérêt de cette configuration permet de rendre les dispositifs finaux robustes en isolant toutes les variations dues aux paramètres extérieurs.

Rappelons que la particularité de la configuration guidante mise en œuvre dans ce travail réside dans l'utilisation d'un unique matériau (SiO_xN_y) disposant d'une différence de composition stœchiométrique entre la couche de cœur et de gaine. De cette façon, l'évolution des indices de réfraction de la couche de cœur et de gaine suit une courbe de Sellmeier du fait de l'utilisation d'un matériau de composition presque identique. Ainsi, l'écart d'indice de réfraction dans la

plage de longueur d'onde du spectre visible peut être considéré quasiment constant. Une description plus détaillée sera présentée dans le chapitre suivant à la section 3.1.2.3. Pour cela, le matériau qui a été choisi est le SiO_xN_y et sera fabriqué dans la salle blanche du LN2 par dépôt chimique en phase vapeur assistée par plasma PECVD.

Rappelons que les deux principaux atouts de ce matériau résident dans ses propriétés de transmission, relativement élevée dans la gamme de longueurs d'ondes visible ($T > 70\%$ de 400 à 800 nm) ainsi que dans le contrôle précis des indices de réfraction et des épaisseurs des couches déposées. En effet, par simple modification des paramètres de dépôts de ce matériau par PECVD, tous les indices de réfraction compris entre $n_{\text{SiO}_2} < n_{\text{SiO}_x\text{N}_y} < n_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ peuvent être obtenus et ce, de façon répétable et précise. Des tests préliminaires de dépôts par PECVD ont été réalisés au LN2 et ont permis de déterminer une valeur du contraste d'indice réalisable et répétable de l'ordre de $\Delta n = 0,1$.

Étant donné la flexibilité élevée en termes d'épaisseur et d'indice du SiO_xN_y , les guides d'onde et les coupleurs MMI seront fabriqués par photolithographie à large bande d'exposition. Cette technique de fabrication donne une résolution latérale de l'ordre de 300 nm au LN2. Le protocole de fabrication sera détaillé au Chapitre 3.

2.2.2 Définition du modèle dans l'environnement de simulation

Plusieurs logiciels de simulation sont disponibles pour modéliser et simuler le comportement de la lumière dans des guides d'onde. Les deux principaux fournisseurs, ainsi que les solutions qu'elles proposent, sont indiqués dans le Tableau 5. L'outil de simulation qui a été utilisé dans cette étude est *FIMMWAVE* de *Photon Design* car la majorité des fonctionnalités proposées sont partagées entre les deux outils.

Fournisseur	Photon Design	ANSYS/Lumerical
Solveurs	FIMMWAVE : FMM ¹⁴ , FDM ¹⁵ , FEM ¹⁶ FIMMPROP : EME ¹⁷	Lumerical MODE : FDM, varFDTD ¹⁸ , EME Lumerical FDTD : FDTD ¹⁹
2D	Indice effectif, FMM ²⁰ , FDM, FEM	FDM
3D	EME	FDTD, varFDTD, EME

Tableau 5 – Principaux environnements proposés et largement utilisés pour la modélisation de guides d’onde en optique intégrée.

2.2.2.1 Choix du solveur retenu

Le solveur FMM est semi-analytique et fournit des solutions très précises pour les guides d'onde de géométrie rectangulaire. Le fonctionnement de celui-ci s’opère de la manière suivante : la structure est séparée en plusieurs tranches verticales où des modes 1D sont calculés pour chacune des tranches. Puis, les matrices d’intégrales de recouvrement entre les modes 1D de tranches adjacentes sont calculées. Le solveur essaie ensuite de trouver l'amplitude pour chaque mode 1D qui donnera un profil de champ obéissant aux équations de Maxwell. Une solution est ensuite « propagée » de côté gauche vers le milieu, puis du côté droit vers le milieu, en utilisant les matrices de recouvrement calculées. De façon générale, le solveur FMM permet une meilleure précision que les autres solveurs de modes dans la détermination de l’indice effectif des modes calculés lorsqu’un maillage rectangulaire est possible.

Le solveur FDM implémente la méthode de différences finies vectorielles et peut être utilisé avec des conditions aux limites électrique/magnétique, transparentes et avec des couches PML²¹. Ce type de conditions est nécessaire dans certains cas particuliers de modélisation comme la courbure de guides enterrés.

Les solveurs de modes FMM et FDM seront donc utilisés conjointement en fonction de l’orientation des simulations. En particulier, FMM sera utilisé dans la modélisation des guides d’ondes enterrés rectilignes et FDM pour les guides à courbure.

¹⁴ « Film Mode Matching »

¹⁵ « Finite Difference Method »

¹⁶ « Finite Element Method »

¹⁷ « Eigen Mode Expansion »

¹⁸ « variationnal Finite Difference Time Domain »

¹⁹ « Finite Difference Time Domain »

²⁰ « Film Mode Matching »

²¹ « Perfectly Matched Layer »

Dans le cas d'un guide rectiligne à symétrie rectangulaire, des conditions aux limites standards de type réflexion électrique et magnétique sont utilisées pour, respectivement, les bords horizontaux et verticaux de la fenêtre de simulation. Cette fenêtre ainsi que la distribution du champs E_x pour le mode TE_0 pour un guide d'onde rectiligne sont illustrées sur la Figure 2.13 – (a) et Figure 2.13 – (b).

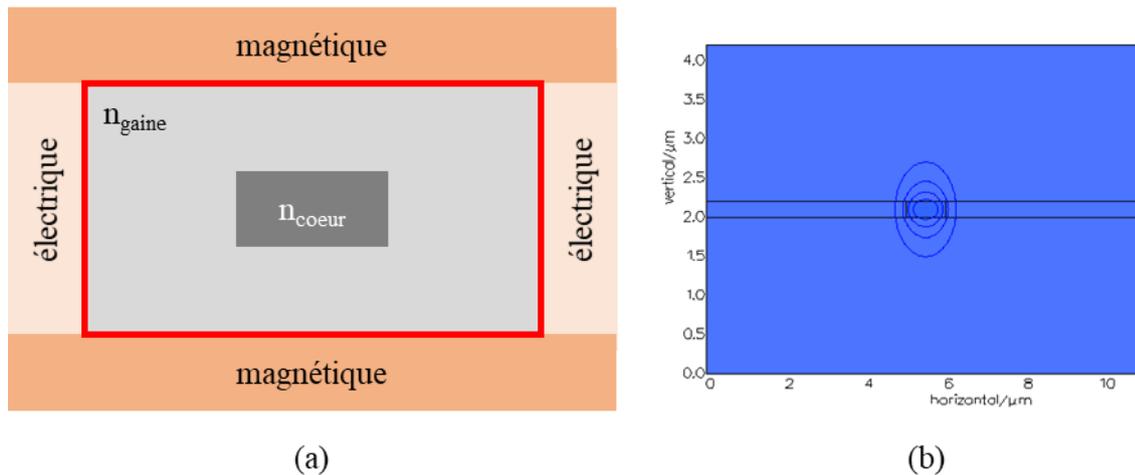


Figure 2.13 – (a) Vue schématique de la fenêtre de simulation (encadrée en rouge) d'un guide d'onde enterré rectiligne et (b) de la distribution du champ E_x du mode TE_0 d'un guide d'onde rectiligne en vue contour (lignes iso-intensités) à 633 nm à l'aide du solveur FMM. Le contraste d'indice cœur/gaine est de 0,1.

2.2.2.2 Cas des guides à courbure

Pour rappel, la proportion de champ évanescent est plus importante dans la partie extérieure d'un guide à courbure. Cet effet peut être source d'erreur dans les simulations. L'ajout de PML s'avère nécessaire afin de supprimer les modes de propagation non physiques. Toutefois, les PML ne sont pas à proprement parler un type de conditions aux limites. Il s'agit d'une couche absorbante entre le bord de simulation et la condition aux limites fixée. La simulation de l'absorption des PML est réalisée en introduisant une épaisseur complexe artificielle. Cela a pour effet d'atténuer toute onde se déplaçant vers le bord de la fenêtre de simulation et de retirer la plupart des modes non physiques résultant de la simulation. La configuration de simulation ainsi que la distribution du champs E_x pour le mode TE_0 pour un guide d'onde à courbure sont illustrées sur la Figure 2.14 – (a) et (b), respectivement.

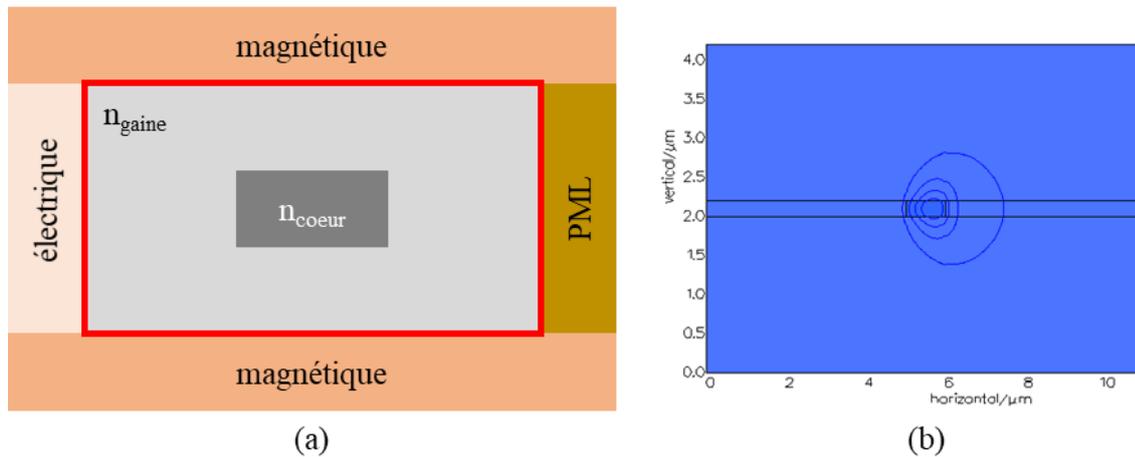


Figure 2.14 – (a) Vue schématique de la fenêtre de simulation (encadrée en rouge) d'un guide d'onde enterré à courbure et (b) de la distribution du champ E_x du mode TE_0 d'un guide d'onde à courbure ($R = 50 \mu\text{m}$) en vue contour (lignes iso-intensités) à 633 nm à l'aide du solveur FDM. Le contraste d'indice cœur/gaine est de 0,1.

2.2.2.3 Etude de la convergence des solutions

Dans la majorité des cas, les solveurs FMM et FDM donnent des résultats de simulation physiquement acceptables et afin de pouvoir les analyser, une étude de la convergence de ces résultats est nécessaire. Le critère de convergence retenu correspond à une variation de moins de 1% de la valeur de l'indice effectif des modes de propagation TE_0 et TM_0 prédite par la simulation (en fonction des conditions choisies). Cette étude a permis d'établir le dimensionnement optimal de la fenêtre de simulation pour les configurations de simulations des guides rectilignes et courbés.

L'évolution de l'indice effectif vis-à-vis du dimensionnement horizontal et vertical de la fenêtre de simulation est présenté sur les Figure 2.15 et Figure 2.16. Pour le dimensionnement horizontal, les valeurs d'indice effectif convergent à partir d'une largeur de $1 \mu\text{m}$. Il en est de même pour le cas vertical avec une convergence à partir d'une hauteur de $1 \mu\text{m}$. Il est à noter que le temps de simulations pour une largeur/hauteur de $1 \mu\text{m}$ ou bien de $5 \mu\text{m}$ est identique à quelques secondes près. Pour cela, les valeurs de $2 \mu\text{m}$ et $5 \mu\text{m}$ ont été retenues pour le dimensionnement des demi-fenêtres de simulation verticale et horizontale, respectivement.

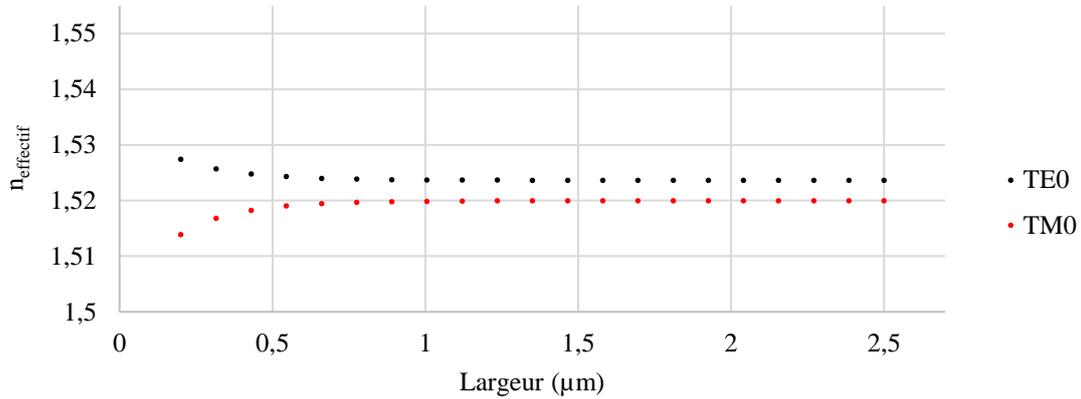


Figure 2.15 - Effet de la largeur de la demi-fenêtre de simulation sur l'indice effectif des modes TE_0 et TM_0 pour un guide d'onde enterré rectiligne de dimensions 200×1000 nm avec un contraste d'indice cœur/gaine égal à 0,1.

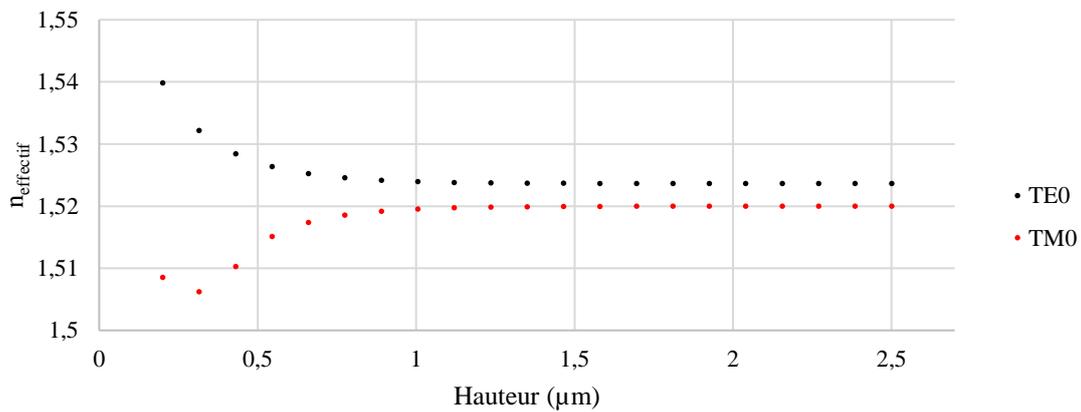


Figure 2.16 - Effet de la hauteur de la demi-fenêtre de simulation sur l'indice effectif des modes TE_0 et TM_0 pour un guide d'onde enterré rectiligne de dimensions 200×1000 nm avec un contraste d'indice cœur/gaine égal à 0,1.

Comme représenté en Figure 2.17, les valeurs obtenues de l'indice effectif vis-à-vis de l'épaisseur de la couche de PML ne montrent pas de tendances explicites de convergence. Ceci est dû à au dimensionnement de la fenêtre de simulation qui est déjà optimisé. Il est tout de même important de prendre une épaisseur suffisante pour éviter l'apparition de solutions « non-physiques » de propagation dans la simulation de guides à courbure. La Figure 2.18 donne l'exemple de deux modes résultant d'une simulation d'une guide à courbure de $500 \mu\text{m}$. De manière empirique, une épaisseur de PML de $5 \mu\text{m}$ sera désormais fixée pour les simulations de ces derniers.

Le Tableau 6 rapporte les valeurs de dimensionnement adaptées aux simulations de guides enterrés et à courbure retenus.

Fenêtre verticale (μm)	Fenêtre horizontale (μm)	Épaisseur de PML (μm)
4	10	5

Tableau 6 – Synthèse des valeurs de dimensionnement des simulations réalisées dans cette étude.

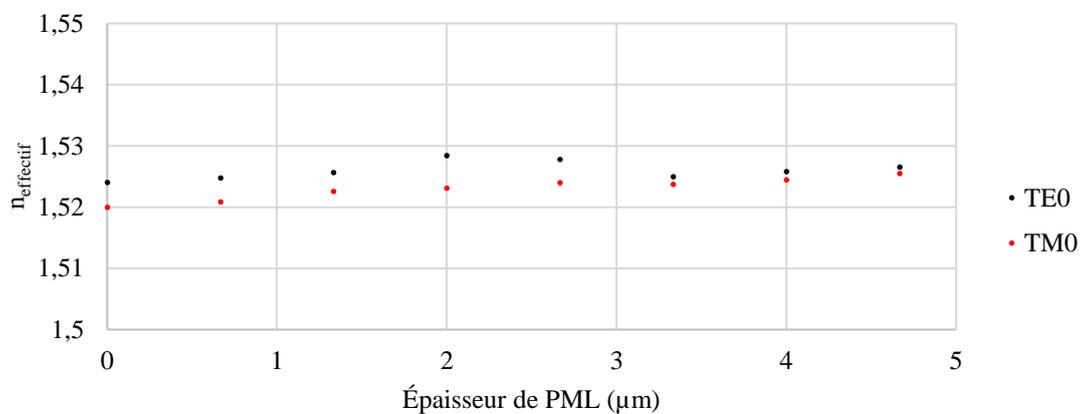


Figure 2.17 - Effet de la largeur de la PML sur l'indice effectif des modes TE₀ et TM₀ pour un guide d'onde à courbure de rayon R=250 μm .

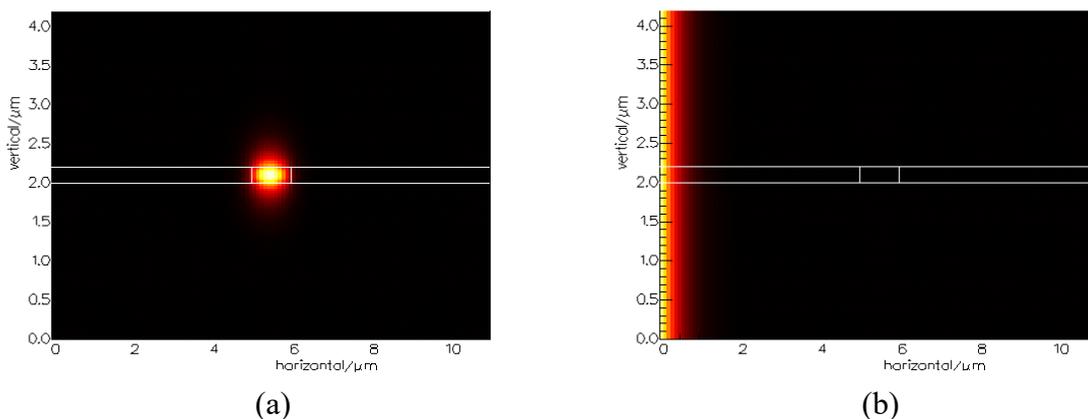


Figure 2.18 – Exemple de distributions d'intensité (a) d'un mode « physique » (TE₀) et (b) d'un mode « non physique » à 633 nm dans un guide d'onde d'épaisseur 200 nm, de largeur 1000

nm et dont le contraste d'indice est de $\Delta n_{\text{cœur/gaine}} = 0,1$ (le blanc représente une forte intensité et le rouge une intensité moindre).

Cette étude de convergence a permis de trouver les valeurs de largeur et d'épaisseur de la fenêtre de simulation. De plus, l'ajout de la PML lors des simulations de guides à courbure permet de s'affranchir d'un certain nombre de modes « non-physiques ». Il est à noter que ces solutions « non-physiques » sont problématiques lors de l'étude de l'évolution de paramètre en fonction d'un mode précis. En effet, l'ordre de classement des modes obtenu à l'issue de la simulation est lié au poids de la solution trouvée. Il est donc fréquent que cet ordre ne soit pas conservé d'une simulation à l'autre à cause de ces solutions « non-physiques ». Par exemple, dans l'étude de l'évolution d'un paramètre de dimensionnement sur le mode TE_0 obtenue au rang i , ce rang peut être modifié lors de l'itération de simulation suivante, générant une erreur sur le nombre de modes de propagation autorisés.

2.2.3 Dimensionnement des guides d'ondes monomode sur une large plage spectrale d'opération

2.2.3.1 Guides rectilignes

Pour aider à la compréhension du lecteur, la modélisation d'un guide d'onde rectiligne de largeur $1\ \mu\text{m}$ et d'épaisseur $200\ \text{nm}$ avec un contraste d'indice de réfraction cœur/gaine $\Delta n = 0,1$ est présentée sur la Figure 2.19. La fenêtre de simulation utilisée est délimitée par l'encadré en rouge.

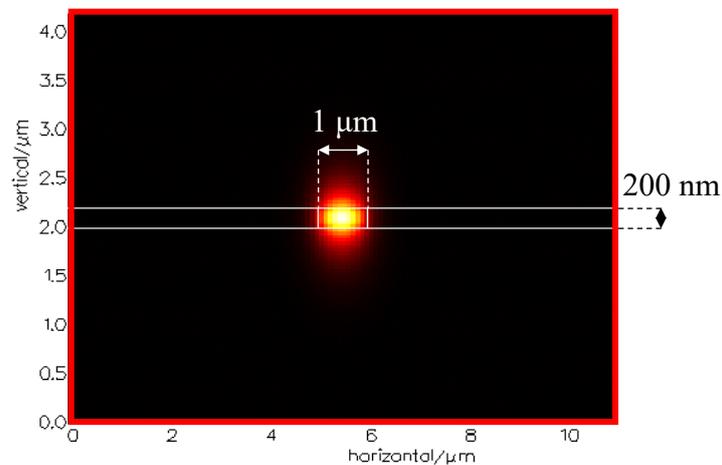


Figure 2.19 - Distribution d'intensité du mode TE_0 d'un guide d'onde rectiligne à $\lambda = 633\ \text{nm}$ à l'aide du solveur FMM. Le contraste d'indice cœur/gaine est de $0,1$. La fenêtre de simulation est délimitée dans l'encadrée en rouge.

Comme mentionné dans la section 2.2.1 de ce chapitre, des contraintes de résolution liées à la fabrication et au nombre de modes de propagation dans les guides d'onde, doivent être prises en considération. L'équipement de photolithographie UV utilisé dans cette étude dispose d'une résolution de $1\ \mu\text{m}$ et d'une incertitude de $300\ \text{nm}$.

D'autre part, la tolérance maximale en épaisseur et indice de réfraction est déterminée par le procédé de dépôt PECVD du matériau guidant. En effet, la précision de mesure d'épaisseur et d'indice de réfraction est dépendante des valeurs visées. En d'autres termes, plus l'épaisseur de la couche de matériau PECVD est élevée et plus la précision sur l'indice de réfraction et l'épaisseur est faible. Celle-ci a été mesurée à l'aide de multiples essais avec des conditions identiques de dépôt. Elle est de $20\ \text{nm}$ sur l'épaisseur de la couche et de $\Delta n_{\text{PECVD}} = 0,02$ sur l'indice de réfraction. La méthode de mesure de ces tolérances est expérimentale et a été réalisée

par ellipsométrie. Compte tenu de cette contrainte, le contraste d'indice de réfraction cœur/gaine (appelé CIR dans la suite) et l'épaisseur de la couche de cœur qui ont été entrées dans les simulations sont respectivement de 200 nm et $\Delta n = 0,1$.

Une étude du dimensionnement des guides tenant compte de ces contraintes a donc été réalisée. La Figure 2.20 représente les surfaces modales pour 4 configurations de guides d'onde réalisés à partir de CIR compris entre $\Delta n = 0,08$ et $\Delta n = 0,15$. L'épaisseur de la couche de cœur est fixée à 200 nm. Cette série de simulations permet d'évaluer l'évolution du nombre de modes vis-à-vis d'écart de CIR possible par rapport à la valeur visée de $\Delta n = 0,1$.

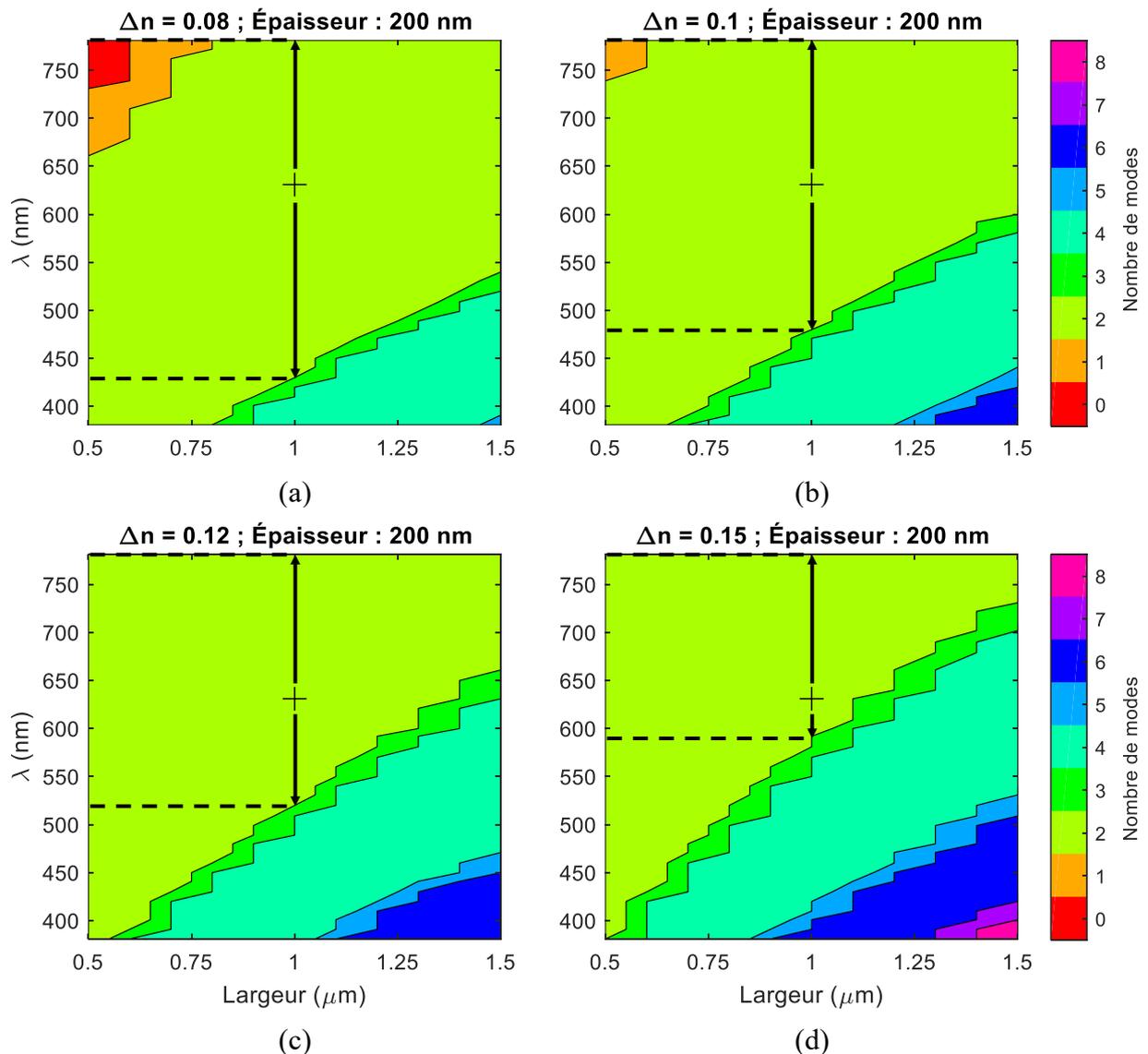


Figure 2.20 – Résultats de simulations du nombre de modes de propagation autorisés pour des configurations de contraste d'indice cœur-gaine de $\Delta n = [0,8 : 0,15]$ en fonction de la longueur d'onde et de la largeur d'un guide d'onde enterré.

L'épaisseur de la couche de cœur est fixée à 200 nm. La croix noire présentée sur les 4 graphiques est positionnée sur les coordonnées $\lambda = 632,8$ nm et Largeur = 1 μm . La plage d'opération monomode est représentée par la double flèche en noire. Notons que cette plage monomode correspond à l'existence des modes de propagation dans les deux états de polarisation TE_0 et TM_0 .

La position des croix rouges présentes sur les graphiques correspond à un dimensionnement de guide d'onde rectiligne enterré dont l'épaisseur est de 200 nm et la largeur de 1000 nm pour un fonctionnement à 633 nm. Ensuite, le nombre de modes peut directement être extrait en fonction de la zone dans laquelle cette croix est positionnée.

L'analyse de ces simulations permet de mettre en avant les points suivants :

- Dans le cas particulier où le contraste d'indice cœur/gaine est de $\Delta n = 0,1$ (qui correspond à l'objectif que nous nous fixons), la Figure 2.20 – (b) montre que le guide simulé autorise le guidage des modes de propagation TE_0 et TM_0 . De plus, ce graphique montre que ce nombre de modes est maintenu à minima sur la plage de 480 à 760 nm. Une largeur de cœur inférieure à 1000 nm permettrait d'obtenir une plage d'opération monomode encore plus importante. Cependant, cette dimension est soumise à la résolution de fabrication du procédé de photolithographie UV utilisé au LN2 qui est de 1 μm .
- La configuration utilisant $\Delta n = 0,08$ apparaît comme le meilleur choix de différence de contraste d'indice puisque celle-ci permet de maintenir la propagation monomode TE_0 et TM_0 sur une plage d'opération allant de 430 à 760 nm. Néanmoins, cette configuration est écartée puisqu'elle n'est pas réalisable en utilisant la technique de fabrication par PECVD au LN2. En effet, ce contraste d'indice de réfraction cœur/gaine n'est pas répétable d'un dépôt à l'autre. Une étude de l'effet de la reproductibilité des procédés de photolithographies et de dépôts PECVD sera présentée à la section 2.2.3.3 afin d'établir le dimensionnement réalisable au LN2.
- Dans une autre mesure, pour un CIR de 0,15, un confinement plus important se traduit par une réduction de la plage de propagation monomode. En effet, le mode de propagation TE_1 apparaît aux longueurs d'onde proches de 600 nm. Une vue récapitulative des plages spectrales d'opération monomode en fonction du contraste d'indice de réfraction cœur/gaine de l'étude est présentée sur la Figure 2.21.

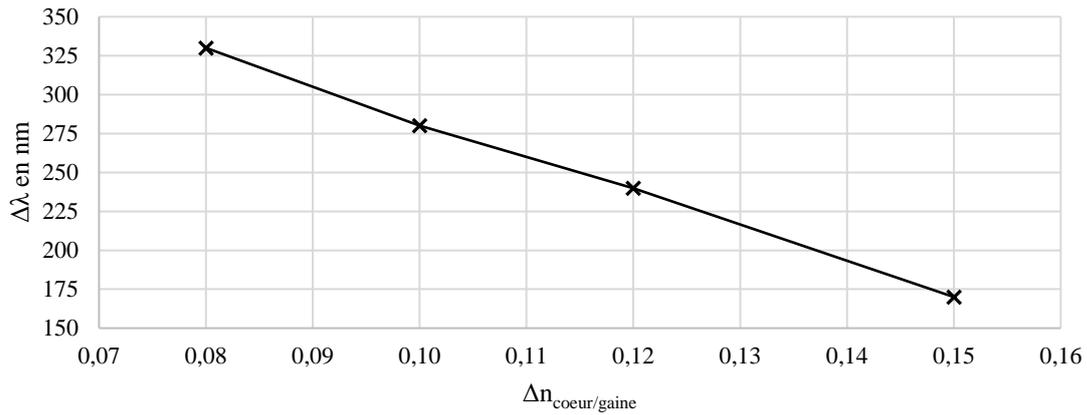


Figure 2.21 – Effet sur la plage spectrale d’opération monomode en fonction du contraste d’indice de réfraction cœur/gaine pour un guide d’onde rectiligne de largeur 1 μm et d’épaisseur 200 nm.

Ces résultats de simulation ont permis de déterminer le meilleur compromis sur les dimensions et le CIR entre le cœur et la gaine des guides, compte tenu des contraintes de fabrication par photolithographie UV large bande et par dépôts PECVD imposant, respectivement, une résolution minimale sur les largeurs et sur les épaisseurs/indice de réfraction tout en maintenant une propagation uniquement des modes TE_0 et TM_0 sur la plus large plage spectrale.

En conclusion, le dimensionnement compatible qui a été choisi avec les contraintes technologiques pour la géométrie des guides d’ondes enterrés est de 200 nm d’épaisseur et 1 μm de largeur avec $\Delta n_{\text{coeur/gaine}} = 0,1$. Le CIR entre les couches de cœur et de gaine sera assuré par un contrôle fin de la stœchiométrie du SiO_xN_y à l’aide des paramètres de dépôts par PECVD et sera discuté dans le Chapitre 3.

2.2.3.2 Guides à courbure

Pour aider à la compréhension, la modélisation d’un guide d’onde à courbure de rayon $R = 500 \mu\text{m}$. Sa largeur est de 1 μm et son épaisseur de 200 nm avec un contraste d’indice de réfraction cœur/gaine $\Delta n = 0,1$ est présentée sur la Figure 2.22. La délocalisation du mode de propagation est faiblement observable vers le bord gauche du cœur du guide.

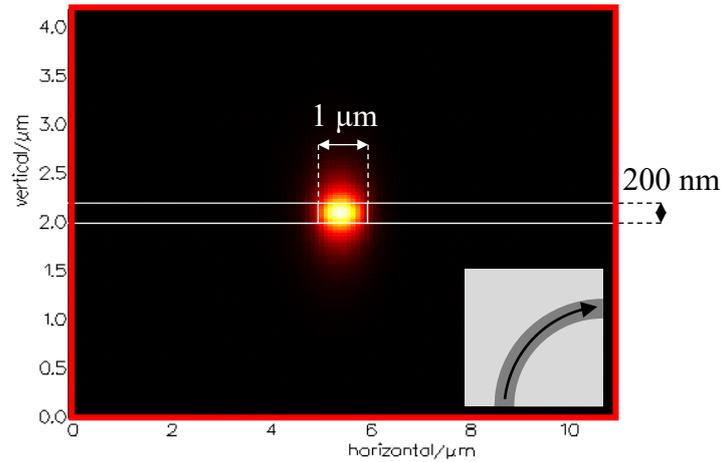


Figure 2.22 – Distribution d’intensité du mode TE_0 d’un guide d’onde à courbure de rayon $R = 500 \mu\text{m}$ à $\lambda = 633 \text{ nm}$ à l’aide du solveur FDM. Le contraste d’indice cœur/gaine est de 0,1. La fenêtre de simulation est délimitée dans l’encadrée en rouge. Un schéma en vue de dessus du sens de propagation du mode dans la courbure du guide est présenté en bas à droite.

A ce stade, les guides d’onde simulés permettent une propagation monomode rectiligne. Les performances de propagation de la lumière dans des guides à courbure doit donc faire l’objet d’une étude et le paramètre clé à optimiser reste les pertes par courbure pour contrôler le parcours lumineux en vue de la réalisation d’un circuit photonique complet.

Les pertes associées pour trois contrastes d’indice différents sont présentées sur la Figure 2.23. Comme anticipée, plus le CIR entre le cœur et la gaine des guides est important et plus le confinement du mode de propagation est important. De fait, plus ce confinement est important et moins les pertes liées à la courbure sont importantes. Cela fait apparaître un compromis devant être effectué entre la compacité de la puce désirée et la plage spectrale d’opération monomode qui, pour rappel, est sensible au CIR cœur/gaine. Pour exemple, un rayon de courbure de $1000 \mu\text{m}$ dans la configuration de contraste d’indice $\Delta n = 0,1$ permet de garder une compacité permettant de réaliser un circuit photonique sur une surface de l’ordre du cm^2 , tout en gardant des pertes de courbure inférieures à $0,1 \text{ dB.cm}^{-1}$.

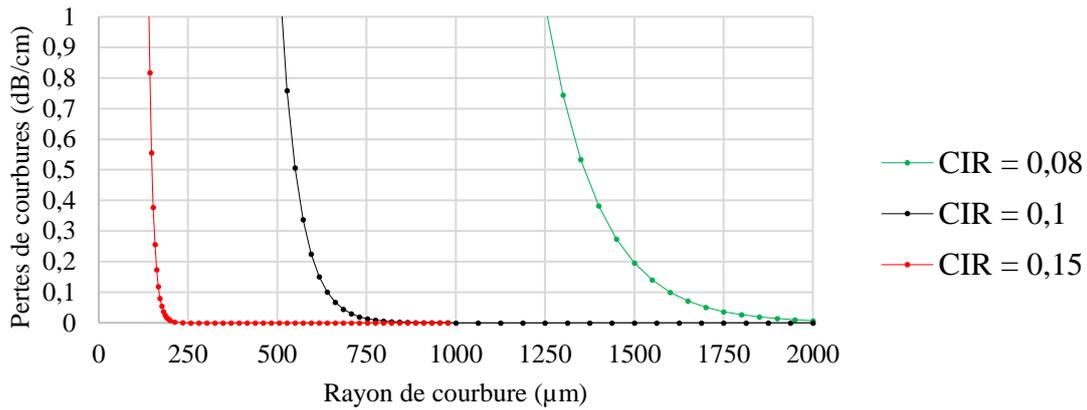


Figure 2.23 – Evolution des pertes par courbure en fonction du rayon de courbure pour 3 configurations de contraste d'indice et pour le mode TE_0 .

Comme discuté et illustré dans la section 2.2.2.2, la courbure des guides implique une délocalisation des modes de propagation vers l'extérieur de la courbe. Ainsi, à la jonction d'un guide rectiligne et d'un guide à courbure, sans modification de conception, des pertes de non-recouvrement modal s'ajoutent à chaque itération de ce type de jonction car le mode du guide à courbure est délocalisé vers l'extérieur de celle-ci. Un décalage latéral du guide rectiligne vers l'extérieur de la courbure permet de réduire les pertes optiques. Une série de simulations a été effectuée pour trouver la valeur de décalage à appliquer à l'entrée/sortie des guides à courbure pour minimiser ces pertes de non-recouvrement modale. Les résultats sont rapportés en Figure 2.24.

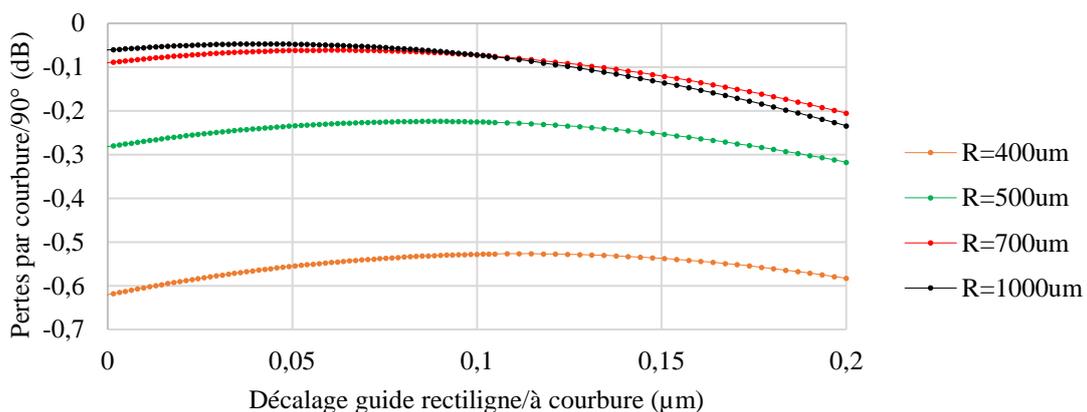


Figure 2.24 – Evolution des pertes par courbure en fonction du décalage entre un guide rectiligne et à courbure pour différents rayons de courbure et pour le mode TE_0 .

Plus la courbure des guides est importante et plus le décalage nécessaire pour maximiser le recouvrement modal l'est aussi. Il est important de noter que ce décalage est deux fois plus important pour les jonctions entre deux guides de courbure opposée et de rayon de courbure identique. Les valeurs de décalage retenues sont reportées dans le Tableau 7.

R_{courbure} (μm)	400	500	700	1000
Δ_{rectiligne/courbé} (nm)	50,7	44,1	37,6	11,3

Tableau 7 – Synthèse des grandeurs de décalage appliquées sur les guides d'onde pour 4 rayons de courbure.

Cette étude par simulations a permis de déterminer les pertes optiques attendues en fonction du rayon de courbure pour 3 contrastes d'indice de réfraction cœur/gaine. Le rayon de courbure optimal retenu est de $R = 1000 \mu\text{m}$ et présente des pertes optiques inférieures à $0,1 \text{ dB.cm}^{-1}$. De plus, les décalages entre un guide rectiligne et à courbure pour maximiser le recouvrement modal a été simulé pour 4 rayons de courbure. Les pertes optiques attendues pour un rayon de courbure de $R=1000 \mu\text{m}$ sont inférieures à $0,1 \text{ dB}$ par virage à 90° de la lumière. Ce dimensionnement de courbure permet ainsi la réalisation d'un circuit faibles pertes.

2.2.3.3 Tolérance à la fabrication du dimensionnement des grandeurs transverses et du contraste d'indice de réfraction

Pour finaliser la modélisation des guides rectilignes et à courbure, l'étude de la robustesse des différentes structures simulées vis-à-vis de leur fabrication a été réalisée à l'aide d'une série de simulations prenant en compte les tolérances et incertitudes de fabrication. Le principal objectif de cette étude a été de déterminer le nombre de modes dans un intervalle de dimensionnement qui sera détaillé ci-après.

Une étude de type « *corner analysis* » est un plan d'expérience simple et communément utilisée dans l'étude des variations dans un procédé de fabrication. Par exemple, rappelons que l'équipement de photolithographie UV et de dépôt par PECVD du LN2 imposent des incertitudes sur le dimensionnement sur la largeur, l'épaisseur et le contraste d'indice de réfraction des guides fabriqués. Les incertitudes sur ces grandeurs sont de $\Delta L = 300 \text{ nm}$, $\Delta e = 20 \text{ nm}$ et $\Delta n_{\text{PECVD}} = 0,02$, respectivement.

D'autres paramètres de fabrication pourraient avoir des variations, telles que la profondeur de gravure ou encore la superposition de masque (erreur d'alignement entre deux masques). De plus, des paramètres de stimulus et environnementaux peuvent aussi être inclus dans cette analyse telles que la température, l'hygrométrie, etc.

Chaque paramètre de processus se voit attribuer un nom : optimisé (opt), bas et haut. Pour trois paramètres de processus, nous pouvons donc considérer un total de 27 possibilités. Parmi ces possibilités, seulement 15 simulations sont nécessaires pour donner le nombre de mode de propagation des guides rectilignes vis-à-vis de l'incertitude de fabrication de cette étude.

Rappelons que la configuration visée est de 200 nm d'épaisseur et 1000 nm de largeur pour les dimensions de la couche de cœur avec un contraste d'indice de réfraction cœur/gaine de $\Delta n = 0,1$.

Les résultats des simulations d'incertitude de fabrication pour des guides rectilignes sont rapportés dans le Tableau 8. L'analyse de ces résultats montre que la propagation dans les guides devient multimodes dans une seule configuration correspondant à la limite haute de tolérance sur les paramètres d'épaisseur, largeur et indice de réfraction du cœur des guides d'ondes, à savoir : 220 nm d'épaisseur, 1300 nm de largeur et un contraste d'indice de 0,12. Ce cas particulier est coloré en orange dans le Tableau 8.

CIR = 0,08	E_{bas} (180nm)	E_{opt} (200nm)	E_{haut} (220nm)
L _{haut} (1300nm)	(TE ₀ , TM ₀)	-	(TE ₀ , TM ₀)
L _{opt} (1000nm)	-	(TE ₀ , TM ₀)	-
L _{bas} (700nm)	(TE ₀ , TM ₀)	-	(TE ₀ , TM ₀)
CIR = 0,1	E_{bas} (180nm)	E_{opt} (200nm)	E_{haut} (220nm)
L _{haut} (1300nm)	(TE ₀ , TM ₀)	-	(TE ₀ , TM ₀)
L _{opt} (1000nm)	-	(TE ₀ , TM ₀)	-
L _{bas} (700nm)	(TE ₀ , TM ₀)	-	(TE ₀ , TM ₀)
CIR = 0,12	E_{bas} (180nm)	E_{opt} (200nm)	E_{haut} (220nm)
L _{haut} (1300nm)	(TE ₀ , TM ₀)	-	(TE ₀ , TM ₀ , TE ₁)
L _{opt} (1000nm)	-	(TE ₀ , TM ₀)	-
L _{bas} (700nm)	(TE ₀ , TM ₀)	-	(TE ₀ , TM ₀)

Tableau 8 – Synthèse des modes autorisés dans les différentes configurations simulées à 633 nm en considérant une étude dite de « *corner analysis* ».

Ces études par simulations des effets de la courbure des guides d'ondes ainsi que leur robustesse face aux incertitudes de fabrication sont importantes. En effet, elles permettent d'obtenir les marges à considérer pour les paramètres de conception à respecter dans le but d'optimiser les performances des guides dans la plage spectrale d'opération visée, tout en respectant la contrainte de propagation monomode. Ces résultats de simulations ont pu être utilisés lors de multiples itérations de fabrication de ces structures. Ces simulations finalisent donc la modélisation des guides rectilignes et à courbure. Leur fabrication est détaillée dans le chapitre suivant.

2.2.4 Modélisation des coupleurs MMI 50/50

La brique de base de séparation de puissance lumineuse étudiée et développée dans ce travail de thèse est le coupleur MMI. Sa modélisation est traitée dans cette section, dans l'objectif de déterminer les dimensions de la partie multimodes et des guides d'entrée et de sortie tout en maximisant les performances de transmission de la structure.

2.2.4.1 Grandeurs d'optimisation

La Figure 2.25 représente la vue schématique d'un coupleur avec les différents paramètres utilisés pour son optimisation. La distribution d'intensité du champ électromagnétique totale est représentée en échelle de couleur chaude à l'intérieur de la délimitation du coupleur MMI en blanc. Le critère d'optimisation pour cette modélisation est le taux de transmission du champ électromagnétique et une maximisation est recherchée dans cette étude. Ce taux de transmission est obtenu pour TE_0 et TM_0 en calculant la matrice de diffusion dans la fenêtre de simulation. Cette matrice de diffusion est une construction mathématique qui relie l'état initial et l'état final d'un système physique soumis à un processus de diffusion qui est utilisée dans les simulations du logiciel FIMMWAVE [59].

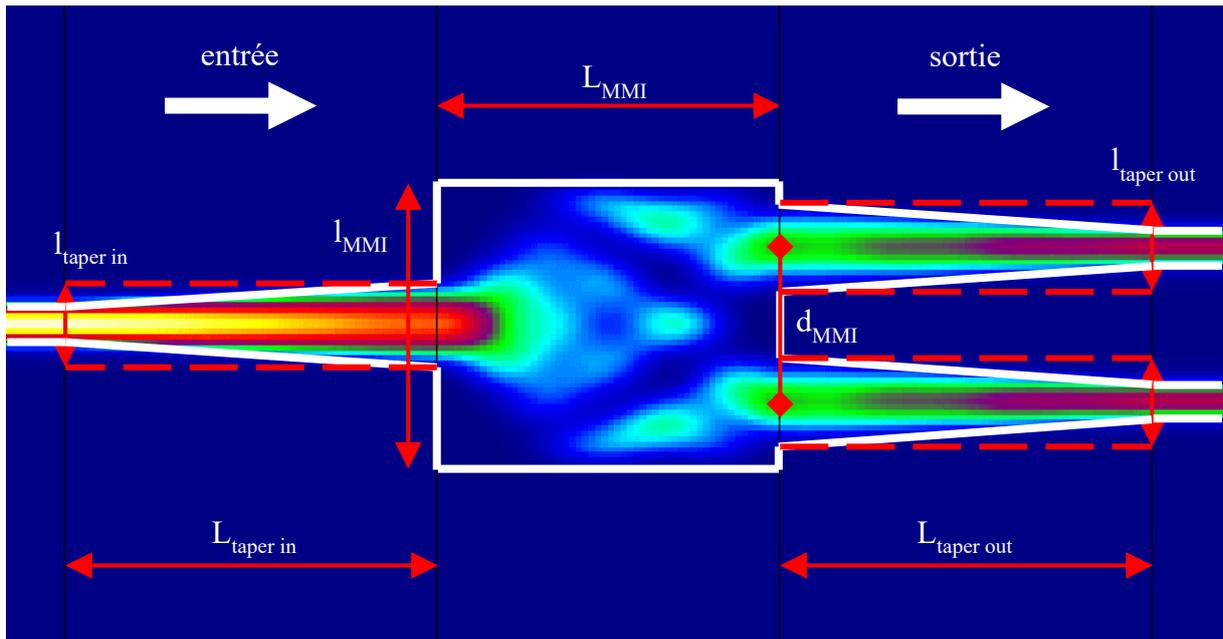


Figure 2.25 – Distribution de l'intensité du champ électromagnétique au sein d'un coupleur MMI simulé en environnement FIMMPROP.

Les guides d'entrée et de sortie disposent d'une forme trapézoïdale. Ce type de structure est appelé guide en biseau ou « taper », en entrée et en sortie du coupleur. Le rôle de ces structures est d'améliorer le recouvrement modal entre le/les modes du guide multimodes avec le/les modes d'entrée/sortie. De cette façon, une maximisation de la transmission totale du coupleur MMI est possible en optimisant la largeur des « tapers » monomode d'entrée/sortie. Les grandeurs définissant la structure d'entrée sont $l_{\text{taper in}}$ et $L_{\text{taper in}}$ pour la largeur et la longueur du guide en biseau d'entrée. Celles définissant les deux guides en biseau de sortie sont $l_{\text{taper out}}$ et $L_{\text{taper out}}$.

La séparation de l'intensité lumineuse dans un coupleur MMI utilise un effet physique particulier portant le nom d'effet d'auto-imagerie. Celui-ci se produit dans la partie multimodes de la structure qui est comprise entre les guides d'ondes d'entrée et de sortie et a fait l'objet d'une description dans la partie 2.1.4. Les positions d'auto-imagerie sont principalement dépendante de la position d'excitation d'entrée de la partie multimodes et de la largeur de celle-ci, notée l_{MMI} , lié au nombre de modes autorisés. Notons que l'effet du décalage de l'excitation modale d'entrée dans le guide multimode est négligé comme expliqué à la fin de la section 2.1.4.2. Pour un coupleur MMI symétrique en $1 \times N$, un nombre de modes autorisé d'au moins $N+1$ permet d'obtenir un faible déséquilibre entre les deux sorties et de faibles pertes d'insertion [58], [60].

La qualité d'imagerie fait référence à la précision avec laquelle le champ d'entrée est reproduit à l'extrémité du guide d'ondes multimodes et la dépendance quadratique des constantes de propagation avec le numéro de mode présenté dans l'équation (2.60) de la section 2.1.4.1 est

une approximation. Cela signifie que les modes guidés accumuleront de petits écarts par rapport aux phases calculées aux distances d'imagerie tendant à brouiller le champ d'image reconstruit.

Le nombre de mode de propagation autorisés dans le guide multimodes doit donc être supérieur à $N+1$ tout en restant limité pour éviter cette accumulation d'erreurs de phases entre les modes. De cette façon, la largeur du guide multimodes des coupleurs a été fixée à $8 \mu\text{m}$ et autorise la propagation de 14 modes à $\lambda = 633 \text{ nm}$.

Une série de simulations sur les 4 paramètres clé du dimensionnement, à savoir, L_{MMI} , d_{MMI} , $l_{\text{taper in}}$ et $l_{\text{taper out}}$ a été réalisée afin de maximiser le taux de transmission au travers du coupleur. Seuls les résultats de simulations sur L_{MMI} (voir Figure 2.26) et d_{MMI} (voir Figure 2.27) seront présentés sous leur forme graphique afin d'alléger la lecture. Ce type d'optimisation a été poursuivi de la même façon sur les termes $l_{\text{taper in}}$ et $l_{\text{taper out}}$. Il est important de souligner que la modification d'un paramètre, par exemple la longueur de la partie multimodes (L_{MMI}), entraîne une variation sur les valeurs optimales de la distance de séparation des guides en biseau (d_{MMI}), la largeur du guide d'entrée ($l_{\text{taper in}}$) et les largeurs des guides de sortie ($l_{\text{taper out}}$). De ce fait, les graphiques présentés sur les Figure 2.26 et Figure 2.27 dépendent d'itérations successives sur les grandeurs d'optimisation afin d'atteindre une convergence des valeurs.

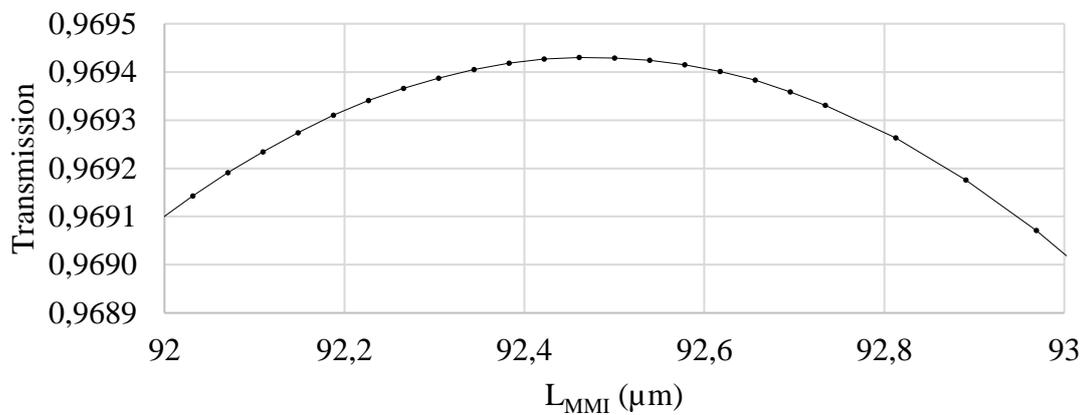


Figure 2.26 – Effet de la longueur de la partie multimodes L_{MMI} du coupleur MMI sur la transmission pour le mode TE_0 .

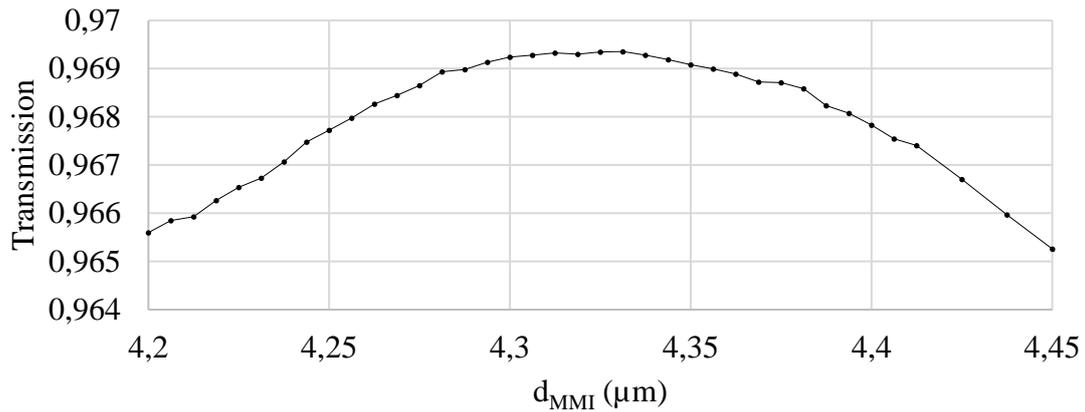


Figure 2.27 – Effet de la distance de séparation d_{MMI} des guides en biseau de sortie sur la transmission pour le mode TE_0 .

In fine, ce processus d’optimisation itératif a permis d’obtenir des valeurs optimales et qui sont présentées dans le Tableau 9.

L_{MMI} (μm)	d_{MMI} (μm)	$l_{\text{taper in}}$ (μm)	$l_{\text{taper out}}$ (μm)
92.46	4.32	2.3	2.44

Tableau 9 – Synthèse des paramètres géométriques optimisés des coupleurs MMI.

La plage spectrale d’opération monomode des guides proposés visant à couvrir autant que possible la gamme du visible, une étude par simulation du comportement des coupleurs a donc été entreprise. Cette série de simulations a été effectuée en utilisant les valeurs optimisées des paramètres géométriques préalablement déterminés (Tableau 9).

La Figure 2.28 présente le comportement du coupleur MMI en termes de pertes par transmission en fonction de la longueur d’onde d’opération. La forte augmentation des pertes de transmission du coupleur MMI, autour de 500 nm, est liée au changement de régime de propagation du guide en entrée. En effet, à cette longueur d’onde, le mode de propagation d’ordre supérieur TE_1 est possible pour les guides d’entrées/sorties du coupleur.

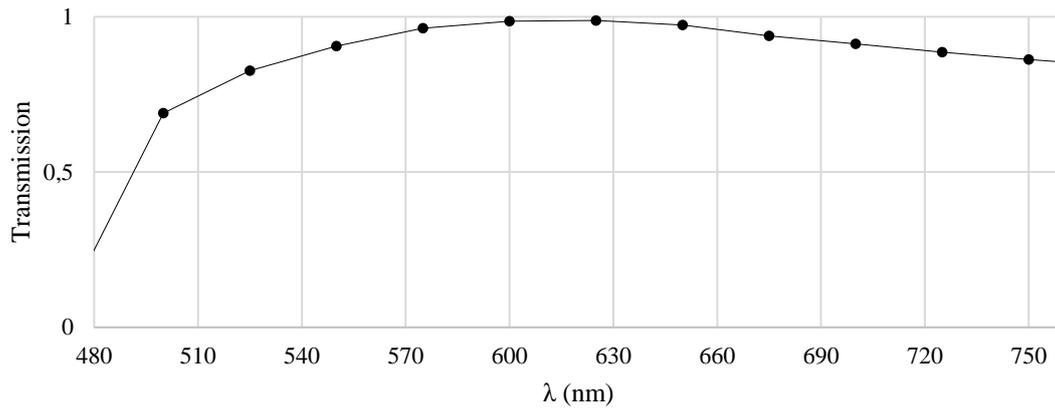


Figure 2.28 – Evolution des pertes de transmission d'un coupleur MMI optimisé en fonction de la longueur d'onde d'opération pour le mode TE_0 .

2.2.4.2 Tolérance du dimensionnement à la fabrication des coupleurs MMI

De même que pour les guides rectilignes, une étude de la transmission totale de ces structures vis-à-vis des tolérances des procédés de fabrication est réalisée sous la forme d'une étude de type « *corner analysis* ». Parmi les fonctions de division de puissance optique, les coupleurs MMI sont réputés pour présenter une bonne tolérance face aux aléas de fabrication [61]. C'est pourquoi, l'incertitude retenue sur la longueur de la partie multimodes (L_{MMI}) a été fixée à environ 500 nm. Ces simulations ont été réalisées pour les deux modes de propagation TE_0 et TM_0 et les résultats en transmission sont synthétisés dans le Tableau 10.

Les transmissions observées restent au-dessus des 90% dans la majorité des configurations et met en exergue l'excellente robustesse face aux incertitudes de fabrication des coupleurs MMI. Les simulations réalisées ont permis de déterminer un dimensionnement compatible avec les techniques de fabrication des coupleurs MMI 50/50.

CIR = 0,08	L_{min} (92μm)	L_{opt} (92.46μm)	L_{max} (93μm)
L _{max} (8.3μm)	TE ₀ (91.35%) TM ₀ (88.61%)	-	TE ₀ (92.47%) TM ₀ (89.91%)
l _{opt} (8μm)	-	TE ₀ (97.41%) TM ₀ (96.29%)	-
L _{min} (7.7μm)	TE ₀ (96.35%) TM ₀ (97.69%)	-	TE ₀ (95.68%) TM ₀ (97.42%)
CIR = 0,1	L_{min} (92μm)	L_{opt} (92.46μm)	L_{max} (93μm)
L _{max} (8.3μm)	TE ₀ (95.26%) TM ₀ (92.70%)	-	TE ₀ (96.29%) TM ₀ (93.96%)
l _{opt} (8μm)	-	TE ₀ (98.59%) TM ₀ (97.57%)	-
L _{min} (7.7μm)	TE ₀ (92.95%) TM ₀ (95.05%)	-	TE ₀ (91.38%) TM ₀ (94.08%)
CIR = 0,12	L_{min} (92μm)	L_{opt} (92.46μm)	L_{max} (93μm)
L _{max} (8.3μm)	TE ₀ (98.06%) TM ₀ (95.74%)	-	TE ₀ (98.62%) TM ₀ (96.78%)
l _{opt} (8μm)	-	TE ₀ (96.47%) TM ₀ (98.75%)	-
L _{min} (7.7μm)	TE ₀ (86.14%) TM ₀ (92.17%)	-	TE ₀ (84.01%) TM ₀ (90.46%)

Tableau 10 – Synthèse des performances en transmission des modes TE₀/TM₀ pour les différentes configurations simulées à 632,8 nm en considérant une étude dite de « *corner analysis* ».

2.3 Conclusion

Ce chapitre a permis de rappeler et présenter les effets physiques de propagation modale à l'intérieur des guides d'onde ainsi que du principe d'auto-imagerie se produisant dans la partie multimodes des coupleurs MMI.

Le but de cette partie était d'aider à la compréhension de la modélisation des guides d'onde enterrés dont le dimensionnement répond aux contraintes de propagation monomode dans le visible imposées dans ce projet.

La configuration retenue est de 200 nm d'épaisseur, 1000 nm de largeur ainsi qu'un contraste d'indice de réfraction cœur/gaine de $\Delta n = 0,1$ à 633 nm.

Le dimensionnement d'un coupleur MMI opérant dans le visible a aussi fait l'objet d'une modélisation et les résultats de simulation indiquent une transmission supérieure à 90%, tout en prenant en compte les tolérances en fabrication liées à la photolithographie UV et au procédé de dépôts PECVD du SiO_xN_y . La conception des puces fabriquées sera présentée dans le Chapitre 4.

Le chapitre suivant traite de la fabrication et du développement technologique des guides d'onde monomode ainsi que des coupleurs MMI en SiO_xN_y dans le domaine du visible.

CHAPITRE 3 : DESCRIPTION DES ÉTAPES OPTIMISÉES DE FABRICATION DES DISPOSITIFS DE GUIDAGE RETENUS

Dans la continuité du Chapitre 2, ce troisième chapitre présente l'ensemble des protocoles optimisés de fabrication des briques de base à partir de SiO_xN_y .

- Dans un premier temps, une brève revue des techniques de dépôt de matériaux est réalisée. A l'issue de cet axe, le choix de l'utilisation du SiO_xN_y et de sa fabrication par la technique PECVD sera discuté et justifié. Ensuite, le procédé de fabrication du matériau SiO_xN_y par PECVD ainsi que la méthode de mesure des épaisseurs et des indices de réfraction optique sont décrits.
- Dans un second temps, le protocole de photolithographie UV de la couche de cœur des guides d'onde et des coupleurs MMI 50/50 est détaillé. Cette partie abordera le principe général de photolithographie UV et, plus particulièrement, des procédés de gravure plasma sur matériau diélectrique qui ont été mis en œuvre. Une caractérisation par microscopie électronique à balayage (MEB) de la rugosité et du dimensionnement obtenu du cœur des guides d'onde est présentée en fin de partie.
- Enfin, dans un troisième temps, le procédé de fabrication des facettes d'injection est décrit. Les performances en termes de puissance optique transmise sont directement liées à la qualité de fabrication de la facette d'injection. Ainsi, l'objectif de cette étude a été de déterminer la méthodologie permettant de minimiser la rugosité de facette. Plusieurs techniques ont été étudiées et leurs avantages & inconvénients seront explicités et celle présentant le meilleur compromis sera retenue.
- Une analyse critique de ces différentes étapes de développement technologique ainsi qu'une synthèse tant sur les principaux résultats de fabrication obtenus, que sur les différents verrous technologiques qui ont dû être dépassés, est effectuée.

3.1 Développement technologique du matériau guidant

Cette section est scindée en deux grands axes. Le premier axe présente les principales techniques de dépôt de matériaux utilisées aujourd'hui en microélectronique. Certaines de ces technologies sont utilisées pour les dépôts de matériaux diélectriques en optique intégrée. Parmi celles-ci, les techniques dites de dépôt physique en phase vapeur (PVD) et de dépôt chimique en phase vapeur (CVD) sont décrites. Puis, le procédé de fabrication du SiO_xN_y , par la technique PECVD utilisée notamment au LN2, est présenté et une emphase particulière est mise sur certaines étapes clés.

3.1.1 Revue des principales techniques de dépôt de matériaux : plateforme SOI et matériaux diélectriques

Cette section a pour objet de faire une revue des techniques de dépôt en considérant les composés classiquement utilisés en microélectronique. A la suite, sera abordée la problématique du composé SiO_xN_y , objet de l'étude.

3.1.1.1 Dépôt physique en phase vapeur : évaporation

Le principe fondamental de la technique de dépôt en phase vapeur PVD²² consiste en l'éjection des atomes à partir d'un matériau cible solide, puis transportée sous vide jusqu'à la surface d'un substrat. Les atomes peuvent être éjectés de la cible par différents moyens : chauffage résistif, chauffage par faisceau d'électrons, bombardement ionique ou bombardement par faisceau laser ou ablation laser.

En microfabrication, de nombreux métaux peuvent être déposés par la technique PVD tels que l'aluminium, le cuivre, les métaux réfractaires ou encore des alliages et composés métalliques tels que TiW, TiN, ZnO et AlN.

L'évaporation des métaux élémentaires est une technique relativement simple à mettre en œuvre : à haute température, la différence de pression de vapeur saturante entraîne le matériau évaporé vers le substrat. Les taux typiques de dépôt sont lents, de l'ordre de 0,1 à 1 $\text{nm}\cdot\text{s}^{-1}$.

En général, les systèmes d'évaporation sont constitués d'une chambre à vide et dont les meilleurs systèmes disposent d'une pression de 10^{-11} torr (ultravide). De cette façon, les atomes ne subissent quasiment pas de collisions et empruntent des trajectoires rectilignes de la source

²² « Physical Vapor Deposition »

au substrat. Typiquement, pour des pressions de vide en dessous de 10^{-4} torr (vide secondaire), le libre parcours moyen des atomes est plus grand que la taille d'une chambre de dépôt standard. Cette caractéristique est donc intéressante pour la fabrication de film sur des surfaces planes.

Cependant, l'utilisation d'une faible température de dépôt ajoutée aux trajectoires rectilignes des atomes dans la chambre, implique une mauvaise qualité de remplissage des structures à rapport d'aspect élevé telles que des trous ou des arêtes. Cette technique n'a que très peu de paramètres pouvant être modifiés afin d'adapter les propriétés du film. Parmi ceux-ci, le chauffage du substrat permet l'amélioration de la qualité de la couche déposée en réduisant la quantité d'impuretés présentes dans le matériau. Néanmoins, dans le cas du dépôt de matériaux composés tels que le SiO_2 , un chauffage localisé à l'aide d'un faisceau d'électrons dans un creuset est nécessaire. Cette technique présente l'inconvénient de générer un rayonnement de type rayons X pouvant endommager les appareils sensibles. Une vue schématique de cette technique est présentée sur la Figure 3.1. Il est à noter que cette technique présente aussi le risque d'incorporer le matériau constituant le creuset dans la couche déposée en cas de désalignement du faisceau laser utilisé pour le bombardement.

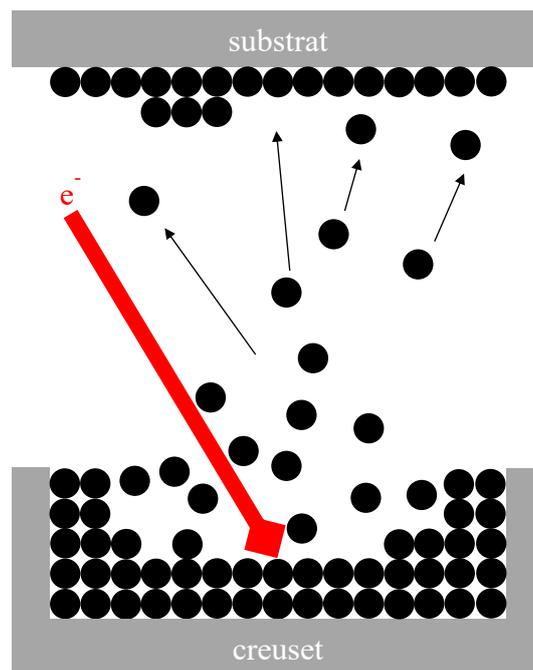


Figure 3.1 – Vue schématique du procédé d'évaporation par faisceau d'électrons matérialisé en rouge, vaporisant le matériau d'un creuset [62].

3.1.1.2 Dépôt physique en phase vapeur : pulvérisation cathodique

Le procédé de pulvérisation cathodique est une méthode PVD couramment utilisée dans les laboratoires de microfabrication. Le principe de base du fonctionnement de cette technique est présenté en Figure 3.2. Il consiste en un bombardement assisté par un plasma d'ions d'Argon (Ar^+) sur une cible spécifique afin d'éjecter une concentration suffisante d'atomes de cette dernière. Les taux de pulvérisation typiques sont de 1 à 10 $\text{nm}\cdot\text{s}^{-1}$ et sont nettement plus élevés que pour la technique d'évaporation.

En général, les pressions mises en œuvre pour la technique de dépôt par pulvérisation cathodique sont plus élevées (1 à 10 mtorr) en comparaison du procédé d'évaporation utilisant des pressions plus faibles (comprises entre 10^{-4} et 10^{-6} torr). Cela implique un libre parcours moyen des atomes plus court et une probabilité de collisions atomiques plus importante avant d'atteindre le substrat.

Les systèmes de pulvérisation cathodique disposent généralement d'une source RF fonctionnant à 13,56 MHz. Ils peuvent être utilisés pour déposer des matériaux diélectriques, ce qui n'est pas possible avec les systèmes à source continue (DC) en raison d'importants effets de charge. Il est possible de former des couches minces d'oxyde en ajoutant intentionnellement de l'oxygène à l'atmosphère de pulvérisation. Cette méthode est appelée pulvérisation cathodique réactive. Dans la même manière, cet ajout d'oxygène peut être utilisé pour la formation de nitrures. C'est ainsi, par exemple, que les composés de type Ta_2O_5 , TiN ou encore SiO_2 (en utilisant un magnétron) sont généralement fabriqués par pulvérisation cathodique.

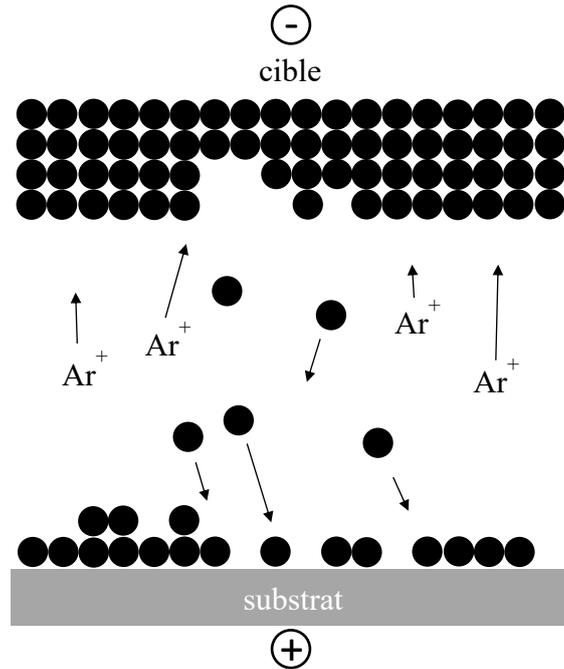


Figure 3.2 – Vue schématique du procédé de pulvérisation cathodique. Des ions d'argon frappent les atomes de la cible. Les atomes éjectés se déposent ensuite sur le substrat [62].

3.1.1.3 Dépôt chimique en phase vapeur (CVD)

Dans le cas des dépôts chimiques en phase vapeur (CVD), les matériaux sources sont introduits dans le réacteur en phase gazeuse. Ils sont activés dans le plasma puis diffusent à la surface du substrat, et y réagissent pour déposer un film. Les sous-produits sont désorbés et pompés comme illustré en Figure 3.3. De plus, la plupart des procédés par CVD conduisent à des films amorphes ou polycristallins. Cependant, il est possible de réaliser des dépôts de film de silicium cristallin dans des conditions particulières.

Les taux de dépôt dépendent de la température selon l'équation d'Arrhenius, mais ils sont de l'ordre de $0,1$ à 10 nm.s^{-1} . Les processus de CVD dépendent à la fois des réactions chimiques et de la dynamique de l'écoulement. De ce fait, deux régimes distincts de dépôt sont possibles :

- soit le débit de gaz est assez élevé pour fournir suffisamment de réactifs et le dépôt du film est ainsi limité par les réactions chimiques de surface ;
- soit les réactions de surface sont rapides et le débit de gaz devient le paramètre limitant.

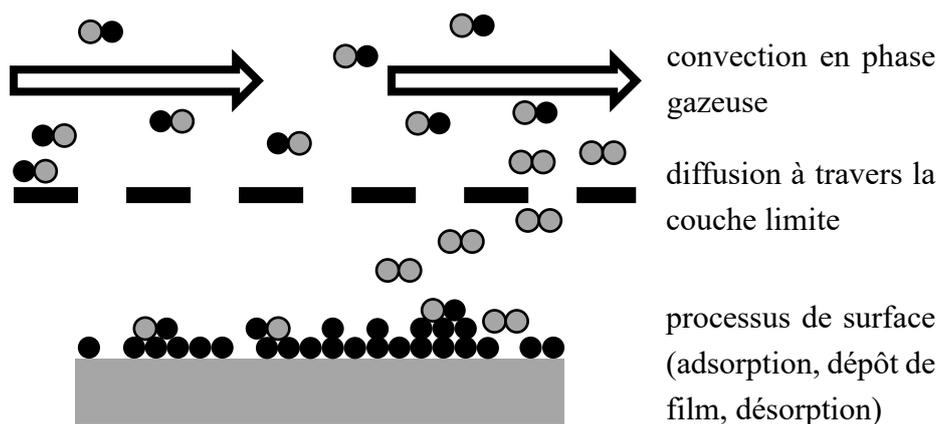


Figure 3.3 – Vue schématique du procédé de dépôt chimique en phase vapeur. Les molécules de gaz source s'adsorbent et réagissent à la surface pour former un film. Les produits de réaction sont désorbés, diffusés et pompés [62].

Le silane (SiH_4) et l'oxygène (O_2) entrent dans la composition des gaz utilisés lors de dépôts de matériaux diélectrique tels que le SiO_2 ou encore le SiO_xN_y . Lorsque ces deux gaz réagissent en phase gazeuse, ils forment des particules d'oxyde solide dans le flux gazeux. Celles-ci seront donc en suspension dans le réacteur et se déposeront aléatoirement sur la tranche. De l'oxyde peut se former sur les parois du réacteur et de telles réactions peuvent être source de flocons dans la chambre et/ou de délaminations sur ses parois et entraîner une contamination de la couche de matériau déposée si le réacteur n'est pas régulièrement nettoyé.

3.1.1.4 Dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma (PECVD)

Dans de nombreux cas, l'utilisation de procédés CVD sous des températures très élevées rend cette technique de dépôt incompatible avec certaines technologies. Par exemple, les dépôts de SiO_2 de haute qualité peuvent être réalisés à l'aide de précurseur gazeux tel que le TEOS²³ mais nécessitent une température de procédé de 700 °C. Ce cas particulier de procédé est inutilisable par les technologies microélectroniques car, à ces températures, le phénomène de migrations des métaux est très prégnant.

C'est pourquoi, de nouvelles chimies de gaz sources ont été étudiées pour permettre des températures de dépôt plus basses [63], [64]. De plus, la décomposition du gaz source peut être favorisée à l'aide de réactions par plasma. Cela se traduit par des taux de dépôt similaires à la technique CVD standard, compris entre 0,1 à 10 $\text{nm}\cdot\text{s}^{-1}$, à des températures beaucoup plus basses (généralement autour de 300 °C).

²³ « TetraEthOxySilane »

Le principe de fonctionnement de base d'un réacteur PECVD est illustré en Figure 3.4. Une tranche de substrat, généralement composé de Si cristallin, est placée sur une électrode inférieure chauffée, les gaz sources sont introduits par le haut du réacteur et sont pompés autour de l'électrode inférieure.

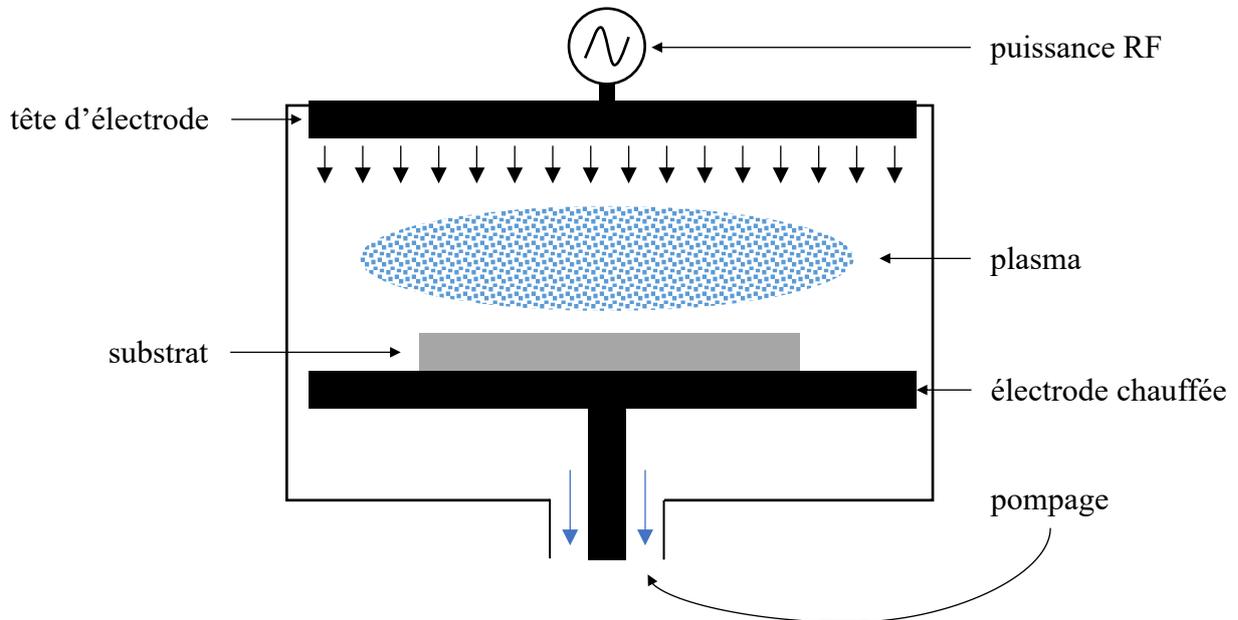


Figure 3.4 – Vue schématique du principe de fonctionnement de base de la technique de dépôt par PECVD [62].

En CVD standard, les principaux paramètres de dépôt sont la pression, la température, le débit et le rapport de débit des gaz. Pour les dépôts par PECVD, la puissance de la source RF constitue un paramètre additionnel. De plus, dans les réacteurs avancés, cette puissance peut être appliquée aux deux électrodes et permet de fournir des fréquences et des niveaux différents de puissance de manière indépendante. Les fréquences typiques de fonctionnement sont de 380-400 kHz ou 13,56 MHz. A 380 - 400 kHz, la fréquence est suffisamment lente pour entraîner les ions dans le champ RF, et ceci implique un bombardement ionique important. A 13,56 MHz, seuls les électrons peuvent suivre le champ et implique un bombardement ionique réduit. Le choix de la fréquence de fonctionnement est important dans l'ingénierie des contraintes (stress) de la couche déposée. A ce titre, une étude à des fréquences de 380 kHz et 13.56 MHz a été conduite par Gorin et al [44]. Dans celle-ci, des relations directes entre la fréquence de dépôt PEDVD et l'absorption des couches minces, ainsi que les pertes par propagation de guides d'onde en Si_xN_y , ont été démontrées.

La technique PECVD est utilisée pour le dépôt de silicium amorphe ($\alpha\text{-Si}$). Cependant, la libération d'hydrogène présent dans la composition de l' $\alpha\text{-Si}$ pendant le recuit doit être prise en compte car elle présente des effets à la fois bénéfiques et néfastes [65]–[67].

Cette technique de dépôt peut aussi être utilisée pour les oxydes mixtes, les nitrures et les carbures ainsi que les oxydes dopés. A ce titre, un mélange de silane (SiH_4), de protoxyde d'azote (N_2O) et d'ammoniac (NH_3) conduira à fabriquer un oxynitrure - (SiO_xN_y), avec un rapport variable des éléments azote et oxygène, couvrant toute la gamme des compositions possibles pour obtenir un ensemble de propriétés inhérentes à ce composé (optiques, mécaniques, physico-chimiques...) ; ce qui en fait son grand intérêt par rapport aux composés SiN_x et SiO_x

3.1.1.5 Justification du choix du SiO_xN_y déposé par PECVD en tant que matériau guidant

A titre de rappel, l'utilisation du SiO_xN_y dans le guidage en optique intégrée est basé sur l'utilisation d'un cœur en SiO_xN_y et d'une gaine en SiO_2 (thermique ou amorphe). Comme il a été discuté dans la section 1.2.2, l'oxynitrure de silicium est particulièrement intéressant pour sa propriété d'accordabilité dans une large plage d'indice de réfraction optique. L'indice de réfraction étant directement lié à la composition stœchiométrique de la couche, l'indice du SiO_xN_y peut prendre une large plage d'indices de réfraction (de $n_{\text{SiO}_2} = 1,46$ à $n_{\text{Si}_3\text{N}_4} = 2,01$ à $\lambda = 633$ nm). Il profite aussi du développement technologique bien maîtrisé des matériaux diélectriques SiO_2 et SiN_x en termes de technique de fabrication.

Par ailleurs, une étude publiée par Albers et al [68] atteste que les techniques de dépôts par PECVD et LPCVD sont complémentaires pour des applications d'optique intégrée. Le dépôt par PECVD de couches minces de SiO_xN_y est plus approprié pour des indices de réfraction inférieurs à $n_{\text{SiO}_x\text{N}_y} = 1,75$ du fait d'une meilleure uniformité d'épaisseur déposée, d'un taux de dépôt plus important et d'un stress mécanique moins élevé dans la couche mince résultante. Dans le cas où l'indice de réfraction visé est supérieur à $n_{\text{SiO}_x\text{N}_y} = 1,75$, c'est la technique de dépôt par LPCVD qui est mieux adaptée.

La réalisation des structures de guidage passives utilisant un CIR cœur/gaine $\Delta n = 0,1$ peut donc être mise en œuvre par la technique de dépôt par PECVD. En effet, les indices de réfraction des couches de cœur et de gaine sont très proches de l'indice de réfraction du SiO_2 , à savoir $n_{\text{SiO}_2} \approx 1,5$ à $\lambda = 633$ nm. De plus, il a été choisi d'utiliser le SiO_xN_y comme seul matériau afin de profiter d'une accordabilité accrue par rapport à la plateforme SiO_xN_y standard ($\text{SiO}_x\text{N}_y/\text{SiO}_2$) en offrant une plus grande liberté dans le dimensionnement des structures tout en répondant aux contraintes de propagation monomode et dans une large plage du domaine visible.

3.1.2 Description du protocole de dépôt du SiO_xN_y par PECVD

Dans cette section, le protocole de dépôt du SiO_xN_y par PECVD mis en œuvre dans le réacteur du LN2 (modèle de réacteur MESC Multiplex de la compagnie Surface Technology Systems - STS) est présenté. Les paramètres techniques sont listés et les résultats de caractérisation des couches déposées par ellipsométrie sont présentés.

3.1.2.1 Préparation de la surface des échantillons

Les substrats utilisés pour la fabrication des couches de cœur et de gaine sont des tranches de silicium cristallin orientées (1,0,0), de diamètre 100 mm et d'épaisseur 500 μm .

Afin de maximiser la qualité des dépôts réalisés, la surface de la tranche entrant dans le réacteur de dépôts doit être la plus propre possible. En effet, la moindre contamination (poussière ou substances extérieures) pourrait être piégée à l'intérieur de la couche et ainsi considérablement affecter les propriétés optiques et mécaniques de la couche déposée.

Avant chaque dépôt dans le réacteur, les tranches subissent donc un procédé de nettoyage standard. Il consiste en plusieurs bains successifs dans de l'acétone puis de l'isopropanol. Dans le cas de tranche de diamètre 100 mm, le nettoyage se poursuit dans une centrifugeuse. Celle-ci dispose de deux cycles : le premier rince à l'eau les résidus d'acétone/isopropanol/autres poussières, et le second sèche les échantillons à l'azote.

Pour finir ce procédé de nettoyage, les échantillons subissent ensuite un plasma d'oxygène afin d'éliminer les possibles résidus non enlevés dans les étapes précédentes. Le plasma d'oxygène utilisé interagit peu avec le silicium ou le SiO_xN_y .

A noter que ce procédé de nettoyage n'est pas mis en œuvre pour le dépôt des deux premières couches de SiO_xN_y PECVD constituant la gaine et le cœur. En effet, lorsque les tranches de silicium sont reçues du fabricant, leur état de propreté est déjà supérieur à ce qui est atteignable en salle blanche. Cependant, des précautions particulières doivent être prises dans la manipulation des tranches afin d'éviter l'ajout de poussières ou autres contaminants en surface. Les échantillons sont donc toujours transportés dans une boîte hermétique et subissent un flux d'azote avant d'être introduits dans le réacteur.

3.1.2.2 Méthode d'optimisation des paramètres de dépôt des couches de SiO_xN_y par PECVD

Dans un premier temps, une série de dépôts a été réalisée sur des échantillons de silicium afin de trouver les paramètres répondant aux propriétés optiques et dimensionnelles visées, qui, pour rappel, sont :

- Un CIR de $\Delta n_{\text{cœur/gaine}} = 0,1$;
- Une épaisseur de 2 μm pour la couche de gaine et de 200 nm pour la couche de cœur.

Le plasma se produisant dans le réacteur de dépôt présente une certaine inhomogénéité. De fait, un procédé ayant pour objectif de déposer des couches dont la précision sur les propriétés optiques et dimensionnelles est haute, doit absolument être développé sur un substrat identique au substrat final. Toutefois, une première série de dépôts sur des échantillons d'une surface de 1 cm² permet une convergence plus efficace des paramètres de dépôts correspondant aux contraintes fixées. En effet, la manipulation d'échantillons de 1 cm² est bien plus aisée et rend le développement technologique du matériau plus économique.

Le critère utilisé pour déterminer l'optimum des paramètres de dépôt reste associé à la répétabilité de plusieurs dépôts identiques sur les grandeurs d'indices de réfraction et d'épaisseur des couches déposées. A la suite de cette optimisation, les dépôts peuvent être optimisés pour des tranches de diamètre 100 mm sur lesquelles les structures finales seront réalisées. Malgré tout, un dépôt sur une tranche de silicium « vierge » est effectué avant chaque itération de dépôt des structures finales afin de valider les valeurs d'épaisseur et d'indice de réfraction. Finalement, les paramètres des conditions retenues pour le dépôt par PECVD des couches de cœur et de gaine de SiO_xN_y sont synthétisés dans le Tableau 11.

	Gaine	Cœur
NH ₃ (sccm)	10	315
SiH ₄ (sccm)	35	60
N ₂ O (sccm)	1515	700
N ₂ (sccm)	-	30
p (mTorr)	900	900
P (W)	60	30
T _{platine} (°C)	300	300
T _{électrode} (°C)	250	250

Tableau 11 – Paramètres de dépôt utilisés pour la fabrication des couches de SiO_xN_y déposées par PECVD. La fréquence de la source RF utilisée est de 13,56 MHz.

Le SiO_xN_y n'est pas le seul matériau fabriqué dans le réacteur de la salle blanche. En effet, il est aussi utilisé dans la fabrication de dioxyde de silicium (α -SiO₂) et de silicium polycristallin (α -Si). Comme indiqué dans la section 3.1.1.3, ces réactions produisent des particules à l'état solide à l'intérieur de la chambre sous vide et l'utilisation répétée contamine aussi l'entrée du réacteur. Une procédure de nettoyage et de conditionnement de la chambre est donc réalisée lorsque l'épaisseur cumulée des dépôts successifs effectués dans le réacteur est supérieure ou égale à 7 μ m. Les paramètres utilisés pour ces deux étapes sont synthétisés dans le Tableau 12.

La procédure de nettoyage de la chambre consiste en un plasma de mélange d'oxygène et de tétrafluorure de carbone (CF₄) à haute puissance permettant de graver la plupart des matériaux présents dans la chambre. Les parois de la chambre sont constituées d'aluminium et réagissent avec le plasma en formant du fluorure d'aluminium. La détection de cette réaction stoppe le plasma du mélange de CF₄ et O₂. Par suite, un conditionnement est réalisé afin de protéger les parois de la chambre pour les dépôts à venir.

Il est à noter qu'une précaution supplémentaire doit être prise sur la propreté du sas d'entrée. Toutefois, les dépôts de particules solides étant visibles à l'œil nu, un nettoyage à l'isopropanol est suffisant.

	Nettoyage #1	Nettoyage #2	Conditionnement
O ₂ (sccm)	100	100	-
CF ₄ (sccm)	400	400	-
SiH ₄ (sccm)	-	-	50
N ₂ O (sccm)	-	-	1800
p (mTorr)	300	600	650
P (W)	600	600	200
T _{platine} (°C)	300	300	300
T _{électrode} (°C)	250	250	250

Tableau 12 – Paramètres de nettoyage et de conditionnement utilisés dans le réacteur de dépôt par PECVD. La fréquence de la source RF utilisée est de 380kHz.

Ce protocole de dépôt a permis la fabrication de deux tranches de diamètre 100 mm. Le fait de disposer de deux tranches fabriquées de façon identique n'est pas anodin. En effet, c'est une assurance contre les aléas de fonctionnement des équipements pouvant se produire pendant le développement technologique de matériau et de protocoles de fabrication. De plus, une étude statistique du fonctionnement des dispositifs peut être menée si aucun bris n'intervient pendant la fabrication.

3.1.2.3 Méthode de mesure des épaisseurs et des indices

Les propriétés de guidage sont très dépendantes de l'épaisseur des matériaux utilisés et de leur indice de réfraction. La méthode de mesure doit donc être rigoureuse et identique entre chaque essai de dépôt par PECVD et, pour cela, il a été choisi d'utiliser l'ellipsométrie.

3.1.2.3.1 Brève description de la méthode de mesure par ellipsométrie

L'ellipsométrie est une technique non-destructive d'analyse optique bien connue et largement exploitée pour extraire l'indice optique d'une couche déposée. Cette méthode a été mise au point par le physicien allemand Paul Drude fin du 19^{ème} siècle [69], [70]. Elle repose sur la mesure de la variation de polarisation de la lumière incidente lors d'une réflexion sur une surface plane.

Cette réflexion introduit un déphasage sur les composantes du vecteur champ électrique qui se traduit par un état de polarisation elliptique. La Figure 3.5 schématise le principe de la mesure et la Figure 3.6 présente également l'équipement utilisé (Ellipsométrie-spectroscopique WOOLLAM).

Il existe plusieurs méthodes d'ellipsométrie (extinction, photométrique, modulation de phase, à polariseur/compensateur tournant), mais elles reposent toutes sur la mesure de deux paramètres ellipsométriques (ψ et Δ) décrivant le comportement du vecteur champ électrique de l'onde après sa réflexion sur l'échantillon. Dans notre étude, la mesure d'ellipsométrie s'effectue en réflexion. A cet effet, rappelons que le coefficient complexe $\tilde{\rho}$ s'écrit comme le rapport des coefficients de Fresnel \tilde{r}_p et \tilde{r}_s correspondant respectivement aux coefficients de la réflectivité de la lumière polarisée p et s :

$$\tilde{\rho} = \frac{\tilde{r}_p}{\tilde{r}_s} = \frac{|r_p|}{|r_s|} e^{i(\delta_{rp} - \delta_{rs})} = \tan(\psi) e^{i\Delta} \quad (3.1)$$

où $\tan(\psi)$ représente le rapport des modules des coefficients de réflexion et Δ la différence de phase.

Ces deux angles sont indépendants et évalués à partir de l'intensité lumineuse de l'onde. Dans le cas d'une structure multicouche, il est nécessaire d'utiliser la représentation matricielle dite d'Abelès afin de décrire le comportement de chaque film. Cette méthode ne nécessite aucun modèle d'indice mais elle conduit à un système d'équations complexes à résoudre.

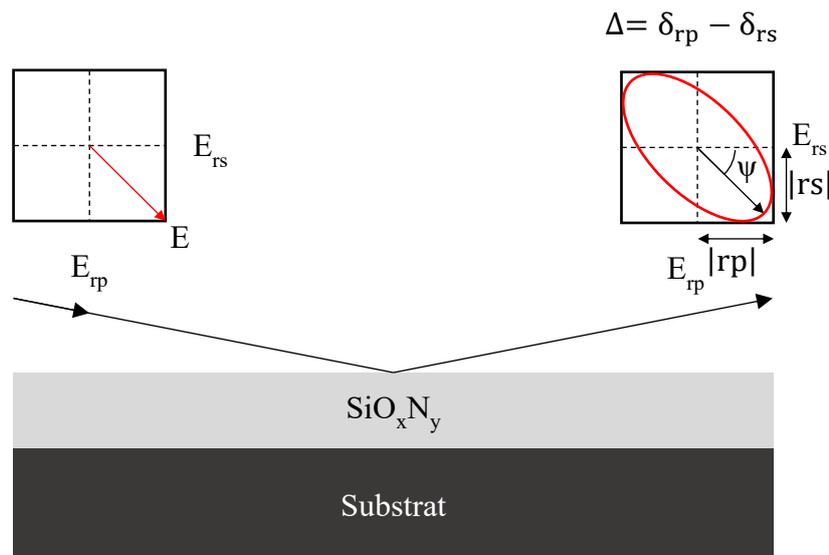


Figure 3.5 – Représentation schématique du principe de mesure par ellipsométrie.

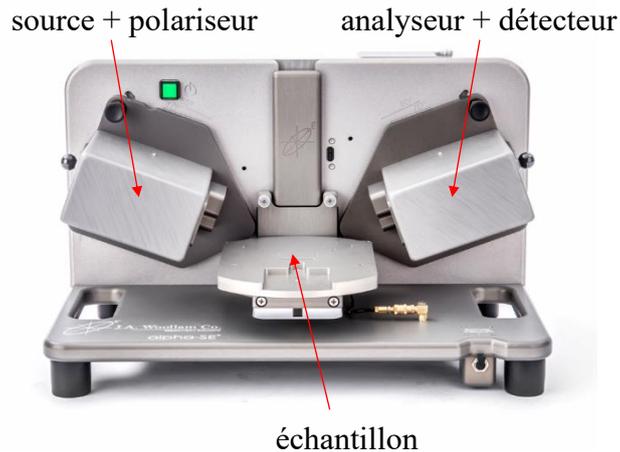


Figure 3.6 - Image de l'équipement de mesure utilisé au LN2/3IT (image modifiée de l'appareil extraite de [71]).

En pratique, un modèle est utilisé pour rendre compte de la variation de ψ et Δ en fonction de l'indice de réfraction, du coefficient d'absorption et de l'épaisseur. Les différents modèles les plus usités sont :

- L'oscillateur de Lorentz et le modèle de Drude [70] ;
- La relation de Sellmeier (matériau transparent) et la formule de Cauchy ;
- Le modèle de Bruggemann (reposant sur une fonction diélectrique effective d'un mélange de plusieurs matériaux décrits par leur fraction volumique et leur fonction diélectrique) ;
- L'utilisation directe des indices des matériaux établis dans des abaques.
- En fonction de la nature du matériau (métal ou diélectrique) et de la gamme spectrale d'opération, il sera choisi l'un ou l'autre de ces modèles.

3.1.2.3.2 *Modèle multicouches de Cauchy*

Il est possible d'utiliser le modèle empirique décrit par Augustin L. Cauchy pour les matériaux transparents. Ce modèle est mis en œuvre dans l'estimation des indices de réfraction optique des couches de SiO_xN_y . La loi de Cauchy permettra aussi l'estimation de l'indice d'une couche mince de nature inconnue. Par exemple, l'épaisseur des résines utilisées en lithographie. Ce modèle est surtout valable dans le domaine du visible, qui est la gamme de longueurs d'onde utilisée dans cette étude.

La loi de Cauchy s'exprime sous la forme d'un développement limité issu du modèle de Drude et liant la longueur d'onde et des coefficients positifs (A, B, C) qui rendent ainsi compte des propriétés du milieu étudié :

$$n = \sum_i \frac{a_i}{\lambda^{2i}}, \quad (3.2)$$

et l'approximation la plus couramment utilisée de ce développement est la suivante :

$$n \cong A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4}. \quad (3.3)$$

Dans le cadre des mesures effectuées, le logiciel de traitement « CompleteEase » donne la valeur de l'erreur moyenne au carré (MSE²⁴). Cette erreur correspond à l'écart entre le modèle théorique choisi et les résultats expérimentaux. Un MSE égal à 1 équivaut à une correspondance parfaite entre les modèles théorique et expérimental. Si ce dernier est en dessous de 10, la mesure est jugée correcte. Entre 10 et 100, l'indice de confiance demeure acceptable. Au-delà, il est nécessaire de refaire la mesure ou de changer le modèle théorique utilisé.

A titre d'exemple, les Figure 3.7 et Figure 3.8 montrent la correspondance entre les valeurs ψ et Δ d'une mesure à un angle de travail de 70° au centre d'une tranche 100 mm de SiO_xN_y déposé par PECVD. Il est mis en lumière le très bon accord entre les données expérimentales et le modèle utilisé.

En Figure 3.7, l'échantillon de la mesure correspond à une tranche composée d'une monocouche de SiO_xN_y sur un substrat de silicium. Un modèle « simple couche » de Cauchy est donc utilisé pour cette mesure. L'ajustement sur ce modèle sera réutilisé pour la caractérisation ellipsométrique de la couche suivante.

La Figure 3.8 présente les résultats de mesure sur un échantillon, composé d'une structure bicouches de SiO_xN_y. Un modèle « multicouches » de Cauchy, réutilisant l'ajustement obtenu sur la première couche, est utilisé pour en déduire l'épaisseur de la couche de cœur. Par cette méthode, les épaisseurs de SiO_xN_y déduites sont de 2,093 μm pour la couche de gaine et 201 nm pour la couche de cœur avec une erreur moyenne carré de MSE = 5,5.

²⁴ « Mean Square Error »

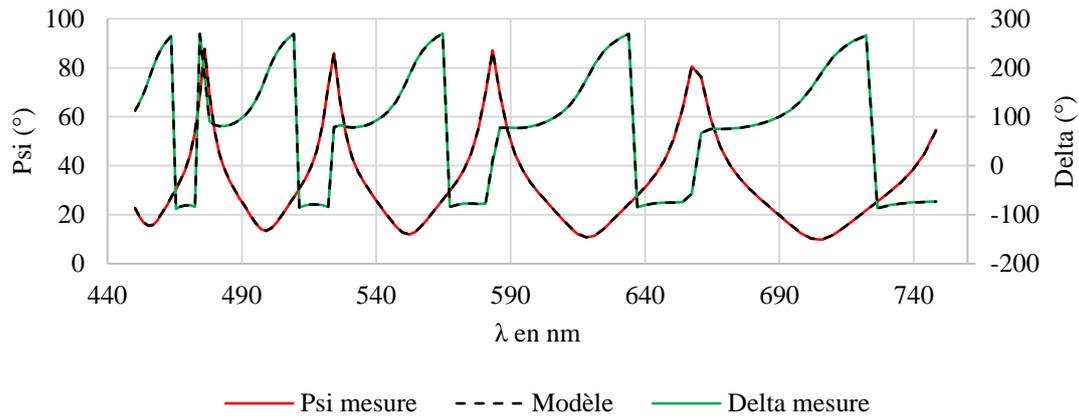


Figure 3.7 – Graphe de mesure par ellipsométrie spectroscopique pour un angle de 70° d'un échantillon composé d'un substrat de silicium et d'une **monocouche** de SiO_xN_y fabriquée par PECVD (couche de gaine). Les données expérimentales pour ψ et Δ sont tracées en traits pleins et la concordance avec le modèle de Cauchy en traits discontinus.

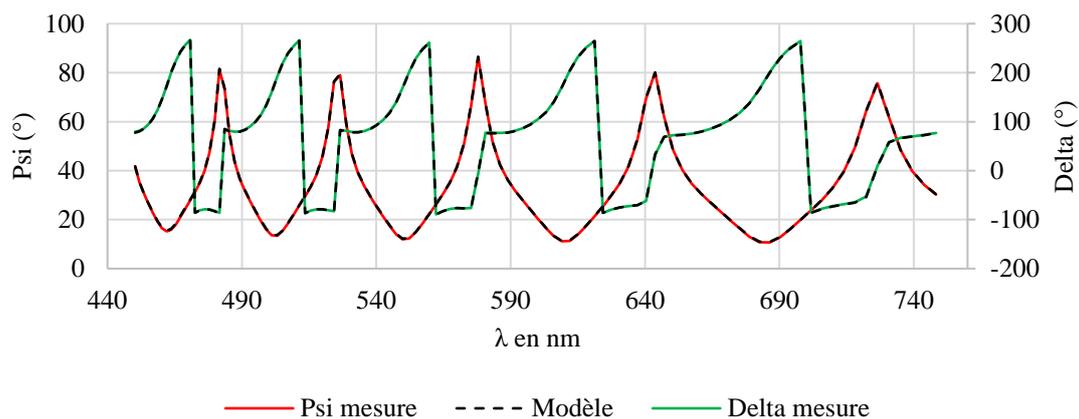


Figure 3.8 – Graphe de mesure par ellipsométrie spectroscopique pour un angle de 70° d'un échantillon composé d'un substrat de silicium et d'une **bicouche** de SiO_xN_y fabriquée par PECVD (couche de gaine + cœur). Les données expérimentales pour ψ et Δ sont tracées en traits pleins et la concordance avec le modèle de Cauchy en traits discontinus.

Par ailleurs, cette méthodologie de mesure permet de déduire l'indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde et d'obtenir le contraste d'indice de réfraction $\Delta n_{\text{cœur/gaine}}$ entre les deux couches de SiO_xN_y . La Figure 3.9 montre l'indice de réfraction de la couche de cœur et de gaine obtenus via les modèles monocouche et bicouche introduits précédemment pour une mesure à un angle de 70° au centre d'une tranche 100 mm.

Une dérive du $CIR_{\text{cœur/gaine}}$ est observée puisque l'on s'attend à un contraste quasi-constant en fonction de la longueur d'onde. Deux possibilités peuvent en être à l'origine :

- soit numérique et due à l'écart d'ajustement entre les modèles « simple couche » et « multicouches » de Cauchy,
- soit matérielle et liée à la différence de composition entre les deux couches de SiO_xN_y .

Néanmoins, cette variation sera négligée car elle est inférieure à 5% par rapport à la valeur de $CIR_{\text{cœur/gaine}}$ de $\Delta n_{\text{cœur/gaine}} = 0,12$ et permet de garder un régime de propagation monomode dans une large plage spectral du visible comme étudié dans la section 2.2.3.

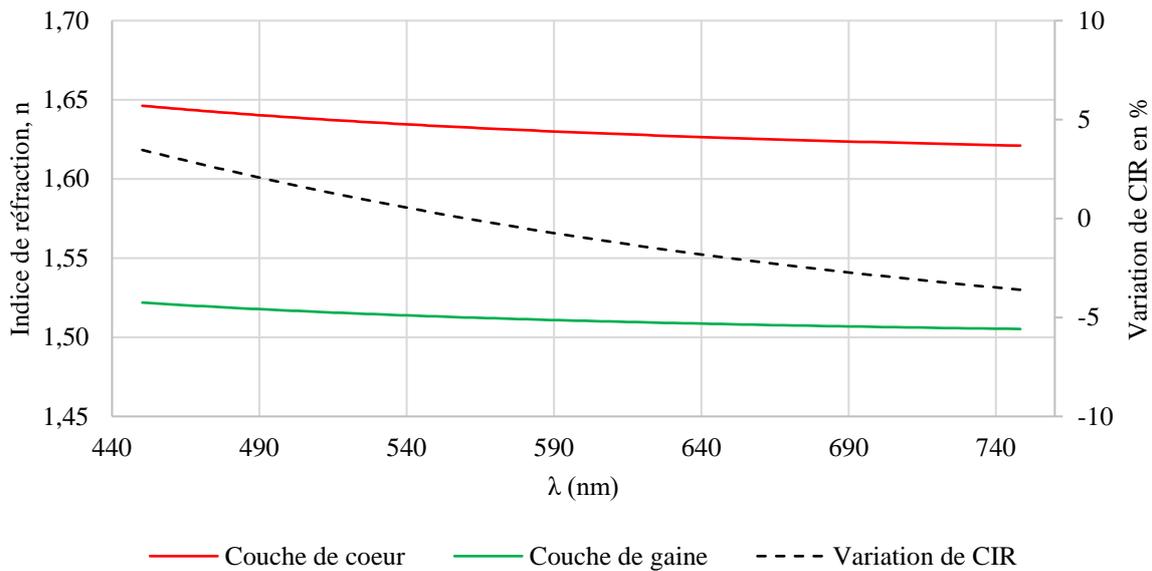


Figure 3.9 – Mesure par ellipsométrie spectroscopique pour un angle de 70° d'un échantillon composé d'un substrat de silicium et d'un film de SiO_xN_y fabriqué par PECVD.

Afin d'obtenir une idée de l'homogénéité de l'épaisseur et de l'indice de réfraction sur les tranches 100 mm, la mesure par ellipsométrie a été effectuée à plusieurs endroits du wafer : au centre ainsi qu'à environ 1 cm à droite et en bas du centre de la tranche. La Figure 3.10 illustre cette méthode de mesure par ellipsométrie spectroscopique.

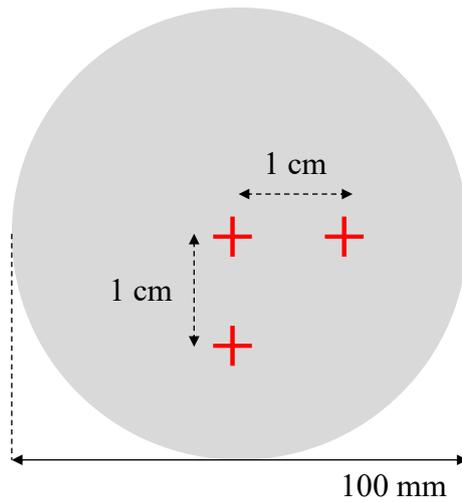


Figure 3.10 – Représentation schématique des trois positions de mesure par ellipsométrie spectroscopique des couches de SiO_xN_y sur tranches 100 mm fabriquées par PECVD.

Le Tableau 13 regroupe les valeurs mesurées des indices de réfraction et des épaisseurs de couche. Toutes les valeurs ont été moyennées sur les trois positions de mesure précédemment décrites.

Les deux premières couches des deux tranches 100 mm ainsi fabriquées disposent donc d'un contraste d'indice de réfraction moyen proche de $\Delta n = 0,12$ (rappelons que la valeur visée était $\Delta n = 0,1$). Les épaisseurs mesurées sont supérieures à $2 \mu\text{m}$ pour la couche de gaine. L'épaisseur visée pour la couche de cœur est de 200 nm afin de concorder au maximum avec l'épaisseur utilisée en simulation. Les deux tranches sont différenciées par leur numéro de suivi des procédés dans la salle blanche (P378 et P490). Les valeurs mesurées qui ont été obtenues sont de 205 nm pour P378 et de 199 nm pour P490. Le cahier des charges fixé en termes d'indice de réfraction et d'épaisseur de la couche de cœur est donc pleinement respecté. Ses principales contraintes sont rappelées dans la section 2.3 du Chapitre 2.

	$\lambda = 532 \text{ nm}$			$\lambda = 632 \text{ nm}$				
	$n_{\text{mesuré}}$	n_{moyen}	Δn_{moyen}	$e_{\text{mesurée}} \text{ (nm)}$	$e_{\text{moyenne}} \text{ (nm)}$	$n_{\text{mesuré}}$	n_{moyen}	Δn_{moyen}
P378 _{cœur}	1,635	1,63	0,12	$201 \pm 0,3$	205	1,626	1,63	0,12
	1,632			$207 \pm 0,4$		1,624		
	1,639			$206 \pm 0,4$		1,632		
P378 _{gaine}	1,514	1,51		2093 ± 2	2134	1,508	1,51	
	1,511			2179 ± 2		1,506		
	1,515			2130 ± 2		1,510		
P490 _{cœur}	1,638	1,64		$195 \pm 0,3$	199		1,63	
	1,636			$203 \pm 0,4$				
	-			-				
P490 _{gaine}	1,516	1,51	2113 ± 2	2157	1,511	1,51		
	1,513		2206 ± 2		1,507			
	1,517		2149 ± 2		1,512			

Tableau 13 – Valeurs mesurées par ellipsométrie spectroscopique moyennées sur les trois positions de mesure illustrées en Figure 3.10. Les deux tranches 100 mm fabriquées sont identifiées par le numéro spécifique permettant un suivi des étapes de fabrication.

L'étape suivante a porté sur la lithographie des structures sur la couche de cœur afin de réaliser les guides et coupleurs MMI. Ce protocole est détaillé et discuté dans la prochaine section.

3.2 Développement et optimisation du procédé de fabrication des guides et coupleurs MMI par photolithographie large bande UV (220 à 436 nm)

La finalité du procédé de fabrication par photolithographie est d'obtenir des guides d'onde enterrés en SiO_xN_y comme représenté sur la Figure 3.11 - (b) à partir d'une tranche disposant de la couche de gaine inférieure et de la couche de cœur Figure 3.11 - (a).

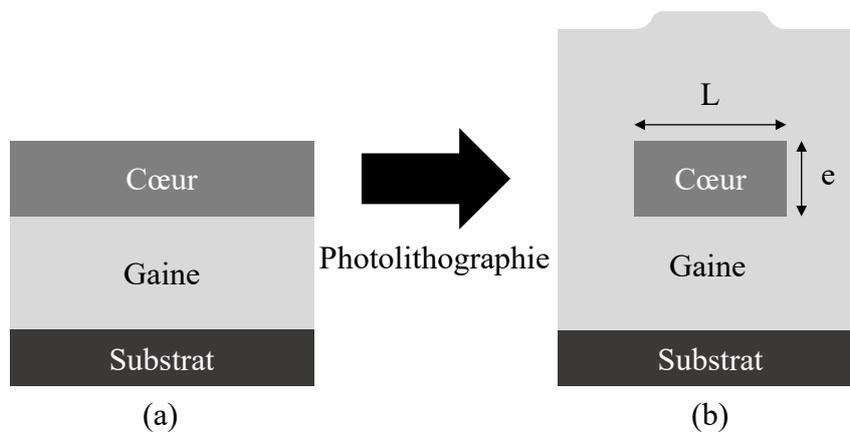


Figure 3.11 – Vue en coupe (a) d'une tranche après les deux premiers dépôts PECVD et (b) d'un guide d'onde enterré après le procédé de photolithographie (à droite). Les termes e et L correspondent à l'épaisseur et à la largeur du cœur du guide.

Les guides d'onde sont réalisés sur un substrat de silicium, servant de support mécanique, sur lequel les deux couches de SiO_xN_y de la gaine et du cœur sont préalablement fabriquées par PECVD. L'épaisseur de la couche de cœur étant maintenant fixée, il reste à définir les dimensions latérales des guides d'ondes et des coupleurs MMI. Pour cela, les deux principales technologies de lithographie disponibles sont la photolithographie et l'électrolithographie.

Le choix d'utilisation entre l'une ou l'autre technologie est fait selon le degré de tolérance ambitionné en termes de dimensions latérales. De manière succincte, lorsque les dimensions latérales à obtenir sont de l'ordre de quelques centaines de nanomètres, l'utilisation de l'électrolithographie est privilégiée. Dans cette étude, les dimensions latérales visées sont de $1\ \mu\text{m}$ et un procédé de fabrication par photolithographie est donc privilégié.

3.2.1 Optimisation du procédé de gravure du cœur des guides et coupleurs MMI

3.2.1.1 Choix de la résine photosensible

Une résine photosensible est un film de polymère qui réagit chimiquement lors de son exposition à certaines longueurs d'onde et, le cas échéant, lors d'un recuit de telle sorte que les parties exposées et non-exposées présentent une vitesse de dissolution différente dans une solution de développement permettant la réalisation d'un masque de résine structuré.

Sa fonction principale est de former une couche de protection contre les attaques chimiques et/ou physiques des processus de lithographie ultérieurs tels que la gravure chimique humide et/ou sèche, l'électroplaquage ou encore le soulèvement. Le choix de la résine photosensible revêt donc une importance particulière car la plupart des résines photosensibles sont optimisées pour des applications spécifiques.

Il existe deux principaux types de résine photosensible : les résines dites positives et celles dites négatives. Ces appellations sont intuitives dans la compréhension de leurs mécanismes de réaction aux rayonnements UV. En effet, les parties exposées d'une résine positive ne seront pas dissoutes et inversement pour une résine négative.

Les résines se présentent généralement sous la forme d'un mélange entre le polymère photosensible de la résine et son solvant. Le choix de la résine répond à de nombreux critères tels que :

- La sensibilité : capacité de la résine à interagir avec le rayonnement UV. Plus cette dernière est sensible, plus la dose d'exposition nécessaire à la modification des propriétés de la résine est faible. Une résine trop sensible peut être un facteur limitant conduisant à un temps d'insolation trop faible pour obtenir un procédé stable.
- Le contraste : capacité/vitesse de dissolution de la résine dans son développeur en fonction de la dose reçue. Un contraste élevé conduira à une forte variation de la vitesse de développement pour une faible différence de dose. Ceci permet notamment d'obtenir des flancs de résine verticaux et d'améliorer la résolution finale.
- La résolution : limite de dimensions réalisable au sein de la résine. Elle dépend notamment des paramètres expérimentaux (tension d'accélération des électrons, taille de sonde, température des recuits, temps de développement) et de la résine (nature, épaisseur, taille du polymère).

- Les autres paramètres : le coût, la toxicité des solvants, les propriétés mécaniques et chimiques (contraintes, résistances aux solvants et aux gravures) sont également des critères qui doivent être pris en considération.

Dans le cadre de ce travail, deux résines ont été utilisées pour la réalisation des motifs de la couche de cœur. Les deux retenues sont l’AZ1505 [72] et l’AZ MiR 701 29 cps [73] du fabricant « MicroChemicals ». Il s’agit de résine à haute résolution optimisée pour la fabrication de structure nanométriques en gravure sèche. Cependant, tout le protocole discuté dans les parties suivantes traitera de l’utilisation de la résine AZ Mir 701 29 cps. La section 3.2.2 présentera les raisons qui ont motivé ce choix.

3.2.1.2 Paramètres d’entrésinement des échantillons

Les procédés d’entrésinement sont maintenant bien connus par la communauté mais, dans le cadre de cette étude, cette étape a demandé une phase d’optimisation pour notamment atteindre une résolution lithographique effective la plus proche possible de la limite de résolution de l’aligneuse et réduire les pertes de propagation dans les structures mises en œuvre.

Cette résolution effective demande donc une étape d’optimisation du procédé d’entrésinement utilisé pour appliquer/déposer une couche mince et uniforme sur des surfaces planes. Cette méthode consiste à déposer quelques gouttes de la solution sur le substrat, posé horizontalement et maintenu par aspiration sur un plateau tournant nommé tournette. Ce procédé est schématisé en Figure 3.12.

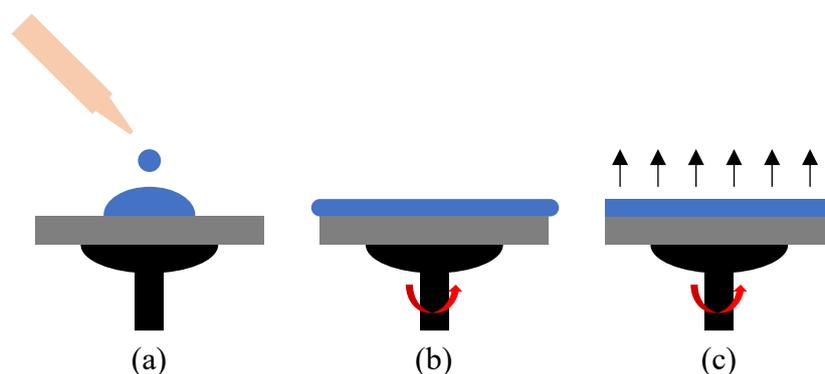


Figure 3.12 – Vue schématique du procédé d’entrésinement : (a) dépôt de la résine sur le substrat de verre, (b) étalement de la résine et (c) évaporation du solvant par rotation de la tournette.

Plusieurs paramètres influent sur l’homogénéité et l’épaisseur du film obtenu. Ces paramètres sont notamment liés à la nature de la résine (concentration, viscosité ou la quantité initialement

déposée) ainsi qu'au processus d'enduction (accélération, vitesse et temps de rotation du plateau).

La présence de poussières lors de l'étape d'enrésinement est un problème majeur. En effet, la résine ne sera plus déposée sous la forme d'un film homogène mais présentera des discontinuités liées à la présence des poussières. La manipulation sous hotte aspirante et l'utilisation d'une tournette à capot fermé permet de minimiser les risques de pollution. Par ailleurs, la tournette fermée permet également de travailler sous atmosphère saturée en solvant.

Le procédé de fabrication débute toujours par un nettoyage aux solvants sur un banc humide en salle blanche suivi d'un plasma oxygène. Les conditions sont identiques au nettoyage détaillé dans la section plus avant portant sur la préparation des surfaces avant les dépôts par PECVD de couches mince. Néanmoins, l'enrésinement sur matériau diélectrique, tel que le SiO_xN_y , implique une étape supplémentaire de traitement de la surface. La Figure 3.13 représente l'étape de nettoyage dans un plasma oxygène des résidus organiques. Cela a aussi pour effet de briser les liaisons pendantes d'hydrogène à la surface et ainsi d'augmenter l'adhérence film de matériau telle qu'une résine. Cependant, en atmosphère de salle blanche typique (Hygrométrie $\approx 40\%$; Température pièce $\approx 25^\circ\text{C}$), le laps de temps où la surface est « activée » est relativement court (de l'ordre de quelques heures).

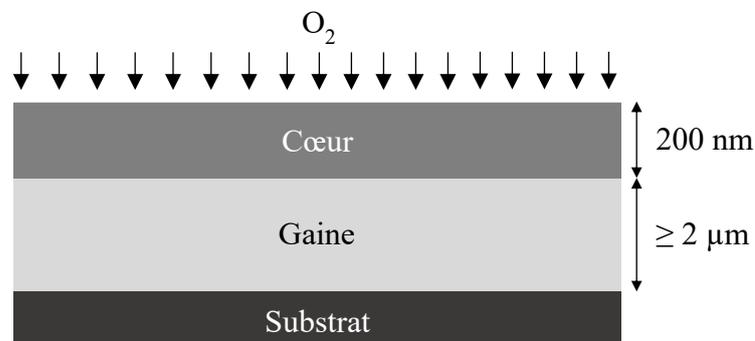


Figure 3.13 – Vue schématique de l'étape de nettoyage au plasma d'oxygène ; la fréquence de la source RF utilisée est égale à 13,56 MHz.

Ce traitement n'est pas suffisant pour que la résine photosensible tienne sur le substrat de SiO_xN_y et l'utilisation d'un promoteur d'adhérence est donc nécessaire. L'hexamethyldisilazane (HMDS) est un composé couramment utilisé pour son pouvoir de promotion d'adhérence des résines photosensibles dans les procédés de photolithographie. Il est possible de l'utiliser en phase liquide mais de meilleurs résultats sont obtenus en phase gazeuse. Pour ce faire, un four d'apprêt programmable est utilisé. Le fonctionnement de celui-ci consiste en une diminution cyclique de la pression de l'atmosphérique jusqu'à quelques mtorr. Le composé HMDS en phase gazeuse est ensuite injecté dans la chambre pendant 4

minutes puis s'en suit une augmentation de la pression dans la chambre jusqu'à la pression atmosphérique. La Figure 3.14 présente une vue schématique de l'étape d'amélioration de l'adhérence sur le substrat de verre réalisé dans ce travail. À la fin de cette étape, les échantillons sont prêts à être enrésinés.

Il est à noter que cette technique de promotion d'adhérence présente une grande stabilité. Ainsi, il est possible de laisser s'écouler quelques jours entre le dépôt de l'HMDS et l'enrésinement des échantillons sans variation significative du procédé de fabrication.

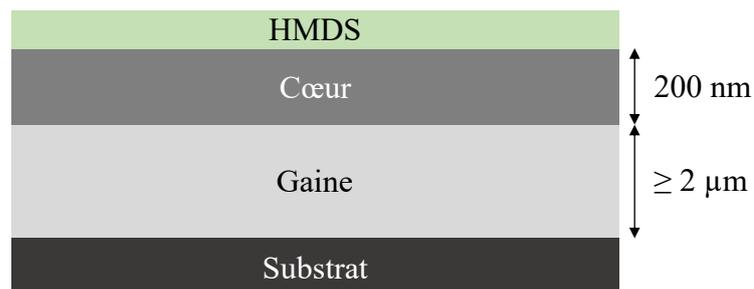


Figure 3.14 – Vue schématique de l'étape de traitement de la surface par HMDS en phase gazeuse dans un four d'apprêt dans le but d'améliorer l'adhérence de la résine photosensible sur le substrat de SiO_xN_y . Le temps d'exposition du substrat à la vapeur est de 4 minutes. L'épaisseur de la couche de HMDS est négligeable.

La représentation schématique de la structure après enrésinement est donnée en Figure 3.15. L'épaisseur de résine est mesurée sur un échantillon de silicium par ellipsométrie spectroscopique à un angle de 70° . Le MSE est inférieur à 10. Les paramètres utilisés pour un enrésinement optimisé en utilisant la résine AZ MiR 701 29 cps sont rapportés dans le Tableau 14.



Figure 3.15 – Vue schématique de la structure après l'étape d'enrésinement et de recuit des échantillons.

	Étape #1	Étape #2
$V_{\text{accélération}} \text{ (tr.min}^{-1}\text{.s}^{-1}\text{)}$	500	1000
$V_{\text{plateau}} \text{ (tr.min}^{-1}\text{.s}^{-1}\text{)}$	1000	5000
$t \text{ (s)}$	5	60

Tableau 14 – Paramètres optima de dépôt à la tournette de la résine AZ MiR 701 29 cps.

Une remarque est à apporter sur la vitesse d'accélération lors de l'enrésinement. La vitesse la plus souvent utilisée est de l'ordre de 1000 tr.min⁻¹.s⁻¹. Dans le cas de ce travail, une diminution de cette accélération a été privilégiée dans le but de diminuer le stress mécanique appliqué au niveau de la résine.

L'amélioration de la qualité de l'enrésinement est visible à l'œil nu en salle blanche. En effet, en cas d'échec de l'enrésinement (comètes dues à des poussières, lacunes de résine sur le substrat...), les échantillons sont plongés à chaud (70-80°C) dans une solution spécifique (Remover 1165) pour dissoudre la résine photosensible. Il est à noter que cette étape est chronophage et donc doit être mise en œuvre hors de la plage horaire d'utilisation de la salle blanche pour atteindre une dissolution totale. Le procédé peut ensuite être repris à partir de l'étape de nettoyage.

3.2.1.3 Conditions optimales d'exposition de la résine photosensible

Le procédé de photolithographie débute par une étape de recuit permettant d'évaporer le solvant de la résine et de l'apprêter pour son insolation (de l'anglais « softbake »). Les paramètres donnés par le fabricant de la résine constituent un point de départ pour optimiser ces paramètres. Dans ce travail, une optimisation des paramètres de recuit utilisé fixe les conditions suivantes : 100°C pendant 90 secondes sur une plaque chauffante.

Avant de procéder à l'exposition des motifs d'intérêt, un soin particulier est pris sur le nettoyage des résidus de résine présents en face arrière des échantillons. Ces derniers peuvent être supprimés en utilisant de l'acétone. La topographie de la résine après étalement n'est pas homogène. Les bords sont plus épais que le centre et cette inhomogénéité se répercute directement dans la résolution photolithographique atteignable. Les quelques millimètres de bords de résine épaisse sont donc retirés afin d'obtenir une homogénéité plus importante en épaisseur. Cette étape est appelée « Edge Bead Removal » (EBR) en anglais, réalisée à l'aide d'un masque spécifique juste avant l'exposition des motifs d'intérêt.

Les motifs à inscrire sur la résine photosensible sont de tailles micrométriques. Un masque de photolithographie en chrome-quartz est donc utilisé pour les transférer dans la résine. L'utilisation d'une résine positive présente l'avantage de rendre la conception du masque plus simple car les parties chromées sur le masque représentent directement les motifs à transférer. Ces motifs en chrome sont opaques aux rayons UV tandis que les zones en quartz sont transparentes.

Le modèle d'aligneuse utilisé est une OAI 806 et le système de mise en contact substrat-masque dont elle dispose permet de maximiser le contact par un jet d'azote en face arrière. La Figure 3.16 représente la structure à l'étape d'insolation à travers le masque en chrome.

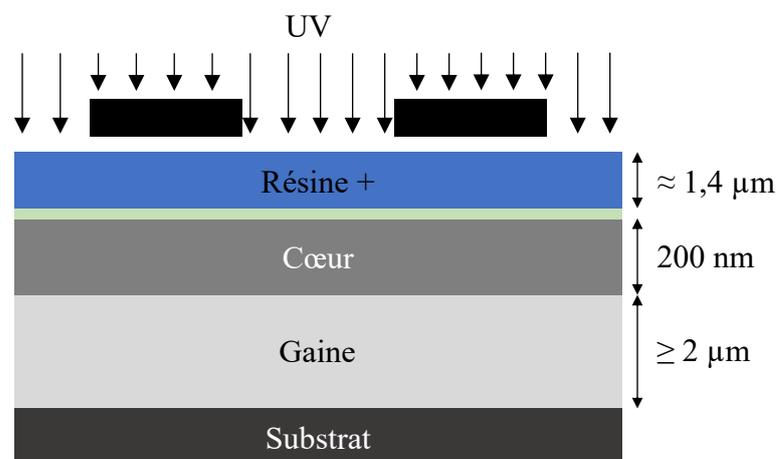


Figure 3.16 – Vue schématique de la structure lors de l'exposition de la résine au rayonnement UV à travers le masque en chrome.

La résine AZ MiR 701 29 cps utilisée étant positive, l'insolation aux rayons UV entraîne une rupture des liaisons chimiques de la zone insolée. Par cette réaction photochimique, l'image du masque est transcrite dans l'épaisseur de la résine, comme représenté sur la Figure 3.17.

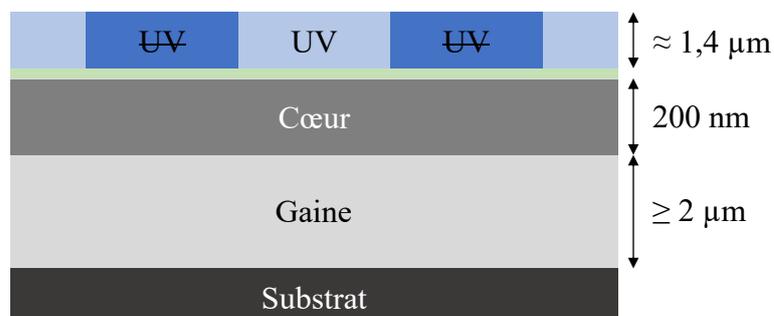


Figure 3.17 – Vue schématique de la structure après l'étape d'exposition au rayonnement UV. Seules les parties en bleu clair ont été insolées.

La dose d'exposition doit être déterminée de manière à apporter suffisamment d'énergie pour modifier la structure chimique de la résine. En effet, une sur- ou une sous-exposition de la résine entraîne une dégradation de la résolution des motifs transcrits. Cette dose est directement dépendante de la puissance de la lampe, du temps et de la longueur d'onde d'exposition. Dans ce travail, aucun filtre n'a été utilisé pour l'exposition de la résine. La bande spectrale d'exposition s'étend donc de 220 à 436 nm. La dose d'exposition optimisée pour la résine AZ MiR 701 29 cps est de 85 mJ.cm^{-2} .

A ce stade, les motifs sont transférés dans la résine. Sur un substrat réfléchissant tel que le silicium, la distribution d'intensité d'exposition dans la résine n'est pas linéaire et des interférences dans le film (modulé en $\sin^2(x)$) dans la direction de la lumière incidente se produisent. Une étape de recuit post-exposition (PEB²⁵) contribue à lisser le profil de concentration du produit de la photoréaction via sa diffusion de sorte que les structures de résines développées ultérieurement ont des parois latérales plus verticales et plus lisses [74]. Dans ce travail, l'optimisation de cette étape a conduit aux paramètres de recuits de 110°C pendant 120 secondes sur une plaque chauffante.

3.2.1.4 Développement des motifs exposés dans la résine

La dernière étape de photolithographie consiste à développer la résine photosensible insolée avec le solvant adéquat. Comme abordé précédemment, la région insolée a subi une modification chimique qui permet la dissolution et la disparition de la résine insolée dans le développeur. Dans le cas de grands échantillons, comme une tranche 100 mm, les produits de la réaction de développement saturent l'environnement proche du film de résine. De plus, sans ajouter de bain de développeur supplémentaire, ces produits sont difficiles à enlever en fin de développement, comme le montre la Figure 3.18. Ainsi, la technique utilisée pour contourner ce souci est de réaliser deux bains de développeur séparés par un bain d'eau désionisée pour rincer les produits de développement intermédiaires.

²⁵ « Post Exposure Bake »

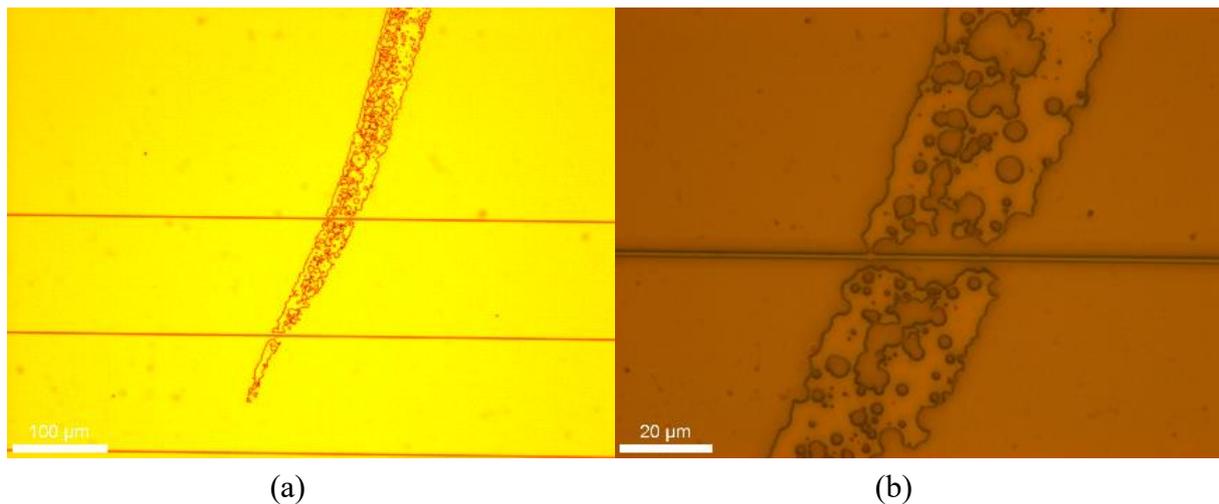


Figure 3.18 – Vue au microscope optique de la résine (guide d’onde) AZ MiR 29 cps à un grossissement de 20x (a) et de 50x (b) montrant un reste de produits de la réaction de développement après l’étape de développement utilisant **un seul bain de développement**. Les lignes horizontales sont des guides d’onde de largeur 1 μm.

La tranche échantillon est donc plongée, pour un temps cumulé de 60 à 75 secondes, dans une solution de développement pour la résine appelé AZ 300 MiF. Un bain intermédiaire d’eau désionisée de 30 secondes à la moitié du temps de développement est effectué. Un rinçage final à l’eau désionisée est effectué pendant 60 secondes. Cela permet de stopper le développement de la résine et de nettoyer les résidus de solvant et de produits de développement restants. Après séchage à l’azote, les motifs sont observés au microscope optique pour valider le procédé de photolithographie.

Pour exemple, la Figure 3.19 représente une vérification des dimensions de résine AZ MiR 701 29 cps d’un coupleur MMI à la fin de l’étape de photolithographie.



Figure 3.19 - Photographie au microscope optique de la résine (coupleur MMI) AZ MiR 29 cps à un grossissement de 50x après l'étape de développement utilisant **deux bains de développement**.

L'étape finalisant le procédé de photolithographie est de retirer les possible résidus organiques dans les parties où la résine a été développée. Pour cela, un plasma O_2 peu puissant d'une puissance de 50 W pendant 3 minutes est réalisé. La Figure 3.20 représente schématiquement cette étape de finalisation du procédé.

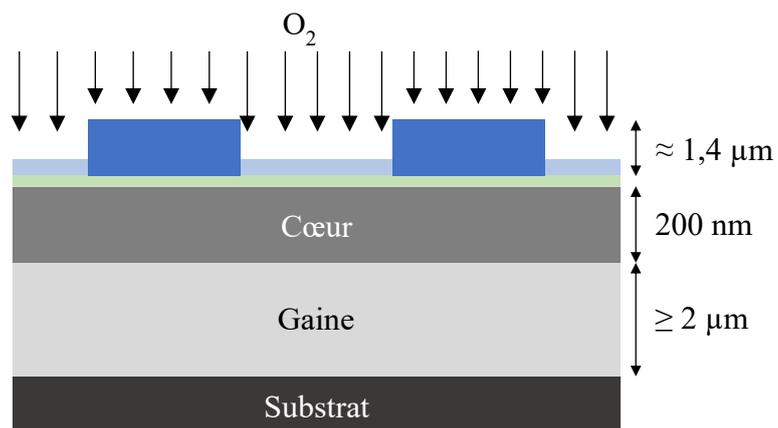


Figure 3.20 – Représentation schématique de la structure après l'étape de développement de la résine. Les résidus de résine développés sont enlevés par une étape de plasma oxygène peu puissante.

3.2.1.5 Gravure sèche de la couche de cœur

A ce stade de la réalisation, les structures réalisées sont recouvertes d'une épaisseur de résine. Celle-ci sert de couche de masquage pour un transfert du motif vers la couche de cœur en SiO_xN_y . Dans le cas de cette étude, le choix de la technique de transfert est important puisqu'il définira directement les performances des structures guidantes réalisées. La rugosité des flancs et la verticalité constituent les deux paramètres les plus importants puisqu'ils influent sur les pertes par propagation et la distribution de champ à l'intérieur des guides d'onde [75]. Le procédé de gravure sèche anisotrope répond à ces contraintes. L'anisotropie de ce type de gravure implique une bonne verticalité. De plus, la résine utilisée est résistante à ce type de gravure.

Le matériau de cœur est donc attaqué par une gravure d'oxyde ICP-DRIE²⁶. Cette technique combine la gravure chimique et la gravure physique en éliminant les matériaux en surface du composant. Ainsi, un plasma est généré à basse pression par une source RF à 13,56 MHz. Pour se rapprocher le plus possible des motifs souhaités, les paramètres à modifier sont les débits des gaz choisis, la puissance RF, la pression de la chambre et le temps de gravure.

Rappelons que la couche de cœur déposée par PECVD dispose d'une épaisseur de 200 nm. Une précision nanométrique sur la profondeur de gravure n'est pas nécessaire puisqu'il est supposé que les compositions stœchiométriques de la gaine inférieure et supérieure soient quasiment identiques. Ainsi, la gravure a été réalisée dans un bâti STS – AOE du laboratoire pour retirer environ 250 nm de SiO_xN_y . Les gaz utilisés sont l'hélium (He), le tétrafluorure de carbone (CF_4) et le dihydrogène (H_2). Cette étape est représentée en Figure 3.21.

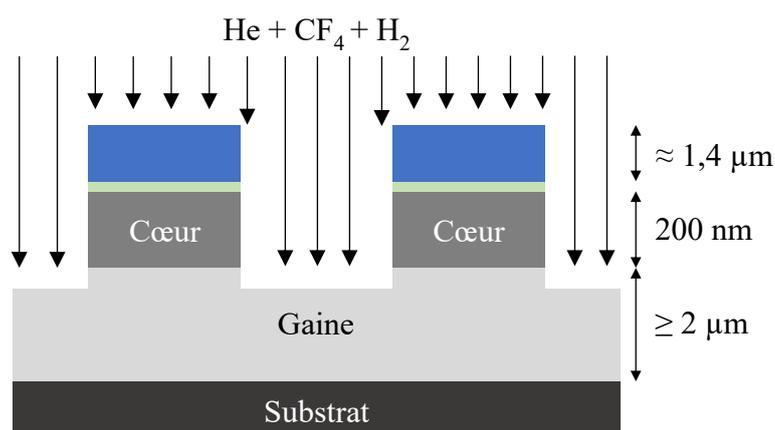


Figure 3.21 – Vue schématique de la structure après l'étape de gravure sèche réalisée par AOE.

²⁶ « Inductively Coupled Plasma – Deep Reactive Ion Etching »

Les conditions optimales de gravure retenues pour la couche de cœur en SiO_xN_y sont reportées dans le Tableau 15.

Réglages bâti					Réglages gaz (sccm)		
$T_{\text{platine}} (\text{°C})$	$p (\text{mTorr})$	$P_{\text{coil}} (\text{W})$	$P_{\text{platine}} (\text{W})$	$t (\text{s})$	He	CF ₄	H ₂
20	4	990	300	90	140	10	25

Tableau 15 – Paramètres optima de gravure sèche par AOE de la couche de cœur en SiO_xN_y .

3.2.2 Vérifications dimensionnelles des structures réalisées

Au terme de ces étapes de fabrication, la structure des guides réalisés dans la couche de cœur a été analysée par microscopie électronique à balayage (MEB) pour valider les dimensions obtenues et leur qualité.

Rappelons que deux types de résines de photolithographie ont été testées lors du développement technologique des motifs de la couche de cœur. La photographie d'une vue en coupe après photolithographie UV à l'aide de la résine AZ 1505 d'un guide au MEB est présentée en Figure 3.22 (a) et (b). Le profil typique observé est un profil dit en « oreilles », problématique car l'épaisseur de résine est tellement fine dans le creux de ce profil que l'épaisseur de la couche de résine n'est plus suffisante pour protéger la couche de SiO_xN_y pour la durée de la gravure par AOE. Ce défaut est illustré dans la Figure 3.22 - (a). De plus, les flancs de résine et donc les flancs de la couche de cœur ne sont pas verticaux, comme illustré en Figure 3.22 - (b).

Pour ces raisons, un changement de résine a eu lieu pendant ce développement au profit de l'AZ MiR 701 29 cps. Les vues MEB post-photolithographie UV utilisant cette résine sont présentées sur la Figure 3.23. Les problématiques de trous dans la résine liés au profil « en oreilles » et de faible verticalité sont supprimées. De plus, une épaisseur de résine plus importante implique une marge d'erreur sur la profondeur de gravure plus importante.

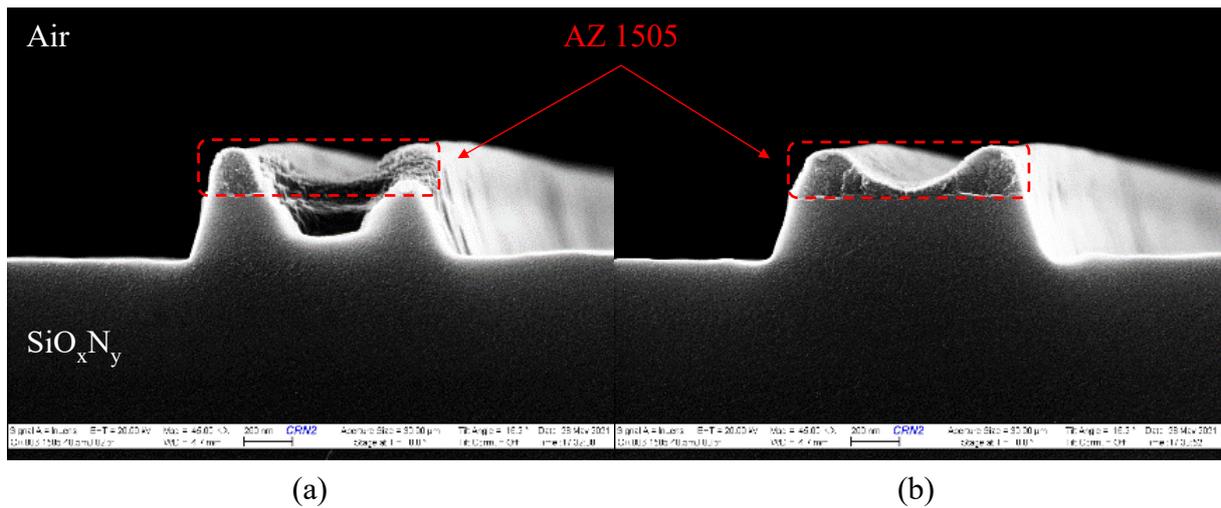


Figure 3.22 – Vue au MEB de la couche de cœur de deux guides d’onde après l’étape de gravure par AOE avec la résine AZ 1505 (a) d’un défaut observé dans le guide et (b) d’un profil dit « en oreilles ».

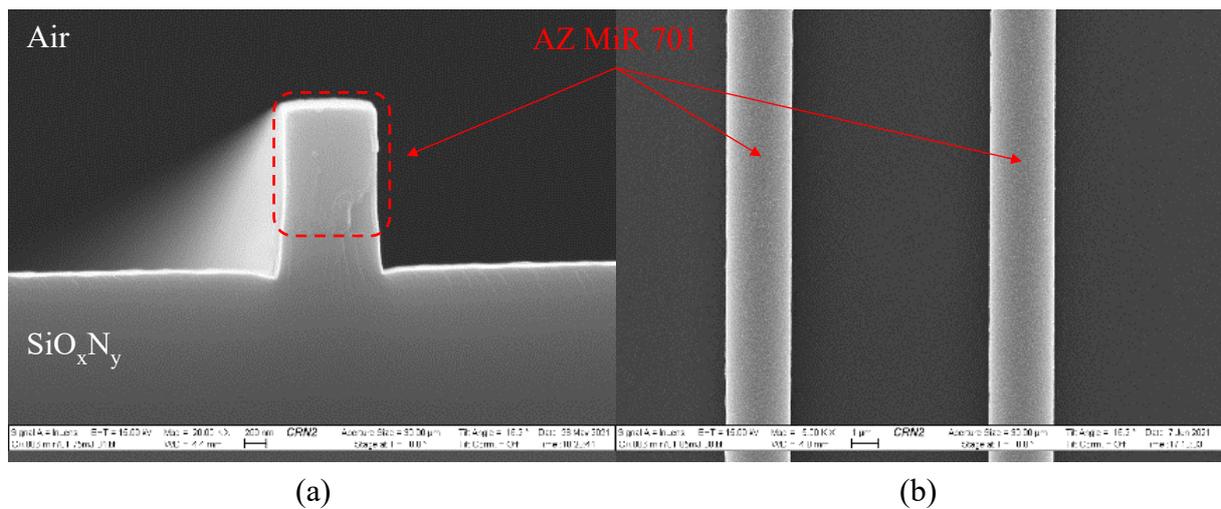


Figure 3.23 - Vue au MEB de la couche de cœur d’un guide d’onde après l’étape de gravure par AOE avec la résine AZ MiR 701 29cps (a) en coupe et (b) vue de dessus.

Il est important de noter que ces observations sur des matériaux diélectriques nécessitent une métallisation de l’échantillon afin de s’affranchir des effets de charges ; procédé qui est destructif pour la structure analysée. Les structures finales n’ont donc pas été observées au MEB après la gravure par AOE. Celles-ci sont seulement soumises à une observation au microscope optique pour vérifier les dimensions du guide, mais également les imperfections (coupures, impuretés...).

L'étape avant la finalisation des structures consiste à nettoyer la résine puis à réaliser le dépôt par PECVD de la couche de gaine supérieure en SiO_xN_y . A ce stade, le nettoyage est une étape très critique. En effet, une étape de plasma à l'oxygène à 150 W pendant 15 minutes est indispensable pour vaporiser les bords de la résine carbonisée lors de l'étape de gravure par AOE. Ces bords ne se dissolvent pas dans les solvants et retombent sur le SiO_xN_y si cette étape n'est pas effectuée. Un nettoyage aux solvants est ensuite réalisé pour retirer les résidus de résine présents sur la tranche échantillon.

À ce stade, le dépôt par PECVD peut être effectué. Les paramètres de ce dépôt sont identiques à ceux utilisés pour la couche de gaine inférieure reportés dans le Tableau 11. Une vue schématique de la structure complète est présentée en Figure 3.24.

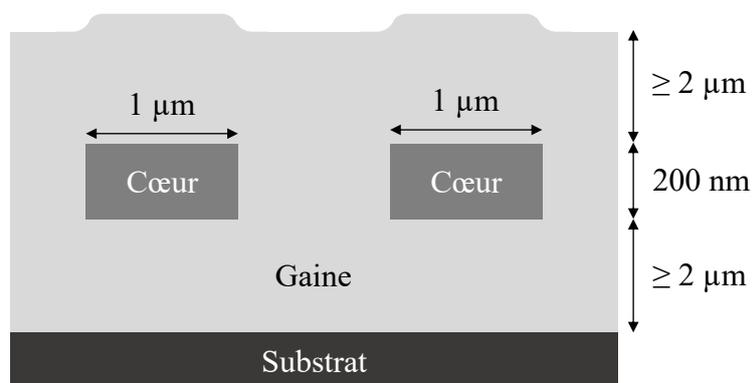


Figure 3.24 – Vue schématique de la structure après le dépôt par PECVD de la couche de gaine supérieure.

3.3 Méthodes de réalisation des facettes d'injection

Les performances optiques sont légitimement liées à la qualité de fabrication de la facette d'injection en termes de puissance optique transmise. La réalisation des facettes d'injection constitue donc une étape fondamentale pour garantir ces performances. Aussi, nous avons porté une attention particulière sur la méthodologie permettant de minimiser la rugosité des facettes d'injection et trois techniques ont fait l'objet d'une étude spécifique :

- le clivage par pointe diamantée,
- le polissage mécano-chimique,
- la gravure plasma.

Ces techniques sont décrites dans les sections suivantes et une synthèse sur les avantages & inconvénients ainsi que sur le choix de fabrication réalisé dans cette étude, est effectuée.

3.3.1 Approche mécanique – clivage par pointe diamantée

L'approche mécanique de réalisation des facettes d'injection de la lumière constitue la technique la plus ancienne car la plus intuitive. En effet, une seule étape est nécessaire car elle consiste en une simple clive manuelle ou instrumentée à l'aide d'une pointe diamantée. Cependant, les caractéristiques de la facette sont directement dépendantes du réseau cristallin du matériau à cliver.

Avec cette approche, l'enjeu est de cliver des structures composées de trois couches de SiO_xN_y amorphes reposant sur un substrat de silicium, qui lui est cristallin (1,0,0). Il est possible de réaliser la clive de l'échantillon de deux façons : soit en clivant par la face avant (SiO_xN_y amorphe), soit par la face arrière (silicium cristallin).

Compte tenu de l'épaisseur de SiO_xN_y (de l'ordre de $4\ \mu\text{m}$), il est évidemment plus aisé de cliver mécaniquement par la face arrière composée de silicium. Nous confirmons que de nombreux essais ont engendré une destruction immédiate de tout l'échantillon en procédant par la face avant et la qualité de la facette (rugosité et aspect rectiligne) reste très aléatoire.

La qualité de la clive par la face arrière est bien supérieure à la précédente mais également plus répétable. Ceci est dû au réseau cristallin du silicium. En effet, la contrainte mécanique appliquée par la pointe diamantée vient « exciter » un axe du réseau cristallin du silicium et se propage préférentiellement le long de cet axe puis dans le SiO_xN_y amorphe. Cette technique est schématisée en Figure 3.25.

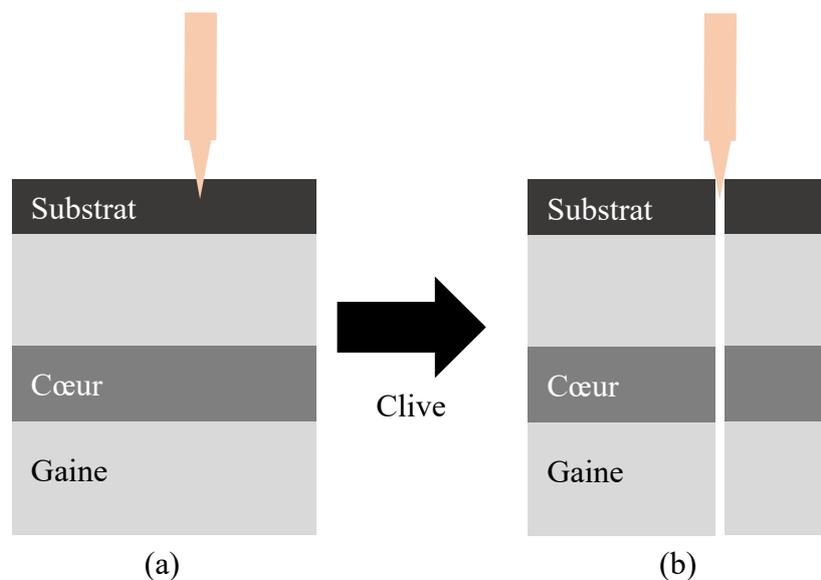


Figure 3.25 – Représentation schématique de la méthode de clivage des échantillons à l'aide d'une pointe diamantée.

Dans le cas de cette étude, l'analyse de l'état de la facette dans le SiO_xN_y amorphe est importante puisque c'est dans cette région que se trouve le cœur des guides. Or, la technique de clive mécanique ne permet pas un contrôle précis de la qualité de la facette au niveau de la rugosité et du contrôle de la clive. De plus, elle est fortement dépendante de l'opérateur, principalement liée à la position de la clive sur chaque puce.

3.3.2 Approche mécano-chimique : polissage

La technique de fabrication de facette par polissage mécanique est une méthode permettant d'obtenir une meilleure rugosité que la clive classique pour un matériau amorphe. De plus, un contrôle sur les positions des facettes est possible. Cette méthode est détaillée et discutée dans la suite de cette section.

3.3.2.1 Enrobage des structures photoniques

Rappelons que le profil transverse des puces fabriquées est d'environ 20 mm de côté et de 0,5 mm d'épaisseur. Un polissage sans aucune préparation de ces échantillons est donc impossible. En effet, une surface de polissage de l'ordre de quelques cm^2 est nécessaire pour mettre en œuvre le protocole de polissage mécanique. De plus, pour une surface de polissage fixée, l'homogénéité de polissage est localisée dans le centre de celle-ci.

Pour ces raisons, le profil transverse des puces doit être augmenté. Ceci est réalisé par l'enrobage dans une résine. Le profil transverse d'une puce enrobée dans un cylindre de résine est présenté sur la Figure 3.26.

En anticipation des caractérisations des structures photoniques, des composants de positionnement ont été utilisés pour assurer un centrage dans un capot cylindrique utilisé pour l'enrobage. Ceux-ci ont été fabriqués à l'aide d'une imprimante 3D. Deux composants circulaires sont utilisés pour le fond et le dessus du cylindre et viennent pincer la puce pour la maintenir dans le cylindre. Une vue schématique de la conception de ces composants est illustrée sur la Figure 3.27.

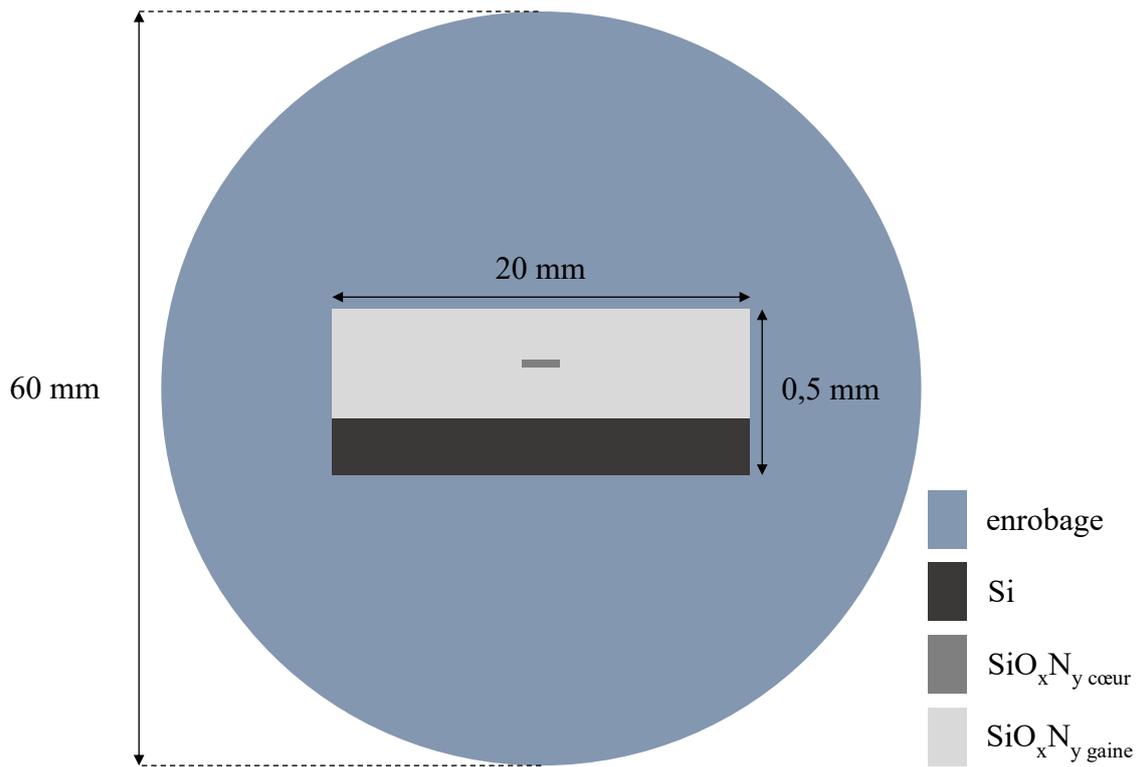


Figure 3.26 – Vue schématique de la composition et du dimensionnement du profil transverse d’une puce enrobée.

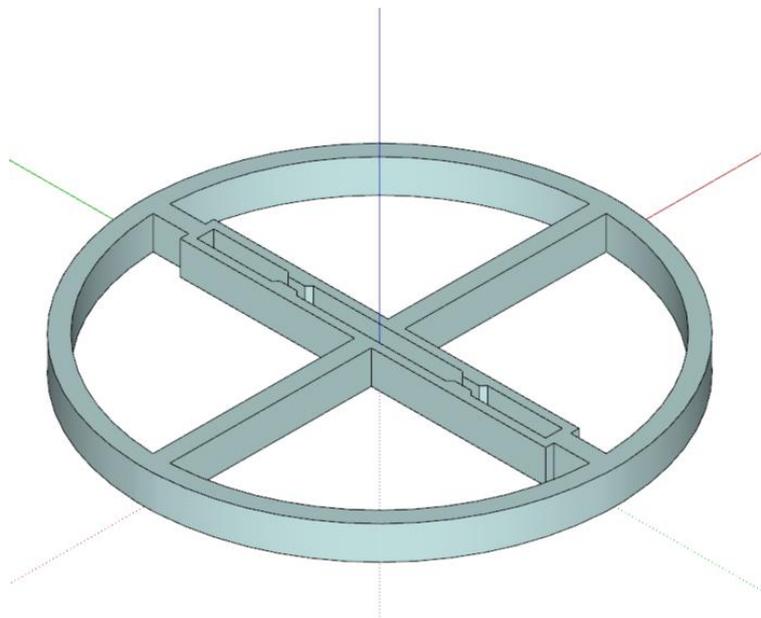


Figure 3.27 – Vue schématique d’un composant de positionnement utilisé dans le cylindre d’enrobage.

L'enrobage est composé d'un mélange de résine polymère et de durcisseur. La solution est ensuite versée pour noyer la puce dans le cylindre. Les proportions massiques utilisées entre le durcisseur et la résine sont de $m_{\text{durcisseur}} = 3 \text{ g}$ et $m_{\text{résine}} = 25 \text{ g}$.

Il est à noter que la présence de bulles d'air, restées piégées dans la résine liquide, est possible. Afin de limiter cet effet, les contenants sont placés dans une chambre à vide primaire (10^{-2} torr). Il est important de réaliser cette étape rapidement après l'enrobage puisque le processus de durcissement commence dès la préparation de la résine. Sans cette précaution, l'évacuation des bulles d'air peut donc être compromise. La résine est ensuite placée sous hotte aspirante pendant une douzaine d'heures pour que le processus de durcissement soit correctement achevé.

3.3.2.2 Découpe des enrobages réalisés

A l'issue du temps de séchage, un bloc cylindrique est obtenu contenant la puce et les composants d'alignement. Des étapes de découpe de certaines parties du bloc de résine sont nécessaires en vue de la caractérisation des puces enrobées. En effet, la fabrication d'un premier méplat permet de maintenir l'horizontalité entre la puce et la plateforme du banc de caractérisation. Un second méplat, dit d'observation, permet d'observer les dispositifs par le dessus afin réaliser les alignements lors de l'injection de la lumière. En effet, la fabrication d'un premier méplat permet de maintenir l'horizontalité (plan y,z) entre la puce et la plateforme du banc de caractérisation, un second permet d'observer les dispositifs par le dessus afin réaliser les alignements lors de l'injection de la lumière. Une vue schématique du bloc de résine après ces découpes est présentée en Figure 3.28.

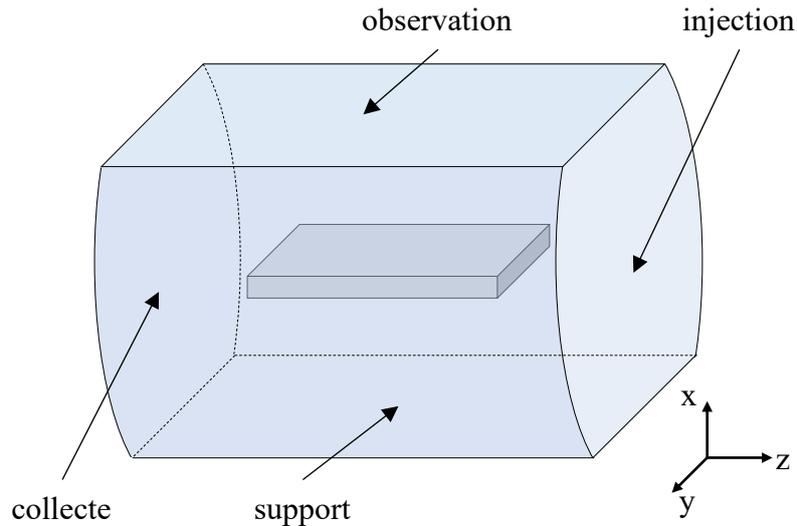


Figure 3.28 – Vue schématique d’une puce enrobée dans un bloc de résine dont les découpes des méplats de positionnement horizontal (plan \vec{y}, \vec{z}) sont réalisées. Les composants de positionnement ne sont pas représentés par souci de clarté.

De manière similaire, deux découpes supplémentaires ont été réalisées afin de retirer de la matière et rapprocher la puce des facettes d’injection et de collecte (plan \vec{x}, \vec{y}). Il est à noter que la mise en œuvre de ces découpes nécessite une grande rigueur dans le marquage des plans de facette. L’objectif est d’obtenir des plans de découpes parallèles entre ceux des puces et des méplats/facettes découpés. La précision atteinte est de l’ordre du demi-millimètre.

3.3.2.3 Étape de pré-polissage

Sur les quatre découpes réalisées, seules les facettes d’injection, de collecte et enfin d’observation ont été polies. Avant d’obtenir une finition dite de poli-optique, un pré-polissage est réalisé à l’aide de différents disques abrasifs en rotation dont la taille des grains diminue graduellement. La manipulation des échantillons est effectuée manuellement par l’expérimentateur et il est primordial de garder une constance dans les mouvements des blocs de résine sur les disques abrasifs.

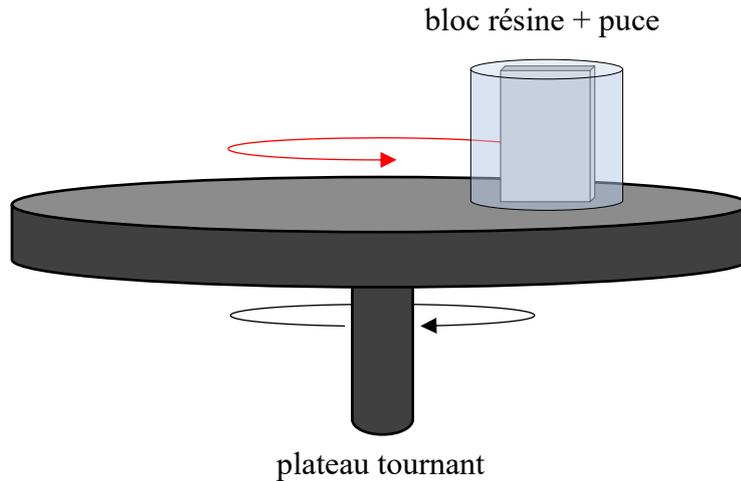


Figure 3.29 – Vue schématique de la méthode de manipulation des échantillons lors de l'étape de pré-polissage. Les flèches colorées en rouge et noir représentent le déplacement du bloc de résine et du plateau tournant respectivement.

L'expérimentation de cette technique a montré que l'utilisation de disques abrasifs de plus gros grains (< 2500) entraîne l'apparition de rayures trop profondes. Ainsi, la finition des disques abrasifs retenue pour l'étape de pré-polissage est de 2500 puis de 5000.

Dans le cas du méplat d'observation, un poli optique n'est pas nécessaire. Cette facette a seulement besoin d'être suffisamment polie pour observer les structures guidantes au travers de la résine. Pour cela, une étape supplémentaire de polissage rapide avec un liquide diamanté ($1/4 \mu\text{m}$) a été réalisée.

3.3.2.4 Polissage de finition

Cette étape est obligatoire afin d'obtenir un polissage de qualité optique indispensable pour les facettes d'injection et de collecte de la lumière en entrée et en sortie des guides. Ces étapes ont été réalisées à l'aide d'un équipement de polissage programmable utilisant des liquides diamantés composés de billes de dimensions micrométriques couplés à des soies de finition spécifiques. Cette étape de polissage de finition est composée de quatre sous-étapes de polissage graduel permettant d'atteindre une rugosité de qualité optique. Les diamètres des billes de diamant pour chaque étape sont indiqués dans le Tableau 16.

Paramètres	Valeurs
D n°1 (μm)	9
D n°2 (μm)	6
D n°3 (μm)	3
D n°4 (μm)	1/4

Tableau 16 – Tailles des billes diamantées dans les différents liquides utilisés lors de l'étape de polissage de finition des facettes d'injection et de collecte.

A la fin de ces étapes de préparation, les puces sont prêtes à être caractérisées sur le banc optique. Une photographie du résultat obtenu est présentée en Figure 3.30. Le bloc présenté montre une des premières versions du développement de la technique de polissage. Le polissage rapide du méplat d'observation n'est pas encore réalisé.

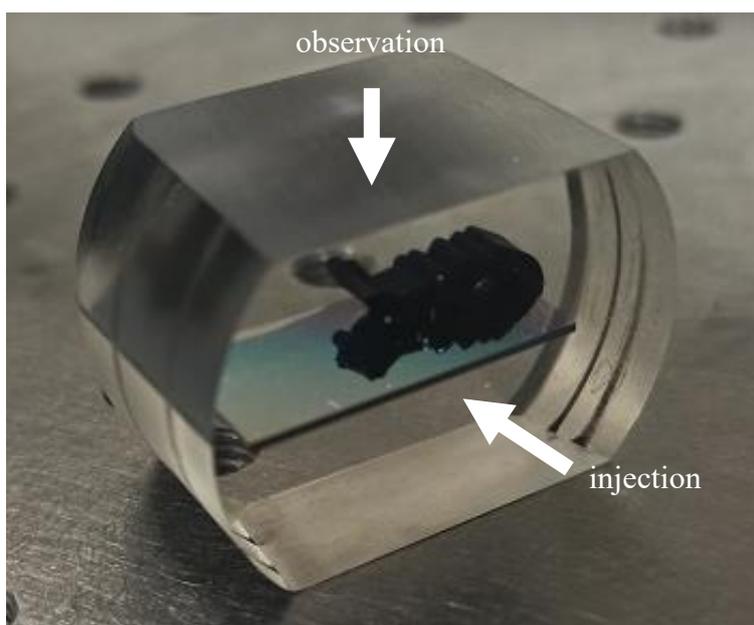


Figure 3.30 – Photographie d'un bloc de résine avec une puce enrobée avec les facettes d'injection et de collecte disposant d'un polie de qualité optique. Une vue à fort grossissement sera présentée dans la suite sur la Figure 3.39. La partie en noire est une première version de support de maintien de la verticalité de la puce dans le bloc de résine.

3.3.3 Approche physique : gravure par plasma

Une technique alternative au polissage mécanique consiste en la fabrication directe des facettes par gravure plasma. Des travaux ont déjà été réalisés à ce sujet pour la fabrication de facettes optiques par lithographie sur plateforme SOI et citons, à titre d'exemple, les travaux de Yap et al [76] qui ont démontré la réalisation d'un procédé de gravure de facette de profondeur 40-70 μm . La précision de positionnement des tranchées est de 1 μm et une optimisation des étapes du procédé a permis d'obtenir une rugosité comparable à la technique de fabrication de facette par polissage.

Les sections suivantes détaillent le protocole s'inspirant du procédé mis en œuvre dans l'étude de Yap et al pour la fabrication par photolithographie de tranchée de 200 μm de large en vue de la gravure complète de l'empilement de SiO_xN_y et Si.

3.3.3.1 Photolithographie UV de la résine de protection

Rappelons que l'un des critères de performances de couplage dans les structures guidantes est la verticalité des facettes d'injection. De plus, l'épaisseur totale de l'empilement des couches de matériau composant les facettes dans cette étude est de l'ordre de 500 μm . Pour ces raisons, la résine retenue pour l'étape de photolithographie UV est l'AZ4903. Après développement, les motifs inscrits dans cette résine donnent des flancs très verticaux. En outre, du fait de sa viscosité, les épaisseurs de résine sont supérieures à 10 μm à l'étalement. Cette caractéristique est importante vis-à-vis de la gravure plasma afin de garder une épaisseur de résine non nulle jusqu'à la traversée complète de l'empilement de couche.

Le protocole de préparation de surface présenté dans la section 3.1.2.1 a été réutilisé avant l'étape d'énrésinement d'AZ 4903. Pour rappel, un nettoyage au solvant, suivi d'un plasma O_2 , a été réalisé. Les tranches sont ensuite placées dans un four d'apprêts. Les paramètres de nettoyage solvant, plasma et de promotion d'adhérence dans le four d'apprêts reprennent ceux utilisés pour les guides et coupleurs MMI dans la section 3.2.1.2. Les paramètres d'étalement de la résine AZ4903 sont rapportés dans le Tableau 17.

	Étape #1	Étape #2
$V_{\text{accélération}} (\text{tr}.\text{min}^{-1}.\text{s}^{-1})$	500	1000
$V_{\text{plateau}} (\text{tr}.\text{min}^{-1}.\text{s}^{-1})$	1000	3000
t (s)	5	60

Tableau 17 – Paramètres de dépôt à la tournette de la résine de protection AZ 4903.

L'épaisseur de résine visée est de 12 μm . Pour cela, une vitesse de rotation moins élevée que dans le cas des guides et coupleurs MI est utilisée. La résine est ensuite recuite sur plaque chauffante à 110°C pendant 120 secondes. Dans le cas de cette résine, un temps de repos de 1 heure est respecté avant de procéder à l'exposition UV.

La dose d'exposition utilisée est de 290 $\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ et sur une aligneuse OAI 806 disposant d'une source d'exposition UV large bande. Le développement est, quant à lui, moins critique que pour la résine AZ MiR 701 29 cps précédemment utilisée. De ce fait, celui-ci se fait en une seule immersion. La solution de développement utilisée est l'AZ 400K diluée dans l'eau désionisée en proportion 4 : 1.

Le temps de développement se situe entre 2 et 3 minutes. Le temps exact d'arrêt du développement est déterminé par l'utilisateur par vérification visuelle de l'apparition des motifs. Lorsque les parties de résine à développer deviennent très réfléchissantes, le développement est considéré comme achevé.

Une photographie au microscope optique de la tranchée dans la résine AZ4903 après l'étape de développement est présentée sur la Figure 3.31. Les largeurs des tranchées obtenues sont de 200 μm et correspondent parfaitement aux largeurs de tranchées voulues. Cela valide le protocole de photolithographie UV des tranchées destinées à la gravure des facettes.

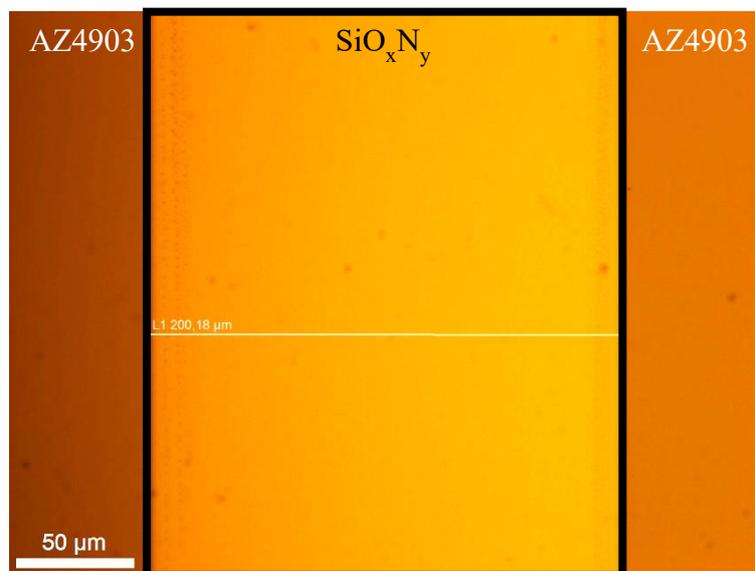


Figure 3.31 – Vue optique d'une tranchée de largeur 200 μm après l'étape de développement de la résine AZ 4903.

La section suivante détaille le procédé de gravure sèche de l'empilement des trois couches de SiO_xN_y , sur le substrat de silicium.

3.3.3.2 Gravure des trois couches de SiO_xN_y

En premier lieu, un nettoyage rapide à l'aide d'un plasma oxygène peu puissant, typiquement 50 W pendant 3 minutes, est réitéré dans ce procédé. La tranche est ensuite collée à l'aide d'un adhésif spécifique (Crystalbond 555). Pour cela, l'adhésif est fondu sur un support 200 mm à l'aide d'une plaque chauffante à 80°C puis l'échantillon est placé sur ce support avant d'entrer dans le bâti de gravure. Il est important de noter que des bulles d'air peuvent être piégées dans l'adhésif. Ceci peut générer des pertes de vide provenant de fuites générées par ce mauvais collage à l'interface entre le support en quartz et le substrat de silicium et pouvant aller jusqu'à empêcher le départ du procédé de gravure plasma. La limitation de ces bulles permet un meilleur contact thermique entre le support et l'échantillon dans la chambre pendant la gravure.

Une vue en coupe longitudinale le long d'un guide d'onde avant gravure est présentée sur la Figure 3.32. Les trois couches de SiO_xN_y et la couche de résine AZ 4903 y sont représentées ainsi que la valeur des épaisseurs respectives.

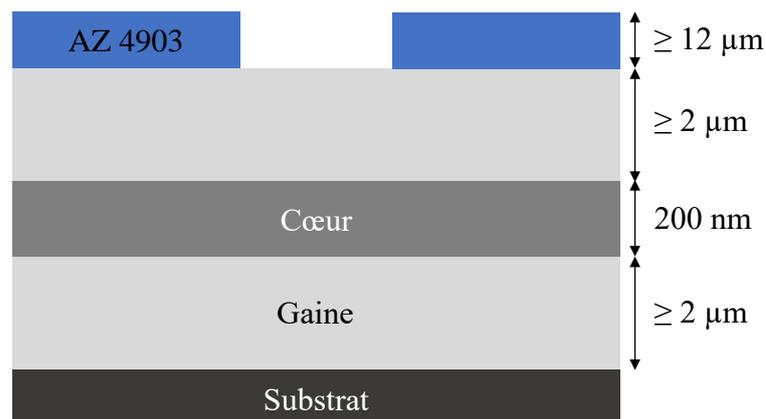


Figure 3.32 – Vue schématique de la structure à la fin du protocole de photolithographie de la résine AZ 4903.

L'étape suivante est critique car il convient de graver les trois couches de SiO_xN_y en une unique étape de gravure sèche. Celle-ci est réalisée par AOE avec les paramètres quasiment identiques à ceux utilisés pour la gravure du cœur des guides d'onde. Le temps de gravure utilisé est de 25 minutes pour graver les 4,2 µm de SiO_xN_y . Ces paramètres sont rapportés dans le Tableau 15.

Une vue schématique de cette étape est présentée en Figure 3.33. Il est à noter qu'une partie significative (environ 2 µm) de résine est aussi gravée pendant cette étape du fait de la faible sélectivité entre la résine et l'oxyde. Il n'est pas nécessaire d'optimiser le temps de gravure car la chimie du plasma n'interagit pas avec le silicium. Le substrat se comporte alors comme une couche d'arrêt.

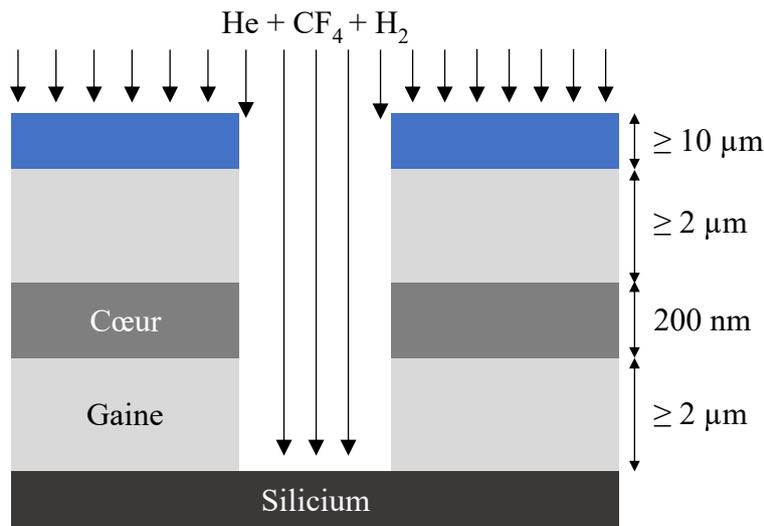


Figure 3.33 – Représentation schématique de la structure à la fin de la gravure sèche par AOE des trois couches de SiO_xN_y .

Après la phase de gravure, l'échantillon et le support sont placés sur une plaque chauffante afin de les séparer, par glissement de la tranche échantillon sur le substrat de silicium. Les résidus de colle en face arrière de l'échantillon sont ensuite nettoyés à l'aide d'un solvant.

3.3.3.3 Gravure du substrat de Silicium

A ce stade, une tranchée de $200\ \mu\text{m}$ de large des trois couches de SiO_xN_y est réalisée et le silicium du substrat est apparent. Il est à noter que les cœurs des guides sont situés dans la couche de SiO_xN_y et que, par conséquent, la rugosité générée par la technique de gravure du silicium n'est plus problématique.

De ce fait, la technique de gravure par ASE²⁷ est utilisée pour graver rapidement des structures profondes et à rapport d'aspect élevé dans le silicium. Il s'agit d'une technique mise en place pour la première fois par la compagnie STS et a permis la mise en œuvre du procédé Bosch pour les gravures profondes de silicium. Ce procédé breveté repose sur un principe de fonctionnement en un cycle de deux étapes distinctes :

- Attaque isotrope par un plasma d'hexafluorure de soufre (SF_6),
- Dépôt d'une couche de téflon à partir d'octafluorocyclobutane (C_4F_8).

²⁷ « Advanced Silicon Etching »

Ce cycle de gravure/dépôt est répété en fonction de la profondeur de gravure de silicium obtenue par cycle et de la profondeur de gravure désirée. Le temps de cycle peut être ajusté sachant que les cycles courts donnent des parois plus lisses et les cycles longs apportent une vitesse de gravure plus élevée.

Le procédé Bosch utilisé pour la gravure de silicium impose un support d'échantillon inerte face aux attaques plasma SF_6 . Pour cela, la tranche échantillon est collée sur un support en quartz. Les deux étapes de chaque cycle du procédé Bosch sont présentées dans les Figure 3.34 et Figure 3.35.

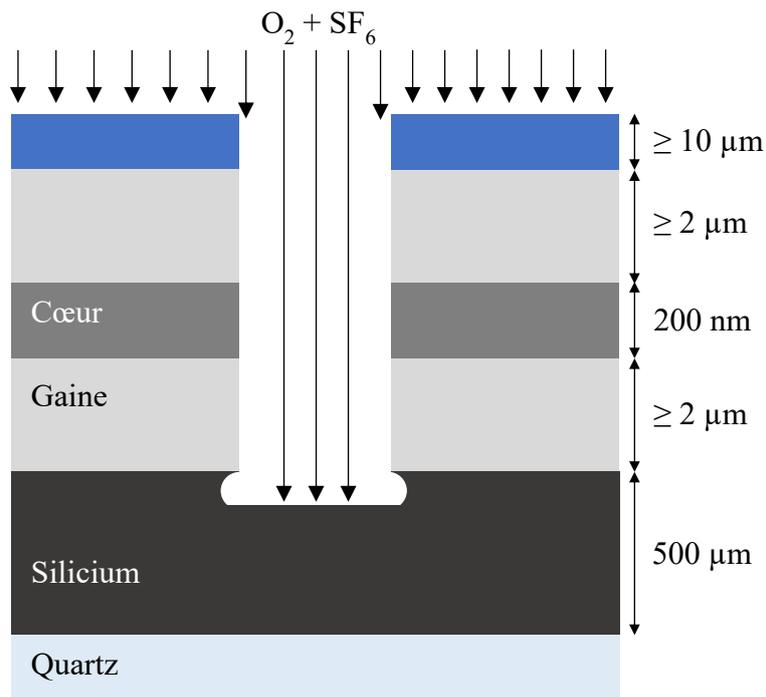


Figure 3.34 – Vue schématique de la structure présentant l'étape de gravure à l'aide de SF_6 du premier cycle du procédé Bosch.

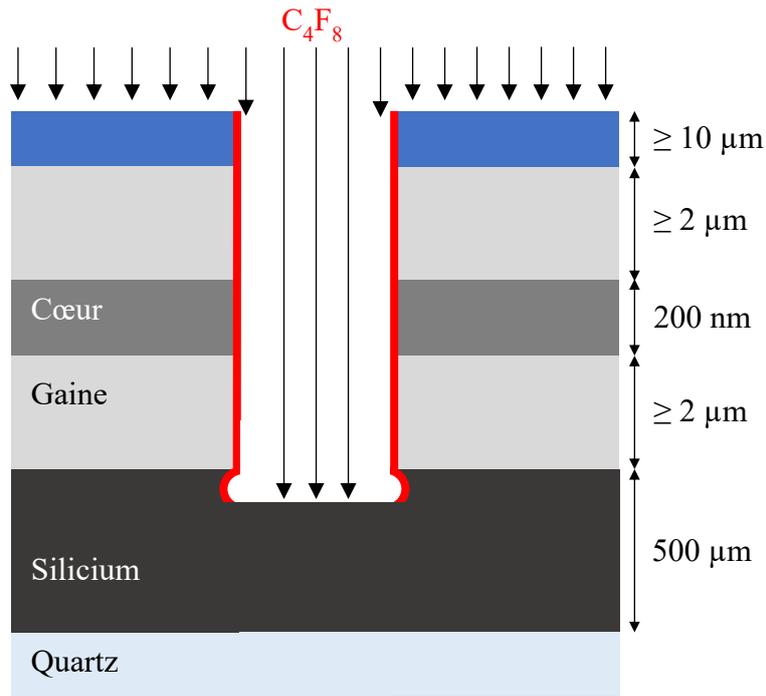


Figure 3.35 – Vue schématique de la structure présentant l'étape de passivation à l'aide de C_4F_8 du premier cycle du procédé Bosch.

Ce procédé dispose d'une très haute sélectivité entre la résine et le silicium permettant une gravure très efficace. A titre d'exemple, dans le cas de cette étude, la sélectivité est de l'ordre de 1 : 80 entre la résine AZ4903 et le substrat de silicium. Les paramètres utilisés pour cette gravure sont listés dans le Tableau 18.

	Gravure	Passivation
T_{platine} (°C)	20	20
p (mTorr)	28	18
P_{coil} (W)	600	600
P_{platine} (W)	18	-
t (s)	13	7
C₄F₈ (sccm)	-	85
SF₆ (sccm)	130	-
O₂ (sccm)	13	-
Nbre de cycles – temps	410 – 2,3 h	

Tableau 18 – Paramètres optima utilisés pour la gravure par le procédé Bosch.

A ce stade, le silicium est complètement gravé (voir Figure 3.36). Une étape de nettoyage plasma oxygène à 150 W pendant 15 minutes a été réalisée pour retirer les parties de résine carbonisée par les gravures successives du SiO_xN_y et du Si. Du fait du niveau de contraintes mécaniques, le décollement mécanique effectué pour la gravure des couches d'oxyde constitue un risque de casse. L'échantillon est donc plongé dans un bain d'eau chaude désionisée jusqu'à son décollement du support en quartz. Il s'en suit un nettoyage solvant standard à l'aide d'acétone, d'isopropanol puis d'eau désionisée. Un dernier plasma d'oxygène de 15 minutes à 150 W est réalisé afin de retirer d'éventuels résidus organiques.

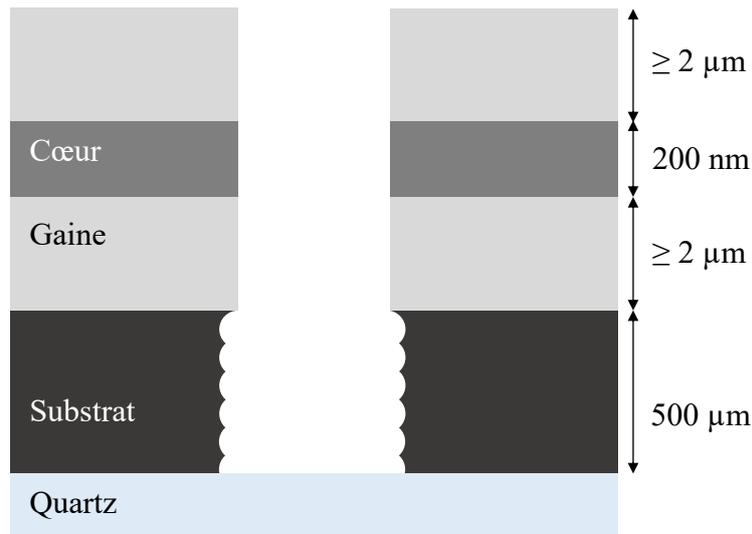


Figure 3.36 - Vue schématique de la structure à la fin des 410 cycles de gravure par le procédé Bosch et le nettoyage de l'échantillon par solvants/plasma O_2 .

3.3.4 Comparaison des techniques de fabrication de facette étudiées

Dans cette section, une synthèse des avantages et des inconvénients des trois techniques présentées dans la section précédente est réalisée. Cette discussion permet d'appuyer l'approche par gravure plasma pour la fabrication des facettes dans cette étude. Les critères de jugement des techniques sont le contrôle sur le positionnement des facettes, l'objectif de rugosité de moins de $\leq \lambda/5$ par rapport à la longueur d'onde d'opération pour se placer dans un régime dit : « sub-longueur d'onde » et la complexité dans la mise en pratique.

3.3.4.1 Clive mécanique

La technique de clive mécanique est simple et efficace pour des matériaux cristallins. Cependant, le SiO_xN_y utilisé dans cette étude est amorphe et implique une faible répétabilité de

la qualité des facettes ainsi qu'un mauvais contrôle sur le positionnement de celles-ci. Cette technique est donc très peu adaptée pour la caractérisation des structures guidantes comme en témoigne la Figure 3.37, présentant la photographie MEB réalisée sur une partie d'une facette clivée à l'aide d'une pointe diamantée.

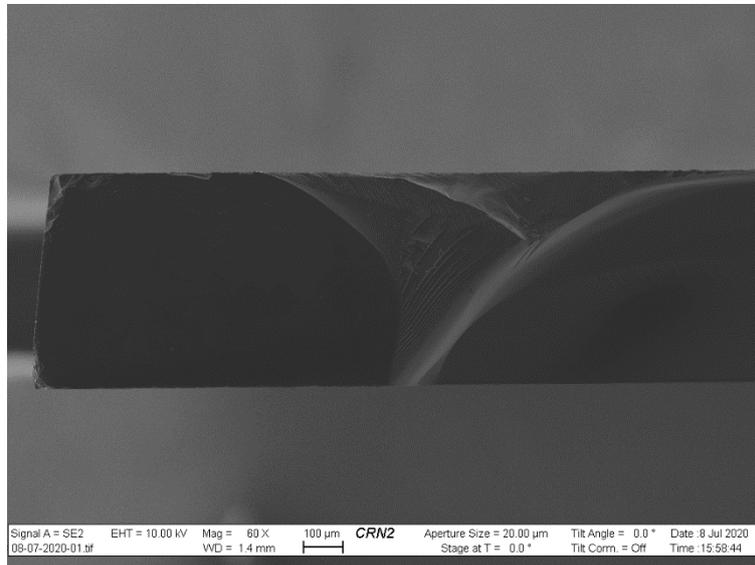


Figure 3.37 – Photographie au MEB d'un essai de facette par clive mécanique à l'aide d'une pointe diamantée.

3.3.4.2 Polissage mécano-chimique

Cette technique de polissage permet un positionnement des facettes bien meilleur que la technique de clive mécanique. De plus, celle-ci permet d'obtenir une qualité de facette avec un poli de finition optique. La photographie au MEB de la Figure 3.38 permet d'illustrer cette qualité de polissage. La rugosité obtenue par l'utilisation de ce procédé de polissage des facettes d'injection et de collecte présente une haute qualité. En effet, après l'étape de polissage de finition, celle-ci est inférieure à $\lambda/5$ par rapport à la longueur d'onde d'opération de 633 nm.

Cependant, l'enrobage des dispositifs photoniques réalisées implique une manipulation brutale qui peut générer des cassures et des arrachements aux interfaces entre la partie guidante et la résine d'enrobage. A titre d'exemple, des arrachements de la couche guidante de SiO_xN_y par la résine d'enrobage lors du procédé de fabrication ont pu être observés. Ces arrachements sont présents sur une grande partie de l'interface SiO_xN_y /résine d'enrobage. Les Figure 3.39 – (a) et Figure 3.39 – (b) montrent ces incidents de polissage.

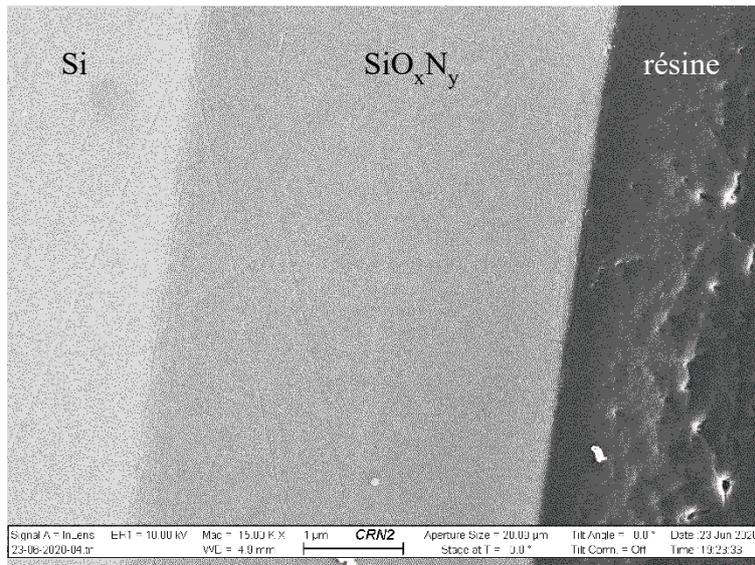


Figure 3.38 – Vue au MEB d’une facette polie à un grossissement de 15 Kx. Le contraste élevé du cliché permet de voir l’empilement des couches ainsi que la finition du poli-optique.

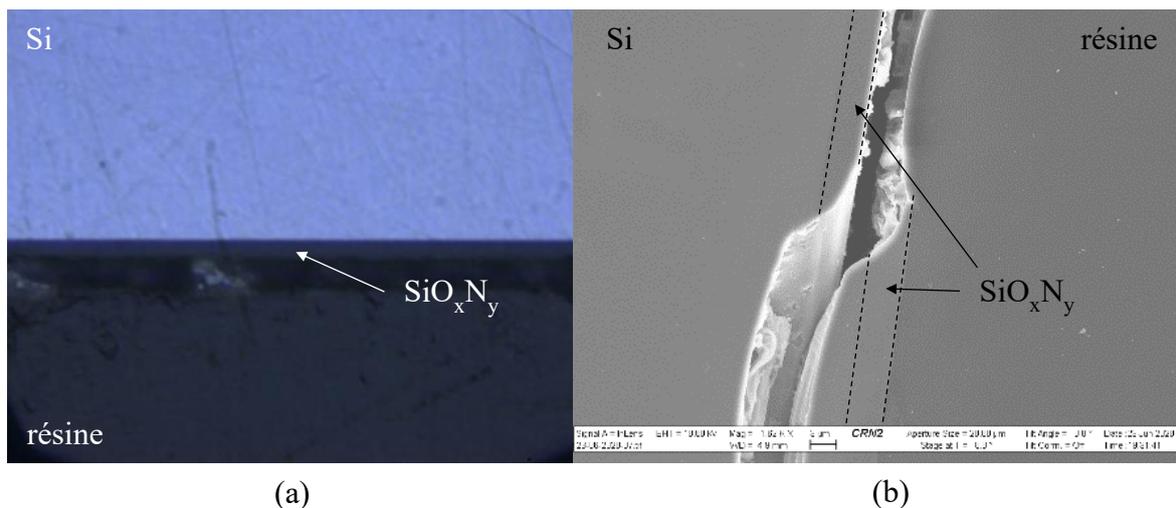


Figure 3.39 – Vue d’une facette polie par observation (a) au microscope optique à un grossissement de 1000x et (b) au MEB à un grossissement de 1620x. Il est clairement mis en évidence un arrachement de la couche guidante de la puce par la résine d’enrobage lors du procédé de polissage mécanique.

Par ailleurs, cet enrobage rend complexe la manipulation des échantillons lors de la phase de caractérisation optique. En effet, la Figure 3.40 montre les résultats d’un test préliminaire d’une injection laser à 633 nm à l’aide d’une fibre monomode dans un guide d’onde et dont la facette a été fabriquée par le procédé de polissage développé dans cette étude. Aucune transmission n’a pu être obtenue. De plus, l’épaisseur centimétrique de résine présente au-dessus du SiO_xN_y,

ajouté aux bulles piégées dans le bloc de résine rendent la procédure d'alignement à l'injection extrêmement complexe.



Figure 3.40 – Vue optique de dessus d'une injection laser à 633 nm à l'aide d'une fibre monomode dans un guide d'onde, dont la facette a été fabriquée par le procédé de polissage mécano-chimique.

3.3.4.3 Gravure plasma

Cette technique de fabrication par gravure présente l'avantage de disposer d'une précision de positionnement micrométrique grâce au procédé de fabrication utilisant la photolithographie UV. De plus, sa complexité de mise en pratique est bien moins grande que les blocs de résine enrobés résultant de la technique de fabrication par polissage.

Plusieurs observations au MEB ont été réalisées afin de vérifier la rugosité de facette du procédé de fabrication par gravure sèche. Les Figure 3.41 – (a) et Figure 3.41 – (b) sont des photographies de la facette d'injection en vue de profil et en vue de face, respectivement.

Le profil typique en « dents de scie » est visible sur la Figure 3.41 – (a) et, comme explicité précédemment, cette rugosité n'interagit pas du tout avec la propagation modale des guides d'ondes. Cependant, la Figure 3.41 – (b) met en exergue une rugosité de l'ordre de la centaine de nanomètres. Pour une longueur d'onde d'opération de 532 nm, cette rugosité est de l'ordre de $\lambda/5$ et cet effet aura probablement peu d'importance dans les pertes de couplage au niveau de la facette d'injection lors de la caractérisation des structures présentée au Chapitre 4.

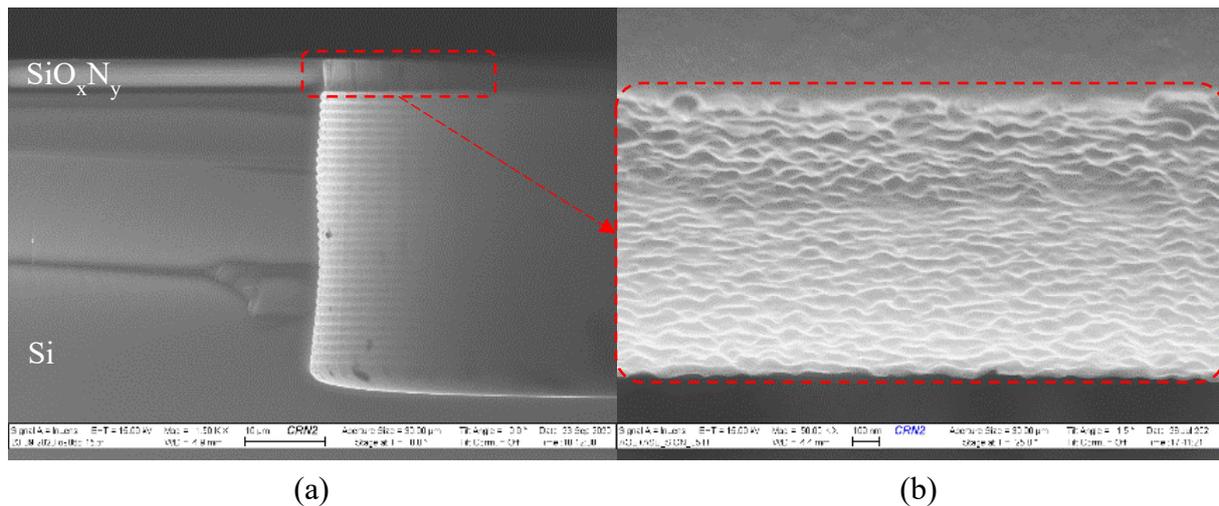


Figure 3.41 – Photographie au MEB (a) du profil de gravure par le procédé Bosch après 30 cycles et (b) de la rugosité de la facette d’injection/collecte en SiO_xN_y sur un échantillon d’essai.

3.4 Conclusion

Ce chapitre a permis de décrire la méthode de fabrication du matériau guidant choisi pour ce travail. L’intérêt de l’utilisation du SiO_xN_y est sa grande transparence dans le domaine du visible ainsi que sa flexibilité de fabrication en termes de dimensions et d’indice de réfraction.

Les différentes couches guidantes ont ainsi pu être déposées par PECVD.

La technique de mesure utilisée dans la caractérisation des couches déposées est l’ellipsométrie. Il s’agit d’une technique intéressante car elle permet d’aider au prototypage rapide de films minces fabriqués par PECVD. Cela a permis d’optimiser les conditions de dépôt PECVD afin d’obtenir des couches de cœur d’épaisseur 200 nm avec un contraste d’indice cœur/gaine de $\Delta n = 0,12$. Cependant, ces mesures n’ont pu être effectuées qu’à un seul angle et pour quelques points proches du centre des tranches. Le degré de précision sur l’épaisseur et l’indice optique des couches déposées reste donc difficilement quantifiable à ce stade de l’étude.

Malgré la limite de dimensions atteignable par photolithographie en utilisant l’aligneuse de la salle blanche du LN2/3IT, les dimensions micrométriques requises ont été atteintes. Le protocole optimisé de fabrication par photolithographie UV a permis de fabriquer des guides d’onde rectilignes, de différents rayons de courbure ainsi que des coupleurs MMI 50/50 dont les dimensionnements latéraux sont très proches des valeurs visées. En effet, les valeurs obtenues sont les suivantes : largeur des guides de 1 µm, largeur du guide multimodes des coupleurs MMI de 8 µm et longueur du guide multimodes de 92,5 µm. Le dimensionnement des structures fabriquées est donc complètement inscrit dans l’étude de tolérance de fabrication par « *corner analysis* », réalisée dans le Chapitre 2.

En vue de la caractérisation optique des structures, plusieurs techniques de réalisation des facettes d'injection ont été étudiées : clive mécanique, polissage mécano-chimique et par gravure plasma. Les deux premières techniques ont assez vite montré leurs limites (casse échantillon, arrachements, complexité pratique...).

La méthode de fabrication des facettes à l'aide d'une succession de gravures sèches par AOE puis par ASE permet de traverser la totalité des tranches échantillons aux positions voulues. Cette technique a été *in fine* utilisée pour fabriquer les tranches destinées à leur caractérisation optique dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 4 : CARACTÉRISATION DES PERFORMANCES OPTIQUES DES GUIDES ET DES COUPLEURS MMI

Ce chapitre a pour objectif de présenter les performances des différentes structures passives réalisées en considérant trois axes :

- Dans un premier temps, une étude du banc de caractérisation est effectuée afin d'évaluer les performances possibles sur les dispositifs mis en œuvre.
- Ensuite, les pertes par propagation ainsi que les pertes par courbures des guides d'onde sont étudiées en mettant en œuvre différentes techniques de caractérisation aux trois longueurs d'onde : 532, 633 et 760 nm. Cette étude de performances s'achève par la caractérisation des performances des coupleurs MMI.
- Une synthèse sur les problématiques rencontrées en termes de préparation d'échantillon, de conception et de fabrication est donnée en fin de chapitre.

4.1 Description des bancs de caractérisation

Dans ce projet de thèse, deux bancs de caractérisation optique sont mis à disposition. L'un est utilisé pour les vérifications qualitatives de guidage optique au LN2/3IT et le second permet de caractériser quantitativement les dispositifs fabriqués à l'IMS. Ce dernier est dédié à la caractérisation des dispositifs pour trois longueurs d'onde du visible et fait l'objet d'une description détaillée afin d'analyser les limites de mesure atteignables. Les composants optiques utilisés dans ce travail, tels que les sources laser émettant dans le visible, les fibres optiques, les optiques de contrôle de polarisation et l'objectif de microscope, seront détaillés dans la suite de cette section. La Figure 4.1 montre une vue d'ensemble du banc de caractérisation dans sa configuration d'injection dans les guides d'entrée.

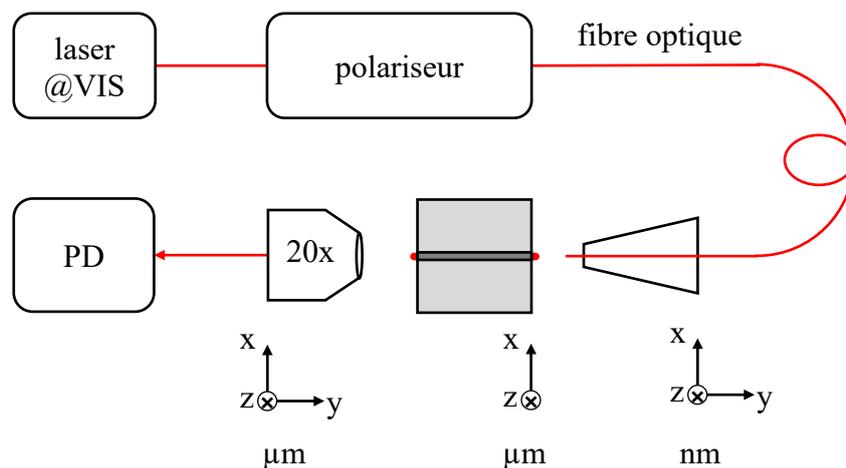


Figure 4.1 – Vue schématique simplifiée du montage expérimental de caractérisation des dispositifs intégrés en configuration de mesure. Une fibre optique est utilisée pour l'injection et placée sur un nanositionneur piézoélectrique 3 axes. La puce et l'objectif de microscope sont placés sur des plateformes 2 / 3 axes, respectivement. La distance de travail de l'objectif de microscope est égale à 9 mm.

4.1.1 Caractéristiques des sources laser émettant dans le visible

Dans ce travail, trois longueurs d'onde sont utilisées pour sonder le comportement des guides et coupleurs MMI 50/50. La technologie de fonctionnement ainsi que les principales caractéristiques de chaque diode laser sont présentées dans les trois sous-sections suivantes.

Les caractéristiques techniques détaillées sont reportées dans un tableau récapitulatif placé en fin de cette section.

4.1.1.1 Source à 532nm

La diode laser du laboratoire est basée sur la technologie DPSSL²⁸. La longueur d'onde la plus commune utilisant ce type de technologie est de 532 nm. Le principe de fonctionnement repose sur un assemblage monolithique composé d'un cristal Laser (Nd : YAG), d'un cristal doubleur de fréquence (KTP) ainsi que de deux optiques de contrôle de la polarisation (lame $\lambda/4$ et un polariseur). Le cristal laser est pompé par une diode laser de pompe centrée sur une transition forte du Néodyme à 808 nm de manière à maximiser une émission stimulée 1064nm. Cette dernière est doublée en fréquence dans le KTP afin d'obtenir la longueur d'onde de 532 nm.

La version retenue, fabriquée par la société OXXIUS, est constituée d'un résonateur monolithique sans alignement ou AMR²⁹. Une photographie de l'assemblage monolithique est présentée en Figure 4.2 – (a). Les éléments du résonateur sont assemblés en un seul sous-système optique à très faibles pertes. Les facettes terminales de deux cristaux sont activées chimiquement afin d'y déposer un composé hautement transparent et ainsi créer une liaison extrêmement robuste dans le temps, faiblement sensible aux variations de température et/ou vibrations mécaniques. Les extrémités des cristaux sont complétées par un revêtement diélectrique afin d'optimiser les coefficients de transmission et réflexion aux différentes interfaces. Il est à noter que la puissance laser est polarisée linéairement et dispose d'un coefficient d'extinction en polarisation de 30 dB. Le faisceau laser de sortie est ensuite couplé dans une fibre à l'aide d'un collimateur en espace libre dédié.

La stabilité de la diode laser est assurée par un asservissement de la température opérant entre 10°C et 50°C par un contrôleur à effet Peltier (où TEC³⁰) et dont la puissance optique est fixée à 50 mW. Les composants constituant le contrôleur TEC sont présentés sur la Figure 4.2 – (b).

²⁸ « Diode Pumped Solid State Laser »

²⁹ « Alignment-free Monolithic Resonator »

³⁰ « Thermo-Electric Cooler »

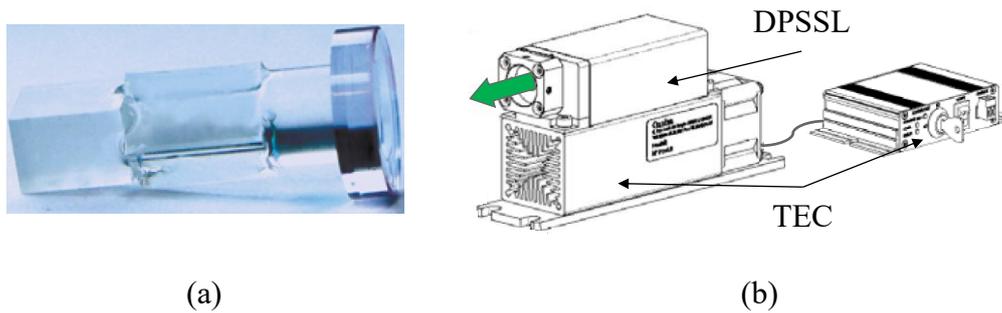


Figure 4.2 – (a) Photographie du cristal monolithique utilisant la technologie DPSSL constituant la diode laser à 532,3 nm du laboratoire et (b) la vue d'ensemble schématique avec asservissement contrôlé en température (TEC) de la compagnie Oxxius [77].

4.1.1.2 Source à 633nm

La longueur d'onde centrale de la diode LP 633 du laboratoire a été mesurée à 634,6 nm. Le régime de fonctionnement de cette diode est continu et la puissance nominale utilisée dans les caractérisations est de 50 mW. De plus, la fiabilité de la diode laser décline rapidement avec l'augmentation de température. Par conséquent, la diode laser est asservie par un contrôleur TEC externe (modèle ITC 510 de THORLABS) pour une température de 25°C. La fibre monomode d'une longueur de 1m dispose d'un connecteur FC/PC à son extrémité³¹. La Figure 4.3 illustre le principe de fonctionnement du laser commercial complet fabriqué par THORLABS.

La lumière provenant de la diode est focalisée dans une fibre polie et biseautée. L'angle du biseau de la facette de la fibre optique est de $\theta_{\text{fibre entrée}} = 8^\circ$ afin de minimiser toute réflexion et retour dans la diode, retours optiques pouvant causer des fluctuations de puissance voire des endommagements du composant actif. Cette technique est bien connue des fibres disposant de férules APC³².

³¹ « Ferrule Connector/Physical Contact »

³² « Angled Physical Contact »

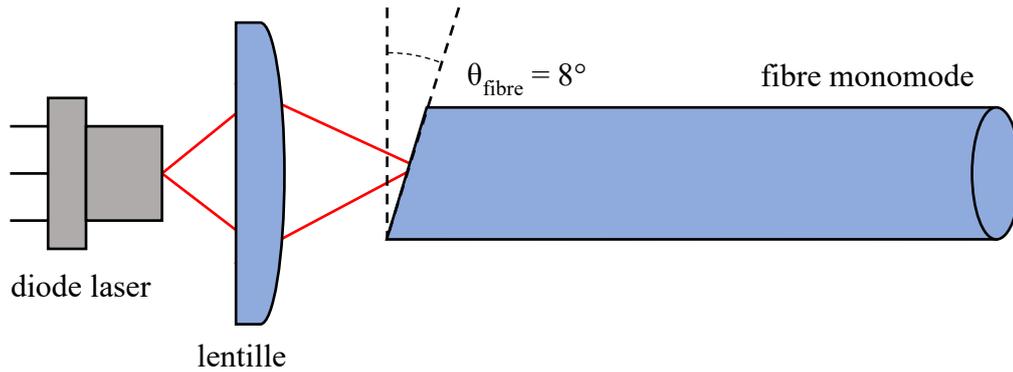


Figure 4.3 – Vue schématique de la diode laser dans son montage fibré à 633 nm. Le faisceau est injecté dans une fibre monomode avec un angle de 8° . Le connecteur de sortie est de type FC/PC.

4.1.1.3 Source à 760nm

La diode laser EYP 760 utilisée au laboratoire (fournie par TOPTICA) dispose d'une longueur d'onde centrale de fonctionnement à 760,6 nm. Le régime de fonctionnement de cette diode est continu et la puissance nominale utilisée dans les caractérisations est de 10 mW. La technologie de fonctionnement est basée sur le principe de rétroaction distribuée ou DFB³³. Le principe de fonctionnement de ce type de laser est basé sur une transposition d'une cavité Fabry-Perot classique. Au lieu d'utiliser des miroirs aux extrémités de la cavité, une cavité DFB met en œuvre une structure périodique (réseau de Bragg) placée dans le milieu actif. Généralement, les diodes laser DFB à semi-conducteurs sont disponibles pour une émission dans différentes régions spectrales comprises dans une plage de $0,8 \mu\text{m}$ à $2,8 \mu\text{m}$.

De plus, de telles sources sont à la fois très stables en régime de fonctionnement choisi, fine spectralement et légèrement accordable en courant et température ($\approx 1 \text{ nm}$). Il est à noter qu'elles présentent également un intérêt dans l'utilisation de leur dépendance à la température ($d\lambda/dT$) et au courant ($d\lambda/dI$) et notamment pour les applications d'analyse spectrale extrêmement résolues telles que réalisées par Girault et al [78] ou encore par Chauvin et al [79].

La configuration d'encapsulation de la diode retenue est dite « papillon » (butterfly package) et une vue schématique de la diode laser utilisée est présentée sur les Figure 4.4 et Figure 4.5. Ce type d'encapsulation permet un contrôle en température de la diode à l'aide d'un TEC ainsi qu'un couplage dans une fibre optique de sortie, le tout dans un environnement le plus compact possible.

³³ « Distributed FeedBack »

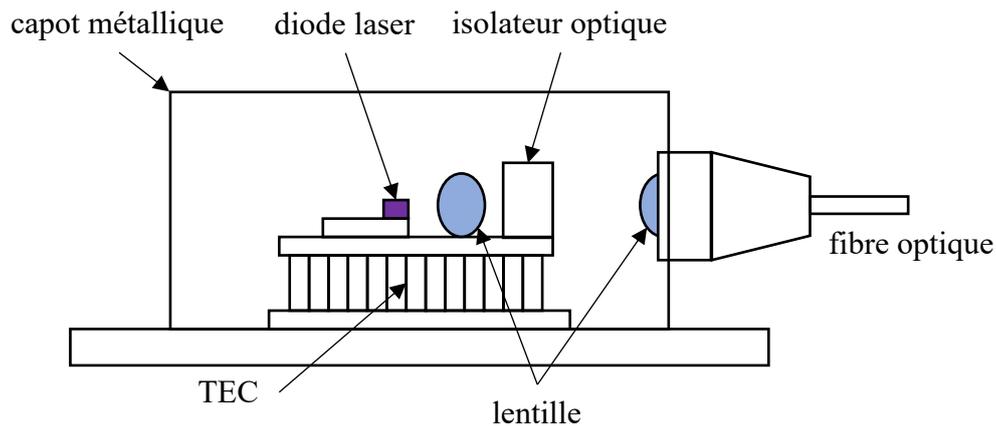


Figure 4.4 – Vue schématique en coupe d’une diode laser DFB en boîtier « butterfly » de la compagnie [80].

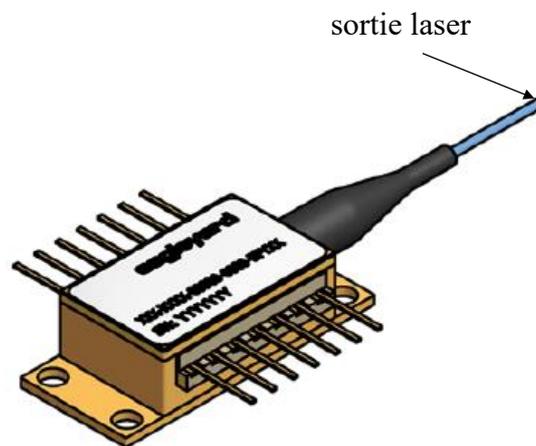


Figure 4.5 – Vue schématique d’un boîtier de type « butterfly » de la compagnie [80].

4.1.1.4 Caractéristiques techniques des sources laser utilisées

Les caractéristiques techniques des trois sources lasers utilisées pour ce travail de caractérisations sont rapportées dans le Tableau 19. Celles-ci sont toutes polarisées linéairement et les PER³⁴ sont spécifiés (lorsqu’ils sont fournis par le fabricant). Bien que cette caractéristique ne soit pas connue pour la source à 633 nm, un soin particulier a été porté sur le contrôle de la polarisation d’entrée dans les structures fabriquées et un montage dédié a été réalisé. Les composants, la configuration ainsi que la méthodologie de ce montage sont détaillées et discutées dans la section 4.1.3.

³⁴ « Polarization Extinction Ratio »

Fabricant	OXXIUS	THORLABS	TOPTICA
Modèle	LCX-532S	LP633-SF50	EYP-DFB-0760
Longueur d'onde (nm)	532,3 ± 0,3	634,6	760,6
Connexion	Espace libre	FC/PC	FC/APC
Puissance (mW)	50 ; CW	50 ; CW	10 ; CW
PER (dB)	≥ 30	-	10
Stabilité en puissance	± 1% sur 8h	-	-
Bruit optique	≤ 0,2% RMS	-	-

Tableau 19 – Synthèse des caractéristiques techniques des trois sources laser utilisées pour la caractérisation des structures fabriquées.

4.1.2 Caractéristiques des composantes d'injection et de collecte

Les fibres microlentillées représentent une solution intéressante pour injecter efficacement la lumière issue des lasers dans les structures guidantes à l'étude. En effet, deux segments sont assemblés par des épissures sur l'extrémité d'une fibre monomode permettant de focaliser la lumière en sortie de fibre. Le premier segment est une fibre sans cœur en silice jouant le rôle d'expandeur de mode et le second segment est constitué d'une portion de fibre à gradient d'indice (GIF) agissant comme une lentille convergente, cette terminaison a une longueur proche du millimètre.

La Figure 4.6 détaille les caractéristiques principales de ce type de fibre composée de ces 2 segments. Le diamètre de la fibre est de 125 μm . La focalisation du faisceau de sortie est gaussienne et donne un diamètre de col de 2,3 μm à une distance de travail de 25 μm . De plus, la propagation est monomode dans la gamme des trois longueurs d'onde utilisées.

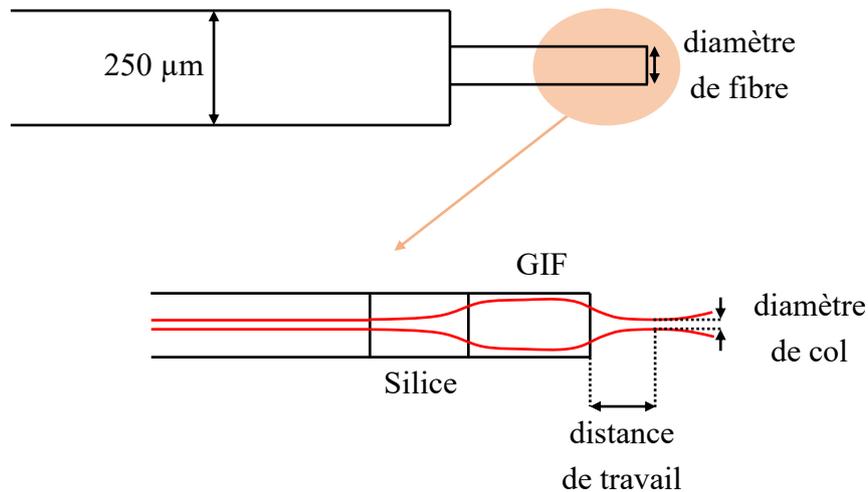


Figure 4.6 – Vue schématique de la fibre microlentillée d’injection composée des 2 segments de la compagnie IDIL [81], [82]. Le parcours des rayons lumineux est présenté en rouge.

Il est à noter que les fibres optiques en sortie des trois sources laser ainsi que la fibre d’injection retenue ne disposent pas d’un maintien de polarisation. La polarisation linéaire d’entrée est donc soumise aux différentes contraintes mécaniques de tension ou de torsion appliquée sur la fibre.

La lumière est collectée à l’aide d’un objectif de microscope de grossissement 1 : 20. Ses caractéristiques techniques principales sont présentées le Tableau 20.

Fabricant	Grossissement	Distance focale (mm)	Distance de travail (mm)	ON
Olympus	1 : 20	9	1,2	0,40

Tableau 20 – Données caractéristiques de l’objectif de microscope utilisé dans la caractérisation.

4.1.3 Méthode d’injection lumineuse

L’objectif de ce travail est de caractériser les structures fabriquées dans les modes de propagation TE et TM de façon différenciée. Pour cela, une méthode d’injection a été développée et mise en œuvre pour toutes les mesures effectuées. Cette méthode sera décomposée en trois étapes : le contrôle de la polarisation à l’injection, la visualisation de

l'injection fibre puce et l'alignement des éléments du banc (polariseur, fibre, puce, objectif, photodétecteur).

4.1.3.1 Contrôle de la polarisation

A ce stade, les trois sources retenues dans l'étude sont polarisées linéairement et couplées dans des fibres optiques PC/PC monomode à leur longueur d'onde respective. Le montage de contrôle de polarisation réalisé est basé sur un montage d'optique en espace libre assemblant un cube séparateur et d'une lame $\lambda/2$.

Notons que deux montages ont été réalisés pour le contrôle de la polarisation. L'un est destiné aux caractérisations à l'aide des sources à 532 nm et 633 nm et le second à 760 nm. Ceci s'explique par les plages d'opération en longueur d'onde des composants utilisés dans le montage de contrôle de la polarisation. De plus, le montage à 760 nm comporte une fonctionnalité supplémentaire sous la forme d'un coupleur fibré afin de pouvoir mixer deux longueurs d'onde (633 nm et 760 nm). Ce coupleur permet d'aider à l'alignement car la campagne de caractérisations a mis en lumière une complexité pratique liée à sa longueur d'onde proche de l'infrarouge. Un premier alignement dans le visible est donc réalisé à l'aide de la source à 633 nm pour faciliter l'alignement à 760 nm.

Le cube séparateur retenu pour 532 et 633 nm est fabriqué par THORLABS (CM1-PBS251) et dispose d'un PER de 1000 : 1 en transmission. Ce composant agit comme un filtre sur la polarisation d'entrée des sources laser. Les caractéristiques techniques du cube sont listées dans le Tableau 21.

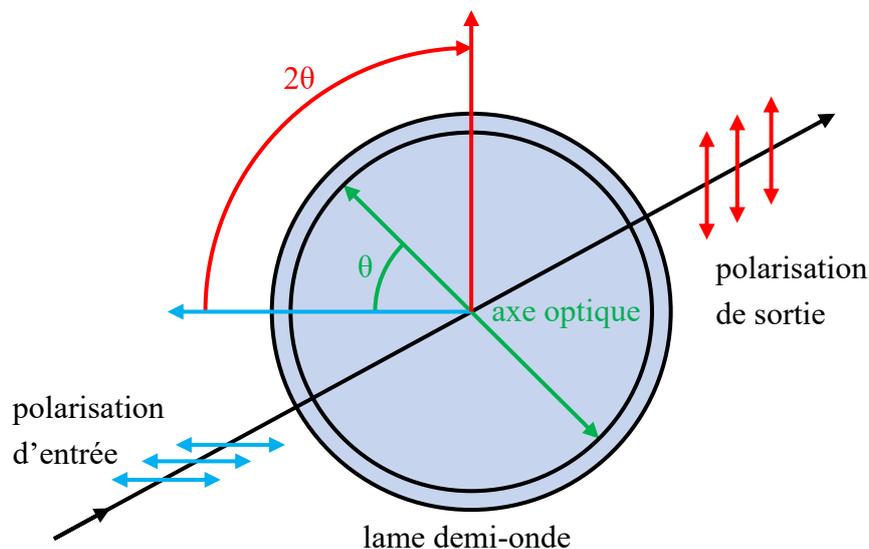


Figure 4.7 – Vue schématique du principe d’action d’une lame $\lambda/2$ sur une polarisation d’entrée linéaire.

Par ailleurs, un composant supplémentaire de contrôle de la polarisation après l’injection dans les structures est utilisé du fait du non-maintien de polarisation de la fibre microlentillée d’injection. Il s’agit d’un prisme de Glan-Taylor de chez THORLABS (GL10-A). Le principe de fonctionnement de ce prisme étant largement connu, il ne sera pas détaillé ici. Celui-ci présente un PER de 100 000 : 1 et sera utilisé pour mesurer les contributions principales et résiduelles de polarisation après l’injection. La section suivante présente cette méthodologie. Les caractéristiques techniques de ce prisme sont rapportées dans le Tableau 21.

Fabricant	Composant	Modèle	$\lambda_{\text{opération}}$ (nm)	$\Delta\lambda_{\text{opération}}$ (nm)	PER (dB)
THORLABS	Collimateurs	TC25APC-543	532 ; 633	531-557	-
		PAF-X-2-C	760	1050-1620	-
	Séparateurs	PBS251	532 ; 633	420-680	30
		FBR-LPNIR	760	650-2000	30
	Lame $\lambda/2$	AHWP05M-600	532 ; 633	400-800	-
		AHWP05M-980	760	690-1200	-
	Glan-Taylor	GL10-A	532 ; 633 ; 760	350-700	50

Tableau 21 – Synthèse des caractéristiques techniques des composants retenus pour le contrôle de polarisation.

A ce stade, tous les éléments de contrôle de polarisation utilisés ont été présentés. Une vue de leurs emplacements sur le parcours lumineux est schématisée en Figure 4.8. Le montage de contrôle de la polarisation est constitué de deux collimateurs (C), du cube séparateur en polarisation (PBS) et d’une lame demi-onde ($\lambda/2$) orientable pour le contrôle de polarisation à l’injection. En sortie de fibre microlentillée (IDIL), la puissance lumineuse est collectée par l’objectif de microscope 20x. Les composantes principales et résiduelles sont ensuite obtenues grâce au prisme Glan-Taylor (GL10-A) et un photodétecteur (PD).

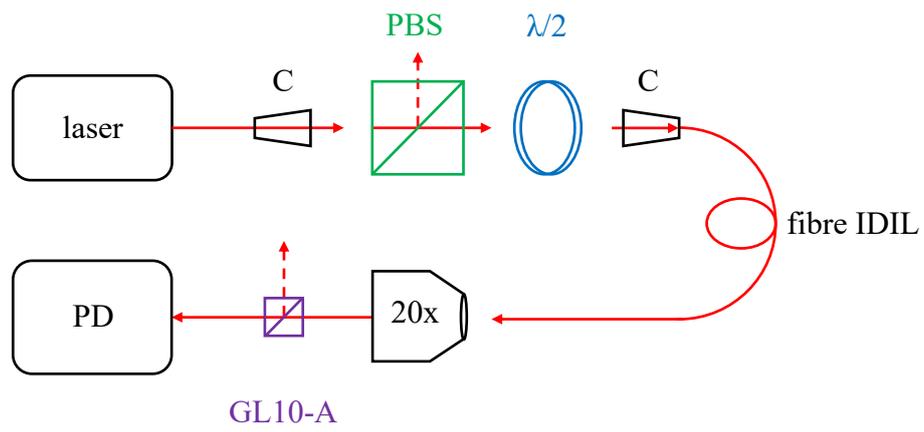


Figure 4.8 – Vue schématique du montage de caractérisation des dispositifs intégrés en configuration de calibration.

4.1.3.2 Détection de la puissance optique

La détection est réalisée à l'aide d'un photodétecteur d'OPHIR. Il s'agit d'une photodiode en Silicium (détection dans la gamme du visible et du proche infrarouge) disposant d'un filtre commutable pour augmenter la dynamique de détection de puissance et d'une ouverture de 10 mm². L'acquisition des données est réalisée par un module de numérisation et une interface logicielle commerciale rendant possible le suivi en temps réel, l'enregistrement et l'analyse statistique des collectes de puissance. Les caractéristiques techniques de la photodiode de mesure retenue sont présentées dans le Tableau 22.

Fabricant	OPHIR	
Modèle	PD300-TP	
Plage spectral (nm)	350 à 1100 (sans filtre)	400 à 1100 (avec filtre)
Plage de mesure (W)	50.10^{-12} à 3.10^{-3}	20.10^{-6} à 1
Résolution (nW)	1.10^{-3}	1

Tableau 22 – Synthèse des caractéristiques techniques de la photodiode de mesure retenue.

En configuration de calibration de la polarisation d'injection, un écran est placé en arrière de l'objectif de microscope afin d'observer le point lumineux correspondant au mode de la sortie de fibre microlentillée. L'objectif de microscope est ensuite déplacé jusqu'à imager ce point sur le plan de la cellule sensible du photodétecteur. Notons que la cellule photosensible est précédée d'un trou pour filtrer le bruit ambiant.

Afin d'obtenir des résultats comparables entre toutes les structures testées, une méthode d'optimisation de la puissance optique mesurée est réalisée. Celle-ci consiste à chercher un maximum de puissance à l'aide des paramètres de positionnement piézoélectrique de la fibre d'injection et ceux de l'objectif de microscope en sortie. Pour chaque mesure effectuée, la valeur maximale est moyennée sur un intervalle de 10 secondes, cette dernière ainsi que son écart-type sont ensuite reportées dans un tableur.

4.1.3.3 Méthodologie d'extraction de la transmission

Les différentes contraintes mécaniques de tension ou de torsion appliquée sur les fibres du banc optique ont un impact direct sur la polarisation du mode propagé dans celles-ci. Dans ce contexte, le collage des fibres sur la table du banc optique a permis de s'affranchir de cet effet en fixant ces contraintes pour, par exemple, la durée de caractérisation d'une puce complète.

Le non-maintien de polarisation dans la fibre d'injection implique une ellipticité de la polarisation en sortie de fibre microlentillée. Une calibration a donc été nécessaire afin d'extraire les contributions de transmissions des modes de propagations TE et TM.

L'ellipticité de la polarisation d'injection implique une composante principale ($P_{\perp\perp}$) et résiduelle ($P_{\perp\parallel}$) qu'il convient de caractériser pour l'extraction des transmissions des dispositifs mesurés. Le montage schématisé dans la Figure 4.9 illustre la configuration du banc pour la mesure de ces composantes de polarisation. L'objectif de microscope est utilisé pour imager la sortie de la fibre microlentillée d'injection sur le photodétecteur. Le prisme de Glan-Taylor est placé sur le chemin optique en sortie de l'objectif de microscope. Cette calibration est réalisée dans les deux cas d'injection possibles : P_{\perp} (TM) et P_{\parallel} (TE).

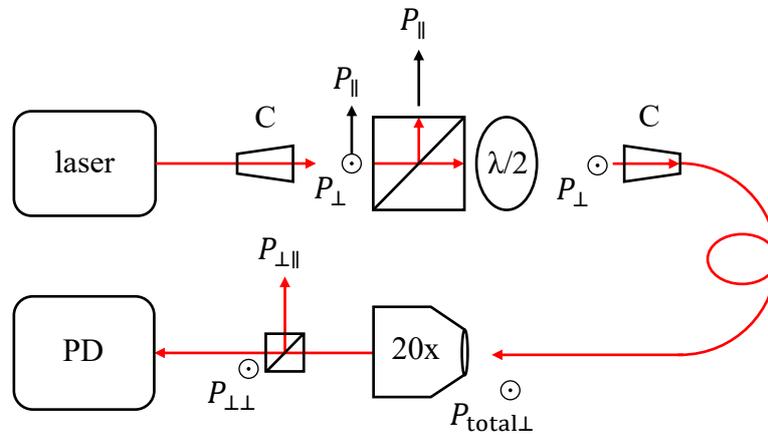


Figure 4.9 – Vue schématique du montage de caractérisation des dispositifs intégrés en configuration d'étalonnage de la polarisation d'injection. Dans cet exemple, la polarisation P_{\perp} (TM) est choisie en sortie de la lame demi-onde ($\lambda/2$). La lumière en sortie de cette fibre est imagée par un objectif de microscope de grossissement 20x puis le faisceau résultant est filtré par un cube séparateur de polarisation afin de mesurer les composantes de polarisation principale ($P_{\perp\perp}$) et résiduelle ($P_{\perp\parallel}$).

Les deux états de polarisation d'injection peuvent ainsi être décomposés mathématiquement par la somme des puissances de polarisation principale et résiduelle par les relations suivantes :

$$P_{\text{total } \parallel} = P_{\text{in } \parallel\parallel} + P_{\text{in } \parallel\perp} \quad (4.1)$$

$$P_{\text{total } \perp} = P_{\text{in } \perp\perp} + P_{\text{in } \perp\parallel} \quad (4.2)$$

Les valeurs de $P_{\text{total } \perp}$ et $P_{\text{total } \parallel}$ sont obtenues lorsque la lame demi-onde est orientée de façon à maximiser la polarisation \perp et \parallel , respectivement. Ces deux positions sont séparées d'un angle de 45° .

Le prisme de Glan-Taylor, placé sur le chemin optique avant le photodétecteur, permet de différencier les contributions principales et résiduelles. Les valeurs de ces contributions sont obtenues en orientant ce cube à 0° et 90° d'angle et pour les deux configurations de la lame demi-onde. Cette caractérisation doit être réalisée pour chaque modification significative du banc de mesures telle que le changement de source laser et/ou le déplacement de la fibre microlentillée.

La mesure de ces termes permet de déterminer le rapport d'extinction en polarisation (Polarisation Extinction Ratio ou PER en anglais) du banc de caractérisation pour les configurations d'injection TE (\parallel) et TM (\perp).

Ce terme correspond au rapport de la composante principale sur la composante résiduelle et peut être exprimé de façon linéaire ou logarithmique et peut s'écrire de la manière suivante :

$$PER_{\parallel} = \frac{P_{\parallel\parallel}}{P_{\parallel\perp}} = \frac{P_{\text{in } \parallel\parallel}}{P_{\text{in } \parallel\perp}} \quad (4.3)$$

$$PER_{\perp} = \frac{P_{\perp\perp}}{P_{\perp\parallel}} = \frac{P_{\text{in } \perp\perp}}{P_{\text{in } \perp\parallel}} \quad (4.4)$$

En utilisant les relations (4.1) à (4.4), les expressions de puissance totale des états de polarisation TE (\parallel) et TM (\perp) peuvent s'écrire comme suit :

$$P_{\text{total } \parallel} @ \theta_{\lambda} = 45^\circ \begin{cases} P_{\text{in } \parallel\parallel} = \frac{P_{\text{total } \parallel}}{1 + \frac{P_{\parallel\perp}}{P_{\parallel\parallel}}} = \frac{P_{\text{total } \parallel}}{1 + \frac{1}{PER_{\parallel}}} \\ P_{\text{in } \parallel\perp} = \frac{P_{\text{total } \parallel}}{1 + \frac{P_{\parallel\parallel}}{P_{\parallel\perp}}} = \frac{P_{\text{total } \parallel}}{1 + PER_{\parallel}} \end{cases} \quad (4.5)$$

$$P_{\text{total } \perp} @ \theta_{\lambda} = 0^\circ \begin{cases} P_{\text{in } \perp\perp} = \frac{P_{\text{total } \perp}}{1 + \frac{P_{\perp\parallel}}{P_{\perp\perp}}} = \frac{P_{\text{total } \perp}}{1 + \frac{1}{PER_{\perp}}} \\ P_{\text{in } \perp\parallel} = \frac{P_{\text{total } \perp}}{1 + \frac{P_{\perp\perp}}{P_{\perp\parallel}}} = \frac{P_{\text{total } \perp}}{1 + PER_{\perp}} \end{cases} \quad (4.6)$$

A ce stade, la caractérisation de la polarisation est achevée et le cube séparateur de polarisation précédant le photodétecteur peut être retiré du banc. Les transmissions pour les modes de propagation TE (\parallel) et TM (\perp) peuvent être exprimées dans le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} P_{\text{out } \perp} = T_{\perp} \times P_{\text{in } \perp \perp} + T_{\parallel} \times P_{\text{in } \perp \parallel} \\ P_{\text{out } \parallel} = T_{\perp} \times P_{\text{in } \parallel \perp} + T_{\parallel} \times P_{\text{in } \parallel \parallel} \end{cases} \quad (4.7)$$

La résolution de ce système permet d'exprimer les transmissions dans les deux états de polarisation pour les structures mesurées de la façon suivante :

$$\begin{cases} T_{\perp} = \left| \frac{P_{\text{out } \perp} \times P_{\text{in } \parallel \parallel} - P_{\text{out } \parallel} \times P_{\text{in } \perp \parallel}}{P_{\text{in } \perp \perp} \times P_{\text{in } \parallel \parallel} - P_{\text{in } \parallel \perp} \times P_{\text{in } \perp \parallel}} \right| \\ T_{\parallel} = \left| \frac{P_{\text{out } \parallel} \times P_{\text{in } \perp \perp} - P_{\text{out } \perp} \times P_{\text{in } \parallel \perp}}{P_{\text{in } \perp \perp} \times P_{\text{in } \parallel \parallel} - P_{\text{in } \perp \parallel} \times P_{\text{in } \parallel \perp}} \right| \end{cases} \quad (4.8)$$

Notons que l'extraction d'un des deux coefficients de transmission ne peut se faire que si les mesures dans les deux états de polarisation ont été effectuées. En effet, le raisonnement mathématique couplé aux mesures de puissance dans les différents états de polarisation permet de déterminer la correction à appliquer aux mesures de transmission. Ce montage d'injection permet ainsi de contrôler la polarisation d'injection sans utiliser de fibre à maintien de polarisation (PM). Une solution alternative de gestion de la polarisation a par ailleurs été envisagée en exploitant uniquement des fibres PM. Cependant, deux obstacles ont freiné sa mise en place et sont : (i) la complexité d'adaptation et d'alignement entre les fibres de sortie des lasers avec la fibre PM et (ii) la nécessité d'un accessoire de rotation suivant l'axe de propagation de la fibre au niveau de l'injection pour sélectionner un mode de polarisation avec les problématiques de précession associées.

4.1.3.4 Visualisation de l'injection

L'observation de la facette et de la fibre d'injection est assurée par une binoculaire d'observation verticale de grossissement maximum 14x. Ce dispositif est fixé sur le rail de la table de manipulation. Cela permet un alignement préliminaire de la fibre d'injection par rapport à la puce à mesurer. Cette méthode d'alignement est largement facilitée par le fait d'utiliser une longueur d'onde d'opération du domaine visible. En effet, le critère de validation de cette étape préliminaire est l'observation d'une ligne colorée suivant le guide d'onde

d'injection. Les Figure 4.10 – (a) et (b) montrent la vue de dessus du plan d'injection pour une longueur d'onde d'opération de 633 nm ainsi qu'une photographie de la binoculaire d'observation verticale au-dessus d'une puce en configuration de caractérisation.

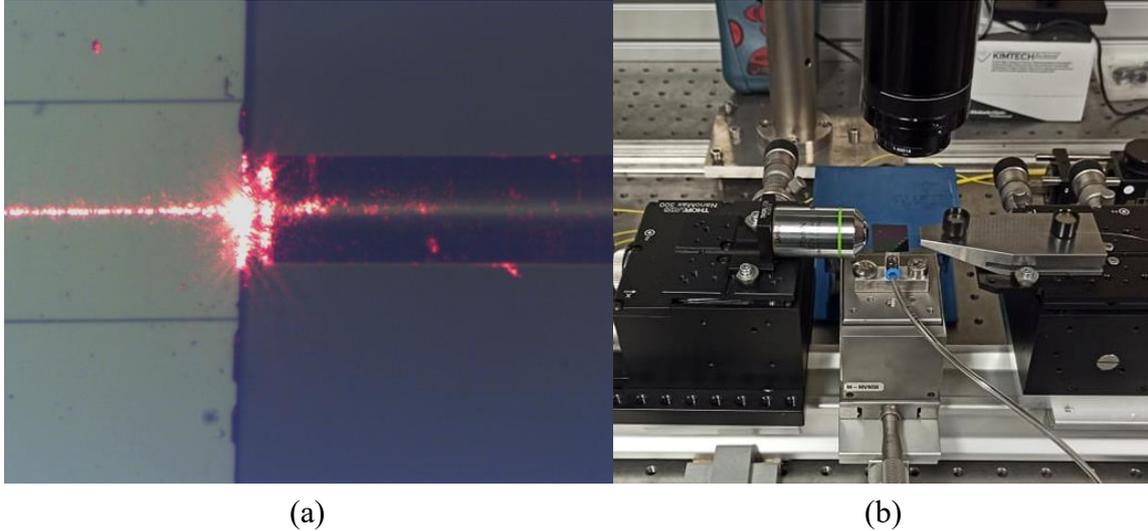


Figure 4.10 – (a) Vue de dessus du plan d'injection entre la fibre microlentillée et un guide d'onde à 633 nm et (b) photographie de la binoculaire d'observation verticale placée au-dessus de la puce à caractériser.

S'agissant des mesures effectuées sur les coupleurs MMI, cette étape préliminaire est réalisée de la même manière. La Figure 4.11 présente (a) un zoom et (b) une vue d'ensemble d'un coupleur MMI lors d'une injection à 532 nm. Notons que les guides sont visibles grâce aux pertes par propagation occasionnant une diffusion du mode guidé et que l'intensité diffusée est nettement décroissante suivant la direction de propagation témoignant de pertes mesurables. Pour cet exemple, le balancement de puissance semble qualitativement équilibré, puisque égal à 0,3 dB suivant les deux bras du MMI.

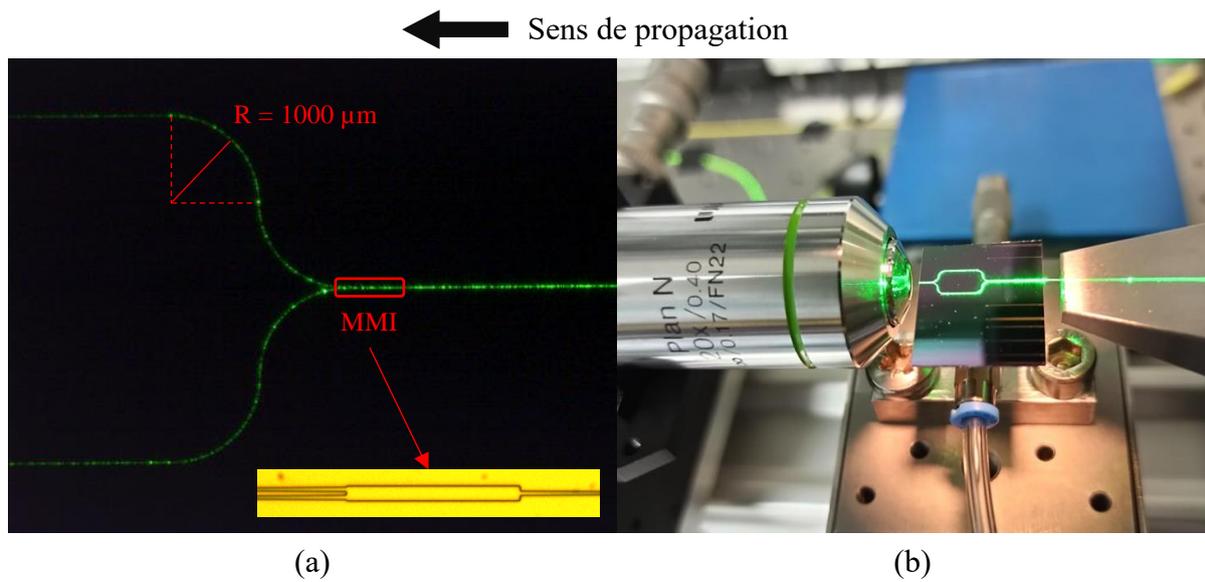


Figure 4.11 – (a) Vue de dessus à l'aide d'une binoculaire d'observation d'un coupleur MMI pour une longueur d'onde d'opération de 532 nm et (b) photographie d'ensemble du montage avec la fibre d'injection à droite, la puce à caractériser au milieu et l'objectif de microscope de collection à gauche.

4.2 Analyse des données de mesures des performances optiques

La section précédente a permis de définir le cadre dans lequel les mesures expérimentales des puissances optiques ont été réalisées. Cette section présente les différents types de mesure réalisées sur les puces fabriquées. Une description détaillée des motifs réalisés sur chaque puce est présentée en vue d'expliquer les différents points de mesure présentés sur les graphiques de tendance. Les différentes sources d'erreur de mesure sont prises en compte et reportées sous forme de barres d'erreur dans les tendances présentées.

4.2.1 Configurations des structures mesurées

Cette section vise à présenter les méthodes directes et différentielles, destructives ou non, permettant d'extraire les performances de nos structures que sont les pertes par propagation, les pertes par courbure et le déséquilibre de puissance des coupleurs MMI.

4.2.1.1 Mesures directes de puissance optique

Il existe plusieurs façons d'effectuer des mesures directes de puissance optique vis à vis d'un paramètre d'étude. La Figure 4.12 illustre la méthode, bien connue, de caractérisation des pertes par propagation dite par « cutback ». Dans ce cas de figure, la mesure de la puissance optique est réalisée pour des longueurs de plus en plus courtes en clivant successivement le guide d'onde rectiligne. Le coefficient directeur de la courbe de régression linéaire permet d'extraire l'atténuation due aux pertes par propagation.

Il est possible d'éviter cet aspect destructif en anticipant directement dans la conception de la puce sur le masque de photolithographie. La Figure 4.13 montre ce type de méthode de caractérisation, méthode également expérimentée lors de cette étude. En concevant plusieurs guides en « S » de différentes longueurs, il est possible de récupérer les valeurs de puissance optique pour différentes longueurs et ainsi obtenir la tendance de pertes par propagation suivant la technique d'extraction décrite précédemment.

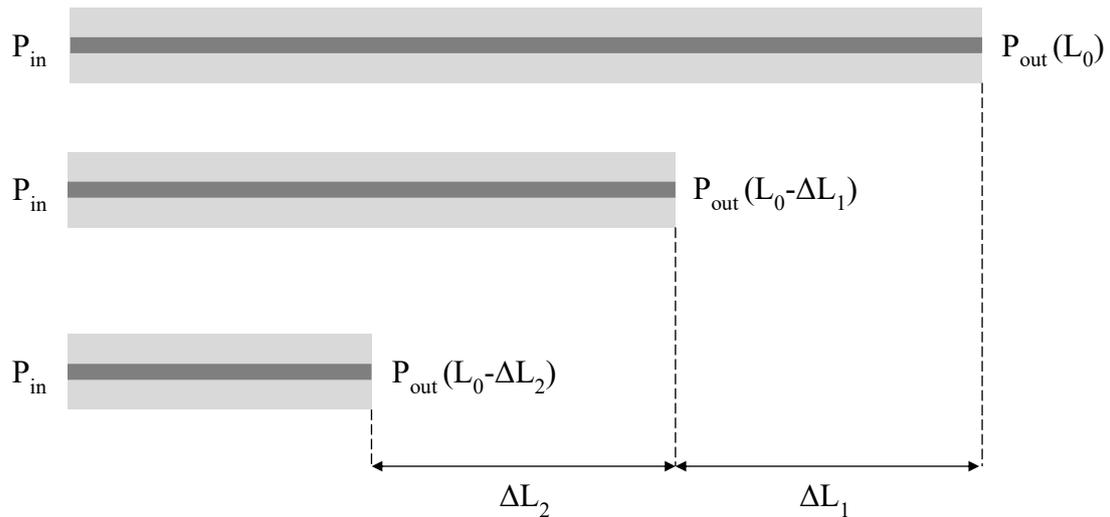


Figure 4.12 – Vue schématique de la méthode de caractérisation des pertes par propagation par la méthode dite de « cutback » pour des guides rectilignes.

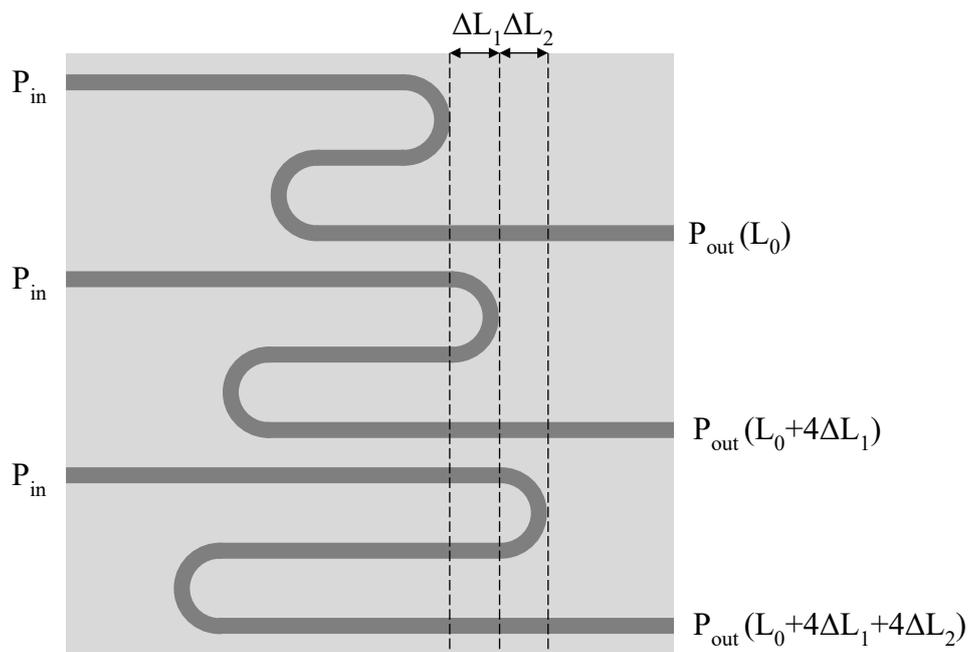


Figure 4.13 – Vue schématique de la méthode de caractérisation des pertes par propagation sur un lot de guides en « S » de différentes longueurs.

Il est également possible de donner une valeur des pertes en observant directement la décroissance exponentielle du champ diffusé le long du guide d'onde à l'aide d'une caméra ou d'une fibre placée perpendiculairement à la surface. Cette technique de mesure est particulièrement bien adaptée pour la caractérisation de structures à fortes pertes [83], [84].

Cependant, cette technique atteint ses limites lorsque les pertes par propagation deviennent trop faibles (moins de diffusion). La Figure 4.14 permet d'illustrer cette méthode de mesure de pertes. Cette technique n'a pas pu être mise en place par manque de temps mais le banc de caractérisation construit est tout à fait apte à une mise en œuvre.



Figure 4.14 – Vue schématique du principe de mesure des pertes par propagation dans un guide d'onde par observation de la décroissance exponentielle du champ.

Enfin, citons une autre méthode consistant à utiliser le comportement en cavité Fabry-Perot du guide entre les deux facettes. Il est ensuite possible d'en retirer le terme de pertes par propagation en utilisant la formule caractéristique d'un Fabry-Perot [85]. Cependant, cette méthode nécessite d'effectuer des mesures discrétisées en longueur d'onde et donc de disposer d'une source laser accordable. Cette méthode n'a donc pas été retenue dans cette étude.

Ces méthodes de mesure ne sont pas uniquement dédiées à une mesure de pertes par propagation. En effet, celles-ci peuvent être adaptées pour d'autres types de mesure tels que les pertes par courbure ou encore le débalancement de puissance dans un coupleur 50/50.

4.2.1.2 Mesures différentielles

Le principe de cette mesure est d'observer la différence de puissance optique entre les deux bras d'un coupleur 50/50 connu et la Figure 4.15 illustre cette méthode de mesure. Il est important de noter que la mise en place de ce type de mesure impose une caractérisation préalable du coupleur 50/50 utilisé dans le cas de deux bras de mêmes longueurs. De même que pour la méthode de mesure directe à l'aide de guide d'onde en « S », cette méthode est non destructive.

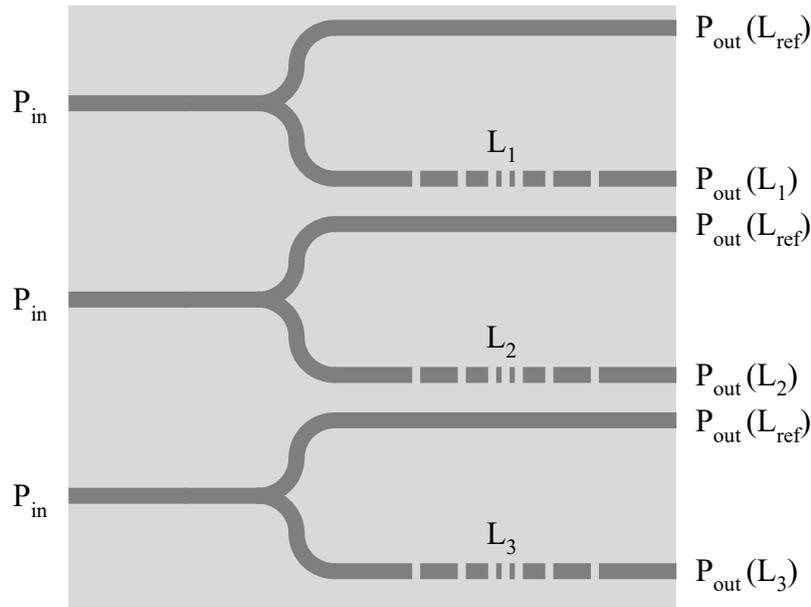


Figure 4.15 – Vue schématique de la méthode de caractérisation des pertes par propagation par la différence de chemin optique entre deux bras de coupleur 50/50. Les discontinuités en L_1 , L_2 et L_3 symbolisent des longueurs différentes du bras de référence.

C'est par cette méthode que les caractérisations optiques des coupleurs MMI ont été réalisées. De la même manière que la partie précédente, ce type de mesure différentielle est adaptable à l'objectif de mesure. Par exemple, elle peut être utilisée pour mesurer les pertes par propagation d'un guide d'onde en comparant les puissances optiques en sortie.

4.2.1.3 Description des conceptions retenues sur le masque de photolithographie

En vue d'étudier les performances et d'extraire les paramètres optimums des guides d'onde et des coupleurs MMI, des variantes technologiques ont été distribuées en 6 configurations de puces différentes. A ce titre, la Figure 4.16 le masque de répartition des différentes puces fabriquées sur une tranche 100 mm avec un code couleur permettant d'identifier les redondances. La redondance employée a permis de réaliser 12 puces de 2 cm^2 de surface et sont détaillées dans cette section.

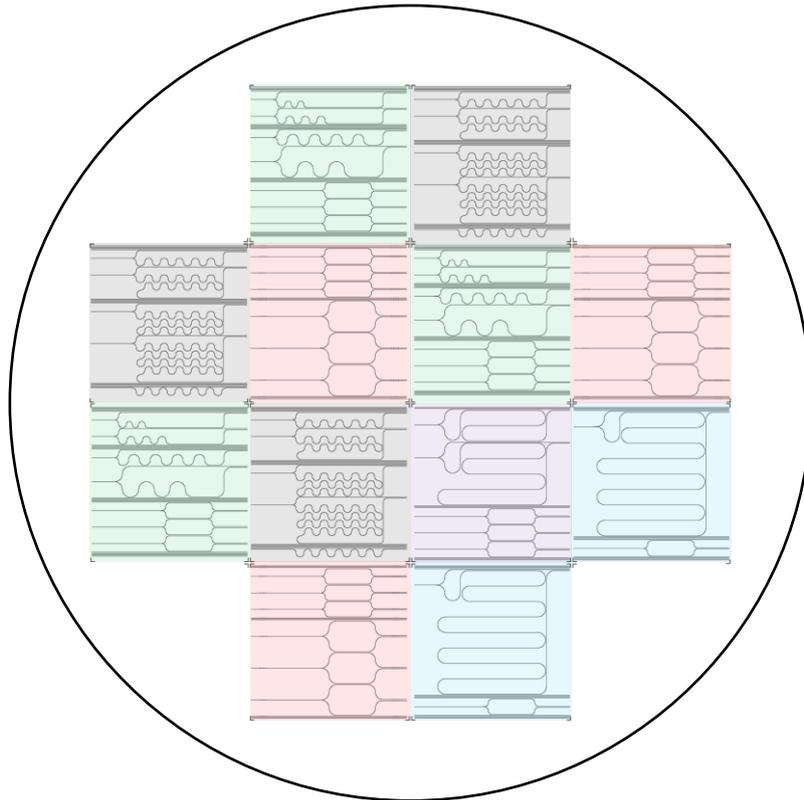


Figure 4.16 – Vue schématique du masque de répartition des 6 différentes configurations de puce fabriquées sur une tranche 100 mm. Les puces identiques sont encadrées par la même couleur.

La redondance appliquée dans la conception de ce masque permet d'augmenter les possibilités d'obtenir des structures fonctionnelles. L'objectif est d'essayer de compenser une éventuelle inhomogénéité d'épaisseur des couches de SiON PECVD en plaçant des puces identiques dans le centre de la tranche 100 mm. Les figures suivantes présentent les différentes configurations de motifs retenues sur chaque puce du masque.

4.2.1.3.1 Influence d'un rayon de courbure de 500 μm :

La Figure 4.17 présente une configuration de motifs ayant pour objectif de mesurer les pertes par courbure des guides d'onde par mesure différentielle ainsi que par mesure directe.

Dans le cas des mesures différentielles, le nombre de « tours » de courbure de rayon $R = 500 \mu\text{m}$ fait l'objet d'une variation allant de 5 tours (5R) pour les structures du haut jusqu'à 20 tours (20R) pour les structures du bas. Il est important de noter que des guides rectilignes sont répétés en haut, au milieu et en bas de chaque puce et sont utiles en tant que guides de références. En effet, la mesure systématique de leur puissance optique permet de contrôler la stabilité des structures fabriquées, une perte locale de puissance pouvant signifier une détérioration des facettes, des ruptures dans les guides, des inhomogénéités d'épaisseur ou de matière nous

alertant sur la qualité des guides. Pour exemple, la structure tout en bas de cette conception correspond à un guide 5R permettant de faire une mesure directe.

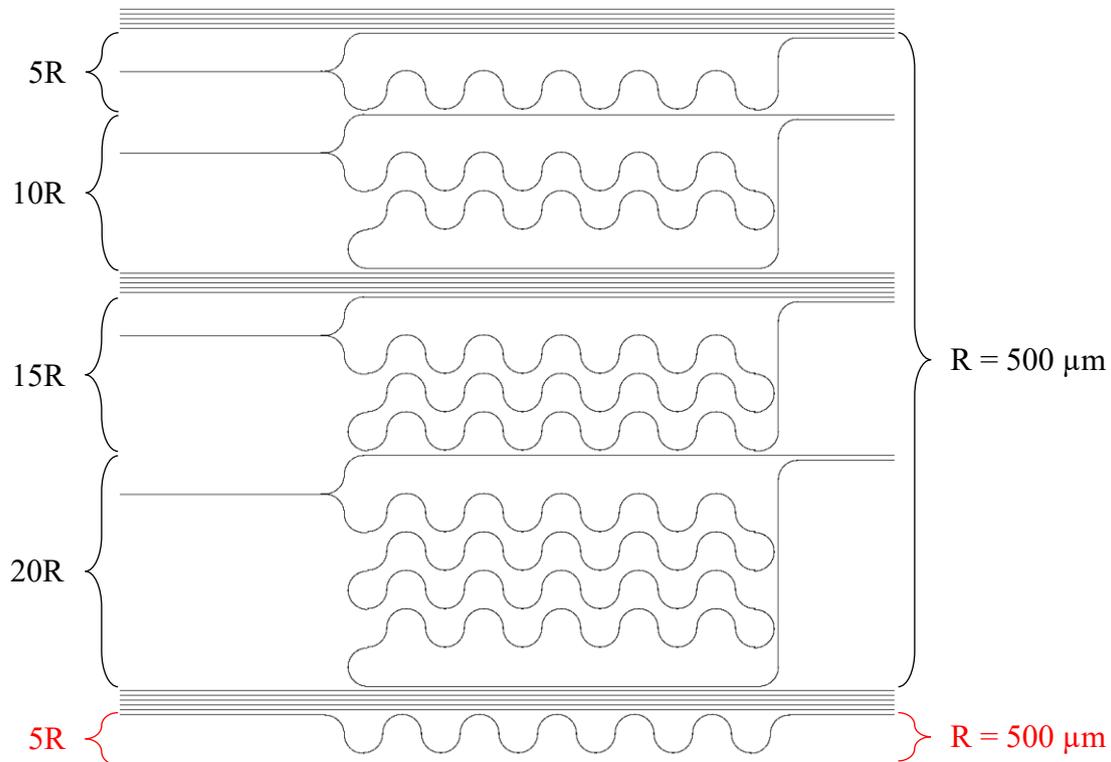


Figure 4.17 – Configuration de motifs à l’aide du logiciel Layout Editor faisant varier le nombre de courbures ($R = 500 \mu\text{m}$) dans le bras inférieur de chaque coupleur MMI dans le cas de mesures différentielles. Ce rayon de courbure est répété en rouge dans le cas des mesures directes.

4.2.1.3.2 Influence de rayons de 400 à 1000 μm et de L_{MMI} :

La configuration de motifs illustrée sur la Figure 4.18 a pour objectif de mesurer les pertes par courbure pour 4 rayons de courbure différents. Pour cela, les bras inférieurs de 4 coupleurs MMI ont été modifiés afin d’ajouter des rayons de courbures de 400 à 1000 μm . L’obtention de ces pertes s’obtient par mesure différentielle. Il est à noter que, dans cette configuration, les pertes par courbures seront extraites par calcul et via des mesures de pertes par propagation préalablement mesurées. Pour chaque rayon de courbure, le nombre de courbures retenues génère des pertes significatives, tout en permettant de disposer d’un signal suffisant en sortie de guide. De plus, trois coupleurs MMI dont la longueur de la partie multimodes (L_{MMI}) varie de 1 μm autour de la valeur optimisée par simulation, sont utilisés afin d’évaluer leur robustesse

en transmission totale vis-à-vis de ce paramètre. D'après les simulations réalisées dans la section 2.2.4, il est attendu que l'effet de la variation de L_{MMI} ne soit pas très significatif.

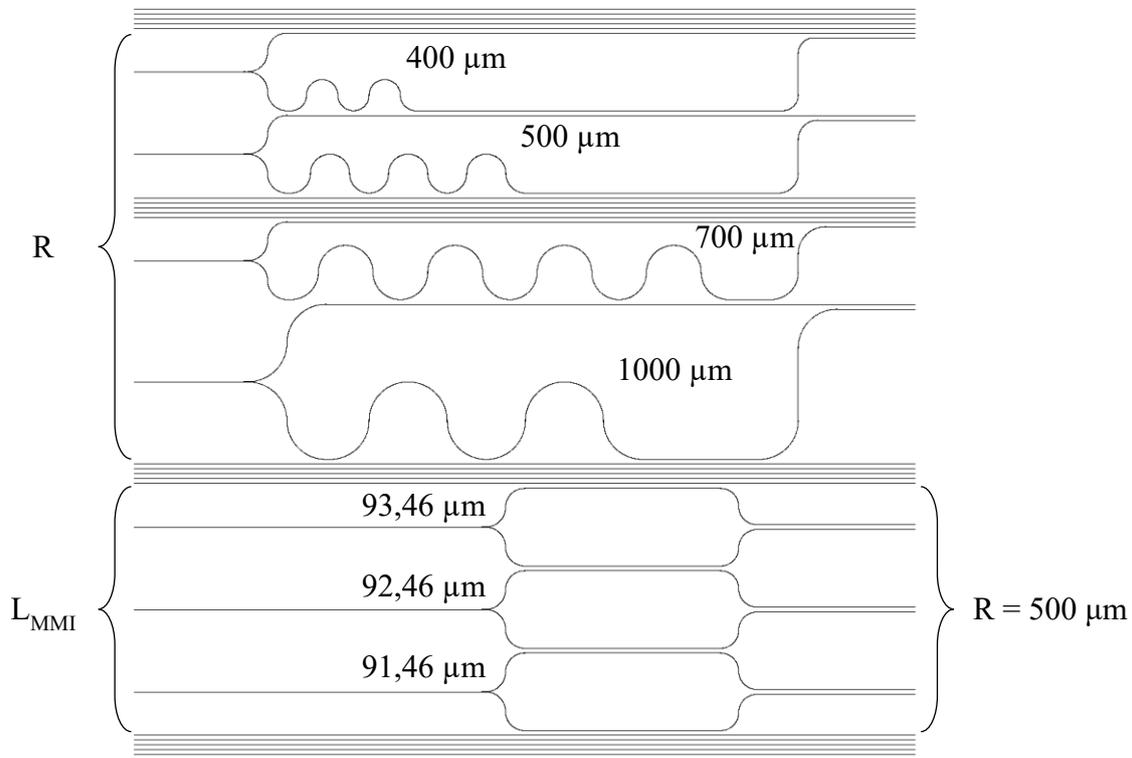


Figure 4.18 – Configuration de motifs à l'aide du logiciel Layout Editor faisant varier les rayons de courbure ($R = 400 ; 500 ; 700 ; 1000 \mu\text{m}$) dans le bras inférieur de chaque coupleur MMI dans le cas de mesures différentielles. La longueur de la partie multimodes des coupleurs MMI varie de $1 \mu\text{m}$ autour de la valeur optimisée par simulation (soit L_{MMI} égal à $91,46$, $92,46$ et $93,46 \mu\text{m}$).

4.2.1.3.3 Influence de L_{taper} :

Les motifs présentés sur la Figure 4.19 ont deux objectifs de mesure. Le premier est d'étudier les performances vis-à-vis de la longueur des guides en biseau inversé (L_{taper}), placés en entrée et en sortie des coupleurs MMI. L'intérêt de l'utilisation de tapers a déjà été présenté dans la section 2.2.4. Le second est d'étudier les performances de débalancement de la puissance optique entre les deux bras des coupleurs MMI. Les 6 structures comportant les coupleurs MMI 50/50 sont répétées en 2 configurations dont les rayons de courbure sont de $500 \mu\text{m}$ et $1000 \mu\text{m}$ offrant également la possibilité de multiplier les chances d'obtenir des structures fonctionnelles.

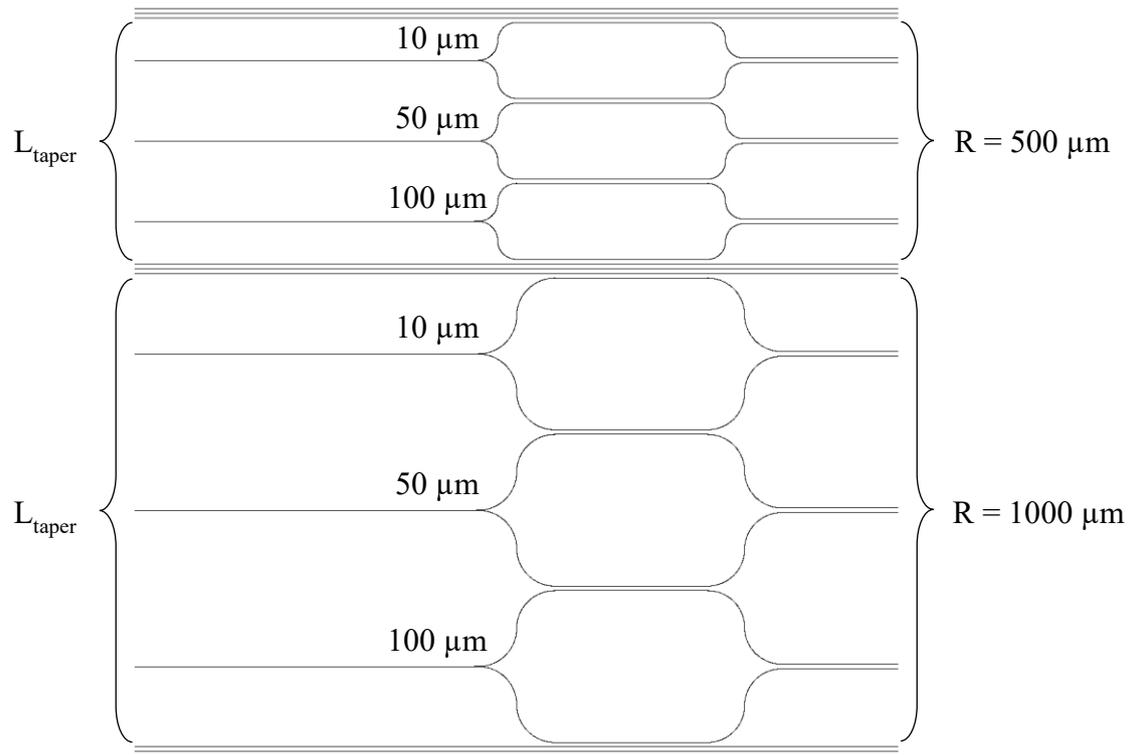


Figure 4.19 – Configuration de motifs à l’aide du logiciel Layout Editor faisant varier la longueur des tapers ($L_{\text{taper}} = 10 ; 50 ; 100 \mu\text{m}$) d’entrée et de sortie des coupleurs MMI pour deux rayons de courbure ($R = 500 \mu\text{m}$ et $R = 1000 \mu\text{m}$).

4.2.1.3.4 Influence de ΔL et d_{MMI} :

La configuration de motifs illustrée en Figure 4.20 permet aussi d’atteindre deux objectifs. Le premier est de mesurer les pertes par propagation des guides rectilignes à l’aide de mesures différentielles. Le second est d’étudier les performances optiques vis-à-vis de la variation de l’écart entre les sorties des coupleurs MMI.

Pour cela, les deux structures du haut comportent une variation de longueur sur le bras du dessous des coupleurs MMI. Le terme ΔL représente la différence de chemin optique parcouru entre les deux bras des coupleurs MMI. La différence de puissance optique mesurée entre les deux bras permet ainsi d’estimer les pertes par propagation pour des différences de longueurs de $\Delta L_1 = 29,94 \text{ mm}$ et $\Delta L_2 = 63,98 \text{ mm}$; valeurs extraites des mesures effectuées sur le masque de photolithographie.

Par ailleurs, l’écart entre les sorties des coupleurs MMI fait l’objet d’une variation de 500 nm autour de la valeur optimisée par simulation ($d_{\text{MMI}} = 4,32 \mu\text{m}$).

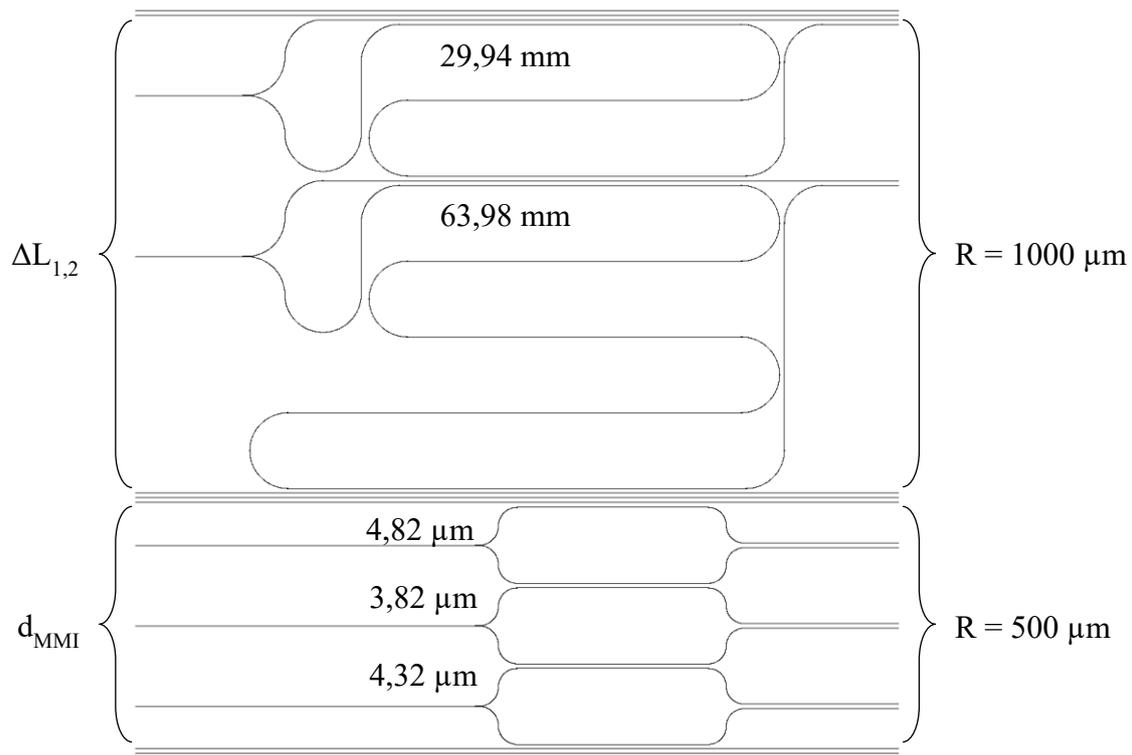


Figure 4.20 – Configuration des motifs à l’aide du logiciel Layout Editor faisant varier la longueur du bras inférieur des coupleurs MMI ($\Delta L_1 = 29,94 \text{ mm}$ et $\Delta L_2 = 63,98 \text{ mm}$). L’écart entre les deux sorties des coupleurs MMI varie de 500 nm autour de la valeur optimisée par simulation ($d_{\text{MMI}} = 3,82 ; 4,32 ; 4,82 \mu\text{m}$).

Enfin, les motifs réalisés et représentés sur la Figure 4.21 sont identiques à la précédente, excepté la grande différence de chemin optique ($\Delta L_3 = 118,04 \text{ mm}$) qui prend une place considérable sur une puce de 2 cm^2 . Il existe donc deux versions de cette même puce dont la seule différence réside dans l’écart entre les sorties du coupleur MMI sur la structure du bas. L’une dispose d’un écart de 3,82 μm et l’autre de 4,82 μm .

A nouveau, l’intérêt principal est de multiplier les chances d’obtenir des structures fonctionnelles, et tout particulièrement pour la structure comportant la plus grande différence de chemin optique (soit $\Delta L_3 = 118,04 \text{ mm}$) car la probabilité d’apparition de défauts de fabrication est d’autant plus grande que la longueur de la structure est importante.

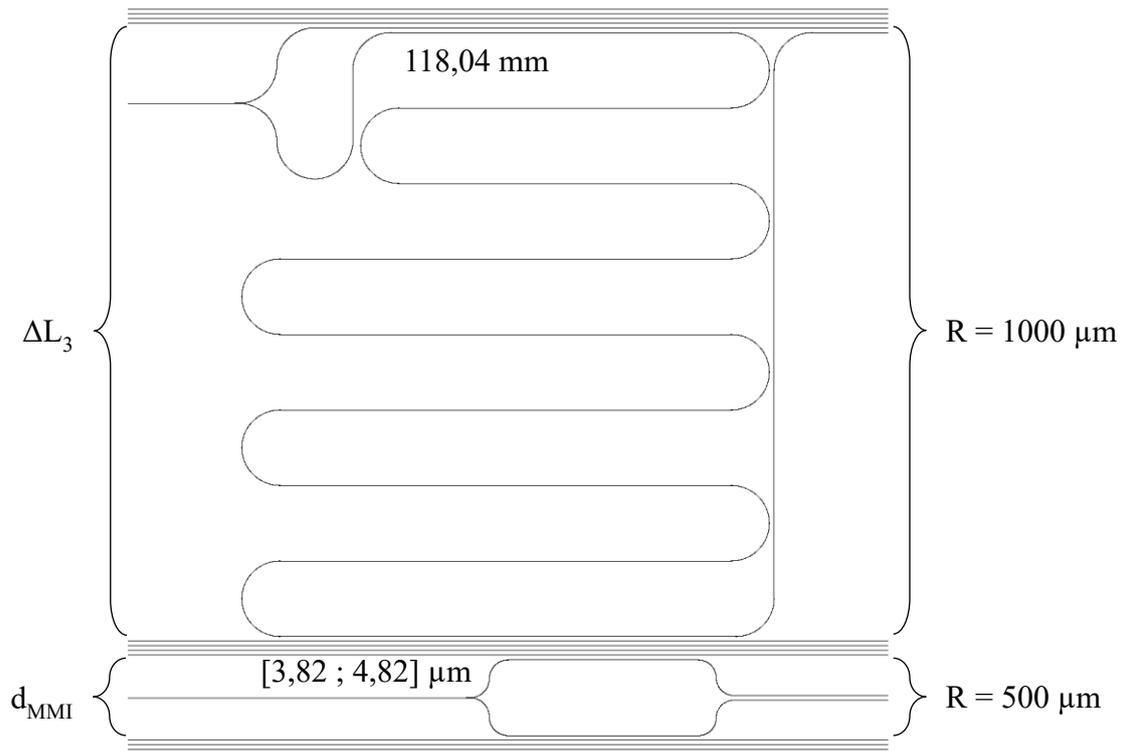


Figure 4.21 – Configuration des motifs à l’aide du logiciel Layout Editor faisant varier la longueur de bras inférieur d’un coupleur MMI ($\Delta L_3 = 118,04 \text{ mm}$). Les coupleurs MMI, présentant un écart entre les deux sorties à $+500\text{nm}$ et -500 nm autour de la valeur optimisée par simulation, sont fabriqués sur deux puces distinctes ($d_{\text{MMI}} = 3,82 ; 4,82 \mu\text{m}$).

4.2.1.3.5 Synthèse des objectifs de mesure :

L’ensemble des masques de conception présentés permet d’obtenir tous les paramètres nécessaires en vue d’une caractérisation complète des guides et des coupleurs MMI 50/50 fabriqués.

Il est important de noter que l’extraction de certains paramètres à partir des données mesurées doit respecter un ordre précis. Par exemple, les mesures différentielles de puissance optique pour différents rayons de courbure, réalisées sur les structures conçues comme illustré précédemment sur les Figure 4.18 et Figure 4.19, imposent une connaissance préalable des pertes par propagation des guides rectilignes. C’est à cette condition que les pertes ajoutées par la courbure peuvent être déduites de la différence de puissance optique entre les bras des coupleurs MMI.

Le Tableau 23 synthétise les objectifs, les paramètres et les grandeurs mesurées des structures adressées en fonction des prérequis de mesure nécessaires pour les réaliser.

Objectifs (guides)	Prérequis de mesure	Paramètre concerné	Grandeurs (μm)
Guides d'onde			
Pertes par propagation	Aucun	L_{cutback}	-
Pertes par propagation	Débalancement de puissance (MMI)	ΔL (mm)	29,94 63,98 118,04
Pertes par courbure	Débalancement de puissance (MMI)	R (μm)	400 500 700 1000
Coupleurs MMI			
Tolérance au dimensionnement	Aucun	L_{MMI} (μm)	91,46 (optimisé - 1) 92,46 (optimisé) 93,46 (optimisé + 1)
Débalancement de puissance	Aucun	d_{MMI} (μm)	3,82 (optimisé - 0,5) 4,32 (optimisé) 4,82 (optimisé + 0,5)
Débalancement de puissance	Aucun	L_{taper} (μm)	10 50 100

Tableau 23 – Synthèse des objectifs, des paramètres et des grandeurs des mesures des structures adressées en fonction des prérequis de mesure nécessaires pour les réaliser.

4.2.2 Sources de pertes additionnelles et erreurs potentielles de mesure

Les guides d'onde et les coupleurs MMI ne sont pas les seuls responsables des pertes dans le cadre de ce travail de caractérisation. En effet, le banc optique lui-même présente une contribution aux pertes mesurées qui doivent donc être évaluées et prises en compte pour l'analyse des données de mesure.

4.2.2.1 Phénomène de non-recouvrement modal

Rappelons que la fibre d'injection retenue dans ce travail de caractérisation est microlentillée. Ses caractéristiques ont été présentées dans la section 4.1.2. Ce type de fibre est utilisée pour minimiser les pertes dues au couplage entre la fibre et le guide d'onde, en adaptant les diamètres de mode de la fibre et du guide. Le diamètre d'un mode dans une fibre monomode autour de

633 nm est proche de dix micromètres. Par le biais de la microlentille en bout de fibre, le mode de la fibre monomode est fortement réduit en sortie de fibre et engendre moins de pertes lors du couplage de la lumière dans un guide d'onde ayant des dimensions plus petites (quelques micromètres voire de tailles submicroniques). L'efficacité de couplage entre deux systèmes guidants est donnée par l'intégrale de recouvrement de leurs profils d'intensité.

Considérant que les guides sont monomodes parfaitement alignés, et assumant un profil transverse d'intensité gaussien & circulaire, les pertes par non-recouvrement modal en configuration elliptique s'expriment de la manière suivante [86]:

$$\alpha_{\text{recouvrement}}(dB) = -10 \log \left(\frac{4w_1^2 w_{2x} w_{2y}}{(w_1^2 + w_{2x}^2)(w_1^2 + w_{2y}^2)} \right), \quad (4.9)$$

avec w_1 , w_{2x} , w_{2y} les « beam waists » des modes respectivement de la fibre, du guide horizontalement et verticalement.

Dans le cas d'une fibre microlentillée, ces « beam waists » correspondent au rayon du profil d'intensité formé à une distance de travail donnée. Dans le cas d'un guide, il s'agit du rayon du profil d'intensité du mode de propagation sélectionné.

En rapprochant w_1 , w_{2x} et w_{2y} , les pertes d'injection et d'extraction sont diminuées. La fibre microlentillée utilisée dispose d'un « beam waist » dont la valeur est de $w_1 = 1,15 \mu\text{m}$ à une distance de travail de 25 μm .

Une façon d'estimer ces pertes est donc de calculer le « beam waist » des modes de propagation TE_0 et TM_0 puis de les injecter dans l'expression sur la puissance en fonction des rayons des cols de faisceau précédente. Cependant, le mode de propagation dans le guide est asymétrique du fait des dimensions rectangulaires du cœur dont nous rappelons que l'épaisseur est de 200 nm et la largeur de 1000 nm avec un contraste d'indice $\Delta n = 0,12$.

Pour cela, des simulations ont été effectuées pour obtenir les valeurs des cols des modes de propagation correspondant aux largeurs horizontales et verticales du profil d'intensité évalué à une intensité égale à $1/e^2$.

Un récapitulatif des valeurs de « beam waist » des modes TE_0 et TM_0 ainsi que les valeurs de pertes de non-recouvrement modale calculées sont présentés dans le Tableau 24.

	w_1 (μm)	w_{2x} (μm)	w_{2y} (μm)	$\alpha_{\text{recouvrement}}$ (dB)
TE₀	1,15	0,578	0,380	3,203
TM₀	1,15	0,604	0,431	2,667

Tableau 24 – Synthèse des valeurs des cols latéraux théoriques des modes de propagation TE₀ et TM₀ dans un guide d'onde enterré dont les dimensions sont de 200 nm en épaisseur, 1000 nm en largeur et de contraste d'indice $\Delta n = 0,12$. Les valeurs des pertes sont issues de l'équation 4.9.

4.2.2.2 Estimation des pertes à l'interface air/guide (en entrée et sortie)

Aux pertes listées précédemment, il convient d'ajouter les pertes de réflexion aux facettes d'injection et de collecte de la lumière, liées à la différence d'indice entre l'air et le guide (en entrée et en sortie).

A ce titre, les formules de Fresnel permettent de décrire ce type d'interaction et de quantifier ces pertes. Pour cela, il est supposé que l'injection et la collecte de la lumière sont colinéaires à la normale facettes d'entrée et de sortie. Les angles d'incidence et transmis sont donc nuls et permettent de simplifier l'équation de la transmission de Fresnel [87]. Les relations simplifiées donnant respectivement le coefficient de transmission (t_F) en amplitude et le facteur de transmission (T_F) en intensité, sont les suivantes :

$$t_F = \frac{2n_{\text{air}}}{n_{\text{air}} + n_{\text{SiON}}} \quad (4.10)$$

$$T_F = |t_F|^2 \frac{n_{\text{SiON}}}{n_{\text{air}}} \quad (4.11)$$

Les indices de réfraction des couches de cœur et de gaine sont connus et permettent d'appliquer les relations précédentes dans le cas de ce travail. Il est à noter que les pertes de Fresnel sont générées aux passages des facettes d'entrée et de sortie des guides d'onde. Le Tableau 25 rapporte les résultats de l'application de ces équations :

n_{air}	n_{SiON}	$T_{\text{F}} \text{ entrée} = T_{\text{F}} \text{ sortie} = T_{\text{F}}$	$P_{\text{F}} \text{ totale} = -10 \log (T_{\text{F}} \text{ entrée} T_{\text{F}} \text{ sortie}) \text{ (dB)}$
1	1,5	0,96	0,355

Tableau 25 – Calcul du facteur de transmission à l’interface air/SiON et des pertes totales entrée/sortie d’un guide.

Ce raisonnement permet ainsi d’établir que la transmission est de 96% à l’interface air/SiON et d’en déduire les pertes totales (entrée et sortie) à environ 0,355 dB.

4.2.2.3 Estimation des pertes à la collection de la lumière

La lumière est collectée par un objectif de microscope de grossissement x20, et ajoute aussi un niveau de pertes qui résulte d’une double contribution : des pertes de Fresnel liées aux différentes interfaces de l’objectif associées à des pertes de couplage puisque les ouvertures numériques (ON) entre le guide et l’objectif sont différentes. Il est possible d’évaluer cette perte d’objectif expérimentalement suivant la méthodologie qui suit :

Dans un premier temps, et après une phase d’optimisation de l’injection, la puissance optique en sortie du guide est mesurée sans l’objectif de microscope en positionnant un détecteur au plus proche de la facette de sortie. La fibre microlentillée d’injection est ensuite décalée de quelques micromètres dans le plan du substrat afin de soustraire le fond continu à la mesure précédente. Enfin, l’objectif de microscope est inséré entre le guide et le détecteur pour répéter les deux étapes précédentes de mesure.

Les deux valeurs (avec et sans objectif) ainsi mesurées sont rapportées dans le Tableau 26. La transmission due au passage de la lumière à travers l’objectif de microscope est de 93,3%. Les pertes ajoutées lorsque ce composant est présent sont donc d’environ 0,30 dB. Les incertitudes proviennent des valeurs extraites du logiciel de la compagnie Ophir moyennées sur un temps d’acquisition d’au moins 15 secondes.

	$P_{\text{sans objectif}} \text{ (}\mu\text{W)}$	$P_{\text{avec objectif}} \text{ (}\mu\text{W)}$	$T_{\text{objectif}} \text{ (}\%)$	$T_{\text{objectif}} \text{ (dB)}$
Guide rectiligne	$35,7 \pm 145.10^{-3}$	$18,8 \pm 130.10^{-3}$	$93,3 \pm 2 \%$	$0,30 \pm 0,1$
Hors axe latéral	$15,75 \pm 100.10^{-3}$	$250.10^{-3} \pm 300.10^{-6}$		
Laser OFF	$95,4.10^{-3} \pm 250.10^{-6}$	$30,8.10^{-3} \pm 75.10^{-6}$		

Tableau 26 – Synthèse des valeurs de puissance optique mesurées avec et sans objectif de microscope (x20) et des facteurs de transmission.

De plus, le traitement antireflet des différents composants de contrôle de la polarisation entraîne une modification du coefficient de transmission aux 3 longueurs d'onde considérées. Les pertes de transmission ajoutées sont rapportées dans le Tableau 27.

Types de polariseur	PBS251		FBR-LPNIR	GLA-10-A		
PER (dB)	30		30	50		
λ (nm)	532	633	760	532	633	760
T (%)	96,9	95,5	81,6	94,1	94,2	88,2
T (dB)	0,2	0,1	0,9	0,3	0,3	0,5

Tableau 27 – Synthèse des facteurs de transmission des différents types de polariseur utilisés sur le banc de caractérisation.

4.2.2.4 Critère de retrait de points de mesure atypiques

La phase de caractérisation a mis en exergue des écarts de mesure de puissance optique lors de la caractérisation de structures où en conditions de mesures identiques et sont liés à plusieurs facteurs. Un exemple est présenté en Figure 4.22, montrant les variations de la transmission totale en fonction de la longueur d'un guide rectiligne via la méthode de « cutback ». Un point de mesure atypique est aisément visible et encadré en rouge. L'explication de cette irrégularité vient de la méthode de mesure des pertes par propagation. En effet, la première mesure est réalisée avec la facette d'injection gravée en exploitant le procédé Bosch décrit dans la section 3.3.3, alors que les points de mesure suivants ont été obtenus après clivage mécanique de l'échantillon successivement.

Il y a donc un décalage de transmission du fait de la différence de rugosité entre la facette gravée et la facette clivée. Par ailleurs, le coefficient de détermination R^2 est très proche de 1 pour la régression linéaire sans ce point et égal à 0,77 lorsqu'il est considéré. Il est donc possible de retirer ce point sans déficit de rigueur sur l'analyse des pertes par propagation.

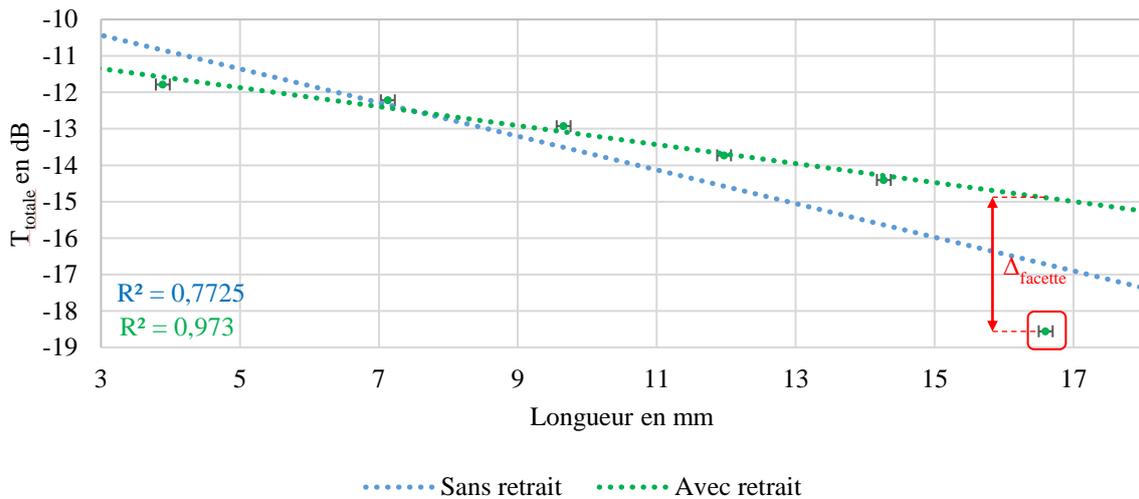


Figure 4.22 – Variations de la transmission totale mesurée sur un guide rectiligne à l’aide la méthode par « cutback ». Le point en encadré rouge (en bas à droite) représente le premier point de mesure effectuée à partir d’une facette gravée ($L \approx 16,6$ mm).

Il a également été observé d’autres écarts lors de cette phase de caractérisation et le graphique présenté en Figure 4.23 permet de le mettre en lumière. Dans cet exemple, la courbe de régression linéaire n’est pas non plus alignée avec deux points de mesure encadrés en rouge. L’explication de cet écart est liée à la faible répétabilité de la méthode de clive mécanique des échantillons à chaque itération de mesure à l’aide de la méthode par « cutback ».

En effet, la clive peut-être irrégulière le long de la facette de l’échantillon et générer des pertes supplémentaires à l’injection et ce, à chaque itération de mesure. De plus, ces points n’ont aucune réalité physique puisque la transmission totale mesurée doit forcément augmenter lorsque la longueur du guide diminue. Ces points ont donc été retirés pour extraire les pertes.

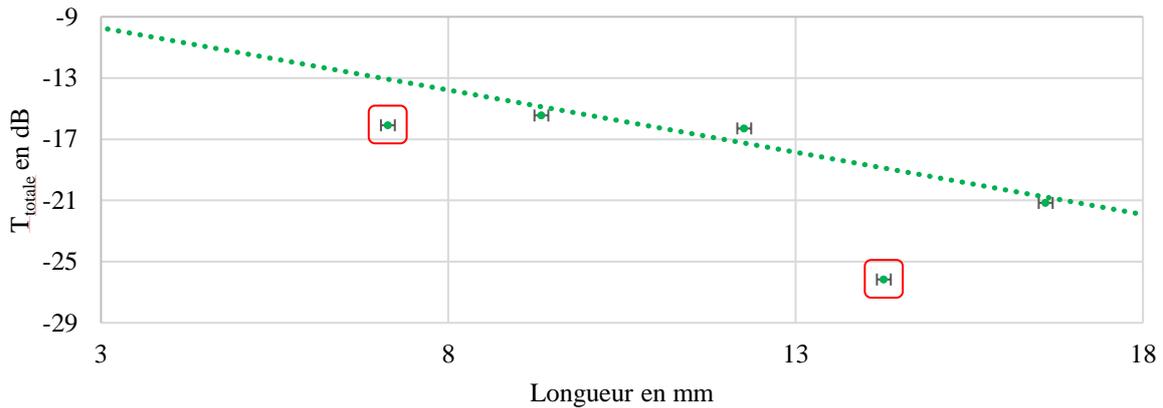


Figure 4.23 – Variations de la transmission totale mesurée successivement sur un guide rectiligne à l’aide la méthode « cutback ». Les deux points de mesure encadrés en rouge correspondent à des mesures atypiques.

Il est à noter que chaque point de mesure dispose d’une barre d’erreur relative à la longueur des guides et sur la valeur de coefficient de transmission issus des mesures de puissance optique. A ce titre, l’incertitude sur la longueur provient de la méthode de mesure de la longueur de l’échantillon effectuée à l’aide d’un pied à coulisse et celle-ci est estimée à 0,1 mm sur un même échantillon puisque la clive peut prendre un léger angle et rendre par conséquent l’échantillon légèrement trapézoïdal.

4.2.3 Présentation et analyse des données mesurées sur les guides

La partie précédente a permis d’établir le cadre dans lequel s’inscrit cette campagne de mesures sur les structures fabriquées. L’analyse des résultats, présentés dans ce paragraphe, permettra de donner des conclusions quantitatives ainsi que situer les performances obtenues par rapport à l’état de l’art sur des structures relativement similaires.

4.2.3.1 Pertes par propagation des guides rectilignes

Le premier paramètre étudié porte sur les pertes par propagation des guides rectilignes. L’étude de ce paramètre est importante puisqu’il permettra de mettre en œuvre la méthode de mesure différentielle pour l’extraction des pertes linéiques à trois longueurs différentes (ΔL_1 , ΔL_2 et ΔL_3) et des pertes par courbure aux différents rayons de courbure (400, 500, 700 et 1000 nm).

Une campagne de mesure a donc été réalisée sur 10 guides rectilignes aux longueurs d’onde de 532, 633 et 760 nm et pour les deux modes de propagation TE_0 et TM_0 . L’analyse sur de

nombreux guides rectilignes n'a pas été fructueuse. L'ensemble des cas pour lesquels les pertes par propagation ne sont pas rapportées, se justifie par deux raisons principales :

- Soit la transmission n'a pas pu être obtenue car le guide était trop détérioré,
- Soit le nombre de points de mesures « atypiques », défini en accord avec le critère de retrait précédemment décrit, était trop important. Les résultats de ces mesures sont présentés dans le Tableau 28.

λ (nm)	$N_{\text{guides caractérisés}}$	$N_{\text{guides interprétables}}$	Mode	$\alpha_{\text{propagation}}$ (dB.cm ⁻¹)
532	10	3	TE	5,95 ; 6,66 ; 10,89
		5	TM	5,19 ; 5,97 ; 3,68 ; 7,95 ; 7,77
633	10	3	TE	2,60 ; 3,19 ; 4,33
		0	TM	-
760	10	3	TE	16,99 ; 18,52 ; 18,81
		2	TM	6,53 ; 5,7

Tableau 28 – Synthèse des pertes par propagation extraites sur dix guides rectilignes.

Le meilleur guide obtenu présente un coefficient de pertes par propagation égal à 2,6 dB.cm⁻¹ à 633nm pour le mode TE₀ et de 3,68 dB.cm⁻¹ à 532 nm pour le mode TM₀. Pour l'ensemble des autres guides, les coefficients de pertes mesurés restent relativement élevés (≈ 3 à 18 dB.cm⁻¹).

Nous avons essayé de situer ces résultats par rapport à la bibliographie à l'aide de l'étude récapitulative de performances optiques de guides réalisés sur plateforme SiN_x et SiO_xN_y dans la section 1.2.3. Les pertes par propagation rapportées dans l'étude de Tzuchizawa et al [34] sont comprises entre 0,2 et 0,3 dB.cm⁻¹. Cependant, les guides d'onde proposés dans leurs travaux fonctionnent à 850 nm et sont multimodes à cette longueur d'onde. De plus, la largeur spectrale d'opération n'est pas précisée.

Dans une autre mesure, les travaux de Subramanian et al [37] ont rapporté la réalisation de guides enterrés sur plateforme SiN_x, présentant des pertes linéiques inférieures à 1 dB.cm⁻¹. Ici, le régime de propagation est également multimodes. Une configuration a tout de même été rapportée avec un régime de fonctionnement monomode mais avec des pertes linéiques supérieures (1,5 dB.cm⁻¹). Il est à noter que le dimensionnement transverse de cette configuration (hauteur, largeur) est plus complexe à réaliser du fait de la résolution latérale nécessaire, notamment, afin d'obtenir une largeur de cœur de 300 nm.

De plus à notre connaissance, il n'existe pas de travaux publiés présentant la réalisation de guides enterrés mettant en œuvre une plateforme « full-SiO_xN_y » utilisée dans notre étude.

4.2.3.2 Étude statistique des performances des guides rectilignes

Une étude complémentaire des performances des guides réalisés a été menée afin de caractériser quantitativement les procédés de fabrication optimisés. Pour cela, les valeurs de transmission totale extraites aux 3 longueurs d'onde sélectionnées de la population totale de guides rectilignes ont été prises sur toutes les structures fabriquées sur un tranche 100 mm.

Le Tableau 29 rapporte le nombre de guides rectilignes ($L = 1,66\text{cm}$), qui ont été caractérisés aux 3 longueurs d'onde utilisées.

λ (nm)	532	633	760
L_{guides} (cm)	1,66		
N_{total}	136	85	31
$N_{\text{caractérisés}}$	89	45	30

Tableau 29 – Nombre de guides rectilignes fabriqués et caractérisés aux trois longueurs d'onde et pour les deux modes de polarisation TE et TM.

Durant la campagne de mesures, un maximum de guides rectilignes a été testé à 532 nm et 633 nm. Du fait de la grande difficulté à obtenir des valeurs mesurables à 760 nm, seuls les guides ayant présenté les meilleurs résultats de puissance optique aux 2 autres longueurs d'onde ont été testés. Il est à noter que la population de guides caractérisés à 760 nm s'inscrit dans celles caractérisées à 532nm et 633 nm. De cette façon, les tendances peuvent être comparées.

L'histogramme présenté en Figure 4.24, comportant la plus grande population de guides, est celui obtenu à 532 nm. La médiane associée à la distribution du facteur de transmission totale (T_{totale}) de la population de guides caractérisés est de -28 dB avec un écart-type de 10,1 dB pour le mode de propagation TE_0 et de -25 dB avec un écart-type 6,4 dB pour TM_0 (voir Tableau 30).

La différence entre les médianes TE_0/TM_0 est de 3 dB et la concentration du nombre de guides vers les hautes valeurs de transmission totale est observable pour les modes TE_0 et TM_0 . La dispersion des valeurs paraît peu élevée mais reste significative. Celle-ci est liée à une incertitude trop élevée dans la qualité de l'injection d'un guide à l'autre.

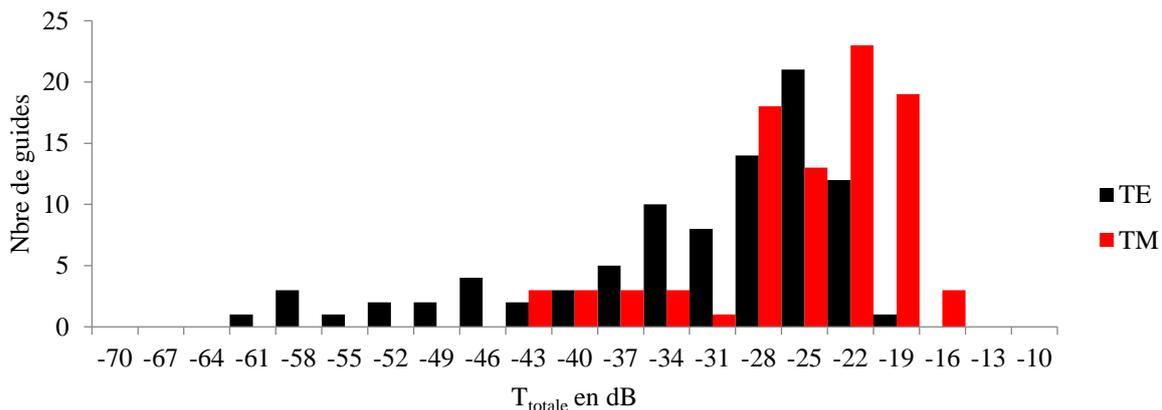


Figure 4.24 – Etude statistique des performances en transmission totale des guides rectilignes, caractérisées à 532 nm pour les modes de propagation TE₀ et TM₀.

La Figure 4.25 présente la distribution statistique de T_{totale} à 633 nm. Pour cette longueur d’onde, la médiane de T_{totale} est de -14 dB avec un écart type de 5,9 dB pour le mode TE₀ et de -39 dB avec un écart type de 6,2 dB pour TM₀. Il est à noter que la différence entre les médianes des 2 distributions associées aux modes TE₀ et TM₀ est beaucoup plus élevée qu’à 532 nm et que le mode de propagation TE₀ présente les pertes les plus faibles. Cependant, la population de guides caractérisés à 633nm est presque 2 fois plus faible que la caractérisation à 532 nm quel que soit le mode de propagation TE/TM. Cette constatation n’a pas pu être rigoureusement expliquée.

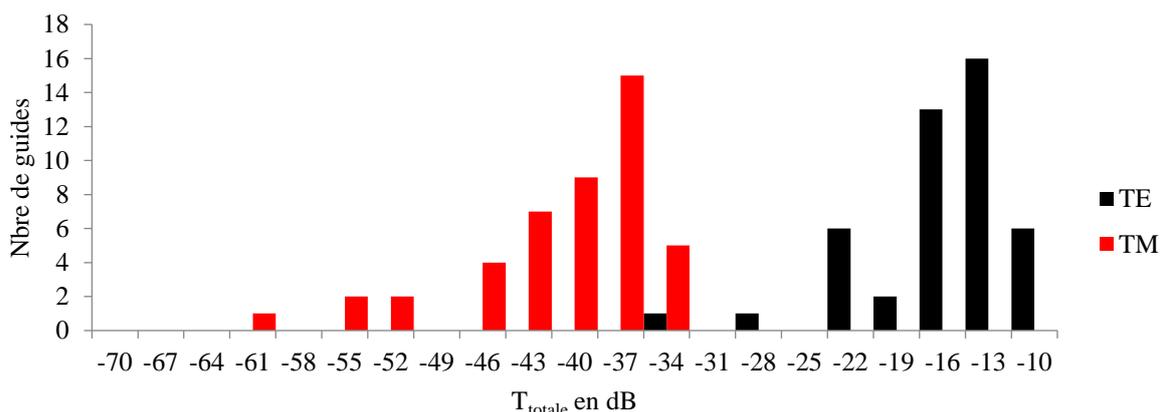


Figure 4.25 – Etude statistique des performances en transmission totale des guides rectilignes, caractérisées à 633 nm pour les modes de propagation TE₀ et TM₀.

La Figure 4.26 présente la distribution statistique de T_{totale} caractérisée à 760 nm. Pour cette longueur d'onde, la médiane de T_{totale} est de -34 dB avec un écart type de 3,6 dB pour le mode TE_0 et de -58 dB avec un écart type de 5,6 dB pour TM_0 . Dans ce cas, la différence entre les médianes des 2 distributions associées aux modes TE_0 et TM_0 est quasiment égale à celle observée à 633 nm et toujours beaucoup plus élevée qu'à 532 nm et ce quel que soit le mode considéré. Le mode de propagation TE_0 reste le mode présentant les pertes les plus faibles. La population de guides caractérisés est proche de celle à 633 nm (voir Tableau 30).

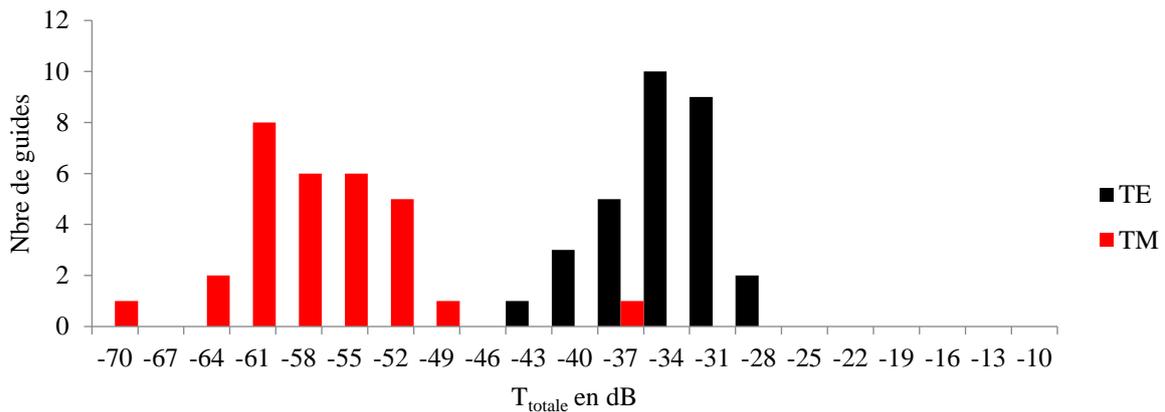


Figure 4.26 – Etude statistique des performances en transmission totale des guides rectilignes, caractérisés à 760 nm pour les modes de propagation TE_0 et TM_0 .

λ (nm)	532		633		760	
Mode	TE	TM	TE	TM	TE	TM
$T_{\text{totale}} \text{ médiane (dB)}$	-28	-25	-14	-39	-34	-58
$T_{\text{totale}} \text{ moyenne (dB)}$	-33,6	-26,6	-16,9	-42,3	-35,5	-58,5
$\Delta T_{\text{totale}} \text{ médiane (dB)}$	3		25		24	
σ (dB)	10,1	6,4	5,9	6,2	3,6	5,6

Tableau 30 – Synthèse des transmissions totale médiane et moyenne ainsi que les écarts-type obtenues à partir des populations de guides rectilignes caractérisés à 532, 633 et 760 nm sans corrections dues aux différentes sources de pertes présentées.

4.2.3.3 Estimation des pertes par courbures des guides rectilignes

Pour la mesure des pertes par courbure des guides, une mesure différentielle a été privilégiée. La Figure 4.27 illustre, sous forme d'un graphique comparatif, les pertes par courbure simulées

en fonction du rayon de courbure pour un guide enterré d'épaisseur 200 nm et de largeur 1000 nm à 633 nm et pour le mode TE_0 .

Les trois croix positionnées représentent les valeurs des pertes par courbure obtenues sur trois structures identiques et dont la configuration de motifs a été détaillée dans la section 4.2.1.3.1. La zone colorée représente la partie dans laquelle doivent être comprises les valeurs simulées pour un contraste d'indice de réfraction cœur/gaine (CIR) de 0,12. Ce graphique montre un décalage conséquent entre les simulations effectuées et les valeurs mesurées expérimentalement. Cet écart peut se justifier par l'effet de plusieurs sources d'incertitude notamment liées au procédé de fabrication, à savoir : l'inhomogénéité de la couche de SiO_xN_y déposée par PECVD et le contraste d'indice associé ainsi que la rugosité des flancs du guide fabriqués. Les sections suivantes s'attachent à décrire l'origine de ces défauts

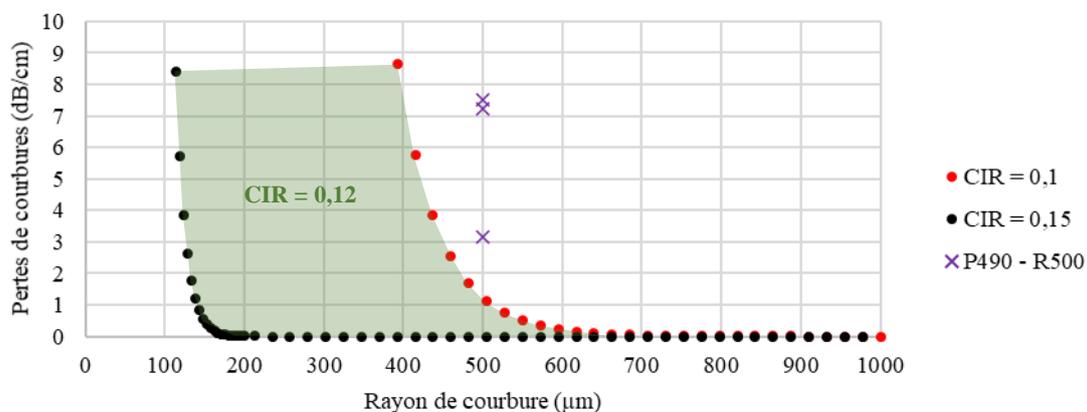


Figure 4.27 – Graphique des pertes par courbure en fonction du rayon de courbure du mode de propagation TE_0 dans un guide d'ondes enterré d'épaisseur 200 nm et de largeur 1000 nm à une longueur d'onde de 633 nm pour deux contrastes d'indice de réfraction de RIC = [0,1 ; 0,15]. La zone en vert clair représente la partie dans laquelle les pertes par courbures attendues pour un contraste d'indice de réfraction de RIC = 0,12 doivent être comprises. Les croix en mauve représentent les valeurs de pertes par courbures obtenus par des mesures différentielles pour un rayon de courbure de 500 µm.

4.2.3.3.1 Inhomogénéité de dépôts PECVD

Nous rappelons que l'épaisseur et l'indice de réfraction des couches de SiO_xN_y déposées par PECVD ont fait l'objet d'une caractérisation ellipsométrique à un seul angle et sur des positions proches du centre de la tranche. Afin de valider cette caractérisation, des observations au MEB ont été effectuées sur des positions différentes des tranches.

Ces observations ont permis de mettre en évidence des défauts de fabrication sous la forme :

- de lacunes dans la couche supérieure de SiO_xN_y ,

et,

- d'écart d'épaisseur de la couche de cœur par rapport aux valeurs mesurées par ellipsométrie (voir Tableau 31) dû à l'inhomogénéité/in-uniformité que peut produire la technique de dépôt par PECVD, d'autant plus importante que l'observation est réalisée aux extrémités de la tranche 100 mm (compris entre 28 et 80 nm).

La Figure 4.28 présente un guide d'onde enterré provenant d'une partie centrale de la tranche 100 mm. Le cœur du guide est délimité par un encadré en pointillée blanc et montre une différence de niveau de gris liée à l'observation MEB car il ne peut pas y avoir 2 couches diélectriques différentes avec un tel contraste. Les couches de SiO_xN_y de cœur et de gaine disposent d'un indice de réfraction très proche (CIR de 0,1). Un tel contraste d'image observé dans cet encadré est donc dû à l'outil d'observation et non à une différence de matériau. Dans cette observation, l'écart d'épaisseur extrait à partir des deux analyses (ellipsométrie et MEB) est plus faible et d'environ 2 nm (voir Tableau 31).

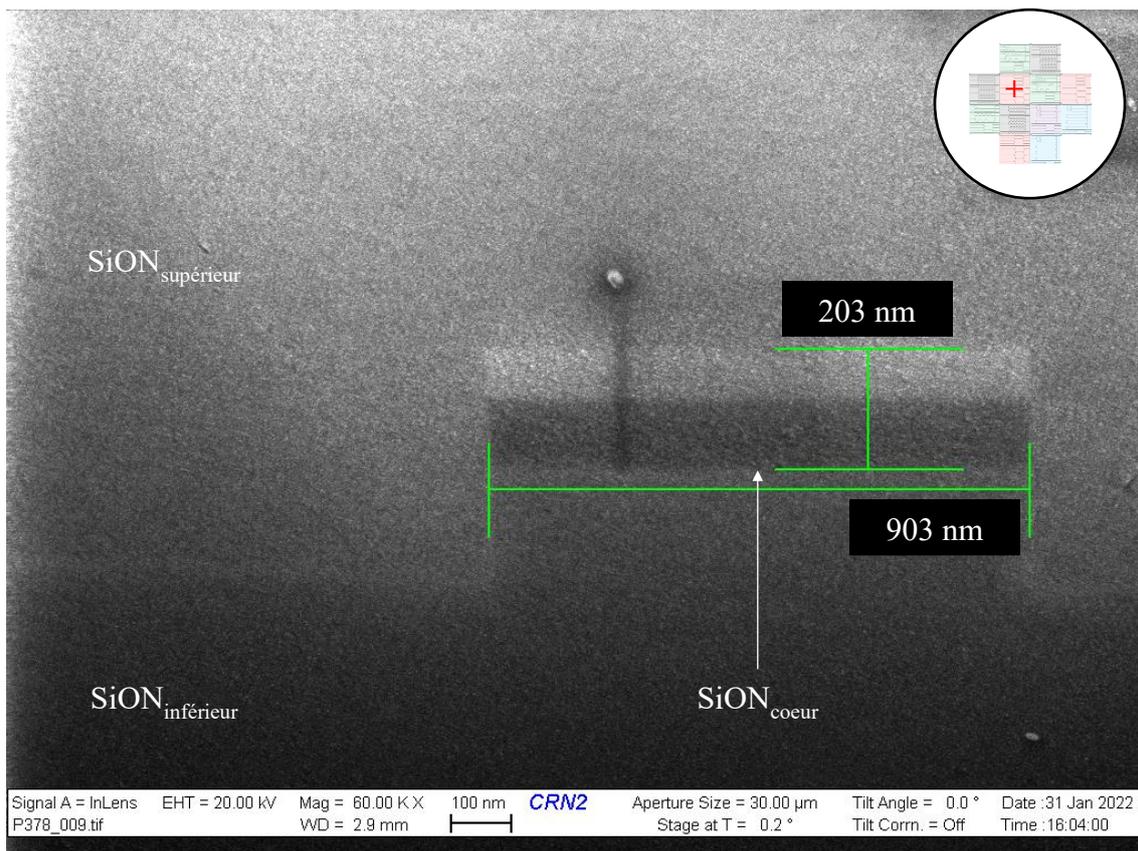


Figure 4.28 - Vue MEB de la coupe transverse de 3 guides enterrés en SiO_xN_y PECVD. Une vue de la position approximative du cliché au niveau de la tranche est indiquée en haut à droite. Les valeurs de l'épaisseur du cœur de deux guides sont rapportées.

L'écart entre les valeurs d'épaisseur mesurées par ellipsométrie et les valeurs mesurées au MEB est rapporté dans le Tableau 31.

	P378 – partie excentrée	P490 – partie centrale
Épaisseur ellipsométrique (nm)	199	205
Épaisseur MEB (nm)	119 à 171	203
Écart d'épaisseur (nm)	28 à 80	2

Tableau 31 – Synthèse des écarts d'épaisseur de la couche de SiO_xN_y déposée par PECVD extraits des mesures par ellipsométrie et MEB.

4.2.3.3.2 Rugosité des facettes gravées

Les très faibles valeurs de coefficient de transmission obtenues dans les mesures ont mis en évidence des problèmes liés à l'état des facettes d'injection et de collecte. Des analyses par MEB ont donc été réalisées afin de déterminer si la rugosité obtenue était en accord avec le procédé de fabrication développé dans le chapitre précédent. La Figure 4.29 montre une vue au MEB de l'état d'une facette d'injection gravée de la tranche P490 d'un guide enterré en SiO_xN_y .

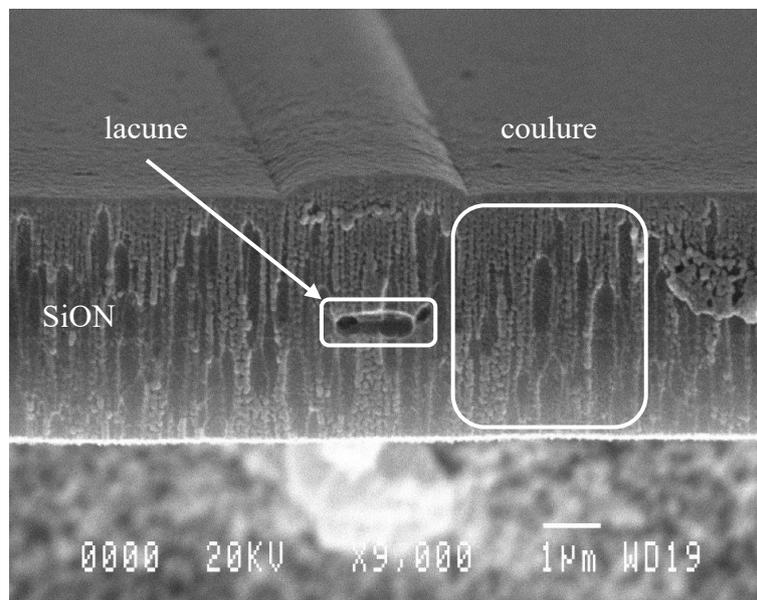


Figure 4.29 – Vue au MEB de l'état d'une facette d'injection gravée de la tranche P490. L'aspect de « coulure » après gravure est observé sur toute les facettes d'injection/collecte.

Cette photographie permet de mettre en évidence une lacune importante au niveau du cœur ainsi qu'une rugosité conséquente sur toute la facette. Cette observation est à comparer avec les clichés et la discussion de la section 3.3.3 dans laquelle le protocole de fabrication de facette par gravure AOE puis par procédé Bosch est détaillé. La cause la plus probable de cet aspect de coulure est le temps d'interaction très élevé du procédé de gravure Bosch avec la résine de protection ainsi que les couches de SiO_xN_y . En effet, ce procédé nécessite 410 cycles de passivation/gravure, soit plus de 2 heures d'interaction avec le matériau et la résine, et les flancs de la résine de protection s'érodent au fur et à mesure de la gravure complète du substrat de silicium ($500\mu\text{m}$).

A ce titre, nous proposons deux principales solutions correctives à cette problématique :

- le substrat de silicium utilisé peut être aminci pour largement diminuer le temps d'interaction entre le plasma de passivation/gravure du procédé Bosch et diminuer ainsi la rugosité de la facette produite,

et,

- l'utilisation d'un dépôt métallique en remplacement de la résine de protection permettrait d'augmenter la sélectivité du procédé de gravure Bosch et de réduire ce phénomène d'érosion se produisant à tous les cycles de passivation/gravure. Cette méthode a déjà été explorée et mise en place dans l'étude de Yap et al [76] pour la réalisation de facettes de guides fabriqués sur plateforme SOI. Les guides développés présentent des pertes moyennes mesurées avec des facettes gravées (-22 ± 4 dB) relativement comparables aux facettes découpées et polies (-22 ± 5 dB).

Il est à noter qu'un effet de report du motif de cœur du guide en surface est présent. Cet effet n'exerce aucune influence sur les propriétés de propagation puisque la proportion de champ évanescent provenant du cœur du guide est quasiment nulle à la surface de la couche de gaine supérieure. Cet effet est très pratique pour repérer toutes les structures à l'œil nu, néanmoins, il est trompeur dans le cas où une vérification du dimensionnement latéral à l'aide de la microscopie optique est mise en œuvre. En effet, les dimensions mesurées entrent en désaccord avec les valeurs mesurées avant le dépôt de cette couche de gaine. L'explication la plus probable est que le dôme formé à la surface de la couche de SiO_xN_y se comporte comme une lentille grossissante.

La combinaison de l'inhomogénéité d'épaisseur de la couche de SiO_xN_y PECVD et des lacunes/rugosités conséquentes aux interfaces d'injection apparaît donc comme la principale justification du décalage des coefficients de transmission mesurés par rapport aux résultats de simulation.

4.2.4 Performances optiques des coupleurs MMI

Cette partie est consacrée à la caractérisation des coupleurs MMI vis-à-vis des paramètres de variations discutés dans la partie détaillant les conceptions des structures fabriquées. L'objectif de cette étude est de caractériser les performances de ces coupleurs, compte tenu des anomalies du procédé de fabrication.

4.2.4.1 Etude des tolérances à l'écart de dimensionnement

Dans un premier temps, l'étude des performances des coupleurs MMI s'est focalisée sur l'impact de l'écart entre les sorties de la partie multimodes (d_{MMI}). Pour rappel, les écarts appliqués lors de la fabrication sont de + 500 nm et - 500 nm par rapport à l'écart optimal simulé $d_{\text{MMI}} = 4,32 \mu\text{m}$.

Les Figure 4.30, Figure 4.31 et Figure 4.32 présentent les transmissions optiques mesurées aux trois longueurs d'onde de caractérisation. Ces transmissions ont été obtenues pour chaque bras des coupleurs en considérant les modes TE_0 et TM_0 et pour des longueurs de bras identiques. Ce type de configuration est dite « balancée », contrairement au cas où l'un des bras d'un coupleur est plus long que l'autre, et appelée « débalancée ».

Les trois graphiques présentés ci-après présentent un maximum de transmission pour $d_{\text{MMI}} = 4,32 \mu\text{m}$. Il s'agit bien de la valeur déterminée par l'optimisation de ce paramètre dans la phase de simulation. Par ailleurs, les configurations de motifs portant sur les variations de conception de la longueur de la partie multimodes (L_{MMI}) ainsi que de la longueur des guides en biseau inversé d'entrée et de sortie (L_{taper}) en configuration « balancée », a aussi fait l'objet d'une étude similaire. Néanmoins, aucune tendance n'a été observée sur ces variations.

Les écarts de transmission optique (ΔT_{TE} et ΔT_{TM}) présentés sur les Figure 4.30 et Figure 4.31 sont de l'ordre de la dizaine de dB et restent dans cette gamme d'écart dans la plupart des mesures effectuées aux 3 longueurs d'onde de caractérisation. Une étude statistique sera conduite sur ces écarts dans la section 4.2.4.2 et une explication qualitative des principales causes de cet écart a déjà été détaillée en section 4.2.3.3.

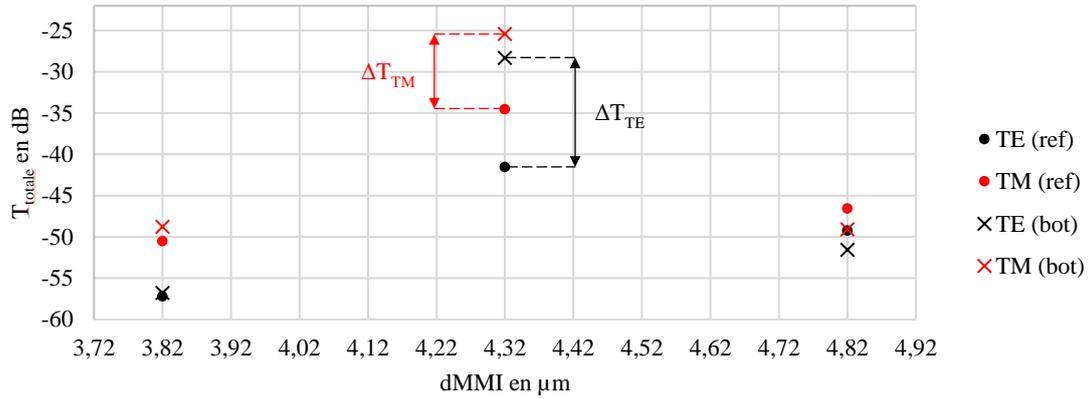


Figure 4.30 – Valeurs de transmission totale vis-à-vis du paramètre d'écart entre les sorties de trois coupleurs MMI à 532 nm. Le mode de propagation TE_0 est coloré en noir et le mode TM_0 en rouge. Les croix représentent les mesures effectuées sur les bras du dessous (bot) et les points sur les bras du dessus (ref).

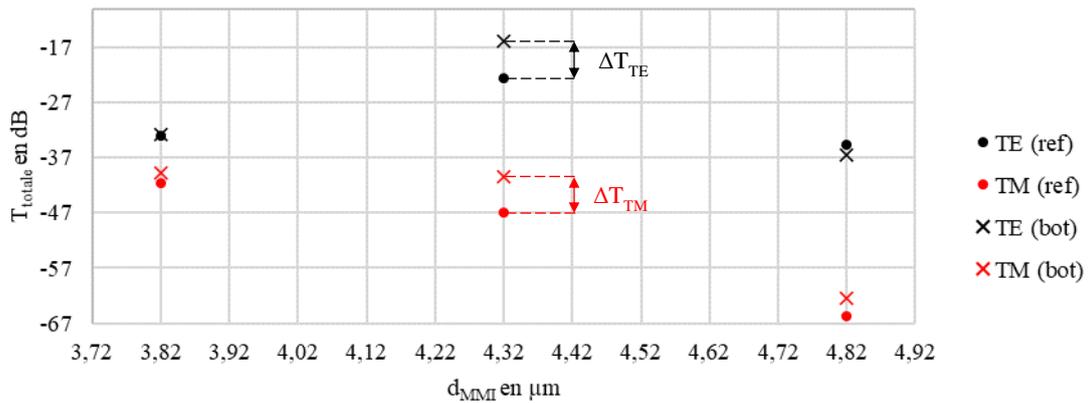


Figure 4.31 - Valeurs de transmission totale vis-à-vis du paramètre d'écart entre les sorties de trois coupleurs MMI à 633 nm. Le mode de propagation TE_0 est coloré en noir et le mode TM_0 en rouge. Les croix représentent les mesures effectuées sur les bras du dessous (bot) et les points sur les bras du dessus (ref).

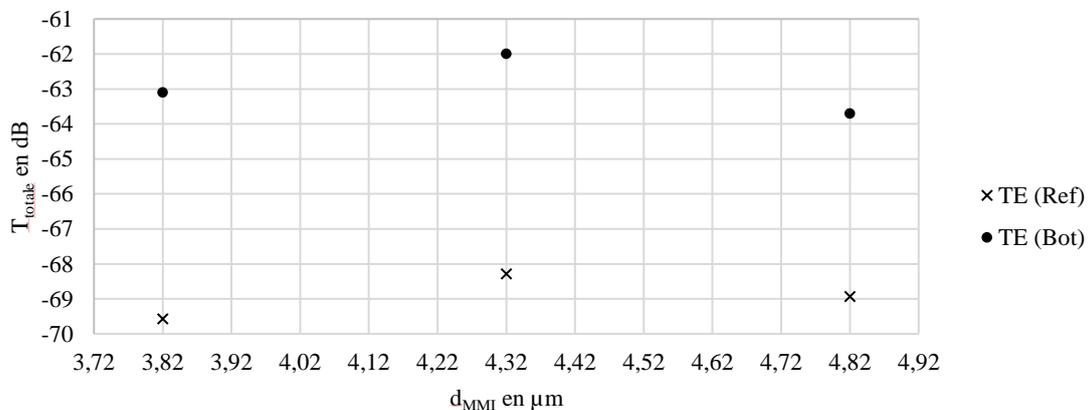


Figure 4.32 - Valeurs de transmission totale vis-à-vis du paramètre d'écart entre les sorties de trois coupleurs MMI à 760 nm. Les croix représentent les mesures effectuées sur les bras du dessous (bot) et les points sur les bras du dessus (ref).

Notons que le graphique à 532 nm présenté en Figure 4.30 confirme la tendance statistique observée sur les guides rectilignes. En effet, les deux modes de propagation TE et TM présentent des coefficients de transmission proches. A la longueur d'onde de 633 nm (voir Figure 4.31), c'est le mode TE qui est le plus favorable. Enfin, seulement le mode de propagation TE a pu être détecté à 760 nm (voir Figure 4.32).

Les écarts de transmission totale médiane entre les modes TE et TM observés et discutés pour les guides rectilignes dans la section 4.2.3.2 sont en phase avec ceux déterminés pour les coupleurs MMI. Il en est de même pour les transmissions optiques plus élevées pour le mode TE que pour le mode TM.

Afin de compléter la caractérisation des coupleurs MMI 50/50, une étude succincte de la distribution du paramètre de débalancement de transmission est pertinente et présentée dans la section suivante.

4.2.4.2 Débalancement de puissance des coupleurs MMI

L'objectif des coupleurs MMI mis en œuvre dans cette étude est la division d'une puissance optique d'entrée en deux sorties identiques. Le débalancement de puissance correspond à la différence de transmission optique obtenue dans chacun des bras de sortie du coupleur MMI. Les transmissions obtenues sur la totalité des coupleurs MMI fabriqués ont donc été mesurées. Compte tenu des écarts de fabrication rendant très complexe la vérification de cette propriété, une étude statistique a été menée à 532 nm puis à 633 nm. Le nombre de coupleurs caractérisés aux 3 longueurs d'onde est rapporté dans le Tableau 32.

λ (nm)	532	633	760
N_{total}	30	18	3
$N_{\text{caractérisés}}$	14	11	0

Tableau 32 - Nombre de coupleurs MMI 50/50 fabriqués et caractérisés aux trois longueurs d'onde et pour les deux modes de polarisation TE et TM.

Les Figure 4.33 et Figure 4.34 présentent ces résultats sous la forme d’histogramme. Il est important de noter qu’il existe des coupleurs MMI 50/50 fonctionnels à 760 nm dans les deux états de polarisation TE et TM mais leur population n’est pas suffisante pour en faire une étude statistique. L’histogramme de performances pour cette longueur d’onde n’a donc pas été tracé.

A ce stade, les conclusions qu’il est possible de donner restent donc relativement qualitatives. Premièrement, nous avons obtenu un grand nombre de coupleurs présentant des valeurs de déséquilibre de puissance médian supérieures à 3 dB (voir Tableau 33) pour les modes TE et TM et la justification de ce résultat ne peut être donnée de manière certaine. En effet, la source de déséquilibre peut avoir plusieurs origines, telles que la différence de rugosité des facettes ou encore la différence de dimensionnement (géométrie et indice de réfraction) des guides enterrés opérant comme partie multimodes et bras des coupleurs. Une optimisation plus avancée du procédé de fabrication reste donc une perspective à prévoir en vue d’une amélioration des performances des coupleurs MMI.

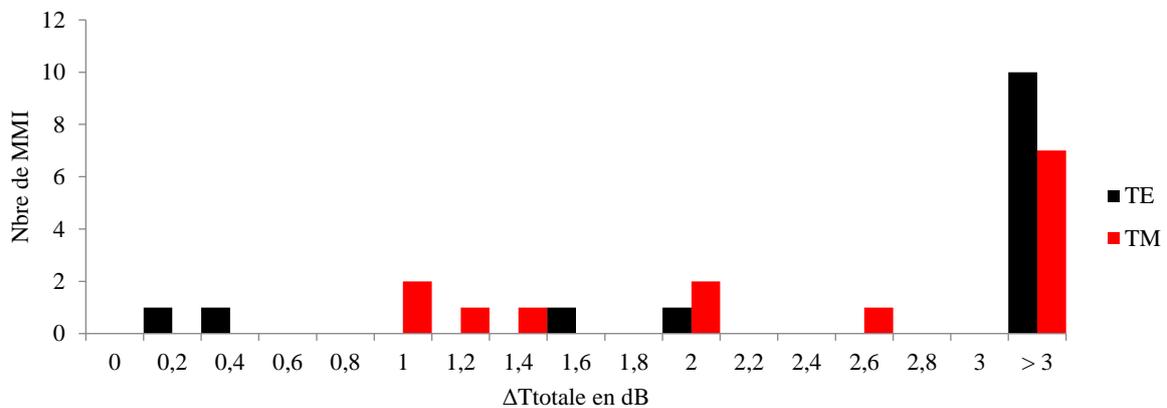


Figure 4.33 – Histogramme issu de l’étude statistique des performances de déséquilibre en transmission totale des coupleurs MMI 50/50 à 532 nm et pour les modes de propagation TE_0 et TM_0 .

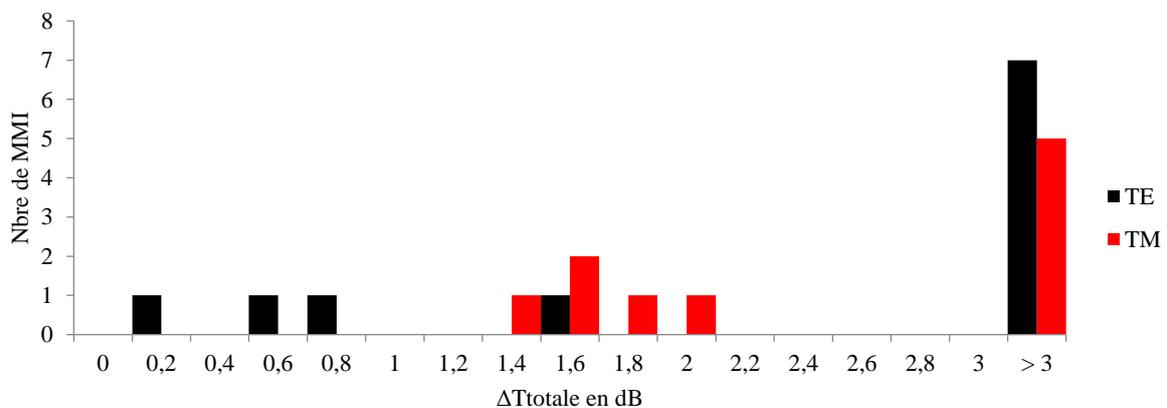


Figure 4.34 – Histogramme issu de l'étude statistique des performances de débalancement en transmission totale des coupleurs MMI 50/50 à 633 nm pour les modes de propagation TE₀ et TM₀.

λ (nm)	532		633	
Mode	TE	TM	TE	TM
$\Delta T_{\text{médiane}}$ (dB)	> 3	> 3	>3	3
$\Delta T_{\text{moyenne}}$ (dB)	6,2	4,8	5,1	4,6
σ (dB)	5,1	4,5	4,2	4,5

Tableau 33 - Synthèse des grandeurs obtenues à partir des populations de coupleurs MMI 50/50 caractérisés à 532 et 633 nm.

Néanmoins, deux aspects encourageants sont à noter. En effet, certains coupleurs MMI 50/50 remplissent leur fonction principale de division de transmission et ce quel que soit le mode propagé. De plus, leur bande spectrale d'opération couvre une plage de près de 230 nm. Les coupleurs réalisés, présentant les meilleures performances, disposent d'un débalancement de transmission $\Delta_{TE} = 0,03$ dB et $\Delta_{TM} = 0,82$ dB à 532 nm et $\Delta_{TE} = 0,16$ dB et $\Delta_{TM} = 1,33$ dB à 633 nm.

Au regard de l'état de l'art, les résultats sont à comparer à l'étude de Tsuchizawa et al [34] qui montrent clairement notre capacité à produire des coupleurs MMI 50/50 sur une plateforme « full-SiO_xN_y » et qui, à notre connaissance, constitue une première sur le plan technologique pour le domaine du visible.

4.3 Conclusion

Ce chapitre de caractérisation des structures fabriquées a permis de compléter le travail de modélisation et de fabrication par des résultats de caractérisation quantitatifs. La mise en œuvre de ce travail a nécessité la mise en place et l'optimisation d'un banc de caractérisation dédié dans le visible.

Un soin particulier a été apporté dans sa caractérisation en termes de stabilité de la mesure, de répétabilité & reproductibilité ainsi que du contrôle de la polarisation d'injection et des pertes associées aux différents éléments optomécaniques en vue d'obtenir des données les plus rigoureuses possibles.

Un grand nombre de guides d'onde et coupleurs MMI a pu être conçu et fabriqué et fonctionnent aux longueurs d'ondes du visible retenues. Même si une partie d'entre elles sont défailantes, les meilleures structures présentes d'excellentes performances :

- un coefficient de pertes par propagation égal à $2,6 \text{ dB.cm}^{-1}$ à 633 nm pour le mode TE_0 et de $3,68 \text{ dB.cm}^{-1}$ à 532 nm pour le mode TM_0 pour les guides d'ondes rectilignes,

et,

- un débalancement de transmission $\Delta_{\text{TE}} = 0,03 \text{ dB}$ et $\Delta_{\text{TM}} = 0,82 \text{ dB}$ à 532 nm et $\Delta_{\text{TE}} = 0,16 \text{ dB}$ et $\Delta_{\text{TM}} = 1,33 \text{ dB}$ à 633 nm pour les coupleurs MMI 50/50

Une étude statistique a aussi pu être menée en mettant en évidence une différence d'écart entre les médianes de performances des guides d'ondes rectilignes (3 dB à 532 nm et $\approx 25 \text{ dB}$ à $633/760 \text{ nm}$). Cet écart a aussi pu être recoupé de façon plus qualitative dans l'étude statistique de débalancement de transmission et de variation du paramètre d_{MMI} des coupleurs MMI 50/50.

Des points d'amélioration dans le procédé de fabrication ainsi que dans le choix de conception des structures à caractériser et tout particulièrement, les incertitudes sur les dimensions du cœur des guides enterrés n'ont pas permis de rigoureusement comparer les résultats expérimentaux aux simulations. Cette incertitude pourrait être réduite en améliorant la caractérisation des couches de SiON fabriquées par PECVD, notamment, par un nombre de mesures ellipsométriques plus important et à partir de plusieurs angles de source sonde.

Une autre source d'amélioration permettant de réduire l'incertitude sur les performances de débalancement de transmission des coupleurs MMI serait d'améliorer le procédé de gravure des facettes d'injection et de collecte de lumière des puces. A ce titre, la Figure 4.35 – (a) présente le cas d'un défaut critique sous la forme d'une cassure à l'extrémité de la puce, observée après clivage mécanique lors des mesures de pertes par propagation des guides rectilignes. Des points plus ou moins brillants peuvent aussi être observés et sont la représentation de pertes locales plus importantes. La Figure 4.35 – (b) présente la facette d'injection réalisée par gravure complète du SiON et du substrat en silicium d'épaisseur $500 \mu\text{m}$.

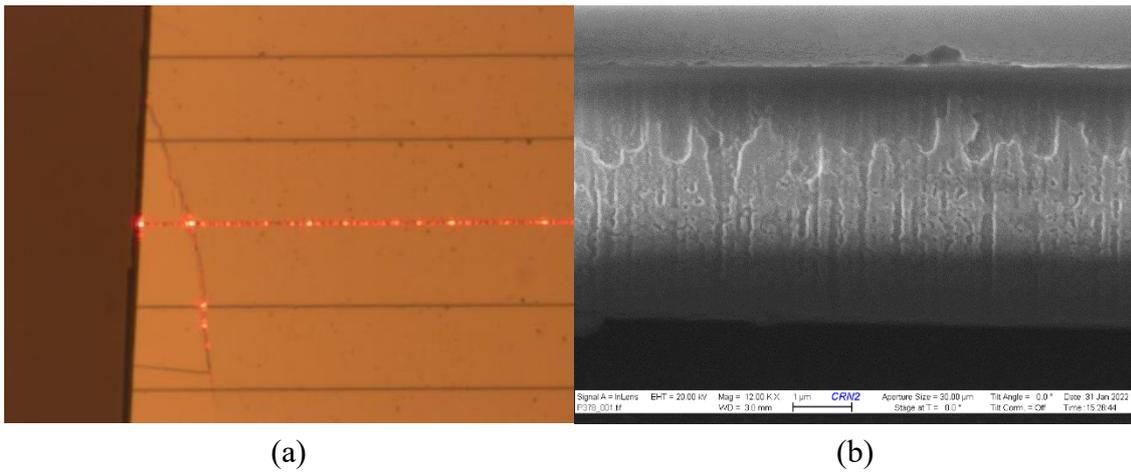


Figure 4.35 –(a) vue optique de dessus d’un exemple de défaut critique lors d’une mesure de transmission totale d’un guide rectiligne et (b) vue au MEB de la facette gravée d’une puce caractérisée.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Conclusion générale

Ce travail de doctorat a visé au développement technologique de briques de base entièrement composées de SiO_xN_y dans le but d'obtenir de faibles pertes par propagation, tout en maintenant une propagation monomode sur une large plage spectrale du domaine visible. Mené en cotutelle entre le Laboratoire de Nanotechnologie et Nanosystèmes (LN2) de l'Université de Sherbrooke (Qc-Canada) et le Laboratoire de l'Intégration du Matériau au Système (IMS) de l'Université de Bordeaux (France), il s'inscrit dans un projet plus large dont l'objectif est de réaliser un système miniaturisé de synthèse d'ouverture opérant dans le visible et intégrant les premières briques de base développées avec cette étude.

La spécificité consiste en la miniaturisation des composantes utilisées en espace libre par la voie de l'optique intégrée permettant la mise en œuvre de cette technique d'imagerie, tout en opérant sur la plus grande largeur spectrale possible du visible.

Réalisé dans le Chapitre 1, l'état de l'art des technologies de guidage aux longueurs d'onde infrarouge et notamment dans la bande 1 - 1,6 μm , est extrêmement riche. La fabrication des structures opérant dans cette bande est basée sur la plateforme SOI, qui est une technologie très mature permettant d'atteindre de hautes performances en termes de pertes par propagation ou encore de pertes d'insertion pour les fonctions de division de puissance. En revanche et à notre connaissance, très peu de dispositifs ont été développés et mis en œuvre dans le domaine du visible.

Pour cette raison, l'engouement pour les technologies utilisant les matériaux diélectriques et classiquement utilisés en microélectronique tels que le SiO_2 ou encore le Si_3N_4 ainsi que pour des applications nécessitant des structures toujours plus compactes, performantes et à faible coût de fabrication, amène à explorer de nouvelles configurations pour optimiser les caractéristiques de structures de base en photonique intégrée.

A ce titre et du fait de ses propriétés intrinsèques, **l'oxynitride de silicium (SiO_xN_y) présente un fort potentiel de performances en termes de pertes par absorption et de prototypage pour le visible**. En effet, les propriétés de ce matériau sont aisément modulables en termes de dimensions géométriques et d'indice de réfraction, ce qui en fait un candidat très pertinent pour la réalisation et la mise en place d'un système d'imagerie miniaturisé et fonctionnel dans le visible.

Le Chapitre 2 a ensuite adressé la modélisation des structures retenues (guides d'onde et coupleurs MMI) à l'aide de l'outil de simulation FIMMWAVE® de Photon Design. Cela a nécessité une prise en main de cet outil puis l'analyse de l'influence de paramètres pour chacune de ces structures tels que la taille et le contraste d'indice de réfraction pour les guides d'onde et les dimensions de la partie multimodes ainsi que celles des coupleurs MMI 50/50.

Cette étude préalable a permis d'évaluer l'impact des tolérances de fabrication par **photolithographie UV à large bande (220 nm à 436 nm) des motifs de la couche de cœur des guides d'onde** afin d'obtenir une estimation des performances optiques susceptibles d'être atteintes et de leur robustesse. Les dimensions obtenues du cœur des guides sont de 200 nm d'épaisseur et 1000 nm de largeur. La condition de guidage est assurée par un contraste d'indice visé de 0,1 à l'aide d'un dopage de la couche de SiO_xN_y constituant le cœur des guides.

Par ailleurs, ce contraste d'indice est maintenu sur une large plage spectrale grâce à la composition du matériau de la gaine identique à celle du cœur. La configuration des guides obtenus **répond à la contrainte de propagation monomode** imposée par le projet en permettant de conserver uniquement les polarisations TE₀ et TM₀. La structure de division de puissance est réalisée à l'aide de **coupleurs MMI 50/50** dont les dimensions de la partie multimodes sont de **8 μm de largeur et 92,46 μm de longueur**.

Par ailleurs, les guides en biseau inversé (« tapers »), composant l'entrée et les deux sorties du coupleur, ont été numériquement optimisés en vue de maximiser la **transmission totale des coupleurs MMI et présentent des pertes d'insertion théoriques de 0,06 dB en polarisation TE et 0,10 dB en polarisation TM**.

À la suite de cette phase de simulations, **le Chapitre 3** a permis d'optimiser des procédés technologiques de fabrication des structures par photolithographie. Cette phase de fabrication a mis en lumière un certain nombre de problématiques technologiques en explorant plusieurs solutions pour le cœur des guides d'onde et des coupleurs MMI ainsi que pour les facettes d'injection/collecte de lumière. Ces problématiques sont apparues à plusieurs niveaux :

- contrôle dimensionnel,
- contrôle du gradient d'indice des différentes couches des structures réalisées et de la rugosité fortement impactante en termes de pertes par propagation et de pertes de couplage aux facettes d'injection/collecte.

La voie de fabrication retenue pour la réalisation du cœur des guides et des coupleurs MMI 50/50 ainsi que des facettes d'injection, utilise la gravure assistée par plasma. **La couche de cœur en SiO_xN_y des structures guidantes a été gravée par AOE**.

Dans le cas de la fabrication des facettes d'injection et de collecte de la lumière, trois techniques de fabrication ont été particulièrement étudiées. Le procédé retenu est très similaire à celui des structures guidantes ; la différence principale étant l'ajout d'une gravure supplémentaire du substrat en silicium afin de prédécouper les puces.

Ce choix a été motivé par l'observation (non quantifiée) d'une rugosité inférieure ou égale à 100 nm lors de la phase de test se présentant comme le meilleur compromis vis-à-vis d'une réalisation par clivage mécanique sous pointe diamantée ou polissage mécano-chimique. En effet, la réalisation de facette par clivage présente une rugosité plus faible que la gravure assistée par plasma. Cependant, la réussite de ce procédé est très aléatoire à cause de la non-cristallinité du SiO_xN_y déposé par PECVD. Quant à la méthode par polissage mécano-chimique, la rugosité des facettes obtenues est similaire à celle obtenue par clivage mécanique. Cependant, ce procédé est très complexe puisqu'il comporte de multiples étapes de préparation telles que l'enrobage des échantillons dans une résine époxy, les découpes précises des blocs de résine, le pré-polissage et le polissage de finition. De plus, ce procédé a révélé une destruction possible des structures guidantes à proximité de la facette du fait d'une contrainte excessive.

Finalement, la capacité à réaliser des **guides d'onde enterrés**, dont les dimensions sont de **200 nm d'épaisseur et 1000 nm de largeur avec un contraste d'indice égal à 0,12 en technologie « full- SiO_xN_y »**, a été démontrée. De plus, le guidage dans cette configuration enterrée est assuré en totalité par le SiO_xN_y , et ceci est permis par une optimisation fine du procédé de fabrication de ce matériau par la voie PECVD. A ce titre, les **facteurs théoriques de confinement sont de 36 % et 28,8 % pour les modes TE_0 et TM_0** , respectivement.

Le dernier chapitre décrit les résultats issus des campagnes de caractérisation des structures fabriquées et a nécessité la mise en place d'un banc optique dédié. Ce dernier permet d'injecter trois longueurs d'onde de 532, 633 et 760 nm, tout en contrôlant précisément la polarisation d'injection.

Les résultats obtenus montrent que les guides d'onde présentent des **pertes par propagation** de l'ordre de **5,2 dB.cm⁻¹ @ 532 nm, 2,6 dB.cm⁻¹ @ 633 nm et 1,75 dB.cm⁻¹ @ 760 nm en polarisation TE**. De plus, il a pu être vérifié que le guidage était maintenu sur une **large bande spectrale couvrant de 532 nm à 760 nm**.

Une étude statistique sur l'ensemble des guides d'onde fabriqués a permis d'observer la distribution de performances en termes de pertes par propagation aux trois longueurs d'onde considérées. Cette distribution présente une concentration des mesures vers les basses valeurs de pertes indiquant une **bonne stabilité et répétabilité des procédés de fabrication développés et optimisés pour cette étude**.

Dans le cas des **coupleurs MMI 50/50** développés, l'étude statistique du déséquilibre de puissance optique entre les deux branches ne peut être concluante à cause de la faible population

de structures même s'il a été mis en lumière que ce **débalancement de transmission est extrêmement faible** pour certaines structures : $\Delta_{TE} = 0,03 \text{ dB}$ et $\Delta_{TM} = 0,82 \text{ dB @ } 532 \text{ nm}$ et $\Delta_{TE} = 0,16 \text{ dB}$ et $\Delta_{TM} = 1,33 \text{ dB @ } 633 \text{ nm}$.

La phase de caractérisation a également révélé plusieurs problématiques de conception et de fabrication. En effet, la rugosité des facettes gravées s'est avérée relativement élevée et a généré des pertes à l'injection. Les guides d'onde fabriqués ont présenté des pertes par propagation plus importantes que celles prévues, rendant parfois impossible certaines caractérisations. Notamment, la caractérisation par mesure différentielle utilisant les coupleurs MMI 50/50 n'a fonctionné que sur un très petit nombre de structures.

A notre connaissance, la démonstration de la **réalisation de guides d'onde et de coupleurs MMI 50/50 sur une plateforme « full-SiO_xN_y »**, constitue une première et le positionnement de nos résultats en est délicat. Les meilleurs **guides d'onde enterrés** de notre étude présentent des **pertes par propagation égal à 2,6 dB.cm⁻¹ @ 633nm pour le mode TE₀ et de 3,68 dB.cm⁻¹ @ 532 nm pour le mode TM₀**.

La synthèse des performances optiques de guides mettant en œuvre les plateformes SiN_x et SiO_xN_y (indiquée dans la section 1.2.3 du Chapitre CHAPITRE 1 :) permet de comparer nos résultats à des travaux réalisés dans un cadre de recherche similaire. Ainsi, l'étude publiée par Tzuchizawa et al [34] reporte des pertes par propagation de guides enterrés, réalisés sur plateforme SiO_xN_y/SiO₂, comprises entre 0,2 et 0,3 dB.cm⁻¹ à 850 nm mais avec un comportement multimodal de ces guides.

En outre, les travaux publiés par Subramanian et al de 2013 [37] ont rapporté la réalisation de guides enterrés sur plateforme SiN_x (Si₃N₄/SiO₂), présentant des pertes par propagation inférieur à 1 dB.cm⁻¹ à 532 nm et, dans ce cas également, le régime de propagation est multimodes. Une version de guides d'onde provenant de leur étude a tout de même été rapportée avec un régime de fonctionnement monomode et des pertes linéiques associés de 1,5 dB.cm⁻¹ à 532 nm. Cependant, le contraste cœur/gaine de ces structures est plus important et la plage d'opération monomode est plus réduite que celles obtenus dans notre étude. De plus, il est à noter que le dimensionnement transverse de cette configuration (largeur) est plus complexe à réaliser que pour nos structures du fait de la précision latérale requise, notamment afin d'obtenir une largeur de cœur de 300 nm, essentielle pour garantir une propagation guidée monomode.

Perspectives

L'ensemble des travaux réalisés a permis de montrer la faisabilité de réalisation de guides d'onde enterrés ainsi que des coupleurs MMI 50/50 opérant en régime monomode dans une large bande spectrale du domaine visible. Néanmoins, nous avons dû faire face à plusieurs difficultés technologiques et de conception mais leur compréhension amène des perspectives intéressantes à ces travaux pour garantir le succès de déploiement ambitionné du système d'imagerie miniaturisé.

- 1- La fabrication du matériau peut être encore améliorée, et particulièrement dans son procédé de caractérisation des couches réalisées par PECVD. En effet, une caractérisation ellipsométrique plus avancée multipliant les points de mesure sur l'échantillon ainsi qu'une étude à plusieurs angles d'incidence de la source sonde permettrait d'augmenter de manière significative la précision de mesure des épaisseurs et des indices de réfraction des couches déposées au fur et à mesure du procédé de fabrication des structures ; l'objectif étant de s'approcher au plus proche des valeurs obtenues lors des modélisations. De plus, la caractérisation de la surface complète des couches PECVD sur une tranche 100 mm donnerait la possibilité de compenser des écarts d'épaisseur et/ou d'indice de réfraction lors des étapes de fabrication subséquentes ; par exemple, en ajustant la dose d'exposition lors de l'étape de photolithographie pour diminuer ou augmenter la largeur des structures.
- 2- Toujours en termes de fabrication, les gravures assistées par plasma pourraient être encore optimisées par le biais de l'utilisation d'un meilleur procédé de lithographie, notamment pour la fabrication des facettes d'injection/collecte. Dans ce cas, une voie possible d'amélioration serait d'utiliser un masque métallique au lieu d'une résine pour profiter d'une sélectivité accrue pour la gravure du cœur des guides et des coupleurs MMI 50/50. Néanmoins, ce procédé imposerait d'utiliser une méthode de retrait de possibles résidus métalliques après la gravure du cœur. En effet, de tels résidus pourraient être à l'origine de fortes pertes s'ils venaient à être piégés entre la gaine supérieure et le cœur des structures guidantes. A ce sujet, une étude a déjà été publiée par Yap et al [76], qui fait la démonstration de l'obtention d'une rugosité de facette par gravure de l'oxyde et du silicium, meilleure ou aussi élevée que par polissage mécanique sur plateforme SOI. Les guides développés présentent des pertes moyennes mesurées avec des facettes gravées (-22 ± 4 dB) relativement comparables aux facettes découpées et polies (-22 ± 5 dB). Des techniques alternatives existent et pourrait aussi être

explorées telles que : la découpe à la scie le long de chemins définis par photolithographie ou encore par polyciage.

- 3- Concernant la gravure des facettes, l'effet de rugosité élevée et de sur-gravure du silicium pourrait aussi être limité voire évité en utilisant un substrat silicium aminci. En effet, cela diminuerait le temps de gravure nécessaire à la gravure totale du matériau et réduirait en conséquence le temps d'interaction du procédé Bosch avec le matériau (diminution du nombre de cycles).

- 4- La phase de caractérisation des structures fabriquées dans ce travail de thèse a aussi révélé qu'une simplification de la conception permettrait de mesurer bien plus précisément le niveau de pertes des structures telles que les pertes par courbures, les pertes par propagation ou encore les pertes d'insertion des coupleurs MMI 50/50.

- 5- Toujours en termes de conception, une voie d'amélioration serait d'anticiper la quantité de résine à développer à l'issue de l'exposition UV. Rappelons que le développement de la résine utilisé dans ce projet est tellement critique qu'il doit être effectué par immersion manuelle. Une limitation dans la surface effective d'exposition prise en compte dans la conception permettrait de rendre cette étape de développement moins critique et bien plus robuste. L'illustration de cette voie d'amélioration est présentée en Figure 5.1.

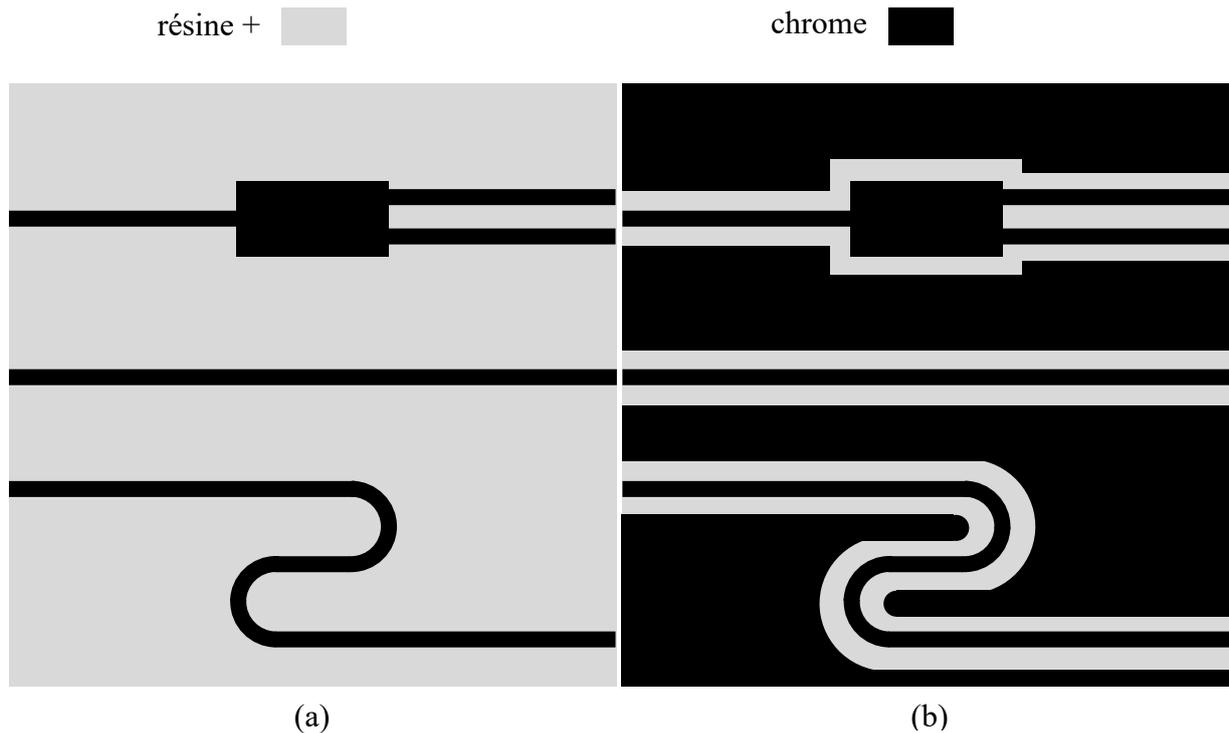


Figure 5.1 – Vue schématique (a) de la ligne de conduite suivie dans la conception du masque de photolithographie de notre étude et (b) d’une voie d’amélioration permettant de limiter la proportion de résine à exposer.

- 6- L’objectif principal visant à démontrer un fonctionnement large bande dans le visible, le banc de caractérisation gagnerait à être amélioré en ajoutant d’autres sources d’injection à des longueurs d’onde différentes de 532, 633 et 760 nm. Cette amélioration pourrait être couplée à l’utilisation d’une fibre d’injection à maintien de polarisation afin d’améliorer le rapport d’extinction en polarisation. Les modes d’injection et de collecte de la lumière pourraient aussi être contrôlés à l’aide d’une caméra visible afin d’étudier les propriétés de propagation (comportement modal) des structures fabriquées.

- 7- Enfin, l’ultime étape d’amélioration suggérée pourrait consister à utiliser un procédé de lithographie électronique. En effet, ce type de procédé dispose d’une résolution latérale bien supérieure à la photolithographie UV. Cela permettrait de possiblement diminuer la rugosité des flancs de gravure de la couche de cœur des guides d’onde. De plus, cette résolution supérieure permettrait la fabrication de structures plus complexes et d’améliorer les performances des coupleurs MMI en termes de plage spectrale d’opération. En effet, dans ce travail, les coupleurs MMI sont censés disposer d’une plage spectrale d’opération de l’ordre de 50 nm autour de 633 nm. Un passage à une technologie de fabrication des motifs de la couche de cœur par électro-lithographie

permettrait de fabriquer des réseaux sub-longueurs d'onde en vue d'élargir la plage d'opération des coupleurs MMI comme démontré dans l'étude publiée par Halir et al [88]. A ce titre, la Figure 5.2 présente une vue MEB (de dessus) d'un coupleur MMI 2 x 2 fabriqué sur plateforme SOI et dont la plage spectrale d'opération est comprise entre 1250 et 1750 nm. Il est à noter que des techniques de fabrication alternatives pourraient aussi être explorées telles que la photolithographie en exposition « deep-UV », la photolithographie par projection ou encore la nanoimpression à partir d'un moule réalisé par électrolithographie.

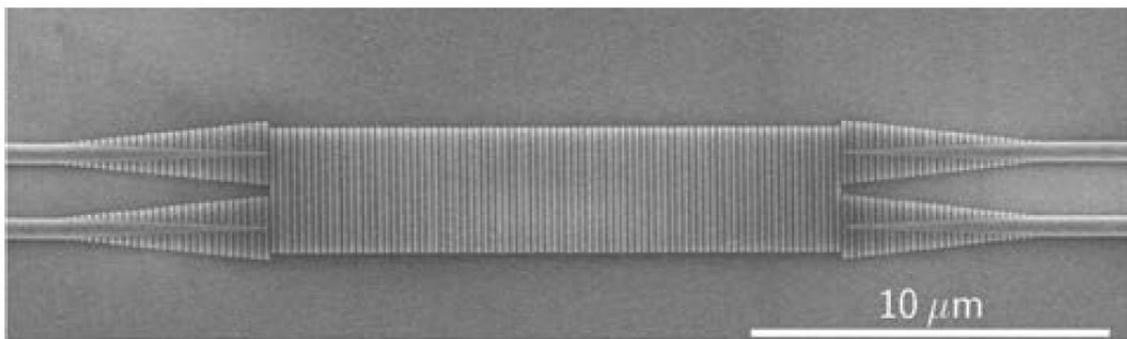


Figure 5.2 – Vue MEB (de dessus) d'un coupleur MMI ultra large bande fabriqué sur plateforme SOI et dont la plage spectrale d'opération est comprise entre 1250 et 1750 nm [88].

RÉFÉRENCES

- [1] A. A. Michelson, « On the application of interference methods to astronomical measurements », *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 30, n° 182, p. 1-21, 1890, doi: 10.1080/14786449008619983.
- [2] A. A. Michelson, « On the application of interference methods to astronomical measurements », *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 7, n° 5, p. 143-146, 1920.
- [3] A. A. Michelson et F. G. Pease, « Measurement of the Diameter of Alpha-Orionis by the Interferometer », vol. 7, p. 143-146, 1921.
- [4] M. Ryle et D. D. Vonberg, « Solar radiation on 175 Mc./s. », *Nature*, vol. 158, n° 4010, p. 339-340, 1946.
- [5] J.-P. Berger *et al.*, « Combining and cophasing a telescope array in a single chip-integrated optics: a new solution for spaced based aperture synthesis interferometry », 2017, vol. 10569, p. 1056903. doi: 10.1117/12.2307953.
- [6] M. Benisty *et al.*, « An integrated optics beam combiner for the second generation VLTI instruments », *Astronomy and Astrophysics*, vol. 498, n° 2, p. 601-613, 2009, doi: 10.1051/0004-6361/200811083.
- [7] D. Mourard *et al.*, « Regain : a new optical beam combiner for the GI2T », *IOJ*, vol. 2, p. 593-598, 1994.
- [8] J. A. Benson *et al.*, « Multichannel optical aperture synthesis imaging of zeta1 URSAE majoris with the Navy prototype optical interferometer », *The Astronomical Journal*, vol. 114, p. 1221-1226, 1997.
- [9] J. E. Baldwin *et al.*, « The first images from an optical aperture synthesis array: Mapping of Capella with COAST at two epochs », *Astronomy and Astrophysics*, vol. 306, n° 1, p. L13-L16, 1996.
- [10] M. Bravo, R. Robles, P. G. Charette, L. Bechou, et J. Sylvestre, « Towards Imaging Based on Low-Coherence Interferometry in the Visible Spectrum », présenté à Photonics North, Montréal, 2018.
- [11] F. Malbet, P. Kern, I. Schanen-Duport, J.-P. Berger, K. Rousselet-Perraut, et P. Benech, « Integrated optics for astronomical interferometry. I. Concept and astronomical applications », *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, vol. 138, n° 1, p. 135-145, 1999.
- [12] J. P. Berger *et al.*, « Integrated optics for astronomical interferometry: II. First laboratory white-light interferograms », *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, vol. 139, n° 1, p. 173-177, 1999.
- [13] P. Haguenaer *et al.*, « Integrated optics for astronomical interferometry. III. Optical validation of a planar optics two-telescope beam combiner », *Applied Optics*, vol. 39, n° 13, p. 2130-2139, 2000, doi: 10.1364/AO.39.002130.
- [14] J. P. Berger *et al.*, « Integrated optics for astronomical interferometry: IV. First measurements of stars », *Astronomy and Astrophysics*, vol. 376, n° 03, p. L31-L34, 2001, doi: 10.1051/0004-6361:20011035.
- [15] E. Laurent *et al.*, « Integrated optics for astronomical interferometry: V. Extension to the K band », *Astronomy and Astrophysics*, vol. 390, n° 3, p. 1171-1176, 2002, doi: 10.1051/0004-6361:20020404.
- [16] J.-B. LeBouquin *et al.*, « Integrated optics for astronomical interferometry. VI. Coupling the light of the VLTI in K band », *Astronomy and Astrophysics*, vol. 450, n° 3, p. 1259-1264, 2006, doi: 10.1051/0004-6361:20054258.

- [17] J. L. Gómez, « Probing the Innermost Regions of AGN Jets and Their Magnetic Fields with RadioAstron. V. Space and Ground Millimeter-VLBI Imaging of OJ 287 », *The Astrophysical Journal*, vol. 924, n° 2, p. 16, 2022.
- [18] R. A. Soref et J. P. Lorenzo, « Single crystal silicon : a new material ofr 1.3 and 1.6 um integrated optical components », 1985.
- [19] G. T. Reed, W. R. Headley, et C. E. J. Png, « Silicon photonics: the early years », San Jose, California, United States, 2005, p. 1. doi: 10.1117/12.596921.
- [20] C. Doerr *et al.*, « Single-Chip Silicon Photonics 100-Gb/s Coherent Transceiver », in *Optical Fiber Communication Conference: Postdeadline Papers*, San Francisco, California, 2014, p. Th5C.1. doi: 10.1364/OFC.2014.Th5C.1.
- [21] A. Debray et J.-L. Malinge, « Silicon Photonics - From Technologies to Markets ». 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://s3.i-micronews.com/uploads/2021/05/YINTR21175-Silicon-Photonics-2021-Sample.pdf>
- [22] A. E.-J. Lim *et al.*, « Review of Silicon Photonics Foundry Efforts », *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, vol. 20, n° 4, p. 405-416, 2014, doi: 10.1109/JSTQE.2013.2293274.
- [23] A. Novack *et al.*, « A 30 GHz Silicon Photonic Platform », présenté à 10th International Conference on Group IV Photonics, Seoul, Korea (South), 2013. doi: 10.1109/Group4.2013.6644463.
- [24] T.-Y. Liow *et al.*, « Silicon Optical Interconnect Device Technologies for 40 Gb/s and Beyond », *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, vol. 19, n° 2, p. 8200312-8200312, 2013, doi: 10.1109/JSTQE.2012.2218580.
- [25] M. Lipson, « Guiding, modulating, and emitting light on Silicon-challenges and opportunities », *J. Lightwave Technol.*, vol. 23, n° 12, p. 4222-4238, 2005, doi: 10.1109/JLT.2005.858225.
- [26] H. Ritchie et M. Roser, « Moore's Law: The number of transistors per microprocessor », *Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/grapher/transistors-per-microprocessor> (consulté le 20 mai 2022).
- [27] N. Izhaky *et al.*, « Development of CMOS-Compatible Integrated Silicon Photonics Devices », *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, vol. 12, n° 6, p. 1688-1698, 2006, doi: 10.1109/JSTQE.2006.884089.
- [28] R. G. Heideman, R. P. H. Kooyman, et J. Greve, « Performance of a highly sensitive optical waveguide Mach-Zehnder interferometer immunosensor », *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 10, n° 3, p. 209-217, 1993, doi: 10.1016/0925-4005(93)87008-D.
- [29] I. Garces, F. Villuendas, J. A. Valles, C. Dominguez, et M. Moreno, « Analysis of leakage properties and guiding conditions of rib antiresonant reflecting optical waveguides », *J. Lightwave Technol.*, vol. 14, n° 5, p. 798-805, 1996, doi: 10.1109/50.495160.
- [30] P. Muñoz *et al.*, « Silicon Nitride Photonic Integration Platforms for Visible, Near-Infrared and Mid-Infrared Applications », *Sensors*, vol. 17, n° 9, p. 2088, 2017, doi: 10.3390/s17092088.
- [31] F. Rebib, E. Tomasella, J. P. Gaston, C. Eyfert, J. Cellier, et M. Jacquet, « Determination of optical properties of a-SiOxNy thin films by ellipsometric and UV-visible spectroscopies », *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 100, n° 8, p. 082033, 2008, doi: 10.1088/1742-6596/100/8/082033.
- [32] C. K. Jung, S. H. Jeong, I. S. Bae, J. H. Boo, et W. S. Choi, « Properties of SiOxNy Thin Films Deposited with a Single Molecular Precursor by Using RF PECVD », *Journal of the Korean Physical Society*, vol. 51, n° 3, p. 1069-1072, 2007.
- [33] R. Germann *et al.*, « Silicon Oxynitride Layers for Optical Waveguide Applications », *J. Electrochem. Soc.*, vol. 147, n° 6, p. 2237, 2000, doi: 10.1149/1.1393513.

- [34] T. Tsuchizawa *et al.*, « Low-loss Silicon Oxynitride Waveguides and Branches for the 850-nm-Wavelength Region », *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 47, n° 8, p. 6739-6743, 2008, doi: 10.1143/JJAP.47.6739.
- [35] L. Bodiou, « Development of a SiON-based integrated platform for the blue/near-UV wavelength range », présenté à Photonics Europe, Strasbourg, France, 2022.
- [36] R. Guider *et al.*, « Design and Optimization of SiON Ring Resonator-Based Biosensors for Aflatoxin M1 Detection », *Sensors*, vol. 15, n° 7, p. 17300-17312, 2015, doi: 10.3390/s150717300.
- [37] A. Z. Subramanian *et al.*, « Low-Loss Singlemode PECVD Silicon Nitride Photonic Wire Waveguides for 532-900 nm Wavelength Window Fabricated Within a CMOS Pilot Line », *IEEE Photonics Journal*, vol. 5, n° 6, p. 2202809-2202809, 2013, doi: 10.1109/JPHOT.2013.2292698.
- [38] S. Romero-García, F. Merget, F. Zhong, H. Finkelstein, et J. Witzens, « Silicon nitride CMOS-compatible platform for integrated photonics applications at visible wavelengths », *Optics Express*, vol. 21, n° 12, p. 14036, 2013, doi: 10.1364/OE.21.014036.
- [39] Y. Jia, X. Dai, Y. Xiang, et D. Fan, « High quality factor silicon oxynitride optical waveguide ring resonators », *Optical Materials*, vol. 85, p. 138-142, 2018, doi: 10.1016/j.optmat.2018.08.031.
- [40] A. Azimi Fashi, M. H. Vadjed Samiei, et A. Teixeira, « Realization of visible light integrated circuits for all-optical haar transform », *Opt Quant Electron*, vol. 53, n° 7, p. 364, 2021, doi: 10.1007/s11082-021-03008-5.
- [41] Y. Zhang *et al.*, « A compact and low loss Y-junction for submicron silicon waveguide », *Optics Express*, vol. 21, n° 1, p. 1310, 2013, doi: 10.1364/OE.21.001310.
- [42] Zhen Sheng *et al.*, « A Compact and Low-Loss MMI Coupler Fabricated With CMOS Technology », *IEEE Photonics J.*, vol. 4, n° 6, p. 2272-2277, 2012, doi: 10.1109/JPHOT.2012.2230320.
- [43] A. Maese-Novo *et al.*, « Wavelength independent multimode interference coupler », *Optics Express*, vol. 21, n° 6, p. 7033, 2013, doi: 10.1364/OE.21.007033.
- [44] A. Gorin, A. Jaouad, E. Grondin, V. Aimez, et P. Charette, « Fabrication of silicon nitride waveguides for visible-light using PECVD: a study of the effect of plasma frequency on optical properties », *Optics Express*, vol. 16, n° 18, p. 13509-13516, 2008.
- [45] P.-J. Zermatten, A. Jaouad, S. Blais, A. Gorin, V. Aimez, et P. G. Charette, « Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition of Si-Rich Silicon Nitride Films Optimized for Waveguide-Based Sensing Applications in the Visible Range », *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 51, p. 110205, 2012, doi: 10.1143/JJAP.51.110205.
- [46] G. Z. Mashanovich *et al.*, « Low loss silicon waveguides for the mid-infrared », *Opt. Express*, vol. 19, n° 8, p. 7112, 2011, doi: 10.1364/OE.19.007112.
- [47] E. A. Anashkina *et al.*, « Development of infrared fiber lasers at 1555 nm and at 2800 nm based on Er-doped zinc-tellurite glass fiber », *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. 525, p. 119667, 2019, doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2019.119667.
- [48] W. Bogaerts, P. Dumon, B. Luyssaert, et P. Bienstman, « Nanophotonic waveguides in silicon-on-insulator fabricated with CMOS technology », *J. Lightwave Technol.*, vol. 23, n° 1, p. 401-412, 2005, doi: 10.1109/JLT.2004.834471.
- [49] P. K. Tien, « Light Waves in Thin Films and Integrated Optics », *Appl. Opt.*, vol. 10, n° 11, p. 2395, 1971, doi: 10.1364/AO.10.002395.
- [50] H. Kogelnik et V. Ramaswamy, « Scaling Rules for Thin-Film Optical Waveguides », *Appl. Opt.*, vol. 13, n° 8, p. 1857, 1974, doi: 10.1364/AO.13.001857.
- [51] R. G. Hunsperger, *Integrated Optics: Theory and Technology*, 6th éd. New York, United States: Springer, 2009.

- [52] W. Berglund et A. Gopinath, « WKB analysis of bend losses in optical waveguides », *J. Lightwave Technol.*, vol. 18, n° 8, p. 1161-1166, 2000apr. J.-C., doi: 10.1109/50.857763.
- [53] R. Ulrich et G. Ankele, « Self-imaging in homogeneous planar optical waveguides », *Appl. Phys. Lett.*, vol. 27, n° 6, p. 337-339, 1975, doi: 10.1063/1.88467.
- [54] D. C. Chang et E. F. Kuester, « A Hybrid Method for Paraxial Beam Propagation in Multimode Optical Waveguides », *Microwave Theory and Techniques*, vol. 29, n° 9, p. 11, 1981.
- [55] J. Xiao, X. Liu, et X. Sun, « Design of an ultracompact MMI wavelength demultiplexer in slot waveguide structures », *Opt. Express*, vol. 15, n° 13, p. 8300, 2007, doi: 10.1364/OE.15.008300.
- [56] C. Vazquez, F. J. Mustieles, et F. Hernhdez-Gil, « Three-Dimensional method for Simulation of Multimode Interference Couplers », *Journal of Lightwave Technology*, vol. 13, n° 11, p. 4, 1995.
- [57] R. Ulrich, « Light-propagation and imaging in planar optical waveguides », *Nouvelle Revue d'Optique*, vol. 6, n° 5, p. 253-262, 1975, doi: 10.1088/0335-7368/6/5/302.
- [58] L. B. Soldano et E. C. M. Pennings, « Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: principles and applications », *Journal of Lightwave Technology*, vol. 13, n° 4, p. 615-627, 1995, doi: 10.1109/50.372474.
- [59] D. F. G. Gallagher et T. P. Felici, « Eigenmode expansion methods for simulation of optical propagation in photonics: pros and cons », San Jose, CA, 2003, vol. 4987, p. 69-82. doi: 10.1117/12.473173.
- [60] R. Ulrich et T. Kamiya, « Resolution of self-images in planar optical waveguides », *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 68, n° 5, p. 583, 1978, doi: 10.1364/JOSA.68.000583.
- [61] P. A. Besse, M. Bachmann, H. Melchior, L. B. Soldano, et M. K. Smit, « Optical bandwidth and fabrication tolerances of multimode interference couplers », *J. Lightwave Technol.*, vol. 12, n° 6, p. 1004-1009, 1994, doi: 10.1109/50.296191.
- [62] S. Franssila, *Introduction to Microfabrication*, 2nd éd. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2010. doi: 10.1002/9781119990413.
- [63] P. G. Pai, S. S. Chao, Y. Takagi, et G. Lucovsky, « Infrared spectroscopic study of SiOx films produced by plasma enhanced chemical vapor deposition », *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, vol. 4, n° 3, p. 689-694, 1986, doi: 10.1116/1.573833.
- [64] S. C. Mao *et al.*, « Low propagation loss SiN optical waveguide prepared by optimal low-hydrogen module », *Opt. Express*, vol. 16, n° 25, p. 20809, 2008, doi: 10.1364/OE.16.020809.
- [65] L. Yin *et al.*, « Fabrication and characterization of compact silicon oxynitride waveguides on silicon chips », *J. Opt.*, vol. 14, n° 8, p. 085501, 2012, doi: 10.1088/2040-8978/14/8/085501.
- [66] S. Zhu, G. Q. Lo, W. Li, et D. L. Kwong, « Effect of cladding layer and subsequent heat treatment on hydrogenated amorphous silicon waveguides », vol. 20, n° 21, p. 8, 2012.
- [67] P. Gatkine, S. Veilleux, Y. Hu, J. Bland-Hawthorn, et M. Dagenais, « Arrayed waveguide grating spectrometers for astronomical applications: new results », *Opt. Express*, vol. 25, n° 15, p. 17918, 2017, doi: 10.1364/OE.25.017918.
- [68] H. Albers, L. T. H. Hilderink, J. H. Berends, K. Worhoff, N. F. van Hulst, et P. V. Lambeck, « A waveguide material for integrated optical sensors : silicon oxynitride », Delft, 1996, p. 221-230.
- [69] P. Drude, « Ueber die Gesetze der Reflexion und Brechung des Lichtes an der Grenze absorbirender Krystalle », *Ann. Phys. Chem.*, vol. 268, n° 12, p. 584-625, 1887, doi: 10.1002/andp.18872681205.

- [70] K. Vedam, « Spectroscopic ellipsometry: a historical overview », *Thin Solid Films*, vol. 313-314, p. 1-9, févr. 1998, doi: 10.1016/S0040-6090(97)00762-1.
- [71] « alpha-SE Ellipsometer - J.A. Woollam ». <https://www.jawoollam.com/products/alpha-se-ellipsometer#tab-id-1> (consulté le 9 septembre 2021).
- [72] « Photoresist AZ 1505 Photoresists MicroChemicals GmbH ». https://www.microchemicals.com/products/photoresists/az_1505.html (consulté le 19 février 2022).
- [73] « Photoresist AZ MIR 701 Photoresists MicroChemicals GmbH ». https://www.microchemicals.com/products/photoresists/az_mir_701.html (consulté le 14 septembre 2021).
- [74] « Basics of microstructuring - Post Exposure Bake ». https://www.microchemicals.com/technical_information/photoresist_post_exposure_bake_peb.pdf (consulté le 20 mai 2022).
- [75] M. Melchiorri *et al.*, « Propagation losses of silicon nitride waveguides in the near-infrared range », *Appl. Phys. Lett.*, vol. 86, n° 12, p. 121111, 2005, doi: 10.1063/1.1889242.
- [76] K. P. Yap *et al.*, « Fabrication of lithographically defined optical coupling facets for silicon-on-insulator waveguides by inductively coupled plasma etching », *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, vol. 24, n° 3, p. 812-816, 2006, doi: 10.1116/1.2186657.
- [77] « Single Longitudinal Mode lasers », *Oxxius*. <https://www.oxxius.com/products/single-longitudinal-mode-dpss-lasers/> (consulté le 19 mai 2022).
- [78] P. Girault *et al.*, « Integrated optical microring resonators for absorption spectroscopy », présenté à SPIE BIOS Frontiers in Biological Detection: From Nanosensors to Systems XII, San Francisco, United States, 2020.
- [79] D. Chauvin, J. Bell, I. Leray, I. Ledoux-Rak, et C. T. Nguyen, « Label-free optofluidic sensor based on polymeric microresonator for the detection of cadmium ions in tap water », vol. 280, p. 77-85, 2019.
- [80] « Single Frequency Laser Diodes like DFB Lasers / DBR Lasers / RWS Lasers for Space, Life Science & Industry », *Toptica eagleyard photonics*. <https://www.toptica-eagleyard.com/products/single-frequency-laser-diodes/> (consulté le 19 mai 2022).
- [81] « IDIL Fibres Optiques ». <https://www.idil-fibres-optiques.com/product/lensed-fiber/> (consulté le 9 mai 2022).
- [82] M. Thual, D. Malarde, B. Abhervé-Guégen, P. Rochard, et P. Chancelou, « Truncated Gaussian beams through microlenses based on a graded-index section », *Opt. Eng.*, vol. 46, n° 1, p. 015402, 2007, doi: 10.1117/1.2431798.
- [83] Y. Okamura, S. Yoshinaka, et S. Yamamoto, « Measuring mode propagation losses of integrated optical waveguides: a simple method », *Appl. Opt.*, vol. 22, n° 23, p. 3892, 1983, doi: 10.1364/AO.22.003892.
- [84] A. F. Evans, D. G. Hall, et W. P. Maszara, « Propagation loss measurements in silicon-on-insulator optical waveguides formed by the bond-and-etchback process », *Appl. Phys. Lett.*, vol. 59, n° 14, p. 1667-1669, 1991, doi: 10.1063/1.106262.
- [85] L. Yin, « Study of Nonlinear Optical Effects in Silicon Waveguides », University of Rochester, Institute of Optics, 2010.
- [86] M. Saruwatari et K. Nawata, « Semiconductor laser to single-mode fiber coupler », *Appl. Opt.*, vol. 18, n° 11, p. 1847, 1979, doi: 10.1364/AO.18.001847.
- [87] M. Born et E. Wolf, *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*, 4^e éd. Elsevier, 1970.
- [88] R. Halir *et al.*, « Ultra-broadband nanophotonic beamsplitter using an anisotropic sub-wavelength metamaterial: Ultra-broadband nanophotonic beamsplitter... », *Laser & Photonics Reviews*, vol. 10, n° 6, p. 1039-1046, 2016, doi: 10.1002/lpor.201600213.