



HAL
open science

Étude et développement d'une plateforme photonique moyen infrarouge sur silicium : vers des capteurs intégrés

Julien Favreau

► To cite this version:

Julien Favreau. Étude et développement d'une plateforme photonique moyen infrarouge sur silicium : vers des capteurs intégrés. Optique [physics.optics]. Université Paris Saclay (COMUE), 2017. Français. NNT : 2017SACLS263 . tel-01639158

HAL Id: tel-01639158

<https://theses.hal.science/tel-01639158v1>

Submitted on 20 Nov 2017

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.

Etude et développement d'une plateforme photonique moyen infrarouge sur silicium : vers des capteurs intégrés

Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay
préparée à l'Université Paris-Sud

École doctorale n°572 Ondes et Matières (EDOM)
Spécialité de doctorat : Optique et Photonique

Thèse présentée et soutenue à Grenoble, le 5 octobre 2017, par

M. Julien Favreau

Composition du Jury :

| | |
|--|--------------------|
| M. Jean-Emmanuel Broquin Professeur, Grenoble-INP (IMEP-LAHC) | Président |
| Mme Delphine Marris-Morini Professeur, Université Paris-Sud (C2N) | Rapporteur |
| M. Xavier Letartre Professeur, Ecole Centrale de Lyon (INL) | Rapporteur |
| M. Alain Dereux Professeur, Université de Bourgogne (ICB) | Examineur |
| M. Mathieu Carras Ingénieur, mirSense | Examineur |
| M. Frédéric Bœuf Ingénieur, STMicroelectronics | Examineur |
| M. Guang-Hua Duan Ingénieur de recherche, III-V Lab | Directeur de thèse |
| M. Salim Boutami Cadre scientifique des EPIC, CEA-Grenoble (Leti) | Encadrant de thèse |

*À ma femme,
À mes futurs enfants,
À tous ceux, familles, amis, rencontres, qui façonnent ma vie*

Remerciements

*A mon âge, il est temps de mettre de l'ordre dans ses affaires,
ce qui consiste à s'y replonger... dans le désordre.*

André Dormont (1924 – 2017)

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de thèse du laboratoire III-V Lab à Palaiseau, Guang-Hua Duan, et mon encadrant du CEA-Leti à Grenoble, Salim Boutami, pour leurs conseils et l'encadrement scientifique et technique qu'ils ont apporté. Je tiens également à remercier les membres du jury d'avoir accepté de lire ce manuscrit et d'en avoir évalué le contenu.

Le travail très transversal de cette thèse n'aurait été possible sans les conseils et aides précieuses de nombreuses personnes du LCO et plus généralement du CEA-Leti. Les résultats présentés dans ce manuscrit ont commencé par un travail de simulation et de dimensionnement. Pour cela, je tiens à remercier Pierre Labeye pour ses conseils avisés en conception de circuits optiques. De même, l'étude des réseaux n'aurait sans doute pas été possible sans les magnifiques outils d'optimisation mis au point par Cédric Durantin durant sa thèse. Merci Cédric de m'avoir ouvert au monde de l'optimisation numérique que j'essayerai d'appliquer dans mes futurs projets. J'attends avec impatience ta soutenance. Ce travail de recherche repose également en grande partie sur l'expertise de microfabrication du Leti. Ainsi, je souhaite remercier les « filières » du laboratoire, Maryse Fournier et Véronique Dejonghe, pour m'avoir aidé à pousser les lots en salle et à prendre les bonnes décisions devant des questions quelque peu absconses pour un novice : *On peut passer ton lot en chimie perdue si tu veux, t'en penses quoi ?* Merci également à Stéphanie Garcia pour les découpes des plaques et les observations MEB de dernière minute. De petits gestes techniques qui sont rarement valorisés, car considérés comme anodin en recherche, mais qui sont à la base de toute réalisation scientifique. Plus généralement, merci aux différentes équipes de la salle blanche qui ont eu mes lots entre les mains et qui les ont amenés à bon port, étape après étape. Bien sûr, rien ne sert de fabriquer des puces si l'on ne peut les caractériser. Pour cela, merci à Pierre Barritault et tout particulièrement à Olivier Lartigue dont l'aide m'a été précieuse pour monter et aligner les différents bancs optiques de cette thèse. Je n'aurais pas survécu aux longues heures de caractérisation sans la bonne humeur des différents « caractérisateurs » des salles de manips. Merci à Fahem Boulila qui a toujours le sourire, Mathieu Dupoy pour ses blagues de bon goût et à Jean-Guillaume Coutard pour les longues discussions que nous avons eu.

Enfin, je ne pourrai sûrement exprimer avec des mots la reconnaissance que j'ai envers toi. Tu as littéralement sauvé ce travail de thèse à l'aide d'une expertise technique doublée d'une grande générosité. Jean-Marc, ton ancien apprenti te remercie du fond du cœur. *May the Force be with you.*

Bien qu'il paraît que le travail c'est la santé, la thèse est aussi une tranche de vie pleine de rencontres. Cédric, Justin, Hélène, Anthony, Guillaume, j'espère que notre amitié durera encore longtemps malgré les kilomètres qui, pour certains, nous séparent. Merci à Adrien pour avoir égayé mes longues heures de caractérisation d'AWG. *Quooooiiii ? Ok !* Qui aurait cru qu'un simple café nous aurait emmené jusqu'à Lille ?

Je remercie également ma famille, *de facto* à l'origine de cette thèse il y a 26 ans, toujours admirative de leurs enfants. Il y a maintenant un vrai docteur dans la famille !

Enfin, merci à celle qui est devenue ma femme durant cette thèse, Shayma, dont la présence est essentielle à ma vie.

Table des Matières

| | |
|--|----|
| Introduction | 8 |
| Chapitre I- La photonique sur silicium dans le moyen infrarouge | 10 |
| 1. L'optique intégrée aujourd'hui | 11 |
| 1.1. Qu'est-ce que l'optique intégrée ? | 11 |
| 1.2. Les plateformes actuelles d'intégration..... | 15 |
| 1.3. Conclusion : more Moore ou more than Moore ?..... | 21 |
| 2. Pourquoi aller vers le moyen infrarouge ?..... | 23 |
| 2.1. Un fort potentiel applicatif..... | 23 |
| 2.2. Des sources lasers disponibles..... | 29 |
| 2.3. Des fibres optiques disponibles..... | 31 |
| 2.4. Conclusion..... | 32 |
| 3. Quelle plateforme photonique pour le moyen infrarouge ? | 33 |
| 3.1. Critères de choix d'une nouvelle plateforme | 33 |
| 3.2. Zoologie des solutions possibles sur silicium..... | 36 |
| 3.3. La plateforme SiGe du CEA-Léti | 43 |
| 4. Conclusion et motivations | 45 |
| Chapitre II- Conception de composants passifs pour l'évaluation de la plateforme SiGe à saut d'indice..... | 47 |
| 1. Le guide optique : élément constitutif du circuit..... | 48 |
| 1.1. Notions de mode optique..... | 48 |
| 1.2. Description électromagnétique du guidage optique | 49 |
| 1.3. Sources de pertes en propagation guidée | 51 |
| 1.4. Dimensionnement des guides sur plateforme SiGe | 52 |
| 2. La problématique du routage optique..... | 53 |
| 2.1. Introduction | 53 |
| 2.2. Virages..... | 54 |
| 2.3. Croisements | 57 |
| 2.4. Conclusion..... | 58 |
| 3. Division et répartition de puissance..... | 58 |
| 3.1. Introduction | 58 |
| 3.2. Division de puissance par MMI 1x2..... | 59 |
| 3.3. Répartition arbitraire de puissance par coupleur directionnel | 60 |
| 4. Multiplexage en longueur d'onde pour de futurs sources larges bandes | 62 |
| 4.1. Contexte..... | 62 |

| | |
|---|-----|
| 4.2. Fonctionnement et figures de mérite d'un AWG | 63 |
| 4.3. Spécifications retenues pour l'AWG sur plateforme SiGe | 64 |
| 5. Conclusion | 66 |
| Chapitre III- Circuits photoniques passifs en technologie SiGe à saut d'indice réalisés par procédé standard..... | 67 |
| 1. Conception du circuit photonique | 68 |
| 1.1. Présentation du masque..... | 68 |
| 1.2. Contexte de la caractérisation par la tranche | 69 |
| 1.3. Motifs pour l'évaluation des pertes par propagation..... | 69 |
| 1.4. Motifs pour l'évaluation des pertes et équilibrage des fonctions optiques | 70 |
| 1.5. Conclusion..... | 71 |
| 2. Fabrication en salle blanche sur plaque 200 mm..... | 71 |
| 2.1. Présentation de l'enchaînement des étapes technologiques | 71 |
| 2.2. Résultats de fabrication..... | 73 |
| 3. Caractérisation optique des circuits..... | 74 |
| 3.1. Préparation des échantillons | 74 |
| 3.2. Présentation du banc de mesure par la tranche..... | 76 |
| 3.3. Protocoles de mesure | 79 |
| 3.4. Résultats obtenus | 80 |
| 4. Conclusion | 88 |
| Chapitre IV- Circuits photoniques passifs en technologie SiGe à saut d'indice réalisés par procédé damascène..... | 89 |
| 1. Caractéristiques de la plateforme SiGe à saut d'indice par procédé damascène..... | 90 |
| 1.1. Intérêts et caractéristiques du procédé damascène | 90 |
| 1.2. Dimensionnement des guides | 91 |
| 2. Conception du jeu de masque..... | 91 |
| 2.1. Buts du circuit | 91 |
| 2.2. Détails des motifs | 92 |
| 3. Fabrication en salle blanche sur plaque 200 mm..... | 92 |
| 3.1. Détails de l'enchaînement des procédés technologiques | 92 |
| 3.2. Résultats de fabrication..... | 94 |
| 3.3. Conclusion..... | 97 |
| 4. Mesure de pertes par propagation sur les guides damascènes..... | 97 |
| 4.1. Principe de la mesure de pertes par la méthode Fabry-Pérot | 97 |
| 4.2. Préparation des échantillons | 99 |
| 4.3. Protocole de mesure..... | 100 |
| 4.4. Résultats obtenus | 101 |

| | |
|--|-----|
| 4.5. Conclusion..... | 102 |
| 5. Conclusion | 103 |
| Chapitre V- Conception de réseaux de couplage pour le moyen infrarouge sur plateforme silicium | 104 |
| 1. Coupler la lumière dans la puce..... | 105 |
| 1.1. Couplage par la tranche : butt-coupling et end-fire coupling..... | 105 |
| 1.2. Couplage surfacique par réseau | 107 |
| 1.3. Conclusion..... | 108 |
| 2. Modélisation des réseaux de couplage | 110 |
| 2.1. Théorie des réseaux de couplage..... | 110 |
| 2.2. Modélisation numérique des réseaux de couplage..... | 115 |
| 2.3. Outils numériques de métamodélisation et d'optimisation globale | 120 |
| 3. Conception de réseaux de couplage pour le SWIR et le MWIR..... | 123 |
| 3.1. Différences entre la configuration SWIR et MWIR..... | 123 |
| 3.2. Réseaux de couplage pour le SWIR..... | 124 |
| 3.3. Réseaux de couplage pour le MWIR | 129 |
| 4. Conclusion | 137 |
| Chapitre VI- Fabrication et caractérisation de réseaux de couplage pour le moyen infrarouge sur plateforme silicium..... | 139 |
| 1. Conception des masques SWIR et MWIR..... | 140 |
| 1.1. Réseaux SWIR avec inclusion..... | 140 |
| 1.2. Réseaux MWIR suspendus..... | 142 |
| 2. Fabrication des réseaux SWIR et MWIR | 143 |
| 2.1. Enchaînement des procédés technologiques pour le réseau SWIR..... | 144 |
| 2.2. Enchaînement des procédés technologiques pour le réseau MWIR..... | 147 |
| 3. Caractérisation des réseaux de couplage SWIR..... | 152 |
| 3.1. Banc de mesure par fibre optique | 153 |
| 3.2. Protocole de mesure..... | 155 |
| 3.3. Résultats obtenus | 155 |
| 4. Conclusion | 157 |
| Conclusion et perspectives..... | 158 |
| Bibliographie | 160 |

Introduction

La fin du XX^e siècle a été le début d'une course vers la miniaturisation et une présence toujours plus forte du numérique dans notre quotidien. Ce phénomène se traduit aujourd'hui par la multiplication de puces électroniques et de capteurs de diverses natures, dans les objets qui nous entourent. Ces puces et capteurs proviennent de l'industrie de la microélectronique qui est née à la fin des années 50. Au départ, limitée à la fabrication de circuits électroniques, celle-ci s'est diversifiée en produisant des capteurs mêlant électronique, mécanique et optiques. On trouve désormais dans nos voitures, nos téléphones portables, montres, etc. des puces capables de mesurer la pression, la température, de prendre des photos, de reconnaître des empreintes digitales ou de mesurer des distances à l'aide d'un laser et ce, en occupant seulement quelques millimètres ou centimètres carrés. Une des innovations les plus récentes est la commercialisation de puce capable non plus de gérer un signal électrique mais également de véhiculer un signal optique. Celles-ci sont utilisées pour la transmission de données à très haut débit ($\geq 100 \text{ Gb.s}^{-1}$), pour la communication entre serveurs au sein de grands centres de données, que doivent gérer des entreprises comme Google ou Facebook. Ces puces dites « photoniques SOI » sont le fruit d'un travail de recherche qui a débuté au début des années 70 dans le domaine de l'optique intégrée. Ce domaine s'intéresse à l'utilisation des techniques de fabrication de microélectronique pour produire des puces contenant des structures capables de guider et manipuler la lumière, à l'image de la fibre optique. Cependant, la technologie commercialisée aujourd'hui exploite une part très restreinte du spectre électromagnétique de la lumière, située dans le proche infrarouge. L'exploitation d'autres bandes spectrales permettraient d'exploiter d'autres phénomènes et de mettre au point des puces optiques avec de nouvelles fonctionnalités. Le domaine électromagnétique du moyen infrarouge est particulièrement intéressant pour cela. En effet, de nombreuses molécules absorbent ou émettent des rayonnements infrarouges de façon spécifique dans ce domaine. Ainsi, des circuits optiques sur puce fonctionnant dans le moyen infrarouge ouvrirait la porte, par exemple, à la mise au point de capteurs de gaz miniatures ou de laboratoires sur puce, tout optiques, capables de faire des analyses sanguines instantanées.

C'est dans ce cadre que s'inscrivent ces travaux de thèse, dont le but est de développer une plateforme technologique de fabrication de circuit optique intégré sur silicium, fonctionnant dans le moyen infrarouge. Celle-ci doit répondre à des contraintes, dont certaines propres au domaine moyen infrarouge, qui seront détaillées par la suite. Ceci, dans le but de pouvoir à terme, mettre au point des capteurs optiques sur puce. Ainsi, ces recherches consistent à simuler et dimensionner des fonctions optiques permettant de mettre au point un circuit optique de test. Ce circuit est ensuite fabriqué dans la salle blanche du CEA-Leti puis caractérisé en laboratoire. Les contraintes du domaine infrarouge étant particulières, deux procédés de fabrication ont été explorés afin de répondre à différentes problématiques. Cette thèse s'inscrit dans les travaux de recherche du Laboratoire de Capteurs Optiques (LCO), appartenant au Laboratoire d'Electronique et des Technologies de l'Information du Commissariat à l'Energie Atomique (CEA-Leti). Celui-ci développe des capteurs de gaz, en utilisant les outils de la microélectronique, à travers des collaborations avec des entreprises et des instituts publics.

Le premier chapitre est consacré au contexte de ce travail de thèse et à la justification des directions de recherche qui ont été prises. Après avoir passé en revue les principales technologies d'optique intégrée, le choix de se tourner vers le domaine moyen infrarouge sera exposé. Notamment, nous

montrons qu'en plus d'un intérêt physique, l'exploration de l'optique intégrée moyen infrarouge était, jusqu'il y a peu, sujet à des verrous technologiques. Enfin, à travers une revue des différentes technologies de fabrication, nous justifierons le choix d'utiliser la plateforme silicium ainsi que des guides enterrés carrés en silicium-germanium (SiGe) à saut d'indice.

Le deuxième chapitre a pour but d'exposer le dimensionnement des composants optiques utilisés pour construire les circuits et évaluer leurs performances. Un rappel sur la théorie électromagnétique du guidage optique sera fait, puis le choix de chaque composant sera justifié à travers l'explication de leur fonctionnalité (routage, division de puissance, etc.).

Le troisième chapitre est dédié à l'évaluation expérimentale de la plateforme SiGe à saut d'indice. L'assemblage sous forme de circuit des précédents composants sera exposé. L'importance de prendre en compte les contraintes de fabrication et de caractérisation sera particulièrement soulignée. Ensuite, l'enchaînement technologique et les résultats de fabrication seront présentés. Le chapitre se terminera sur la mesure des performances du circuit et conclura, notamment sur les pertes par propagation qui sont les meilleures dans l'état de l'art, pour ce type de circuit.

Le quatrième chapitre est consacré à l'évaluation d'une alternative de fabrication permettant de co-intégrer sur une même puce des circuits fonctionnant à des longueurs d'onde très différentes. En effet, certaines applications, comme la mesure de gaz, requièrent souvent de devoir cibler deux molécules dont les empreintes sont très éloignées l'une de l'autre dans le spectre infrarouge. Cette méthode alternative de fabrication, exploitant le principe du procédé damascène, a pour but de répondre à cette problématique.

Le cinquième chapitre se concentre exclusivement sur le dimensionnement de différents réseaux de couplage, composants permettant de faire l'interface entre le circuit et une fibre optique. Le réseau de couplage a été un élément important dans l'industrialisation de la photonique SOI via la possibilité de faire des caractérisations automatisées. Dans une démarche de recherche technologique et de monter en maturité de la plateforme développée, des réseaux de couplage pour le moyen infrarouge ont été mis au point à l'aide de simulation par différences finies, couplées à un algorithme d'optimisation globale. La difficulté à obtenir des réseaux performants nous ont amenés à mettre au point des structures innovantes, notamment un réseau comportant des inclusions d'air et un réseau localement suspendu.

Le sixième chapitre décrit la fabrication des réseaux dimensionnés et leur caractérisation optique. Le réseau contenant des inclusions et le réseau suspendu constituent des structures peu aisées à fabriquer par des techniques de microélectronique standards. A travers ce chapitre, nous faisons la démonstration que celles-ci sont tout à fait réalisables. En particulier, nous démontrons la faisabilité de définir des motifs malgré des très fortes topographies ($< 5 \mu\text{m}$) et de suspendre des matériaux contraints comme le silicium-germanium. La caractérisation optique confirmera que le fonctionnement du réseau avec inclusion est en accord avec la simulation.

Chapitre I- La photonique sur silicium dans le moyen infrarouge

L'optique guidée est le domaine de l'optique s'intéressant de façon générale au guidage de la lumière. Cette discipline est devenue connue du grand public avec la démocratisation d'Internet et le déploiement généralisé de la fibre optique. L'optique intégrée est un sous-domaine de cette discipline qui se consacre à l'utilisation d'outils de la microélectronique, et plus généralement de la microfabrication, pour fabriquer des circuits optiques sur puce permettant de guider et manipuler la lumière. Les technologies utilisées en optique intégrée sont extrêmement diverses ce qui permet de couvrir l'ensemble du spectre électromagnétique compris entre les rayonnements X [1] et les rayonnements micro-ondes [2]. Ce chapitre est consacré à l'introduction du domaine de recherche qu'est l'optique intégrée sur silicium dédiée au moyen infrarouge. Après une brève introduction au guidage optique, un état de l'art sera fait sur les techniques de fabrication actuelles en optique intégrée. Nous verrons quelles sont leurs limitations et quelles sont les applications qu'elles adressent. Dans un deuxième temps, nous nous attacherons à montrer en quoi il est justifié d'étendre l'optique intégrée au domaine infrarouge et en quoi la plateforme silicium s'y prête. Cela nous amènera à faire l'état de l'art des solutions techniques de guidage de la lumière infrarouge sur silicium et justifier le choix de celles développées dans cette thèse.

1. L'optique intégrée aujourd'hui

1.1. Qu'est-ce que l'optique intégrée ?

1.1.1. Découverte du guidage optique : de la fontaine lumineuse aux télécommunications modernes

L'optique intégrée est basée sur le principe du guidage de la lumière qui est mis en pratique à travers ce que l'on appelle un guide d'onde. Un guide d'onde est une structure capable de forcer une onde électromagnétique à se propager le long d'un chemin prédéfini. Le fonctionnement du guide est basé sur le confinement de la lumière dans une ou plusieurs directions. Cela est rendu possible grâce à la structure du guide. Celui-ci est composé d'un cœur fait d'un matériau d'indice optique de réfraction n_1 entouré d'une gaine fait d'un ou plusieurs matériaux d'indice inférieure ($n_2 > n_3 > \dots$). Le cœur au centre du guide, dans lequel est confinée la lumière, constitue ce que l'on appelle la zone guidante. Plus le contraste d'indice Δn , c'est-à-dire la différence d'indice entre le cœur et la gaine du guide, est important, plus la lumière est fortement confinée. De nombreuses géométries de guides existent pour assurer un guidage optique, les plus communes sont décrites en Figure I-1.

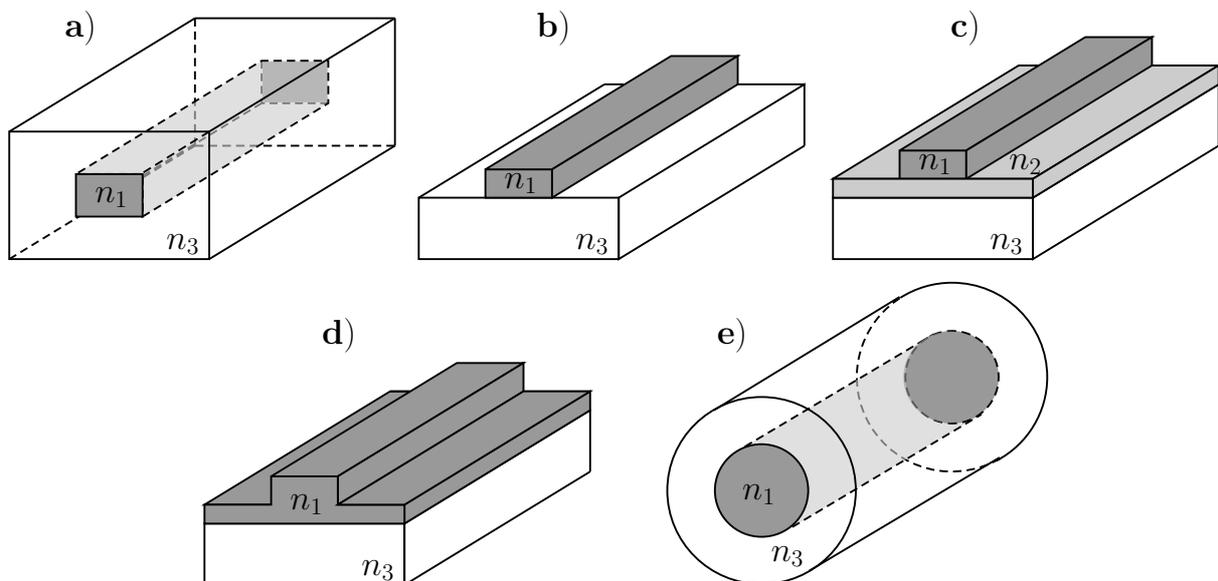


Figure I-1 : Schéma des principales géométries de guide d'onde optique : a) guide enterré dit channel, b) guide strip, c) guide strip-loaded, d) guide rib ou ridge et e) fibre optique.

La première démonstration du guidage de la lumière a été faite en 1842 par Jean-Daniel Colladon [3], scientifique Suisse, et Jacques Babinet [4], scientifique français. L'expérience consistait à éclairer une cuve d'eau percée à l'aide d'une lentille focalisant la lumière sur la sortie d'un jet d'eau (Figure I-2). Originellement, Daniel Colladon utilisa la lumière du soleil puis fit fabriquer une lampe à arc électrique pour son expérience. On pouvait ainsi observer un jet d'eau « lumineux », preuve que la lumière pouvait être guidée sur une trajectoire courbe, chose alors impensable à l'époque.

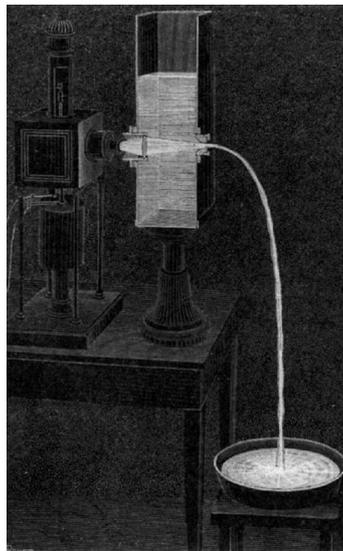


Figure I-2 : Illustration de l'expérience de fontaine lumineuse menée par Jean-Daniel Colladon parue dans le magazine La Nature en 1884 (Source : Wikimedia [5])

Avec ce dispositif, ils exploitent ingénieusement le principe de réflexion totale interne (Figure I-3) que l'on déduit des relations de Snell-Descartes [6]. Cependant, la structure de guidage présente des dimensions très supérieures à la longueur d'onde de la lumière qu'elle guide. Le jet d'eau a des dimensions centimétriques alors que la lumière visible a une longueur d'onde de l'ordre de la centaine de nanomètre. Dans le cadre de l'optique intégrée nous allons nous intéresser à des guides d'onde dont les dimensions sont de l'ordre de la longueur d'onde de la lumière qu'ils transportent, voire inférieures. Il faudra attendre vingt ans et les travaux de James Clerk Maxwell [7] pour pouvoir décrire complètement le comportement de la lumière dans des guides d'aussi faible dimension. Il faudra ensuite attendre le développement de la fibre optique pour pouvoir appliquer en pratique cette théorie avec les ondes lumineuses. Le domaine de l'optique guidée restera donc en suspens après les travaux théoriques de Maxwell pendant près d'un siècle. En effet, au XIX^e siècle et au début du XX^e siècle, les techniques de fabrication de la fibre optique se perfectionnent mais dans le but d'améliorer ses propriétés mécaniques et non pour ses propriétés optiques [8]. D'ailleurs à cette époque, le guidage de la lumière dans le verre ne paraît pas une idée très judicieuse du fait des pertes optiques importantes dans ce matériau. En 1960, l'invention du laser par T. Maiman [9] va relancer le domaine en offrant des sources de lumière puissantes et cohérentes. C'est en effet à cette époque que naissent les télécommunications optiques modernes, avec la démonstration par Charles K. Kao de la première transmission d'information par fibre [10]. Il combina un laser hélium-néon, mis au point seulement 5 ans plus tôt par Ali Javan [11], avec une fibre optique et étudia les différentes sources de pertes optiques. Pour ce travail C. K. Kao recevra le prix Nobel de physique en 2009. Suite à ces travaux, l'optimisation des fibres pour le transport de lumière continua passant de pertes supérieures à 20 dB.km⁻¹ à moins de 0,25 dB.km⁻¹ aujourd'hui. On ne peut, pour l'instant, toujours pas parler d'optique intégrée mais le guidage optique moderne était né.

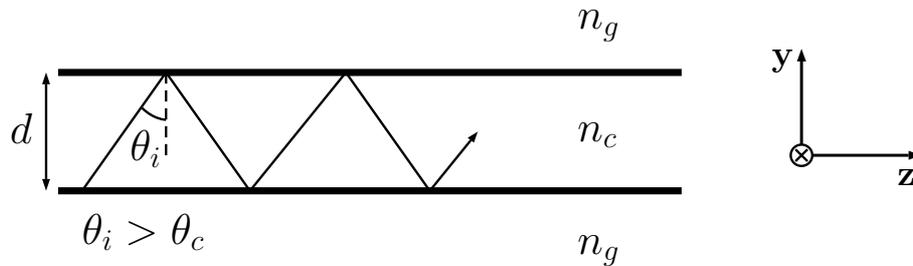


Figure I-3 Schéma illustrant le guidage optique dans un guide plan.

1.1.2. Naissance de l'optique intégrée : fusion de la microélectronique et de l'optique guidée

A la fin des années 50, le premier circuit intégré est fabriqué et au début des années 60, l'industrie de la microélectronique est en pleine expansion. Les techniques de fabrication se perfectionnent et l'on assiste à la naissance de la *Silicon Valley* et d'entreprises qui sont aujourd'hui des multinationales comme Intel, IBM, etc. La fabrication de circuit microélectronique consiste en la reproduction de motifs sur une plaque de silicium pure à 99,999999 % appelée *wafers*. Pour ce faire, une résine photosensible est étalée sur l'ensemble de la plaque. Une fois exposée à la lumière, celle-ci va voir ses propriétés physico-chimiques se modifier et devenir soluble dans certains solvants. Les technologies actuelles utilisent une lumière UV profond ($\lambda=193$ nm) produite par un laser à excimère ArF. Le motif désiré est défini sur un cache, usuellement en chrome, à travers lequel la lumière passe et vient insoler la résine. En répétant cette opération sur l'ensemble de la plaque on obtient un grand nombre de fois le même motif (Figure I-4). Chaque répétition correspondra à une puce électronique. Une fois l'insolation terminée, la résine qui a été exposée est retirée à l'aide d'un solvant. Cette technique, appelée photolithographie, permet ainsi de délimiter les zones qui seront exposés aux prochains procédés. Ceux-ci peuvent constituer en un dépôt de matériaux, en une gravure ou une implantation d'ions pour modifier les propriétés électriques des semi-conducteurs. Ils ont la particularité d'agir sur toute la plaque en même temps, d'où l'importance de pouvoir choisir les zones à exposer à l'aide de la photolithographie. Ensuite la résine est entièrement enlevée par un procédé dit de *stripping* et de nouvelles étapes (photolithographie, gravure, etc.) sont répétées jusqu'à obtention de la structure finale. L'ensemble de ces procédés (photolithographie, gravure, dépôt, *stripping* et d'autres que nous n'avons pas évoqué) sont des procédés dits planaires, c'est-à-dire qu'ils sont réalisés sur une seule face plane, contrairement à une fabrication mécanique où la pièce à usiner est pivotée pour être percer sur différentes directions. Ils constituent depuis les années 60 les techniques de base de fabrication de la microélectronique. Ces procédés ont évolué en complexité depuis, mais le principe demeure aujourd'hui le même.

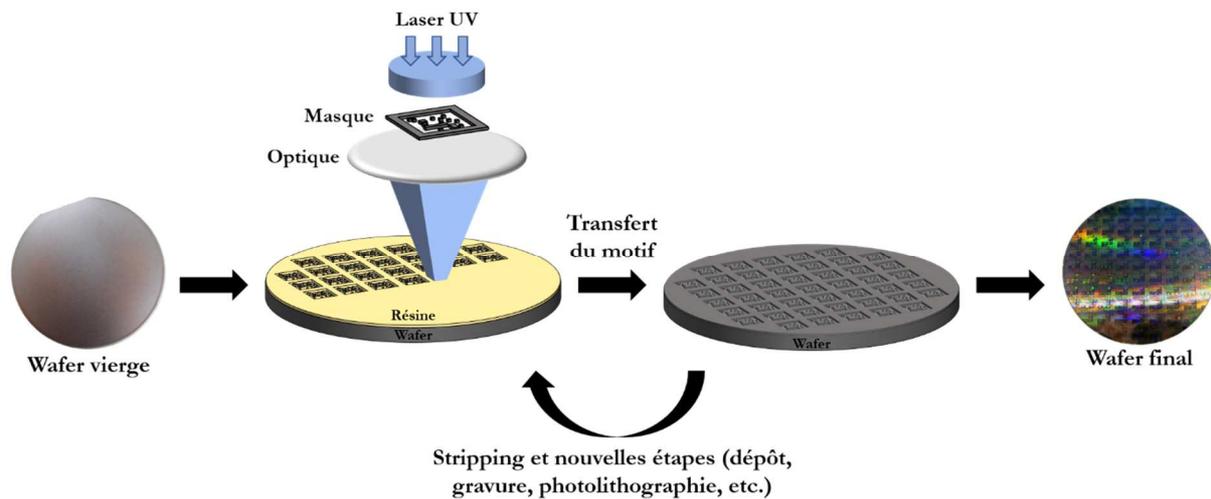


Figure I-4 : Etapes classiques de fabrication en microélectronique : des procédés de photolithographie, gravure, dépôt, etc. sont enchaînés de façon séquentielle jusqu'à aboutir à des puces électroniques fonctionnelles. Les wafers sont ensuite découpés et mis sous packaging pour pouvoir être soudés sur des circuits imprimés.

Ainsi à la même époque, la recherche en optique guidée et l'industrie de la microélectronique sont en plein essor. Alors même que les télécommunications optiques ne sont encore qu'à leur balbutiement (la première fibre optique transatlantique ne sera posée qu'en 1988 [12]), un chercheur des Bell Labs, E. Miller, comprend très vite l'intérêt de la microélectronique pour l'optique guidée. En 1969, il propose d'utiliser les techniques de photolithographie utilisées en microélectronique pour réaliser des circuits d'optique guidée [13]. Il décrit déjà la géométrie et le fonctionnement des principaux composants qui sont toujours utilisés aujourd'hui. L'idée de cette combinaison découle en partie des problèmes liés à l'optique classique dite « de volume ». Les montages optiques sont encombrants et surtout soumis aux instabilités mécaniques et thermiques. Un circuit optique fabriqué sur un support unique s'affranchirait totalement des difficultés d'alignement optique et serait, dans une certaine mesure, insensible aux changements de température. A cette occasion il introduit le terme d'optique intégrée qui est resté d'actualité.

1.1.3. Un circuit en optique intégrée aujourd'hui

Depuis la proposition de E. Miller, de nombreuses démonstrations technologiques ont été faites. Le domaine de l'optique intégrée est passé de la démonstration du simple guidage optique sur puce à la fabrication de véritables démonstrateurs capables de générer, manipuler, transmettre et détecter la lumière. Les technologies les plus avancées ont à leur disposition une bibliothèque de composants très importante exploitant des propriétés d'interférence, de résonance, de couplage optique et d'électro-absorption permettant de remplir de nombreuses fonctionnalités. Mis bout à bout, ces composants forment ce que l'on appelle un circuit photonique intégrée ou PIC (*Photonic Integrated Circuit*) (Figure I-5). Très grossièrement, un PIC complet comprend l'ensemble de la chaîne de détection optique : une source de photons, un ensemble de fonctions optiques permettant le traitement du signal optique, et un photodétecteur, capable de transformer le signal optique en signal électrique que l'on peut ensuite traiter par voie électronique. Le choix et l'agencement de ces composants permettent de réaliser des fonctions complexes, allant de la transmission de données haut-débit [14], à la spectrométrie [15] en passant par le traitement du signal tout optique [16]. Dans un PIC, on distingue usuellement deux grandes familles de composants : les composants passifs et les composants actifs. Les premiers regroupent toutes les fonctions optiques de base ne nécessitant aucun apport d'énergie extérieure (guidage, répartition de puissance, interférométrie, etc.) Les seconds se distinguent par le fait qu'ils nécessitent une

source d'énergie extérieure pour fonctionner. On pense typiquement au laser qui doit être pompé, optiquement ou électriquement, pour fonctionner. Aujourd'hui, les technologies de PIC les plus avancées se font sur substrat silicium (Si) et sur substrat en phosphure d'indium (InP). Elles sont capables de regrouper sur un même circuit tous les composants optiques passifs et actifs. Les efforts de recherche et de développement technologique sont désormais concentrés sur deux axes : l'intégration de l'électronique et de l'optique sur une même puce et l'ajout de nouvelles fonctionnalités, notamment des fonctions de capteurs, grâce à d'autres technologies comme la microfluidique et les microsystèmes électromécaniques (MEMS : *MicroElectroMechanical Systems*).

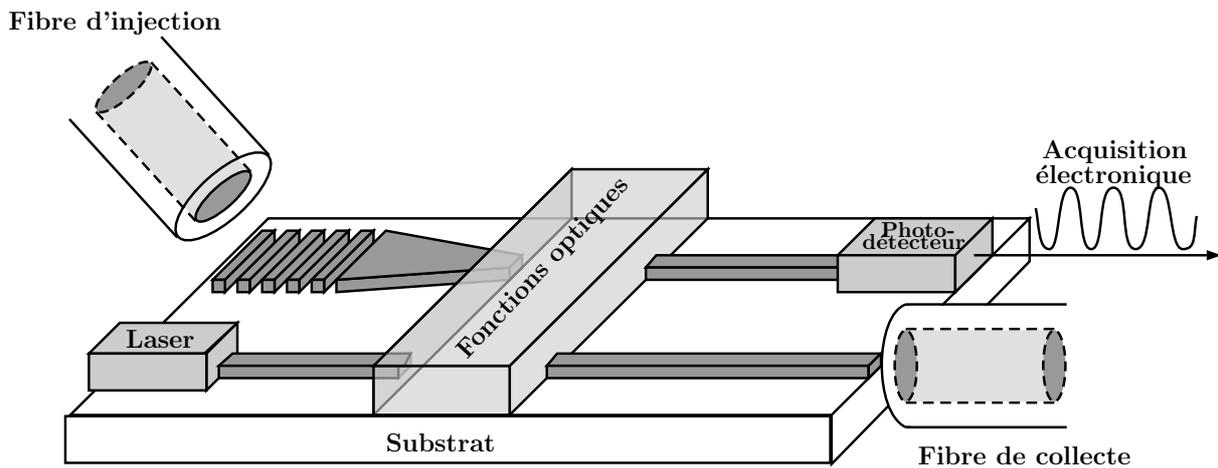


Figure I-5 : Schéma de principe d'un circuit photonique intégré avec différentes façons d'injecter ou extraire la lumière du circuit : couplage par la tranche avec une fibre, couplage par réseau, source laser directement intégrée sur puce et photodétecteur relié à une électronique de lecture.

1.2. Les plateformes actuelles d'intégration

Il faudra attendre seulement un an après la proposition de Miller pour qu'un circuit d'optique intégrée soit fabriqué [17]. D'abord fabriqué sur des substrats polymères, puis sur verre et enfin sur silicium, les circuits optiques n'ont eu cesse de s'améliorer. Avec l'amélioration des techniques de microfabrication, les technologies disponibles aujourd'hui pour la fabrication de circuits optiques intégrés sont très diverses. Celles-ci regroupent un ensemble de procédés de fabrication (photolithographie, gravure, dépôt de matériaux, etc.) adaptés à un substrat dont la nature est propre à chaque technologie. Cette ensemble « procédés-substrat » constitue ce que l'on appelle une plateforme d'intégration ou une plateforme technologique dont le nom est très souvent celui du matériau composant le substrat. Les plateformes photoniques se distinguent par plusieurs caractéristiques qui sont les suivantes :

- Le domaine de transparence en longueur d'onde
- Le substrat utilisé, les matériaux et les procédés de fabrication associés
- Le contraste d'indice Δn et les pertes linéiques en dB.cm^{-1}
- La bibliothèque de composant actifs et passifs

Le premier critère est évident et permet simplement de savoir à quelle longueur d'onde fonctionne la plateforme. C'est un critère important dans le sens où selon l'application visée, on ne cherchera pas à travailler dans le même domaine spectral. Le critère du substrat est également important au regard des applications visées. Par exemple, un PIC dédié à la biologie ne pourra être fait dans un substrat qui n'est pas biocompatible. De plus, les procédés de fabrication, qui sont liés à un type de substrat, n'ont pas tous la même précision et la même fiabilité. Le troisième critère est lié à la compacité et la complexité atteignable par la plateforme. Un contraste d'indice élevé permet de

faire des circuits compacts et de faibles pertes permettent de faire un circuit avec un chemin optique important et de nombreuses fonctions optiques. Enfin, le dernier critère permet de savoir quelles fonctionnalités optiques seront intégrables dans le circuit (source, détection, etc.). Tous ces critères sont importants pour juger du potentiel et de la maturité technologique d'une plateforme d'intégration. A travers ces critères, nous nous proposons ici de faire l'état de l'art des principales plateformes d'intégration disponibles pour la fabrication de PIC.

1.2.1. La plateforme polymère

Les technologies de fabrication sur substrat polymère font partie des techniques de fabrication les plus anciennes en optique intégrée. Elles apparaissent très peu de temps après la proposition de E. Miller. Dès 1970, on découvre la possibilité d'augmenter localement l'indice de réfraction de couches polymères à l'aide d'une exposition par lumière UV [18]. Ces techniques de photopolymérisation seront rapidement appliquées à la fabrication de circuit optique sur substrat polymère [17]. Les techniques de fabrication de guide optique sur polymère sont assez diverses. On peut les regrouper en trois catégories [19] : lithographie classique à base de résine photosensible, lithographie directe et lithographie douce (Figure I-6). La première (Figure I-6a) regroupe les techniques de photolithographie classique utilisées en microélectronique et évoquées précédemment. La technique de lithographie directe (Figure I-6b) utilise un polymère photosensible comme substrat et insole directement le polymère pour le photopolymériser. L'insolation se fait avec un laser, la reproduction des motifs est donc cette fois sérielle ce qui en fait une technique très utile pour le prototypage rapide. Il n'y a en effet pas besoin de fabriquer un masque au préalable. Les parties non insolées sont ensuite enlevées à l'aide d'une chimie sélective. Enfin, les techniques de lithographie douce (Figure I-6c) sont des techniques de microfabrication qui, au lieu d'utiliser des masques suivie d'une exposition UV, utilisent des tampons et moules en élastomère permettant de répéter mécaniquement un motif sur un substrat. Les techniques sont nombreuses et ils seraient long de toutes les énumérer. Une des plus connues est la technique de *nanoimprint* qui consiste à utiliser un moule en PDMS (i.e. Polydiméthylsiloxane) venant presser une résine photosensible qui est ensuite durcie par lumière UV. De récents travaux ont démontré la fabrication de plusieurs couches de circuits empilés à l'aide de techniques de *nanoimprint* [20]. Suivant la technologie adoptée, le contraste d'indice Δn des guides polymères est compris entre 0,03 et 0,5. La compacité de la plateforme peut donc être relativement importante. Les composants disponibles sont tous des composants passifs à l'exception de modulateurs électro-optiques [21]. Les matériaux polymères ne peuvent fournir de gain optique, il n'y a donc pas de source laser ni de photodétecteur réalisable sur cette plateforme. Les solutions les plus avancées aujourd'hui consistent à venir assembler « bout à bout » des diodes lasers, le circuit polymère, et les photodétecteurs [22]. Le domaine de transparence des substrats polymères couvre le domaine du proche UV jusqu'au proche infrarouge ($\Delta\lambda=0,2-2,2 \mu\text{m}$)[23]. On retrouve donc cette technologie sur des applications de type télécom, principalement pour les interconnexions optiques [24] où les pertes par propagation sont de l'ordre de 0,1 dB.cm⁻¹, mais également biologiques en réalisant des circuits de microfluidique dans le polymère [25]. Le très faible coût potentiel des circuits polymères en fait une plateforme très attractive.

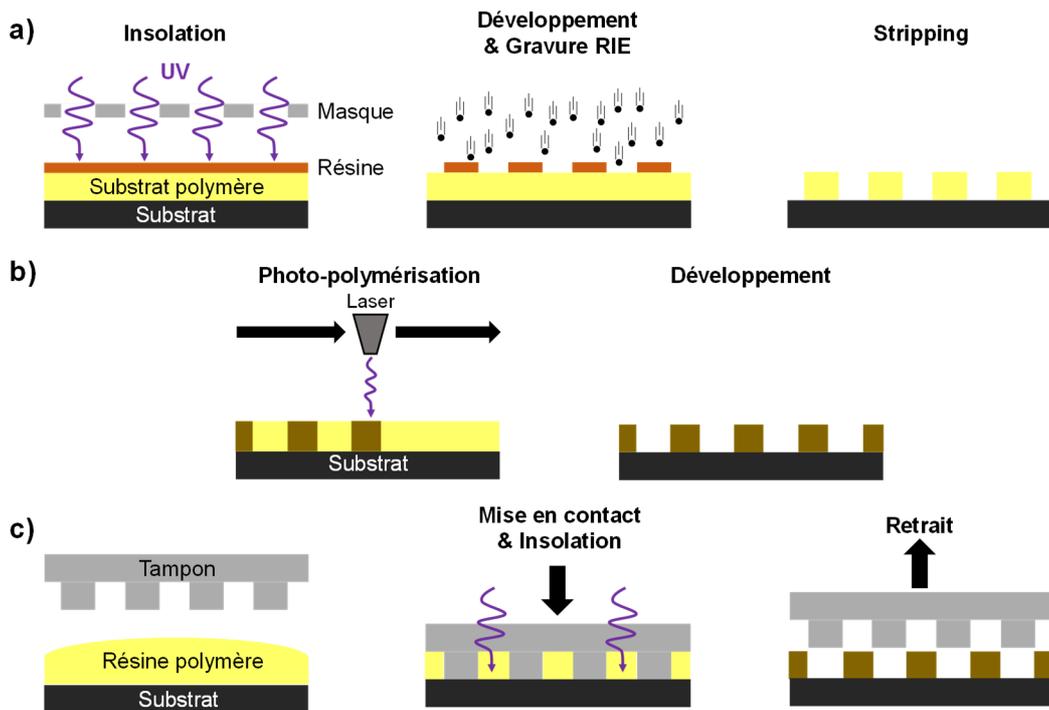


Figure I-6 : Schéma comparatif des trois familles de fabrication de guide optique sur polymère. a) Lithographie classique où une résine durcie par lumière UV vient protéger certaines zones du polymère. Les guides sont définies par une gravure plasma RIE (i.e. Reactive Ion Etching) puis la résine est enlevée par chimie sélective b) Lithographie directe où le substrat polymère est directement insolé. Les parties non insolées sont enlevées par chimie sélective. c) Lithographie douce (ici nanoimprint) qui consiste à venir répéter mécaniquement un motif avec un tampon au lieu de le faire optiquement. Le durcissement du polymère est fait par photopolymérisation UV.

1.2.2. Optique intégrée sur verre

Une autre technologie de fabrication de circuits optiques, apparaissant peu de temps après l'utilisation des polymères, est l'échange d'ions sur verre. Cette technique est connue depuis le Moyen-Age [26] et a été très utilisée à partir du XIX^e siècle pour augmenter la résistance mécanique du verre [27]. Suite à la proposition de E. Miller et à de précédents travaux montrant les effets de guidage optique obtenus après des préparations par échange d'ions [28] [29], l'échange d'ions sur verre est très rapidement envisagé pour fabriquer des guides d'ondes planaires [30]. La première réalisation est faite en 1972 par Izawa et Nakagome [31] qui lance définitivement le domaine. La technique d'échange d'ions sur verre consiste à remplacer des ions relativement mobiles contenus dans le verre (typiquement Na⁺) par des ions de taille et polarisabilité différente (i.e. Tl⁺, Ag⁺, Rb⁺, K⁺, Cs⁺, etc.) [32]. Il en résulte une augmentation de l'indice optique dans la zone de diffusion des ions. L'échange d'ions se fait à partir d'une source qui peut être liquide (sel de nitrate fondus) ou solide (métal). Dans le cas d'utilisation de source liquide, le substrat de verre est placé dans un bain de sel de nitrate fondu après délimitation des zones d'échange par masquage (Figure I-7). Pour le lecteur intéressé, une revue complète et synthétique des différentes variantes d'échange d'ions sur verre a été faite par Tervonen *et al.*[32]. Les guides obtenues par ces procédés de fabrication sont des guides surfaciques à gradient d'indice (i.e. l'indice optique décroît continûment du cœur vers la gaine) qui peuvent être éventuellement enterrés par une étape d'électromigration. Les contrastes d'indice varient suivant les techniques employées. Sur la technologie très commune d'échange d'ions à partir de solution AgNO₃-NaNO₃, on obtient typiquement des contrastes entre $\Delta n=4.10^{-3}$ et $\Delta n=7.10^{-2}$ [33]. La plage de longueurs d'onde utilisable sur ces circuits est limitée par la fenêtre de transparence du verre qui va de $\lambda=450$ nm à $\lambda=2,0$ μ m [34]. Les guides étant obtenues par diffusion, l'interface cœur-gaine n'a par définition pas de rugosité, ceux-ci ont des

perces par propagation très faibles, de l'ordre de 0,1-0,2 dB.cm⁻¹ [35]. L'ensemble des composants passifs sont réalisables par échange d'ions sur verre. Pour les composants actifs, des amplificateurs et lasers sont réalisables en dopant localement le substrat avec des ions spécifiques. Par exemple, les ions néodyme fournissent un gain optique à $\lambda=1,06 \mu\text{m}$ et les ions erbium à $\lambda=1,55 \mu\text{m}$. En revanche, aucun modulateur et photodétecteur n'ont été démontrés à ce jour. Tout comme pour les circuits polymères, la croissance importante du domaine des télécommunications optiques a rapidement orienté le domaine de l'optique intégrée sur verre vers ces applications. Aujourd'hui, des combineurs, diviseurs et multiplexeurs réalisés par échange d'ion sur verre sont commercialisés et utilisés pour les réseaux de télécommunications optiques [36]. Dans le domaine de la recherche, des circuits ont été mis au point pour l'interférométrie astronomique visible et proche infrarouge au VLTI au Chili [37]. Le verre étant un matériau biocompatible, le développement de laboratoire sur puce en échange d'ions sur verre est également un domaine très actif [38].

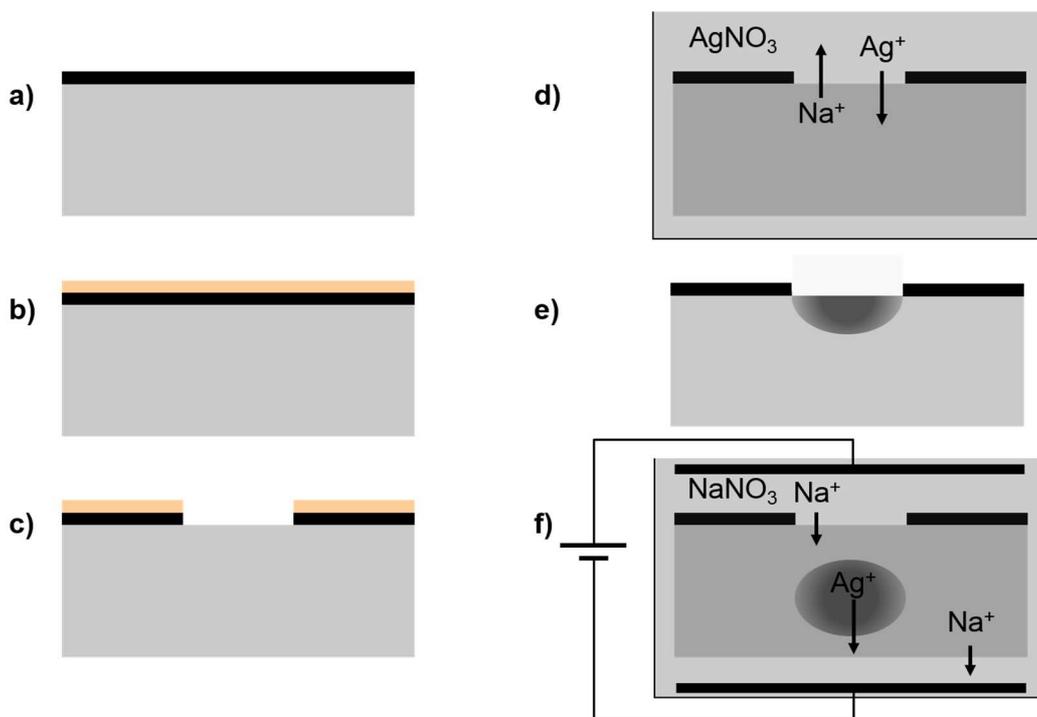


Figure I-7 : Schéma des étapes technologiques de fabrication d'un circuit optique intégré sur verre : a) Dépôt par pulvérisation cathodique d'une couche métallique b) Etalement d'une résine photosensible c) Photolithographie et gravure du masque d) Une fois la résine retirée, le substrat est plongé dans un bain de sel fondu pour procéder à l'échange d'ions au niveau des surfaces laissées accessibles par le masque e) Les guides à gradient d'indice sont obtenus f) Etape facultative d'électromigration pour enterrer les guides dans le substrat (Source Tervonen et al [32]).

1.2.3. Optique intégrée sur InP

Le phosphore d'indium (InP) est un matériau dit III-V car alliant un élément de la colonne III et un élément de la colonne V de la classification périodique des éléments. Plus généralement appelée plateforme III-V, celle-ci utilise des substrats InP sous forme de *wafers* allant de 2" (51 mm) à 3" (76 mm) de diamètre. Les matériaux III-V présentent des propriétés optiques et électro-optiques intéressantes dû à leur bande interdite directe. Ainsi, la plateforme InP a d'abord été utilisée pour la mise au point de lasers et de photodétecteurs à base de semi-conducteurs, avec l'ingénierie de bande qu'offre les alliages de matériaux III-V [39]. La limite entre une cavité laser et un guide optique étant assez ténue, le premier guidage optique dans une structure planaire de GaAs est

démontré expérimentalement un an après [40]. S'en suivront les premiers guides *channel* [41] puis le développement de différents composants passifs (coupleurs [42], AWG [43], etc.). Contrairement aux deux autres plateformes que nous venons de voir, les procédés de fabrication de la plateforme InP sont les mêmes qu'en microélectronique. La différence réside dans le fait que les matériaux III-V étant des contaminants pour la microélectronique classique, ceux-ci ne sont pas « CMOS-compatible », les salles blanches utilisés sont réservés aux matériaux III-V. Aujourd'hui, la plateforme InP possède l'ensemble des briques passives en optique intégrée, mais également actives, c'est-à-dire laser, modulateur et photodétecteur [44]. L'avantage de la plateforme InP réside dans son procédé dit monolithique. Tous les composants sont fabriqués ensemble avec la même famille de procédés. Il n'y a donc pas de soucis d'hybridation de matériaux ou d'éléments supplémentaires, comme on a pu le voir pour la plateforme polymère, qui ne ferait pas partie de procédé de fabrication standard des salles blanches dédiées aux matériaux III-V. La plage de transparence des matériaux III-V commence, pour certains, vers la fin du visible début du proche infrarouge [45] jusqu'à $\lambda=14 \mu\text{m}$ où les phénomènes d'absorption multi-photons et d'absorption par porteur libres deviennent prédominants [46], [47]. Son contraste d'indice $\Delta n \approx 0,3$ [48] est plutôt élevé et les pertes par propagation rapportées dans le proche infrarouge (NIR) ($<1 \text{ dB.cm}^{-1}$ à $\lambda=1,55 \mu\text{m}$) en font une plateforme compacte et très performante. Une de ces limitations réside dans les problèmes liés aux gravures III-V difficiles à maîtriser, produisant une rugosité importante et donc des pertes optiques supplémentaires pour les guides. Sa plage de transparence dans le NIR et ses propriétés électro-optiques ont amené la plateforme InP vers le domaine *telecom/ datacom* avec un certain succès. Les réalisations les plus avancées co-intègrent une grande partie des composants optiques possibles. On pourra citer la réalisation de transmetteurs pour le domaine *datacom* incluant des sources lasers, des modulateurs électro-optiques ainsi que la circuiterie nécessaire au multiplexage de ces sources [49]. Dans le cadre de projets européens, la technologie est suffisamment mature pour que des instituts de recherche appliquée ouvrent des lignes pilotes pour les entreprises, afin que celle-ci puissent fabriquer des prototypes répondant à leurs besoins [50]. Des entreprises comme Infinera® commercialisent des PICs basés sur la technologie InP [51].

1.2.4. Optique intégrée sur silicium

Bien que proposé par E. Miller dès 1969, ce que l'on appelle aujourd'hui photonique sur silicium n'apparaît qu'en 1985. C'est à cette date que Richard A. Soref et J. P. Lorenzo démontre expérimentalement les premiers composants optiques sur silicium fonctionnant à une longueur d'onde de 1,3 et 1,6 μm [52]. Ces premiers guides sont de type *rib*, constitués de silicium intrinsèque épitaxié sur un substrat silicium fortement dopé. Suite à ces travaux, de nombreux matériaux ont été utilisés pour fabriquer des guides. En effet, une des forces de la plateforme silicium est la diversité des substrats, des matériaux et des procédés disponibles. Il est ainsi possible de faire des guides aux géométries et composition très diverses. Tout d'abord, on peut distinguer trois substrats différents utilisables en salle blanche CMOS compatible : le substrat Si, le substrat SOI et le substrat SOS (Figure I-8). Le substrat silicium (Si) est le substrat historique de la microélectronique. Il consiste en un *wafers* de Si pure de 200 mm à 300 mm de diamètre. Le substrat de silicium sur isolant (SOI : *Silicon On Insulator*) est lui aussi un *wafers* de silicium mais sur lequel est présente une couche d'oxyde de silicium enterrée (BOX : *Buried Oxide*) sous la surface faite de silicium cristallin. Enfin, le substrat silicium sur saphir (SOS : *Silicon On Sapphire*) consiste en un *wafers* de saphir avec une couche de silicium cristallin à sa surface. Son diamètre maximal est limité à 100 mm. A partir de ces substrats, de nombreuses géométries de guide ont été fabriquées. Les configurations les plus courantes sont sous forme de guide *ridge*, *strip* ou *channel* avec des empilements très divers : SiON/SiN/SiO₂ [53], SiN/SiO₂ [54], poly-Si/SiO₂ [55], Si/SiO₂, etc. D'autres géométries plus exotiques et exploitant d'autres phénomènes de guidage ont été démontrées comme des guides

résonant anti-réfléctif (ARROW : *Anti-reflecting resonant optical waveguides*) [56] ou des guides à cristaux photoniques [57].

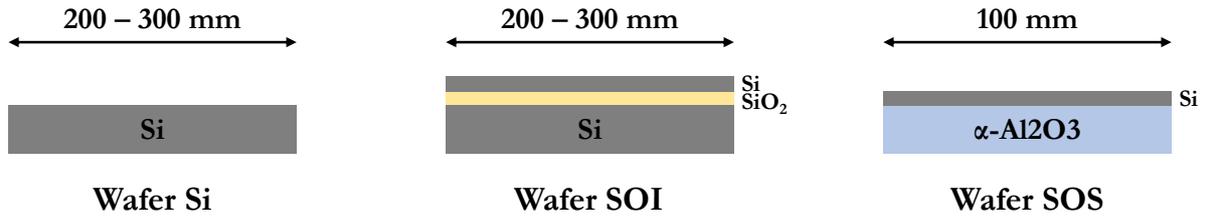


Figure I-8 : Schéma des trois types de substrats/wafers disponibles en salle blanche CMOS-compatible avec leur diamètre.

Cette pluralité de solutions offertes fait que la plateforme silicium a une plage de fonctionnement théorique comprise entre $\lambda=300$ nm et $\lambda=100$ μm [58]. Le contraste d'indice dépend beaucoup de la technologie de guide adoptée. Celui-ci peut aller de $\Delta n=0,001$ pour un guide n/n^+ Si [52] jusqu'à $\Delta n=2,03$ pour un guide SOI [59]. Comme pour les précédentes plateformes, les perspectives industrielles dans le milieu *telecom/ datacom* ont poussé les efforts de recherche vers des composants fonctionnant à $\lambda=1,3-1,55$ μm . Il s'avère que des modulateurs électro-optiques haut débit [60] et des photodiodes performantes à base de germanium [61] peuvent être intégrés monolithiquement pour ces longueurs d'onde. En revanche, le silicium étant à *gap* indirect, il n'est pas possible d'obtenir un gain optique et donc impossible de fabriquer une source laser ou un amplificateur optique. Cette difficulté a été contournée par l'hybridation de lasers III-V sur silicium, originellement démontrée par le Leti et UCSB en 2005 puis par Intel [62]. Parmi les techniques possibles, celle développée au CEA-Leti consiste à rapporter par collage moléculaire une vignette de matériaux III-V contenant le milieu à gain sur la face supérieure d'un guide SOI [63]. La vignette est ensuite mise en forme (gravure, contacts électriques, etc.). Le guide optique et le laser ont une structure permettant le passage de la lumière entre la cavité laser et le guide optique (Figure I-9). Certaines équipes ont également intégré de façon hybride des photodétecteurs III-V [64].

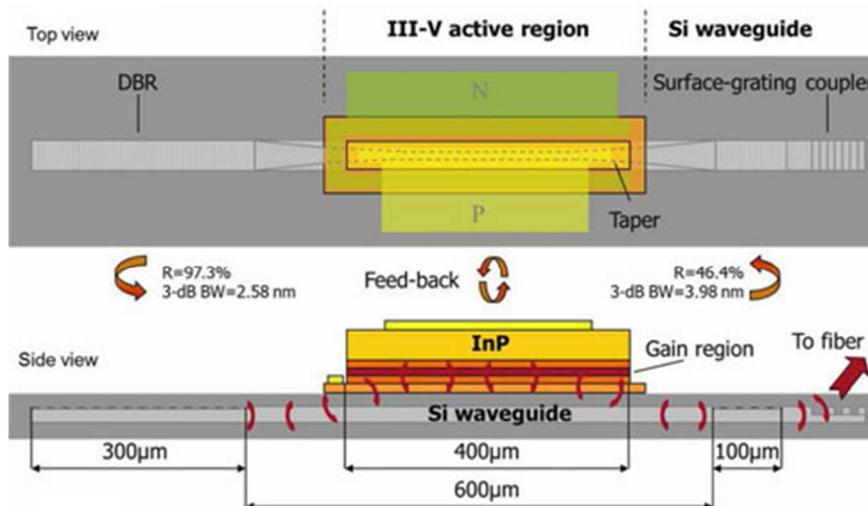


Figure I-9 : Schéma avec vue de dessus et en coupe du fonctionnement d'un laser III-V hybride sur silicium. Les miroirs délimitant la cavité sont gravés dans le guide silicium. La structure permet le passage de la lumière entre la vignette III-V et le guide. Le tout forme une cavité laser hybride. (Source : Ben Bakir et al. [65]).

La plateforme SOI est aujourd'hui un des fers de lance de la photonique silicium. Elle est vue comme la réponse aux problèmes de vitesse de transfert de données dans les *data-centers*, mais également entre les puces mémoires et les processeurs dans les circuits intégrés. La maturité de la plateforme est telle que des sociétés comme Luxtera® [66] ou Mellanox® (anciennement Kotura) [67] commercialisent déjà des solutions pour les *data-centers*. Les perspectives de co-intégration de l'électronique et de l'optique font que d'importantes sociétés de la microélectronique comme Intel, IBM ou STMicroelectronics se tournent également vers la photonique silicium (Figure I-10). Bien sûr, la photonique silicium n'est pas cantonnée qu'au domaine *datacom*. Des équipes travaillent également sur le traitement du signal tout-optique [68] ou des laboratoires sur puce pour la biologie [69]. La plateforme silicium offrant la possibilité de co-intégrer sur une même puce différentes technologies, des chercheurs exploitent cette possibilité pour fabriquer des capteurs optomécaniques, c'est-à-dire mêlant l'optique et la mécanique, en fabriquant des circuits optiques alliés à des MEMS [70].

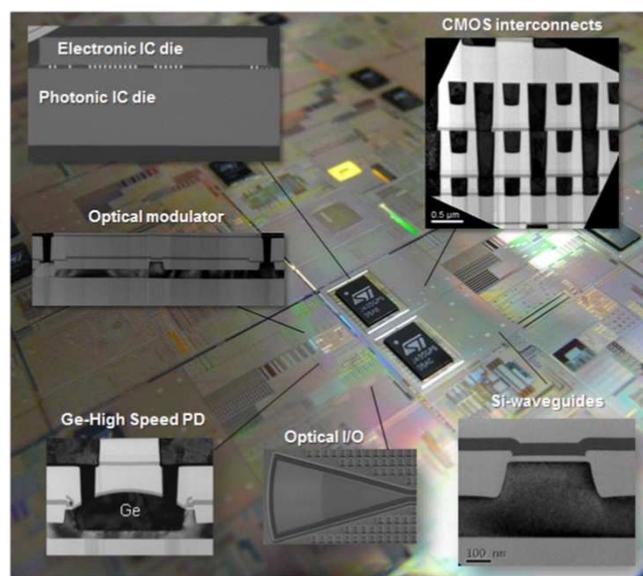


Figure I-10 : Puce de photonique silicium sur SOI fabriqué par la société STMicroelectronics. La puce contient tous les composants actifs et passifs, cités à l'exception de la source laser. Le tout est co-intégré avec un circuit électronique CMOS par technologie 3D. (Source : F. Bœuf [71])

1.3. Conclusion : *more Moore* ou *more than Moore* ?

1.3.1. Avènement de la loi de Moore de la photonique pour les telecoms

Nous venons de passer en revue les principales plateformes technologiques permettant de réaliser des circuits optiques intégrés (Tableau I-1). La première chose frappante est de voir à quelle point le domaine des *telecom/datacom* a été un moteur dans l'apparition et le perfectionnement de toutes ces plateformes. Quasiment chacune de ces plateformes a réussi à commercialiser un élément de la chaîne de communication au cours des années 2000 [72]. Cependant, aujourd'hui les deux plateformes en pleine expansion sont la plateforme SOI et la plateforme InP. La recherche en optique intégrée est actuellement en train de connaître la même transformation que l'électronique il y a 50 ans : d'une recherche purement axée sur le composant, celle-ci se diversifie et l'on voit apparaître une recherche plus orientée vers le système [73]. En témoigne la complexification des circuits photoniques ces dix dernières années avec une augmentation très importante du nombre de composants constituant un circuit, préfigurant une « loi de Moore pour la photonique » (Figure I-11a). On constate que la photonique sur SOI a mis plus de temps à monter en maturité du fait

des difficultés techniques pour co-intégrer des sources lasers. Ces difficultés étant surpassées, la plateforme SOI supplante maintenant la plateforme InP en terme de complexité. Elle a en effet trois avantages pour elle. Tout d'abord, la plateforme SOI a quasiment rattrapé la plateforme InP en terme de performances (pertes, débits possibles avec les modulateurs, etc.) [74]. Ensuite, la taille des substrats est de 200 ou 300 mm de diamètre contre 76 mm maximum pour l'InP. Cela laisse supposer des économies d'échelle importantes une fois la technologie au stade de l'industrialisation. Enfin, le dernier est le rendement beaucoup plus important sur la plateforme SOI et ce d'un ordre de grandeur (Figure I-11b). Cela est dû au fait que les procédés III-V sont beaucoup moins contrôlés que les procédés silicium. Ainsi, en plus d'une surface moindre, les *wafers* InP n'offrent que peu de puce fonctionnelle, obligeant les concepteurs à se préoccuper des variabilités technologiques plutôt que de la conception [74], ce qui est un frein pour l'industrialisation. La plateforme SOI est donc beaucoup plus reproductible et fiable.

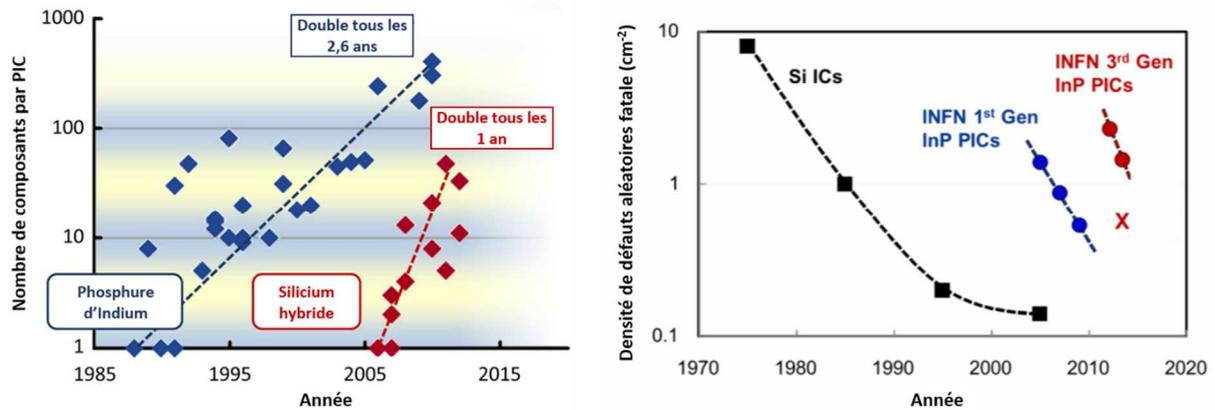


Figure I-11 : Montée importante en maturité de la plateforme SOI par rapport à la plateforme InP avec a) l'augmentation de la complexité des circuits mesurée en nombre de composants par circuit [75] et b) l'amélioration du taux de défauts par cm² pour les deux plateformes [76].

Ces deux avantages combinés font que la plateforme SOI sera, à court terme, capable de répondre à un marché qui, selon les prédictions, s'annonce très important (Figure I-12). Ajouter à cela les possibilités de co-intégration avec les circuits électroniques, les technologies MEMS et la microfluidique, la plateforme SOI semble également être une solution viable à moyen et long terme pour développer des applications en dehors des *telecom/datacom*.

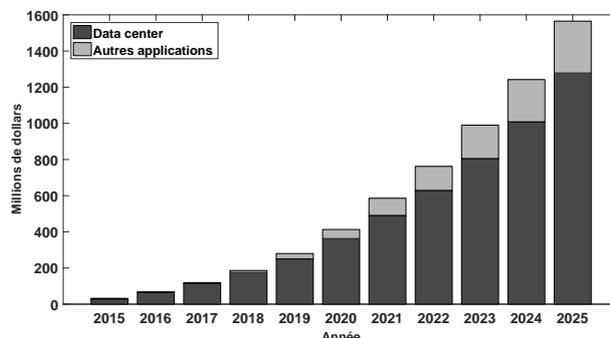


Figure I-12 : Prévisions de croissance du marché de la photonique sur silicium (Source : Yole Développement [77])

1.3.2. Et demain ?

Le domaine de l'optique intégrée est donc aujourd'hui nettement dominé par des circuits fonctionnant aux longueurs d'onde proche infrarouge ($1,33 \leq \lambda \leq 1,55 \mu\text{m}$) pour le domaine

telecom/datacom. Comme nous venons de le voir, ce domaine de recherche est aujourd'hui très avancé avec le triomphe de la plateforme SOI. Le choix de ces longueurs d'onde a été purement dicté pour des raisons de pertes optiques dans les fibres. Cependant le spectre électromagnétique de la lumière est loin d'être limité à cette simple gamme et les différents niveaux d'énergie accessibles suivant la longueur d'onde peuvent permettre d'exploiter de nouveaux phénomènes. Dans cette thèse, nous proposons d'aller au-delà du domaine proche infrarouge *telecom* en allant vers des circuits exploitant le domaine de l'infrarouge moyen (MIR) pour étendre les fonctionnalités et les applications de l'optique intégrée.

| Plateforme | Pertes typiques (dB.cm ⁻¹) | Contraste d'indice Δn | Plage de transparence $\Delta\lambda$ (μm) | Composants actifs | Applications courantes |
|--------------------------|--|--|---|---|---|
| Polymère | 0,1 | 0,03 - 0,5 | 0,2 - 2,2 | <u>Monolithique</u> : - Modulateur EO | Datacom : 1,3-1,55 μm Lab-on-chip |
| Echange d'ions sur verre | 0,1 - 0,2 | 0,004 - 0,07 | 0,45 - 2,0 | <u>Monolithique</u> : - Laser et amplificateur ($\lambda=1,06 \mu\text{m}-\lambda=1,55 \mu\text{m}$) | Datacom : 1,3-1,55 μm Lab-on-chip |
| InP | <1,0 | 0,3 | 0,9 - 14 | <u>Monolithique</u> : - Modulateur EO - Photodiode - Laser et amplificateur | Datacom : 1,3-1,55 μm |
| Si / SOI / SOS | <1,0 | 0,001 - 2,03 <u>SOI</u> : 2,03 <u>SOS</u> : 1,73 | 0,3 - 100 | <u>Monolithique</u> : - Modulateur - Photodiode Ge <u>Hybride</u> - Laser III-V - Photodétecteur III-V | Datacom : 1,3-1,55 μm Lab-on-chip |

Tableau I-1 : Récapitulatif des caractéristiques principales de chaque plateforme d'intégration.

2. Pourquoi aller vers le moyen infrarouge ?

Nous venons, à travers une approche historique, de faire un état des lieux des différentes plateformes technologiques existantes, de leurs principales applications et de leur degré de maturité technologique. Nous allons maintenant nous attacher à montrer en quoi il est justifié de vouloir étendre l'optique intégrée au domaine de l'infrarouge moyen. Le développement d'une nouvelle technologie doit réunir plusieurs prérequis. Tout d'abord, elle doit permettre de faire quelque chose de nouveau qui ne pouvait être fait avant : observer de nouveaux phénomènes physiques, faire des mesures plus précises ou dans des environnements plus rudes (vide, température extrême, etc). Deuxièmement, il faut s'assurer qu'un minimum de prérequis techniques soient disponibles. Typiquement, on ne peut mettre au point un circuit photonique SOI sans source laser permettant de le caractériser. Après avoir défini ce qu'est le domaine MIR, nous montrerons, à travers deux exemples, en quoi les applications potentielles qu'il offre sont intéressantes pour l'optique intégrée. Enfin un état des lieux sera fait sur les équipements infrarouges qui ont longtemps été un obstacle pour le développement d'une technologie de PIC MIR.

2.1. Un fort potentiel applicatif

2.1.1. Interaction moléculaire

Quel que soit leur état physique, solide, liquide ou gazeux, l'ensemble des corps qui nous entoure est composé de molécules. Celles-ci peuvent être relativement simples et composées de quelques atomes, comme pour des gaz communs à l'image du dioxyde de carbone (CO₂) ou du méthane (CH₄). Elles peuvent également être bien plus complexes dans le cas d'hydrocarbures (octane : C₈H₁₈) ou de protéines (phénylalanine : C₉H₁₁NO₂). Sous l'effet de l'agitation moléculaire, les molécules sont soumises à une agitation interne et bougent selon différents degrés de liberté : rotation, élongation, torsion, etc. Les modes de résonances mécaniques qui en découlent sont liés à des transitions énergétiques entre différents niveaux d'énergie. On distingue les transitions entre des niveaux électroniques, des niveaux vibrationnels et rotationnels, chacun mettant en jeu des énergies de plus en plus faibles. Les transitions vibrationnelles se font en conjonction avec des transitions rotationnelles. On les appelle transitions rovibrationnelles et sont spécifiques à des liaisons chimiques (méthyle, alkyle, cycles aromatiques, etc.) (Figure I-13). Ces modes de résonance des molécules peuvent être excités à l'aide d'une source de lumière dont la longueur d'onde est adaptée. En terme énergétique, les transitions rovibrationnelles sont comprises entre une centaine et quelques dizaines de meV, ce qui correspond à des photons dont la longueur d'onde est comprise entre 2 μm et 25 μm soit une partie du domaine infrarouge. La définition du domaine MIR est relativement changeante suivant les domaines et les applications. Dans ce manuscrit, nous considérerons que le domaine MIR est compris dans le domaine de longueurs d'onde $2 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 20 \mu\text{m}$. Les photons appartenant à ce domaine ont une énergie comprise entre 62 meV et 620 meV. Nous définissons également le nombre d'onde $\sigma=1/\lambda$, souvent utilisé dans ce domaine car étant proportionnel à l'énergie des photons contrairement à la longueur d'onde.

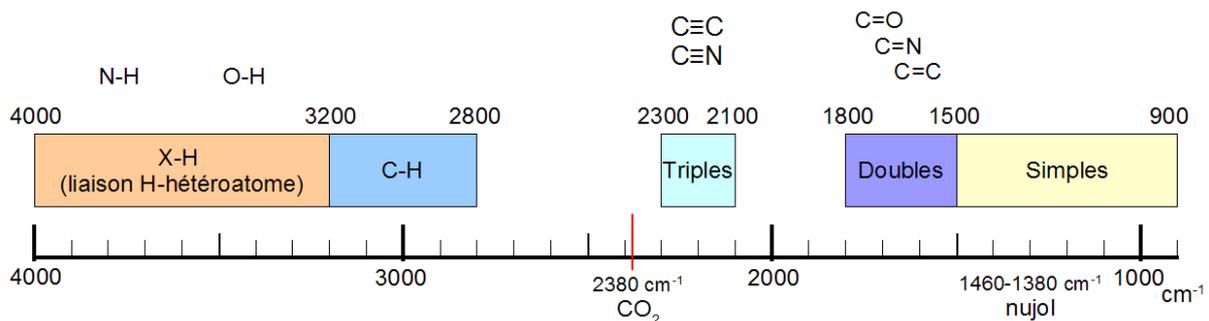


Figure I-13 : Domaines d'absorption des molécules pour différents types de liaisons chimiques (Source : Wikipédia [78])

2.1.2. Détection et mesure de gaz à l'état de trace

Le domaine du moyen infrarouge est donc un domaine énergétique où les molécules présentent des modes de résonances fondamentaux. Pour les gaz, cela se traduit par des empreintes uniques d'absorption. Ceux-ci présentent des pics d'absorption qui leur sont spécifiques, ce qui permet de les discriminer et de mesurer leurs concentrations (Figure I-14).

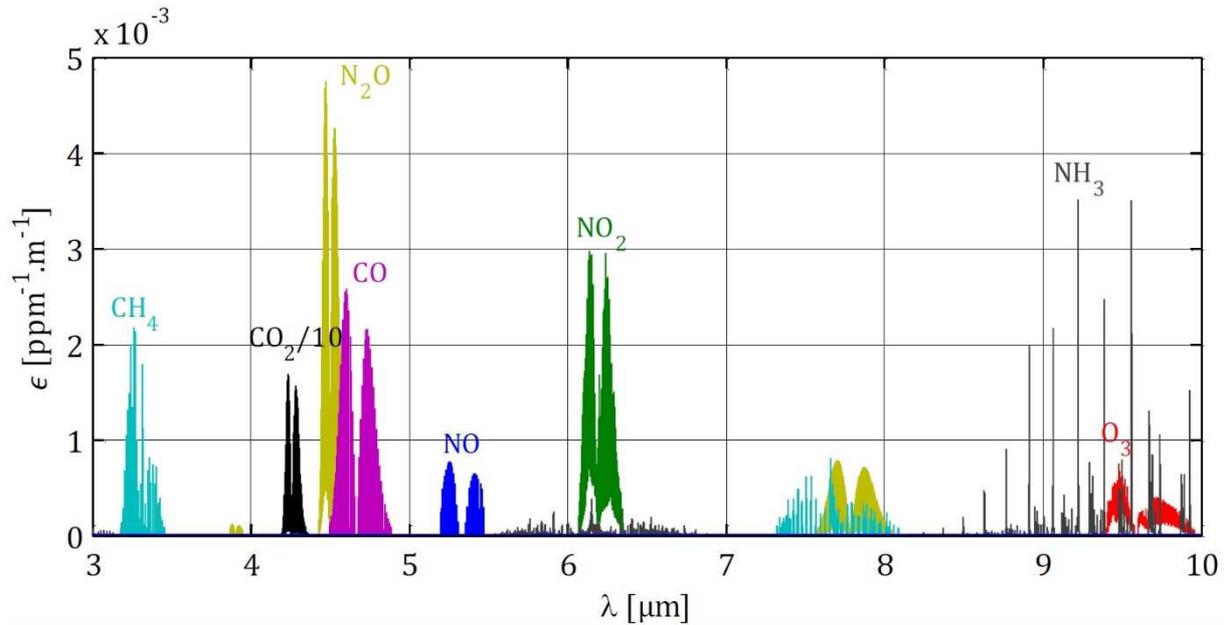


Figure I-14 : Spectre d'absorption (absorptivité molaire) de gaz atmosphériques communs (Source : Thèse de A. Lefebvre [79])

Cette propriété est exploitée dans la mesure de gaz à l'état de trace, c'est-à-dire des quantités de gaz allant du ppm (*i.e.* partie par million) au ppb (*i.e.* partie par milliard) voire ppt (*i.e.* partie par billion). On peut ainsi surveiller des concentrations de gaz pour l'étude de l'environnement, pour l'amélioration de l'habitat ou pour les rejets toxiques des cheminées d'usine [80]. Quelle que soit la technique de mesure employée, celle-ci repose sur l'absorption des gaz décrite par la loi de Beer-Lambert spécifiant l'intensité I d'un faisceau lumineux après la traversée une couche de gaz :

$$I = I_0 \cdot e^{-\epsilon c L} \quad (1)$$

Où, I_0 est l'intensité initiale du faisceau, ϵ le coefficient d'absorptivité du gaz, c la concentration du gaz et L la longueur d'interaction entre le gaz et le faisceau (*i.e.* la longueur du chemin optique). Parmi les techniques employées pour la mesure, on peut distinguer celles utilisant des sources larges bandes dites NDIR (*Non Dispersive InfraRed*) et celles utilisant des rayonnements monochromatiques. Les premières utilisent un corps noir, c'est-à-dire un matériau chauffé à haute température, émettant sur l'ensemble du moyen infrarouge selon la loi de Planck. Elles sont appelées non dispersives car l'ensemble du rayonnement émis interagit avec le gaz. En opposition, les deuxièmes utilisent soit un élément dispersif comme un prisme ou un réseau pour obtenir un rayonnement monochromatique à partir d'une source large bande, soit utilisent un ou plusieurs lasers. La méthode de détection peut se baser directement sur l'absorption ou sur d'autres changements de propriétés du gaz. Pour les systèmes NDIR, c'est la première solution qui est très souvent utilisée. L'ensemble du spectre émis traverse un échantillon de gaz, puis arrive sur un détecteur sur lequel un filtre est placé pour ne détecter que les variations d'intensité liées à l'espèce chimique d'intérêt. Un deuxième détecteur placé sur une voie de référence sans la présence du gaz permet de connaître l'intensité initiale I_0 . La différence des deux mesures permet de remonter à la concentration du gaz. Dans le cas de technique dispersive, il est également possible d'exploiter directement la loi de Beer-Lambert. Cependant il peut être intéressant d'exploiter le changement d'autres propriétés du gaz pour en détecter sa concentration. C'est le cas, par exemple, de la photoacoustique où une source laser est modulée en amplitude à une fréquence acoustique (*i.e.* \sim kHz). En absorbant le rayonnement électromagnétique, le gaz s'échauffe et s'étend, puis se

contracte en refroidissant. La répétition des détentes et contraction du gaz se fait à la fréquence de modulation du laser, générant une onde acoustique détectée par un ou plusieurs microphones. Pour le lecteur intéressé, une revue complète des techniques de détection de gaz a récemment été faite par Hodgkinson *et al.* [81]. Le défaut principal de ces systèmes de détection est leur volume (Figure I-15), en particulier ceux basés sur l'absorption directe qui nécessite de longue cavité pour atteindre une sensibilité élevée. Suivant les absorptivités molaires des gaz, les chemins optiques peuvent aller de quelques centimètres à plusieurs kilomètres pour atteindre la sensibilité nécessaire.



Figure I-15 : Exemple de système de mesure de gaz : a) Système NDIR avec détection dans une cellule multipassage pour la mesure de NO , NO_2 , CO , HCl , HF et SO_2 [82] b) Cellule photoacoustique de l'entreprise Gasera [83].

2.1.3. Diagnostic clinique

Dans le domaine de la biologie, le diagnostic clinique passe souvent par l'identification de certains types de cellule. Pour cela, on procède à une biopsie, c'est-à-dire à un prélèvement *in situ* d'un échantillon biologique, qui est ensuite découpé et mis sur une lame de microscope pour analyse par des anatomo-pathologistes. La lumière visible au microscope permet de faire une première observation morphologique mais certaines structures ne sont parfois pas distinguables (Figure I-16a). Classiquement, ce problème est résolu grâce à des colorations histologiques (Figure I-16b) qui vont permettre de distinguer d'autres structures, mettre en évidence la présence de certains constituants chimiques (fer, ADN, ARN) ou faire la différence entre des types de cellules. Cependant, ces colorations manquent parfois de spécificités et une technique plus récente est alors utilisée : la fluorescence *in situ*. Celle-ci consiste à greffer chimiquement des marqueurs fluorescents à des protéines. Ces fluorophores sont ensuite excités à l'aide d'un laser et réémettent ensuite de la lumière dans le domaine visible pour pouvoir être observables au microscope. On peut ainsi distinguer très précisément la composition des cellules (Figure I-16c) et même suivre des interactions moléculaires à l'échelle de la cellule. Cette technique de marquage est particulièrement utilisée pour la détection de virus comme celui de la grippe. On parle alors de technique d'immunofluorescence. La difficulté principale réside dans la mise au point de marqueurs spécifiques aux molécules que l'on souhaite observer [84]. Faute de fluorophores adaptés, certaines réactions biologiques ou certains virus ne peuvent être détectés. A cela s'ajoute également le problème du photoblanchiment des fluorophores. Leur durée de vie est limitée et leur propriété de fluorescence disparaît dans le temps, empêchant l'observation sur des temps longs.

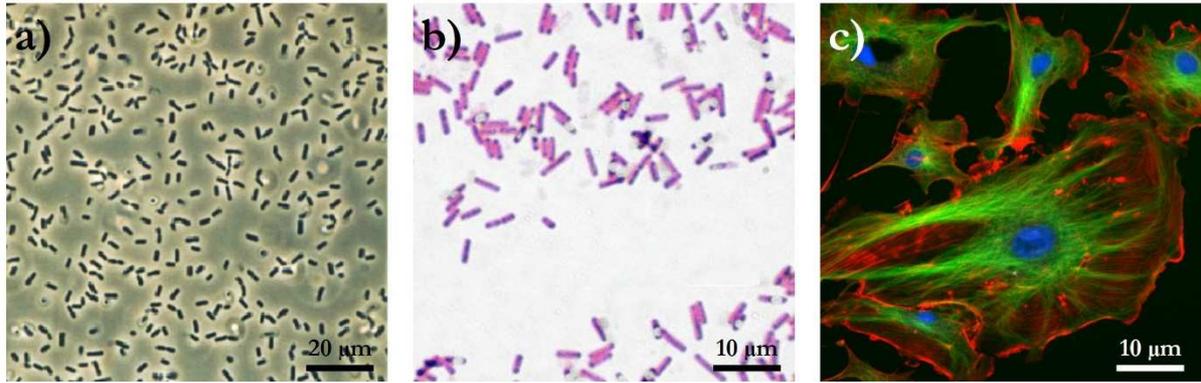


Figure I-16 : Trois observations biologiques au microscope à l'aide de différentes techniques de coloration : a) Colonies de bactéries (*Bacillus subtilis*) sans coloration spécifique [85]. b) Bactéries (*Bacillus subtilis*) répondant positivement à la coloration de Gram (couleur violette au lieu de rose claire) indiquant qu'elles ne sont dotées que d'une simple paroi [86]. c) Cellules endothéliales bovines marquées par trois fluorophores permettant de distinguer le noyau (bleu), les microtubules (vert) et les filaments d'actine (rouge) [87].

Pour contourner ces limitations, l'utilisation d'illumination MIR est récemment apparue dans le domaine de la recherche biologique, avec la commercialisation de microscope utilisant des lasers émettant dans ce domaine [88]. Ce type d'équipement permet d'obtenir des images à différentes longueurs d'ondes. En utilisant les propriétés d'absorption des protéines dans le MIR, il est ainsi possible de faire des diagnostics sans marquage [89] contrairement aux techniques de colorations de fluorescence nécessitant une préparation chimique.

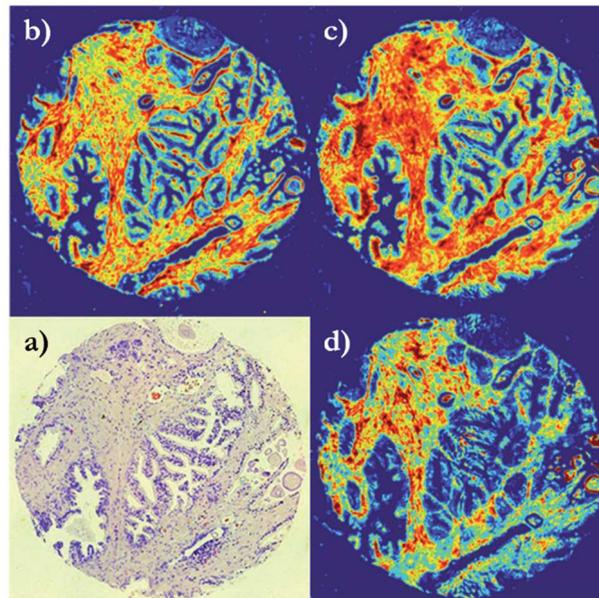


Figure I-17 : Image prise d'une biopsie de la prostate avec le microscope Spero™ de Daylight Solutions dans a) le domaine visible, b) à $\sigma=1652 \text{ cm}^{-1}$, c) à $\sigma=1524 \text{ cm}^{-1}$ et d) à $\sigma=1236 \text{ cm}^{-1}$ (Source : Pilling et al. [89]).

2.1.4. Conclusion : vers la miniaturisation

La détection de gaz et le diagnostic clinique ne sont, bien sûr, pas les seuls champs d'applications où le MIR a un apport significatif. La question est également de savoir l'apport que pourraient avoir les technologies d'intégration pour ces deux exemples. Pour la détection de gaz, l'optique intégrée pourrait régler le problème de compacité des systèmes de mesure. De récents développements tendent à miniaturiser les capteurs de gaz, en exploitant les capacités de co-intégration qu'offre le

silicium. Notamment, le CEA-Leti travaille sur un laboratoire sur puce contenant à la fois les sources lasers MIR, la circuiterie photonique ainsi qu'une chambre photoacoustique [90], [91] (Figure I-18). Un tel objet présente plusieurs avantages : sa petite taille permet d'envisager des applications embarquées, il présente une très grande stabilité mécanique et une très grande sensibilité car la technique de mesure choisie voit sa sensibilité augmentée avec la miniaturisation. On voit ici l'importance d'une plateforme d'intégration capable de co-intégrer différentes technologies : hybridation III-V pour les sources lasers, photonique CMOS pour les guides optiques et MEMS pour la photoacoustique.

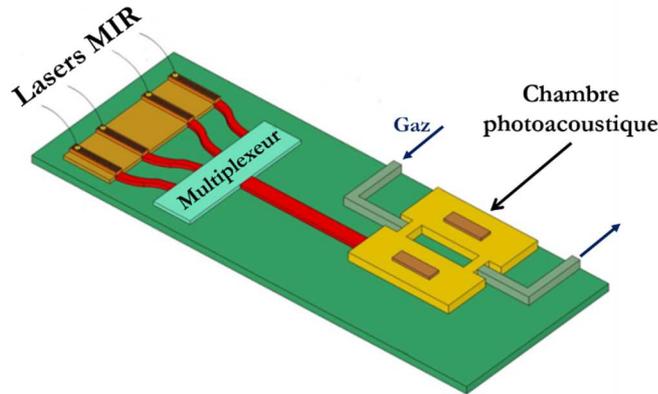


Figure I-18 : Schéma de principe du capteur de gaz développé au CEA-Leti co-intégrant les sources lasers, la circuiterie optique et un capteur photoacoustique.

Pour le diagnostic clinique, de nombreuses équipes travaillent sur des laboratoires sur puce capables de trier et d'identifier de potentiels éléments pathogènes (bactéries, virus, etc.). Le but est d'avoir des systèmes tout-en-un utilisant de très faibles volumes d'échantillon et pouvant être utilisés de façon autonome et nomade. Le diagnostic devient immédiat et ne se fait plus dans un laboratoire d'analyse médical mais directement auprès du patient. C'est ce qu'on appelle aujourd'hui le *point-of-care*. Afin de réaliser de tels systèmes, on utilise de la microfluidique capable de véhiculer les échantillons qui sont très souvent sous forme liquide (sang, plasma, salive, etc.). Afin de détecter les agents pathogènes, le marquage et l'hybridation sont très utilisés. Pour cela une préparation chimique est nécessaire. Celle-ci est soit appliquée sur la surface de détection soit directement sur l'échantillon à analyser. Dans le premier cas, les agents pathogènes d'intérêts vont alors s'hybrider sur cette surface. Dans le deuxième cas, ce sont des marqueurs fluorescents qui sont hybridés sur les agents pathogènes. Un système optique est alors ensuite nécessaire pour exciter et mesurer la réponse des fluorophores. L'équipe de Ozelik *et al.* [92] a récemment mis au point une puce combinant la microfluidique et l'optique intégrée pour détecter des virus préalablement marqués (Figure I-19). L'optique intégrée MIR permettrait potentiellement de s'affranchir du marquage chimique, à l'image de ce qui est fait avec le microscope Spero™. A travers ces deux exemples, on voit donc bien l'intérêt de l'optique intégrée MIR pour l'amélioration des capteurs et la mise au point de nouvelles techniques de diagnostic. Ces exemples ne se veulent pas exhaustifs et d'autres applications sont possibles.

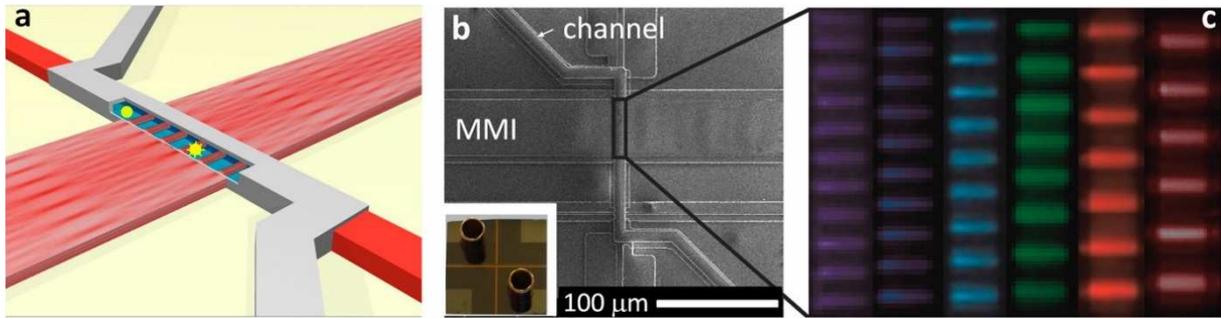


Figure I-19 : Laboratoire sur puce exploitant le multiplexage en longueur d'onde et le marquage fluorescent pour la détection de virus unique. a) Un canal microfluidique (en gris) fait circuler un analyte contenant les virus marqués. Ce canal croise un guide d'onde multimode venant exciter les molécules fluorescentes b) Image au microscope électronique à balayage ainsi qu'une photographie montrant la puce complète avec deux réservoirs d'analyte. c) Photographie des spots d'excitation créés par le guide multimode (Source : Ozcelik et al. [92])

2.2. Des sources lasers disponibles

Les circuits d'optique intégrée ont besoin d'une source de lumière cohérente pour être caractérisés. Dans le domaine MIR, la première source laser disponible a été un accélérateur d'électrons, appelée aussi synchrotron. Il est usuellement utilisée pour sa capacité à générer des faisceaux de rayons X très intense comme à l'ESRF de Grenoble [93] mais les synchrotrons sont également capables d'émettre dans le domaine infrarouge. Faisant partie de la classe des grands instruments avec des dimensions allant de quelques mètres à plusieurs kilomètres, ce type de source est peu adaptée pour l'optique intégrée. Dans les années 60, les premiers lasers à base de sel de plomb (*i.e.* PbS, PbSe, PbSnTe, etc.) sont mis au point [94]. Ils constituent les premières sources compactes infrarouges. Leur principal inconvénient vient du fait qu'ils ne fonctionnent qu'à température cryogénique et sont donc peu pratiques à utiliser. Dans les années 90, deux nouvelles sources lasers MIR à base de matériaux III-V sont démontrées expérimentalement et constituent aujourd'hui des sources performantes et populaires : le laser à cascade quantique et le laser à cascade interbande.

2.2.1. Laser à cascade quantique

Les lasers à cascade quantique (QCL : *Quantum Cascade Laser*) sont fabriqués à base d'alliage de matériaux III-V tels que InGaAs, AlInAs, GaAs et AlGaAs [95]. Ceux-ci sont déposés en très fines couches, de l'ordre de l'ångström, sur des substrats InP par des procédés d'épitaxie par jet moléculaire (MBE : *Molecular Beam Epitaxy*) ou par épitaxie de composés métallo-organiques en phase vapeur (MOCVD : *MetalOrganic Chemical Vapour Deposition*). Ces fines couches forment des puits quantiques qui vont offrir le gain nécessaire pour une émission de photons dans l'infrarouge moyen. Dans une diode laser classique, les photons sont émis lors d'une recombinaison électron-trou radiative au sein d'un matériau semi-conducteur (Figure I-20a). Un électron situé dans la bande de conduction à une énergie E_2 passe dans la bande de valence à une énergie E_1 en émettant un photon dont l'énergie est égale à celle séparant bande de valence et bande de conduction ($\varepsilon = E_2 - E_1 = h\nu$). On appelle cela une transition interbande. La longueur d'onde du laser est donc dépendante de la bande interdite du matériau. Dans un QCL, les couches successives de matériaux forment des puits quantiques qui ont la particularité de créer des niveaux d'énergie discrets au sein de la bande de conduction. Cette fois-ci, les électrons passent d'un état E_2 à un état E_1 au sein même de la bande de conduction (Figure I-20b). Cette transition est appelée transition inter-sous-bande. Ces puits quantiques sont cascades un grand nombre de fois pour fournir un gain suffisant afin de créer l'effet laser. Les zones de gain optique sont alternées avec des zones permettant de remonter les électrons sur des niveaux d'énergie supérieures afin de leur faire subir de nouveau une cascade de désexcitation radiative. La modification de la nature et de l'épaisseur des couches permet

d'ajuster la longueur d'onde d'émission des QCLs. Ils peuvent ainsi couvrir une gamme spectrale très large, allant de 3 μm à 25 μm à température ambiante [96] et de 60 μm à 330 μm lorsqu'ils sont refroidis cryogéniquement [96], [97]. Expérimentalement, la première démonstration du laser à cascade quantique a été faite par J. Faist en 1994 [98]. Ce premier QCL opérait à une température de 10 K en mode pulsé avec une puissance crête de 8 mW et émettait à $\lambda=4,2 \mu\text{m}$. Depuis les QCLs ont énormément évolué et ceux-ci sont capables de fonctionner à température ambiante, de façon continue, et de délivrer plusieurs watts optiques.

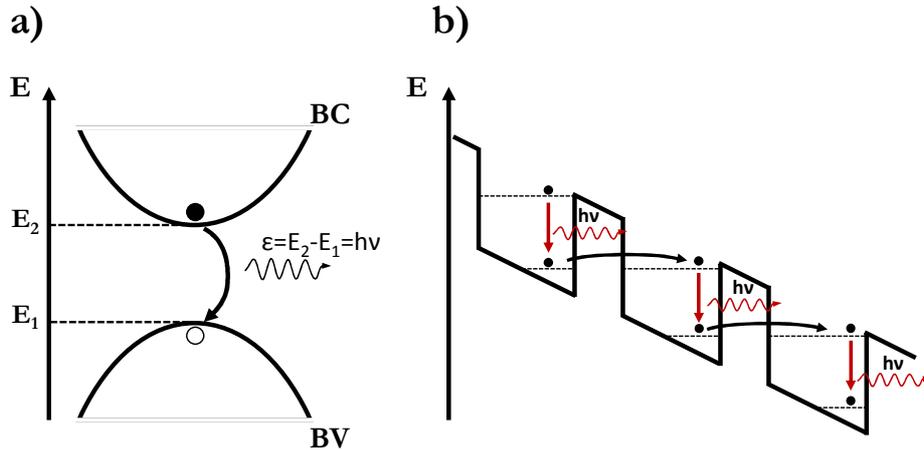


Figure I-20 : Principe de l'émission radiative dans deux types de lasers à semi-conducteurs : diode laser et QCL. a) Diode laser : émission de photons par recombinaison électron-trou dans un matériau à bande interdite (i.e. gap) directe, b) QCL : transition électronique radiative au sein de la bande de conduction dans des puits quantiques. Les électrons passent d'un puit à l'autre par effet tunnel.

2.2.2. Laser à cascade interbande

Moins populaire que son homologue à cascade quantique, le laser à cascade interbande (ICL : *Interband Cascade Laser*) a été inventée en 1994 puis démontrée expérimentalement en 1997 [99]. Il est également fabriqué en matériaux III-V par technique d'épitaxie MBE. Les couches successives formant le laser sont déposés sur des *wafers* de GaSb. Les alliages utilisés sont typiquement InAs, AlSb et GaInSb. Son fonctionnement est à mi-chemin entre une diode laser et un QCL. Le laser exploite des transitions interbandes (Figure I-21) qui sont cascadiées. Entre chacune de ces jonctions, de multiples puits quantiques, appelés « injecteur d'électrons » et « injecteurs de trous », permettent de repeupler en porteur les bandes de conduction et de valence avant la prochaine région active. Les ICL utilisant des transitions interbandes, ceux-ci sont limités par les caractéristiques des matériaux. La gamme de longueur d'onde atteignable est donc plus restreinte que celle des QCL et s'étend de 3 à 6 μm . Tout comme les QCL, les ICL opéraient à leur début à des températures cryogéniques et sont aujourd'hui capables de fonctionner à température ambiante voire plus ($T_{\text{max}}=118 \text{ }^\circ\text{C}$). En revanche, les ICL atteignent des puissances optiques moindres, de l'ordre de quelques centaines de milliwatts maximum. Leur avantage principal réside dans leur efficacité énergétique bien supérieure, avec des courants de seuil inférieurs à ceux des QCL. Ces lasers visent des applications de faible puissance optique où la consommation énergétique est un critère important.

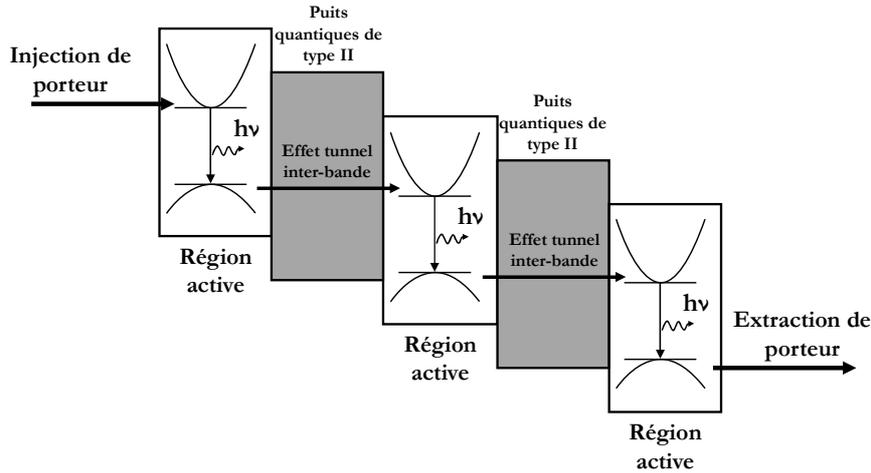


Figure I-21 : Schéma de fonctionnement d'un laser à cascade inter-bande de type II. L'émission de photons se fait par recombinaison radiative électron-trou. Les porteurs passent dans plusieurs régions actives mises en cascade et passent d'une région à l'autre par effet tunnel (Source : Yang et al. [100]).

2.3. Des fibres optiques disponibles

Un dernier élément ayant également son importance pour l'optique intégrée est la fibre optique. Elle permet de facilement transporter la lumière du laser vers la puce et de la puce vers un photodétecteur. C'est un élément important d'interconnexion optique, en particulier si tous les éléments actifs (lasers, photodétecteurs) ne peuvent être tous intégrés dans le circuit photonique. D'un point de vue purement pratique, elle permet de s'affranchir en partie des alignements optiques sur les bancs de mesure. Enfin, elle a pris une importance toute particulière en photonique silicium car elle a permis de faire des tests automatisés à même le *wafér* (Figure I-22). La photonique sur silicium s'est ainsi affranchie des préparations d'échantillon (découpe et polissage des interfaces) rajoutant des aléas de mesure et pouvant dégrader les performances de la puce. Les tests automatisés sont particulièrement importants pour connaître l'impact de la dispersion des procédés de fabrication. C'est un élément clef vers la montée en maturité d'une plateforme technologique. Cependant, les fibres optiques en silice utilisées en télécom ne transmettent pas au-delà de $\lambda=2 \mu\text{m}$. Pour aller au-delà, d'autres matériaux sont nécessaires et leur production sous forme de fibre a longtemps été limitée au domaine de la recherche. Depuis peu, des fibres optiques MIR sont disponibles commercialement.

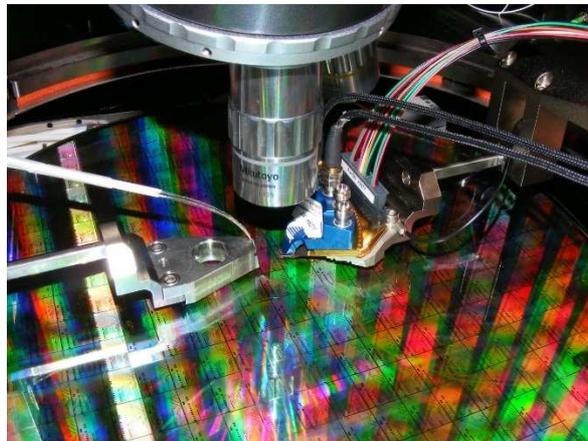


Figure I-22 : Test automatisé sur wafer de modulateurs électro-optiques réalisés sur plateforme SOI 200 mm au CEA-Leti.

2.3.1. Fibres à saut d'indice ZBLAN

Les verres fluorés à métaux lourds ont été découverts en 1975 par Poulain et al. [101]. Parmi eux, la famille de verre ZBLAN, contenant les verres composés de ZrF_4 , BaF_2 , LaF_3 , AlF_3 et NaF , possède des propriétés intéressantes de transparence dans l'infrarouge moyen. Le domaine de transparence optique s'étend de $\lambda=300$ nm à $\lambda=7$ μm . Disponible commercialement [102] [103], ce type de fibre affiche des pertes par propagation inférieure à $0,5$ $dB.m^{-1}$ entre $\lambda=0,5$ μm et $\lambda=4,7$ μm . Leur inconvénient majeur est leur fragilité ce qui rend leur manipulation délicate comparée à des fibres classiques en silice.

2.3.2. Fibres en chalcogénure à cristaux photonique

Les verres de chalcogénure sont des alliages à base de sulfure, selenium et tellure. Parmi les applications les plus courantes, on trouve les alliages de $AgInSbTe$ et $GeSbTe$ utilisés dans les disques optiques réinscriptibles. Les chalcogénures sont connus pour leurs propriétés optiques depuis les années 50 [104] et les premières recherches sur des fibres en chalcogénure datent de 1965 [105]. Cependant, il faudra attendre les années 90 pour que la recherche autour de la mise au point de fibre en chalcogénure soit très active. Depuis peu, de jeunes entreprises commercialisent des fibres en chalcogénure dû à une demande croissante pour les applications dans le domaine MIR (transport de forte puissance optique, imagerie IR, biomédical, etc.). Les verres à base de chalcogénure présentent un domaine de transparence qui s'étend de $\lambda=2$ à $\lambda=22$ μm [106] ce qui leur permet de couvrir l'ensemble du domaine MIR. Bien que non exploité dans ces travaux de thèse, ils présentent également des coefficients non linéaires importants qui peuvent être exacerbés par la structuration en cristaux photoniques. Lors de ces travaux de thèse, nous avons eu accès aux fibres à cristaux photoniques (PCF : *Photonic Cristal Fiber*) de la société SelenOptics [107]. Dans notre cas, ces PCF n'ont pas été choisie pour leurs propriétés non-linéaires mais pour leurs propriétés modales. En effet, le guide optique est ici « infiniment monomode » sur toute la plage de transmission de la fibre. Cela permet d'avoir une seule fibre optique monomode couvrant tout le MIR (Figure I-23). Certaines structurations permettent également d'obtenir des PCF à maintien de polarisation. Tout comme les fibres ZBLAN, les fibres en chalcogénure présente le désavantage d'être relativement fragiles.

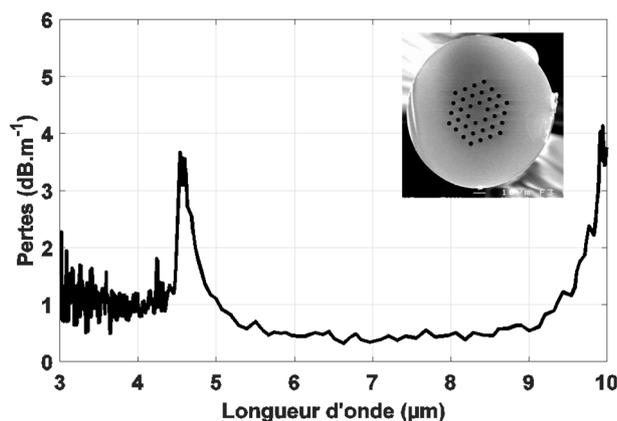


Figure I-23 : Photographie MEB et courbe de transmission d'une fibre à cristaux photoniques en chalcogénure. La fibre est monomode sur l'ensemble de sa plage de transmission (Source : SelenOptics [107]).

2.4. Conclusion

Nous venons de voir que l'ensemble des prérequis pour développer une plateforme photonique MIR sont réunis. Tout d'abord, le large champ d'applications, seuls quelques exemples particuliers

ont été évoqués, justifie la miniaturisation et le passage sur puce. Les prérequis techniques sont également réunis. Des sources lasers MIR puissantes, fiables et faciles d'utilisation, dont la disponibilité commerciale fut longtemps un problème, sont maintenant courantes et relativement abordables pour un laboratoire de recherche. Celles-ci couvrent une grande partie du domaine MIR et de nombreuses longueurs d'onde sont disponibles. Des fibres optiques, qui ont eu une grande importance pour le développement de la plateforme SOI avec les tests automatisés, sont également disponibles. Tous les éléments optiques nécessaires à la caractérisation n'ont bien sûr pas tous été évoqués : des lentilles et photodétecteurs sont également disponibles. Il faut bien comprendre que ces éléments existent commercialement depuis un certain temps déjà et que les sources laser, et les fibres optiques dans une moindre mesure, étaient des verrous technologiques importants. Nous avons donc montré qu'aucun verrou technologique majeure, en dehors de la fabrication de puce transparente dans le MIR, ne s'opposait au développement d'une plateforme photonique dédiée au MIR. De plus, de nombreux champs d'applications sont possibles et profiteraient des avantages offerts par la miniaturisation des technologies de microfabrication.

3. Quelle plateforme photonique pour le moyen infrarouge ?

Toutes les conditions sont réunies pour le développement d'une technologie d'optique intégrée pour le domaine MIR. La question qui reste en suspens et à laquelle nous devons répondre est : quelle plateforme technologique choisir pour l'optique intégrée moyen infrarouge ? Dit autrement quels sont les critères que nous devons retenir pour le choix d'une plateforme ? Quelles sont les plateformes existantes et susceptibles de présenter un intérêt pour ce domaine ? Ces différentes questions seront traitées afin de justifier le choix qui a été fait au CEA-Leti et les directions prises dans cette thèse.

3.1. Critères de choix d'une nouvelle plateforme

3.1.1. Pertes et bande passante

De façon évidente, le premier critère à retenir est celui des pertes optiques. On pondèrera également par le domaine de transparence, soit la bande passante potentielle. De façon relativement admise dans la littérature, une plateforme photonique devient intéressante autour de $1-2 \text{ dB.cm}^{-1}$ de pertes par propagation. En effet plus les guides optiques présentent de pertes, moins l'on pourra cascader de composants optiques et les fonctions optiques réalisées par la puce seront relativement basiques. Le circuit aura finalement peu de valeur ajoutée. D'autant qu'il faut garder à l'esprit que passer du domaine visible ou proche infrarouge (NIR : *Near InfraRed*) vers le MIR n'est pas que simplement une transposition en longueur d'onde. Les sources lasers sont moins puissantes et les photodétecteurs moins sensibles dans le MIR que leurs homologues dans le visible ou le NIR. Il s'ensuit que les pertes par propagation seront critiques, avec des pertes maximales source à détecteur qui devraient être plus contraignantes pour la photonique MIR. La question est donc : quels matériaux présentent une absorption suffisamment faible pour constituer des guides optiques convenables ? Les principales plateformes de microfabrication pour l'optique intégrée ont été décrites précédemment et sont : les guides polymères, l'échange d'ions sur verre, la photonique sur substrat InP et la plateforme silicium. En compilant les coefficients d'absorption des matériaux disponibles sur ces différentes plateformes (Tableau I-1), il est déjà possible d'identifier des candidats potentiels. Les substrats utilisés en échange d'ions sur verre sont opaques dans le MIR et coupent entre 2 et $3 \mu\text{m}$ [108]. Les substrats polymères sont dans la même situation et deviennent opaque au-delà de $2,2 \mu\text{m}$. L'échange d'ions sur verre et la photonique sur polymère ne sont donc

pas envisageables pour l'optique intégrée MIR. Restent donc les plateformes Si et InP. Les deux présentent des domaines de transparence relativement importants. L'avantage de la bande passante revient tout de même à la plateforme Si qui peut aller au-delà de $\lambda=14 \mu\text{m}$ et couvrir l'ensemble du MIR et au-delà.

3.1.2. Potentialité d'une plateforme complète, maturité technologique et co-intégration

Il est clair désormais que le développement d'une plateforme MIR doit se faire sur substrat III-V ou sur un des substrats CMOS compatibles de la plateforme Si. Cependant, le seul critère de transparence ne saurait guider entièrement notre choix. D'autres critères sont à considérer afin de les départager : la potentialité d'un PIC complet, la capacité de co-intégration et la maturité technologique.

Tout d'abord, la capacité d'une plateforme technologique à aboutir à une bibliothèque complète de composants, passifs et actifs, est un critère important. A ce jour, les matériaux III-V sont à la base des sources lasers QCL et ICL mais également de photodétecteurs IR, tels que les photodiodes à base de InGaAs ou ceux à base de multi-puits quantiques (QWIP : *Quantum Well Infrared Photodetector*). A notre connaissance, seuls les modulateurs électro-optiques n'ont à pas été démontrés, sur substrat InP, dans le MIR. La plateforme InP a donc la potentialité d'offrir, à terme, une intégration monolithique de l'ensemble des composants nécessaires pour un PIC MIR avancé, comme elle l'a fait pour les *telecom/datacom*. Contrairement à la plateforme InP, la plateforme Si ne bénéficie pas des mêmes propriétés électro-optiques et ne permet pas d'offrir du gain optique dans le MIR. Cependant, tout comme pour le domaine *telecom/datacom*, ce défaut peut être compensé par des techniques d'hybridation de laser III-V QCL ou ICL. En 2008, une première démonstration d'hybridation de QCL a été faite par thermocompression [109]. Récemment, le premier QCL véritablement hybride a été fabriqué par collage moléculaire sur des guides Si/Si₃N₄/SiO₂ sur substrat Si [110]. A court terme, la plateforme Si peut donc tout à fait intégrer laser et photodétecteur par voie hybride. De plus, à moyen et long terme, il semble qu'une intégration monolithique soit également possible. En effet, des travaux sur les lasers à base d'alliage Ge/GeSn suggèrent que ce type d'intégration permettra de fabriquer des sources couvrant le début du domaine MIR ($\lambda=2-3 \mu\text{m}$) dans un futur proche [111]. Un laser utilisant ces alliages et directement épitaxié sur substrat Si a d'ailleurs été démontré expérimentalement [112]. Celui-ci émet à $\lambda=2,3 \mu\text{m}$ en étant pompé optiquement et refroidi à 90 K. De plus, des conceptions de QCL à base d'alliage GeSn ont également été proposées pour faire des sources lasers autour de $\lambda=8,27 \mu\text{m}$ [113], laissant présager une large couverture du domaine MIR par des lasers monolithiquement intégrés. Enfin, contrairement à la plateforme InP, le germanium utilisé sur plateforme Si permet de faire des modulateurs pour le MIR. Un modulateur en germanium fonctionnant par pompage optique a d'ailleurs récemment été démontré expérimentalement à $\lambda=2-3 \mu\text{m}$ [114]. Des calculs théoriques montrent également que des modulateurs électro-optiques à base de germanium sont possibles [115]. La plateforme Si présente donc également des atouts importants pour obtenir une riche bibliothèque de composants.

En plus d'une plateforme capable d'offrir une bibliothèque fournie de composants, l'intégration d'autres technologies doit également être considérée dans les critères de choix. Comme nous avons pu le voir, le potentiel du domaine MIR ne tient pas dans une simple translation du domaine de longueur d'onde des PIC actuels. Par exemple, les applications dans le domaine biomédical nécessiteront une certaine biocompatibilité et la capacité à acheminer des analytes vers les zones de détection du circuit optique via de la microfluidique. Or, les matériaux III-V n'offrent ni de biocompatibilité, car ils sont toxiques pour le vivant, ni la capacité à fabriquer des canaux microfluidiques [116]. En revanche, les circuits de microfluidique se fabriquent sur substrat

silicium, les applications de laboratoire sur puce ne sont donc pas réalisables sur plateforme InP. De même, si nous reprenons l'exemple des capteurs de gaz, ce type d'application nécessitera, dans certains cas, d'utiliser des technologies MEMS, comme pour la photoacoustique développée au CEA-Leti. Or, seule la plateforme Si offre cette possibilité. Enfin, comme on peut le voir avec la photonique SOI, la plateforme Si pourrait permettre la co-intégration de PIC MIR avec l'électronique de pilotage et de traitement. La photonique MIR sur silicium devrait d'ailleurs bénéficier des développements technologiques de co-intégration des circuits microélectroniques et photoniques qui sont actuellement réalisés pour la photonique SOI. Ainsi, la plateforme Si possède un réel avantage pour répondre à ce besoin particulier du domaine MIR, qui est de devoir combiner différentes technologies pour aboutir à de nouveaux capteurs.

Enfin, un dernier critère non négligeable est la maturité des procédés de fabrication. Les procédés III-V sont, en général, moins maîtrisés que les procédés CMOS. Par exemple, la gravure des matériaux III-V donne des flancs beaucoup moins abrupts et plus rugueux que la gravure Si ou Ge. Pour illustrer notre propos, nous pouvons comparer les performances de deux multiplexeurs à réseau échelle aux configurations similaires. Celui réalisé sur plateforme InP par Gilles *et al.* [117] a des performances très dégradées par rapport à celui réalisé sur plateforme Si par Malik *et al.* [118]. Il en résulte que le nombre de défauts présents sur une plaque InP est bien plus grand que sur une plaque silicium. Le travail de cette thèse étant orienté vers une recherche technologique et applicative, il est important de prendre en compte dans nos critères le rendement de production d'une technique.

3.1.3. Conclusion

Les plateformes d'optique intégrée aux procédés de fabrication matures sur lesquelles on peut s'appuyer pour étendre leur domaine de fonctionnement au MIR sont au nombre de quatre : échange d'ions sur verre, plateforme polymère, plateforme III-V et plateforme Si. Les deux premières présentent des substrats opaques dans le MIR et ne pourront accueillir des PIC fonctionnant à ces longueurs d'onde. Les deux autres présentent des domaines de transparence suffisants dans le MIR avec une bande passante en faveur pour la plateforme Si ($\Delta\lambda=0,3-100 \mu\text{m}$ pour le Si et $\Delta\lambda=0,9-14 \mu\text{m}$ pour l'InP). En revanche, ces deux dernières diffèrent par leur maturité technologique, leur rendement, et leur capacité de co-intégration de différentes technologies (Tableau I-2). Les procédés de fabrication sont plus performants sur plateforme Si et sont CMOS compatible. A moyen et long terme, les applications d'optique intégrée MIR ne nécessiteront pas seulement que des circuits optiques performants mais également des capteurs micromécaniques, de la manipulation d'analytes biologiques par des systèmes microfluidiques et de l'électronique. Or la plateforme Si est la seule ayant la capacité de réaliser et co-intégrer l'ensemble de ces technologies. Sur ces critères, ce travail de thèse s'est dirigé vers le développement d'une technologie de PIC MIR sur plateforme silicium.

| Nom de la plateforme | Source laser | Modulateur | Photodétecteur | Densité de défauts fatales (cm ⁻²) | Co-intégration technologie de capteurs |
|----------------------|--|---|--------------------------|--|--|
| Si | QCL hybride Laser GeSn monolithique Potentiel pour QCL GeSn monolithique | Modulateur tout-optique démontrée Matériaux du groupe IV prometteurs | Hybride | 0,14 | Electronique MEMS Microfluidique |
| InP | Intégration monolithique QCL et ICL | Non démontrée | Intégration monolithique | 0,9 - 2,3 | Non |

Tableau I-2 : Comparatif des principales plateformes de fabrication existantes dans le cadre du développement d'une technologie de PIC MIR. Le comparatif se base sur les composants actifs démontrés et potentiels ainsi que sur la maturité technologique (rendements des procédés, co-intégration).

3.2. Zoologie des solutions possibles sur silicium

Maintenant que le choix de l'outil de développement a été fait, il est nécessaire que nous fassions le choix de la structure du guide optique qui sera la brique de base de notre plateforme photonique MIR. La plateforme silicium, malgré son nom, n'offre pas que la disponibilité de faire des guides en silicium. Comme évoqué plus tôt, elle a à sa disposition un large panel de matériaux ainsi que les procédés associés pour les mettre en forme. Il y a donc deux facettes du problème qu'il faut aborder : le choix des matériaux et la forme du guide. Les deux sont liés, car des matériaux seront trop absorbants pour certaines géométries ou alors des géométries ne pourront pas être réalisés avec des matériaux dont la mise en forme est peu aisée. Nous nous proposons de faire un état de l'art des différents matériaux CMOS compatibles disponibles pour une application MIR. Ensuite nous verrons ce qu'il est possible d'envisager comme structure à partir de ces matériaux, notamment à travers les réalisations qui ont été rapportés dans la littérature. Cela nous amènera à justifier les choix de développement faits dans cette thèse. A travers cette revue, nous garderons à l'esprit les critères qui nous ont guidé jusqu'ici : bande passante, faisabilité industrielle et potentiel de co-intégration.

3.2.1. Un choix restreint de matériaux

Avant de voir les différentes structures de guide possibles, nous allons passer en revue les principaux matériaux disponibles sur plateforme Si ayant une fenêtre de transparence significative dans le moyen infrarouge : le nitrure de silicium (SiN), le saphir (oxyde d'aluminium α -Al₂O₃ sous forme cristalline), le dioxyde de silicium (SiO₂, appelée aussi silice), le silicium, le germanium et des alliages de germanium-étain [119] (Figure I-24). Afin de définir des fenêtres de transparences utiles pour l'optique intégrée, on considèrera que le matériau est opaque au-delà de pertes par propagation supérieures à 2 dB.cm⁻¹. Actuellement les matériaux les plus populaires pour la fabrication de guides optiques sont le Si, pour le cœur, et le SiO₂, pour la gaine, sur substrat SOI pour les applications à $\lambda=1,3$ -1,55 μ m. Comme on le voit ici, la présence de silice est difficilement tolérable dans le domaine infrarouge et coupe à partir de $\lambda=3,6$ μ m. Le SiN utilisé pour la photonique dans le visible est transparent jusqu'à quasiment $\lambda=6,6$ μ m. Cependant celui-ci coupe plus tôt que le Si dans le MIR et ne bénéficie pas d'autant de procédés de mise en forme. De plus, pour atteindre ce niveau de transparence, le SiN est sous sa forme amorphe ce qui empêche l'encapsulation par des matériaux cristallins. On évoquera également le saphir, qui est relativement transparent jusqu'à $\lambda=4,3$ μ m. Cependant il nécessite de ne plus utiliser des substrats standards Si

ou SOI mais SOS, soit une plaque entièrement en saphir. Le SOS n'étant pas un substrat standard de la microélectronique, on tendra à ne pas l'utiliser. Néanmoins le SiN et le saphir sont des candidats potentiels, si utilisés en tant que matériau de gaine afin de minimiser l'interaction lumière-matière et pousser le domaine de transparence des guides le plus loin possible. Il apparaît clairement que si l'on désire couvrir la plus grande partie du MIR, les matériaux à privilégier sont le silicium, le germanium et les alliages germanium-étain. Le saphir, le SiO₂ et le SiN sont à éviter ou à utiliser en gaine, afin que leur impact sur les pertes soit minimal.

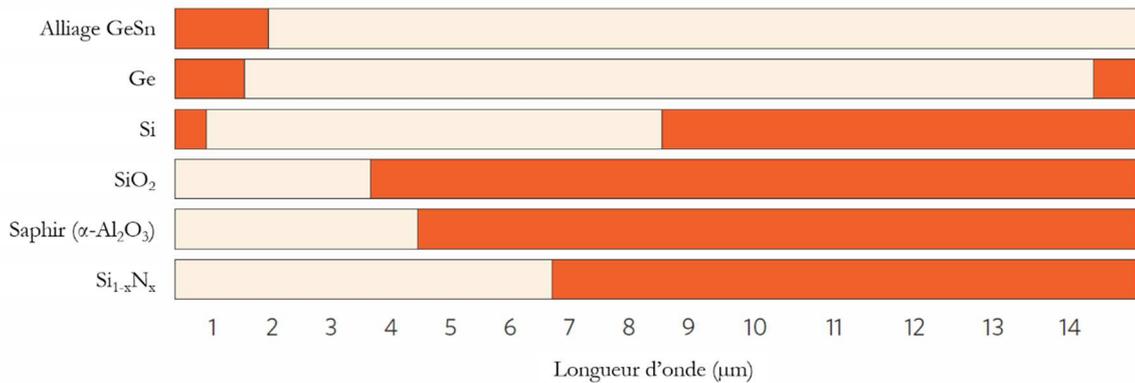


Figure I-24 : Fenêtre de transparence des matériaux disponibles sur plateforme Si en tant que matériau de cœur pour le guide. Les matériaux sont considérés comme opaque (zone orange) pour des pertes par propagation supérieures à 2 dB.cm⁻¹ (Source : Soref et al. [119]).

3.2.2. Guides d'onde sur SOI

Lors du développement d'une nouvelle technologie, il est préférable de ne pas repartir de rien et de s'appuyer sur des technologies existantes. La photonique sur SOI étant extrêmement mature, l'idée la plus simple est de la pousser aux limites de son domaine de transparence. Les guides peuvent être de type *strip*, *rib*, *ridge*, ou *channel* avec des dimensions adaptées pour les grandes longueurs d'onde. L'avantage de cette solution est de pouvoir bénéficier de la maturité avancée de la plateforme SOI et de pouvoir rapidement réaliser des objets complexes. L'équipe de Nedeljkovic *et al.* [120] [121] a ainsi démontré un spectromètre à transformée de Fourier sur puce fonctionnant à $\lambda=3,75 \mu\text{m}$. Comme il était attendu théoriquement, leurs guides SOI sont exploitables jusqu'à $\lambda=4 \mu\text{m}$ avec des pertes de $1,28 \pm 0,65 \text{ dB}$ [122].

Afin d'aller au-delà de $\lambda=4 \mu\text{m}$ en restant sur SOI, plusieurs solutions ont été explorées par différents groupes de recherche. Toutes ont pour point commun de limiter au maximum l'interaction avec le SiO₂, tout en conservant au maximum le fort contraste d'indice de la plateforme permettant de faire des circuits compacts. Dans le but de faire des laboratoires sur puce, une équipe du *Massachusetts Institute of Technology* a mis au point des guides Si sur piédestal [123]. Après gravure du silicium, l'oxyde du SOI est gravé partiellement par voie humide pour former un piédestal (Figure I-25a). Une diminution des pertes par propagation de 10 dB est annoncée dans la gamme $\lambda=4-5 \mu\text{m}$ mais aucun chiffre de pertes en absolu n'est donné [124]. Ils ont également démontré le même type de guide avec un piédestal en Si [125]. Le substrat utilisé n'est pas du SOI mais des pertes de $2,7 \text{ dB.cm}^{-1}$ à $\lambda=3,7 \mu\text{m}$ sont rapportées. Ce type de guide semble donc souffrir de pertes additionnelles probablement causées par la rugosité aux interfaces engendrée par les gravures.

Pour utiliser toute la plage de transparence du Si sur substrat SOI, l'évolution logique consiste à supprimer l'oxyde et à suspendre complètement le guide optique. La première démonstration de guide Si suspendu a été faite par Cheng *et al.* en 2012 [126]. Les pertes par propagation sont de l'ordre de $3 \pm 0,7 \text{ dB.cm}^{-1}$ à $\lambda=2,75 \mu\text{m}$ [127]. En plus des pertes par propagation, le léger défaut de

ces guides est qu'ils demandent deux étapes de photolithographie pour être fabriqués. Une première avec gravure partielle pour définir le *ridge*, puis une seconde pour faire les trous nécessaires afin d'atteindre l'oxyde et libérer les membranes (Figure I-25b). Pour ramener le procédé de fabrication à une seule étape de gravure, Penades *et al.*, de l'université de Southampton, ont remplacé la gaine latérale par un métamatériau fabriqué à l'aide d'un réseau sub-longueur d'onde [128] (Figure I-25c). La période de celui-ci étant très inférieure à la longueur d'onde de la lumière, cette dernière « voit » un matériau dont l'indice est la moyenne des matériaux, ici le silicium et l'air. Les premiers guides présentaient des pertes par propagation de $3,6 \text{ dB.cm}^{-1}$ à $\lambda=3,8 \mu\text{m}$. Ceux-ci ont rapidement été améliorés et les pertes ont été réduites à $0,82 \text{ dB.cm}^{-1}$ en 2016 [129]. Ces guides suspendus semblent avoir une bonne tenue mécanique. Cependant, leur structure pose question pour la réalisation de composants à forte densité de motifs. Cela annulerait en partie le très fort contraste d'indice ($\Delta n \approx 2,42$) de ces guides qui permet des circuits compacts avec de petites dimensions. Des structures comme les *Arrayed Waveguide Grating* (AWG) permettant le multiplexage en longueur d'onde semblent difficiles à réaliser avec ce type de technologies.

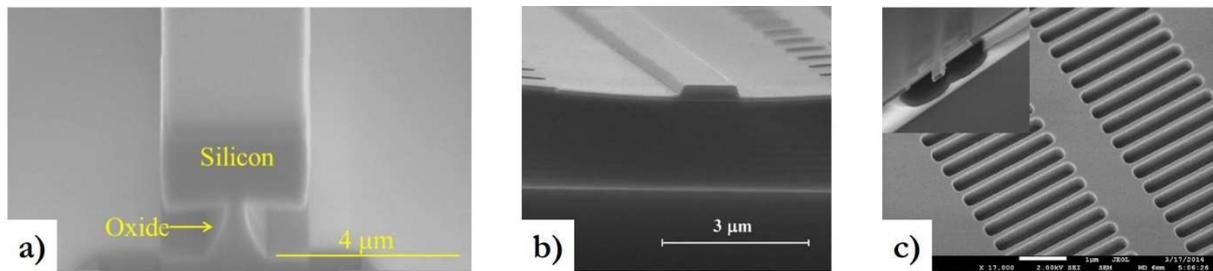


Figure I-25 : Images MEB de différentes géométries de guide sur plateforme SOI pour la photonique MIR.
 a) Guide d'onde sur piédestal d'oxyde obtenu par gravure partielle en voie humide (Source : Lin *et al.* [124]). b) Guide membrane suspendu. Les trous d'accès au BOX pour la libération en voie humide sont visibles (Source : Cheng *et al.* [130]). c) Guide suspendu avec gaine latérale sub-longueur d'onde obtenu par gravure totale du silicium. Celle-ci est utilisée pour accéder au BOX et procéder à la libération des structures (Source : Penades *et al.* [128]).

3.2.3. Guides d'onde sur SOS et SON

Les substrats SOI obligeant de réaliser des structures complexes pour couvrir une plus large gamme spectrale, une solution est d'utiliser un substrat où la gaine inférieure est faite d'un matériau moins absorbant. Les substrats silicium sur saphir permettent d'élargir la couverture spectrale tout en conservant des procédés de fabrication similaires aux procédés sur SOI. Les premiers guides (Figure I-26) démontrés avaient des pertes importantes égales à $4,3 \pm 0,6 \text{ dB.cm}^{-1}$ à $\lambda=4,5 \mu\text{m}$ [131] et $4 \text{ dB} \pm 0,7 \text{ dB.cm}^{-1}$ à $\lambda=5,5 \mu\text{m}$ [132]. Depuis, d'autres équipes ont développé leur guide et les plus faibles pertes rapportées à ce jour sont de $1,92 \text{ dB.cm}^{-1}$ à $\lambda=5,18 \mu\text{m}$ [133], confirmant expérimentalement l'intérêt de la plateforme SOS. En plus de couvrir une plus grande partie du MIR, le contraste d'indice des guides SOS est élevé ($\Delta n \approx 1,7$), ce qui présage des circuits assez compacts. L'inconvénient majeur du SOS est le fait que ce n'est pas un substrat standard et sa petite taille (100 mm de diamètre), l'empêche de passer sur les machines standards 200 mm de la salle blanche du CEA-Leti. Afin de s'affranchir de cette difficulté des substrats SON (*Silicon On Nitride*) ont été mis au point à partir de substrat Si et SOI afin de fabriquer des guides Si/SiN [134]. Le SiN présente l'avantage d'avoir une fenêtre de transparence plus élargie que celle du saphir et d'être un matériau très utilisé en microélectronique. Cependant les pertes optiques mesurées sont pour le moment trop élevées, de l'ordre de $5,2 \text{ dB.cm}^{-1}$ à $\lambda=3,39 \mu\text{m}$.

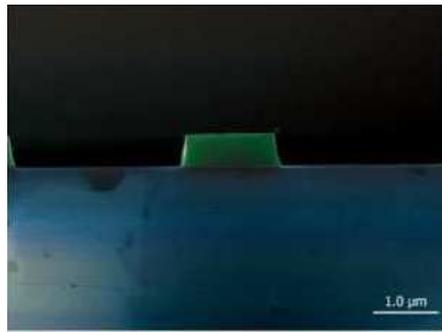


Figure I-26 : Vue en coupe faite au MEB d'un guide strip SOS. L'image est en fausse couleur : le silicium est en vert et le saphir en bleu (Source : Baehr-Jones et al. [131]).

3.2.4. Guides d'onde creux sur substrat Si

Jusqu'ici les travaux répertoriés avaient pour point commun de rester sur des technologies de guide (substrat utilisée ou géométrie) relativement proches de ce qui avait été fait en photonique silicium. Une autre voie est de travailler directement sur substrat Si « brute » pour venir construire le guide optique et ne pas dépendre d'une couche intermédiaire enterrée comme pour le SOI, le SON ou le SOS. Dès lors, de nombreuses solutions sont possibles tant par les matériaux que par les géométries. Tous les matériaux disponibles présentant une coupure plus ou moins tôt dans le MIR, la solution la plus radicale est d'utiliser une géométrie où l'interaction avec ceux-ci est minimal. Ainsi dans leur revue de guides possibles pour le MIR et le LWIR, Soref *et al.* [135] ont proposé des guides creux dont le cœur est formé d'air. Les guides creux offrent des perspectives intéressantes pour des applications de type laboratoire sur puce. Leur centre étant vide, on peut potentiellement y faire circuler de l'air ou de l'eau pour faire de la détection de gaz, de bactérie, etc. Contrairement aux guides classiques, le cœur a un indice de réfraction inférieur à celui de la gaine. Afin que cela soit possible, la gaine doit être capable de réfléchir la lumière. Pour cela, la gaine est formée d'une alternance de matériaux (Si/SiO₂ ou Si/Si₃N₄) formant soit un miroir de Bragg, soit un miroir Fabry-Pérot, le guide est alors dénommé ARROW [136] (*Anti-Resonant Reflecting Optical Waveguide*). Malgré l'absorption de l'air atmosphérique, si l'on garde comme critère des pertes par propagation inférieures à 2 dB.cm⁻¹, le domaine de transparence de ces guides est en théorie très important et s'étend de $\lambda=1,2 \mu\text{m}$ à 200 μm . Cet avantage est cependant mitigé par les multiples inconvénients que présentent ces guides. Tout d'abord, leurs dimensions sont extrêmement importantes pour atteindre des pertes inférieures à 2 dB.cm⁻¹. Typiquement, pour un guide creux de type ARROW, il faut respecter la condition $d > 4\lambda$ [137], avec d la largeur et hauteur du cœur de guide, soit dans le domaine infrarouge des guides compris entre 8 μm et 40 μm de large. Les méthodes de fabrication proposées ou essayées jusqu'ici sont assez compliquées, comme le collage moléculaire de deux *wafers* [138] (Figure I-27a), l'utilisation de couche sacrificiel [139] (Figure I-27b) ou la mise sous contrainte de matériaux multicouches [140] (Figure I-27c). Enfin, ces guides sont par nature hautement multimodes, limitant les types de composants que l'on fait classiquement en optique intégré. Aucun guide creux n'a encore été rapporté pour le domaine MIR mais leurs inconvénients semblent les limiter à des applications très spécifiques, en particulier pour l'infrarouge lointain et le domaine térahertz.

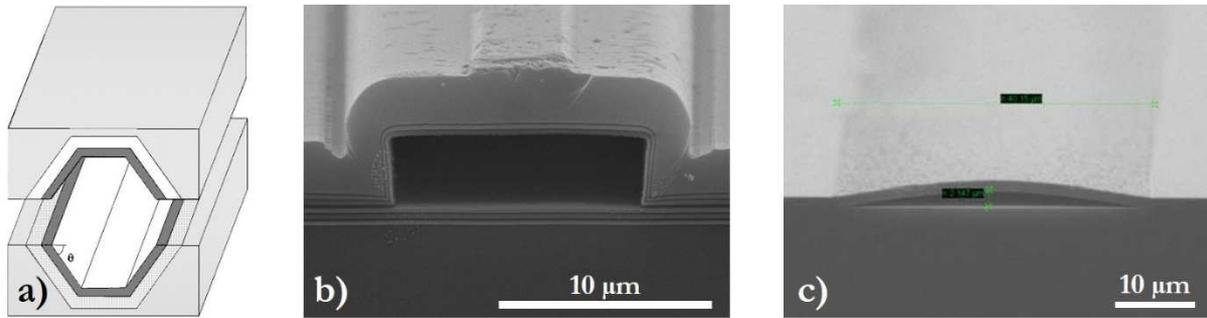


Figure I-27 : Schéma et images MEB de guides creux proposées ou réalisées dans la littérature : a) Proposition de guide micro-usiné et assemblé par collage moléculaire de deux wafers (Source : Bernini et al. [138]) b) Guide réalisé par dépôt successifs de SiN et SiO₂ autour d'une résine photosensible SU-8 utilisée comme couche sacrificielle. La résine n'est plus présente sur l'image (Source : Schmidt et al. [139]) c) Guide constitué de multicouche a-Si/SiO₂ et réalisé par procédé de flambage (Source : Epp et al. [140]).

3.2.5. Guide d'onde à base de Ge sur substrat Si

Une dernière voie consiste à déposer un matériau sur le substrat Si qui pourra faire office de cœur pour le guide optique. Le problème est que la plupart des matériaux transparents dans le MIR (Figure I-24) et déposables sur substrat Si ont un indice optique inférieur à celui du Si et doivent donc être utilisés pour former la gaine du guide. Le saphir, le SiN et le SiO₂ demandent tous un procédé de préparation particulier pour obtenir un substrat où ils sont présents en tant que couche enterrée avec du Si cristallin en surface. Le germanium permet de résoudre ce problème car il est cristallin, possède un indice optique supérieure à celui du silicium ($n_{Ge} \approx 4$), une très large transparence dans le MIR, et déposable sur la surface d'un *wafers* de Si par procédé d'épitaxie. Son seul défaut est que sa maille cristalline ($a_{Ge} = 5,65791$ Å) est plus grande de 4,18 % par rapport à celle du silicium ($a_{Si} = 5,43102$ Å) [141], ce qui peut engendrer des dislocations à l'interface Si/Ge, source de pertes optiques. Afin de réduire cet effet, il est possible de faire croître des alliages de Si_{1-x}Ge_x. En choisissant la bonne proportion x , la taille de la maille cristalline peut être adaptée pour éviter les dislocations. Théoriquement, un guide Ge/Si ou Ge/SiGe couvrirait la gamme $\lambda = 1,9-16,8$ µm et un guide SiGe/Si couvrirait $\lambda = 1,6-12$ µm [135]. Il est donc possible d'avoir un guide couvrant la quasi-totalité du MIR, requérant peu d'étapes de fabrication, en technologie planaire et CMOS compatible.

Différents types de guides à base de germanium ont été démontrés jusqu'ici. Le premier guide apparu dans la littérature date de 2012. C'est un guide *strip* en Ge pur de 2 µm de haut directement épitaxié sur substrat Si (Figure I-28a). Il présente des pertes de $2,5 \text{ dB.cm}^{-1}$ à $\lambda = 5,8$ µm en polarisation TM [142]. Des guides similaires ont été fabriqués par d'autres équipes présentant des pertes de $3-4 \text{ dB.cm}^{-1}$ autour de $\lambda = 5,3$ µm [143] (Figure I-28b). Des pertes beaucoup plus faibles ont été obtenues sur des guides *rib* Ge directement épitaxiés sur Si [144] (Figure I-28c). Celles-ci sont de $0,6 \text{ dB.cm}^{-1}$ à $\lambda = 3,8$ µm en partie expliquées par une épaisseur du guide plus importante de 2,9 µm au lieu de 2 µm pour les deux guides précédents. Pour éviter d'éventuelles dislocations, certaines équipes ont décidé d'utiliser des alliages Si_{1-x}Ge_x. Ramírez *et al.* [145] ont procédé à une épitaxie de 11 µm dont la composition varie linéairement de $x=0$ à partir du substrat jusqu'à $x=0,79$ à la surface. Une seconde épitaxie de 2 µm de Si_{0,2}Ge_{0,8} est réalisée dans laquelle des guides *rib* sont gravés. A $\lambda = 4,6$ µm, les pertes obtenues sont de $1,5 \pm 0,5 \text{ dB.cm}^{-1}$ en polarisation TE et de $2,0 \pm 0,5 \text{ dB.cm}^{-1}$ en polarisation TM. Notre équipe a opté pour une épitaxie de Si_{0,6}Ge_{0,4} sur substrat Si, développée pour ces travaux de thèse, dans le but d'exploiter les propriétés non-linéaires du SiGe [146] (Figure I-28d). Les guides sont rectangulaires ($1,4 \times 2 \text{ µm}^2$) et enterrés dans le silicium. Ils présentent des pertes de $1,5 \text{ dB.cm}^{-1}$ à $\lambda = 3,25$ µm et de seulement $0,5 \text{ dB.cm}^{-1}$ à $\lambda = 4,75$ µm en polarisation TE. On remarquera les écarts importants de pertes par propagation pour des guides

relativement similaires. Bien que les dimensions et la longueur d'onde utilisée aient leur importance, on remarquera que la qualité de la gravure germanium semble être le premier facteur déterminant pour les pertes optiques. Les guides de Chang *et al.* et Malik *et al.* ont les pertes les plus élevées et également une rugosité très importante au niveau des flancs des guides, source de pertes.

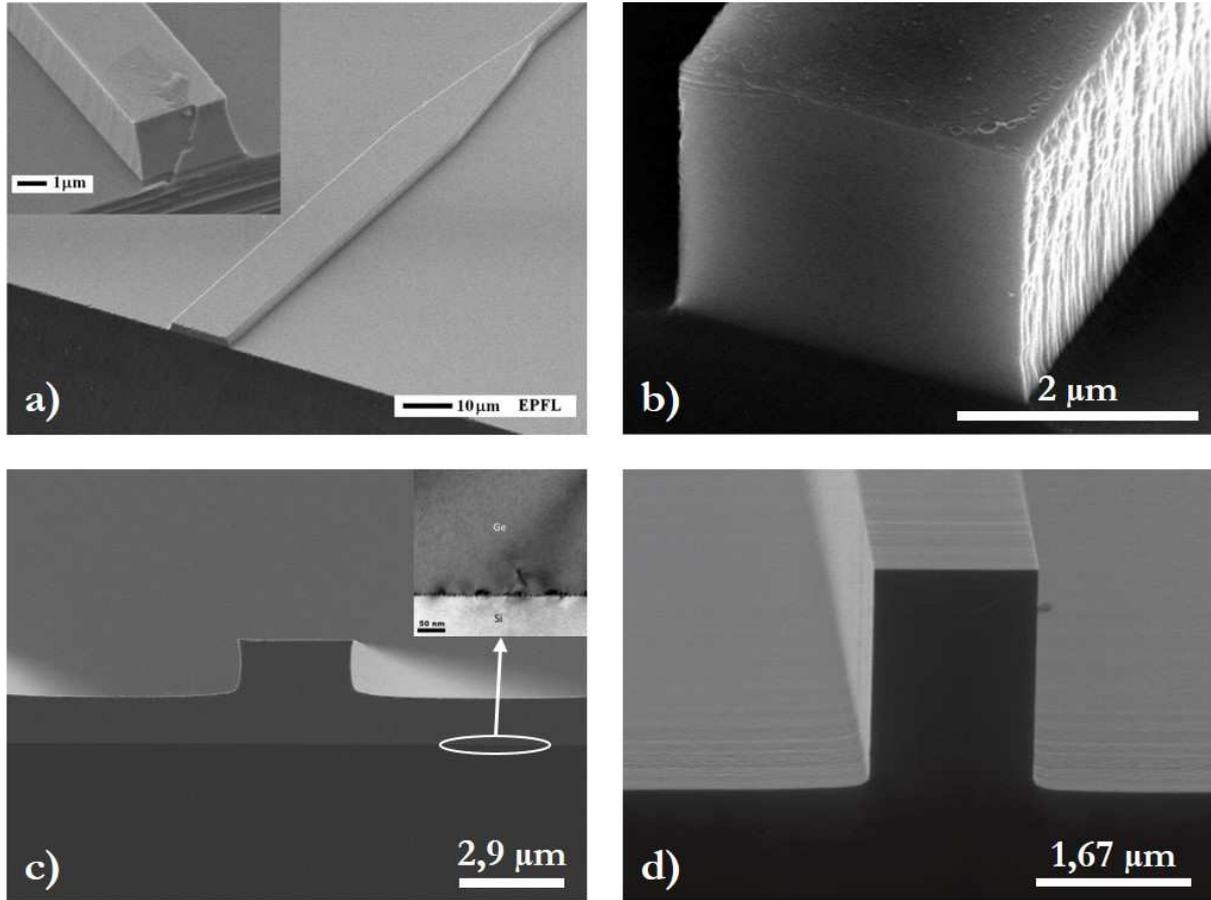


Figure I-28 : Images prises au microscope à balayage électronique de guides Ge ou SiGe épitaxiés sur Si dans la littérature : a) Guide Ge strip (Source : Chang *et al.* [142]) b) Guide Ge strip (Source : Malik *et al.* [143]) c) Guide Ge rib. Le zoom est une image prise au microscope électronique à transmission montrant les dislocations à l'interface Si/Ge (Source : Nedeljkovic *et al.* [144]) d) Guide SiGe channel avant encapsulation Si (Source : Grillet *et al.* [146]).

3.2.6. Conclusion

Avant de résumer notre propos, il est à noter que l'état de l'art qui vient d'être fait date en très large majorité de 2013 à 2016, soit la période de ces travaux de thèse. L'ensemble des solutions envisageables sur silicium a été récapitulé sous forme de tableau (Tableau I-3) avec les réalisations et mesures correspondantes. A court terme, la solution la plus simple revient à utiliser un substrat SOI pour faire des guides *rib* aux dimensions adaptées. Premièrement, cela présente l'avantage d'avoir très peu de développement procédé à faire. En effet, on ne fait que détourner la technologie développée pour les *telecom/datacom*. Tous les procédés de fabrication sont déjà matures et l'on peut rapidement concevoir des objets complexes visant des applications précises. Deuxièmement, l'on bénéficie d'un contraste d'indice très fort permettant des composants et des circuits compacts. En revanche, le domaine MIR couvert est extrêmement restreint avec le SiO₂ empêchant d'aller au-delà de $\lambda=3,7 \mu\text{m}$. La suspension des guides semble être prometteur pour résoudre ce problème et couvrir une plus large partie de ce domaine, jusqu'à $\lambda=8 \mu\text{m}$, tout en restant sur substrat SOI. Néanmoins la faisabilité de puce à grande densité de motifs semble compromise et peut, en pratique, annuler l'avantage du fort contraste d'indice. Enfin, les résultats sur guide piédestal semblent suggérer qu'il vaut mieux suspendre complètement le guide ou ne pas le suspendre du

tout. L'absorption du SiO_2 étant le facteur limitant, une solution plus simple que la suspension consiste à utiliser un substrat où le SiO_2 est remplacé par un matériau comme le saphir, pour le substrat SOS ou le Si_3N_4 , pour le substrat SON. Tout en restant sur des technologies relativement similaires au SOI, ils permettent de couvrir une part plus importante du domaine MIR ($\lambda_{\text{max}}=4,4 \mu\text{m}$ pour le SOS et $\lambda_{\text{max}}= 6,7 \mu\text{m}$ pour le SON). Cependant le SOS n'est pas un standard des salles blanches et son petit diamètre (100 mm) n'est pas adapté aux machines actuelles opérant sur substrat 200 mm ou 300 mm. Le SON ne se fabrique qu'en laboratoire et les pertes annoncées ($>5 \text{ dB.cm}^{-1}$) sont très importantes par rapport aux résultats escomptés. Une des solutions les plus prometteuses semble d'épitaxier du germanium ou un alliage silicium-germanium sur un substrat Si. Quelles que soient les géométries ou la composition de l'épitaxie, les pertes mesurées peuvent être extrêmement faibles, de l'ordre de $0,5\text{-}0,6 \text{ dB.cm}^{-1}$. Le contraste d'indice est certes bien moins important ($\Delta n \approx 0,58$) que le SOI mais le domaine MIR est quasiment couvert dans son entièreté ($\lambda_{\text{max}}= 16,9 \mu\text{m}$ avec le Ge). A cela s'ajoute les perspectives d'intégration monolithique de photodétecteur et de laser à base d'alliage de GeSn actuellement en cours de développement [112] [147]. Sur ces critères, ces travaux de thèse se sont concentrés sur l'utilisation du germanium pour le développement d'une plateforme photonique MIR CMOS compatible au sein de la salle blanche 200 mm du CEA-Leti.

| Type de guide (substrat) | Domaines de fonctionnement théorique (d'après Soref <i>et al.</i> [135]) | Réalisation : Géométrie (Empilement), hauteur x largeur : Pertes (polarisation) |
|---|--|--|
| Si/SiO ₂ /Si (SOI) | 1,2-2,6 μm / 2,9-3,7 μm / 100-200 μm | Rib (Air/Si/SiO ₂ /Si), 0,4x1,35 μm ² : 1,46 dB.cm ⁻¹ à λ=3,77 μm (TM) [148] Rib (Air/Si/SiO ₂ /Si), 0,5x1,3 μm ² : 1,28 dB.cm ⁻¹ à λ=3,8 μm (TM) [122] |
| Si piédestal (SOI) | NA | SOUP (Air/Si/SiO ₂ /Si), 2x2 μm ² : pas de mesure [124] |
| Si piédestal (Si) | NA | Si piédestal (Air/Si), 8x5 μm ² : 2,7 dB.cm ⁻¹ à λ=3,7 μm [125] |
| Si suspendu (SOI) | 1,2-8 μm / 24-200 μm | Membrane (Air/Si/Air), 0,34x1 μm ² : 3 dB.cm ⁻¹ à λ=2,75 μm (TE) [127] Sub-λ (Air/Si/Air), 0,5x1,1 μm ² : 3,4 dB.cm ⁻¹ à λ=3,8 μm (TE) [128] Sub-λ (Air/Si/Air), 0,5x1,3 μm ² : 0,82 dB.cm ⁻¹ à λ=3,8 μm (TE) [129] |
| Si/Si ₃ N ₄ /Si (SON) | 1,2-6,7 μm | Rib (Air/Si/Si ₃ N ₄ /Si), 0,5x1,3 μm ² : 5,2 dB.cm ⁻¹ (TE) et 5,1 dB.cm ⁻¹ (TM) à λ=3,39 μm [134] |
| Si/Al ₂ O ₃ (SOS) | 1,2-4,4 μm | Strip (Air/Si/Al ₂ O ₃), 0,6x1,8 μm ² : 4,3 dB.cm ⁻¹ à λ=4,5 μm (TE) [131] Strip (Air/Si/Al ₂ O ₃), 0,6x1,8 μm ² : 4 dB.cm ⁻¹ à λ=5,5 μm (TE) [132] Channel (SiO ₂ /Si/Al ₂ O ₃), 0,28x1 μm ² : 1,92 dB.cm ⁻¹ à λ=5,18 μm (TE) [133] |
| Guide creux (Si) | 1,2-200 μm | NA |
| Si _{1-x} Ge _x /Si | 1,6-12 μm / 100-200 μm | Channel (Si/Si _{0,6} Ge _{0,4} /Si), 2x1,4 μm ² : 1,5 dB.cm ⁻¹ à λ=3,25 μm 0,5 dB.cm ⁻¹ à λ=4,75 μm (TE) [146] |
| Ge/Si | 1,9-16,8 μm / 140-200 μm | Strip (Air/Ge/Si), 2x2,9 μm ² : 2,5 dB.cm ⁻¹ à λ=5,8 μm (TM) [142] Strip (Air/Ge/Si), 2,2x2 μm ² : 2,5-3,5 dB.cm ⁻¹ (TE) et 3-4 dB.cm ⁻¹ (TM) λ=5,15-5,4 μm [143] Rib (Air/Ge/Si), 2,7x2,9 μm ² : 0,6 dB.cm ⁻¹ à λ=3,8 μm (TE) [144] |

Tableau I-3 : Tableau récapitulatif des différents types de guide envisageables pour une plateforme d'optique intégrée sur silicium dédiée à l'infrarouge moyen. Pour chaque type, les réalisations effectuées (géométrie, dimensions, empilements, pertes mesurées) sont répertoriées.

3.3. La plateforme SiGe du CEA-Léti

Avant de conclure sur les objectifs et motivations de cette thèse, il est nécessaire de donner le contexte de travail dans lequel elle s'inscrit. Dans le cas présent, cette thèse a été menée au sein du CEA-Léti dans lequel de précédents travaux sur la photonique MIR ont été réalisés. Cette dernière partie vise à exposer les spécificités de la plateforme qui a été développée. Nous concluons sur ses avantages et ses inconvénients et nous motiverons les choix des directions de développements qui ont fait l'objet de ces travaux de thèse.

3.3.1. Guides à gradient d'indice

Les guides développés au CEA-Léti sont des guides SiGe à gradient d'indice de type *channel*, enterrés sous le Si. L'indice optique de ces guides varie linéairement entre le cœur et la gaine selon la verticale du guide (Figure I-29a). Pour ce faire, la composition en Ge varie entre 0 % et 40 % entre le haut ou le bas du guide et le centre (Figure I-29b). Ce gradient de composition a été mis

au point dans le but d'éviter d'éventuelles dislocations qui apparaîtraient aux interfaces $\text{Si}_{0,6}\text{Ge}_{0,4}/\text{Si}$ avec la différence de constante de maille entre les deux structures.

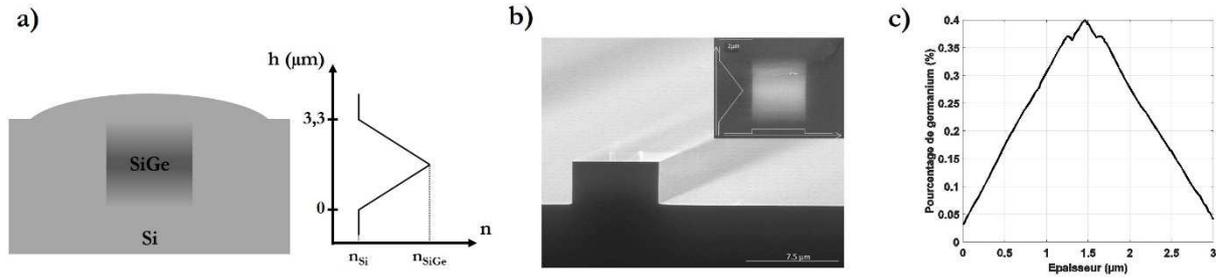


Figure I-29 : Guide à gradient d'indice mis au point au CEA-Leti. a) Schéma de la section du guide avec la variation d'indice théorique. b) Image MEB avant et après encapsulation de l'épitaxie de SiGe à gradient de composition. c) Mesure par spectrométrie de masse des ions secondaires (SIMS : Secondary Ion Mass Spectrometry) de la composition du guide.

Ces guides ont été conçus pour une future intégration hybride avec des QCLs qui émettent en polarisation TM, soit un champ électrique vertical. Dans le but de faire des puces avec des lasers à différentes longueurs d'onde, il faut que ces guides puissent être monomodes sur une grande partie du MIR. En variant les dimensions latérales du guide, il est possible de concevoir des guides à faibles pertes qui ont la même épaisseur (Figure I-30). La surface supérieure de tous les guides étant à la même hauteur, il est ensuite possible de venir coller une épitaxie III-V où seront définis les QCLs. Dans ce cadre, les guides font 3,3 μm d'épais avec des largeurs différentes suivant les longueurs d'onde (Figure I-30). Deux guides différents ont été réalisés : un de 3,3 μm de large pour $\lambda=4,5 \mu\text{m}$ et un de 7,0 μm de large pour $\lambda=7,4 \mu\text{m}$. Le premier a montré des pertes par propagation inférieure à $1 \text{ dB}\cdot\text{cm}^{-1}$ à $\lambda=4,5 \mu\text{m}$ et inférieure à $1,5 \text{ dB}\cdot\text{cm}^{-1}$ à $\lambda=5,65 \mu\text{m}$. Le second présente des pertes par propagation inférieures à $2 \text{ dB}\cdot\text{cm}^{-1}$ à $\lambda=7,4 \mu\text{m}$ [149]. Ces guides sont donc capables de couvrir la plage pour laquelle ils étaient conçus, soit $\lambda=3-8 \mu\text{m}$.

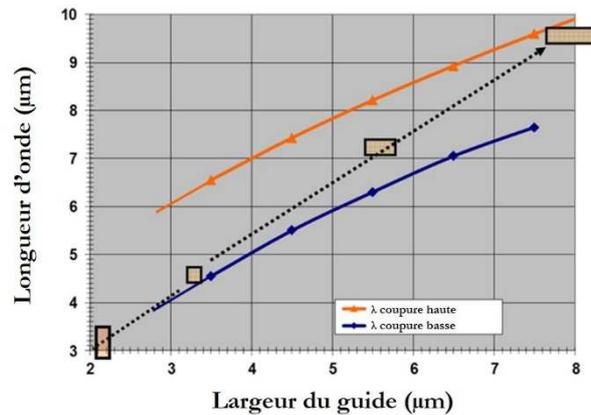


Figure I-30 : Plage de monodécité en polarisation TM des guides à gradient d'indice selon la largeur du guide et la longueur d'onde de fonctionnement. (Source : Brun et al. [149]).

3.3.2. Limitations de la plateforme SiGe à gradient d'indice

Ces travaux de thèse sont inscrits dans une démarche de recherche technologique. Les réalités du monde industriel ne sont donc pas ignorées et à cet égard, la plateforme SiGe à gradient d'indice n'est pas exempt de défauts. Tout d'abord, l'épitaxie des profils de gradient de composition est difficilement reproductible (Figure I-31). L'épaisseur et la composition des cœurs des guides ne sont pas garantis et cela pose problème pour la mise au point de composants sensibles aux variations technologiques comme les coupleurs évanescents ou les AWG. Deuxièmement, le

contrôle d'épaisseur du guide en salle blanche se fait par technique ellipsométrique. Or, l'épaisseur d'un profil à gradient est difficilement mesurable avec ce type de mesure. Les guides à gradient posent donc un problème de métrologie dite « *in-line* », c'est-à-dire de contrôle en cours de production. Enfin, ces guides représentent un confinement relativement faible de la lumière. Il s'ensuit que les circuits sont peu compacts et cela pose des problèmes à court terme pour le développement de circuits plus complexes ou pour l'utilisation de boîtiers miniatures.

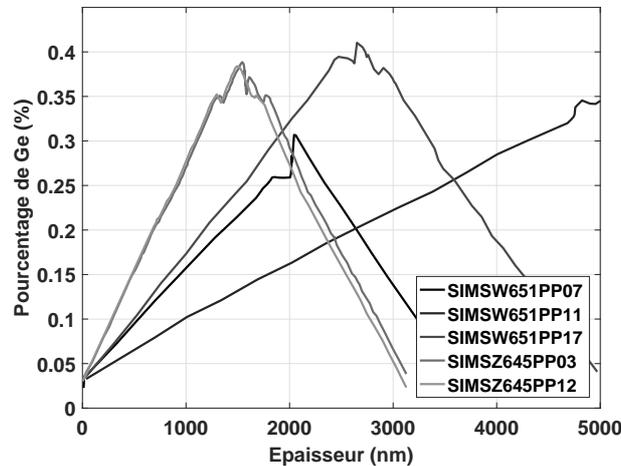


Figure I-31 : Mesures SIMS du profil de concentration en germanium sur plusieurs épitaxies SiGe pour la fabrication des guides à gradient d'indice.

4. Conclusion et motivations

A travers un premier état de l'art de ce qu'est l'optique intégrée aujourd'hui, nous avons pu constater la multiplicité des plateformes, des applications adressées à travers elles ainsi que les longueurs d'onde mises en jeu dans ces circuits. Une brève revue des interactions lumière-matière intervenant dans le moyen infrarouge a montré tout l'apport que pouvait représenter des technologies intégrées dans ce domaine. Nous avons vu que le MIR pouvait aussi bien nécessiter des circuits travaillant avec des longueurs d'onde discrètes très éloignées dans le cas, par exemple, d'une application de détection multi-gaz ($\lambda_{\text{CO}_2}=4,2 \mu\text{m}$ et $\lambda_{\text{NO}_2}=6,1 \mu\text{m}$) ; que des circuits avec des sources larges bandes couvrant tout une portion du MIR pour, par exemple, faire des spectres très résolus en fréquence. Nous avons justifié le choix de nous diriger vers la plateforme silicium, et plus particulièrement de travailler sur des guides à base de germanium. Reposant sur des précédents travaux effectués au sein du CEA-Leti, ces travaux de thèse ont pour but de développer une plateforme photonique MIR. Ce développement s'est fait autour de plusieurs axes :

- Amélioration technologique de la plateforme existante
- Préparer la voie vers des circuits larges bandes
- Explorer de nouvelles solutions pour co-intégrer des circuits fonctionnant à des longueurs d'onde très éloignées spectralement
- Permettre la montée en maturité de la plateforme

Ces axes de travail nous ont conduits à passer à une technologie à saut d'indice afin de résoudre les problèmes de reproductibilité, de métrologie et de compacité de nos circuits. Pour que ces développements soient possibles, le dimensionnement et la conception des différentes fonctions optiques permettant de valider la plateforme à saut d'indice seront exposés à travers le chapitre II. La validation expérimentale de cette technologie fera l'objet du chapitre III. Le deuxième axe s'est traduit par la réalisation d'un multiplexeur de type AWG dans la perspective de réaliser des sources

QCL hybrides large bande ($\Delta\sigma \geq 100 \text{ cm}^{-1}$) qui fait également l'objet du chapitre III. Le troisième axe s'est traduit par l'exploration d'un procédé de fabrication alternatif permettant la fabrication simultanée de plusieurs circuits fonctionnant à des longueurs arbitrairement éloignées dans le domaine MIR. Ce procédé doit permettre également l'intégration hybride de source QCL III-V. Ce développement est traité dans le chapitre IV. Enfin, ces travaux nous ont amené à envisager une montée en maturité de la plateforme. Pour cela, l'accès aux tests statistiques a été déterminant pour la photonique SOI *telecom*. Nous avons donc cherché à mettre au point des solutions d'interface fibre/circuit via des réseaux de couplage pour ouvrir la plateforme aux tests statistique sur *prober*. La conception de ces réseaux fera l'objet du chapitre V et leur fabrication ainsi que leur caractérisation feront l'objet du chapitre VI.

Chapitre II- Conception de composants passifs pour l'évaluation de la plateforme SiGe à saut d'indice

L'évaluation d'une plateforme photonique se fait à travers des mesures sur des briques de base des PIC. Cela permet de s'assurer que la plateforme répond à certains critères, comme les pertes par propagation, et qu'il sera possible par la suite de construire des PIC plus complexes à partir de ces briques. L'évaluation expérimentale de la nouvelle plateforme à saut d'indice passe donc par une phase de conception des composants qui seront fabriqués et évalués pour la première fois. Ce chapitre est consacré au dimensionnement des briques de base de la nouvelle plateforme. Après un rappel sur la théorie électromagnétique du guidage optique, la géométrie des nouveaux guides sera présentée. Ensuite, le choix de chaque composant sera justifié à travers la problématique technique à laquelle il répond. Son fonctionnement théorique et son dimensionnement seront également exposés. Le chapitre conclura sur la bibliothèque de composants dimensionnés pour être réalisée sur la nouvelle plateforme à saut d'indice $\text{Si}_{0,6}\text{Ge}_{0,4}$.

1. Le guide optique : élément constitutif du circuit

Le guide optique est la brique de base sur laquelle s'appuie la conception de tout le circuit optique. Une introduction au guidage optique est donc nécessaire pour comprendre le dimensionnement du guide mais également le fonctionnement des différents composants fabriqués dans ces travaux de thèse. Au chapitre précédent, une première interprétation du phénomène de guidage optique a été donnée avec le principe de réflexion totale interne. En ajoutant à celui-ci la notion de chemin optique et de déphasage, il est possible de faire une première description du phénomène de propagation modale, qui est la base de l'optique guidée. La description exacte et complète des modes guidés ne peut cependant se faire qu'à l'aide d'une théorie électromagnétique complète, qui sera exposée dans un second temps.

1.1. Notions de mode optique

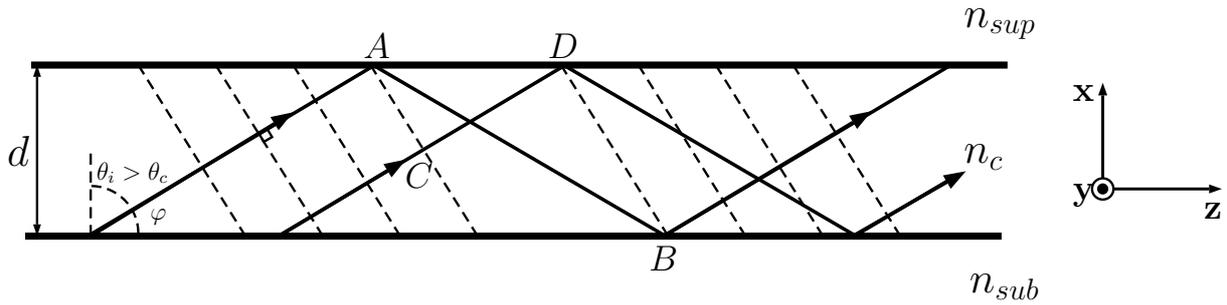


Figure II-1 : Propagation de deux rayons ayant le même angle d'incidence θ_i au sein d'un guide plan. Leurs fronts d'onde sont représentés en pointillés

Reprenons l'exemple du guide plan (Figure II-1) constitué d'un cœur d'indice optique n_c , d'une gaine supérieure d'indice n_{sup} et d'une gaine inférieure d'indice n_{sub} . La gaine supérieure est considérée semi-infinie dans la direction $+x$ et la gaine inférieure semi-infinie dans la direction $-x$. De plus la structure est invariante dans le plan y . Dans ce guide plan, nous allons considérer deux rayons lumineux faisant partie de la même onde plane. Ces deux rayons parcourent deux chemins optiques différents mais doivent être en phase tous les deux pour que l'onde guidée existe. D'après la Figure II-1, les points A et C sont sur le même front d'onde, de même pour les points B et D. Il s'ensuit que les chemins optiques AB et CD doivent être égaux à un multiple de 2π près. Ceci afin que des interférences constructives se fassent. En appliquant cette condition on aboutit, dans le cas le plus général (*i.e.* $n_{sup} \neq n_{sub}$), à l'équation suivante :

$$k_0 d \sqrt{n_c^2 - n_{eff}^2} - \tan^{-1} \left(\xi_{supc} \sqrt{\frac{n_{eff}^2 - n_{sup}^2}{n_c^2 - n_{eff}^2}} \right) - \tan^{-1} \left(\xi_{subc} \sqrt{\frac{n_{eff}^2 - n_{sub}^2}{n_c^2 - n_{eff}^2}} \right) = m\pi \quad (2)$$

Avec $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$ le vecteur d'onde dans le vide, $\xi_{ic} = \frac{n_c^2}{n_i^2}$ en polarisation TM et $\xi_{i1} = 1$ en polarisation TE. On introduit à cette occasion la notion d'indice effectif, noté n_{eff} . Il représente l'indice optique d'un milieu fictif dans lequel une onde plane acquerrait le même déphasage que l'onde guidée pour une même distance de propagation. La constante de propagation d'une onde guidée peut donc s'exprimer :

$$\beta = k_0 n_{eff} = k_0 n_c \cos \theta_i \quad (3)$$

L'équation (2) est appelée équation de dispersion des modes du guide plan. Elle montre que la lumière ne peut se propager dans un guide que pour des valeurs discrètes de la constante de propagation β (i.e. de l'angle d'incidence θ_i). Une onde dont la constante de propagation est solution de cette équation est appelée mode. La Figure II-2 présente l'évolution de l'indice effectif des modes guidés dans un guide plan symétrique en fonction du rapport d/λ . Les indices optiques choisis sont ceux d'un guide SiGe mis au point dans ces travaux de thèse ($n_c=3,597$ et $n_{sup}=n_{sub}=3,423$). On remarque que sous certaines conditions, un guide peut ne transporter qu'un seul mode, on parle alors de guide monomode. Au contraire si le rapport d/λ est suffisamment important, plusieurs modes peuvent être guidés en même temps. On parle alors de guide multimode.

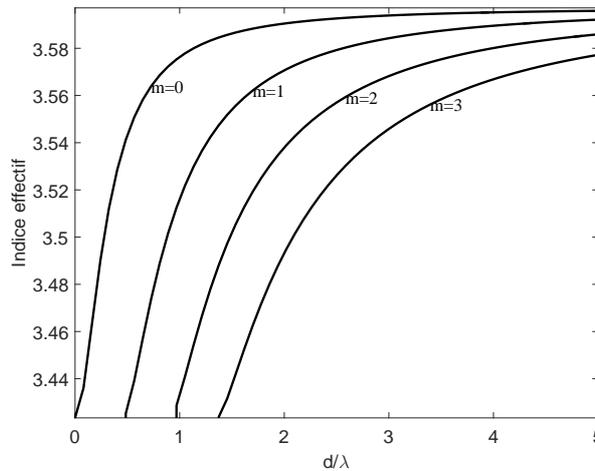


Figure II-2 : Evolution de la valeur de l'indice effectif des quatre premiers modes guidés en polarisation TE dans un guide plan symétrique en fonction du rapport d/λ . Le cœur du guide a un indice de 3,597 et la gaine un indice de 3,423.

1.2. Description électromagnétique du guidage optique

Vingt ans après les travaux de Jean-Daniel Colladon et Jacques Babinet, James Clerk Maxwell publia son ouvrage *A Dynamical Theory of Electromagnetic Field* où il considère la lumière comme une onde électromagnétique [150]. Il y expose les équations régissant son comportement, connues aujourd'hui sous le nom des équations de Maxwell qui s'expriment de la manière suivante :

$$\begin{aligned} \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{H} &= \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J} \\ \nabla \cdot \mathbf{D} &= \rho \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

Avec \mathbf{E} le champ électrique, \mathbf{H} le champ magnétique, \mathbf{B} l'induction magnétique et \mathbf{D} l'induction électrique. \mathbf{J} représente la densité de courant et ρ la densité de charge. Une description exacte de la propagation d'une onde guidée passe par une vision ondulatoire de la lumière et la résolution de ces équations. Dans ce manuscrit, les matériaux utilisés pour la fabrication des guides optiques sont

des matériaux diélectriques dont les propriétés optiques sont isotropes. La résolution des équations de Maxwell sera limitée à ce cas en supposant également que les matériaux n'engendrent aucune perte optique. En appliquant le jeu d'équations (4) au cas du guide plan symétrique, on démontre l'existence de deux jeux de composantes indépendantes des champs [151]. Les solutions ne faisant intervenir que les composantes (H_x, E_y, H_z) forment les modes dits TE pour « transverse électrique ». Les solutions ne faisant intervenir que les composantes (E_x, H_y, E_z) forment les modes dits TM pour « transverse magnétique ». On peut donc résoudre séparément le problème du guide plan pour les modes TE et pour les modes TM. Dans la suite nous ne présenterons que les résultats pour le cas TE mais la même démarche peut être appliquée au cas TM. Dans le cas du guide plan symétrique et pour des ondes polarisées TE, l'application des équations de Maxwell revient à résoudre l'équation d'Helmholtz suivante :

$$(\nabla^2 + k_0^2 n^2(x, z))\mathbf{E}(x, z) = 0 \quad (5)$$

Nous savons que les composantes E_x et E_z du champ sont nulles et que les solutions d'une telle équation sont de la forme :

$$\mathbf{E}(x, z) = \mathbf{E}_y(x) \cdot e^{j(\omega t - \beta_m z)} \quad (6)$$

Où ω est la pulsation électromagnétique et β_m la constante de propagation du m-ième mode. Dès lors, en réinjectant l'équation (6) dans l'équation (5), le problème revient à résoudre l'équation différentielle suivante :

$$\frac{\partial^2 E_y(x)}{\partial x^2} + (k_0^2 n^2(x) - \beta_m^2) E_y(x) = 0 \quad (7)$$

Celle-ci se résout à l'intérieur du guide et à l'extérieur du guide. Sachant que le mode guidé est confinée à l'intérieur du guide et que celui-ci voit son champ électromagnétique décroître exponentiellement dans la gaine, le champ électrique s'exprime de la façon suivante [152][153] :

$$E_y(x, z) = E_{y0} \cdot e^{-j\beta_m z} \begin{cases} \cos\left(\sqrt{k_0^2 n_c^2 - \beta_m^2} \frac{d}{2} + \psi\right) \cdot e^{-\alpha_{sup}(x - \frac{d}{2})}, & (x > d/2) \\ \cos\left(\sqrt{k_0^2 n_c^2 - \beta_m^2} \cdot x + \psi\right), & (-d/2 \leq x \leq d/2) \\ \cos\left(\sqrt{k_0^2 n_c^2 - \beta_m^2} \frac{d}{2} - \psi\right) \cdot e^{\alpha_{sub}(x + \frac{d}{2})}, & (x < -d/2) \end{cases} \quad (8)$$

Les coefficients ϕ , α_{sup} , et α_{sub} se déterminent à l'aide des conditions de continuité du champ électrique aux interfaces du guide. Ainsi on obtient :

$$\begin{aligned}
 \alpha_{sup} &= \sqrt{\beta_m^2 - n_{sup}^2} \\
 \alpha_{sub} &= \sqrt{\beta_m^2 - n_{sub}^2} \\
 \psi &= \frac{1}{2} \left(\tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{\beta_m^2 - k_0^2 n_{sub}^2}}{\sqrt{k_0^2 n_c^2 - \beta_m^2}} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{\beta_m^2 - k_0^2 n_{sup}^2}}{\sqrt{k_0^2 n_c^2 - \beta_m^2}} \right) \right)
 \end{aligned} \tag{9}$$

Les équations précédentes sont assez lourdes mais elles présentent des propriétés intéressantes sur le profil des modes guidés. Dans le cas simple du guide symétrique (*i.e.* $n_{sup} = n_{sub}$), la distribution du champ électrique est elle-même symétrique. On définit deux familles de mode optique : les modes pairs ($m= 0, 2, 4, \dots$) et les modes impairs ($m= 1, 3, 5, \dots$). Les premiers possèdent une symétrie axiale par rapport à l'axe de propagation tandis que les seconds ont une symétrie centrale. Le mode fondamentale (*i.e.* $m=0$) a la particularité d'avoir une épaisseur de coupure nulle. Dit autrement, pour un guide plan symétrique il existe toujours un mode de propagation même pour un cœur infiniment fin. Cette propriété n'est en revanche plus vrai dès que le guide est asymétrique (*i.e.* $n_{sup} \neq n_{sub}$). Il existe alors une épaisseur pour le cœur en-dessous de laquelle plus aucun mode ne peut se propager dans la structure. La Figure II-3 présente le profil du champ électrique pour les premiers modes guidés dans un guide plan symétrique. Une autre propriété intéressante, que nous ne démontrerons pas ici, est que les modes sont tous orthogonaux entre eux. De fait, ils forment la base d'un espace vectoriel. Ainsi toute onde guidée peut être décrite par une somme des modes formant cette base.

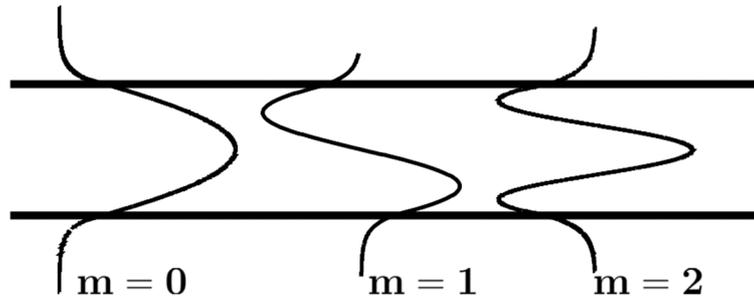


Figure II-3 : Amplitude du champ électrique des trois premiers modes d'un guide plan symétrique. On peut observer les propriétés de symétrie des modes pairs et impairs.

1.3. Sources de pertes en propagation guidée

Si l'on s'en tient à la description théorique du guidage optique que nous venons de voir, un mode optique se propage sans modification de son amplitude, c'est-à-dire sans pertes. Or, dans la pratique les guides optiques présentent plusieurs sources de pertes optiques.

1.3.1. Processus d'absorption

Une des premières sources de pertes optiques à laquelle on peut penser est l'absorption de la lumière par les matériaux constituant le guide. Celle-ci intervient principalement sous deux formes. La première est l'absorption de bord de bande. Lorsque les photons ont une énergie égale ou supérieure à la bande interdite du matériau alors ceux-ci sont absorbés en faisant passer des

électrons de la bande de valence à la bande de conduction. Pour le silicium où le *gap* indirect est de $E_g=1,1242$ eV (*i.e.* $\lambda_g=1,1$ μm) [141], celui-ci devient absorbant pour des photons dont la longueur d'onde est inférieure à λ_g . Cela explique pourquoi le silicium est utilisé dans les capteurs optiques pour le visible. De même, le germanium devient absorbant pour des longueurs d'onde inférieures à $\lambda=1,88$ μm (*i.e.* $E_g=0,664$ eV). La seconde source de pertes par absorption est l'absorption par porteur libre. Dans ce cas, ce sont les porteurs, électrons ou trous, qui sont déjà dans un état excité et qui, grâce à l'absorption d'un photon, atteignent des niveaux intermédiaires d'énergie, au sein de la bande de conduction pour les électrons et au sein de la bande de valence pour les trous. Dans les guides à base de semi-conducteurs, c'est ce phénomène qui est majoritaire dans les pertes par absorption.

1.3.2. Diffraction

La deuxième source majoritaire des pertes par propagation sont dus aux phénomènes de diffraction. On peut distinguer deux origines : la diffraction dite « de volume » et la diffraction aux interfaces [154]. La première vient d'imperfections au sein du matériau (cœur ou gaine) qui peuvent être dues à la présence d'impuretés (atomes contaminants dans la maille) ou à des défauts dans la maille cristalline. Un procédé de croissance de matériau mal maîtrisé ou mal adapté est souvent la source de ce type de pertes. La diffraction aux interfaces se localise à la transition entre le cœur et le gaine du guide. La rugosité des flancs du guide provoqué par la gravure peut être une source importante de diffraction ainsi que d'éventuelles dislocations du matériau de gaine lors de la reprise de croissance. Il est à noter qu'un mode optique polarisé TE (*i.e.* champ électrique parallèle au plan de la puce) sera plus sensible aux imperfections des flancs du guide et inversement un mode optique polarisé TM (*i.e.* champ électrique perpendiculaire au plan de la puce) sera plus sensible aux imperfections des interfaces inférieures et supérieures du guide.

1.4. Dimensionnement des guides sur plateforme SiGe

Dans ces travaux, les guides optiques ont été dimensionnés pour la longueur d'onde $\lambda=4,5$ μm . Ce sont des guides carrés (*i.e. channel*) dont le cœur est en $\text{Si}_{0,6}\text{Ge}_{0,4}$ enterrés sous le Si. Contrairement à la technologie à gradient d'indice, le cœur du guide a une composition constante de 40 % de germanium sur toute la hauteur. Afin que le guide ait le moins de pertes par propagation possible, le confinement du mode doit être maximum sans pour autant altérer sa monodicité. Pour se faire, il faut que les dimensions du guide soient telles que la valeur de la fréquence normalisée soit juste en-dessous de la fréquence de coupure du second mode. Le dimensionnement pour un guide *slab* est aisé car il existe une expression analytique de la fréquence normalisée V et des valeurs de fréquence de coupure. Dans le cas d'un guide carré à faible écart d'indice, F. Ladouceur et J. Love ont généralisé l'expression de la fréquence normalisée [155] :

$$V = \frac{\pi}{\lambda} \sqrt{w \cdot h \cdot (n_c^2 - n_g^2)} \quad (10)$$

Où w et h sont la largeur et la hauteur du guide, respectivement. Cependant F. Ladouceur et J. Love n'ont dérivé l'expression des fréquences de coupure que seulement pour des guides en silice. Dans notre cas, les guides ne sont ni à fort écart d'indice ni à faible écart d'indice. Empiriquement, une valeur de $V \approx 2$ donne un bon point de départ avant d'optimiser le résultat avec un solveur de mode numérique. Le problème de ne pas avoir de solution analytique est qu'à la coupure, l'extension spatiale du mode est infinie. Dès lors, les solveurs numériques ne prédisent pas avec

une grande précision la fréquence de coupure. Une marge doit donc être prise par rapport aux valeurs de la simulation. Cette plateforme étant développée dans le but d'intégrer des lasers QCLs hybrides sur silicium à moyen terme, les guides sont conçus pour ne supporter que le mode fondamental TM0 (*i.e.* les guides sont donc bimodes, le mode TE0 étant forcément guidé). En effet, les QCLs présentent la particularité d'émettre préférentiellement en polarisation TM [156]. En utilisant un solveur de mode commercial (Fimmprop[®]), les dimensions idéales se révèlent être $w=h=2,7 \mu\text{m}$ à $\lambda=4,5 \mu\text{m}$ en polarisation TM (Figure II-4).

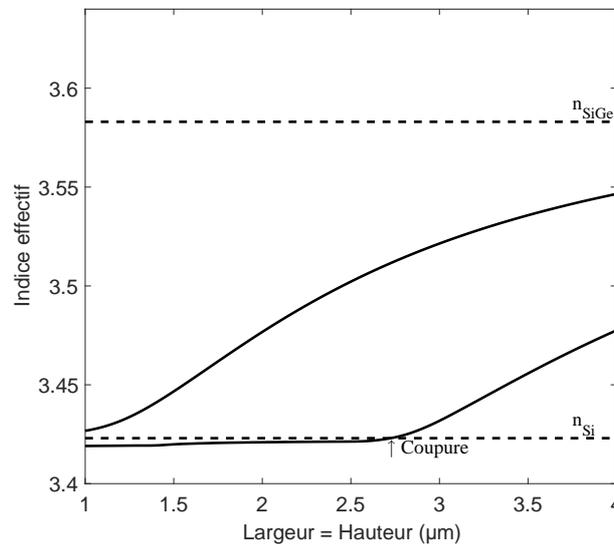


Figure II-4 : Indice effectif des premiers modes dans un guide à saut d'indice $\text{Si}_{0,6}\text{Ge}_{0,4}$ en fonction de $h=w$ pour $\lambda=4,5 \mu\text{m}$ en polarisation TM.

2. La problématique du routage optique

2.1. Introduction

Un PIC peut être vu comme un assemblage de composants optiques. Or, pour que ce PIC fonctionne il faut que ses composants soient reliés entre eux. On se retrouve alors dans un cas similaire aux circuits imprimés, où il est nécessaire de faire du routage. Le routage désigne de façon générale le processus d'agencement des interconnexions entre différents éléments. On parle de routage pour l'acheminement des paquets sur le réseau internet, pour le tracé des pistes électriques des circuits électroniques et désormais pour le tracé des guides optiques sur une puce photonique. Or, ce routage présente des contraintes importantes en optique intégrée. Contrairement à la microélectronique classique, le circuit est contraint dans un seul plan alors que les circuits intégrés utilisent plusieurs niveaux d'interconnexions métalliques donnant au routage une certaine souplesse (Figure II-5). Le nombre de chemins possibles est d'autant plus réduit en optique intégrée qu'il est difficile voire impossible d'arrêter brusquement un guide ou de lui faire faire des virages abrupts. Ils s'ensuivraient d'importantes pertes par diffraction rendant le circuit inutilisable. Ainsi pour qu'un routage optique soit possible il faut être capable de faire des guides courbes voire dans certains cas de pouvoir faire croiser des guides. Les capacités de routage d'une plateforme forment un élément important car de cela découle en partie la compacité et le nombre maximal de composants que l'on peut mettre sur une surface de puce donnée. L'évaluation d'une plateforme passe donc par la mise au point des composants optiques nécessaires au routage optique.

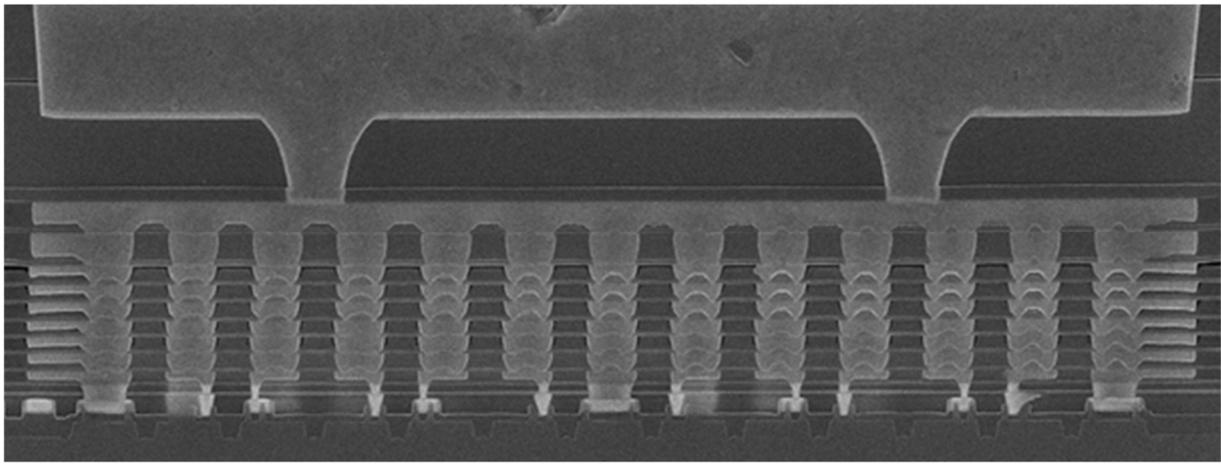


Figure II-5 : Image MEB (coupe) de la puce Exynos 7420 présente dans les téléphones Samsung Galaxy S6. Les 11 niveaux d'interconnexions métalliques permettent un routage électrique en trois dimensions (Source : www.chipworks.com).

2.2. Virages

Afin de pouvoir relier les composants optiques du PIC comme on le désire, il est nécessaire de courber les guides et de faire des virages. Le virage est une brique de base importante en optique intégrée car il permet d'augmenter la densité d'intégration. Plus des virages serrés sont possibles, plus il est possible d'intégrer de composants et donc plus le circuit pourra réaliser de fonctionnalités avancées. Nous nous proposons ici de faire un bref rappel théorique sur les guides courbes puis nous exposerons la technique employée pour le dimensionnement des virages S utilisés dans ces travaux de thèse.

2.2.1. Sources de pertes dans les guides courbes

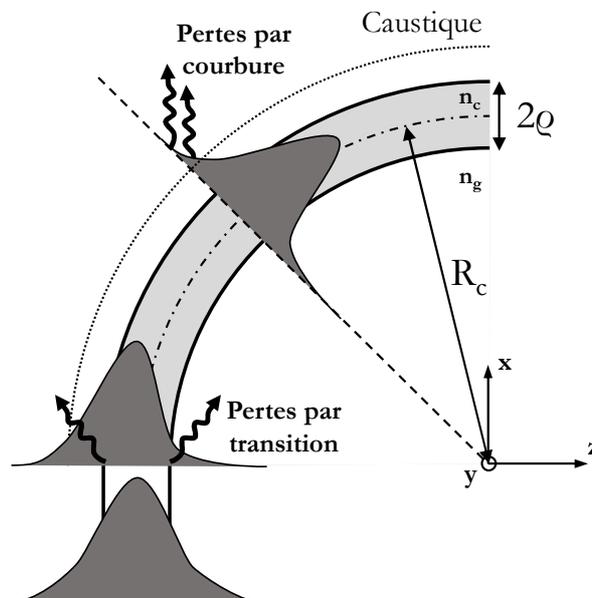


Figure II-6 : Schéma des sources de perte dans un virage en optique guidée.

Le virage est un composant qui intrinsèquement engendre des pertes. Dans un guide droit la lumière se propage sans changement dans la distribution spatiale de son champ électromagnétique. En revanche dès que le guide se courbe deux sources de pertes apparaissent : les pertes par transition et les pertes par courbure. Les premières sont dues à la discontinuité que représente le

début, ou la fin, du virage. Les pertes se font à l'endroit où le rayon de courbure du guide passe brutalement de l'infini à une valeur finie. Le mode dans le guide droit est parfaitement centré, tandis que le mode dans le virage est déformé et décalé vers l'extérieur du virage. Le mode existant dans le virage et dans le guide droit n'étant pas le même, l'intégrale de recouvrement entre les deux est imparfaite et une partie de la puissance n'est pas transmise correctement et se trouve perdu par radiation.

Pour comprendre l'origine des pertes par courbure nous allons considérer le front d'onde d'un mode se propageant dans un guide courbe (Figure II-6). Si l'on suppose que le front d'onde doit rester plan, la vitesse de phase du mode dans le virage doit augmenter au fur et à mesure que l'on s'éloigne du centre de courbure. Celle-ci ne peut augmenter indéfiniment et ne peut dépasser la vitesse d'une onde plane se propageant dans la gaine. Ainsi au-delà d'une distance x_c où $v_{phase} = c/n_g$, le front d'onde se courbe et la lumière fuit. Ce point est appelé caustique de radiation. Celui-ci peut s'exprimer sous la forme [157] :

$$\frac{x_{rad}}{\rho} = \frac{R_c \Delta W^2}{\rho V^2} \quad (11)$$

Avec, R_c le rayon de courbure, ρ la demi-largeur du guide, le contraste $\Delta = (n_c^2 - n_g^2)/2n_c^2$, et les variables réduites $W = k_0 \rho \sqrt{n_{eff}^2 - n_g^2}$ et $V = k_0 \rho n_c \sqrt{2\Delta}$. Qualitativement, cela nous permet de voir que plus le rayon de courbure est petit plus le point de caustique est proche et plus les pertes par courbure seront importantes. Pour être plus précis, les travaux de Marcatili montrent que les pertes par courbure augmentent exponentiellement avec le rayon de courbure [158] [159]. Ainsi pour une technologie de guide donnée, le rayon de courbure minimum des virages du circuit sera un compromis entre compacité et pertes. De plus, on remarque que plus l'indice effectif est faible plus le point de caustique sera proche. Les modes d'ordre supérieurs subiront donc plus de pertes dans les virages que les modes fondamentaux. Les circuits photoniques sont ainsi dans la majorité des cas monomodes pour minimiser les pertes par courbure. Le virage est donc un élément difficilement miniaturisable.

2.2.2. Dimensionnement pour la plateforme

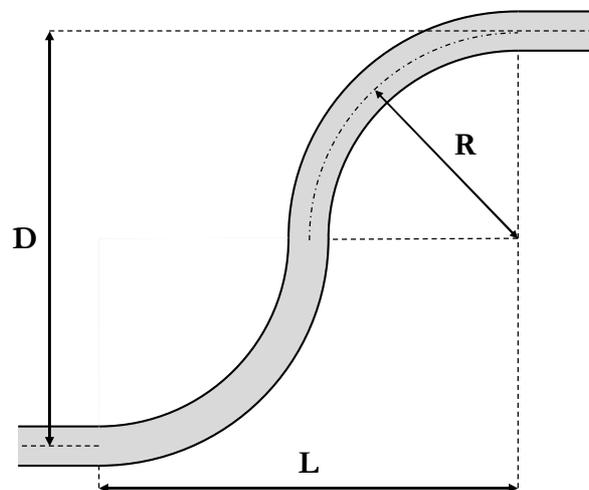


Figure II-7 : Schéma d'un virage S et des paramètres géométriques.

Dans ces travaux les virages S (Figure II-7) ont été dessinés pour le routage de structures permettant la mesure des fonctions optiques ainsi que pour la construction des coupleurs directionnels que nous verrons par la suite. Ceux-ci ont donc été conçus pour engendrer de faibles pertes pour ne pas perturber la mesure. Le critère retenu est d'avoir des pertes par courbure théoriques inférieures à $0,1 \text{ dB.cm}^{-1}$. Deux virages S différents sont présents dans les structures de tests. Les deux virages font $335 \mu\text{m}$ de long et diffèrent par leur décalage vertical D entre l'entrée et la sortie : 76 ou $80 \mu\text{m}$. Pour d'obtenir des pertes par courbure inférieures à $0,1 \text{ dB.cm}^{-1}$, le rayon de courbure doit être inférieure ou égale à $370 \mu\text{m}$. Le calcul a été fait à l'aide du logiciel Fimmwave® (V6.1.1).

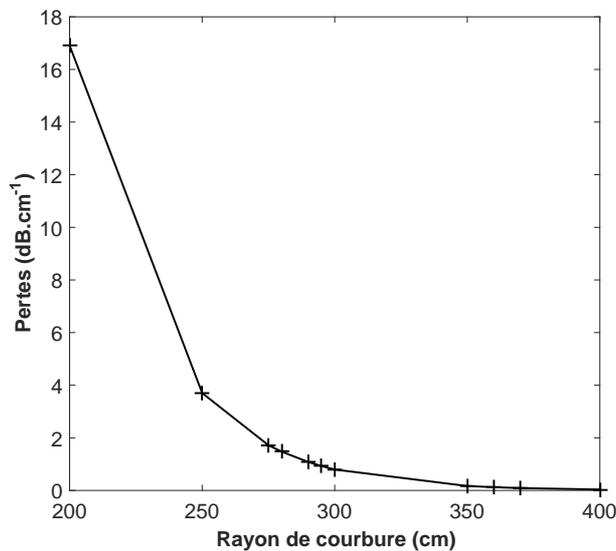


Figure II-8 : Pertes par courbure calculées à l'aide du logiciel FIMMWAVE pour des guides carrés $\text{Si}_{0.6}\text{Ge}_{0.4}$ enterrés dans le Si, fonctionnant à une longueur d'onde de $4,5 \mu\text{m}$.

Pour minimiser les pertes par transition et les pertes par courbure, il est possible d'appliquer deux techniques spécifiques : l'élargissement et le décalage du guide courbe [160]. La première consiste à ce que le guide courbe soit plus large que le guide droit. On éloigne ainsi la caustique de radiation ce qui permet de réduire les pertes par courbure. La seconde consiste à ce qu'il y ait un décalage entre le centre du guide courbe et du guide droit. Cela permet de maximiser l'intégrale de recouvrement et d'optimiser le transfert de puissance entre le virage et le guide droit. Dans la phase de conception, trouver le bon couple « élargissement-décalage » peut être assez compliqué. Les virages S ont ici été conçus à l'aide d'une méthode développée au CEA-Léti consistant à faire varier continûment le rayon de courbure et l'élargissement des guides [157]. La méthode présente le double avantage d'être automatisée et plus robuste technologiquement. En effet, elle évite d'avoir des motifs avec des angles droits qui sont difficilement reproduits correctement en photolithographie. Ainsi pour un rayon de courbure donné, le virage S obtenu par cette méthode a une transmission bien plus importante qu'un virage S identique mais avec une courbure et une largeur constante. En plus des deux virages S nécessaires au routage pour ces travaux, deux variantes ont été ajoutées. La première variante, dites « E_{auto} », est directement le virage que l'on trouve naturellement avec la méthode décrite ci-dessus. La deuxième variante, dites « E_{250} », correspond simplement à la première variante à laquelle on a augmenté le facteur d'élargissement du virage. Cette deuxième variante est sensée avoir moins de pertes. Leurs caractéristiques sont résumées Tableau II-1.

| | S335-D76-Eauto | S335-D76-E250 | S335-D80-Eauto | S335-D80-E250 |
|---|----------------|----------------------|----------------|-------------------|
| Décalage D (μm) | 76,254 | 76,254 μm | 80 | 80 μm |
| Longueur L (μm) | 335 | 335 | 335 | 335 μm |
| Coefficient d'élargissement (μm^2) | 130,4 | 250 | 130,4 | 250 |

Tableau II-1 : Résumé des caractéristiques géométriques des virages S conçus pour la plateforme SiGe à saut d'indice. Le calcul du coefficient d'élargissement peut être trouvé dans la publication de Ladouceur et al. [157].

2.3. Croisements

Le développement naturel d'une technologie de PIC est d'aller vers plus de fonctionnalités. Cela s'accompagne [161] généralement d'un accroissement du nombre de fonctions optiques, ainsi que d'un allongement toujours plus important du chemin optique parcouru par la lumière dans la puce. Le routage devient alors de plus en plus complexe et il peut arriver que relier deux composants demandent de faire de grands détours, car plus aucun autre chemin n'est possible. La possibilité de faire croiser des guides devient alors essentielle, à la fois pour alléger les contraintes de routage optique et pour diminuer l'empreinte du circuit.

2.3.1. Effets d'un croisement sur la propagation

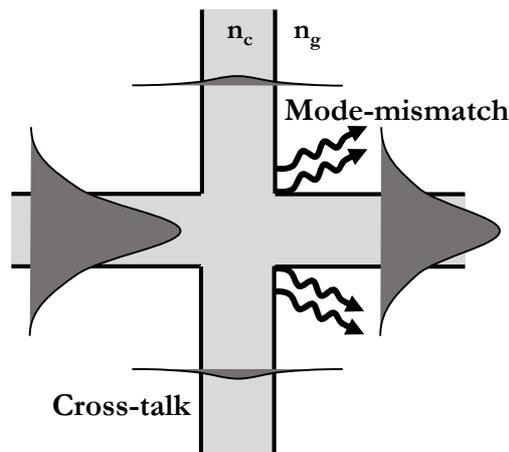


Figure II-9 : Schéma des sources de pertes dans un croisement en optique intégrée.

Le croisement se fait généralement à 90° pour minimiser les phénomènes de couplage optique entre les guides car des guides suffisamment proches peuvent échanger de l'énergie, chose que l'on veut éviter ici. En plus de ce phénomène, un mode optique arrivant à l'intersection diffracte dû au changement brutal de milieu. La puissance optique va en partie aller dans le guide opposé mais également aller dans l'autre guide composant l'intersection. Le reste est simplement perdu dans des modes non guidés. Lors de la conception de croisements, on cherche donc à maximiser la transmission de part et d'autre de l'intersection mais également à minimiser tout phénomène de *cross-talk*, c'est-à-dire d'échange non désiré de puissance optique entre deux guides. Des formulations analytiques des pertes aux intersections et des comparaisons à des outils de simulations peuvent être trouvées dans les travaux de Ladouceur [161] et Gevorgyan [162]. Tout comme pour les virages des techniques existent pour minimiser les pertes optiques aux intersections. Il est possible d'ajuster l'angle de croisement pour minimiser les pertes [163]. On

peut également directement travailler sur la géométrie du croisement. Bogaerts et al. ont ainsi mis au point un croisement fait de *tapers* réalisés par deux gravures successives [164] diminuant le contraste d'indice et par la même occasion les phénomènes de diffraction et de réflexion. Dernièrement, des géométries plus simples ont été proposées permettant de limiter au maximum les phénomènes de diffraction [165]. Enfin, les meilleures performances sur des guides SOI (-0,07 dB/croisement à ce jour) sont obtenues en exploitant des phénomènes d'interférences multimodales [166].

2.3.2. Dimensionnement pour la plateforme

Lors du développement de la plateforme SiGe à gradient des croisements avaient été fabriqués [149]. Afin de pouvoir comparer les deux technologies des croisements à 90° ont été dimensionnés pour les guides SiGe à saut d'indice. Trois variantes de croisements ont été dessinées avec une largeur croissante de guide au niveau de l'intersection : 2,7, 4 et 6 μm . Le guide est élargi avant le croisement puis rétréci après via un *taper*. Le *taper* est linéaire et pris volontairement très long (248 μm) pour ne pas ajouter des pertes supplémentaires par diffraction. Les pertes théoriques des croisements ont été calculées en FDTD-3D et sont de l'ordre de -0,1 dB/croisement.

2.4. Conclusion

Nous venons de dimensionner deux briques de base qui seront utilisées pour évaluer expérimentalement la nouvelle plateforme SiGe à saut d'indice. Ces deux briques, virage et croisement, sont des éléments sans lesquels un circuit ne peut tout simplement pas exister. Aucun composant ne peut être relié sans eux et c'est grâce à eux que nous pourrons construire l'ensemble du circuit de test. Maintenant que nous disposons des composants de routage, nous allons nous intéresser à des composants qui auront besoin de ces éléments de liaisons.

3. Division et répartition de puissance

3.1. Introduction

Les montages optiques requièrent régulièrement de pouvoir faire de la répartition de puissance. L'exemple le plus classique est l'interféromètre de Michelson, où une lame semi-réfléchissante permet de diviser et de recombinaer un faisceau. Dans ce cas, la division de puissance permet d'obtenir deux faisceaux de puissance égale et cohérents entre eux que l'on va pouvoir faire interférer. Ce type de montage a son équivalent en optique intégrée avec, par exemple, l'interféromètre de Mach-Zehnder. Un autre cas pratique est le contrôle et la régulation de la puissance optique émise par une diode laser. Cette fois on ne divise pas la puissance en deux mais l'on vient prélever une petite partie de la puissance émise par le laser pour l'envoyer sur un photodétecteur. La mesure de cette puissance permet de connaître en temps réel la puissance optique délivrée par le laser sans altérer ses performances. De plus, on peut mettre en place une boucle de rétroaction électronique afin de réguler et améliorer la stabilité de l'émission du laser. On peut ainsi imaginer d'avoir en optique intégrée un composant prélevant une petite partie de la puissance émise par un laser hybride afin de l'amener vers un photodétecteur et contrôler la puissance émise.

Pour résumé, deux cas de figures se présentent en répartition de puissance. Soit la puissance du faisceau en entrée est divisée également en N faisceaux (ex : interféromètre), soit cette division est faite avec des coefficients arbitraires (ex : boucle de rétroaction). Afin d'évaluer la capacité de la plateforme SiGe à saut d'indice à répondre à ces problématiques, deux composants ont été

dimensionnés : le guide à interférence multimode (MMI : *MultiMode Interference*) et le coupleur directionnel symétrique.

3.2. Division de puissance par MMI 1x2

La division de puissance en N faisceaux peut être fait par trois composants : les jonctions Y qui consistent en un guide qui se divise en deux, les coupleurs directionnels et les MMI. Dans ces travaux, nous avons fait le choix du MMI car il présente le double avantage d'être plus robuste technologiquement et d'être plus facile à dimensionner [167]. Nous nous sommes restreint au cas de la division en deux faisceaux, soit le cas du MMI 1x2.

3.2.1. Théorie

Le MMI est un guide d'onde multimode dont on exploite les propriétés d'auto-imagerie découlant des phénomènes d'interférences entre les différents modes. Historiquement suggéré dans les guides plans par Bryngdahl [168], l'auto-imagerie consiste en la reproduction en une ou plusieurs images, du profil de champ en entrée d'un guide multimode, à des intervalles périodiques le long de l'axe de propagation. Dans le cas le plus général, N guides d'entrées viennent exciter le guide multimode et M guides de sortie récupèrent la lumière. On parle alors de MMI NxM. Les propriétés des MMI font qu'ils peuvent remplir de nombreuses fonctions différentes : multiplexage-démultiplexage en longueur d'onde [169], de modes [170] ou de la combinaison de faisceau [171]. Dans le cas présent, nous cherchons à utiliser le MMI en tant que coupleur -3 dB, soit un MMI 1x2 où l'entrée est imagée en double à la sortie. Soldano *et al* [172] ont fait la démonstration complète du fonctionnement du MMI NxM en utilisant la technique d'analyse de propagation de modes guidées (*i.e.* MPA : *guided-mode propagation analysis*). Nous rappellerons ici les principaux résultats appliqués au cas du MMI 1x2. La propriété d'auto-imagerie du MMI vient des interférences se produisant entre les m modes se propageant dans le guide multimode. Le champ d'entrée $\psi(x, z=0)$ vient exciter l'ensemble des modes guidés de la structure. Le champ d'excitation étant, dans sa quasi-totalité, spatialement contenu dans le guide multimode, seules les modes guidées sont excitées. Le profil de champ en entrée peut alors s'exprimer comme la somme des modes guidés :

$$\psi(x, 0) = \sum_{v=0}^{m-1} c_v \psi_v(x) \quad (12)$$

Où c_v est obtenu par intégrale de recouvrement entre le champ d'entrée et le v-ème mode guidée ψ_v . Sachant cela, le profil de champ à une distance z dans le MMI est décrit par :

$$\psi(x, z) = \sum_{v=0}^{m-1} c_v \psi_v(x) e^{j(\beta_0 - \beta_v)z} \quad (13)$$

Dans le cas du MMI 1x2, on se place dans le cas dit des interférences restreintes car tous les modes de la structure ne sont pas excités. Le mode d'entrée est symétrique ainsi seuls les modes guidés symétriques sont excités. Les images où le profil de champ d'entrée est répété N fois se forment à des distances :

$$L = \frac{p}{N} \left(\frac{3L_\pi}{4} \right), p \in \mathbb{N} \quad (14)$$

Où L_π est la longueur de battement entre les deux premiers modes telle que $L_\pi = \pi/(\beta_0 - \beta_1)$. L'intérêt des interférences restreintes est que le MMI est quatre fois plus court pour obtenir la même image par rapport au cas où tous les modes de la structure sont excités.

3.2.2. Dimensionnement

Le MMI 1x2 assurant la fonction de division de puissance pour les structures de test a été conçu à l'aide du logiciel de simulation FIMMPROP utilisant la méthode d'expansion des modes propres. La forme finale du MMI a été obtenue en utilisant l'outil d'optimisation globale Kallistos inclus avec le logiciel. Ici, la longueur, la largeur du MMI ainsi que la distance séparant les guides de sortie ont été définis en paramètres avec pour objectif de maximiser la transmission du MMI 1x2. Le MMI ainsi obtenu est parfaitement équilibré avec une transmission supérieure à 97 % pour une longueur de 91,67 μm , une largeur de 13,7 μm et une séparation des deux guides de sorties de 4,79 μm . La transmission n'est égale à 100 % car un léger *mode mismatch* au niveau de la transition entre les guides monomodes et le guide multimode. L'utilisation de *tapers* aurait pu résoudre ce problème.

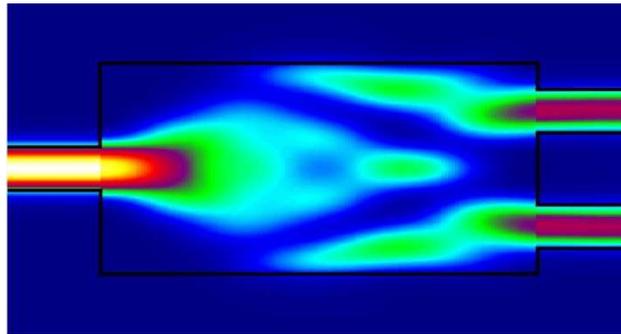


Figure II-10 : Cartographie de l'intensité dans le MMI 1x2 avec le mode fondamental TM_0 en entrée (guide de gauche). La puissance optique est répartie à 50/50 entre les deux guides de sorties.

3.3. Répartition arbitraire de puissance par coupleur directionnel

Le MMI que nous venons de voir ne peut répartir la puissance entrante que de façon égale entre les branches de sortie. Les coupleurs directionnels, au contraire, permettent de transférer une quantité arbitraire de puissance d'un guide vers un autre.

3.3.1. Couplage évanescent entre deux guides

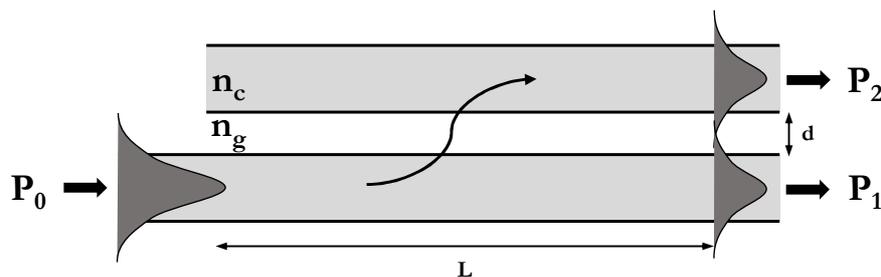


Figure II-11 : Schéma d'un coupleur directionnel.

Le coupleur directionnel est composé de deux guides optiques parallèles et proches l'un de l'autre, de l'ordre de la largeur du mode optique (Figure II-11). Lorsque deux guides sont assez proches, ceux-ci se perturbent mutuellement et le profil de champ des modes qu'ils supportent varie selon la direction de propagation z . Les deux guides sont alors capables d'échanger de la puissance optique. Pour comprendre cela, il est nécessaire de faire appel à la théorie des modes couplés [173]. Celle-ci suppose que l'on peut décrire les modes supportés par la structure dite perturbée (*i.e.* les deux guides proches) comme la somme des modes supportés par les structures non perturbées (*i.e.* les deux guides pris séparément). En normalisant la puissance initiale P_0 à 1 et en considérant que celle-ci se trouve initialement dans le guide 1, on peut alors démontrer que la puissance dans chaque guide varie de la façon suivante [174] :

$$\begin{aligned} P_1(z) &= 1 - \frac{\kappa^2}{\kappa^2 + \delta^2} \cdot \sin^2(\sqrt{\kappa^2 + \delta^2} \cdot z) \\ P_2(z) &= \frac{\kappa^2}{\kappa^2 + \delta^2} \cdot \sin^2(\sqrt{\kappa^2 + \delta^2} \cdot z) \end{aligned} \quad (15)$$

Avec κ le coefficient de couplage entre les deux guides et δ la différence de phase entre les deux modes non perturbés tels que :

$$\kappa = \frac{\omega \epsilon_0}{4} \int \Delta n^2 E_1 E_2^* dS \quad \text{et} \quad \delta = \frac{\beta_1 - \beta_2}{2} \quad (16)$$

Dans le cas où les guides sont symétriques (*i.e.* $\delta=0$) alors l'échange de puissance d'un guide à l'autre sera total tandis que pour des guides asymétriques, l'échange de puissance ne sera que partiel (Figure II-12).

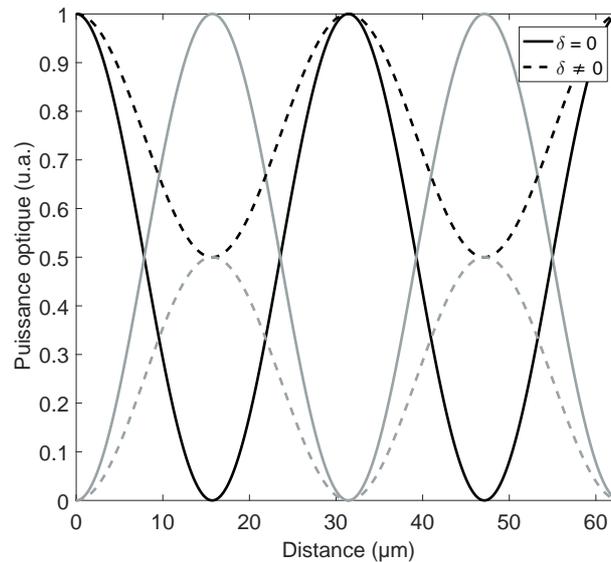


Figure II-12 : Evolution de la puissance optique entre deux guides optiques proches. Dans le cas où les guides sont symétriques ($\delta=0$), le transfert de puissance est total. Au contraire, lorsque les guides sont asymétriques ($\delta \neq 0$), le transfert de puissance n'est que partiel.

3.3.2. Dimensionnement du coupleur

Les coupleurs présents sur le circuit sont des coupleurs symétriques. Deux variantes de coupleurs ont été conçus : un coupleur 50/50 et un coupleur 0/100. Le dimensionnement a été fait à l'aide de la théorie des modes couplées en calculant la demi-longueur de battement L_c nécessaire pour transférer 100 % de la puissance d'un guide à l'autre. Celle-ci s'exprime de la façon suivante [174] :

$$L_c = \frac{\pi}{\beta_s - \beta_a} \quad (17)$$

Où, β_s est la constante de propagation du supermode symétrique supportée par la structure et β_a la constante de propagation du supermode antisymétrique. A l'aide d'un solveur de mode par élément fini, il est possible de calculer la constante de propagation de ces modes. Dans notre cas, où les guides carrés sont séparés de 1 μm , on obtient $\beta_s=4,8951 \mu\text{m}^{-1}$ et $\beta_a=4,8756 \mu\text{m}^{-1}$, d'où $L_c=160 \mu\text{m}$. Le coupleur 0/100 a donc une longueur de 160 μm et le coupleur 50/50 une longueur de 240 μm .

4. Multiplexage en longueur d'onde pour de futurs sources larges bandes

4.1. Contexte

Comme nous avons pu le constater au cours du Chapitre I, certaines applications dans le domaine MIR ont besoin de sources laser larges bandes, c'est-à-dire couvrant une partie importante du spectre MIR. L'une des solutions est de combiner un grand nombre de sources laser, chacune émettant une longueur d'onde différente. La voie actuellement explorée au CEA-Léti est le report sur substrat Si de barrette QCL [175] fabriquée sur substrat InP. Une fois ces lasers intégrés au substrat Si et couplés aux guides SiGe, il est nécessaire de combiner tous les faisceaux pour obtenir un guide faisant office de source large bande. Pour cela, il est nécessaire de faire une opération de multiplexage consistant à faire passer plusieurs signaux de longueurs d'onde différentes dans un même guide. Le démultiplexage est l'opération inverse où les différents signaux sont séparés dans des guides individuels. En optique intégrée, de nombreuses techniques existent pour réaliser des opérations de multiplexage-démultiplexage. Les plus simples sont l'emploi de coupleur directionnels [176], de MMI [177] ou l'utilisation de filtres en cascade de interféromètres Mach-Zehnder [178] ou des anneaux résonnants [179]. Ceux-ci sont généralement limités à quelques canaux. Lorsque le nombre de canaux se multiplie, il est préférable d'utiliser des composants basés sur des phénomènes d'imagerie et de dispersion. Les deux composants les plus utilisés (Figure II-13) sont le réseau échelle concave (*i.e.* PCG : *Planar Concave Grating*) et le réseau de guide (*i.e.* AWG : *Arrayed Waveguide Grating*). Pour le premier, les propriétés dispersives sont données par un réseau de diffraction et dans le second cas, par une série de guide. Cependant, la fabrication des réseaux échelles requiert une étape de gravure profonde souvent délicate. Les AWG, quant à eux, sont fabriqués pendant l'étape de gravure standard définissant l'ensemble du circuit. Pour cette raison, l'AWG est le composant choisi pour la création de source large bande dans ces travaux de thèse.

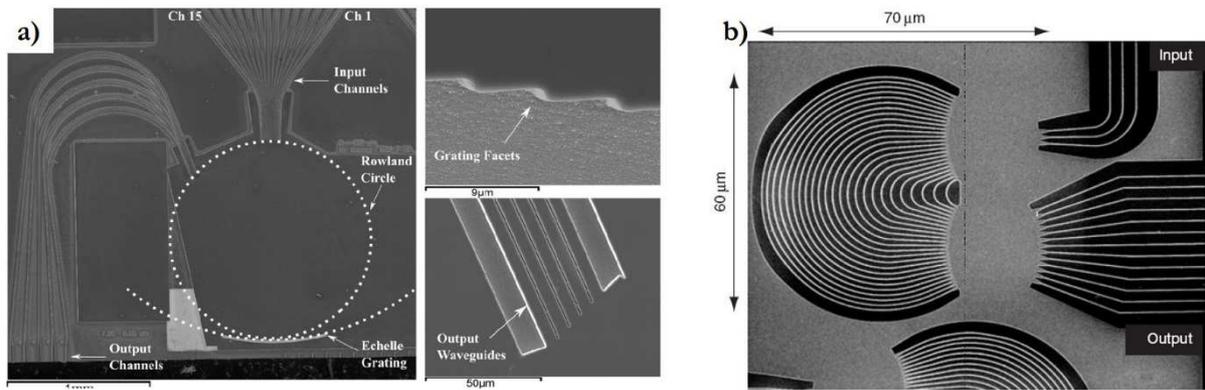


Figure II-13 : Images MEB de a) PCG fabriqué sur InP (Source : Gilles et al. [117]) et b) d'AWG fabriqué sur Si (Source : Song et al. [180]).

4.2. Fonctionnement et figures de mérite d'un AWG

Le fonctionnement de l'AWG sera décrit dans le sens du démultiplexage pour des raisons de simplicité. L'AWG étant symétrique, les explications données pourront être transposés au cas du multiplexage. Considérons le mode fondamental du guide d'entrée de l'AWG (Figure II-14) à la longueur d'onde λ_c , longueur d'onde central de l'AWG. Celui-ci arrive dans le guide dit *slab*, soit un guide suffisamment large pour considérer qu'il forme un guide plan. Le mode n'étant plus confiné latéralement, celui-ci va diverger comme s'il était en espace libre à partir du plan objet de l'AWG. Il arrive alors sur le réseau de guide (*i.e. array waveguide*) et se couple à chacun d'eux. Le réseau de guide échantillonne le champ et le transporte jusqu'au *slab* de sortie. C'est lors de ce transport que l'AWG acquiert ses propriétés dispersives. La différence de chemin optique entre deux guides successifs dans le réseau est égale à un entier multiple de la longueur d'onde central λ_c de l'AWG. Ainsi à λ_c , les faisceaux de chaque guide arrive tous avec la même phase, à un multiple de 2π près, sur le *slab* de sortie. La distribution de champ en entrée du réseau de guide est reproduite en sortie à la différence que le front de phase n'est plus convexe (*i.e. faisceau divergent*) mais concave (*i.e. faisceau convergent*). L'ensemble des guides du réseau agissant comme de multiples émetteurs en phase, l'image du faisceau du guide d'entrée est alors reproduite sur la sortie centrale. L'accumulation de phase linéaire dans le réseau de guide donne ses propriétés dispersives à l'AWG. Un changement dans la longueur d'onde arrivant en entrée de l'AWG causera un changement linéaire de phase le long du réseau de sortie. Cela se traduit par le fait que l'image du faisceau se décale en fonction de la longueur d'onde le long du plan image. Les guides de sorties sont donc placés le long du plan image pour récupérer l'image du guide d'entrée pour chaque longueur d'onde.

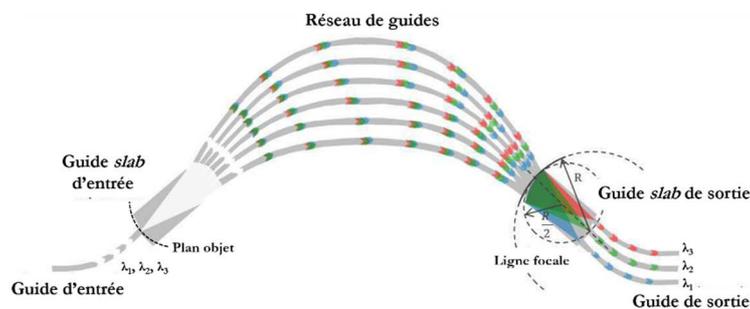


Figure II-14 : Schéma de principe du fonctionnement d'un AWG dans le sens du démultiplexage.

Nous ne détaillerons pas ici les équations régissant le fonctionnement de l'AWG dont un résumé a été fait par M. K. Smit dans [181]. Nous allons cependant décrire les principales caractéristiques et figures de mérite d'un AWG. Dans la suite nous parlerons non plus en longueur d'onde mais en

nombre d'onde ($\sigma=1/\lambda$) car de nombreux paramètres de l'AWG sont linéaires par rapport à celui-ci. Le spectre de transmission typique d'un AWG est donné Figure II-15, à partir duquel on peut définir huit caractéristiques permettant de décrire l'AWG :

- Le nombre de canaux N,
- La fréquence de fonctionnement centrale σ_c ,
- L'espacement fréquentielle entre deux canaux $\Delta\sigma_{ch}$,
- La bande passante $\Delta\sigma$,
- Les pertes par insertion du canal central L_c ,
- La non uniformité L_u ,
- Le croisement inter-canal X_{ch} ,
- La diaphonie ou *crosstalk* C.

Le nombre de canaux est le nombre de longueurs d'onde différentes (et donc de guide) que l'AWG est capable de multiplexer-démultiplexer. Le canal central transmet la fréquence de fonctionnement central σ_c de l'AWG et les autres canaux transportent une lumière dont la fréquence est celle du canal plus ou moins un multiple de $\Delta\sigma_{ch}$. La bande passante donne la couverture spectrale totale de l'AWG, soit le nombre de canaux N multiplié par l'espacement $\Delta\sigma_{ch}$. Les pertes par insertion sont les pertes engendrées par l'AWG dans son ensemble, résultant des pertes par propagation et des pertes de couplage dans les différentes sections de l'AWG. Elles sont mesurées sur le canal central où les pertes sont théoriquement minimales. La non-uniformité décrit simplement les pertes supplémentaires entre le canal central et les canaux extrêmes. Celle-ci proviennent du fait que l'intensité du champ lointain des guides constituant le réseau de sortie diminue au fur et à mesure que l'on s'éloigne du centre du plan image. Ainsi lorsque l'on s'écarte de la longueur d'onde centrale de l'AWG, la transmission décroît. Le croisement inter-canal est la différence de transmission qu'il y a entre le pic de transmission d'un canal et le point où la réponse de deux canaux adjacents se croisent spectralement. Enfin, le *crosstalk* est la différence d'intensité avant que deux canaux ne se confondent spectralement. Ces caractéristiques sont résumées sur un exemple de spectre de transmission d'un AWG dans le MIR (Figure II-15).

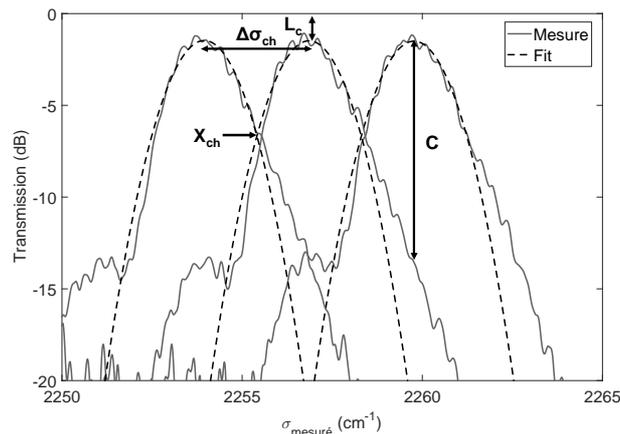


Figure II-15 : Exemple d'un spectre de transmission d'un AWG mesuré expérimentalement sur trois canaux.

4.3. Spécifications retenues pour l'AWG sur plateforme SiGe

Dans le but de créer de futures sources larges bandes, l'AWG développé est doté d'une bande passante importante et d'un grand nombre de canaux. L'AWG dimensionné pour la plateforme SiGe (Figure II-16) possède trente-cinq sorties couvrant une plage de 100 cm^{-1} allant de 2185 cm^{-1}

à 2285 cm^{-1} et une fréquence de fonctionnement centrale $\sigma_c=2135 \text{ cm}^{-1}$ (i.e. $\lambda_c=4,6838 \text{ }\mu\text{m}$). L'espacement fréquentiel entre deux voies est de $\Delta\sigma_{ch}= 2,94 \text{ cm}^{-1}$.

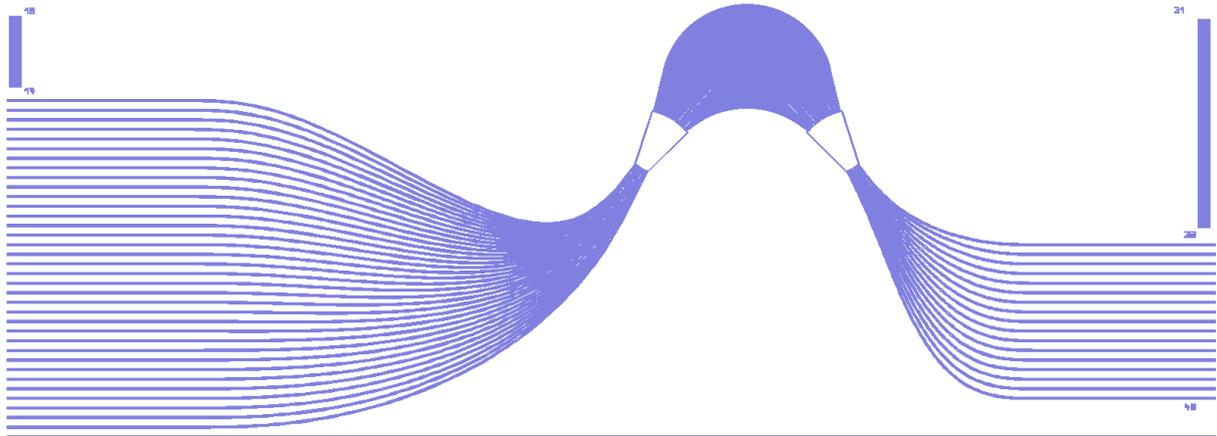


Figure II-16 : Arrayed Waveguide Grating sur le premier niveau du masque du circuit de test de la plateforme SiGe à saut d'indice. L'AWG possède 35 sorties réparties entre 2185 cm^{-1} et 2285 cm^{-1} avec un espacement de $2,94 \text{ cm}^{-1}$.

Il est important que le croisement inter-canal soit le plus faible possible afin d'avoir une source dont la réponse spectrale est la plus uniforme possible. L'insertion d'un MMI 1x2 [182] à la fin du guide d'entrée permet d'aplatir la réponse spectrale et de diminuer le croisement inter-canal (Figure II-17). Le MMI crée une image double du mode d'entrée qui se couplera aux guides de sortie avec une efficacité relativement constante pour une plus grande plage de longueur d'onde. Ainsi la réponse de l'AWG est aplatie. Cet aplatissage se fait aux dépens des pertes par insertion car l'intégrale de recouvrement entre le mode d'un guide de sortie et le champ imagé est diminuée. L'AWG dimensionné possède des caractéristiques identiques à un AWG précédemment développé sur plateforme SiGe à gradient d'indice. Leurs performances pourront être comparées.

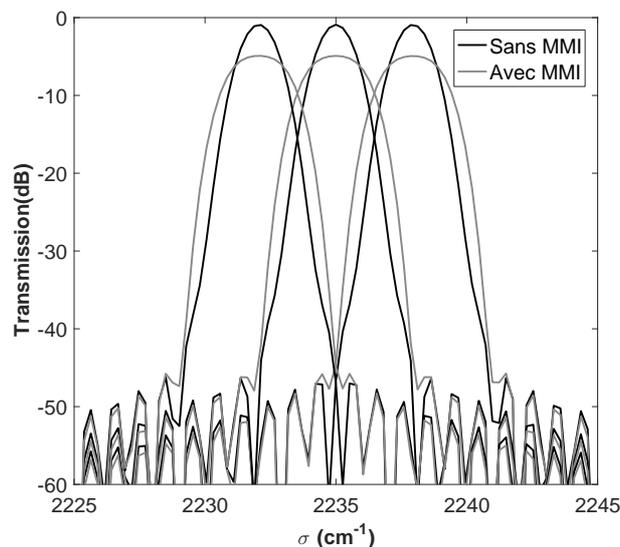


Figure II-17 : Effet de l'ajout d'un MMI sur la transmission de l'AWG pour trois canaux autour du canal central. On voit clairement un aplatissage de la transmission globale de l'AWG avec un croisement inter-canal beaucoup plus faible. Cet effet s'accompagne d'une nette augmentation des pertes par insertion.

La transmission théorique de l'AWG présente des pertes par insertion $L_c=-5 \text{ dB}$ avec une non-uniformité $L_u=-3 \text{ dB}$ (Figure II-18). Le *crosstalk* est de l'ordre de $C=-35 \text{ dB}$ et le croisement inter-canal est de $X_{ch}=-7 \text{ dB}$. Ces calculs ont été faits en collaboration avec le Dr. P. Labeye travaillant

au CEA-Léti. Celui-ci a développé un outil semi-analytique en langage C permettant de simuler la transmission et de générer le *layout* d'un AWG. Le routage des entrées-sorties en bord de puce a été fait par le Dr. S. Boutami avec un outil également développé au CEA-Léti et exploitant la méthode d'optimisation des virages de F. Ladouceur et P. Labeye [157].

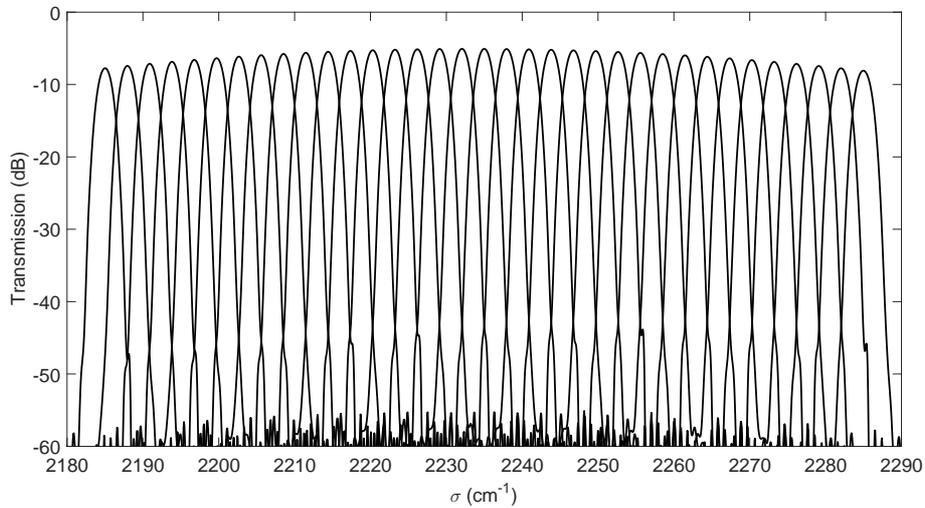


Figure II-18 : Simulation de la transmission de l'AWG pour ses 35 canaux.

5. Conclusion

L'ensemble des composants dimensionnés pour la caractérisation de la nouvelle plateforme photonique MIR a été passé en revue. Le choix de ces composants répond à plusieurs problématiques. Tout d'abord les guides ont été dimensionnés pour minimiser les pertes par propagation. Les éléments de routage, virages et croisements, ont été choisis à la fois pour pouvoir construire un premier circuit de test des fonctions optiques dimensionnées (notamment les virages) mais également se comparer à la plateforme à gradient d'indice (notamment les croisements). Les fonctions de répartition de puissance, MMI 1x2 et coupleurs, répondent à des problématiques de base en optique intégrée et pourront servir à fabriquer des objets plus complexes par la suite. Enfin, le besoin en sources larges bandes dans le MIR est ici exploré, via un AWG capable de combiner 35 lasers différents sur une plage de 100 cm^{-1} . Cet AWG possède les mêmes caractéristiques qu'un AWG auparavant fabriqué et caractérisé sur plateforme SiGe à gradient d'indice et constituera un élément de comparaison pour la nouvelle plateforme à saut d'indice.

Chapitre III- Circuits photoniques passifs en technologie SiGe à saut d'indice réalisés par procédé standard

Les composants dimensionnés doivent désormais être fabriqués sur la nouvelle plateforme SiGe à saut d'indice, puis caractérisés optiquement. Pour cela, il est nécessaire de concevoir un circuit de test incorporant toutes ces fonctions. Ce circuit doit à la fois prendre en compte les contraintes de fabrication mais également les contraintes de caractérisation. Dans un premier temps, nous nous attacherons à présenter le masque de photolithographie définissant le PIC et expliquerons ses particularités de conception. Ensuite, la fabrication du circuit en salle blanche sur des *wafers* de 200 mm sera exposée avec les principales observations faites durant les étapes-procédés les plus importantes. Enfin, le banc optique, les protocoles de mesure et les résultats de caractérisation seront présentés et commentés.

1. Conception du circuit photonique

Afin de valider expérimentalement la plateforme SiGe à saut d'indice, il est nécessaire de fabriquer puis de caractériser les composants optiques que nous avons dimensionnés. L'étape de fabrication requiert de définir un masque de photolithographie contenant l'ensemble de ces composants. Cependant pour que la caractérisation soit correctement réalisée, il faut que ces composants soient agencés d'une manière spécifique. Dans cette partie nous tâcherons de donner une vue d'ensemble du masque contenant le circuit optique de test conçu pendant cette thèse. Les structures permettant la caractérisation optique seront expliquées et justifiées. Nous soulignerons ainsi l'importance de prendre en compte les techniques de caractérisation dès la phase de conception du circuit.

1.1. Présentation du masque

Le jeu de masque permet de définir les composants qui seront fabriqués sur la puce au moment des étapes de photolithographie. De lui dépend la bonne définition du circuit. Le jeu de masque réalisé dans cette thèse permet de fabriquer des puces optiques de $22 \times 22 \text{ mm}^2$ sur *wafers* Si de 200 mm. Il est composé d'un seul niveau (Figure III-1) définissant l'ensemble du circuit photonique. Comme nous l'avons vu précédemment, le circuit a été conçu pour fonctionner à une longueur d'onde de $4,5 \mu\text{m}$ et en polarisation TM, polarisation d'émission naturelle des QCL. La longueur d'onde et la polarisation choisies sont les mêmes que celles utilisées lors de l'évaluation de la technologie à gradient d'indice afin de pouvoir comparer les deux plateformes. Le but du circuit, défini par ce masque, est de caractériser les briques de base précédemment dimensionnées. Les informations que nous cherchons avec ce circuit sont : les pertes par propagation, les pertes et/ou équilibrage des fonctions optiques dimensionnés (virages, croisements, MMI et coupleurs) ainsi que le spectre de transmission de l'AWG. Pour cela, la technique de caractérisation optique par la tranche sera utilisée. Celle-ci consiste en l'injection et la collection de lumière dans le circuit par la tranche de la puce. Cependant cette technique impose d'utiliser des structures optiques particulières afin d'obtenir les informations que nous recherchons. Pour mieux comprendre la structure du circuit il est tout d'abord nécessaire d'expliquer quelles sont les limitations imposées par la caractérisation par la tranche. Ensuite, nous justifierons les structures optiques adoptées pour la mesure des pertes par propagation dans les guides et pour la caractérisation des autres composants optiques.

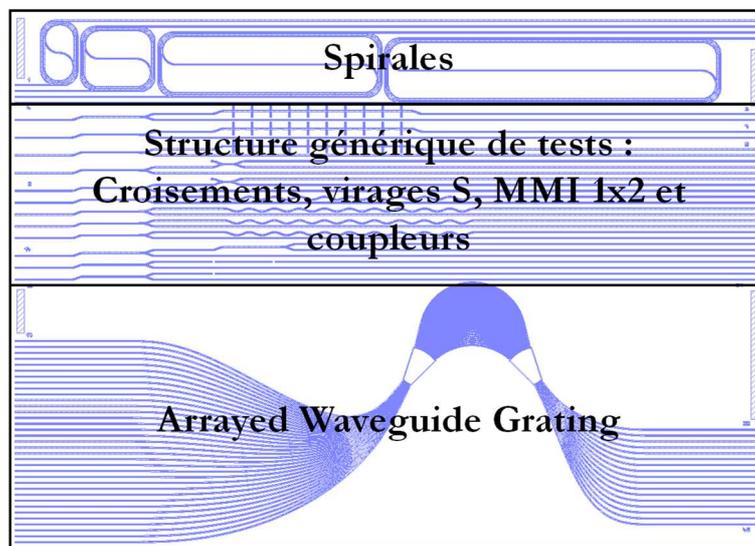


Figure III-1 : Masque du circuit de test de la plateforme SiGe à saut d'indice. L'ensemble des fonctions optiques dimensionnés au chapitre précédent sont visibles. Le masque est divisé en trois zones : une

première avec des spirales pour l'évaluation des pertes par propagation, une seconde pour la caractérisation des composants par mesure différentielle et une troisième pour l'AWG.

1.2. Contexte de la caractérisation par la tranche

Afin de caractériser un PIC il est nécessaire de pouvoir injecter la lumière dans celui-ci puis la récolter pour l'analyser. Une technique très répandue, et utilisée dans cette thèse, est la caractérisation par la tranche. Le principe est simple : la lumière est directement injectée dans le guide optique en éclairant sa section. Les dimensions du guide étant petites (quelques microns) on utilise des lentilles pour pouvoir focaliser la lumière et maximiser le pourcentage de puissance optique rentrant dans le guide. Des fibres optiques peuvent également être utilisées ce qui permet d'éviter certains alignements optiques fastidieux. Sachant cela, l'idée la plus simple pour caractériser les pertes des fonctions optiques serait de mesurer la puissance en entrée et en sortie d'un guide intégrant ces fonctions. Malheureusement, il est extrêmement difficile de déterminer avec exactitude les pertes par insertion (*i.e.* pertes entre le guide et l'espace libre) aux facettes de l'échantillon lorsque l'on procède à une injection par la tranche. Pour contourner ce problème, il est nécessaire d'utiliser des structures optiques qui permettent de s'affranchir de la connaissance des pertes par insertion ou alors d'utiliser des méthodes de caractérisation peu sensibles aux pertes aux interfaces. La conception du PIC doit donc prendre en compte les contraintes de caractérisation au risque de ne pas pouvoir mesurer les caractéristiques optiques du circuit. Dans ces travaux, nous avons choisi d'utiliser des structures nous permettant de nous affranchir de la mesure des pertes par insertion.

1.3. Motifs pour l'évaluation des pertes par propagation

Les pertes optiques maximales que l'on peut s'autoriser dans un circuit optique sont dictées directement par la puissance de la source et la puissance nécessaire lors de la détection, suivant un ou des critères définis par l'application visée. Ainsi, plus les pertes par propagation sont faibles, plus il sera possible de faire des circuits avec de longs chemins optiques et donc de faire des circuits complexes avec de nombreuses fonctions. Les pertes par propagation sont une des figures de mérite les plus importantes pour une technologie d'optique intégrée. D'une certaine façon, elles présument du niveau de fonctionnalité que l'on pourra atteindre. Dans la littérature, il est usuellement reconnu que des pertes par propagation inférieure à 2 dB.cm^{-1} sont nécessaires pour commencer à considérer la plateforme comme intéressante. Afin de mesurer ces pertes, plusieurs méthodes sont possibles [154] : la méthode par rétrodiffusion, la méthode par mesure de résonance Fabry-Pérot et la méthode dite *cut-back*. La première consiste à imager la surface d'une puce et de mesurer l'intensité décroissante de la lumière diffractée le long d'un guide droit. L'intensité lumineuse exponentiellement décroissante le long du guide permet de remonter au coefficient α de pertes optiques. Cette technique a deux inconvénients. Le premier est qu'elle est peu adaptée au domaine infrarouge où la puissance optique des lasers est relativement limitée et où la dynamique des caméras est bien moindre que dans le visible. De plus, cette technique nécessite des guides avec des pertes optiques importantes. La méthode par résonance Fabry-Pérot exploite le fait qu'un guide droit forme une cavité résonante où les facettes d'entrée et de sortie du guide font office de miroir. La méthode consiste à mesurer des franges d'interférences en faisant varier la phase accumulée lors de la traversée de la cavité. L'inconvénient de cette méthode est qu'elle est très sensible à la qualité optique des facettes [183]. Enfin la méthode *cut-back* consiste à mesurer la puissance en sortie d'un guide droit en le redécoupant plusieurs fois. On obtient ainsi une courbe de puissance en fonction de la longueur du guide (Figure III-2) dont la pente donne directement les pertes en dB.cm^{-1} et l'ordonnée à l'origine les pertes par réflexion aux facettes (*i.e.* pertes par insertion).

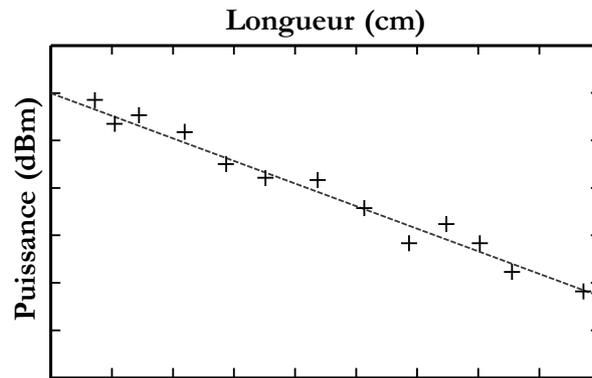


Figure III-2 : Courbe factice illustrant les résultats obtenus par la méthode cut-back ou mesure sur des spirales. La pente de la droite correspond aux pertes par propagation en dB.cm^{-1} et l'ordonnée à l'origine aux pertes par insertion. Dans le cas des spirales les pertes des virages sont également contenues dans l'ordonnée à l'origine.

L'inconvénient de la méthode *cut-back* vient de la redécoupe successive entre chaque mesure pour raccourcir le guide. Elle impose de détruire la puce contenant tout le circuit et introduit un biais de mesure : chaque découpe ne permet pas d'obtenir une facette ayant une qualité optique identique à la précédente. Pour résoudre ce problème nous avons fait le choix d'utiliser des spirales pour évaluer les pertes par propagation des guides SiGe à saut d'indice. L'utilisation de spirales permet d'obtenir les mêmes résultats que la méthode *cut-back*, sans les inconvénients introduits par les découpes successives de la puce. Les spirales présentes sur le circuit sont au nombre de quatre. Chaque spirale contient exactement le même nombre de virages ce qui permet de s'affranchir des pertes par courbure. L'ordonnée à l'origine de la courbe sera, dans ce cas, égale aux pertes des facettes, plus les pertes par courbure. En omettant les virages, les spirales font respectivement 2,796025 cm, 3,796025 cm, 7,796025 cm et 10,796025 cm de long.

1.4. Motifs pour l'évaluation des pertes et équilibrage des fonctions optiques

Pour l'évaluation des fonctions optiques (autres que l'AWG), le choix a été fait d'utiliser des structures permettant d'effectuer des mesures différentielles. Le principe est simple et consiste à répartir de façon égale la puissance optique initiale injectée dans un guide, dans deux autres guides. L'un constitue une voie de mesure où sont présents les composants dont on veut connaître les pertes. Le second est une voie de référence ne contenant aucun composant et de longueur égale à l'autre voie. Le rapport des puissances de sortie entre la voie de mesure et la voie de référence donne directement les pertes engendrées par les fonctions optiques. De cette façon il n'y a pas besoin de connaître les pertes aux interfaces en entrée et sortie de guide pour connaître les pertes engendrées par les fonctions optiques. Une structure générique de test a donc été mise en place sur le masque (Figure III-3). Son bon fonctionnement repose sur une division équitable de la puissance entre les deux voies. Cette fonction est assurée par le MMI 1x2 précédemment dimensionnée. Cependant, une répartition correcte de la puissance dans les deux voies ne suffit pas pour que les mesures différentielles soient correctes. Le routage optique de l'ensemble de la structure de test doit être fait avec précaution. En particulier, il faut absolument que le mode optique arrivant sur le MMI soit parfaitement symétrique. Dans le cas contraire, la répartition de puissance ne serait plus de 50/50 entre les deux guides de sorties. Or lorsque la lumière est injectée par la tranche, une partie de celle-ci n'est pas couplée au mode fondamental mais à des modes à fuite qui perturbent le profil de champ. Afin de s'assurer que seul le mode fondamental se propage, un virage S est ajouté avant chaque MMI 1x2. Les modes d'ordres supérieurs (*i.e.* les modes à fuites) subiront d'importantes pertes par courbure contrairement au mode fondamental. La lumière ressort du

virage S complètement filtré des modes parasites. Cependant, si le virage est trop proche du MMI, la lumière radiée par le virage peut également venir se coupler dans le MMI. Le virage S est donc placé à une distance suffisante du MMI 1x2. Sur le masque, le virage est placé à 1500 μm avant l'entrée du MMI (Figure III-3). L'utilisation de ce virage, combinée à un autre qui permet d'écarter les deux voies en sortie du MMI, a également un autre avantage. Il permet à ce que le guide droit d'injection soit aligné avec la voie de référence. Cela facilite les alignements optiques lors de l'étape de caractérisation.

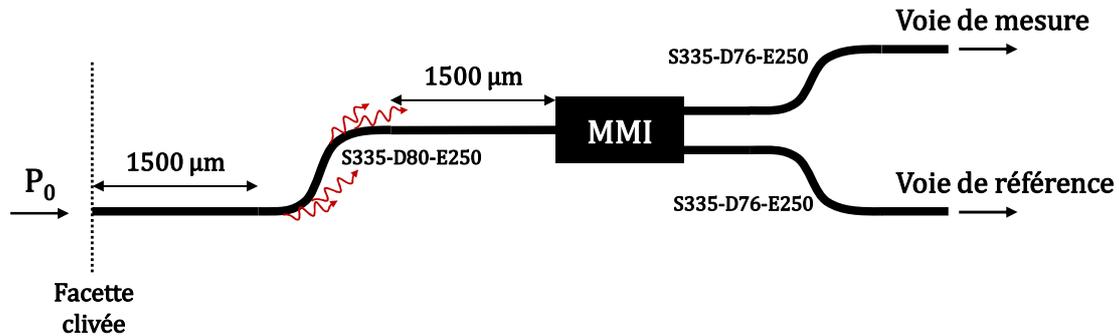


Figure III-3 : Schéma de la structure générique distribuant la puissance optique pour caractériser les pertes des fonctions optiques. Le MMI 1x2 est très éloigné du premier virage faisant office de filtre pour ne pas recevoir de lumière radiée par le virage. La voie de référence et le guide d'entrée de la structure sont alignés pour faciliter les alignements sur le banc optique.

1.5. Conclusion

Avant même la fabrication, nous avons pu voir à quel point il était important de prendre en compte les contraintes liées aux méthodes de caractérisation. Les répercussions sur la conception du masque sont importantes. L'agencement et les choix de conception étant expliqué, nous pouvons désormais aborder la fabrication en salle blanche du PIC.

2. Fabrication en salle blanche sur plaque 200 mm

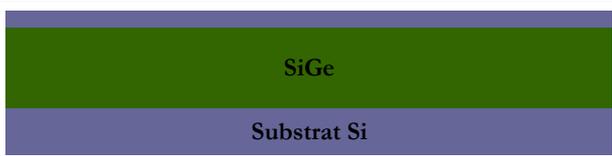
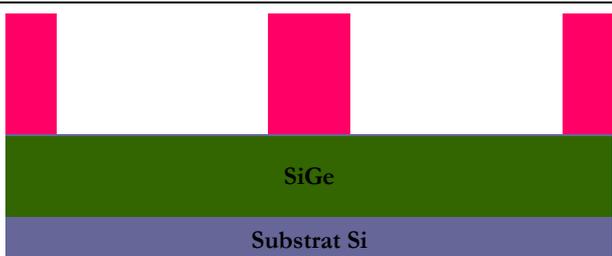
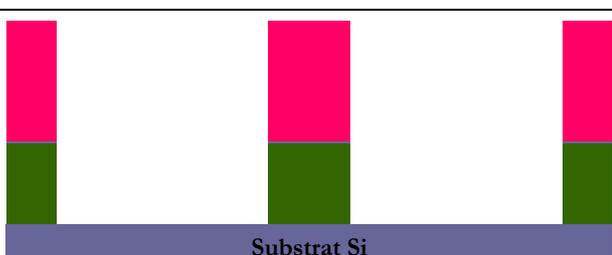
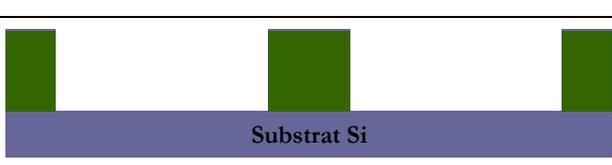
La fabrication des puces a été faite sur *wafers* Si 200 mm dans la salle blanche du CEA-Leti à partir d'une analyse de l'enchaînement des étapes technologiques.

2.1. Présentation de l'enchaînement des étapes technologiques

La fabrication des circuits se fait en 11 étapes (Figure III-4) que nous détaillons ici (certaines étapes ont été regroupées pour plus de clarté) :

1. Le substrat de départ est un *wafers* de 200 mm en silicium non dopé de 725 μm d'épaisseur.
2. Préparation de surface par une désoxydation pour le retrait de l'oxyde natif. La croissance de la couche de $\text{Si}_{0,6}\text{Ge}_{0,4}$ est faite par un procédé de dépôt chimique en phase vapeur (RP-CVD : *Reduced Pressure – Chemical Vapor Deposition*). Une seconde épitaxie de Si est directement enchaînée. La couche de SiGe fait 2,7 μm d'épais et celle de Si 550 nm.
3. Récupération d'un état de surface par deux polissages mécano-chimiques (CMP : *Chemical Mechanical Polishing*). Le premier CMP retire 450 nm de Si puis un second, dit de finition, retirant 50 nm permet d'atteindre une surface avec une rugosité inférieure à 0,3 nm RMS.
4. Préparation de surface avec un nettoyage de type CARO (*i.e.* H_2SO_4) et un nettoyage dynamique dilué [184] (DDC : *Dynamic Diluted Clean*).
5. Etalement de la résine par *spin coating*. L'épaisseur finale de résine est de 820 nm.

6. Insolation en DUV 248 nm avec le masque précédemment décrit et développement.
7. Gravure du circuit avec arrêt dans le substrat Si par gravure profonde plasma (DRIE : *Deep Reactive Ion Etching*).
8. Retrait de la résine avec un procédé de *stripping* adapté pour le SiGe. Celui-ci est réalisé par une gravure avec un plasma O₂ puis un nettoyage dans un bain de HF 1 %.
9. L'encapsulation du circuit se fait avec un dépôt RP-CVD de 5,7 µm de Si.

| | |
|---|--|
| 1. Substrat Si 200 mm |  |
| 2. Désoxydation – Nettoyage HF – Epitaxie Si _{0,6} Ge _{0,4} – Epitaxie Si |  |
| 3. CMP puis CMP finition Si |  |
| 4. Nettoyage de surface |  |
| 5. Etalement de la résine photosensible |  |
| 6. Insolation - développement |  |
| 7. Gravure sèche SiGe |  |
| 8. Retrait résine |  |

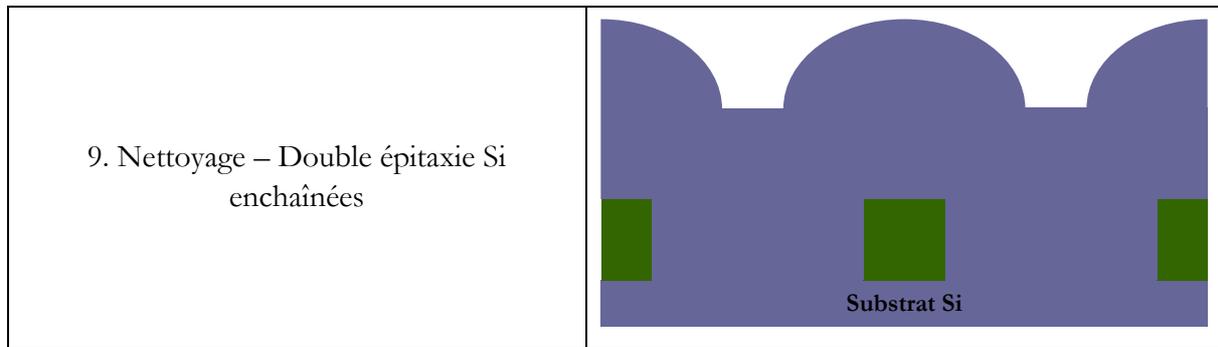


Figure III-4 : Enchaînement des étapes technologiques pour la fabrication des circuits en technologie de guide SiGe à saut d'indice.

2.2. Résultats de fabrication

L'enchaînement technologique doit être contrôlé tout le long de sa réalisation. Ceci, afin de s'assurer que chaque procédé donne les résultats escomptés. Nous nous proposons ici de résumer les principales observations et mesures faites durant la fabrication du lot.

2.2.1. Epitaxie $Si_{0,6}Ge_{0,4}$ par RP-CVD

Après préparation de surface, la première étape importante est la croissance de $Si_{0,6}Ge_{0,4}$ sur le substrat Si par technique RP-CVD. L'ajustement de l'épaisseur du dépôt de SiGe se fait à l'aide d'une plaque essai sur laquelle la vitesse de dépôt est évaluée par pesée. Le temps de dépôt et le poids de la plaque avant et après dépôt permettent de déduire l'épaisseur de SiGe déposée. Lors des essais, la vitesse de dépôt de SiGe constatée était de $160 \text{ nm} \cdot \text{min}^{-1}$. Cependant, le temps de dépôt a été légèrement sous-évalué et les plaques présentent une épaisseur de SiGe de $2,56 \mu\text{m}$ mesurée par pesée.

2.2.2. Photolithographie et gravure du circuit en $Si_{0,6}Ge_{0,4}$

Suite à la croissance du SiGe, deux CMP sont réalisés afin de récupérer une surface très plane. Suite à un nettoyage de surface, la photolithographie est faite avec un alignement au *notch* (*i.e.* encoche du *wafers*) suffisant pour un alignement sachant qu'il n'y a qu'un seul niveau de masque. Une matrice d'exposition « dose-focus » a été faite sur une plaque essai afin d'obtenir une reproduction correcte des motifs dans la résine. Le réglage consiste à faire de multiple exposition en faisant varier la dose (*i.e.* l'intensité du faisceau UV) et la focalisation des motifs. Cela permet de déterminer le couple « dose-focus » permettant d'atteindre la résolution souhaitée. En l'occurrence sur ce circuit, il faut être capable de reproduire des dimensions critiques (CD : *Critical Dimensions*) qui sont des lignes et des espaces de $1 \mu\text{m}$ de large. Après développement de la résine, une gravure plasma de type DRIE est appliquée. Il a été constaté que le procédé DRIE pour les composés germanium présente une forte non-uniformité de gravure entre le centre et le bord de la plaque, de l'ordre de 13 %. Les mesures au profilomètre montre que pour une profondeur gravée de $2,81 \mu\text{m}$ en bord de plaque, le centre est gravé de $3,22 \mu\text{m}$. Après *stripping*, on peut constater que les motifs sont bien définis sur la plaque et qu'aucune trace de résine n'est visible (Figure III-5).

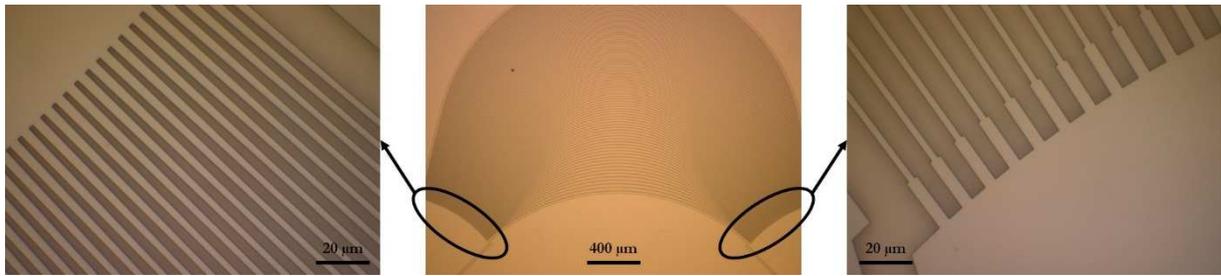


Figure III-5 : Photographies prises au microscope optique après stripping au niveau de l'AWG. Aucun reste de résine n'est visible. Deux zooms sont effectués sur la sortie et l'entrée de l'AWG.

2.2.3. Encapsulation Si

Le *stripping* est doublé d'un nettoyage de surface afin de s'assurer qu'aucun dépôt de résine n'est présent, ce qui empêcherait une croissance correcte du Si. Un nettoyage au HF est également effectué avant l'épitaxie afin d'enlever tout oxyde natif (*i.e.* SiO₂) qui aurait pu se former à la surface de la plaque. Après l'encapsulation silicium, une coupe MEB permet de vérifier que la morphologie des guides est correcte (Figure III-6). On peut observer une croissance polycristalline au-dessus des flancs des guides. Les flancs des guides sont légèrement inclinés et l'on peut constater une légère sur-gravure car les guides ont une largeur de 2,55 μm au lieu de 2,7 μm attendue. La hauteur des guides constatée au MEB est de 2,58 μm, en accord avec les mesures faites après le dépôt RP-CVD de SiGe.

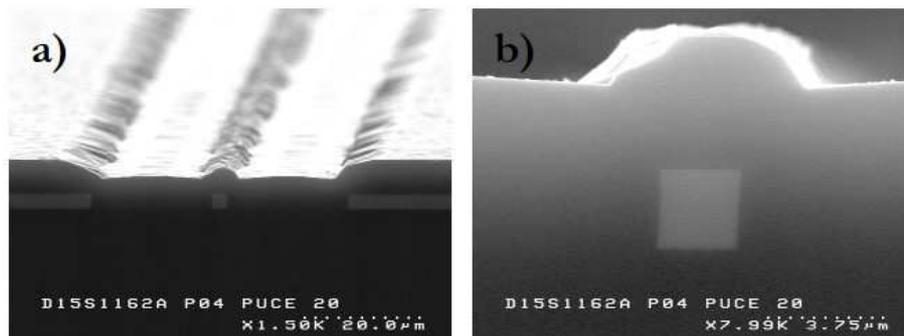


Figure III-6 : Photos prises au MEB après avoir clivé une puce suite à l'encapsulation Si : a) Photo du guide où l'on peut observer une croissance polycristalline du Si au niveau des flancs de gravure SiGe. b) Zoom sur la section du guide faisant 2,58 μm de haut et 2,55 μm de large.

3. Caractérisation optique des circuits

Les circuits étant désormais fabriqués, il est nécessaire de les caractériser optiquement. Tout d'abord, la méthode de caractérisation par la tranche nécessite de découper les *wafers* fabriqués sous forme de puce, afin de les caractériser de façon unitaire. La préparation des échantillons étant primordiale pour la qualité des mesures, celle-ci sera exposée. Dans un deuxième temps, le banc de mesure monté lors de ces travaux de thèse sera décrit, ainsi que les protocoles de mesure associés. En effet, l'AWG, de par ses fonctions de multiplexage-démultiplexage, nécessite un protocole différent des autres fonctions optiques. Enfin, les résultats obtenus sur les composants dimensionnés au chapitre II seront présentés.

3.1. Préparation des échantillons

La qualité optique des facettes des guides est un élément important de la caractérisation par la tranche. La planéité des facettes doit se rapprocher d'un dioptre plan pour éviter des phénomènes de diffraction qui ferait baisser le rapport signal à bruit (SNR : *Signal to Noise Ratio*) et la précision

des mesures. De plus, une qualité irrégulière des facettes introduirait une erreur de mesure supplémentaire en, par exemple, faussant les mesures différentielles si une des deux voies a une facette ayant une mauvaise transmission. Après amincissement du *wafer* à une épaisseur de 500 μm , la première étape de préparation des puces consiste en la découpe des *wafers* en salle blanche à l'aide de la scie automatique DISCO DAD3350 (Figure III-7). Durant l'opération, les puces sont collées sur un film adhésif maintenu par un vide et séparées avec une scie circulaire diamantée refroidie par eau. La scie circulaire provoquant des micro-rayures, le wafer est découpé en bandes parallèles aux guides. On obtient ainsi des bandes de 22 mm de large contenant de 5 à 9 puces. La qualité optique des facettes qui viennent d'être découpées importe peu, puisqu'elles ne permettent pas d'atteindre la section des guides.

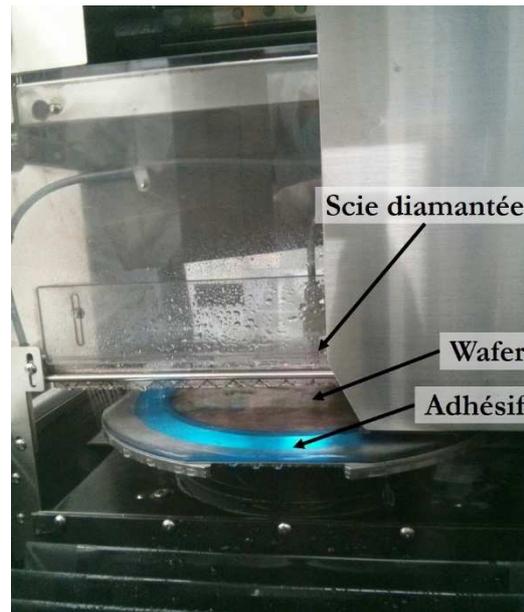


Figure III-7 : Photographie du wafer pendant la découpe sur la découpeuse automatique DISCO DAD3350. Le wafer et les puces sont maintenus en place à l'aide d'un adhésif lui-même maintenu par un vide.

La deuxième étape consiste à séparer les puces d'une même bande en les clivant. Cette fois-ci la qualité optique des facettes qui sera obtenue est primordiale. Le clivage consiste à forcer le silicium à se briser sur un plan cristallin en lui appliquant une contrainte mécanique. Cela permet à la fois d'avoir une découpe très droite, puisque suivant un même plan atomique, et également une facette très plane donc optiquement de très bonne qualité. Un clivage se fait en deux temps. Tout d'abord une encoche, ou trait d'amorce, est réalisée à la surface de l'échantillon. Cela permet de créer une zone de défaillance mécanique où s'initiera le plan de clivage lors de l'application de la contrainte. En pratique, la difficulté du clivage est d'arriver à ce que la découpe suive un même plan cristallin et se fasse à l'endroit désiré. Pour cela, il faut que le trait d'amorce soit parallèle à un plan cristallin et que la contrainte soit appliquée très progressivement pour que la découpe ne se décale pas de proche en proche sur d'autres plans. Le clivage des puces a été réalisé à l'aide d'une micro-cliveuse manuelle permettant de cliver précisément les puces (Figure III-8). Ici, le clivage doit se faire en traversant les guides d'entrée et de sortie. Le trait d'amorce est précisément placé sur la puce à l'aide d'une vis micrométrique et d'une binoculaire. Une micro-goniomètre permet également de régler l'angle du trait de découpe sur l'échantillon. Le trait d'amorce est donc bien parallèle aux motifs et au plan cristallin. Le trait d'amorce est réalisé à l'aide d'un bras mécanique qui fait translater l'échantillon dans l'axe de la pointe. La pointe est, elle, posée sur l'échantillon au bout d'un autre bras qui est lesté afin que la pointe appuie suffisamment et que l'amorce se fasse correctement

(Figure III-8-a). Le clivage à proprement parler de la puce se fait dans un deuxième temps. Pour cela l'échantillon est placé sur une lame de rasoir avec le trait d'amorce aligné sur la lame (Figure III-8-b). Deux pointes en inox viennent appuyer de part et d'autre de l'amorce. Leur déplacement est assuré par une vis micrométrique pour que les contraintes mécaniques augmentent très graduellement et que le plan de clivage se fasse proprement. On obtient alors une puce dont les deux facettes sont parfaitement clivées, avec une qualité optique permettant une injection de lumière efficace.

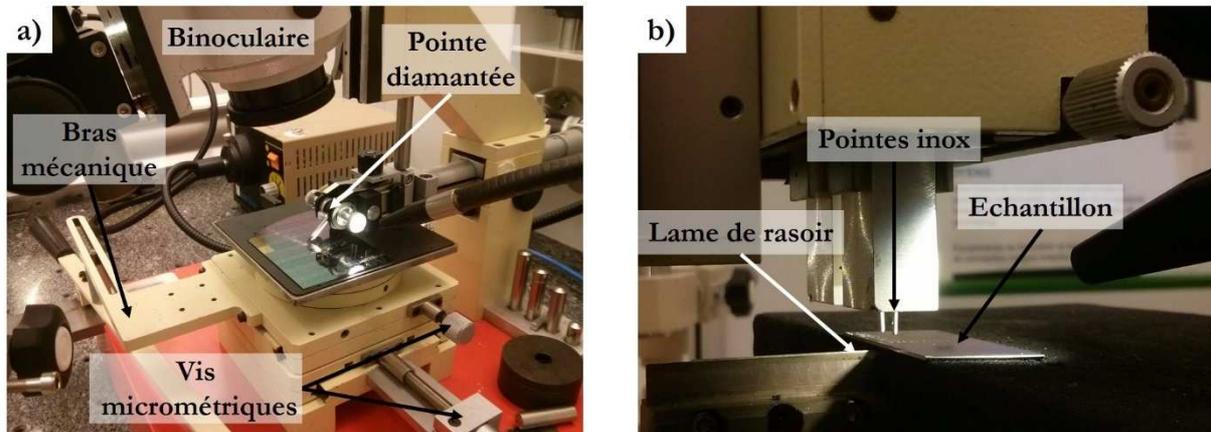


Figure III-8 : Photos de la micro-cliveuse. Celle-ci est composée en deux parties : a) une première permettant de faire les traits d'amorce avec une pointe diamantée et b) une deuxième permettant de cliver les puces en appliquant une contrainte mécanique de part et d'autre du trait d'amorce.

Afin de s'assurer de la qualité optique des facettes, certains échantillons ont été observés au microscope électronique à balayage. Les puces ont été mises sur un porte-échantillon incliné à 45°. On observe nettement l'amorce faite à la pointe diamantée en bord de puce (Figure III-9-a). Un peu plus loin sur la facette, le plan de clivage est propre et aucun défaut n'est observable au niveau des guides (Figure III-9-b).

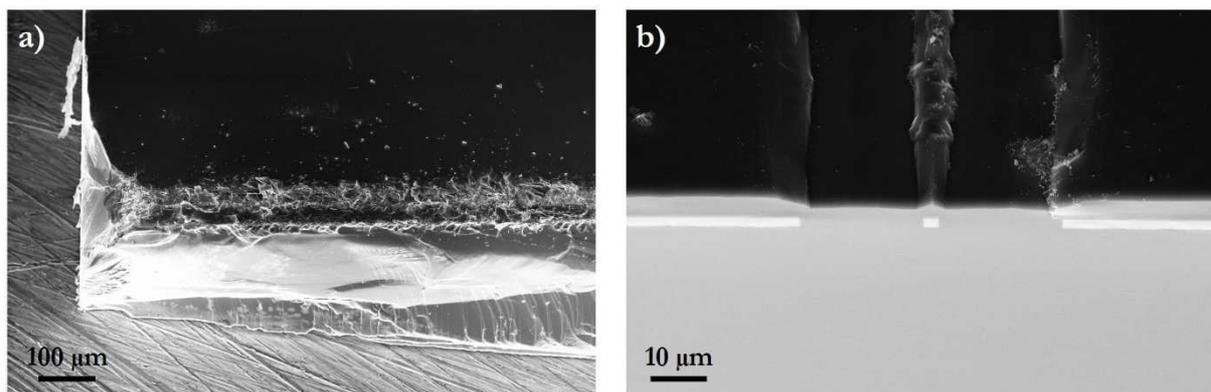


Figure III-9 : Photos prises au microscope à balayage électronique d'une des deux facettes de la puce après clivage mise sur un porte-échantillon penchée à 45°. a) Bord de la puce où l'on peut voir l'amorce qui a été faite à la pointe diamantée sur la surface de l'échantillon. b) Photo prise sur les premiers guides situés après l'amorce. Le plan de clivage s'est fait correctement et la facette des guides est parfaitement plane.

3.2. Présentation du banc de mesure par la tranche

Afin de caractériser les puces découpées et clivées, il est nécessaire de monter un banc optique permettant d'injecter la lumière dans un guide, de la récupérer et de mesurer les effets introduits par les composants optiques sur le faisceau initial. Dans un premier temps, le banc utilisé dans ces

travaux sera exposé dans son ensemble. Ensuite, les spécifications techniques de chaque sous-éléments (sources, mécaniques, etc.) seront détaillées.

3.2.1. Vue d'ensemble

Le banc de caractérisation par la tranche est composé des trois éléments indispensables à un système de caractérisation optique : une source, un système de mise en forme du faisceau et un détecteur (Figure III-10). La source est un laser émettant dans l'infrarouge moyen. Le faisceau émis est collimaté par une première lentille et ensuite envoyé dans une deuxième lentille dite d'injection. Celle-ci focalise le faisceau sur la tranche de la puce où affleure la section des guides optiques. Une fois en sortie de puce, la lumière est récupérée par une lentille dite de collection imageant la sortie du guide à l'infini. Le faisceau est alors envoyé, soit vers une caméra InSb afin de visualiser la facette de sortie de la puce, soit redirigé à l'aide de miroirs amovibles vers un photodétecteur rapide ou un spectromètre à transformée de Fourier (FTIR : *Fourier Transformed InfraRed spectrometer*).

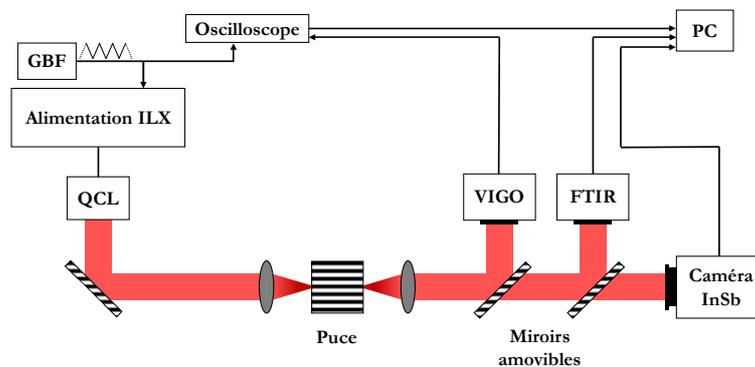


Figure III-10 : Schéma d'ensemble du banc de caractérisation par la tranche.

3.2.2. Sources lasers

Sur le banc mis en place, deux sources lasers infrarouges sont disponibles : un laser ICL de chez Nanoplus GmbH et un laser QCL provenant du III-V Lab. Le premier est un laser à réseau de Bragg dit DFB (DFB : *Distributed FeedBack*) émettant de façon continue à une longueur d'onde de 4546 nm avec une très faible largeur spectrale, typiquement 0,498 nm de largeur à mi-hauteur (Figure III-11-a). Le laser est piloté à l'aide d'une alimentation ILX-LDC3722B qui fait office à la fois de source de courant et de commande en température du module Peltier intégré au laser. Typiquement le laser opère dans un régime continu à 66 mA et à une température de $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Il est possible de moduler le laser en courant à l'aide d'un générateur basse fréquence Tektronix AFG 2021 branché sur l'entrée analogique de l'alimentation ILX. Le deuxième laser est de type Fabry-Pérot émettant sur une large gamme spectrale allant de 4380 nm à 4444 nm (*i.e.* 2250 cm^{-1} à 2283 cm^{-1}) (Figure III-11-b). Contrairement à l'autre laser, celui-ci opère dans un régime pulsé. Il est commandé via une alimentation Agilent 81110A envoyant des impulsions de type créneau à une fréquence de répétition de 100 kHz, une largeur de 300 ns et une amplitude typique de 13,6 V. Le laser Fabry-Pérot est également régulé en température à $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Les deux lasers émettent dans un mode TM_0 , soit un champ électrique polarisé perpendiculairement par rapport au plan de la puce.

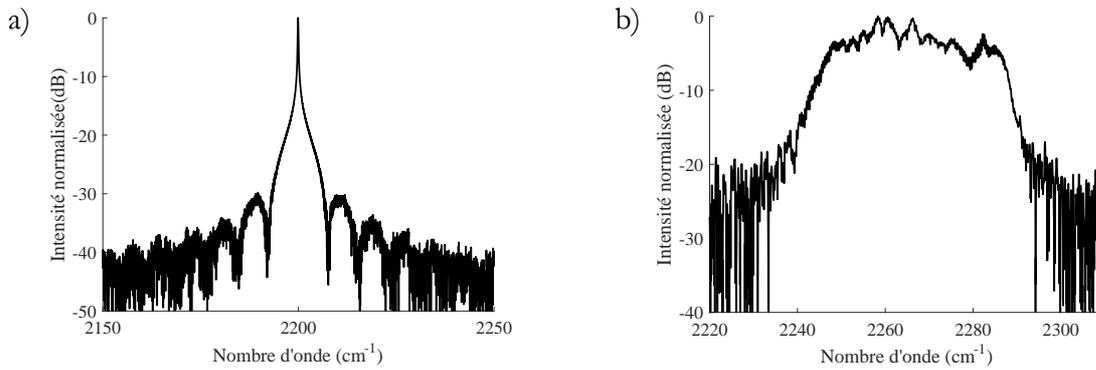


Figure III-11 : Spectre d'émission des deux sources laser présentes sur le banc. a) Le laser ICL de Nanoplus émet à 4546 nm pour un courant de 66 mA et une température régulée à - 4 °C. b) Le laser QCL du III-V Lab est alimenté de façon pulsée. Les pulses sont des créneaux de largeur 300 ns avec une fréquence de répétition de 100 kHz et une tension crête à crête de 13,6 V.

3.2.3. Optomécanique du banc

Le faisceau infrarouge gaussien émis par le laser choisi est ensuite envoyé sur une lentille asphérique de focale effective 1,874 mm. Celle-ci focalise le faisceau sur la puce photonique. En sortie de la puce une deuxième lentille asphérique de focale effective 4 mm image à l'infinie la sortie du guide optique. Les lentilles sont faites en chalcogénure *black diamond* avec un antireflet 3 - 5 μm. La lentille de collection nécessite une grande ouverture numérique car le faisceau en sortie du guide a une très grande divergence. Il est aussi nécessaire d'avoir une petite focale pour ne pas récupérer de flux parasite qui fausserait la mesure. Dans l'idéal, il faudrait la même lentille en collection qu'en injection, soit une focale de 1,874 mm. Cependant le champ de vision très restreint offert par une focale courte rend l'alignement optique de la puce difficile à la caméra. Le choix de la focale 4 mm en collection est donc un compromis entre ouverture numérique et étendu du champ de vision. Les deux lentilles sont montées sur des micro-positionneurs cinq axes X, Y, Z, θ et φ de chez Newport. Les axes X, Y et Z sont également équipés de piézoélectriques permettant des déplacements d'une résolution de 20 nm. Ceux-ci sont pilotés par contrôleur d'actuateur haute résolution Newport ESA-C. La puce photonique est montée sur une embase en cuivre usinée sur mesure. La puce est maintenue en place grâce à une succion assurée par un réseau de vide. Le tout est placé sur un micro-positionneur trois axes Y, θ et φ (Figure III-12).

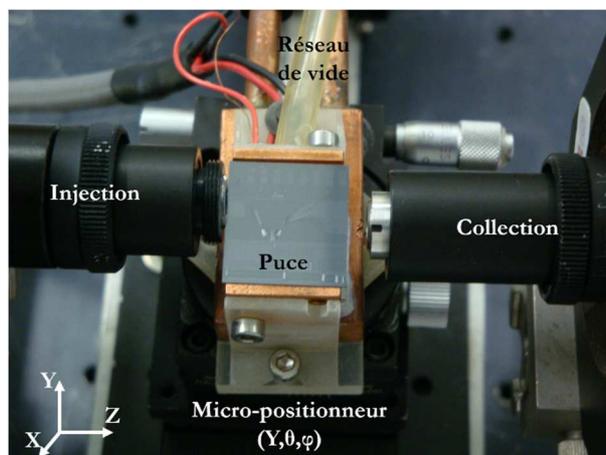


Figure III-12 : Photographie de l'ensemble optomécanique permettant l'injection et la collection de la lumière par la tranche d'une puce photonique.

3.2.4. Photodétecteurs

Le faisceau sortant de la puce est imagé à l'infini grâce à la lentille de collection. L'image du guide optique est obtenue sur une caméra InSb ONCA 4697 de chez Xenics dont l'objectif est réglé à l'infini. La caméra permet de visualiser la puce et la lumière sortant du ou des guides optiques. Elle permet également de faire les premiers réglages pour ajuster la position de la puce et maximiser l'intensité lumineuse sortant de la puce. Une fois la lumière correctement injectée dans la puce, celle-ci peut être soit envoyée vers un photodétecteur photovoltaïque rapide PVI-4TE5 de chez Vigo, soit vers un spectromètre à transformée de Fourier Nicolet iS50R, suivant les besoins de caractérisation. Le spectromètre est purgé à l'azote afin que les mesures ne soient pas perturbées par l'absorption des gaz atmosphériques.

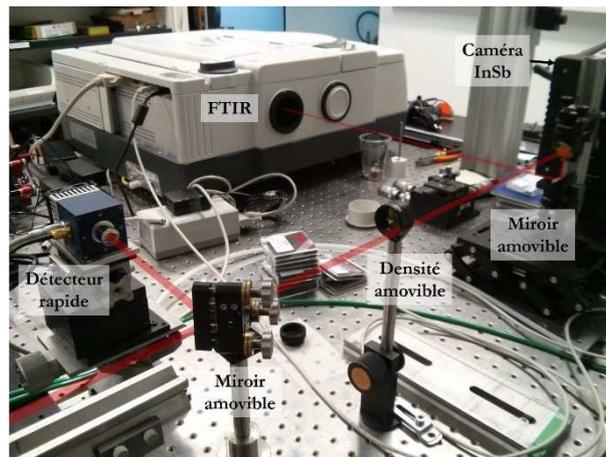


Figure III-13 : Photographie de l'ensemble des moyens de mesure du faisceau. Sur la gauche le faisceau sort de la lentille de collection et est redirigé au choix vers le détecteur rapide, vers le FTIR ou directement sur la caméra grâce à un jeu de miroir amovible. La densité optique est utilisée lorsque la caméra InSb est saturée par le faisceau.

3.3. Protocoles de mesure

Les fonctions optiques présentes dans les circuits fabriqués ne nécessitent pas une caractérisation spectrale au contraire de l'AWG. Deux protocoles de mesure ont donc été mis en place pour la caractérisation du circuit complet.

3.3.1. Protocole pour les mesures différentielles

Les différentes fonctions optiques (spirales, MMI 1x2, etc.), à l'exception de l'AWG, sont caractérisées à l'aide de la source laser ICL. Celle-ci est polarisée avec un courant de 55 mA et régulé à une température de -4°C . Le laser est également modulé en courant à l'aide d'un générateur basse fréquence Tektronix AFG 2021 délivrant un signal rampe d'amplitude $500\text{ mV}_{\text{p-p}}$ et de fréquence 1 kHz à l'entrée de modulation analogique de l'alimentation ILX LDC-3722B. Cela correspond à une modulation en courant de $\pm 5\text{ mA}$, sachant que le seuil laser est à 45 mA. La modulation en courant permet une modulation en longueur d'onde évitant des phénomènes d'interférences qui fausseraient les mesures. L'injection de la lumière dans la puce se fait à l'aide de la caméra InSb. Une fois la facette de l'échantillon correctement imagée sur la caméra, la puce et la lentille de collection sont bougées de concert selon l'axe Y (*i.e.* direction verticale) pour que la facette s'illumine tout juste. Le but étant que le faisceau laser arrive sur le haut de la facette, là où sont les guides optiques. La puce est ensuite translatée en X devant un guide distribuant une structure de test de fonction optique. La voie de référence délivrant le plus de flux lumineux sert à faire un premier réglage pour maximiser la puissance optique injectée dans la puce. Pour ce faire,

la puce est légèrement translaturée en X et Y à la position optimale ainsi que la lentille d'injection en Z. Des densités optiques peuvent être mises devant la caméra, si celle-ci sature durant la procédure de réglage. Ensuite le faisceau est redirigé vers le détecteur rapide à l'aide d'un miroir. La lentille de collection et le miroir sont réglés pour que le signal détecté soit maximal. Le signal délivré par le détecteur rapide est visualisé sur oscilloscope. On procède ensuite à la dernière étape qui est un réglage fin de la lentille d'injection en X, Y et Z à l'aide des actionneurs piézoélectriques. La mesure se fait alors en mesurant la composante continue du signal délivré par le photodétecteur pour tous les guides de la structure de test (*i.e.* guide de référence et guides de mesure). Le relevé de tension se fait à l'aide d'un multimètre Keysight 34401A. Cette tension est directement convertible en puissance reçue par le détecteur via sa caractéristique de responsivité. Pour les mesures différentielles, le rapport des tensions donne directement les pertes additionnelles engendrées par les fonctions optiques dans la voie de mesure. Cette procédure est appliquée à chaque structure de test de fonction optique et aux spirales.

3.3.2. Protocole pour l'AWG

Le protocole de mesure de l'AWG diffère du précédent pour une raison simple : c'est un composant large bande nécessitant une caractérisation spectrale. La source laser utilisée est un QCL Fabry-Pérot dont le spectre d'émission s'étend de 2250 cm^{-1} à 2283 cm^{-1} . (*i.e.* 4380 nm à 4444 nm). L'AWG est caractérisé en étant utilisé dans le sens du démultiplexage. Le faisceau du laser QCL Fabry-Pérot est envoyé dans les différentes sorties de l'AWG et l'on récupère le faisceau sortant par les différentes entrées. La procédure d'optimisation du positionnement des lentilles est la même qu'au paragraphe précédent à ceci près que le photodétecteur rapide est remplacé par le spectromètre à transformée de Fourier (FTIR). Pour chaque sortie de l'AWG, on acquiert le spectre qui est émis par chaque entrée de l'AWG à l'aide du FTIR. La division de ces mesures par un spectre de référence, acquis en sortie d'un guide droit, permet d'obtenir la transmission de l'AWG. Le laser étant peu puissant (2,7 mW au point de fonctionnement choisie) et les pertes optiques importantes sur ce banc, le détecteur utilisé dans le FTIR est un détecteur en tellurure de mercure-cadmium (*i.e.* HgCdTe ou MCT), refroidi à 77 K sous azote liquide.

3.4. Résultats obtenus

Afin de se repérer sur le *wafers*, les puces ont été numérotées de gauche à droite et de haut en bas, le bas étant le côté où se situe le *notch* (Figure III-14). Sauf mention contraire, les résultats expérimentaux qui seront présentés ont été obtenus à partir des puces 14, 16, 18, 35 et 61. Chaque puce a été mesurée trois fois. Les résultats présentés par la suite sont la moyenne de ces trois mesures.

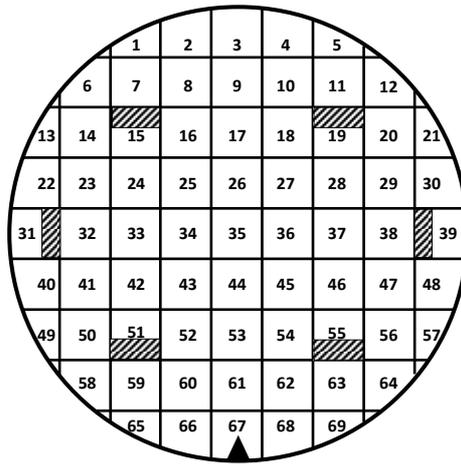


Figure III-14 : Schéma du wafer avec la numérotation des puces. Le notch est représenté par un triangle noir. Les zones hachurées représentent les marques d'alignement (i.e. PM : Primary Mark) pour les étapes de photolithographie.

3.4.1. Pertes par propagation

Les pertes par propagation se déterminent en mesurant la puissance en sortie de chaque spirale et en la traçant en fonction de la longueur des spirales. Les pertes maximales mesurées sont de $-0,29 \text{ dB.cm}^{-1}$ (Figure III-15) sur la puce centrale du wafer (puce 35). On notera cependant une incohérence des mesures pour la puce 61 où l'on mesure plus de puissance optique après 3 cm de propagation qu'après 2 cm. Ce résultat montre que la plateforme $\text{Si}_{0,6}\text{Ge}_{0,4}$ à composition constante présente des pertes par propagation plus de trois fois inférieures à celles de la plateforme à gradient d'indice [149]. L'origine de ces faibles pertes n'est pas encore clairement identifiée. On notera d'abord que les pertes mesurées sont en polarisation TM. Dans ce cas, le mode optique est plus sensible aux défauts aux interfaces et non aux défauts au niveau des flancs du guide. Au vu des faibles valeurs de pertes, on peut supposer que les pertes engendrées par des défauts aux interfaces inférieure et supérieure du guide n'est pas le mécanisme dominant. Cela remet donc en cause l'intérêt de faire un gradient d'indice pour éviter des dislocations. Une cause probable de la diminution des pertes serait une amélioration dans la gravure des guides, engendrant des flancs moins rugueux. Soit le procédé de gravure du CEA-Leti a été amélioré depuis le premier lot à gradient d'indice, soit la gravure d'une couche de SiGe à composition constante engendre moins de rugosité que la gravure d'une couche avec un gradient de composition. Néanmoins cela ne minimise pas l'importance du résultat. D'autant plus, qu'à notre connaissance, aucune plateforme sur substrat silicium dédiée au moyen infrarouge ne présente des pertes aussi faibles. A ce jour, les pertes les plus faibles rapportées sur plateforme silicium sont sur des guides à saut d'indice $\text{Si}_{0,6}\text{Ge}_{0,4}$ de $1,4 \mu\text{m}$ d'épais et de $2 \mu\text{m}$ de large, fabriqués au CEA-Leti. Grillet *et al.* ont ainsi obtenues des pertes de $0,5 \text{ dB.cm}^{-1}$ en polarisation TE à une longueur d'onde de $4,75 \mu\text{m}$ [146]. La différence de valeur de pertes peut s'expliquer par un meilleur dimensionnement de nos guides.

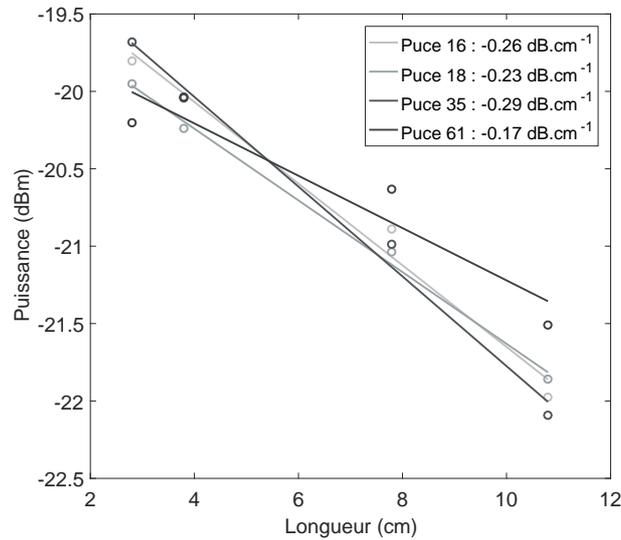


Figure III-15 : Fit linéaire sur la puissance mesurée en fonction de la longueur des spirales pour chacune des puces.

3.4.2. Equilibrage du MMI 1x2

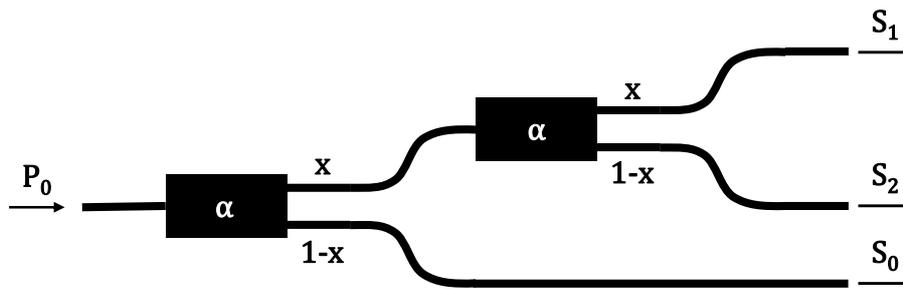


Figure III-16 : Schéma de la structure de test du MMI 1x2. La puissance P_0 en entrée de la structure est répartie sur trois sorties S_1 , S_2 et S_0 grâce aux deux MMI. Chaque MMI a une transmission α et la puissance est répartie sur les deux sorties avec un pourcentage x et $1-x$.

La caractérisation des fonctions optiques présentes sur la puce repose sur des mesures différentielles, où l'on suppose que la répartition de puissance entre les différentes voies se fait sans pertes et de façon équitable. Dans le cas contraire, une correction des mesures sera nécessaire. Pour savoir si le MMI 1x2 est équilibré, deux MMI sont cascades (Figure III-16). L'entrée est donc divisée en trois sorties : une de référence S_0 venant du premier MMI et deux autres de mesure S_1 et S_2 venant du deuxième MMI. Si l'on nomme P_0 la puissance initiale en entrée du circuit, x la part de puissance partant dans la branche supérieure du MMI et α le taux de transmission du MMI, on exprime alors la puissance optique dans chaque sortie :

$$\begin{aligned} S_1 &= \alpha^2 x^2 P_0 \\ S_2 &= \alpha^2 x(1-x)P_0 \\ S_0 &= \alpha(1-x)P_0 \end{aligned} \quad (18)$$

En faisant le rapport des puissances mesurées entre les différentes voies, on extrait très facilement les caractéristiques du MMI 1x2. Notamment, l'équilibrage s'obtient facilement en faisant le rapport suivant :

$$\frac{S_1}{S_1 + S_2} = x \quad (19)$$

L'équation (19) permet de connaître directement l'équilibrage du MMI en s'affranchissant des pertes par insertion (Figure III-17). Les résultats présentés sont la moyenne des mesures faites sur les MMI et les barres d'erreurs sont égales à l'écart-type de ces mesures. Dans l'ensemble, les MMI sont relativement bien équilibrés avec $0,493 < x < 0,504$. L'équilibrage du MMI varie entre le centre et le bord du *wafér*, la puce centrale (*i.e.* puce 35) ayant $x = 0,504$ et les puces en périphérie (*i.e.* puces 14, 16, 18 et 61) ayant $x \approx 0,495$. Cela est probablement dû à la dispersion bord-centre de la gravure germanium utilisée pour graver les guides. L'écart-type peut être très différent entre deux puces à cause de l'alignement optique manuel qui rend la précision et la répétabilité des mesures très dépendantes de l'opérateur. De la même façon, on peut retrouver les pertes par insertion en calculant le rapport S_2/S_0 ce qui permet de déduire la valeur de α connaissant la valeur de l'équilibrage x . Les résultats obtenus ne sont cependant pas cohérents à cause d'une trop faible précision des mesures. Ils ne seront donc pas présentés. Par la suite, les résultats obtenus pour les différentes fonctions optiques seront corrigés du léger déséquilibre des MMI.

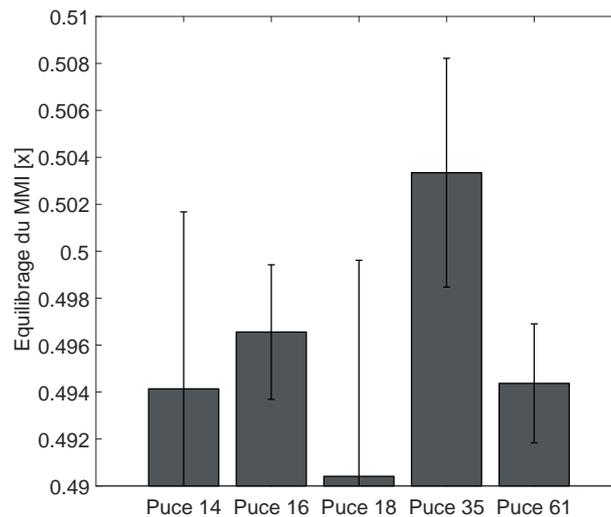


Figure III-17 : Equilibrage du MMI 1x2 sur les différentes puces mesurées. L'équilibrage du MMI varie entre le bord et le centre de plaque.

3.4.3. Equilibrage des coupleurs directionnels symétriques

A l'image de la mesure de l'équilibrage des MMI 1x2, le coupleur n'est présent qu'une seule fois dans la voie de mesure. Le rapport entre les deux voies de sortie du coupleur directionnel et la voie de référence permet de connaître l'équilibrage du coupleur (Figure III-18). Comme pour les autres fonctions, l'équilibrage des coupleurs a été mesuré trois fois, puis moyenné, sur chaque puce. Premièrement, l'équilibrage mesuré ne correspond pas au dimensionnement des coupleurs. Le coupleur S1 censé être un coupleur 0/100 se révèle être un coupleur 20/80 et le coupleur S2 est un coupleur 90/10 au lieu d'un 50/50. Cette différence vient très certainement du fait que le couplage entre l'échange de puissance entre les deux guides ne se fait pas seulement dans la partie rectiligne, mais également au niveau des virages, lorsque ceux-ci sont suffisamment proches [185]. Le dimensionnement des coupleurs aurait dû prendre cet effet en compte et réduire la longueur

des coupleurs. Des simulations BPM-3D confirment les résultats expérimentaux. Le comportement des coupleurs est donc bien en accord avec la théorie.

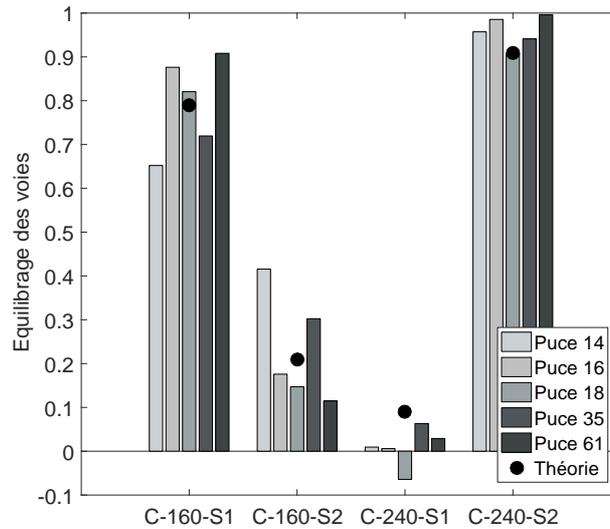


Figure III-18 : Equilibrage des coupleurs directionnels.

3.4.4. Pertes par virages S

Chaque variante de virage S a été incorporée dans une structure de test. Les virages étant conçu pour engendrer peu de pertes, 20 virages S sont cascades afin de pouvoir mesurer une différence de puissance significative entre la voie de mesure et la voie de référence. La courbure étant variable les pertes mesurées sont celles engendrées par un virage S, pertes par courbure et par transition sont donc confondues dans la mesure (Figure III-19). Toutes puces et toutes variantes confondues, les pertes maximales mesurées sont de $-0,07$ dB/virage. En moyenne les pertes mesurées sont plus élevées pour le décalage de $80 \mu\text{m}$ ($-0,058$ dB) que pour celui de $76 \mu\text{m}$ ($-0,048$ dB). Les virages S faisant tous la même longueur, le virage avec le décalage le plus important a une courbure plus importante et engendre donc plus de pertes par courbure. En revanche, il n'y a pas de différences significatives entre les variantes avec des facteurs d'élargissement différents. Expérimentalement, il a été constaté qu'un facteur d'élargissement deux fois plus important que celui trouvé automatiquement permettait de diminuer d'un facteur deux les pertes du virage S [149]. Les pertes mesurées étant relativement faible, la précision est peut-être insuffisante pour constater une différence. Enfin pour conclure, en technologie à gradient d'indice, les virages S présentaient des pertes deux fois supérieures ($-0,1$ dB) pour un rayon de courbure minimal de $550 \mu\text{m}$, une longueur de $325 \mu\text{m}$, et un décalage moindre de $50 \mu\text{m}$. La plateforme à saut d'indice permet donc d'obtenir des virages 55 % plus compactes et engendrant deux fois moins de pertes. Le gain de compacité vient du mode qui plus confiné dans le guide à saut d'indice. En revanche, les pertes moindres s'expliquent *a priori* par les pertes par propagation qui sont plus faibles pour les guides à saut d'indice. En effet, les mesures ici ne font pas la distinction entre les pertes par propagation, les pertes par courbure et les pertes par transition.

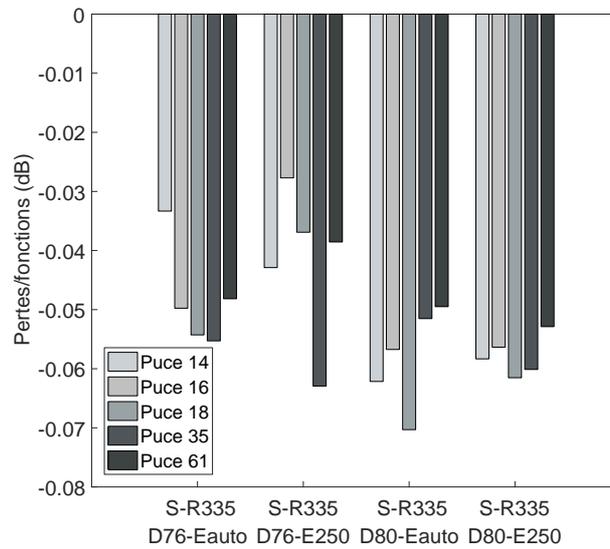


Figure III-19 : Pertes engendrées par virage pour chaque variante de virage S.

3.4.5. Pertes par croisement

Comme pour les virages S, les trois variantes de croisements ont été mises dans une structure de test. Dix croisements successifs sont présents dans la voie de mesure afin d'engendrer des pertes mesurables facilement. Les pertes des croisements ont été mesurées trois fois sur chaque puce. Les résultats donnés (Figure III-20) sont la moyenne de ces trois mesures. D'une façon générale, l'ordre de grandeur des pertes mesurées sont en accord avec les calculs. En revanche la théorie indique que l'élargissement des intersections devraient diminuer les pertes. On observe que cette tendance n'est respectée que pour la puce 35, située au centre du *wafer*. Pour les autres puces, le croisement à 4 μm représente un maximum (puces 14, 16 et 18) ou un minimum (puce 61). La puce 14 présente des pertes par croisement bien plus importantes que sur les autres puces, en particulier pour le croisement à 4 μm . En moyenne les pertes par croisement sont du même ordre de grandeur que celles mesurées pour la technologie à gradient d'indice [149]. Enfin, le *crosstalk* des croisements n'a pu être mesuré car la conception du circuit ne le permettait pas.

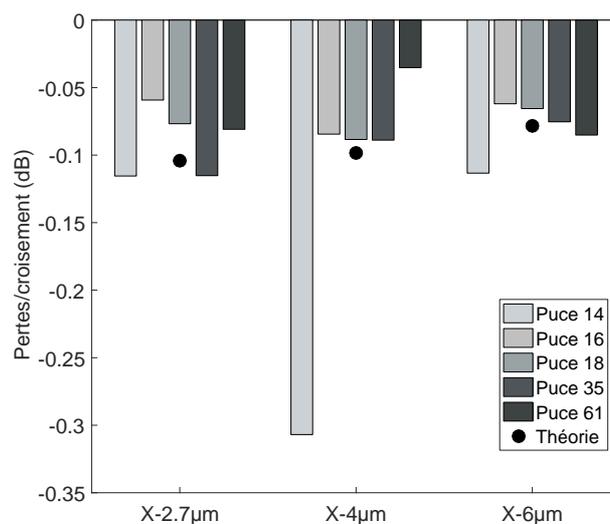


Figure III-20 : Pertes engendrées par chaque variante de croisement sur cinq puces du wafer.

3.4.6. Caractéristiques expérimentales de l'AWG

La source utilisée ne couvrant pas l'ensemble de la bande passante de l'AWG ($\Delta\sigma = 19 \text{ cm}^{-1}$ à -3 dB et $\Delta\sigma = 38 \text{ cm}^{-1}$ à -5 dB), des entrées supplémentaires ont été rajoutées. Au nombre de 16, celles-ci sont décalées spectralement de $5,88 \text{ cm}^{-1}$, $11,78 \text{ cm}^{-1}$, $17,65 \text{ cm}^{-1}$, $23,53 \text{ cm}^{-1}$, $29,41 \text{ cm}^{-1}$, $35,29 \text{ cm}^{-1}$, $41,18 \text{ cm}^{-1}$ et $47,06 \text{ cm}^{-1}$ de chaque côté de la voie de l'entrée centrale et permettent de caractériser la transmission de tous les canaux de sortie. Un seul AWG du *wafers* a été caractérisé, celui de la puce 16. Après normalisation par le spectre transmis par un guide droit, la transmission de l'AWG est obtenue. Les résultats expérimentaux sont exploités en faisant une approximation gaussienne du spectre sortant de chaque canal de sortie (Figure III-21). On obtient ainsi facilement la fréquence centrale de transmission et les pertes par insertion de chaque canal, ainsi que leur largeur à mi-hauteur.

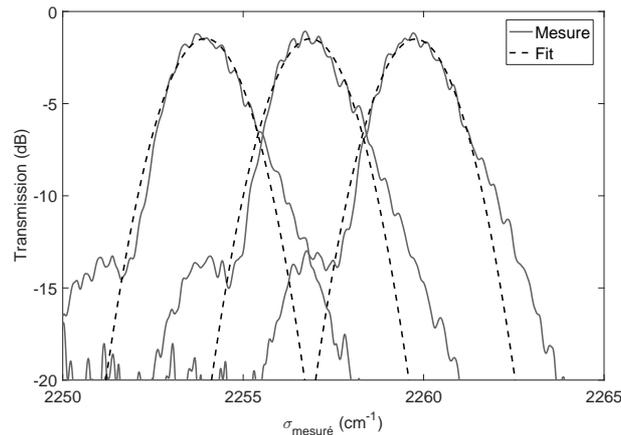


Figure III-21 : Transmission mesurée sur l'AWG de la puce 16. La mesure a été faite en utilisant l'entrée centrale. Seules trois sorties sont représentées ici.

En utilisant l'entrée centrale de l'AWG, les pertes par insertion pour la sortie centrale sont inférieures à $-1,3 \text{ dB}$ avec une nonuniformité de $4,3 \text{ dB}$ mesurée seulement grâce à un seul canal, celui devant transmettre théoriquement autour de $\sigma=2285 \text{ cm}^{-1}$. Le modèle de simulation prédisait des pertes $L_c=-5 \text{ dB}$ avec une non-uniformité de $L_u=3 \text{ dB}$. Si l'on compare les caractéristiques de transmission obtenues avec toutes les entrées décalées spectralement (Figure III-22), les pertes par insertion moyennes pour la sortie centrale ($\sigma_c=2235 \text{ cm}^{-1}$) sont de $L_c=-2,45 \text{ dB}$. La non-uniformité moyenne est de $L_u=4,55 \text{ dB}$. La non-uniformité importante constatée est imputée à la forte baisse du rapport signal à bruit qui surestimerait les pertes par insertion pour les canaux les plus extrêmes. Il en est de même pour le *crosstalk* qui augmente avec la baisse du rapport signal à bruit. Le *crosstalk* mesuré est inférieur à -12 dB , soit très proche des $-11,9 \text{ dB}$ donnés par le modèle. Si l'on regarde la largeur à mi-hauteur (*i.e.* FWHM : *Full Width at Half Maximum*) des spectres de transmission de chaque sortie en fonction du nombre d'onde mesuré (Figure III-23), on s'aperçoit que celle-ci augmente avec le nombre d'onde transmis. Ce comportement est en accord avec la simulation bien que l'augmentation de la FWHM avec le nombre d'onde soit plus important en pratique que pour les calculs théoriques. Physiquement, on peut expliquer ce phénomène par la largeur des modes focalisés en sortie de la zone planaire, c'est-à-dire à l'entrée des MMI. Plus le nombre d'onde est grand (*i.e.* plus la longueur d'onde est petite), plus la taille du mode focalisé est petit. Ainsi, l'intégrale de recouvrement entre ce mode et celui du MMI est plus tolérante, ce qui explique une FWHM plus importante.

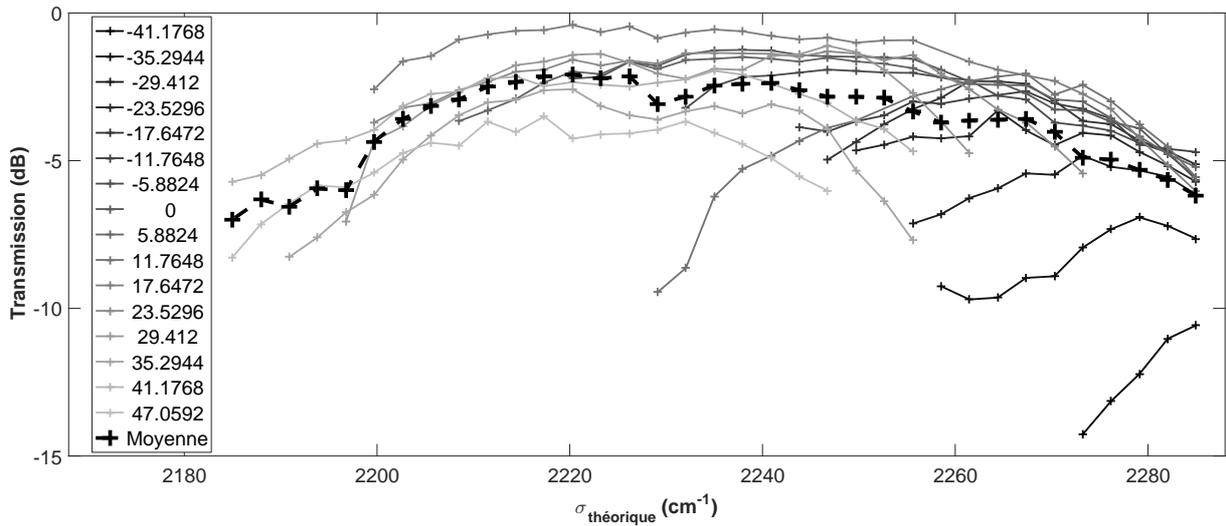


Figure III-22 : Pertes par insertion pour l'ensemble des canaux en fonction du nombre d'onde théorique pour lequel le canal est dimensionné. Chaque couleur correspond à un canal de sortie utilisé pour la mesure. Chaque sortie utilisée permet de décaler spectralement la réponse de l'AWG et d'atteindre les canaux d'entrée qui ne pouvait être atteints avec la sortie centrale en raison du spectre d'émission trop étroit de la source laser utilisée. La légende indique le décalage spectral en cm^{-1} provoqué par chaque canal d'entrée utilisé.

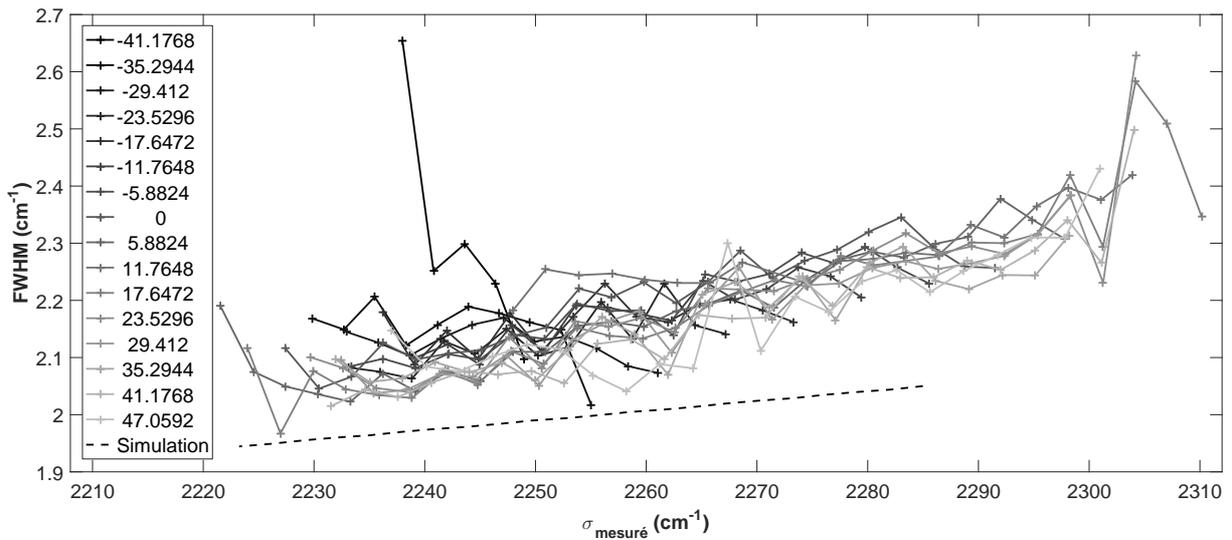


Figure III-23 : Largeur à mi-hauteur (FWHM) de l'approximation gaussienne du spectre de transmission mesuré sur chaque canal de sortie en fonction du nombre d'onde central mesuré. Les mesures ont été faites pour tous les canaux de sortie possibles. La légende indique le décalage spectral en cm^{-1} provoqué par chaque canal d'entrée utilisé.

L'AWG est conçu pour que chaque guide provoque un déphasage égal à un nombre entier de longueurs d'onde. Toute modification au niveau de la géométrie des guides ou de leur composition changerait la plage de fonctionnement de l'AWG. En affichant le décalage spectral $\Delta\sigma$ (*i.e.* différence entre le nombre d'onde mesuré et le nombre d'onde théorique, corrigée du décalage spectral induit par l'entrée utilisée pour la mesure) en fonction du nombre d'onde théorique de fonctionnement de la voie de sortie (Figure III-24), on constate un décalage global de l'AWG de $7,14 \text{ cm}^{-1}$. L'espacement spectral moyen entre deux canaux est de $2,916 \text{ cm}^{-1}$ avec une dispersion de $0,05 \text{ cm}^{-1}$.

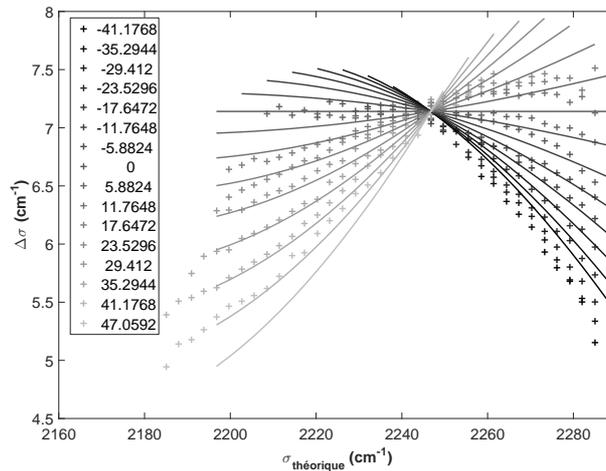


Figure III-24 : Décalage spectral de l'AWG par rapport à la conception initiale. Les lignes solides correspondent à la simulation corrigée du décalage spectral constatée expérimentalement. Les points correspondent aux mesures effectuées avec l'ensemble des voies d'entrée. La légende indique le décalage spectral en cm^{-1} provoqué par chaque canal d'entrée utilisé.

Les résultats obtenus sont à comparer avec l'AWG à $4,5 \mu\text{m}$ précédemment réalisé en technologie à gradient d'indice [186]. Celui-ci avait des pertes par insertion de l'ordre de $L_c = -5 \text{ dB}$ et une non-uniformité $L_u = -2 \text{ dB}$. Les pertes constatées sur la technologie à saut d'indice sont bien moindres. Cela se fait cependant aux dépens d'une non-uniformité et d'un *crosstalk* plus important. Un dernier élément à ne pas négliger est l'empreinte de notre composant sur le circuit. L'AWG à gradient d'indice occupe une longueur d'environ $11,7 \text{ mm}$. En technologie à saut d'indice, l'AWG ne fait plus que $3,3 \text{ mm}$ de long. En changeant de technologie nous avons donc augmenté la compacité du multiplexeur d'un facteur $3,5$. Cet AWG fait désormais partie des composants MIR proposés dans le projet européen MIRPHAB [187].

4. Conclusion

Lors de ce chapitre, la conception du circuit d'évaluation de la plateforme SiGe à saut d'indice a été présentée. Celui-ci a été constitué à partir de tous les éléments choisis et dimensionnés lors du chapitre précédent. A travers cette conception nous avons pu constater l'importance d'anticiper et de prendre en compte les contraintes de fabrication et de caractérisation, dès la phase de conception du circuit. Ce circuit a été fabriqué dans la salle blanche du CEA-Leti sur des *wafers* Si de 200 mm . L'ensemble des étapes de fabrication se sont correctement déroulés avec quelques écarts sur la géométrie des guides, inhérents à un premier essai de fabrication. La caractérisation optique de ces circuits a démontré que cette plateforme possédait les pertes par propagation les plus faibles au monde ($< 0,3 \text{ dB.cm}^{-1}$). De façon générale, l'ensemble des fonctions optiques présentent des pertes inférieures ou équivalentes à la précédente plateforme à gradient d'indice. A cela s'ajoute un gain en compacité important, qui se constate notamment avec l'AWG qui voit sa surface divisée par $3,5$. En résumé, ces travaux ont démontré la pertinence de cette nouvelle plateforme pour le MIR qui présente de très faibles pertes, est plus compacte et ne présente plus l'aléas de fabrication que constituait la croissance du gradient de concentration de germanium.

Chapitre IV- Circuits photoniques passifs en technologie SiGe à saut d'indice réalisés par procédé damascène

La technologie de guide SiGe à saut d'indice répond aux problématiques de compacité et de faibles pertes pour la constitution d'une plateforme photonique dans le MIR. Cependant, elle ne permet pas de répondre à d'éventuelles applications nécessitant un circuit bi- λ ou tri- λ . Ainsi, un nouveau procédé de fabrication des guides SiGe a été élaboré afin de pouvoir co-intégrer sur une même puce des guides monomodes et à faibles pertes, fonctionnant à des longueurs très différentes. Ce chapitre est donc consacré à l'évaluation de ce procédé, dit damascène. Dans un premier temps, le principe de fabrication et ses intérêts seront présentés. Dans un deuxième temps, nous exposerons les détails du jeu de masque mis au point pour l'évaluation de cette technologie. L'enchaînement complet des étapes de fabrication sera ensuite détaillé ainsi que les résultats technologiques associés. Enfin, l'évaluation des pertes optiques dans ces guides sera présentée avant de conclure sur le potentiel réel de cette technologie de fabrication, alternative au procédé standard.

1. Caractéristiques de la plateforme SiGe à saut d'indice par procédé damascène

Dans ces travaux de thèse, nous avons exploré des alternatives pour l'intégration des guides optiques. Le but étant de répondre à la problématique de PIC capable de manipuler des longueurs d'onde différentes sans que les pertes par propagation ne soient dégradées. Le circuit du chapitre précédent est tout à fait adapté pour des applications nécessitant une seule longueur d'onde ou une bande passante relativement restreinte, ici $\Delta\sigma=100\text{ cm}^{-1}$. Cependant, dans certains cas, il est possible d'avoir besoin d'utiliser dans un même circuit des longueurs d'onde très éloignées. Par exemple, si l'on cherche à détecter deux gaz comme le CH_4 et le NO_2 , l'on aura besoin de faisceaux à $\lambda\approx 3,2\text{ }\mu\text{m}$ et $\lambda\approx 6,1\text{ }\mu\text{m}$. Or, un seul guide ne pourra être à la fois à faible perte et monomode pour ces deux longueurs d'onde. Il est donc nécessaire d'avoir deux guides de dimensions différentes, adaptés pour chacune des longueurs d'onde sur une même puce photonique.

1.1. Intérêts et caractéristiques du procédé damascène

En microélectronique, on peut distinguer deux types de procédé. Les procédés soustractifs enlèvent de la matière pour définir des motifs. Typiquement, la sculpture sur pierre ou la fabrication des guides dans le chapitre III font partie de cette famille. A l'opposé, les procédés additifs ajoutent de la matière qui vient prendre la forme des motifs désirés. C'est le cas des procédés de type damascène que nous avons adapté à la fabrication des guides SiGe à saut d'indice. Les procédés damascènes ont historiquement été mis au point pour la fabrication des interconnexions métalliques des transistors. Ils consistent à venir prédéfinir des motifs sous forme de cavités qui seront ensuite remplies. Si l'on applique ce schéma aux guides SiGe à saut d'indice (Figure IV-1), la première étape consiste à définir les zones de croissance des guides par des photolithographies et gravures successives. Les cavités qui formeront les cœurs des guides sont ainsi définis. Une épitaxie SiGe vient remplir les cavités, suivie d'un CMP permettant d'enlever le surplus de matière en dehors des cavités. Enfin, une encapsulation Si enterré les guides et les isole de l'extérieur.

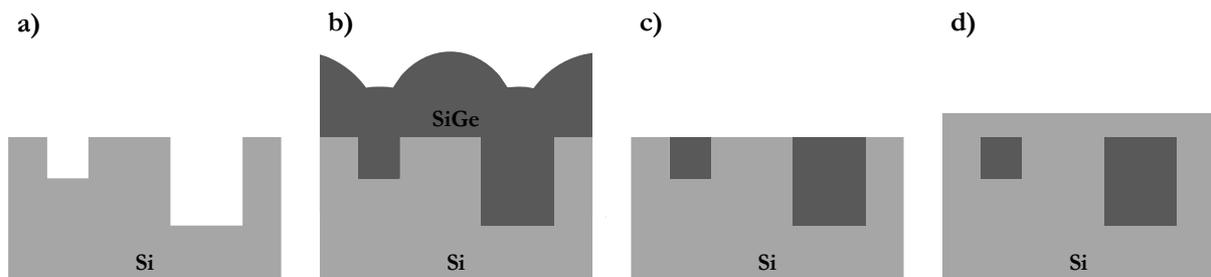


Figure IV-1 : Schéma de principe du procédé damascène adapté à la fabrication de guide SiGe à saut d'indice : a) des cavités sont définies dans le substrat, b) celle-ci sont remplies avec une épitaxie SiGe, c) une étape de CMP supprime l'excédent de matière en dehors des cavités, d) les guides sont encapsulés par épitaxie Si.

En plus de pouvoir définir des guides avec des hauteurs différentes, un autre intérêt important de cette technologie est que l'ensemble des guides ont la face supérieure de leur cœur alignée à la même hauteur. Cela est très intéressant si l'on envisage d'intégrer des sources lasers III-V hybrides où le mode laser vient se coupler dans le guide par évanescente. On peut ainsi envisager de venir rapporter par collage moléculaire des vignettes de QCL III-V adaptées à des longueurs d'onde différentes, puis les mettre en forme sur *wafers* 200 mm ou 300 mm (Figure IV-2). On aurait ainsi

une plateforme technologique capable de produire des puces contenant des PIC multi- λ avec leurs sources lasers intégrées.

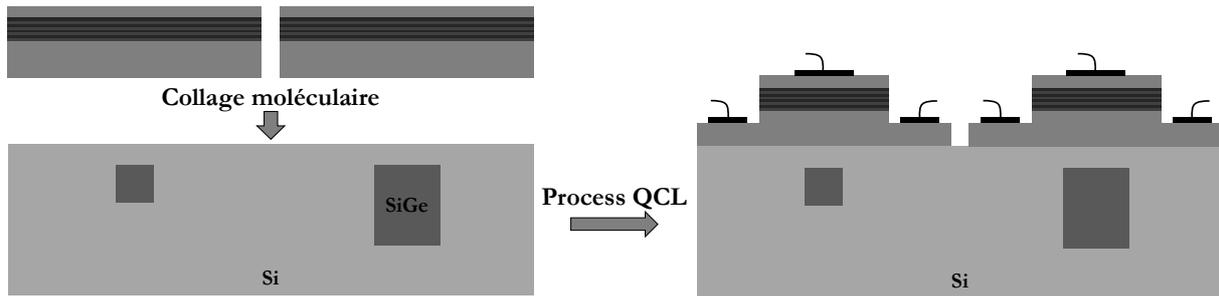


Figure IV-2 : Illustration de l'intégration de QCL hybride sur un circuit obtenu par procédé damascène.

1.2. Dimensionnement des guides

Le test du procédé d'intégration damascène pour fabriquer des guides SiGe à saut d'indice requiert que l'on conçoive un masque. Avant de pouvoir faire ce masque il est nécessaire que l'on dimensionne des guides pour d'autres longueurs d'onde. Le choix a été fait de dimensionner un guide monomode à $\lambda=2,3 \mu\text{m}$ en polarisation TE. Les QCL ne pouvant émettre en-deçà de $3 \mu\text{m}$, les ICL peuvent être utilisés à $\lambda=2,3 \mu\text{m}$ mais émettent préférentiellement en TE (*i.e.* parallèle au substrat). A l'aide d'un solveur de mode commercial (Fimprop[©]), les dimensions choisies sont $w=h=1,3 \mu\text{m}$ (Figure IV-3).

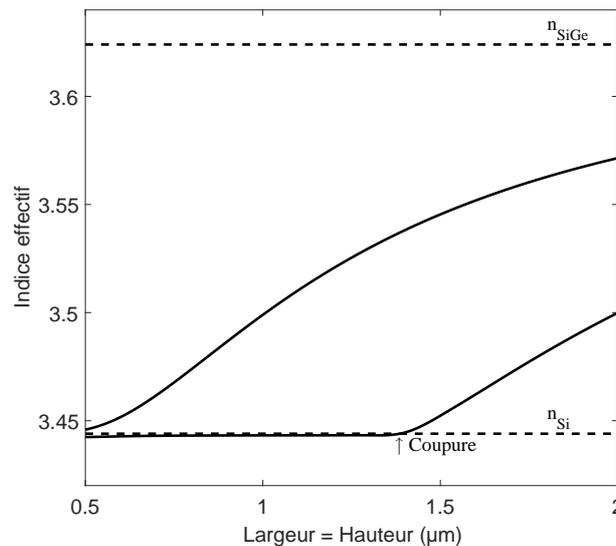


Figure IV-3 : Courbe de l'indice effectif des premiers modes en fonction de $h=w$ pour $\lambda=2,3 \mu\text{m}$ en polarisation TE.

2. Conception du jeu de masque

2.1. Buts du circuit

Le procédé de fabrication mis en place au chapitre III était relativement mature, car les étapes les plus critiques avaient déjà été mis au point lors du développement de la plateforme à gradient d'indice. Le circuit qui a été fabriqué et caractérisé était donc un circuit orienté vers la caractérisation des performances optiques. Ici, le procédé damascène est plus amont et présente potentiellement des limitations, notamment en termes de dimensions qui pourront être atteinte pour les guides. En

effet, le remplissage des tranchées par épitaxie ne se fera sans doute pas correctement pour toutes les dimensions. Le circuit doit également permettre de démontrer la faisabilité d'intégrer des guides de hauteurs différentes sur une même puce, ainsi que permettre leur caractérisation optique. La conception du masque est donc différente par rapport au circuit SiGe à saut d'indice et doit prendre en compte l'ensemble de ces contraintes.

2.2. Détails des motifs

Les contraintes évoquées ont amené à la conception d'un jeu de masque composé de deux niveaux. Chaque niveau contient les guides pour une seule longueur d'onde : le premier niveau est dédié aux guides de $1,3 \mu\text{m}$ de haut (*i.e.* transport d'un mode TE₀ à $\lambda=2,3 \mu\text{m}$) et le deuxième niveau est dédié aux guides de $2,7 \mu\text{m}$ de haut (*i.e.* transport d'un mode TM₀ à $\lambda=4,5 \mu\text{m}$). Les deux niveaux sont très similaires et comporte une série de 40 guides droits parallèles traversant la puce dont la largeur varie. La variation de la largeur des guides permettra de connaître les rapports d'aspect hauteur/largeur que l'on peut atteindre avec la technologie damascène. Le premier niveau voit la largeur de ses guides variée de $2 \mu\text{m}$ à $0,3 \mu\text{m}$ avec un pas de $0,1 \mu\text{m}$ entre 2 et $0,4 \mu\text{m}$ de large puis un pas de $0,05 \mu\text{m}$ jusqu'à la largeur de $0,3 \mu\text{m}$. Le deuxième niveau voit la largeur de ses guides variée de $4 \mu\text{m}$ à $1 \mu\text{m}$ avec un pas de $0,2 \mu\text{m}$ entre 4 et $1,6 \mu\text{m}$ de large puis un pas de $0,1 \mu\text{m}$ jusqu'à la largeur de $1 \mu\text{m}$. Pour les deux niveaux, chaque guide est en double avec une version comportant un *taper* élargissant l'entrée et la sortie du guide à $5 \mu\text{m}$ et une version sans *taper*. Egalement sur les deux niveaux, un guide multimode ($10 \mu\text{m}$ de large pour le 1^{er} niveau et $15 \mu\text{m}$ de large pour le second) est présent en début et fin de série pour faciliter l'étape d'alignement sur le banc de caractérisation par la tranche. Le nombre de variante de guide étant important, le circuit ne comporte pas de spirales par manque de place sur la puce. La mesure des pertes optiques sera donc faite avec une méthode différente du chapitre précédent.

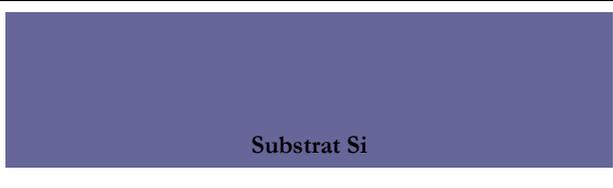
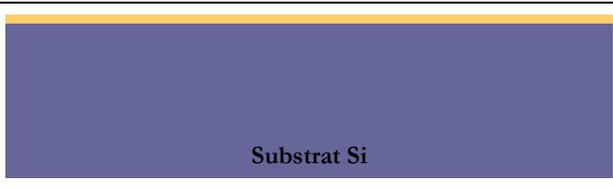
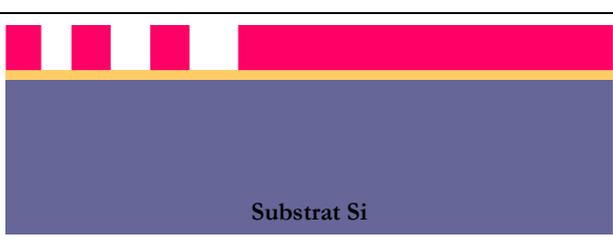
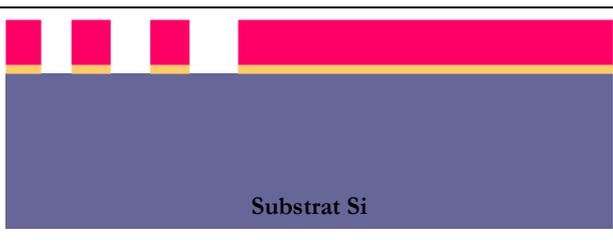
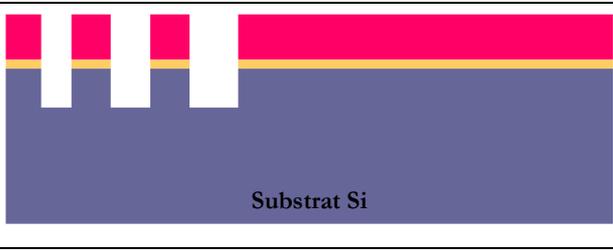
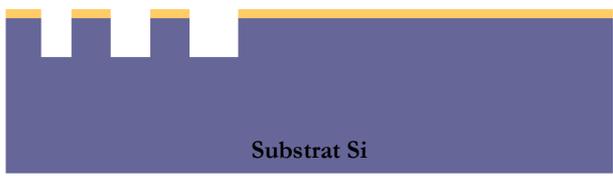
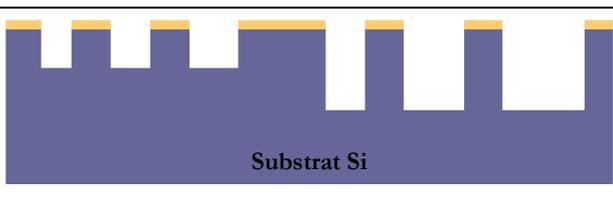
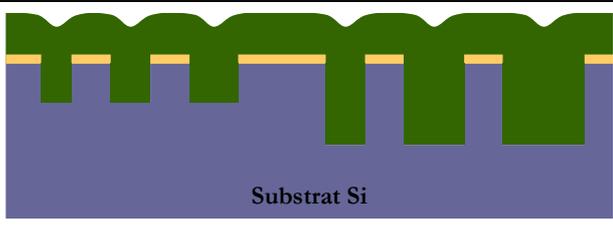
3. Fabrication en salle blanche sur plaque 200 mm

3.1. Détails de l'enchaînement des procédés technologiques

La fabrication des guides damascènes a été faite dans la salle blanche du CEA-Leti sur des *wafers* Si de 200 mm de diamètre. La fabrication des guides damascènes se fait en 18 étapes (Tableau IV-1) que nous allons détailler ici (certaines étapes ont été regroupées pour plus de clarté) :

1. Le substrat de départ est un wafer Si de 200 mm de diamètre non dopé.
2. Un dépôt d'oxyde de 250 nm est réalisé sous haute température (800°C) par oxydation sous atmosphère O_2 . Ce type d'oxyde est appelé HTO pour *High Temperature Oxyde* et servira de masque dur.
3. Une résine photosensible est étalée par *spin coating*, c'est-à-dire par force centrifuge en faisant tourner le *wafer*. L'épaisseur de résine utilisée est de $2,5 \mu\text{m}$. La résine est insolée par lumière UV (DUV : *Deep UltraViolet*) en utilisant le 1^{er} niveau de masque, puis développée.
4. Le masque dur HTO est gravé par un procédé de gravure plasma.
5. Le silicium est gravé par DRIE sur $1,3 \mu\text{m}$.
6. La résine est enlevée par un procédé de *stripping*.
10. Les étapes 3 à 7 sont répétées pour la réalisation de la deuxième série de guide. Pour cela le 2^{ème} niveau de masque est utilisé et la gravure Si est faite sur $2,7 \mu\text{m}$ de profond.
11. Un nettoyage chimique de préparation est réalisé avant de faire le dépôt de $\text{Si}_{0,6}\text{Ge}_{0,4}$ de $3 \mu\text{m}$ d'épaisseur par procédé RP-CVD.
12. Le surplus de SiGe est enlevé par un CMP pour récupérer une surface plane. Le CMP s'arrête sur le masque dur SiO_2 .

13. Le retrait du masque dur se fait par gravure en voie humide avec une solution de HF.
14. Enfin, un nettoyage de préparation de surface est réalisé avant l'encapsulation du circuit par environ 10 μm de Si déposé par RP-CVD.

| | |
|---|---|
| 1. Substrat Si 200 mm |  <p>Substrat Si</p> |
| 2. Dépôt HTO 250 nm |  <p>Substrat Si</p> |
| 3. Etalement de la résine, insolation DUV et développement du 1 ^{er} niveau de masque |  <p>Substrat Si</p> |
| 4. Gravure SiO ₂ plasma |  <p>Substrat Si</p> |
| 5. Gravure Si DRIE 1,3 μm |  <p>Substrat Si</p> |
| 6. <i>Stripping</i> |  <p>Substrat Si</p> |
| 7-10. Les étapes 3 à 6 sont répétées avec le 2 ^{ème} niveau de masque et une gravure Si de 2,7 μm de profond. |  <p>Substrat Si</p> |
| 11. Nettoyage puis épitaxie RP-CVD Si _{0,6} Ge _{0,4} |  <p>Substrat Si</p> |

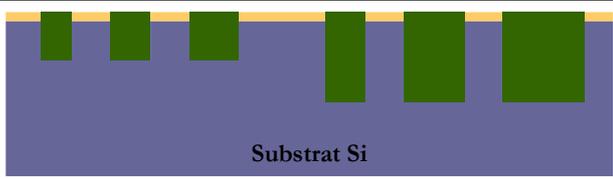
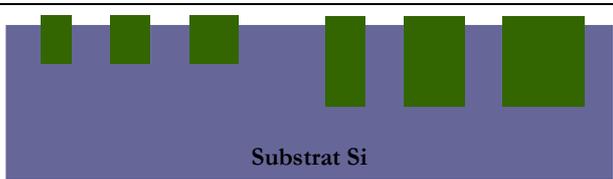
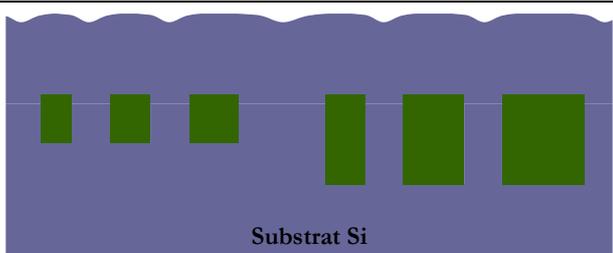
| | |
|--|---|
| 12. CMP avec arrêt sur SiO ₂ |  <p>Substrat Si</p> |
| 13. Gravure SiO ₂ par voie humide |  <p>Substrat Si</p> |
| 14. Nettoyage et épitaxie Si par RP-CVD |  <p>Substrat Si</p> |

Tableau IV-1 : Enchaînement des étapes technologiques pour la fabrication des guides damascènes.

3.2. Résultats de fabrication

L'enchaînement technologique qui vient d'être décrit est nouveau par rapport à la technologie standard de fabrication des guides déjà mise au point. De ce fait, des observations et mesures ont été faites après les étapes critiques afin de constater d'éventuelles dérives par rapport aux résultats escomptés. Nous nous proposons ici de résumer les principales observations et mesures faites durant la fabrication du lot.

3.2.1. Photolithographie des guides

La photolithographie des guides s'est correctement déroulée pour le 1^{er} niveau de masque. En revanche, les tranchées créées ont posé problème pour l'étalement de la résine pour le 2^{ème} niveau. La résine s'est retrouvée piégée dans les rainures et ne s'est pas étalée correctement sur l'ensemble de la plaque (Figure IV-4). La solution trouvée a été d'utiliser une résine plus épaisse et plus visqueuse pour la seconde photolithographie.

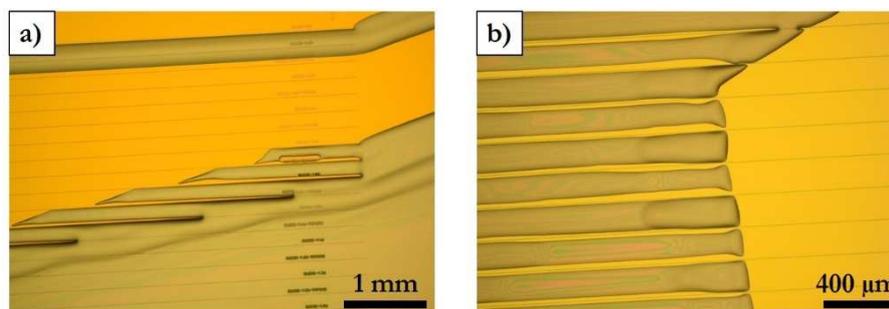


Figure IV-4 : Photos prises au microscope des défauts d'étalement de résine pour la seconde photolithographie a) en bord de guides et b) au milieu des guides.

3.2.2. Gravure silicium

Suite à la photolithographie, le masque dur HTO et les tranchées en silicium ont été gravés. L'état des tranchées a été vérifié par des observations de coupe au MEB (Figure IV-5). Tout d'abord, les

flancs de gravure sont bien droits bien qu'une légère rugosité soit visible sur ceux-ci avec une striation verticale induite par le procédé de gravure (Figure IV-5a). Les dimensions, largeur et hauteur, des guides sont également respectées avec une profondeur de gravure d'environ $1,3\ \mu\text{m}$ (Figure IV-5b). L'anisotropie de la gravure n'est pas parfaite avec un léger évasement au niveau de la base des guides. On notera également que le masque dur HTO est plus fin que ce qui était prévu, $173\ \text{nm}$ au lieu de $250\ \text{nm}$. Lorsque le rapport d'aspect hauteur/largeur devient important, l'état des flancs se dégradent avec des aspérités et une rugosité plus importantes (Figure IV-5c).

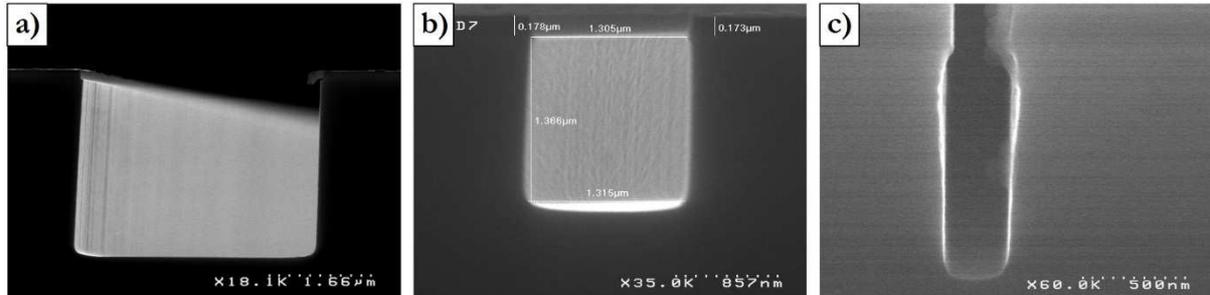


Figure IV-5 : Photos MEB d'une coupe des guides damascènes après gravure silicium et stripping : a) Les flancs sont droits avec une striation verticale due au procédé de gravure ; b) la profondeur de gravure est respectée. On notera un léger évasement à la base du guide ; c) pour les rapports d'aspect plus agressifs, les flancs semblent plus rugueux.

3.2.3. Epitaxie $\text{Si}_{0,6}\text{Ge}_{0,4}$ par jet moléculaire

Une des principales inconnues, sur la fabrication des guides en technologie damascène, est le rapport d'aspect hauteur/largeur maximal accessible. En effet, on ne sait pas comment la croissance de SiGe va se produire dans des cavités de formes diverses. Si la croissance se fait de façon isotrope sur toutes les parois de la tranchée, alors on ne pourra remplir des tranchées dont le rapport d'aspect hauteur/largeur est très supérieure à 1. Tout d'abord, nous avons pu constater que la croissance se fait correctement en fond des tranchées et ce, quel que soit la hauteur des guides (Figure IV-6). En revanche, des trous, appelés *voids*, apparaissent à partir d'un rapport d'aspect de l'ordre de 1 (Figure IV-6b). Cela est dû à une croissance de SiGe se faisant sur les arêtes et formant des bourrelets qui viennent obstruer la tranchée avant que celle-ci ne soit entièrement rempli. Au niveau des interfaces SiGe/Si, on constate une rugosité bien plus importante que précédemment notamment avec des profils de flancs en « dent de scie » (Figure IV-6c). Ce profil est d'autant plus marqué pour des rapports d'aspect supérieurs à 1 (Figure IV-6d). Il a été identifié que c'est durant l'étape d'épitaxie que les flancs prennent ce profil. On peut supposer que la gravure silicium des tranchées provoque une rugosité trop importante pour que la croissance de SiGe se fasse correctement. Ici, le profil en dent de scie est plus marqué pour les rapports d'aspect inférieures à 1 et nous avons pu constater, que c'est sur ces tranchées que la gravure avait laissé les aspérités les plus importantes.

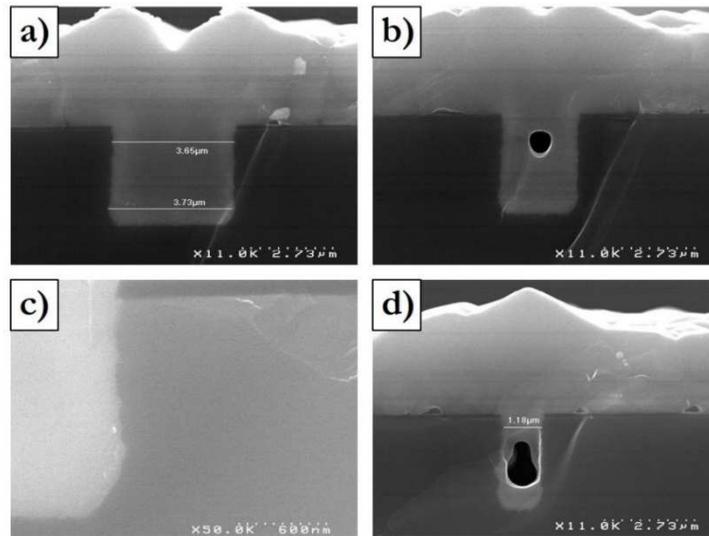


Figure IV-6 : Photos MEB d'une coupe des guides damascènes après épitaxie du SiGe pour différents rapports d'aspect : a) rapport d'aspect de 0,74, aucun void n'est visible ; b) le rapport d'aspect devient supérieur à 1 et des voids se forment ; c) un zoom sur les flancs permettent de constater une interface SiGe/Si en dent de scie ; d) sur les rapports d'aspects les plus importants, les voids composent la majorité du guide et les flancs sont encore plus rugueux.

3.2.4. Planarisation et encapsulation

Suite au remplissage des tranchées, il est nécessaire de retirer l'excédent de SiGe présent sur l'ensemble de la plaque. Cela est réalisé avec une étape de CMP qui est arrêté par le masque dur en SiO₂. Suite à cela, le masque dur est retiré par voie humide et l'on procède à l'encapsulation du circuit avec une épitaxie Si. Des coupes MEB ont été réalisées une fois ces procédés réalisés, soit à la fin du cycle de fabrication des puces (Figure IV-7).

On voit apparaître des creux sur les bords des guides qui ne correspondent pas aux observations de la Figure IV-6. A partir d'un rapport d'aspect proche de 1, on peut aussi observer que des *voids* sont formés par du Si dans le cœur en SiGe (Figure IV-7c, d). Il est délicat de conclure sur l'origine de ces creux car ce n'est pas du *dishing* observé souvent avec le CMP. Il s'agirait plutôt d'un défaut de croissance de SiGe qui a l'air d'avoir été déposé en deux fois et de manière insuffisante sur cet échantillon.

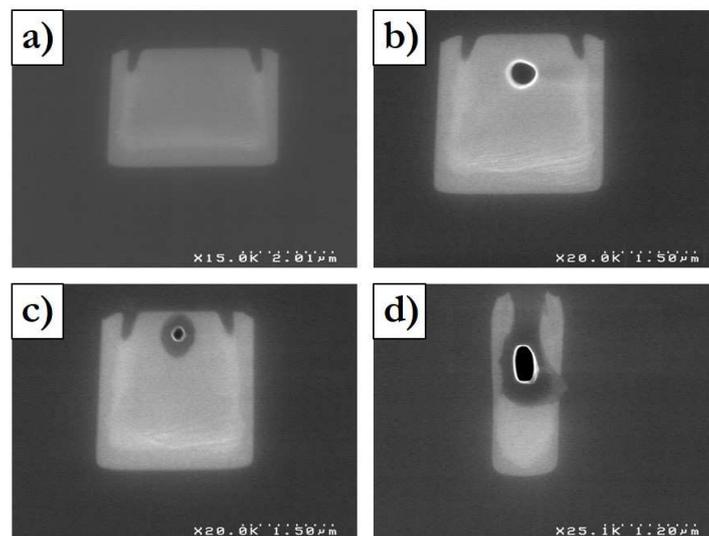


Figure IV-7 : Coupes MEB prises après fabrication complète des puces d'essai de la technologie damascène. Les photos sont classées par rapport d'aspect croissant et permettent de voir l'apparition de défauts avec l'augmentation de celui-ci.

3.3. Conclusion

La fabrication de guides SiGe à saut d'indice en technologie damascène était une première dans la salle blanche du CEA-Leti. Ce premier circuit a permis de mettre en lumière certaines limitations technologiques de ce type de procédé. Tout d'abord, l'étalement de résine sur une plaque comportant des motifs gravés peut poser problème et nécessite d'adapter le procédé, avec une résine plus épaisse et visqueuse. Cette difficulté contournée, l'épitaxie SiGe remplit correctement les cavités à condition d'avoir une épaisseur de croissance suffisante. Il reste donc un travail autour de l'optimisation des procédés de gravure silicium et d'épitaxie SiGe pour améliorer la qualité des interfaces. Le procédé damascène comporte une réelle limitation dans les rapports d'aspect atteignables pour les guides optiques. Il est impossible de réaliser des guides avec un rapport hauteur/largeur s'approchant de 1 ou le dépassant. Ainsi, des guides carrés ou *slot* ne sont pas faisables avec ce type de technologie, ce qui limite les applications de la plateforme.

4. Mesure de pertes par propagation sur les guides damascènes

Afin d'évaluer le potentiel de la technologie damascène, il est nécessaire de connaître les pertes optiques des guides fabriqués. Les puces ne contiennent que des guides droits ce qui ne permet pas d'utiliser le même type de mesure de pertes par propagation que dans le chapitre III. Parmi les techniques disponibles (rétrodiffusion, *cut-back*, et Fabry-Pérot), la méthode par rétrodiffusion aurait pu être adaptée, au vu de la rugosité constatée sur les flancs des guides. Cependant, cela nécessite une optique d'imagerie de qualité dans le MIR que nous n'avons pas à disposition. Les guides étant courts (0,98 cm), il est très difficile de cliver correctement les puces plusieurs fois pour les raccourcir. La méthode *cut-back* est donc impossible dans la pratique. Ainsi, la méthode adoptée pour la caractérisation de ces guides est la méthode de mesure par résonance de Fabry-Pérot qui présente l'avantage d'être non destructive et relativement simple à mettre en place. Le principe de mesure sera tout d'abord expliquée. Dans un deuxième temps, la découpe et la préparation des échantillons seront exposées. Enfin, le protocole de mesure utilisé sera présenté ainsi que les résultats expérimentaux associés.

4.1. Principe de la mesure de pertes par la méthode Fabry-Pérot

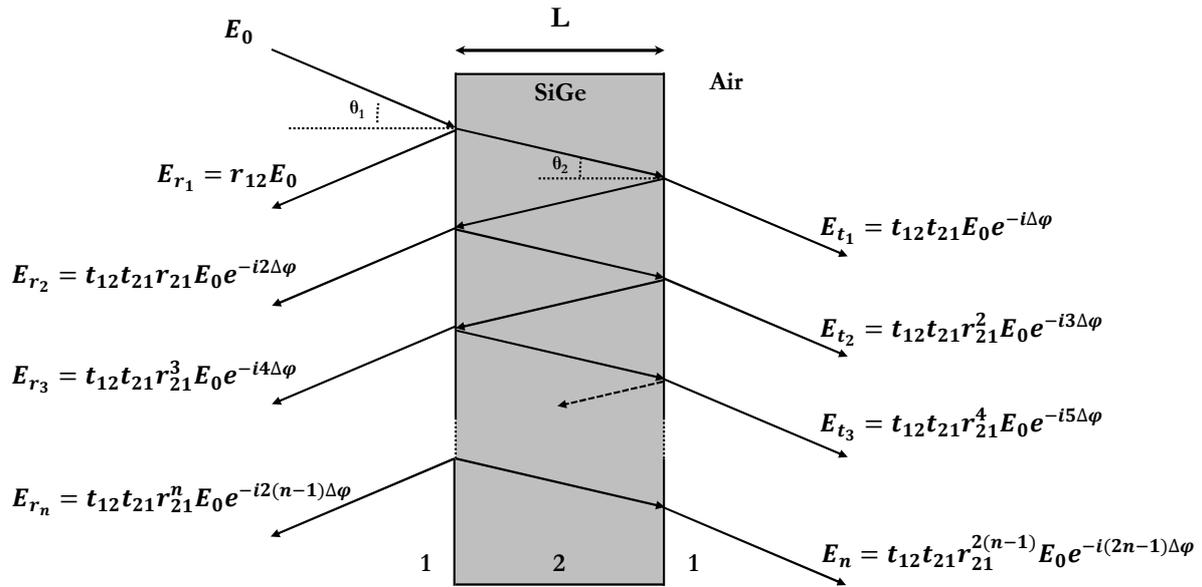


Figure IV-8 : Schéma d'une cavité Fabry-Pérot de longueur \$L\$ formée par un milieu d'indice optique \$n_2\$ et entourée d'un milieu d'indice optique \$n_1\$.

Les guides droits traversant la puce forment des cavités Fabry-Pérot où le corps de la cavité est constitué par le guide ; et où les interfaces air-SiGe à l'entrée et la sortie du guide font office de miroirs semi-réfléchissants. L'injection de la lumière dans le guide se faisant dans l'axe du guide, on ne considérera que le cas où l'angle d'incidence \$\theta\$ est nul. Dans ce cas relativement simple (\$\theta=0\$ et cavité symétrique), l'intensité transmise par un guide droit, s'exprime de la manière suivante [154] :

$$I_t = \frac{(1 - R)^2 e^{-\alpha L}}{(1 - R e^{-\alpha L})^2 + 4 R e^{-\alpha L} \sin^2 \left(\frac{\Delta\varphi}{2} \right)} \cdot I_0 \quad (20)$$

Où, \$R\$ est le coefficient de réflexion en intensité aux interfaces, \$I_0\$ l'intensité lumineuse arrivant sur le guide, \$L\$ la longueur du guide, \$\alpha\$ le coefficient d'absorption en \$\text{cm}^{-1}\$ et \$\Delta\varphi\$ le déphasage entre deux rayons, accumulé lors d'un aller-retour dans la cavité. On remarque immédiatement que l'intensité transmise est minimale lorsque \$\Delta\varphi = 2m\pi, m \in \mathbb{Z}\$ et est maximale lorsque \$\Delta\varphi = (2m + 1)\pi, m \in \mathbb{Z}\$. On définit alors le contraste de la cavité Fabry-Pérot comme étant \$\xi = \frac{I_{max}}{I_{min}}\$ où :

$$\begin{aligned} I_{max} &= \frac{I_0 (1 - R)^2 e^{-\alpha L}}{(1 - R e^{-\alpha L})^2} \\ I_{min} &= \frac{I_0 (1 - R)^2 e^{-\alpha L}}{(1 - R e^{-\alpha L})^2 + 4 R e^{-\alpha L}} \end{aligned} \quad (21)$$

On peut alors écrire :

$$\frac{\sqrt{\xi} - 1}{\sqrt{\xi} + 1} = R e^{-\alpha L} \quad (22)$$

Et donc exprimer α :

$$\alpha = -\frac{1}{L} \ln \left(\frac{1}{R} \frac{\sqrt{\xi} - 1}{\sqrt{\xi} + 1} \right) \quad (23)$$

Une simple mesure du contraste permet de remonter à α si l'on a connaissance de la longueur L et de la réflectivité aux facettes R . La réflectivité aux facettes est extrêmement difficile à évaluer expérimentalement et de nombreux facteurs peuvent la modifier : angle et qualité du polissage, propreté des facettes, etc. N'ayant pas de moyen de la caractériser, celle-ci a été fixée à la valeur théorique d'une réflexion SiGe-Air, soit $R=0,32$. Cette supposition est raisonnable si la qualité optique des facettes est suffisante. La mesure du contraste nécessite que l'on puisse faire varier la valeur du déphasage $\Delta\varphi$ afin de moduler l'intensité en sortie du guide. Plusieurs techniques existent dans la littérature. Il est possible de faire varier la température du guide ce qui entraîne une modification de l'indice des matériaux et donc une modification du déphasage. On peut également faire varier la longueur de la cavité en couplant, en entrée et sortie de puce, des fibres optiques que l'on étire [188]. Cependant, la dépendance de l'efficacité de couplage avec la température est un inconvénient pour la première technique [183]. La deuxième technique est quant à elle relativement lourde à mettre en place expérimentalement. D'autant plus que les fibres adaptées au MIR sont fragiles. Nous avons choisi une méthode simple et très courante dans la littérature, la modulation directe de la longueur d'onde d'émission du laser à l'aide d'une modulation en courant (Figure IV-9).

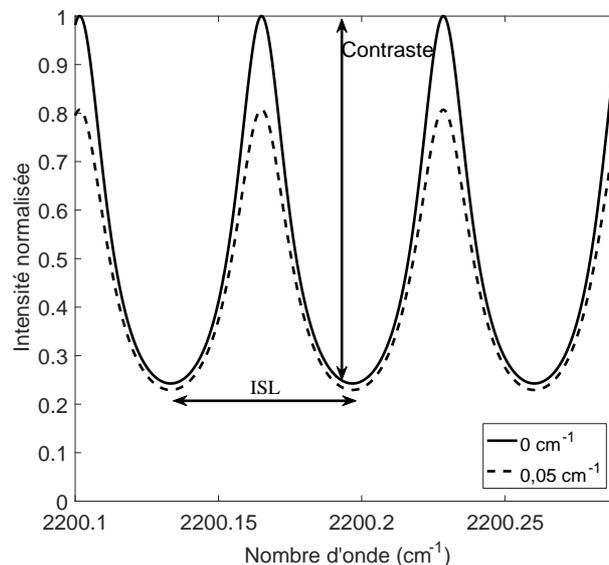


Figure IV-9 : Courbe illustrant l'intensité mesurée en sortie d'une cavité Fabry-Pérot en fonction du nombre d'onde de la source laser et des pertes optiques. La cavité simulée est un barreau de germanium de 2,2 cm de long. Le faisceau arrive parallèle à la normale de la cavité.

4.2. Préparation des échantillons

Une fois la fabrication terminée, les *wafers* ont été découpés sous forme de puce faisant 22 mm x 9,8 mm. La découpe est faite avec la même scie automatique que pour les circuits fabriqués au chapitre III. Le sciage des puces produit des micro-rayures sur les facettes ce qui ne permet pas d'obtenir une qualité optique suffisante pour une injection par la tranche. Les facettes où affleurent les guides ont ensuite été poncées avec un grain de plus en plus fin à l'aide d'une polisseuse

industrielle. Historiquement, ce protocole de préparation des puces a été réalisé avant la préparation des puces du chapitre III. Il s'est avéré que le polissage des puces donne des facettes avec une qualité optique médiocre, ce qui explique notre choix de cliver les puces lors du chapitre III.

4.3. Protocole de mesure

Sur les puces, deux types de guides sont présents : des guides de $1,3 \mu\text{m}$ de haut et des guides de $2,7 \mu\text{m}$ de haut. Les premiers sont conçus pour fonctionner à $\lambda=2,3 \mu\text{m}$ en polarisation TE et les seconds à $\lambda=4,5 \mu\text{m}$ en polarisation TM. Comme nous le verrons par la suite, les guides d'ondes à $\lambda=2,3 \mu\text{m}$ n'ont pas pu être caractérisés. Seul le protocole de mesure avec la source laser ICL Nanoplus, émettant à $\lambda=4546 \text{ nm}$, sera donc présenté. Le banc optique utilisé est exactement le même qu'au chapitre précédent, il ne sera donc pas redécrit ici. La modulation en courant du laser se fait à l'aide d'un GBF délivrant le signal de modulation à l'alimentation laser. Typiquement, le signal est une rampe de fréquence 100 Hz et d'amplitude $1,2 V_{cc}$. Cela correspond à une modulation de $\pm 12 \text{ mA}$ avec le laser polarisé à $I=66 \text{ mA}$. Avant de réaliser la mesure Fabry-Pérot à proprement parler, il est nécessaire d'acquérir une *baseline*, soit l'intensité du laser modulé en l'absence d'échantillon. Le faisceau laser est envoyé à travers les lentilles d'injection et de collection qui sont réglées pour imager le faisceau à l'infini. Le bon alignement des lentilles est vérifié à l'aide de la caméra InSb Xenics. En défocalisant légèrement les lentilles, on s'assure qu'il n'y ait pas d'aberrations optiques et que l'image du faisceau reste toujours concentrique. Cette première étape permet d'aligner correctement l'ensemble des éléments du banc optique. Une fois cela fait, le faisceau est envoyé sur le détecteur rapide Vigo afin d'acquérir la *baseline* à l'aide d'un oscilloscope (Figure IV-10-a). La lentille de collection est ensuite reculée et la puce photonique mise sur le porte-échantillon. Celui-ci permet de bouger la puce afin de changer de guide optique sans toucher à l'alignement du banc. Pour arriver à injecter la lumière dans un guide de la puce, la facette de la puce est imagée à l'aide de la caméra InSb Xenics. On s'assure que le haut de la facette est éclairé par le laser, zone où sont présents les guides optiques. Ensuite, la puce est translaturée horizontalement jusqu'à ce que la lumière soit couplée à un guide. Pour cette étape, il est préférable de faire l'injection de lumière dans un guide large pour faciliter le pré-alignement de la puce. Le faisceau sortant de la lentille de collecte est ensuite redirigé vers le détecteur rapide en plaçant un miroir amovible devant la caméra. Les réglages des micro-positionneurs cinq axes sont alors optimisés pour maximiser le signal optique arrivant sur le détecteur rapide. De même que pour la *baseline*, l'intensité transmise par le guide optique est enregistrée via l'oscilloscope. Le *background* (i.e. signal fourni par le détecteur lorsque la source laser est éteinte) du détecteur est ensuite soustrait de l'ensemble des mesures. La division de l'intensité transmise par la *baseline* permet de s'affranchir de la variation de puissance du laser dû à la modulation. On obtient alors les franges Fabry-Pérot à partir desquelles est mesuré le contraste (Figure IV-10-b).

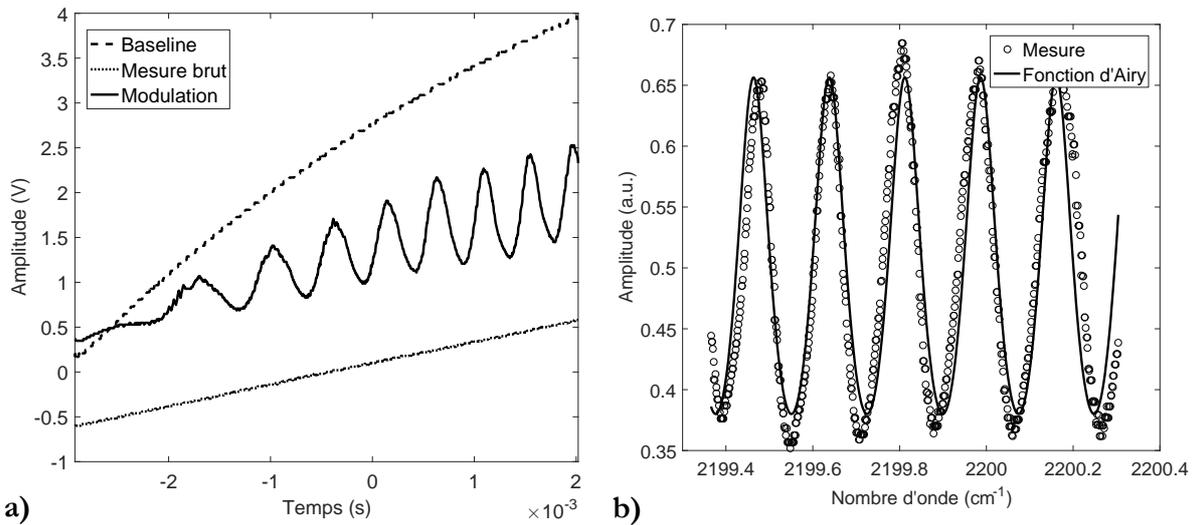


Figure IV-10 : Signaux acquis lors de la caractérisation par méthode Fabry-Pérot. Les données ont été obtenues à partir de la puce 6 avec un guide de $3,6 \mu\text{m}$ de large sans taper. a) Signal de modulation, baseline et intensité transmise par un guide enregistrés à l'oscilloscope. b) Franges Fabry-Pérot obtenues après traitement permettant la mesure de contraste. La fonction d'Airy correspond de façon satisfaisante aux mesures effectuées.

4.4. Résultats obtenus

Quatre puces du même wafer ont été caractérisées et correspondent aux puces 6 à 9 sur la Figure IV-11. Dans la suite, seuls les résultats pour les guides fonctionnant à $\lambda=4,5 \mu\text{m}$ seront présentés. L'injection de lumière n'ayant pas été concluante dans les guides à $\lambda=2,3 \mu\text{m}$. Mis à part la puce 8 où les mesures ont été arrêtées au guide de $3,4 \mu\text{m}$ de large, les mesures pour les autres puces ont été faites pour tous les guides où les pertes étaient mesurables.

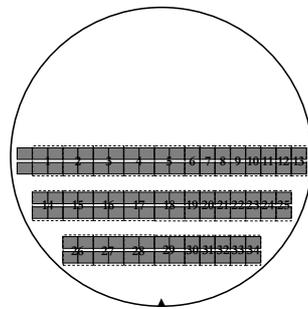


Figure IV-11 : Numérotation des puces sur le wafer. Les carrés gris indiquent les groupes de guides de même hauteur ($1,3 \mu\text{m}$, $2,7 \mu\text{m}$) et les traits en pointillés représentent les lignes de découpes.

D'une manière générale, les pertes par propagation des guides damascènes sont assez élevées et sont comprises entre $-2,4 \text{ dB}\cdot\text{cm}^{-1}$ et $-11 \text{ dB}\cdot\text{cm}^{-1}$ (Figure IV-12). Celles-ci sont à comparer avec les guides fabriqués en technologie standard, où les pertes ne sont seulement que de $-0,3 \text{ dB}\cdot\text{cm}^{-1}$ pour la même longueur d'onde et même polarisation. Des pertes aussi élevées s'expliquent *a priori* par la mauvaise qualité constatée de la gravure silicium. Celle-ci produit des flancs très rugueux. Sachant que les pertes par propagation varient au carré de la rugosité RMS [189], la qualité des interfaces est sûrement la cause principale d'une augmentation des pertes par propagation entre les deux technologies. Tous les guides n'ont pas pu être mesurés à cause d'une augmentation très importante des pertes par propagation en dessous d'une certaine largeur du guide. Les pertes augmentent très significativement pour le dernier guide où la transmission de lumière est encore possible. Pour les puces 6 et 9, à partir de $w=2,6 \mu\text{m}$, les pertes passent brutalement de $-3,9 \text{ dB}\cdot\text{cm}^{-1}$

¹ en moyenne à $-10,5 \text{ dB.cm}^{-1}$. Pour la puce 7, c'est à partir de $w=2,8 \mu\text{m}$ où les pertes passent de $-4,7 \text{ dB.cm}^{-1}$ à -11 dB.cm^{-1} . Cette augmentation brutale correspond à la formation des *voids* au milieu des guides, observée lors de la fabrication. Il est intéressant de voir que malgré la présence de *voids* relativement important (environ 2 % de la section du guide), les guides assurent toujours une fonction de guidage, bien qu'avec des pertes de l'ordre de $10 - 11 \text{ dB.cm}^{-1}$. Enfin, il est assez difficile de dégager une tendance globale des pertes par propagation en fonction des dimensions des guides. On aurait pu s'attendre à voir les pertes augmenter au fur et à mesure de la diminution de la largeur du guide, l'intensité du champ au niveau de l'interface étant de plus en plus forte à mesure que le guide s'amincit. Or, les mesures sont très dispersées de guide à guide et de puce à puce. Seul le guide de $15 \mu\text{m}$ de large présente des pertes constantes pour les quatre puces. Ce guide est d'ailleurs théoriquement multimode et les franges Fabry-Pérot devraient être distordues du fait de la superposition de plusieurs ordres d'interférences dans la cavité [154]. Cependant, ce n'est pas le cas expérimentalement suggérant que seul le mode fondamental ait été excité expérimentalement. Pour conclure, la forte dispersion des mesures vient de la faible qualité optique des facettes. Le polissage effectué a laissé de multiples micro-rayures sur les facettes des guides ayant deux conséquences. La première est que la réflectivité réelle des facettes est plus faible que celle supposée. Le contraste mesuré est donc sous-estimé ce qui surestime les pertes par propagation. La deuxième est que les rayures introduisent une variation de la réflectivité entre deux guides, donc une erreur aléatoire supplémentaire sur la mesure de pertes. D'où une forte dispersion des valeurs de pertes entre deux puces, mais également entre deux guides d'une même puce. Sur une même puce, les pertes mesurées peuvent différer jusqu'à un facteur trois pour deux guides de même largeur, dont la seule différence est la présence d'un *taper*.

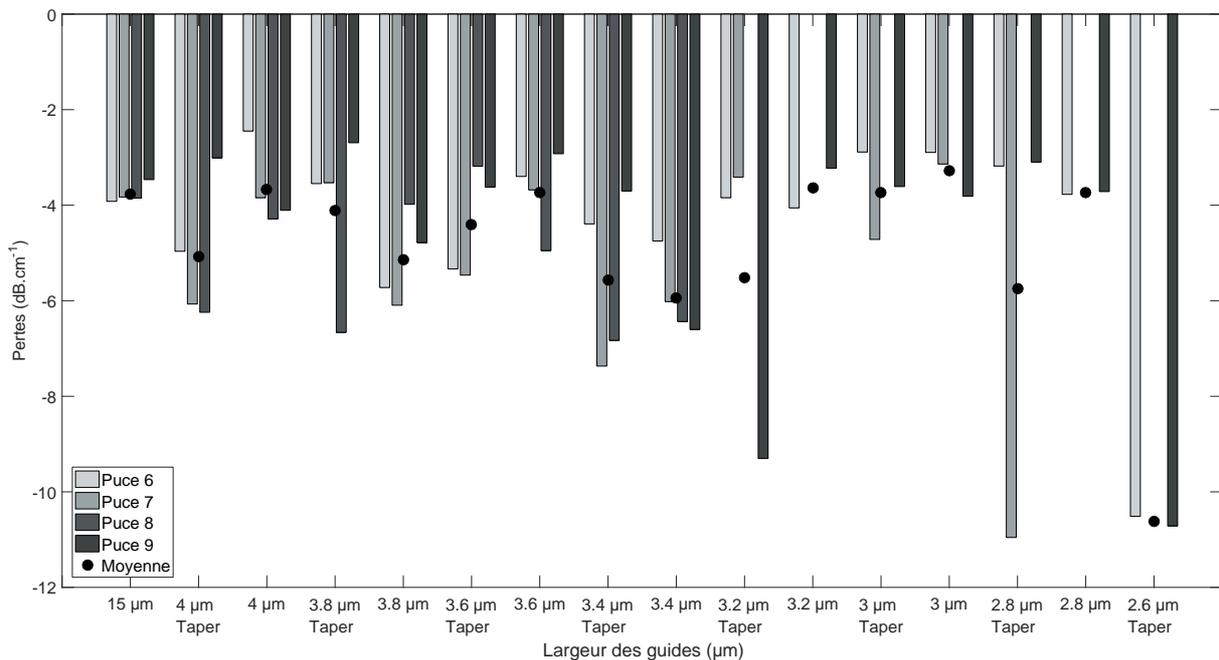


Figure IV-12 : Pertes par propagation des guides mesurées par méthode Fabry-Pérot et calculées à l'aide du contraste des franges d'interférence.

4.5. Conclusion

Des puces photoniques contenant des guides droits de différentes largeurs ont été fabriqués pour évaluer la viabilité de la technologie de fabrication damascène. Cette technique consiste à d'abord graver des tranchées dans le substrat silicium qui seront ensuite remplies par une épitaxie SiGe. Cette technique de fabrication présente l'avantage de co-intégrer des guides monomodes capables

de véhiculer des longueurs d'ondes très différentes sur une même puce. Les puces fabriquées dans cette thèse comportent des jeux de guides droits conçus pour les longueurs d'onde de $\lambda=2,3 \mu\text{m}$ TE et $\lambda=4,5 \mu\text{m}$ TM. L'évaluation des pertes par propagation de ces guides a été faite à l'aide de la méthode par résonance Fabry-Pérot. Les guides à $\lambda=2,3 \mu\text{m}$ n'ont pas pu être caractérisés car l'injection de la lumière dans les guides n'a pas été observée. Pour les guides à $\lambda=4,5 \mu\text{m}$, les valeurs de pertes mesurées sont très dispersées et sont comprises entre $-2,4 \text{ dB.cm}^{-1}$ et -11 dB.cm^{-1} . La présence de micro-rayures sur les facettes des guides introduit une surestimation des pertes par propagation mesurées, ainsi qu'une erreur de phase aléatoire entre deux guides, expliquant la forte dispersion des mesures. L'augmentation brutale des pertes en dessous d'une largeur de $2,6\text{-}2,8 \mu\text{m}$ correspond à l'apparition de *voids* au milieu des guides. Les guides sans *voids* ayant les dimensions les plus proches des guides à gradient d'indice présentent des pertes 3 à 5 fois supérieures que ces derniers. Cela s'explique *a priori* par une rugosité plus importante des flancs dû à la gravure silicium. Dans l'état actuel, la technologie damascène est donc moins performante que la technologie de guide à gradient d'indice. Les rapports de forme atteignables sont limités et les pertes par propagation sont au minimum trois fois supérieures.

5. Conclusion

La nécessité de fabriquer des PIC multi- λ pour certaines applications, en particulier la détection de gaz, nous a amené à explorer des techniques de fabrication alternatives capables de fabriquer sur une même puce des guides aux dimensions très différentes. La technique évaluée lors de ce chapitre est une adaptation du procédé damascène pour la fabrication de guide SiGe à saut d'indice. Le lot d'essai fabriqué en salle blanche sur *wafers* 200 mm a permis de révéler les limitations de ce type de procédé. Le résultat majeur étant que l'on ne peut fabriquer des guides avec un rapport d'aspect hauteur/largeur égale ou supérieure à 1. Les guides carrés très faibles pertes démontrés au chapitre précédent ne sont donc pas manufacturables avec cette technologie. Les mesures par résonance Fabry-Pérot ont révélé des pertes par propagation particulièrement élevées, supérieures à -4 dB.cm^{-1} en moyenne sur l'ensemble des guides de $2,7 \mu\text{m}$ de haut à $\lambda=4,5 \mu\text{m}$. L'impossibilité d'injecter la lumière dans les guides de $1,3 \mu\text{m}$ de haut et à $\lambda=2,3 \mu\text{m}$, suggère des pertes au moins supérieures à -11 dB.cm^{-1} . Sans doute, cela est-ce le fait de la rugosité importante des flancs dont l'impact sera plus important pour des petites longueurs d'onde. Dans l'état actuelle de notre développement, la technologie damascène semble donc peu prometteuse, en particulier à cause des limitations de rapports d'aspect atteignables.

Chapitre V- Conception de réseaux de couplage pour le moyen infrarouge sur plateforme silicium

Il a désormais été démontré expérimentalement que la plateforme SiGe pouvait être viable pour des applications de photonique MIR. Elles présentent des caractéristiques de compacité et de pertes par propagation à l'état de l'art mondial. Pour développer cette plateforme dans le cadre de recherche technologique, il est nécessaire de pouvoir multiplier les mesures afin d'accéder à des données statistiques des performances des puces fabriquées sur l'ensemble du *wafers*. Les techniques de couplage par la tranche utilisées dans ce manuscrit sont des procédés longs et fastidieux qui, dans la pratique, ne permettent pas de connaître finement les caractéristiques des puces d'un ou plusieurs *wafers*. Pour résoudre cette difficulté technique, nous avons exploré le développement de réseau de couplage sur plateforme SiGe. Dans un premier temps, nous reviendrons sur les techniques de couplage, leurs différences et en quoi il est justifié de développer des réseaux de couplage pour faire du test statistique. Ensuite, le comportement théorique des réseaux sera détaillé ainsi que la modélisation numérique adoptée. Tout ceci, nous permettra d'aborder la conception de réseaux de couplage dans le SWIR et le MWIR à l'aide d'outils numériques d'optimisation globale.

1. Coupler la lumière dans la puce

Dans les chapitres précédents, nous avons pu constater l'importance cruciale d'avoir des interfaces d'entrées-sorties du circuit dotées d'une bonne qualité optique. Elles peuvent être sources de pertes non désirées (réflexion, diffraction, etc.) et conditionnent le taux de puissance optique que l'on pourra injecter dans le circuit. Jusqu'ici, seule la technique du couplage par la tranche a été utilisée. Cependant d'autres techniques existent pour faire le lien entre l'espace libre ou une fibre optique et un PIC. Celles-ci se distinguent en deux familles : les techniques de couplage par la tranche, utilisées précédemment, et les techniques de couplage surfacique (Figure V-1). Les premières utilisent l'illumination directe de la section du guide en utilisant ou non une optique de mise en forme du faisceau. Elles ont le désavantage d'exciter l'ensemble des modes optiques supporté par la structure guidante. Les secondes consistent à éclairer la surface d'un guide à un angle spécifique. Elles exploitent des phénomènes d'accord de phase qui permettent de choisir le mode auquel on désire transférer la puissance optique. L'accord de phase se fait via un élément optique permettant de « casser » le confinement imposé par le guide. Deux éléments sont principalement utilisés : le prisme et le réseau. Le prisme est un bloc taillé d'un même matériau comprenant trois faces sur une base triangulaire. Pour que le couplage entre le faisceau traversant le prisme et le mode guidé puisse se faire, il est nécessaire que le prisme soit fait d'un matériau dont l'indice optique est supérieur au cœur du guide. Dans le cadre de ces travaux, le cœur des guides est composé d'un alliage de germanium, matériau ayant l'indice optique le plus élevé à l'état naturel. Le couplage par prisme n'est donc pas possible, ce qui fait qu'il ne sera pas abordé dans ce chapitre. Il a également le désavantage d'obliger à mettre en contact un élément d'optique avec la surface des guides, ce qui à terme peut poser des problèmes de dégradation de leur surface.

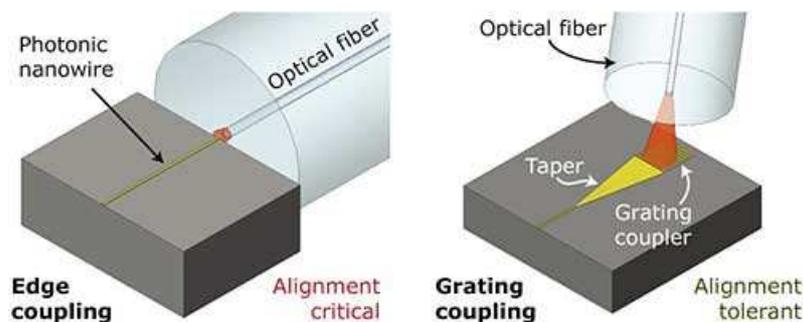


Figure V-1 : Schéma des deux principales techniques de couplage en optique intégrée. A gauche, le couplage par la tranche où un faisceau (ici amené par une fibre) éclaire la section du guide optique. A droite, un couplage surfacique où un faisceau (également mis en forme par une fibre dans cet exemple) éclaire la surface de la puce. Un élément optique (ici un réseau) permet de rediriger la lumière dans le guide (Source : KTH [190]).

1.1. Couplage par la tranche : butt-coupling et end-fire coupling

Le couplage par la tranche est la méthode la plus intuitive conceptuellement. Elle consiste à illuminer directement l'entrée du guide avec une source de lumière. Le faisceau peut directement sortir d'une fibre, on parle alors de *butt-coupling*, ou être focalisé par un système de lentille, on parle alors d'*end-fire coupling* [154]. Le pourcentage de lumière entrant dans le guide est déterminé par la réflexion de Fresnel subit à la facette d'entrée et le taux de recouvrement entre le champ d'excitation et les différents modes guidés. Dans la pratique, la qualité optique de la facette du guide est également très importante pour éviter tout phénomène de diffraction. Considérons les guides caractérisés au chapitre III qui présentent une section de $2,7 \times 2,7 \mu\text{m}^2$ en $\text{Si}_{0,6}\text{Ge}_{0,4}$ enterrée dans le Si et sont utilisés en polarisation TM. A l'aide d'un solveur de mode 2D, il est possible de

déterminer le diamètre théorique du mode TM₀ qui est de 3,35 μm. Le diamètre du mode (MFD : *Mode Field Diameter*) est, dans une approximation gaussienne, défini comme la largeur à 1/e du profil de champ électrique (*i.e.* et à 1/e² du profil d'intensité). On cherche à injecter la lumière venant d'une fibre monomode vers ce guide. Les fibres travaillant dans le MIR ont un MFD de l'ordre de 12 μm, il varie de 8 à 14 μm suivant le type de fibre et la longueur d'onde. Si l'on considère que l'on peut décrire les modes en présence par des gaussiennes telles que :

$$\begin{aligned} E_{guide} &= \exp\left[-\left(\frac{x^2}{\omega_x^2} + \frac{y^2}{\omega_y^2}\right)\right] \\ E_{fibre} &= \exp\left[-\frac{(x^2 + y^2)}{\omega_0^2}\right] \end{aligned} \quad (24)$$

On peut alors exprimer l'efficacité de couplage de la fibre vers le guide de la manière suivante [154] :

$$\Gamma^2 = \frac{\frac{4}{\omega_0^2} \left[\frac{1}{\omega_x \omega_y} \right]}{\left[\frac{1}{\omega_x^2} + \frac{1}{\omega_0^2} \right] \left[\frac{1}{\omega_y^2} + \frac{1}{\omega_0^2} \right]} \quad (25)$$

A noter que l'équation (25) ne prend pas en compte la réflexion aux facettes mais seulement les pertes dues au *mode mismatch*, c'est-à-dire dues à la différence de forme entre les profils de champs. Pour un guide SiGe, les pertes purement dues au *mode mismatch* sont de -5,8 dB, sans compter les pertes par réflexion de l'ordre de -1,7 dB. A titre de comparaison, les pertes pour un guide SOI 300 x 400 nm² sont de l'ordre de -21 dB.

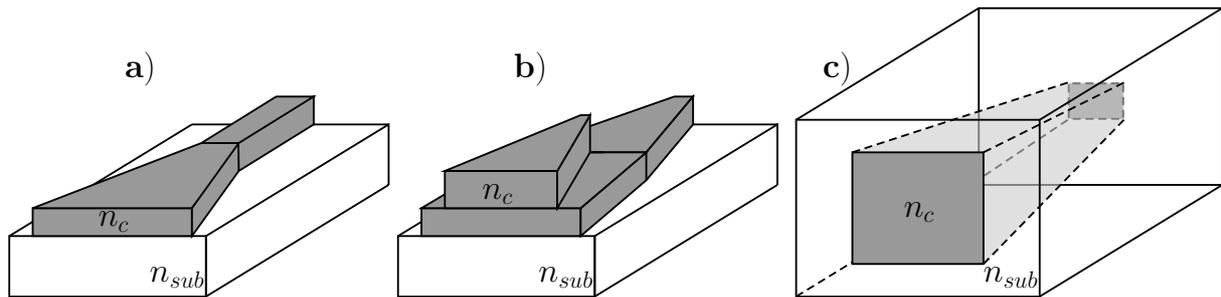


Figure V-2 : Schéma de trois types de taper en ordre croissant de complexité de fabrication. a) Taper planaire, les dimensions du guide ne change que dans le plan. b) Taper à deux étages définis par une double gravure. c) Taper 3D, les dimensions du guide changent de façon continue dans les deux plans X et Y.

On constate ici que la grande différence de dimensions entre le mode de fibre et le mode fondamental du circuit intégré implique d'importantes pertes aux interfaces. Afin de pallier à cela, le recours à un *taper* permet d'adapter la taille du mode et minimiser le *mode mismatch*. Le *taper* est un guide dont la distribution d'indice n(x,y) change progressivement le long de l'axe de propagation z. Cela se fait généralement en changeant la géométrie du guide. Les géométries de taper sont nombreuses et varient en fonction de la méthode de fabrication. Cela va du cas simple du *taper* planaire [191] jusqu'au taper 3D [192] en passant par des géométries intermédiaires [193]

permettant de faire varier l'indice dans une ou plusieurs directions (Figure V-2). Cette modification de la distribution d'indice permet de changer la distribution des champs électromagnétiques du mode guidée le long du guide. Si le changement de la forme du guide est suffisamment lent selon la direction de propagation, la conversion du mode entre le début et la fin du *taper* se fait sans perte. On parle alors de *taper* adiabatique. On peut ainsi adapter la taille du mode au faisceau d'injection pour obtenir un meilleur recouvrement des champs et donc une meilleure efficacité de couplage. La solution la plus simple est d'élargir les guides d'entrées-sorties afin de maximiser le recouvrement dans la direction y . On réduit ainsi facilement les pertes par *mode mismatch* de -5,8 dB à -2,9 dB (Figure V-3). En pratique, les pertes totales de couplage en photonique télécom entre une fibre et un guide sont de l'ordre de -7 dB avec un *taper* simple et de -1,5 dB avec un *taper* à double étage [194]. Il est également possible d'élargir le mode en affinant fortement le guide d'onde [191]. En dessous d'une largeur donnée, le mode optique se délocalisera et la majorité de l'énergie sera transportée dans la gaine et non le cœur. De cette manière, on peut s'affranchir presque totalement des pertes par *mode mismatch*. Seules les pertes par réflexion subsistent.

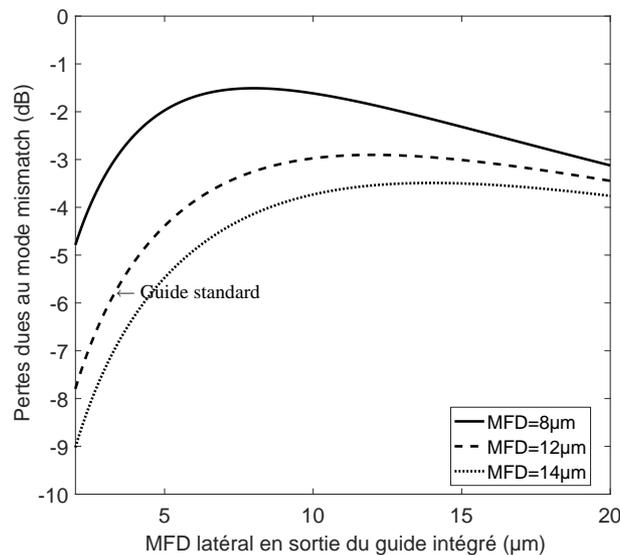


Figure V-3 : Pertes dues au mode mismatch entre un guide SiGe et une fibre MIR en fonction du MFD en sortie de puce pour différentes tailles de mode de fibre (8, 12 et 14 μm).

1.2. Couplage surfacique par réseau

Les réseaux permettent de faire un couplage dit surfacique. On ne vient plus éclairer la tranche du guide mais un côté du guide, usuellement la gaine supérieure, afin d'injecter la lumière à l'intérieur du guide. Cependant pour que la lumière rentre effectivement dans le guide il faut satisfaire la condition de phase suivante :

$$k_{inc} = \beta \quad (26)$$

Où k_{inc} est la composante selon z du vecteur d'onde du champ incident et β est le vecteur d'onde du mode guidée auquel on souhaite se coupler. Or, on sait que la théorie des modes guidées impose que $\beta > k_{inc}$. Dans ces conditions il n'est *a priori* pas possible de faire un couplage surfacique, d'où l'intérêt du réseau de couplage. Un réseau est une structure périodique dont l'indice optique varie dans une ou plusieurs directions. La variation périodique de l'indice optique apportée par le réseau se traduit par l'introduction d'un vecteur d'onde k_g dans la relation reliant le champ incident et le

champ diffracté. Dans le cas d'un réseau unidimensionnel, la relation de Snell-Descartes devient alors :

$$k_z = k_{inc} + k_r \quad (27)$$

Où k_z est le vecteur d'onde du champ diffracté, k_{inc} celui du champ incident et k_r celui introduit par la perturbation du réseau. La relation (27) est connue sous le nom de condition de Bragg. La valeur du vecteur k_r est inversement proportionnelle à la période du réseau. En choisissant judicieusement la valeur de la période du réseau, la lumière éclairant le guide peut venir se coupler au mode choisi dans le guide d'onde. Inversement, un mode se propageant dans le guide pourra être découplé et extrait du guide dans la direction voulue. Intégré à un guide d'onde, le réseau de couplage constitue un composant performant d'entrée-sortie. Comme pour le paragraphe précédent, il est usuellement conçu pour faire l'interface avec une fibre optique. Contrairement au couplage par la tranche, il est difficile de prédire, avec un calcul simple, des performances pour un réseau de couplage intégré à un guide SiGe et aucun réseau n'ont encore été intégrés à ces guides. En revanche, il est possible d'avoir un point de comparaison avec la photonique sur SOI. Les efficacités de couplage expérimentales sont légèrement supérieures à celles des coupleurs par la tranche. Les pertes par couplage sont de l'ordre de -4,5 dB pour des réseaux simples [195] mais peuvent descendre jusqu'à -0,58 dB [196] avec une conception plus avancée.

1.3. Conclusion

Comme nous venons de le voir, la difficulté première de l'optique intégrée sur silicium est de convertir un mode de fibre, ou un mode de propagation de faisceau laser, en mode guidé sur puce. Les deux techniques présentées sont capables d'atteindre des efficacités de couplage relativement identiques. Dans ce cas, laquelle choisir et selon quel critère ? Si l'on regarde ce qui a été fait en photonique sur silicium pour les télécoms, plusieurs facteurs sont à prendre en compte en plus des pertes de couplage : la bande passante, la tolérance d'alignement, la facilité d'utilisation et la flexibilité apportée dans le *design*. Pour le premier critère, le couplage par la tranche est clairement gagnant car c'est la fibre optique qui sera limitante spectralement. La bande passante du réseau est très faible en comparaison. En revanche, le réseau présente des tolérances d'alignement relaxées sur plateforme SOI ($\pm 2 \mu\text{m}$ au lieu de $\pm 0,3 \mu\text{m}$ pour un couplage par la tranche). Il n'y a pour l'instant aucune donnée expérimentale pour la plateforme SiGe mais les dimensions des guides étant plus importantes, la différence de tolérance d'alignement entre réseau et couplage par la tranche devrait être moins importante. Enfin, c'est le dernier critère énoncé qui retient notre attention. Le couplage par la tranche nécessite de découper et polir les puces une à une avant de pouvoir les caractériser. Le couplage par la tranche demande donc une préparation engendrant à la fois un coût supplémentaire mais également un aléa additionnel sur les performances des composants d'entrées-sorties. Il demande aussi à ce que l'ensemble des entrées-sorties de la puce soient mises en bord de puce pour être accessibles. A contrario, le réseau de couplage peut être placé n'importe où sur la puce et l'on peut caractériser les puces à même le *wafers*. Cela permet, d'une part, de bien mieux exploiter l'espace alloué sur chaque puce au moment de la conception. D'autre part, cela permet de faire du test statistique (Figure V-4) sur l'ensemble d'un *wafers* (*i.e. wafers-level testing*) à l'aide d'un testeur automatisé (*i.e. prober*). Ce dernier avantage est crucial car l'automatisation des tests permet d'accéder à une connaissance fine de sa plateforme technologique. Il devient possible de corrélérer la dispersion des caractéristiques des circuits avec la dispersion de fabrication entre deux *wafers* ou même entre deux puces du même *wafers*. Or le développement d'une plateforme photonique passe par une connaissance fine de ses performances et de l'impact des procédés de

fabrication sur celles-ci afin de connaître les limitations intrinsèques de la plateforme. Notre objectif étant de développer une plateforme technologique potentiellement industrialisable, le test statistique au niveau même du *wafers* est indispensable à moyen terme. Le choix de développer des réseaux de couplage par fibre est donc tout à fait justifié.

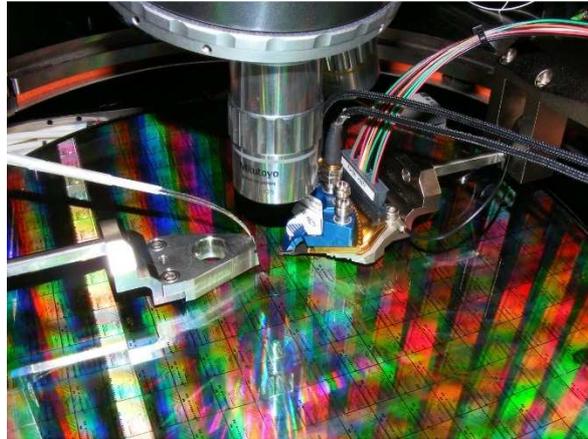


Figure V-4 : Test automatisé sur wafer de modulateurs électro-optiques réalisés sur plateforme SOI 200 mm au CEA-Léti.

A ce jour, peu de travaux ont été publiés sur l'étude des réseaux de couplage dans l'infrarouge, et ce quelle que soit la plateforme technologique utilisée (Tableau V-1). Quelques résultats ont été rapportés sur plateforme SOI mais dans le domaine du SWIR [197] [126] (2,1 et 2,75 μm) et seront limités par l'absorption de la silice pour une montée en longueur d'onde vers le MWIR. Pour éviter l'absorption du SiO_2 , *Cheng et al.* ont fabriqué des réseaux de couplage ainsi qu'un guide suspendu sur plateforme SOI [126]. Cependant cela semble difficile de réaliser un circuit entier avec des structures suspendues. Des problèmes de tenues mécaniques risquent d'apparaître, notamment avec certains composants dont la densité de motifs est très importante. Une plateforme plus couramment utilisée pour le moyen-infrarouge est le silicium sur saphir (SOS : *Silicon-On-Sapphire*) où des réseaux avec une efficacité de couplage élevée ont été démontrés à 2,75 [198] [199], 3,4 [200] et 4,5 μm [201]. Cependant le SOS n'est pas standard dans les fonderies CMOS de par son substrat en saphir et sa petite taille limitée à 100 mm de diamètre. La salle blanche du CEA-Léti ne travaille que sur des *wafers* de 200 mm ou 300 mm. Le seul résultat expérimental rapporté sur une plateforme à base de germanium a été fait par l'équipe de *Nedeljkovic et al.* [144] en 2015. Les réseaux sont gravés directement sur des guides *strip* en Ge sur Si. L'efficacité de couplage fibre à puce obtenu est de 3,2 % (*i.e.* -14,9 dB) à une longueur d'onde de $\lambda=3,8 \mu\text{m}$. On constate donc que peu de travaux ont été réalisés et que le développement de réseaux de couplage dans le MIR reste un sujet à explorer.

| Plateforme | Type de réseau | Longueur d'onde centrale (μm) | Efficacité de couplage | Polarisation |
|------------|---|--|------------------------|--------------|
| SOI [197] | Gravure partielle | 2,1 | 41,7 % | TE |
| SOI [126] | Sub-longueur d'onde suspendu | 2,75 | 24,7 % | TE |
| SOS [198] | Gravure partielle / Sub-longueur d'onde | 2,75 | 32,6 % / 11,6 % | TE / TM |
| SOS [199] | Gravure partielle | 2.75 | 27 % | NC |

| | | | | |
|-------------|---------------------|-----|-------|----|
| SOS [201] | Sub-longueur d'onde | 3,4 | 29 % | TE |
| SOS [200] | Gravure totale | 4,5 | NC | NC |
| Ge/Si [144] | Gravure totale | 3.8 | 3.2 % | TE |

Tableau V-1: Etat de l'art des réseaux de couplage dans le proche et moyen-infrarouge utilisés en tant qu'interconnexion fibre-puce.

2. Modélisation des réseaux de couplage

2.1. Théorie des réseaux de couplage

2.1.1. Géométrie et figures de mérite en photonique silicium

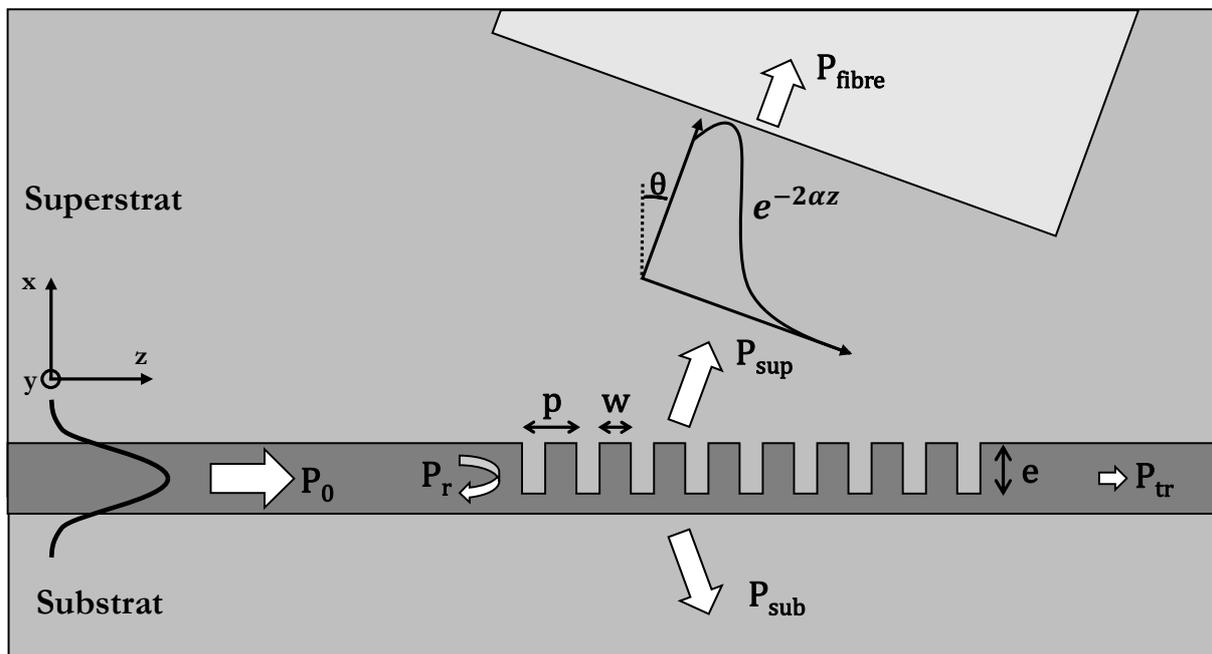


Figure V-5 : Schéma de fonctionnement d'un réseau couplage intégré dans un guide optique avec ses principaux paramètres géométriques.

Dans ce manuscrit le réseau de couplage est utilisé comme interface d'entrée-sortie entre un circuit intégré et une fibre optique, la plupart du temps monomode. Il se caractérise par une variation périodique de l'indice optique dans une ou plusieurs directions. Cette variation permet de briser le confinement optique et autorise sous certaines conditions le couplage entre le mode de fibre et un mode choisi du guide optique sur puce. En optique intégrée, la corrugation de l'indice définissant le réseau s'obtient généralement par gravure directe du guide. La gravure peut-être aussi bien partielle que totale. Géométriquement, le réseau se définit par sa période p , sa profondeur de gravure e et son facteur de remplissage $ff = w/p$, que l'on retrouve sous le terme de *fillfactor* dans la littérature. Considérons un mode optique se propageant dans le guide sur puce avec une puissance P_0 et arrivant sur le réseau (Figure V-5). Le réseau constituant une perturbation, une part P_r de la puissance initiale peut être réfléchi. Au fur et à mesure de l'avancé du mode à travers le réseau, celui-ci est découplé vers le superstrat et vers le substrat avec un angle θ par rapport à la normale du réseau. Le long du réseau la puissance optique diminue exponentiellement telle que :

$$P_g(z) = P_0 \cdot e^{-2\alpha z} \quad (28)$$

Le coefficient 2α est appelé force de couplage du réseau. Il caractérise la capacité à extraire, ou injecter, de la lumière par le réseau. A partir de cette notion on peut également définir la distance de couplage $L_c = (2\alpha)^{-1}$. Comme tout problème de physique, la description du réseau de couplage n'échappe pas à la conservation de l'énergie. Ainsi la part P_{tr} de la puissance optique initiale qui n'a été ni diffractée ni réfléchi est transmise par le réseau. Enfin, la lumière qui a été découplée vers le superstrat va rencontrer la fibre optique et rentrer à l'intérieur. Cependant, la transmission n'est que rarement de 100 % et dans un cas général $P_{fibre} \leq P_{sup}$. Ces premières notions permettent de définir des figures de mérite caractérisant les réseaux de couplage. Celles-ci permettent de quantifier les performances et de discriminer objectivement une configuration par rapport à une autre. On définit usuellement [202] :

1. La directionnalité : traduit littéralement de l'anglais, elle désigne le ratio de puissance diffractée vers le superstrat sur la totalité de la puissance diffractée par le réseau. Elle s'écrit : $\frac{P_{sup}}{P_{sup}+P_{sub}}$.
2. L'efficacité de couplage : est le pourcentage de puissance passant du guide dans la fibre (et vice-versa). Elle s'écrit $\eta = \frac{P_{fibre}}{P_{guide}}$. Du point de vu de l'ingénieur système, elle peut être considéré comme une perte d'interface entre la fibre et le circuit. On parlera alors de pertes d'insertion et celles-ci seront exprimées en dB.
3. La bande passante : Elle est l'intervalle de longueur d'onde pour lequel le réseau est capable de coupler un minimum de puissance optique. Elle est usuellement donnée pour une perte additionnelle de -1 dB ou -3 dB par rapport au pic d'efficacité.
4. Pertes de pénétration : désigne le ratio entre la puissance diffractée vers le substrat P_{sub} , qui peut être considéré comme une perte sèche du système, et la puissance initiale P_0 .
5. Pertes par réflexion : désigne le ratio entre la puissance réfléchi P_r et le puissance initiale P_0 .

Dans la suite, la description du réseau de couplage se fera majoritairement dans le cas où le réseau est utilisé en tant qu'interface de sortie, soit dans le cas où l'onde incidente est un mode optique guidé découplé vers une fibre de collecte (Figure V-5). Cette description n'est en rien restrictive car il y a équivalence mathématique entre le problème de couplage et le problème de découplage [203]. Le taux de puissance transmise entre la fibre et le guide est donc identique dans un sens comme dans l'autre. Les trois paramètres géométriques (p, ff, e) définis plus haut régissent le fonctionnement du réseau. En particulier, ce sont eux qui permettent, ou non, l'accord de phase.

2.1.2. Condition de Bragg

Une des lois fondamentales décrivant le comportement des structures périodiques est la condition de Bragg, appelée également loi de Bragg. Elle régit la relation entre des vecteurs d'onde des champs incidents sur le réseau et diffractés par celui-ci. La loi de Bragg a déjà été évoquée au paragraphe 1.2 et nous allons la détailler plus précisément dans le cas des réseaux de couplage pour l'optique intégrée. Considérons le cas d'une structure périodique 1D à l'interface entre deux matériaux d'indice optique n_{sup} et n_{sub} , telle que $n_{sup} < n_{sub}$. Une onde électromagnétique arrivant sur la structure, avec un vecteur d'onde dont la composante selon z est k_{inc} , sera diffractée en suivant la loi de Bragg, autrement dit la relation de Snell-Descartes modifiée par la présence du réseau :

$$k_z = k_{inc} + m \frac{2\pi}{p}, m \in \mathbb{Z}^* \quad (29)$$

Où, si l'on reprend l'équation (27), le vecteur d'onde introduit par la structure périodique est égal à $k_r = m \cdot 2\pi/p$ avec p la période. L'équation (29) peut se vérifier pour des multiples de k_r en fonction de la valeur de la période et de celle du vecteur d'onde du champ incident. Le réseau présente alors plusieurs directions de diffraction que l'on appelle ordres de diffraction du réseau (Figure V-6a).

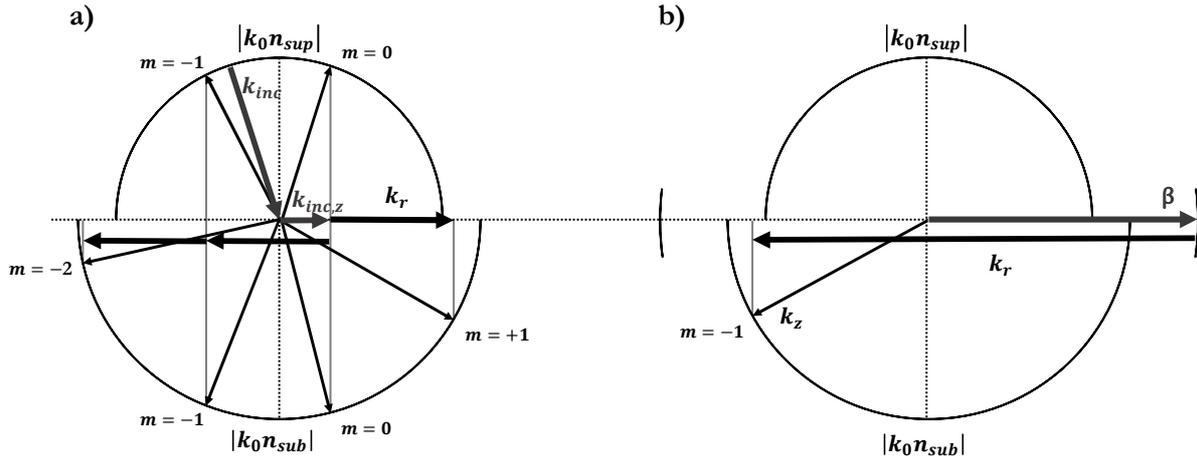


Figure V-6 : Diagramme de vecteur d'onde a) pour le cas général d'un réseau et b) pour le cas d'un réseau de couplage dit de premier ordre en photonique sur silicium.

Dans le cas particulier d'un réseau de couplage en photonique sur silicium, l'onde incidente est le mode se propageant dans le guide, la condition de Bragg s'écrit alors :

$$k_z = \beta + m \frac{2\pi}{p}, m \in \mathbb{Z}^* \quad (30)$$

$$k_0 n_{sup} \sin \theta = k_0 n_{eff} + m \frac{2\pi}{p}, m \in \mathbb{Z}^*$$

Avec k_0 le vecteur d'onde dans le vide et θ l'angle de couplage par rapport à la normale du réseau (Figure V-5). Cependant cette formule n'est exacte que pour des réseaux faiblement perturbatifs où le facteur de remplissage est proche de 1. Dans le cas où cette condition n'est plus vérifiée, il est nécessaire de considérer la véritable onde incidente, soit le mode se propageant dans la structure périodique. L'équation (30) doit alors être corrigée en changeant la valeur de l'indice effectif dans la constante de propagation β . Celui-ci s'exprime alors de la manière suivante :

$$n_{eff} = ff \cdot n_{eff1} + (1 - ff) \cdot n_{eff2} \quad (31)$$

Où n_{eff1} est l'indice effectif du mode existant dans les portions non gravées du guide, et n_{eff2} l'indice effectif du mode existant dans les portions gravées du guide. Dans le cadre de la photonique sur silicium, les réseaux de couplage sont généralement des réseaux dit de premier ordre ne

présentant qu'un seul ordre de diffraction (Figure V-6b). Cela oblige à ce que la fibre soit légèrement inclinée d'un angle θ par rapport à la normale au réseau. Il est à noter que la condition de Bragg n'est strictement exacte que pour des réseaux infinis. Pour un réseau fini, la diffraction se fera selon un petit intervalle autour de la valeur de k_z prédite par la condition de Bragg. Cet intervalle de direction se traduit par un intervalle de longueur d'onde pour lequel le couplage est possible. Autrement dit c'est ce que l'on appelle la bande passante du réseau.

2.1.3. Limitations de l'efficacité de couplage

L'efficacité de couplage est intrinsèquement limitée par certaines propriétés des réseaux. Notamment si l'on considère des arguments de symétrie. Dans le cas d'un couplage vertical (Figure V-7a), la structure présente une symétrie horizontale. De ce fait, la lumière venant de la fibre se couplera à 50 % vers la droite et à 50 % vers la gauche. 50 % de la lumière est donc perdue. Si l'on veut aller au-delà d'une efficacité de couplage de 50 %, il est nécessaire de casser la symétrie. C'est ce qui est usuellement fait dans la littérature avec un angle de couplage différent de zéro [204] ou en utilisant un réseau asymétrique [205]. Cependant, un réseau avec un angle de couplage non nulle peut présenter une autre symétrie, une symétrie verticale (Figure V-7b). C'est le cas si le réseau présente une gravure totale, et que $n_{sup} = n_{sub}$, ou au contraire si la profondeur de gravure est petite devant l'épaisseur du guide. Cette dernière configuration est assez courante en pratique. Il est donc *a priori* difficile d'avoir un réseau avec une efficacité de couplage supérieure à 50 %.

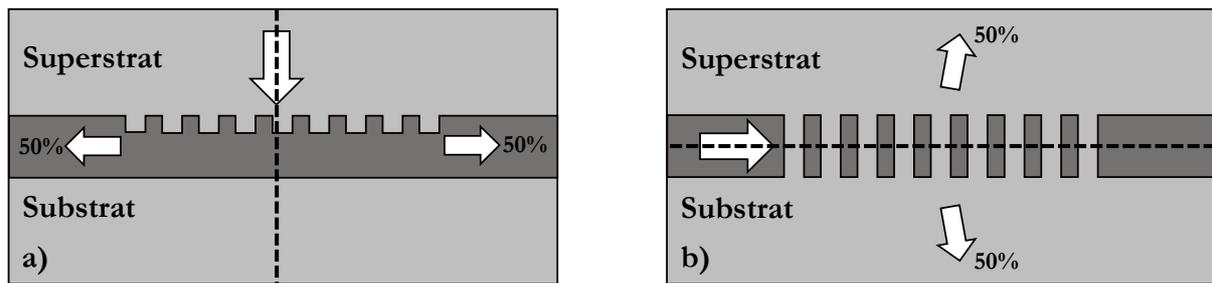


Figure V-7 : Schéma d'un réseau de couplage présentant a) une symétrie horizontale et b) une symétrie verticale.

De la même façon que la puissance au sein du guide décroît exponentiellement (28), le champ électrique décroît de la même manière :

$$E_g = E_0 \cdot e^{-\alpha z} \quad (32)$$

Où E_g est le champ électrique dans le guide le long du réseau, E_0 est l'amplitude initiale du champ arrivant sur le réseau et α est appelé le taux de décroissance de l'amplitude du champ électrique. Le champ découpé par le réseau et se propageant en espace libre va avoir une forme similaire. Pour que celui-ci puisse rentrer dans la fibre, il faut que son profil de champ corresponde à celui du mode fondamental de la fibre. Ainsi, le pourcentage de puissance optique qui passera du champ diffracté dans la fibre correspond à l'aire commune où les deux courbes décrivant les champs se recouvrent (Figure V-8) Mathématiquement, cela correspond à une intégrale de recouvrement entre le mode de fibre et le champ incident. Lorsque les champs ne correspondent pas parfaitement le transfert de puissance (*i.e.* le couplage) d'un mode vers l'autre ne se fait pas à 100 %. Cela engendre des pertes, c'est ce que l'on appelle le *mode mismatch* que l'on peut traduire par une non-correspondance des modes. Dans le cas qui nous intéresse, le mode fondamental de la fibre peut

être approximé par une gaussienne. L'intégrale de recouvrement maximale entre une gaussienne et une exponentielle décroissante est de l'ordre de 80 % [206]. Sachant cela, un réseau symétrique ne peut en définitive qu'avoir une efficacité de couplage de 40 %.

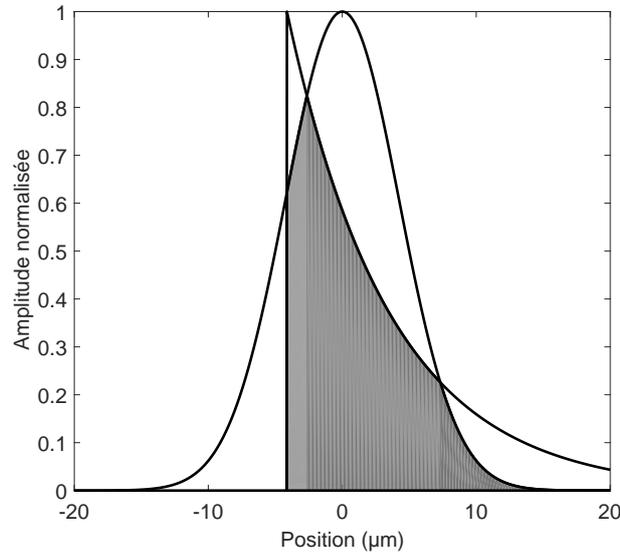


Figure V-8 : Courbe d'illustration de l'intégrale de recouvrement entre une gaussienne et une exponentielle décroissante. Les aires communes des deux courbes, en gris, représentent le pourcentage de puissance qui sera transféré d'un mode vers l'autre.

2.1.4. Techniques d'amélioration de l'efficacité de couplage

D'après le paragraphe précédent, certaines propriétés limitent l'efficacité de couplage fibre-puce des réseaux. Cependant il est possible de contourner ces limitations. Tout d'abord, la symétrie du problème peut être brisée par différentes techniques, chacune améliorant l'efficacité de couplage. L'ajout d'une couche supplémentaire au-dessus de chaque dent du réseau permet de briser la symétrie et d'augmenter l'efficacité de couplage [207]. Une autre solution, largement utilisée sur plateforme SOI, est l'utilisation d'une cavité Fabry-Pérot d'épaisseur $\lambda/4$ formée par le BOX dont l'épaisseur est ajustée pour réfléchir la lumière vers le superstrat [208]. De la même manière il est possible de faire un antireflet avec une cavité $\lambda/2$ entre le guide et le superstrat [209]. Si l'on veut améliorer encore le concept, il est possible de réfléchir la quasi-totalité de la lumière vers le superstrat en intégrant un miroir dans le substrat. Cela peut être fait simplement à l'aide d'une couche métallique [210] ou à l'aide d'un miroir de Bragg (DBR : *Distributed Bragg Reflector*) composé d'une succession de couches diélectriques [211]. Ces solutions permettent de briser la symétrie de la structure et d'augmenter la directionnalité, et donc l'efficacité de couplage du réseau. Il est également possible d'améliorer l'efficacité de couplage en rendant la force du réseau α variable le long du réseau. En choisissant judicieusement le profil de variation de $\alpha(z)$, la valeur de l'intégrale de recouvrement avec une gaussienne peut aller au-delà des 80 %. Pour obtenir cela, il est possible soit de faire varier la profondeur de gravure des dents [212] soit de faire varier le facteur de remplissage [213]. On parle alors d'apodisation du réseau. Ces différentes techniques d'amélioration sont illustrées Figure V-9.

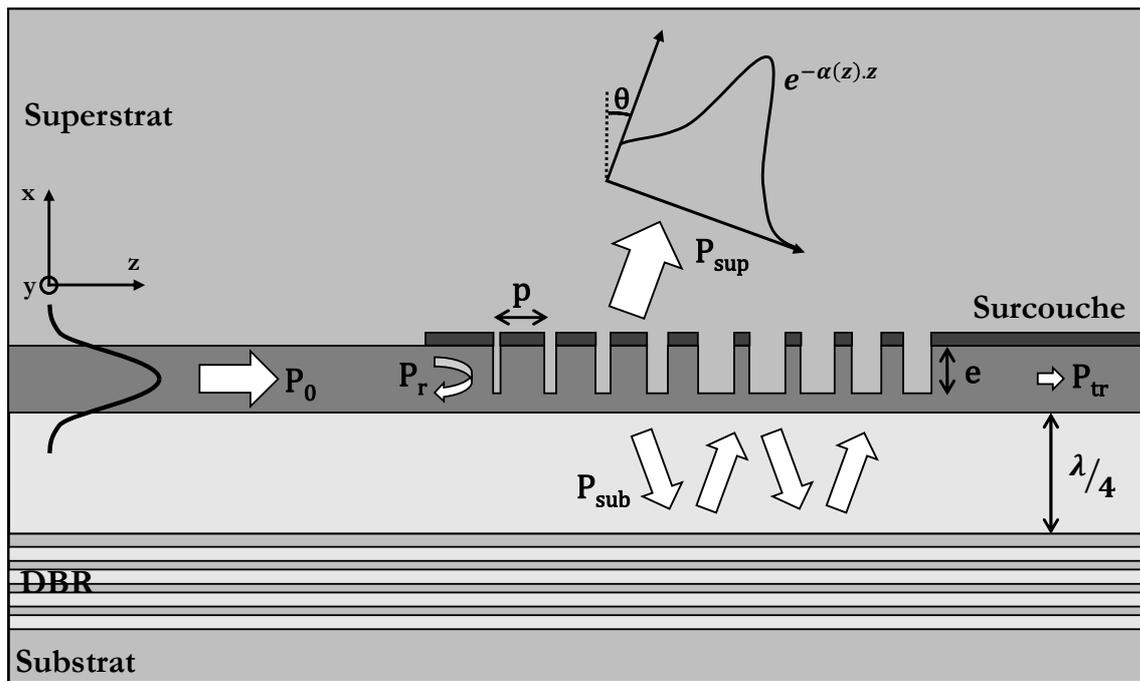


Figure V-9 : Schéma d'un réseau illustrant les différentes techniques d'amélioration de l'efficacité de couplage.

2.2. Modélisation numérique des réseaux de couplage

2.2.1. Finite Difference Time Domain

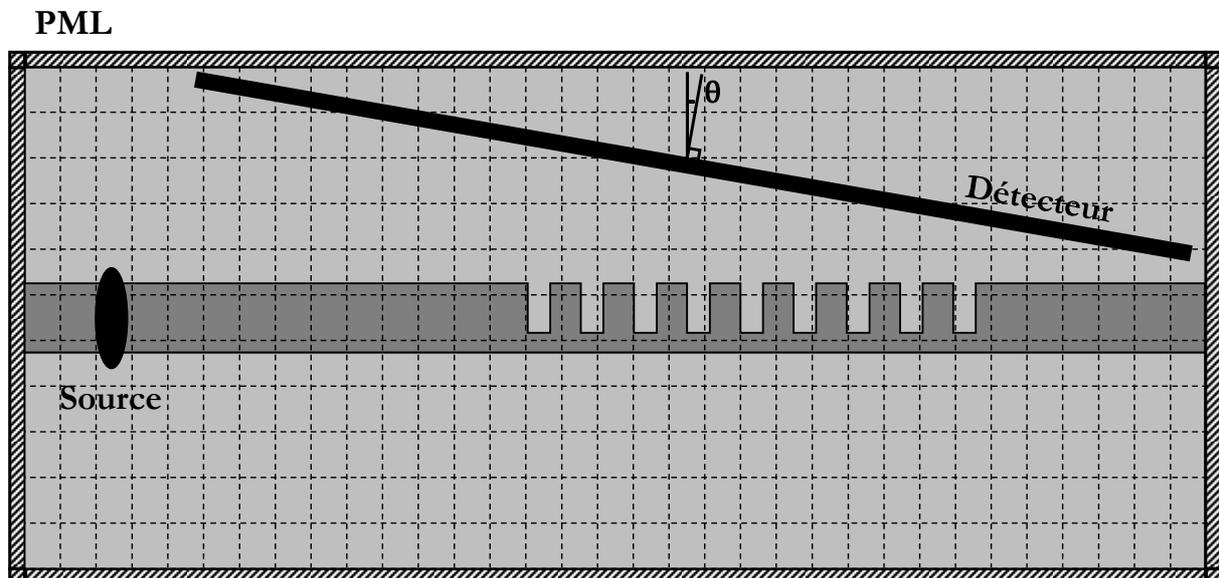


Figure V-10 : Schéma décrivant le modèle typique de simulation du comportement électromagnétique d'un réseau de couplage en 2D avec la méthode FDTD. Le maillage dessiné pour l'illustration est bien entendu beaucoup plus fin dans la réalité.

L'outil choisi pour simuler le comportement électromagnétique des réseaux de couplage est la méthode *Finite Difference Time Domain* (FDTD), utilisée à l'aide du logiciel commercial RsoftTM. La méthode FDTD est conceptuellement la méthode la plus simple de résolution des équations de Maxwell. Elle résout, sans simplification préalable, les équations de Maxwell à la fois dans le temps et dans l'espace. De ce fait, c'est une méthode numérique très utilisée car elle peut s'appliquer à un

grand nombre de problèmes en électromagnétisme. Elle permet le calcul et la visualisation en temps réel de la propagation d'une onde pour les géométries d'objet les plus complexes et sans limitation quant à la nature du matériau (diélectrique, métal, plasma, etc.). Un des avantages de la méthode FDTD est que c'est une méthode de résolution temporelle. Ainsi, en choisissant judicieusement le profil temporel de la source d'excitation, il est possible de calculer, en une seule simulation, la réponse d'un système sur une grande plage fréquentielle à l'aide d'une simple transformée de Fourier. Afin de résoudre numériquement les équations de Maxwell, la méthode FDTD se base sur un schéma de différence finie centrée pour approximer les dérivées partielles temporelles et spatiales. Cet algorithme de résolution a été introduit par K. S. Yee en 1966 [214] et a donné naissance à la méthode FDTD telle que nous la connaissons aujourd'hui. L'évaluation numérique des dérivées partielles nécessite une discrétisation de l'espace et du temps. L'espace est alors découpé en cellule élémentaire de volume $\Delta_x \times \Delta_y \times \Delta_z$. Le maillage ainsi créé doit être régulier, c'est-à-dire que le pas de discrétisation dans chacune des dimensions est constant. L'évaluation numérique de chacune des composantes du champ électrique et magnétique se fait à chaque nœud du maillage. Comme tout schéma de résolution numérique, l'algorithme de Yee est sujet à un critère de stabilité qui doit être respecté afin que la simulation ne diverge pas numériquement. L'application de la condition de Courant-Friedrich-Levy [215] dans le cas d'un maillage régulier [216] donne pour la méthode FDTD le critère de stabilité suivant :

$$\Delta_t \leq \frac{n_{min}}{c \cdot \sqrt{\frac{1}{\Delta_x^2} + \frac{1}{\Delta_y^2} + \frac{1}{\Delta_z^2}}} \quad (33)$$

Où, n_{min} est l'indice du matériau ayant le plus bas indice dans la simulation et c la vitesse de la lumière dans le vide. A ce critère de stabilité se rajoute le problème de dispersion numérique inhérent à la méthode FDTD. La résolution discrète des équations de Maxwell implique que les signaux numériques (*i.e.* une onde plane, par exemple) se propagent avec une vitesse de phase inférieure à la vitesse de phase « physique » (*i.e.* du monde réel). Cette dispersion varie avec la fréquence et la discrétisation spatio-temporelle. Afin de résoudre ce problème, le maillage spatial doit être typiquement de l'ordre de $\lambda/10$ voire de $\lambda/20$ [203]. Le maillage peut également être encore plus résolu dans le cas où certains éléments de la géométrie ont des dimensions bien inférieures à la longueur d'onde. La méthode FDTD se limite donc à des problèmes électromagnétiques de petite taille car la puissance de calcul et la mémoire requise augmente de façon exponentielle avec l'augmentation de la taille du maillage. Le problème du réseau de couplage est également un problème dit de « système ouvert », c'est-à-dire que le problème contient théoriquement une ou plusieurs dimensions infinies. Dans notre cas le substrat et le superstrat sont des milieux semi-infinis. Une simulation de taille infinie étant par définition impossible, il est nécessaire de limiter la taille du domaine de simulation. Pour cela on impose des conditions aux limites sur les bords du domaine de simulation appelées *Perfectly Matched Layers* (PML), mises au point par J-P. Bérenger en 1994 [217]. Elles permettent d'absorber dans sa quasi-totalité le champ électromagnétique incident et empêchent toute réflexion vers l'intérieur du domaine de simulation. Dans le cadre de ces travaux, les simulations se limitent à des cas à deux dimensions et à des domaines n'excédant pas une taille de $70 \lambda^2$. Une simulation de réseau de couplage en 2D dans ce manuscrit représente un temps de calcul n'excédant pas 3 à 6 min sur un processeur moderne capable de gérer 6 ou 8 *threads*. La Figure V-10 représente la géométrie, le domaine de simulation et les grandeurs (puissance, champ électrique, etc.) typiquement calculées. Notamment, le champ

électromagnétique diffracté par le réseau et arrivant sur la fibre est ensuite utilisé pour calculer l'efficacité de couplage. Bien que le problème du réseau de couplage soit fondamentalement un problème en trois dimensions, nous verrons par la suite qu'il est tout à fait possible d'extrapoler les performances 3D à partir d'un modèle 2D. Cette extrapolation se fait de façon analytique au moment du calcul de l'efficacité de couplage guide-fibre du réseau.

2.2.2. Calcul de l'efficacité de couplage

Grâce au calcul FDTD, il est relativement aisé d'obtenir le profil du champ électromagnétique sortant du réseau et arrivant sur la fibre. Cela ne nous donne pas pour autant la part de puissance optique qui se couple effectivement au mode fondamental de la fibre. Pour connaître cela, considérons une onde électromagnétique (\mathbf{E}, \mathbf{H}) arrivant sur un guide d'onde quelconque. Nous savons que les modes optiques sont orthogonaux entre eux et forment une base complète. Il est donc possible d'exprimer l'onde électromagnétique arrivant sur le guide comme une somme de modes guidés et radiés telle que :

$$\begin{aligned}\mathbf{E} &= \sum_{i=1}^n a_i \mathbf{E}_i + \mathbf{E}_{rad} \\ \mathbf{H} &= \sum_{i=1}^n b_i \mathbf{H}_i + \mathbf{H}_{rad}\end{aligned}\quad (34)$$

Où les champs électrique \mathbf{E}_i et magnétique \mathbf{H}_i forment un mode guidé $(\mathbf{E}_i, \mathbf{H}_i, \beta_i)$ avec une constante de propagation β_i . Dans notre cas, nous ne sommes intéressés que par la puissance incidente et la proportion qui sera transmise dans le ou les modes guidés par la fibre. La puissance de l'onde incidente peut s'exprimer de la manière suivante :

$$P_0 = \frac{1}{2} \left| \iint_S (\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*) \cdot \mathbf{z} \cdot dS \right| \quad (35)$$

Et la puissance contenue dans le i-ème mode guidée de la fibre :

$$P_i = |a_i|^2 N_i \quad (36)$$

Avec N_i la puissance unitaire transportée par le i-ème mode :

$$N_i = \frac{1}{2} \left| \iint_S [\mathbf{E}_i \times \mathbf{H}_i^*] \cdot \mathbf{z} \cdot dS \right| \quad (37)$$

La puissance totale transportée par les différents modes guidés de la fibre s'exprime alors :

$$P_{tot} = |a_i|^2 N_i \quad (38)$$

Le problème de savoir quelle est la part de la puissance initiale couplée dans le $i^{\text{ème}}$ mode de fibre se réduit à déterminer la valeur des coefficients a_i . Pour les calculer, écrivons l'égalité suivante :

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \iint_S [\mathbf{E} \times \mathbf{H}_i^*] \cdot \mathbf{z} \, dS \\ &= \frac{1}{2} \iint_S \left[\left(\sum_{j=1}^n a_j \mathbf{E}_j + \mathbf{E}_{rad} \right) \times \mathbf{H}_i^* \right] \cdot \mathbf{z} \, dS \\ &= \sum_{j=1}^n a_j \frac{1}{2} \iint_S [\mathbf{E}_j \times \mathbf{H}_i^*] \cdot \mathbf{z} \, dS + \frac{1}{2} \iint_S [\mathbf{E}_{rad} \times \mathbf{H}_i^*] \cdot \mathbf{z} \, dS \end{aligned} \quad (39)$$

La propriété d'orthogonalité des modes implique que le produit vectoriel $\mathbf{E}_j \times \mathbf{H}_i^*$ est non nul seulement lorsque $i = j$. D'où,

$$\frac{1}{2} \iint_S [\mathbf{E} \times \mathbf{H}_i^*] \cdot \mathbf{z} \, dS = \frac{1}{2} a_i \iint_S [\mathbf{E}_i \times \mathbf{H}_i^*] \cdot \mathbf{z} \, dS \quad (40)$$

On obtient finalement la valeur des coefficients a_i :

$$a_i = \frac{\iint_S [\mathbf{E} \times \mathbf{H}_i^*] \cdot \mathbf{z} \, dS}{\iint_S [\mathbf{E}_i \times \mathbf{H}_i^*] \cdot \mathbf{z} \, dS} \quad (41)$$

On peut désormais définir le coefficient de couplage pour le $i^{\text{ème}}$ mode, c'est-à-dire, la proportion de la puissance venant sur la fibre et se retrouvant guidée par le $i^{\text{ème}}$ mode guidé de la fibre :

$$\eta_i = \frac{P_i}{P_0} = \frac{|a_i|^2 N_i}{\frac{1}{2} |\iint_S [\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*] \cdot \mathbf{z} \, dS|} \quad (42)$$

Avec ce qui a été précédemment calculé, l'équation (42) peut se réécrire :

$$\eta_i = \frac{|\iint_S [\mathbf{E} \times \mathbf{H}_i^*] \cdot \mathbf{z} \, dS|^2}{|\iint_S [\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*] \cdot \mathbf{z} \, dS| |\iint_S [\mathbf{E}_i \times \mathbf{H}_i^*] \cdot \mathbf{z} \, dS|} \quad (43)$$

L'équation (43) est l'expression la plus générale du coefficient de couplage. Dans notre cas, la fibre optique considérée est monomode. Il n'y a donc pas n modes guidés mais un seul et la puissance optique ne pourra se coupler qu'au mode fondamental. On remarquera également que le dénominateur dans l'expression du coefficient de couplage est un terme de normalisation. Dans cette démonstration la puissance P_0 considérée est celle arrivant sur la fibre. Dans le cas du couplage par réseau, ce qui nous intéresse est le taux de couplage du guide intégré dans la fibre et non du champ découpé par le réseau vers la fibre. Pour corriger cela, il suffit non plus de considérer le champ diffracté par le réseau dans le terme de normalisation mais le mode guidé arrivant sur le réseau. On exprime alors P_0 de la manière suivante :

$$P_0 = \left| \iint_S [\mathbf{E}_g \times \mathbf{H}_g^*] \cdot \mathbf{z} \cdot dS \right| \left| \iint_S [\mathbf{E}_{fib} \times \mathbf{H}_{fib}^*] \cdot \mathbf{z} \cdot dS \right| \quad (44)$$

Où, $(\mathbf{E}_g, \mathbf{H}_g)$ sont les composantes du mode fondamental se propageant dans le guide d'onde et arrivant sur le réseau et $(\mathbf{E}_{fib}, \mathbf{H}_{fib})$ le mode fondamental de la fibre. Le coefficient de couplage en puissance du mode guidé vers la fibre (et inversement) est égal à :

$$\eta = \frac{|\iint_S [\mathbf{E}_{diff} \times \mathbf{H}_{fib}^*] \cdot \mathbf{z} \cdot dS|^2}{|\iint_S [\mathbf{E}_g \times \mathbf{H}_g^*] \cdot \mathbf{z} \cdot dS| |\iint_S [\mathbf{E}_{fib} \times \mathbf{H}_{fib}^*] \cdot \mathbf{z} \cdot dS|} \quad (45)$$

Avec $(\mathbf{E}_{diff}, \mathbf{H}_{diff})$ les composantes du champ diffractés par le réseau de couplage. C'est cette dernière équation (45) qui est utilisée dans la suite du manuscrit pour calculer le taux de couplage puce-fibre à partir des différents champs produits par la simulation FDTD. Le mode de fibre est approximé par une gaussienne avec un MFD compris entre $8 \leq \omega_0 \leq 14 \mu\text{m}$. Cela correspond aux valeurs contenues dans les spécifications des fibres commercialement disponibles [218] [102]. L'efficacité de couplage donnée par l'équation (45) n'est exacte que pour un milieu uniforme et ne prend seulement en compte que le *mode mismatch* entre le champ diffracté et le mode de fibre. Cela signifie que les réflexions de Fresnel intervenant à l'interface air-fibre ne sont pas prises en compte. Cependant les fibres MIR ne sont pas standardisées comme cela est le cas dans le domaine télécom. Beaucoup de configurations sont possibles allant des fibres à saut d'indice en ZrF_4 ou InF_3 jusqu'aux fibres à cristaux photoniques à base de chalcogénure. Malgré des matériaux aux indices optiques élevés, certaines de ces fibres présentent de faibles pertes par réflexion par un traitement antireflet adéquat. Le prise en compte des pertes par réflexion est donc très dépendant du choix de la fibre optique pour la phase de caractérisation. Au moment de la conception des réseaux de couplage, le choix du type de fibre optique n'étant pas arrêté, nous avons décidé de ne pas prendre en compte les pertes par réflexion de Fresnel. Cependant, dans le cas où le structure de la fibre est connue, il est possible de calculer ces pertes additionnelles en adaptant la méthode explicitée par de Valicourt et al. [219].

Enfin, un dernier point important à traiter est la généralisation en trois dimensions du calcul. En effet, la formule que nous venons d'établir est tout à fait applicable aussi bien au cas 2D qu'au cas 3D, sans perte de généralité. Il est possible d'extrapoler le résultat de la simulation FDTD-2D au cas 3D en multipliant η par la valeur de l'intégrale de recouvrement entre le mode de fibre et la largeur du guide où est inscrit le réseau [206]. Cette extrapolation repose sur l'hypothèse que le

champ électromagnétique $\psi(x, y)$ peut être écrit comme le produit de deux fonctions $\psi_1(x)$. $\psi_2(y)$ au voisinage du réseau où $\psi_1(x)$ décrit le profil du champ du mode du guide *slab* et $\psi_2(y)$ le profil latéral du mode dans le guide. Cette description est possible si largeur du guide est bien plus grande que son épaisseur. De plus, elle ne reste valide qu'à la condition que l'indice effectif du mode considéré (le mode fondamental dans notre cas) est quasiment identique en 2D et en 3D [220]. Les cas adressés dans ce manuscrit permettent de valider ces hypothèses et d'utiliser cette approximation.

2.2.3. Conclusion sur le modèle

Le modèle d'évaluation numérique complet d'un réseau de couplage comprend un modèle FDTD-2D capable de calculer les différentes composantes du champ électromagnétique arrivant à l'interface de la fibre. Les composantes d'intérêts sont ensuite extraites et utilisées pour calculer le coefficient de couplage η . Le traitement numérique des données produites par le modèle FDTD est fait à l'aide du logiciel de calcul scientifique MATLAB. La position de la fibre ayant un impact important sur l'efficacité de couplage, η est calculé en faisant varier la position de la gaussienne le long de l'interface de la fibre. La valeur retenue de η est la valeur maximale, celle pour laquelle la position de la fibre est optimale. Comme nous l'avons vu précédemment, un réseau de couplage présente de nombreux paramètres géométriques (profondeur de gravure, période, facteur de remplissage, épaisseur du guide, etc) qui influencent directement l'efficacité de couplage. Ceux-ci sont plus ou moins nombreux suivant la configuration adoptée et leur impact peut rapidement changer lorsque l'on s'éloigne du cas d'un réseau faiblement perturbatif. Il arrive fréquemment d'avoir des problèmes à trois, quatre variables voire plus dans certains cas. Trouver la configuration idéale peut s'avérer délicat. Pour remédier à cela, des algorithmes d'optimisation numérique ont été couplés au modèle numérique du réseau de couplage afin d'automatiser la conception.

2.3. Outils numériques de métamodélisation et d'optimisation globale

2.3.1. Contexte

Le problème du réseau de couplage est fondamentalement un problème à plusieurs variables. Au minimum trois variables sont à évaluer mais il est possible d'arriver facilement à des problèmes ayant huit paramètres [205]. Dans ce cas il devient de plus en plus difficile de trouver une configuration optimale donnant la meilleure efficacité de couplage. Si l'on veut simplement évaluer chaque paramètre sur dix valeurs le nombre d'évaluation du modèle numérique est de 10^8 . Sachant qu'un modèle FDTD-2D prend plusieurs minutes d'évaluation, cela équivaudrait à un temps de calcul de plusieurs centaines d'années pour seulement avoir une idée de l'intervalle de valeur dans lequel le jeu de paramètre donne une efficacité de couplage importante. Il est toujours possible de diminuer le temps de calcul en parallélisant les évaluations sur un grand nombre de machines regroupés dans un *cluster* de calcul mais cette stratégie a ses limites. Pour pallier à cela, l'équipe de *Roelkens et al.* [205] utilisèrent leur sens physique afin de pouvoir dimensionner certains éléments séparément. Cependant, cette approche ne permet pas de garantir que la configuration optimale du réseau délivrant l'efficacité de couplage maximale ait été atteinte.

Le problème d'un dimensionnement de réseau révèle donc deux difficultés. La première est le nombre de configurations augmentant de façon exponentielle avec le nombre de paramètres. La deuxième, issu du premier, est le temps de calcul. Un modèle FDTD-2D étant relativement long à évaluer (jusqu'à 10 min) la multiplication des itérations devient rapidement ingérable. Afin de pallier à cela des outils que l'on pourrait qualifier de « *design automatisé* » ont été mis au point. Ceux-ci

permettent de trouver le maximum ou minimum global d'un modèle, par exemple en maximisant la puissance en sortie d'un dispositif, en faisant varier automatiquement les paramètres du problème. En plus de donner une garantie mathématique de trouver un minimum global, le nombre d'itérations pour y parvenir est fortement réduit. Ces outils reposent sur des techniques de métamodélisation et d'algorithme d'optimisation globale. Dans ce travail de thèse, l'outil utilisé est l'algorithme *Efficient Global Optimization* (EGO) couplé à un métamodèle construit par krigeage. Ces résultats sont le fruit d'un travail en collaboration avec Cédric Durantin, doctorant au CEA-Leti sur les méthodes d'optimisation numérique appliquées à la nanophotonique [221].

2.3.2. Construction du métamodèle par krigeage

La première étape est la construction d'un modèle de substitution, appelé métamodèle. Ce modèle de substitution consiste à remplacer un modèle numérique coûteux en temps de calcul par un modèle approximé dont l'évaluation est quasi-immédiate. La création du métamodèle passe par une phase d'entraînement où le modèle de référence est évalué sur un nombre n de points. Chaque point est un vecteur de m paramètres, m étant le nombre de variable d'intérêt. Ces points forment ce que l'on appelle un plan d'expérience. Sa constitution est importante car les points d'évaluation doivent recouvrir au mieux l'espace de conception pour que le métamodèle soit suffisamment fidèle. La méthode de répartition la plus simple consiste à choisir des points de manière aléatoire. L'espace est alors rarement rempli de façon optimale, certains points sont très proches tandis que certaines zones sont démunies de tous points (Figure V-11). Afin de remplir l'espace de manière plus homogène, une technique plus perfectionnée consiste à découper l'espace en plans hypercube latin dans lesquels les points sont répartis en appliquant le critère mathématique Maximin [222]. Cette méthode garantit que l'espace est rempli de façon homogène et que la distance entre un point du domaine et un point de l'échantillon est minimale.

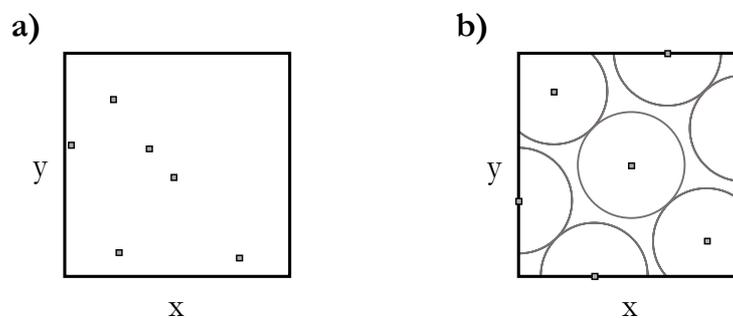


Figure V-11 : Illustration d'un plan d'expérience élaborée a) de manière aléatoire et b) à l'aide d'un plan latin hypercube et du critère Maximin.

Une fois le plan d'expérience évalué, le métamodèle peut être construit. Sa construction consiste à interpoler l'ensemble des évaluations obtenues. Par exemple, une interpolation par polynôme est un métamodèle. Le métamodèle utilisé dans ces travaux exploite la méthode du krigeage développé par Daniel Krige en 1951 [223] puis par Georges Matheron en 1963 [224]. L'interpolation se fait en supposant que la réponse du modèle aux différents paramètres d'entrées suit un processus gaussien dont tous les chemins possibles passent par les points précédemment évalués. De cette manière le métamodèle est une surface de réponse donnée par la valeur moyenne \hat{y} de l'ensemble des chemins issus du processus gaussien pour l'ensemble des variables considérés (Figure V-12). Cette méthode présente l'avantage de pouvoir donner une incertitude de prédiction sur les valeurs interpolées. On peut ainsi savoir si la valeur prédite par le métamodèle est suffisamment proche de la valeur théorique ou si le métamodèle doit être enrichi par de nouveaux points.

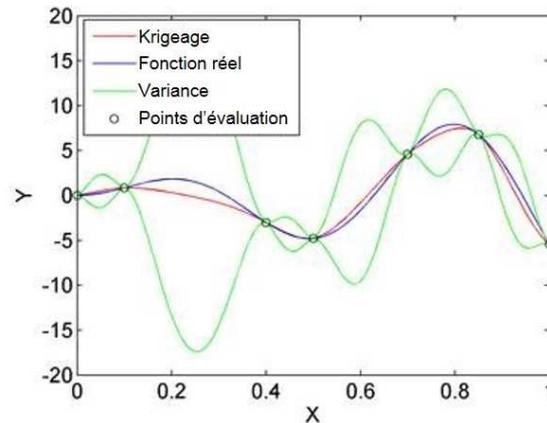


Figure V-12 : Courbe d'illustration d'un métamodèle obtenu par krigeage.

2.3.3. Optimisation sous contrainte par méthode EGO

Le métamodèle obtenu permet de prédire à un coût de calcul réduit, la valeur du modèle numérique de référence, par exemple, l'efficacité de couplage d'un réseau. Il est également possible de procéder à une recherche d'optimum sur le métamodèle. Par exemple, il est possible de trouver le jeu de paramètre maximisant l'efficacité de couplage. Cependant, il se peut que le métamodèle soit trop imprécis et la prédiction de l'optimum sera alors très loin de la vérité. Pour pallier à cela, Jones *et al.* mirent au point l'algorithme d'*Efficient Global Optimization* (EGO) en 1998 [225]. Cette méthode exploite les propriétés du métamodèle pour améliorer la prédiction d'un optimum global tout en minimisant le nombre d'appel au modèle numérique de référence. A partir des valeurs et de leur incertitude associée (*i.e.* leur variance) renvoyées par le métamodèle, l'algorithme est capable de déterminer un point à évaluer permettant d'améliorer la prédiction d'un optimum global. Ce point est déterminé à travers le calcul d'un critère dit « d'amélioration attendue » ou « *Expected Improvement* (EI) ». En rendant ce processus itératif, il est possible de prédire un optimum global avec une assez grande précision. L'algorithme EGO peut se résumer de la manière suivante :

- 1) Un premier plan d'expérience constitué de n vecteurs $\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ est construit. Le modèle f est évalué sur les n points définis par le plan d'expérience. Le métamodèle est construit par krigeage à partir de ces résultats.
- 2) Le jeu de paramètre $\mathbf{x}_{\text{new}} = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ donnant le maximum d'*Expected Improvement* (EI) à partir du métamodèle est évalué par le modèle f .
- 3) Le métamodèle est recalculé en prenant en compte le nouveau résultat $y_{\text{new}} = f(\mathbf{x}_{\text{new}})$.
- 4) On recommence à partir de l'étape 2 jusqu'à ce que le critère d'arrêt soit atteint.

La Figure V-13 illustre le fonctionnement de l'algorithme EGO. Le critère d'arrêt est souvent défini par une valeur en dessous de laquelle doit rester l'EI. Cela permet d'avoir un minimum de garanti sur le fait que l'optimum global ait été atteint.

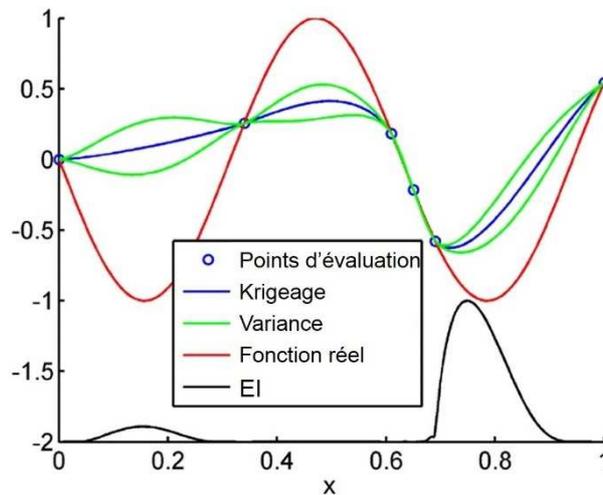


Figure V-13 : Illustration de l'algorithme EGO (Source : Durantin et al. [226]).

3. Conception de réseaux de couplage pour le SWIR et le MWIR

La conception des réseaux de couplage de ce manuscrit a été faite dans l'optique d'une intégration la plus naturelle possible dans le *flow* de fabrication existant de la plateforme SiGe. En particulier, celle-ci ne doit pas mettre en péril les briques déjà existantes lors de la fabrication et si possible ne pas nécessiter une complexité de fabrication trop importante. Les premiers dimensionnements de réseaux de couplage ont concerné des circuits fonctionnant à $2,3 \mu\text{m}$ en polarisation TE, fin du domaine SWIR. A cette longueur d'onde, le matériel disponible est plus standard et plus facile à mettre en place expérimentalement que pour les plus grandes longueurs d'onde. Des fibres en silice faciles à manipuler sont encore utilisables, les sources lasers fibrés avec des fibres à maintien de polarisation existent et les photodétecteurs sont encore performants sans avoir recours à de la cryogénie. Dans un deuxième temps, des réseaux fonctionnant à proprement parler dans le domaine MWIR ont été conçus. A cette occasion est exposée la difficulté à obtenir des réseaux de couplage performants pour des grandes longueurs d'onde. L'ensemble de ces dimensionnements ont été menés à l'aide d'outils d'optimisation globale présentés précédemment et mis au point lors de la thèse de Cédric Durantin [221].

3.1. Différences entre la configuration SWIR et MWIR

La principale différence entre les configurations SWIR et MWIR est la dimension des guides. Pour rappel, à $\lambda=2,3 \mu\text{m}$ les guides ont une section de $1,3 \times 1,3 \mu\text{m}^2$ et à $\lambda=4,5 \mu\text{m}$ les guides ont une section de $2,7 \times 2,7 \mu\text{m}^2$. Ensuite, les fibres optiques utilisées en pratique étant différentes pour le SWIR et le MWIR, cela engendre quelques différences au niveau de la configuration du réseau. Le calcul de l'efficacité de couplage est effectué avec un mode de fibre de $8 \mu\text{m}$ de diamètre pour le réseau SWIR ($\lambda=2,3 \mu\text{m}$ en polarisation TE) et de $12 \mu\text{m}$ de diamètre pour le réseau MWIR ($\lambda=4,5 \mu\text{m}$ en polarisation TM). L'angle de couplage choisie est $\theta=20^\circ$ pour des raisons d'encombrement au niveau du banc optique. Une question qui n'a pas encore été soulevée est le choix de la longueur du réseau, dit autrement du nombre de période. Si le réseau est trop court, l'efficacité de couplage sera sous-estimée et si le réseau est trop long, le temps de calcul sera inutilement allongé. Le faisceau gaussien sortant de la fibre diverge et éclaire le guide sur une certaine longueur L (Figure V-14). Si l'on définit la normale à la fibre comme l'axe z du plan alors on peut établir les deux équations suivantes :

$$\begin{cases} W_d(z) = (l - z) \tan\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) \text{ avec } l = \frac{h + w_0 \cdot \sin \theta}{\cos \theta} \\ W_f(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_0}\right)^2} \end{cases} \quad (46)$$

Où W_d est l'équation définissant la droite représentant le plan du réseau et W_f l'équation définissant la largeur du faisceau. En résolvant l'équation $W_d(z) = W_f(z)$, on obtient les deux points d'intersections entre le faisceau gaussien et la puce ce qui détermine la longueur L . Dans le cas du réseau SWIR, cela représente 17 périodes, sachant que $L \approx 13 \mu\text{m}$ et que la valeur typique d'une période est de $p = 750 \text{ nm}$. Dans le cas du réseau MWIR, cela représente 13 périodes, sachant que $L \approx 18 \mu\text{m}$ et que la valeur typique d'une période est de $p = 1,43 \mu\text{m}$. Ce sont ces valeurs qui sont retenues pour les modèles FDTD de réseau à $\lambda = 2,3 \mu\text{m}$ et $\lambda = 4,5 \mu\text{m}$, respectivement. Les valeurs d'indice prises pour les simulations ont été mesurées par méthode m-lines au laboratoire [227]. A $\lambda = 2,3 \mu\text{m}$, les indices utilisés sont $n_{\text{Si}} = 3,444$ et $n_{\text{SiGe}} = 3,624$ et à $\lambda = 4,5 \mu\text{m}$ les indices sont égaux à $n_{\text{Si}} = 3,423$ et $n_{\text{SiGe}} = 3,583$. Enfin pour des raisons pratiques, la valeur de variation maximale des paramètres d'entrée par l'algorithme d'optimisation a été limitée.

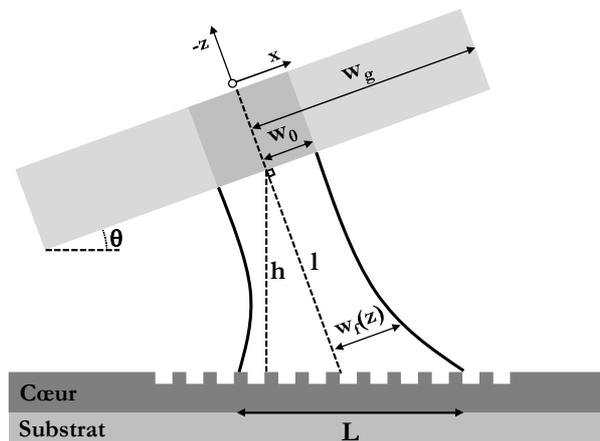


Figure V-14 : Schéma décrivant l'éclairage de la fibre sur un réseau surfacique

3.2. Réseaux de couplage pour le SWIR

La conception de réseau de couplage pour le SWIR a été faite dans l'objectif d'une intégration technologique la plus aisée possible dans le *flow* actuel de fabrication. Trois configurations ont été évaluées dont l'impact technologique est faible voire nulle sur les briques déjà développées. Pour l'ensemble des cas, l'épaisseur de la gaine supérieure des guides (*i.e.* superstrat) est fixée à $5 \mu\text{m}$. C'est l'épaisseur standard utilisée lors de la fabrication des circuits en technologie SiGe dans le laboratoire.

3.2.1. Réseaux enterrés



Figure V-15 : Schéma en coupe du réseau enterré

La solution la plus simple pour obtenir un réseau de couplage sur la plateforme SiGe est de venir inscrire le réseau directement sur le guide puis de l'encapsuler (Figure V-15). De cette manière on ne modifie pas le processus standard de fabrication des guides et une simple photolithographie supplémentaire est nécessaire. A l'aide des outils d'optimisation globale présentés précédemment au paragraphe 2.3, une première configuration a été obtenue. Les paramètres optimisés sont ceux classiques du réseau (p, ff, e). Les contraintes choisies sont soit dues aux limites technologiques (ex : taille de motif de 200 nm maximum) soit à la physique (ex : valeur de la période ne respectant pas la condition de Bragg). L'ensemble des paramètres est résumé au Tableau V-2. L'efficacité de couplage obtenue est extrêmement faible, dont la valeur maximale obtenue est de 0,26 % (Figure V-16a). Le maximum ne se situe pas exactement à $\lambda=2,3 \mu\text{m}$ car les arrondis auxquels on procède ne permettent pas à l'algorithme d'optimisation d'atteindre le maximum avec une précision suffisante. Une efficacité de couplage aussi faible s'explique par le fait que le contraste d'indice du réseau est faible. La valeur du coefficient α dépend de la perturbation apportée par le réseau. Si celle-ci est importante alors α est élevé et la puissance optique est entièrement découplée sur une courte distance. La perturbation dépend de la profondeur de gravure mais également du contraste d'indice entre la partie gravée et la partie non gravée. Dans le cas présent, $\Delta n=0,18$, à comparer avec la plateforme SOI où $\Delta n=2,03$. On se retrouve donc dans une configuration où le réseau a besoin d'une grande distance pour découpler une part significative de puissance, distance qui dépasse largement le MFD de la fibre, qui est de $8 \mu\text{m}$ environ. En faisant correspondre la puissance découplée à une exponentielle décroissante, il est possible d'obtenir la valeur du coefficient α telle que $P(z) = P_0 e^{-2\alpha z}$ [228]. Le réseau enterré a une force de couplage de l'ordre de $\alpha \approx 3,6 \cdot 10^{-4} \mu\text{m}^{-1}$ ce qui représente une longueur de couplage $L_c = (2\alpha)^{-1} \approx 1389 \mu\text{m}$. A titre de comparaison, la force de découplage d'un réseau « basique » en photonique sur SOI présenté par Taillaert *et al.* [195] est de $\alpha \approx 0,1944 \mu\text{m}^{-1}$, soit $L_c \approx 3,8 \mu\text{m}$. Pour découpler autant de puissance qu'en photonique sur SOI il faudrait un réseau 365 fois plus long. Il est donc nécessaire de sortir d'une configuration standard afin d'augmenter le contraste d'indice du réseau et sa force de découplage.

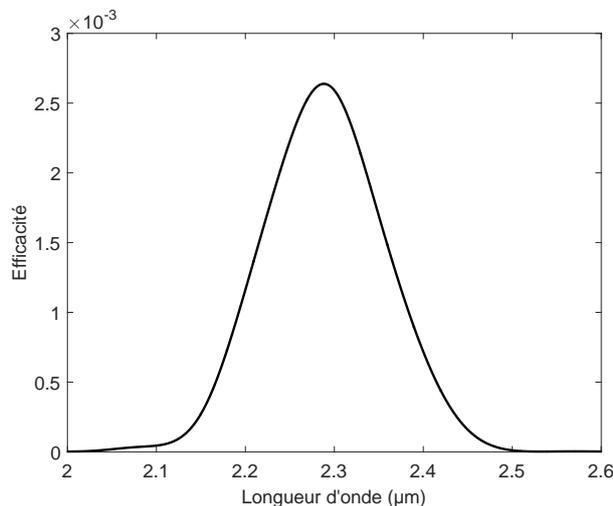


Figure V-16 : Efficacité de couplage du réseau enterré optimal en fonction de la longueur d'onde.

| DOE (100 itérations) | | | |
|----------------------|------------------------|--------------|----------------------------|
| Paramètres | Facteur de remplissage | Période (nm) | Profondeur de gravure (nm) |
| Borne inf | 0,15 | 680 | 5 |
| Borne sup | 0,85 | 780 | 1300 |
| Précision | 1.10^{-3} | 1 | 1 |

| EGO (4 itérations) | | | | | | | | | |
|--------------------|------------------------|--------------|----------------------------|--------------------------------------|------------------|------------------|-----------------|-------|---------------------|
| Paramètres | Facteur de remplissage | Période (nm) | Profondeur de gravure (nm) | η ($\lambda=2,3 \mu\text{m}$) | P_{sup} | P_{sub} | P_{tr} | P_r | α |
| Résultats | 0,462 | 720 | 881 | 0,26 % | 0,3 % | 1 % | 98,6 % | 0,1 % | $3,6 \cdot 10^{-4}$ |

Tableau V-2 : Résumé des paramètres et résultats de l'optimisation par méthode EGO du réseau de couplage enterré.

3.2.2. Réseaux sans gaine supérieure



Figure V-17 : Schéma en coupe du réseau sans gaine supérieure

Une voie possible pour augmenter le contraste d'indice consiste à retirer la gaine supérieure Si du guide (Figure V-17). Les guides devant rester enterrés, il est toujours possible de faire réapparaître progressivement la gaine supérieure via un *taper*. Une première optimisation a été faite comme précédemment (Tableau V-3) et l'algorithme a convergé vers un réseau avec une période de 733 nm, un facteur de remplissage de 0,515 et une profondeur de gravure de 869 nm. L'efficacité de couplage est cette fois beaucoup plus élevée, atteignant $\eta=2,04$ %. La force de couplage est beaucoup plus grande avec $\alpha \approx 0,03 \mu\text{m}^{-1}$, ce qui explique l'augmentation de l'efficacité de couplage et qu'une importante partie de la puissance incidente est diffractée ($P_{\text{sup}}+P_{\text{sub}}=48,2$ %). Cependant, une part importante de la puissance incidente est également réfléchiée vers le circuit avec $P_r=22$ %. En effet, la profondeur de gravure est très importante avec un guide gravé aux deux tiers de sa hauteur. Le réseau représente alors une rupture importante de milieu pour le mode incident, provoquant une importante réflexion, à l'image d'un dioptre de fort indice. Cela est rédhibitoire car cela signifie que dans le sens de l'injection, 22 % de lumière sera réfléchiée vers la fibre et donc vers le laser. Une telle réflexion ferait qu'au mieux le laser serait instable, au pire cela aboutirait à sa destruction. Pour pallier à ce défaut une deuxième optimisation a été menée en contraignant la profondeur de gravure à ne pas dépasser 600 nm (Tableau V-3). La configuration obtenue a une période $p=715$ nm, un facteur de remplissage de 0,386 et une profondeur de gravure de 468 nm. L'efficacité de couplage est forcément moins importante ($\eta=1,65$ %) avec une force de couplage réduite ($\alpha \approx 0,01$) et donc une puissance totale diffractée bien inférieure ($P_{\text{sup}}+P_{\text{sub}} \approx 20$ %). La réflexion à l'entrée du réseau est par contre fortement réduite ($P_r=6,4$ %), rendant une utilité pratique au réseau. Un défaut important de ces configurations est leur dissymétrie verticale qui fait descendre la directionnalité du réseau en-dessous des 50 %. On peut d'ailleurs constater que plus la gravure est importante plus la directionnalité est faible avec 5 % pour la gravure profonde et 10 % pour la gravure superficielle. Cela joue en notre défaveur : l'augmentation de la profondeur de gravure augmente la puissance totale découplée mais celle-ci est préférentiellement diffractée vers le substrat. Néanmoins, ce type de réseau a une efficacité suffisante pour envisager des premières mesures comme l'ont montré Nedeljkovic *et al* [144]. Cependant, dans notre cas, il a l'inconvénient de devoir retirer localement la gaine supérieure et de devoir faire ensuite une adaptation vers le reste du circuit qui est enterré sous le Si.

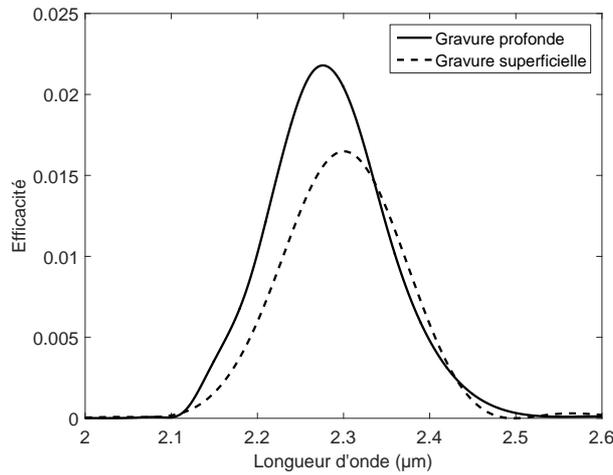


Figure V-18 : Efficacité de couplage du réseau optimisé sans gaine supérieure.

| DOE 1 (100 itérations) | | | | DOE 2 (100 itérations) | | | |
|------------------------|------------------------|--------------|----------------------------|------------------------|------------------------|--------------|----------------------------|
| Paramètres | Facteur de remplissage | Période (nm) | Profondeur de gravure (nm) | Paramètres | Facteur de remplissage | Période (nm) | Profondeur de gravure (nm) |
| Borne inf | 0,15 | 680 | 5 | Borne inf | 0,15 | 680 | 5 |
| Borne sup | 0,85 | 800 | 1300 | Borne sup | 0,85 | 780 | 600 |
| Précision | 1.10^{-3} | 1 | 1 | Précision | 1.10^{-3} | 1 | 1 |

| EGO 1 (4 itérations) | | | | | | | | | |
|----------------------|------------------------|--------------|----------------------------|--------------------------------------|------------------|------------------|-----------------|-------|---------------------------------|
| Paramètres | Facteur de remplissage | Période (nm) | Profondeur de gravure (nm) | η ($\lambda=2,3 \mu\text{m}$) | P_{sup} | P_{sub} | P_{tr} | P_r | α (μm^{-1}) |
| Résultats | 0,515 | 733 | 869 | 2,04 % | 2,5 % | 45,7 % | 29,8 % | 22 % | 0,03 |

| EGO 2 (5 itérations) | | | | | | | | | |
|----------------------|------------------------|--------------|----------------------------|--------------------------------------|------------------|------------------|-----------------|-------|---------------------------------|
| Paramètres | Facteur de remplissage | Période (nm) | Profondeur de gravure (nm) | η ($\lambda=2,3 \mu\text{m}$) | P_{sup} | P_{sub} | P_{tr} | P_r | α (μm^{-1}) |
| Résultats | 0,386 | 715 | 468 | 1,65 % | 2,1 % | 17,8 % | 73,7 % | 6,4 % | 0,01 |

Tableau V-3 : Résumé des paramètres et résultats de l'optimisation par méthode EGO du réseau sans gaine silicium.

3.2.3. Réseaux avec inclusion d'air



Figure V-19 : Schéma en coupe du réseau avec inclusion d'air

La dernière solution envisagée est de venir localement augmenter le contraste d'indice avec des dents constituées d'un matériau bas indice. De cette manière le réseau est toujours enterré ce qui permet à la fois de garder une configuration identique pour le circuit et pour le réseau, et d'augmenter localement le contraste d'indice. Par un procédé technologique qui sera expliqué en détails au chapitre VI, il est possible de faire en sorte que les dents du réseau soient faites d'air, soit le matériau ayant le plus bas indice optique possible. Une première optimisation (Tableau V-4) permet d'obtenir un réseau avec une efficacité de couplage de $\eta=1,8 \%$. La profondeur de gravure

étant très importante ($e=1053$ nm), on retrouve le même défaut que pour la configuration précédente, soit une importante réflexion ($P_r=58$ %) rendant le réseau inutilisable. Une deuxième optimisation avec une contrainte de 600 nm sur la profondeur de gravure permet d'aboutir à une configuration où la puissance réfléchi n'est plus que de 6 %. La profondeur de gravure est cette fois beaucoup plus faible ($e=181$ nm) mais l'efficacité de couplage n'est pas beaucoup dégradée avec $\eta=1,5$ %. La puissance totale découplée ($P_{sup}+P_{sub}=9$ %) et la force de couplage ($\alpha\approx 0,0045$) ont fortement chuté mais cela est compensé par une bien meilleur directionnalité du réseau. On remarquera que la variation de l'efficacité de couplage est multimodale (Figure V-20) d'où un nombre d'itérations plus important au niveau de l'algorithme EGO.

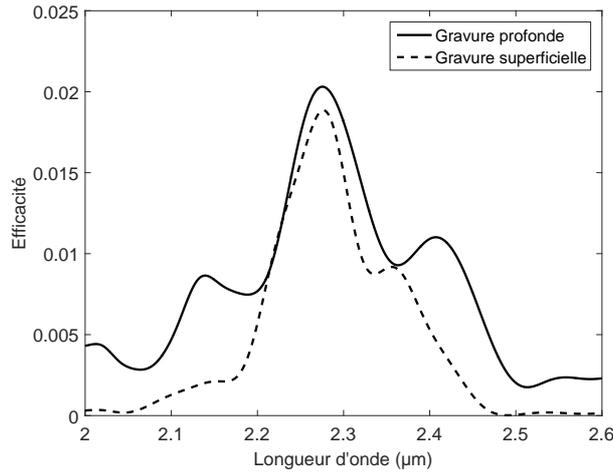


Figure V-20 : Efficacité des réseaux de couplage avec des inclusions d'air.

| DOE 1 (100 itérations) | | | | DOE 2 (100 itérations) | | | | | |
|------------------------|------------------------|--------------|----------------------------|--|------------------------|--------------|----------------------------|-------|---------------------------------|
| Paramètres | Facteur de remplissage | Période (nm) | Profondeur de gravure (nm) | Paramètres | Facteur de remplissage | Période (nm) | Profondeur de gravure (nm) | | |
| Borne inf | 0,15 | 680 | 5 | Borne inf | 0,15 | 680 | 5 | | |
| Borne sup | 0,85 | 780 | 1300 | Borne sup | 0,85 | 780 | 600 | | |
| Précision | 1.10^{-3} | 1 | 1 | Précision | 1.10^{-3} | 1 | 1 | | |
| EGO 1 (26 itérations) | | | | | | | | | |
| Paramètres | Facteur de remplissage | Période (nm) | Profondeur de gravure (nm) | η ($\lambda=2,3$ μm) | P_{sup} | P_{sub} | P_{tr} | P_r | α (μm^{-1}) |
| Résultats | 0,314 | 749 | 1053 | 1,81 % | 2,7 % | 21 % | 23 % | 58 % | 0,012 |
| EGO 2 (11 itérations) | | | | | | | | | |
| Paramètres | Facteur de remplissage | Période (nm) | Profondeur de gravure (nm) | η ($\lambda=2,3$ μm) | P_{sup} | P_{sub} | P_{tr} | P_r | α (μm^{-1}) |
| Résultats | 0,687 | 705 | 181 | 1,5 % | 2 % | 7 % | 85 % | 6 % | 0,045 |

Tableau V-4 : Résumé des paramètres et résultats de l'optimisation par méthode EGO du réseau avec inclusions

3.2.4. Conclusion

D'une façon générale, le faible contraste d'indice de la plateforme et le faible confinement qui en découle font que les configurations découplant le plus de lumière ont une profondeur de gravure

importante. Bien que cela permette d'atteindre de meilleures efficacités de couplage, la rupture de milieu que cela engendre, provoque une très forte réflexion vers le circuit, et donc vers la fibre dans le sens de l'injection. Cette réflexion rend ces configurations inutilisables. Il est alors nécessaire de limiter la profondeur de gravure pour annuler la réflexion vers le circuit. Mis à part la première configuration, les réseaux étudiés présentent une très faible directionnalité, oscillant entre 5 % et 23 %. Notamment, la structure sans gaine où 17,8 % de la puissance incidente est diffractée vers le substrat tandis que seulement 2,1 % est diffractée vers le superstrat. L'ajout d'un miroir dans le substrat permettrait de récupérer une partie, voire la totalité, de la puissance diffractée vers le substrat et augmenterait fortement l'efficacité de couplage. L'ajout d'une couche antireflet (typiquement une couche de SiN) sur la gaine pour les configurations enterrées éviterait également la réflexion Si-air renvoyant une partie de la lumière vers le substrat. Dans une certaine mesure l'épaisseur de la gaine supérieure peut également être optimisée pour faire office d'antireflet. Des efficacités de couplage de l'ordre de 10 % à 20 % sont potentiellement atteignables avec ces améliorations. Bien que présentant la meilleure efficacité de couplage, la configuration sans gaine supérieure nécessite une adaptation de mode optique pour faire la transition entre le réseau et le reste du circuit qui serait délicat à réaliser. Le réseau avec inclusions ne présente pas ce défaut et offre donc un compromis entre l'efficacité de couplage et la facilité d'intégration dans le *flow* de fabrication actuel. La fabrication et la caractérisation de ce réseau seront abordées au prochain chapitre.

3.3. Réseaux de couplage pour le MWIR

3.3.1. Une montée en longueur d'onde difficile

La plateforme développée a pour but de couvrir tout le domaine MWIR. Dans le cadre de cette montée en longueur d'onde de la plateforme, la configuration de réseau de couplage adoptée doit également pouvoir assurer son rôle d'interface aux grandes longueurs d'onde. Or, le MFD des fibres n'augmente pas avec la même proportion que la longueur d'onde. Typiquement, pour $\lambda=2,3 \mu\text{m}$, le MFD est de $8 \mu\text{m}$, pour $\lambda=4,5 \mu\text{m}$, on a $\text{MFD} \approx 12 \mu\text{m}$ et pour $\lambda=9,5 \mu\text{m}$, $\text{MFD} \approx 16 \mu\text{m}$. Plus le MFD est grand plus le spot sur la puce est grand. De même lorsque la longueur d'onde est doublée, la période est doublée également, donc le réseau est deux fois plus long pour un même nombre de période. Ainsi si le MFD n'augmente pas autant que la longueur d'onde, il y a de moins de moins de périodes « disponibles » pour coupler la lumière. Chaque période permettant d'extraire ou d'injecter un pourcentage de lumière fixe, le réseau est fatalement de moins en moins efficace avec l'augmentation de la longueur d'onde. En supposant que la force de découplage du réseau reste constante, la puissance découplée par un réseau est quasiment divisée par deux entre le début et la fin du MWIR (Figure V-21).

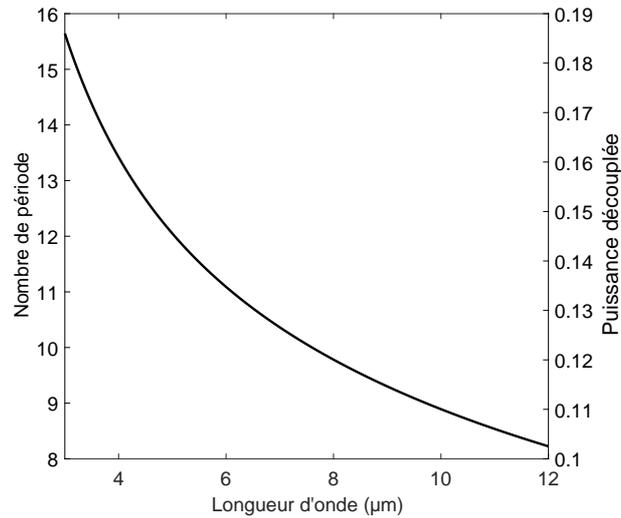


Figure V-21 : Nombre de période et puissance optique totale découplée d'un réseau sur plateforme SiGe en fonction de la longueur d'onde pour une force de couplage constante.

En reproduisant l'étude faite au paragraphe 3.2 et en comparant des configurations équivalentes (pourcentage de gravure similaire, peu de réflexion, etc.), les puissances totales découplées diminuent. Le réseau sans gaine ne découple plus que 16,5 % de la puissance incidente à $\lambda=4,5 \mu\text{m}$ contre 20 % à $\lambda=2,3 \mu\text{m}$. Le réseau avec inclusion suit la même tendance avec 5 % de puissance totale diffractée à $\lambda=4,5 \mu\text{m}$ contre 9 % à $\lambda=2,3 \mu\text{m}$. Le réseau enterré, quant à lui n'a quasiment plus aucun effet avec une transmission proche de 100 %. Une voie possible pour pallier à ce problème est d'augmenter fortement la force de couplage en allant vers des configurations à fort contraste d'indice.

3.3.2. Présentation de la structure

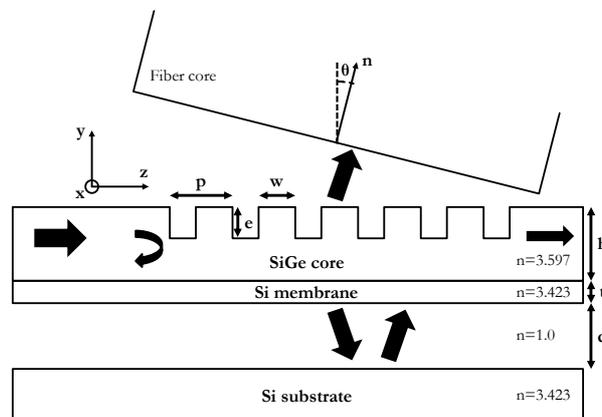


Figure V-22 : Vue en coupe du réseau de couplage suspendu avec les paramètres du réseau, les épaisseurs des matériaux, et les différents trajets de la lumière dans le cas d'un réseau de découplage vers une fibre. Les indices optiques sont donnés pour une longueur d'onde de $4,5 \mu\text{m}$.

La structure proposée pour augmenter l'efficacité de couplage est un guide d'onde localement suspendu d'épaisseur h où le réseau est directement gravé en surface du guide (Figure V-22). De cette manière le contraste d'indice est très fortement augmenté ($\Delta n=2,58$) ce qui améliore la force de découplage du réseau. Afin de garder un confinement optique optimal et n'avoir que le mode fondamental en polarisation TM, le guide d'onde est beaucoup plus fin, typiquement autour de $h=700 \text{ nm}$. La présence d'une membrane en silicium sous le guide suspendu est due à la méthode de fabrication employée. Celle-ci correspond à la couche de Si supérieure d'un *wafers* SOI. De même,

la hauteur de suspension d correspond à l'épaisseur du BOX retirée. Les procédés de fabrication adoptés pour la fabrication de cette structure seront explicités en détails au chapitre VI. Comme précédemment, l'angle de couplage θ est de 20° pour des raisons de contraintes au niveau du banc de test optique. Le guide d'onde étant suspendu, il y a un très fort *mode mismatch* entre le mode optique supporté par la structure suspendue, ayant une section typique de $0,7 \times 18 \mu\text{m}^2$, et le mode existant dans le guide standard enterré, ayant une section de $2,7 \times 2,7 \mu\text{m}^2$. Une adaptation optique est donc nécessaire entre les deux guides afin de faire une transition progressive entre les deux modes. Ceci dans le but d'éviter toutes pertes optiques et ne pas dégrader les performances globales de la structure de couplage. L'adaptation proposée est la suivante : une première adaptation latérale avec une réduction de la largeur du guide suspendu qui est de $18 \mu\text{m}$ au niveau du réseau (région 1 sur la Figure V-23), l'apparition progressive ensuite de l'épaisseur manquante de SiGe et de la gaine Si (région 2), et finalement l'ajout de la gaine latérale en Si (région 3).

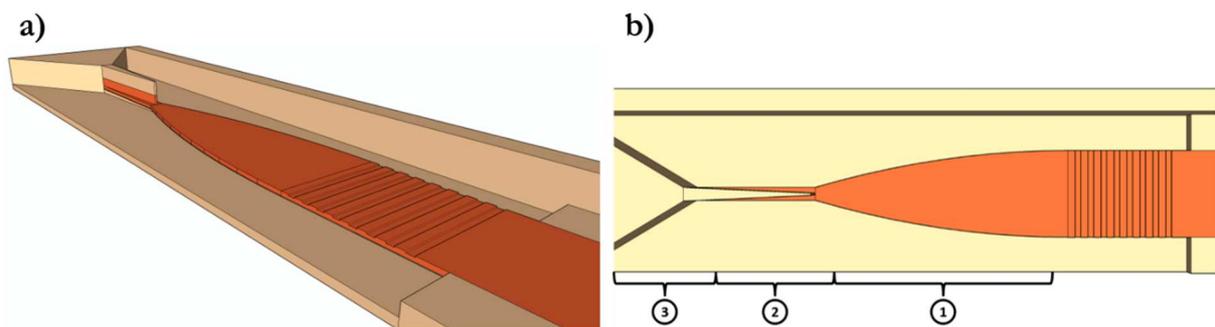


Figure V-23 : Schémas 3D de l'ensemble de la structure envisagée avec le réseau de couplage et le taper faisant la transition optique entre le guide suspendu et le guide enterré. a) Vue 3D de l'ensemble b) Vue de dessus avec le détail de chaque structure. La zone 1 est un taper suspendu faisant une adaptation latérale du mode optique. La zone 2 fait apparaître la gaine inférieure et supérieure ainsi que l'épaisseur supplémentaire du cœur. La zone 3 permet de rajouter la gaine latérale en silicium.

3.3.3. Optimisation du réseau suspendu par optimisation sous contraintes

Le dimensionnement du réseau suspendu est un problème où six paramètres différents sont d'intérêt : la hauteur de suspension du réseau d , l'épaisseur t de la membrane Si, l'épaisseur h du guide SiGe, la profondeur de gravure e , la période p et le facteur de remplissage ff . Il serait tout à fait possible de procéder à une optimisation par la méthode EGO avec ces six variables mais la prise en compte de diverses contraintes permet de légèrement simplifier le problème. Tout d'abord, l'on cherche le plus possible à avoir un guide avec un cœur en SiGe et une gaine d'air. La membrane en silicium est ainsi fixée à une épaisseur relativement faible de $t=100$ nm. Les *wafers* qui seront utilisés pour la fabrication seront des *wafers* de type SOI. Les épaisseurs de BOX disponibles commercialement sont relativement limitées (typiquement, $d=1, 2$ ou $3 \mu\text{m}$). Des simulations préliminaires indiquent qu'une épaisseur de BOX $d=1 \mu\text{m}$ donne les meilleurs résultats. Cela se comprend assez bien, car la couche d'air entre le guide et le substrat forme une cavité Fabry-Pérot qui présente des interférences constructives vers le superstrat pour une épaisseur proche de $\lambda/(4 \cos \theta) \approx 1,2 \mu\text{m}$. Ces considérations préliminaires permettent de ramener le dimensionnement à un problème de quatre variables dont les bornes doivent être définies pour l'optimisation. L'épaisseur h du guide est limité entre 500 nm et 900 nm où seul le mode TM_0 existe. L'épaisseur est au minimum de 500 nm pour ne pas suspendre une structure trop fine, au risque de la voir se briser. La profondeur de gravure e est simplement restreinte pour ne pas graver entièrement le cœur et la membrane. Le facteur de remplissage ff est compris entre 0,1 et 0,9. Les bornes pour la période du réseau se déduisent ensuite naturellement de l'équation (29), connaissant la plage de

variation de n_{eff} et ff . L'ensemble des variables, leurs bornes et leurs précisions respectives sont résumées dans le Tableau V-5.

| Paramètre d'entrée | Borne inférieure | Borne supérieure | Précision |
|---|------------------|------------------|-------------|
| Épaisseur du guide h (μm) | 0,5 | 0,9 | 0,1 |
| Profondeur de gravure e (μm) | 0,01 | 0,6 | 1.10^{-3} |
| Facteur de remplissage ff | 0,1 | 0,9 | 1.10^{-3} |
| Période p (μm) | 1,7 | 3,2 | 1.10^{-3} |

Tableau V-5 : Paramètres d'entrée avec leurs bornes et leurs précisions pour l'optimisation du réseau de couplage suspendu.

La procédure d'optimisation a été initialisée avec l'évaluation d'une DOE de 200 points pour le vecteur de paramètre (h , e , ff , p). Un optimum global a été atteint après 39 itérations supplémentaires déterminées par la méthode EGO. Le réseau de couplage optimisé est fait d'un guide en SiGe de 700 nm d'épais gravée sur une profondeur de 180 nm avec une période de 2,664 μm et un facteur de remplissage de 0,555. Cette configuration atteint une efficacité de couplage guide à fibre de 64 % (*i.e.* -1,94 dB de pertes) avec une bande passante à -3 dB de 410 nm. Quasiment la totalité de la puissance optique est diffractée par le réseau avec seulement 0,8 % de la puissance optique initiale transmise et 0,1 % réfléchi.

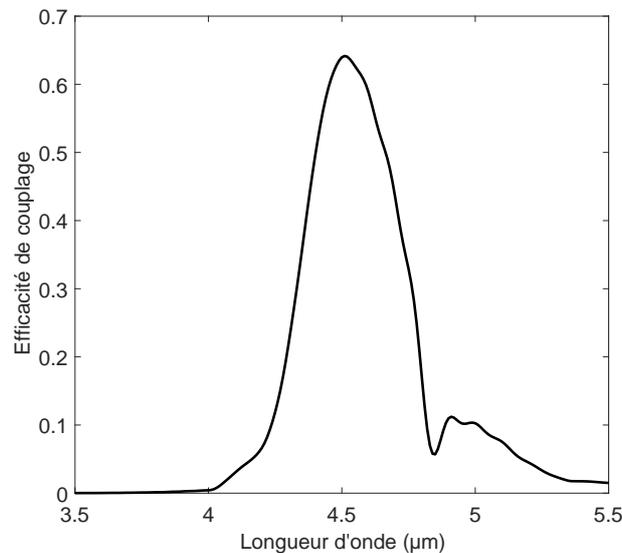


Figure V-24 : Efficacité du réseau de couplage suspendu obtenu par optimisation EGO en fonction de la longueur d'onde. L'optimisation a été faite pour une longueur d'onde de 4,5 μm en polarisation TM. L'angle de couplage choisi est de 20° avec un mode de fibre de 12 μm de diamètre.

3.3.4. Tolérances de fabrication

Ce *design* étant voué à être fabriqué, il est nécessaire de vérifier la robustesse technologique de la configuration obtenue. La période et le facteur de remplissage sont définis par photolithographie et seront donc très peu sujet à des variations de fabrication. En revanche, le guide est défini par épitaxie par jet moléculaire suivi d'une gravure partielle qui sont deux procédés non standards pour les épaisseurs de SiGe mises en jeu. Leur reproductibilité entre deux wafers est donc mal maîtrisée. A cela s'ajoute une importante non uniformité de la profondeur gravée sur l'ensemble du *wafers* due à la machine de gravure profonde. De même, la profondeur des dents du réseau est définie par une

étape de gravure partielle dont le contrôle est également délicat. Ces deux paramètres risquent donc de varier lors de la fabrication. Bien que ne rentrant pas dans les critères de la procédure d'optimisation, la configuration obtenue s'est révélé relativement tolérante aux erreurs de fabrication sur l'épaisseur du guide h et la profondeur de gravure e (Figure V-25). Si l'on prend comme critère de conserver une efficacité de couplage supérieure à 50 %, l'épaisseur du guide doit rester comprise dans l'intervalle 660-720 nm et la profondeur de gravure dans l'intervalle 150-230 nm. Cela représente une tolérance de l'ordre de 9 % pour l'épaisseur du guide et de plus de 40 % pour la gravure du réseau.

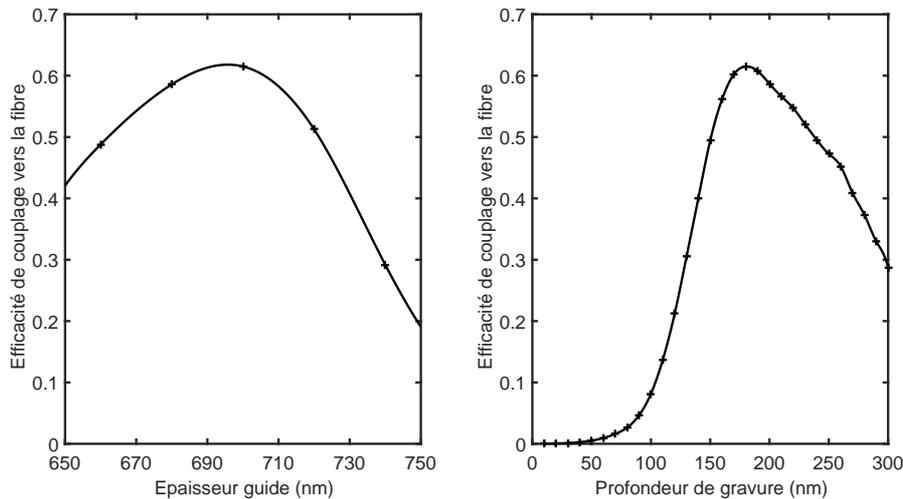


Figure V-25 : Tolérance de fabrication du réseau de couplage optimum vis-à-vis de l'épaisseur du guide suspendu et de la profondeur de gravure du réseau. Les courbes en trait plein ont été obtenues avec une interpolation à base de splines.

3.3.5. Adaptation des modes optiques : transition vers le circuit enterré

La corrugation du réseau a permis de faire l'interface entre le mode de fibre et le mode du guide suspendu. Cependant le couplage vers le circuit n'est encore que partiel. Il est nécessaire de faire une adaptation du mode optique se propageant dans le guide suspendu de section $18 \times 0,7 \mu\text{m}^2$ vers le guide standard enterré de section $2,7 \times 2,7 \mu\text{m}^2$. Pour se faire, nous utilisons la structure en trois parties présentée à la section 3.3.2 et qui est repris ici plus en détails (Figure V-26). La première partie est un *taper* suspendu réduisant la largeur du guide entre le réseau et le point d'ancrage vers le reste du circuit enterré. Une fois cela fait, il est nécessaire de faire apparaître la gaine silicium et l'épaisseur manquante de SiGe. Si la technologie le permettait, un *taper* 3D serait idéal. A la place, nous avons opté pour un *taper* 2D linéaire en deux parties. La première partie fait apparaître l'épaisseur totale manquante de SiGe, de la gaine inférieure et supérieure de Si sur une petite largeur et s'élargit petit à petit jusqu'à atteindre la largeur standard du guide enterré (région 2 de la Figure V-26). La deuxième partie fait lentement apparaître la gaine latérale en Si. La longueur et la forme de ce *taper* ne seront pas étudiées ici car il n'y a pas le besoin d'une compacité particulière du dispositif. De plus un *taper* linéaire aura une transmission de 100 % s'il est suffisamment long.

Deux points sont extrêmement importants dans cette structure. Le premier est la transition entre la fin de la partie suspendue et l'apparition de l'épaisseur manquante du cœur et de la gaine (frontière entre région 1 et région 2). Le *mode mismatch* est potentiellement important à cet endroit. Afin de le réduire au maximum, il est nécessaire d'ajuster au mieux la largeur w de la fin du *taper* suspendu. Ce dernier doit d'ailleurs être le plus court possible, ce qui constitue le deuxième point de dimensionnement de cette structure. Le SiGe épitaxié sur Si étant un matériau contraint en

compression, le guide suspendu pourrait se déformer s'il s'avère trop long. Il est donc également nécessaire de trouver une forme permettant d'avoir un *taper* adiabatique le plus court possible.

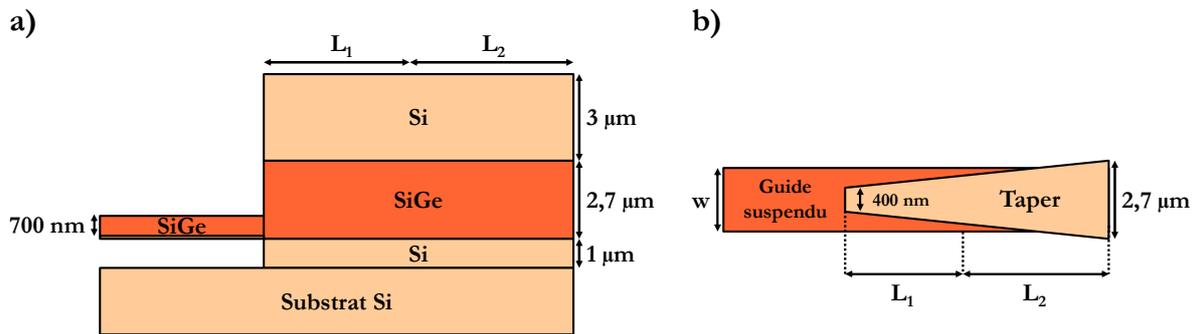


Figure V-26 : Détails de la transition entre la partie suspendue et la partie enterrée. a) vue en coupe longitudinales b) vue de dessus

Avant de pouvoir dimensionner le *taper*, il est nécessaire de déterminer la largeur w minimisant le *mode mismatch* au moment de l'apparition de la pointe du *taper*. En effet, le mode fondamental TM₀ se propageant dans le guide suspendu rencontrera une transition abrupte au moment de l'apparition de la pointe du *taper* dont la largeur sera finie. Idéalement, la pointe du *taper* devrait être infiniment fine et l'adaptation de mode se ferait sans pertes. Dans la pratique, les outils de photolithographie ne permettent que de descendre jusqu'à une largeur de 400 nm pour la pointe. Cependant, il est possible qu'il y ait une valeur idéale pour la largeur w du guide suspendu qui minimiserait le *mode mismatch*. Le problème est étudié en utilisant la méthode d'expansion des modes propres (*i.e.* EME *method*) à l'aide du logiciel Fimmprop[®] (Figure V-27). La transmission du mode TM₀ du guide suspendu vers le mode TM₀ atteint quasiment 100 % pour une largeur du guide suspendu $w=1,28 \mu\text{m}$. C'est donc la largeur optimale si l'on souhaite faire une interface sans perte entre le circuit enterré et le guide localement suspendu.

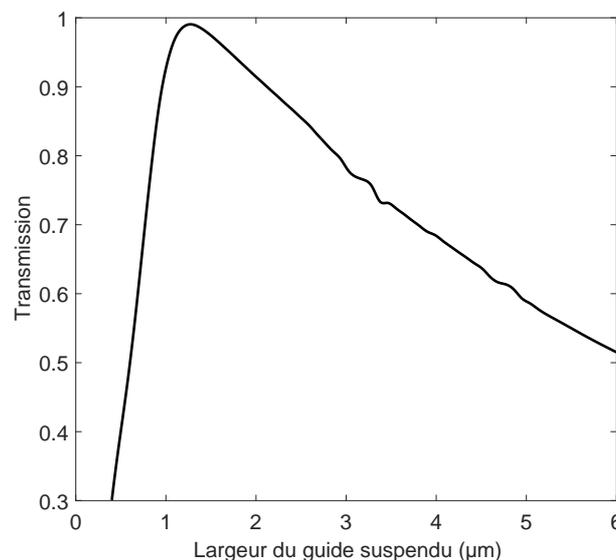


Figure V-27 : Taux de transmission entre le guide suspendu et l'entrée du taper pour le mode TM₀ en fonction de la largeur finale du guide suspendu. La transmission atteint quasiment 100 % pour une largeur de 1,28 μm.

3.3.6. Optimisation et étude du taper suspendu

La dernière étape de conception de la structure de couplage est le *design* du *taper* suspendu. La solution la plus simple consiste à utiliser un *taper* linéaire qui, à condition d'avoir une longueur suffisante, fera une adaptation de mode sans perte du réseau jusqu'à la fin du guide suspendu. Cependant, le matériau utilisé est mécaniquement contraint et plus la structure suspendue est grande, plus le risque de défaillance mécanique sera grand. Dans ce cas, il faut que le guide suspendu soit le plus court possible. La transmission du *taper* a été étudiée pour différentes formes : linéaire, quadratique, parabolique, exponentielle et une dernière que nous appellerons « M&B », du nom de leurs inventeurs. Les quatre premières formes sont connues et se retrouvent classiquement dans la littérature. En particulier la forme parabolique connue pour donner les *tapers* adiabatiques les plus courts. La forme M&B s'obtient en appliquant le critère suivant au demi-angle local θ_t du *taper* qui doit alors satisfaire la condition :

$$\theta_t = \alpha \frac{\lambda_0}{2Wn_{eff}} \quad (47)$$

Où, λ_0 est la longueur d'onde dans le vide, W est la largeur locale du *taper*, n_{eff} l'indice effectif du mode supporté à la largeur W et α un scalaire. Cette règle a été dérivée par A. F. Milton et W. K. Burns en 1977 [229] et requiert que l'élargissement du guide soit plus lente que l'élargissement du mode d'ordre le plus bas par le phénomène de diffraction. Ainsi, ce critère permet d'éviter tout couplage entre le mode fondamental et des modes d'ordre plus élevé. A condition de connaître la largeur de début et de fin du *taper*, la valeur de α donne, par construction, directement la longueur du *taper*. Faire varier α revient donc à faire varier la longueur du *taper*. Le *taper* recherché doit être adiabatique, la transmission recherchée doit donc être supérieure à 99 %. Le calcul du taux de transmission du *taper* a été mené à l'aide du logiciel Fimmprop[®] basé sur la méthode EME. Les simulations sont faites en 3D avec un solveur de mode par différence finie. Sur l'ensemble des formes essayées, celle dérivée à partir du critère de Milton & Burns semble la meilleure avec une transmission de 99 % atteinte pour une longueur de 47 μm (Figure V-28). La forme parabolique, usuellement citée dans la littérature comme donnant les *tapers* les plus courts, n'atteint un tel taux de transmission qu'à partir de 120 μm .

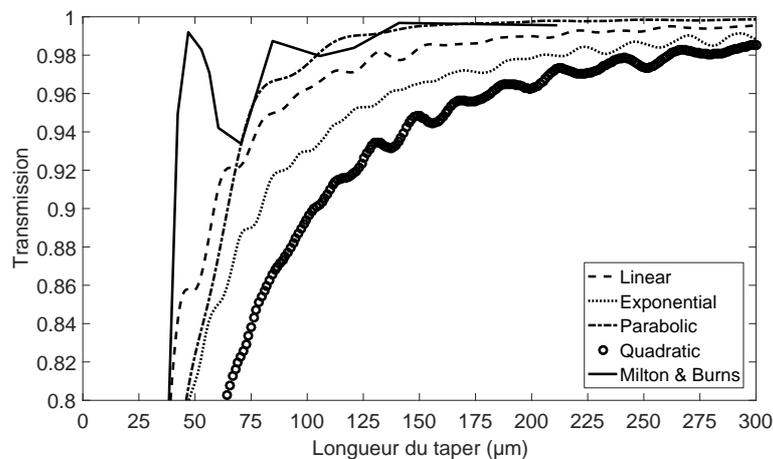


Figure V-28 : Transmission du *taper* suspendu pour le mode TM_{00} à une longueur d'onde de 4,5 μm en fonction de sa longueur et pour différentes formes. La largeur du *taper* varie entre 18 μm et 1,28 μm .

3.3.7. Renforcement mécanique

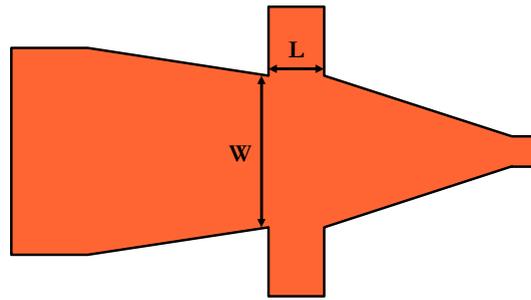


Figure V-29 : Schéma vue de dessus du taper suspendu avec des bras de soutiens supplémentaires afin de renforcer la structure et éviter une défaillance mécanique. La largeur du guide suspendu au niveau des bras est notée W , et la largeur des bras est notée L .

Comme cela a précédemment été souligné, le SiGe est un matériau mécaniquement contraint et son comportement mécanique au moment de la suspension n'est pas connu. La structure peut ne pas être suffisamment courte. Dès lors, un renforcement mécanique permettrait à la structure de ne pas vriller ou plier. La solution choisie est l'ajout de bras de largeur L de part et d'autre du guide (Figure V-29). La largeur W du guide est gardée constante au niveau de chaque bras afin de limiter au maximum de potentiels perturbations optiques. La transition optique « guide – bras – guide » a été étudiée à l'aide d'une simulation FDTD-2D. En particulier, le taux de puissance restant dans le mode TM_{00} après le passage des bras a été calculé en fonction des largeurs W et L . (Figure V-30). Comme on peut le voir, pour une largeur du guide W donnée, plus les bras sont larges plus, plus le mode est perturbé et de moins en moins de puissance reste dans le mode fondamental TM_{00} . Quand le guide est large, une petite fraction du champ est diffractée par la discontinuité que représentent les bras. Lorsque le guide devient plus fin, une plus grande partie du champ peut être diffracté. Ainsi, pour une largeur donnée W du guide, il existe une largeur L minimale des bras en-dessous de laquelle aucune puissance ne sera diffractée dans les bras. Le caractère adiabatique du taper ne devant pas être dégradé, la puissance restant dans le mode TM_{00} après le passage des bras doit être d'au moins 99 %. Ce critère considéré, on peut tracer la longueur maximale des bras permettant de garder au minimum 99 % de la puissance dans le mode fondamental TM_{00} en fonction de la largeur du guide suspendu (Figure V-31). Au vu de la longueur du réseau et du taper suspendus, un choix simple est de situer les bras en sortie du réseau, là où le guide est le plus large. Afin de ne pas rallonger inutilement la structure, les bras choisis ont une largeur $L=10\ \mu\text{m}$, bien qu'optiquement, une largeur de $20\ \mu\text{m}$ fût possible.

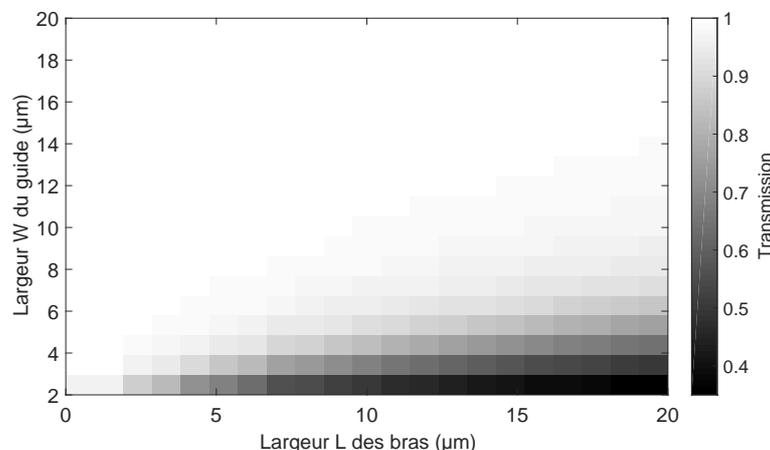


Figure V-30 : Taux de transmission dans le mode TM_{00} après le passage des bras en fonction de la largeur du guide suspendu W et de la largeur des bras L .

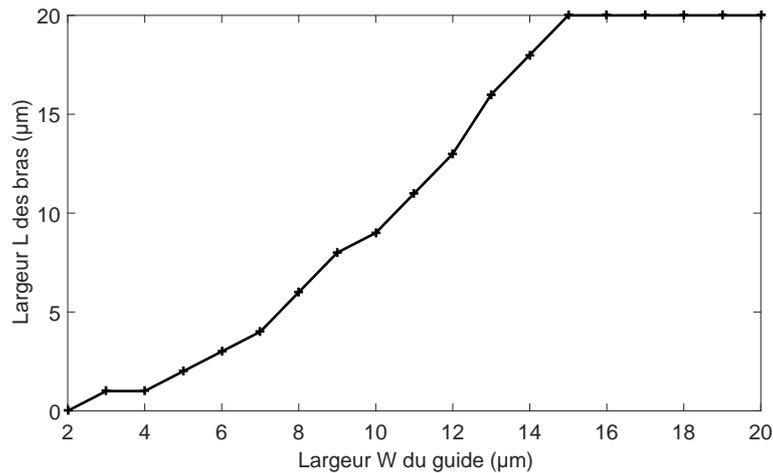


Figure V-31 : Largeur maximale L des bras permettant de garder 99 % de la puissance initiale dans le mode fondamental TM_{00} , pour une largeur de guide W , après le passage des bras faisant office de renfort mécanique de la structure.

3.3.8. Conclusion

L'augmentation de longueur d'onde entraîne une diminution de la puissance découplée par un réseau surfacique et donc une diminution de l'efficacité de couplage fibre à puce. Afin de pallier à cela, une structure suspendue a été proposée. Celle-ci permet d'augmenter localement le confinement de la lumière et le contraste d'indice, ainsi que d'exploiter l'effet Fabry-Pérot avec la cavité formée entre le guide et le substrat. En contrepartie d'une difficulté de réalisation technologique, il en résulte une efficacité de couplage très importante, de l'ordre de 64 %. Le SiGe étant un matériau contraint, le *taper* suspendu a été raccourci au maximum tout en conservant un caractère adiabatique. La possibilité de rajouter un soutien mécanique a été optiquement étudiée et validée. Cette structure nécessite une adaptation de mode optique entre la région suspendue et le reste du circuit qui est enterré. Le dispositif de transition qui a été dimensionné, formé d'un double *taper*, présente un comportement adiabatique avec une transmission proche de 100 %.

4. Conclusion

Après quelques rappels sur la problématique du couplage optique dans un PIC, la revue des techniques et des composants intégrés pour le couplage dans un guide a permis de mettre en exergue certains avantages du réseau de couplage, notamment pour les tests automatisés. Suite à cela, la théorie des réseaux de couplage ainsi que le modèle développé ont été présentés. Le choix de la méthode numérique de modélisation, qu'est la FDTD, a été justifié. Enfin, ce modèle a été couplé à des outils d'optimisation globale exploitant un métamodèle construit par krigeage et une recherche d'optimum par la méthode EGO. Ces outils permettent de faciliter une partie de la conception avec des recherches automatisées et sous contraintes, de point de fonctionnement optimal du réseau. Le modèle et les outils développés ont ensuite été appliqués à la conception de réseau de couplage sur plateforme SiGe. Plusieurs configurations, choisies pour leur faible impact sur le *flow* de fabrication existant, ont été passées en revue pour le domaine du SWIR. La configuration retenue est faite d'inclusions d'air formant les dents. Bien que l'efficacité de couplage obtenue soit faible ($\eta=1,5\%$), cela est suffisant pour faire des premiers essais expérimentaux. Une deuxième phase de conception a ensuite été faite pour le domaine du MWIR. La baisse d'efficacité de couplage associée à l'augmentation de la longueur d'onde oblige à changer drastiquement de configuration pour obtenir des efficacités de couplage exploitables expérimentalement. Une structure suspendue a été mise au point permettant d'atteindre une efficacité de couplage de 64 %.

Cela a donné lieu à une optimisation à quatre variables incluant l'épaisseur du guide. L'ensemble de la transition entre la partie suspendue et le circuit enterré a été optimisé pour être à la fois adiabatique et la plus courte possible pour minimiser le risque de défaillance mécanique. L'impact optique d'un éventuel renfort mécanique de la structure a été étudié. La réalisation de ces deux réseaux de couplage dans une salle blanche 200 mm est présentée au chapitre suivant.

Chapitre VI- Fabrication et caractérisation de réseaux de couplage pour le moyen infrarouge sur plateforme silicium

Les réseaux de couplage conçus au chapitre précédent ont pour but d'être réalisés sur plateforme SiGe à saut d'indice. Pour cela, il est nécessaire de définir un jeu de masque qui sera l'objet de la première partie de ce chapitre. Des modifications sur la géométrie des réseaux dues aux contraintes de fabrication seront également évoquées. Dans un deuxième temps, le détail de l'enchaînement technologique en salle blanche sera exposé ainsi que les observations liées au suivi de fabrication. Enfin, la caractérisation optique de ces réseaux sera présentée.

1. Conception des masques SWIR et MWIR

Pour rappel, deux configurations ont été dimensionnées : une première pour un circuit à $\lambda=2,3 \mu\text{m}$ en polarisation TE (*i.e.* réseau SWIR) et une deuxième à $\lambda=4,5 \mu\text{m}$ en polarisation TM (*i.e.* réseau MWIR). Le réseau SWIR permet de vérifier la validité de la méthode de conception en caractérisant un réseau de couplage dans le domaine MIR tout en utilisant du matériel relativement standard, en particulier une fibre optique à base de silice. Le réseau MWIR oblige à mettre en place du matériel plus fragile, comme des fibres en chalcogénure. Afin de pouvoir caractériser optiquement ces réseaux, il est nécessaire de définir des motifs de test les contenant. A l'image de ce qui a été fait pour la caractérisation des fonctions optiques du PIC SiGe à saut d'indice en technologie standard. Tout d'abord, le jeu de masque du réseau SWIR sera exposé puis celui du réseau MWIR.

1.1. Réseaux SWIR avec inclusion

1.1.1. Contexte de fabrication

Le premier lot réalisé à l'aide de la technologie damascène (*cf.* Chapitre IV) avait pour but de mettre au point les procédés de fabrication ainsi que de faire une première évaluation des performances et limitations de la technologie. Nous avons pu constater que cette technologie engendre des guides avec de trop fortes pertes pour être utilisable en l'état. Or les réseaux SWIR présentés ici nécessitent d'utiliser une grande partie de la technique de fabrication damascène. Historiquement, le choix de la configuration choisie pour les réseaux SWIR (*i.e.* inclusion d'air) a été fait alors que les limitations du procédé damascène étaient encore inconnues. En effet, pour des raisons de délai de fabrication, ceux-ci ont été incorporés dans un deuxième lot damascène fabriqué en parallèle du premier. Au vu des résultats exposés au chapitre IV, nous savons désormais que la technologie damascène n'est pas viable en l'état mais il est important de vérifier la fonctionnalité des réseaux fabriqués. On pourra en particulier valider ou non les techniques de conception du chapitre précédent. Cependant, les *voids* présents nous empêchent de transposer tel quel le réseau de couplage précédemment dimensionné.

1.1.2. Redimensionnement

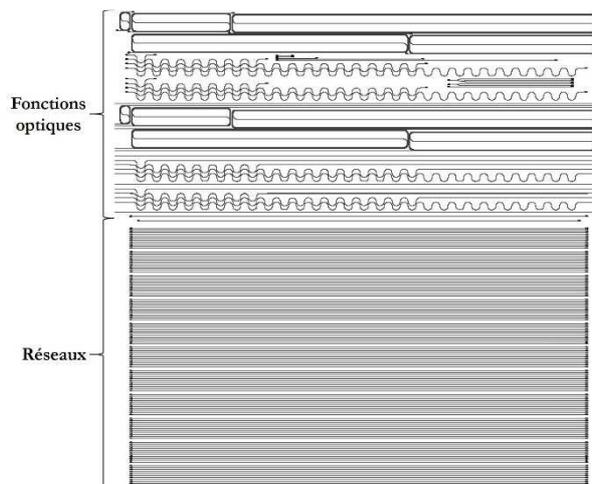


Figure VI-1 : Jeu de masque du 2^o lot damascène contenant des fonctions optiques de tests et des variantes de réseau de couplage pour $\lambda=2,3 \mu\text{m}$ en polarisation TE.

Le lot damascène comportant les réseaux de couplage a été conçu en supposant que des guides carrés $1,3 \times 1,3 \mu\text{m}^2$ pour la longueur d'onde $\lambda=2,3 \mu\text{m}$ étaient réalisables. A l'image du PIC du

chapitre III pour évaluer la technologie standard de fabrication des circuits SiGe, le jeu de masque (Figure VI-1) définit un circuit comportant un ensemble de fonctions optiques permettant d'évaluer les performances de la technologie damascène. Ce jeu de masque initial comportait donc un premier niveau pour définir le PIC et un deuxième pour définir les réseaux. Afin d'éviter les *voids* tout en minimisant le nombre de niveau à refaire, le choix a été fait de conserver le premier niveau de masque en diminuant la profondeur de gravure. Les fonctions optiques autres que les réseaux deviennent ainsi inutilisables mais la présence de *voids* constatées en technologie damascène aurait empêché leur caractérisation. Dans la suite, nous nous intéresserons donc qu'aux réseaux de couplage et non aux autres fonctions optiques présentes sur le circuit. L'adaptation des paramètres des réseaux de couplage a été faite avec des simulations FDTD couplées à un algorithme d'optimisation globale basé sur la méthode EGO. L'optimisation a porté sur la maximisation de l'efficacité de couplage en faisant varier la période, le facteur de remplissage, la profondeur de gravure et l'épaisseur du guide. Après évaluation d'un plan d'expérience initiale de 40 points, l'algorithme EGO converge en seulement 15 itérations (Tableau VI-1). La configuration idéale trouvée a une période de 725 nm, un facteur de remplissage de 0,731, une gravure de 254 nm avec un guide de 800 nm de haut. L'efficacité de couplage est beaucoup plus élevée que pour la configuration initiale avec $\eta=6,3\%$ (Figure VI-2). A l'origine, un antireflet constitué de 290 nm de SiN devait être déposé. Celui-ci n'ayant pas été déposé lors de la fabrication, les résultats de simulation sans antireflet sont également présentés. L'efficacité de couplage est alors réduite à $\eta=4,1\%$.

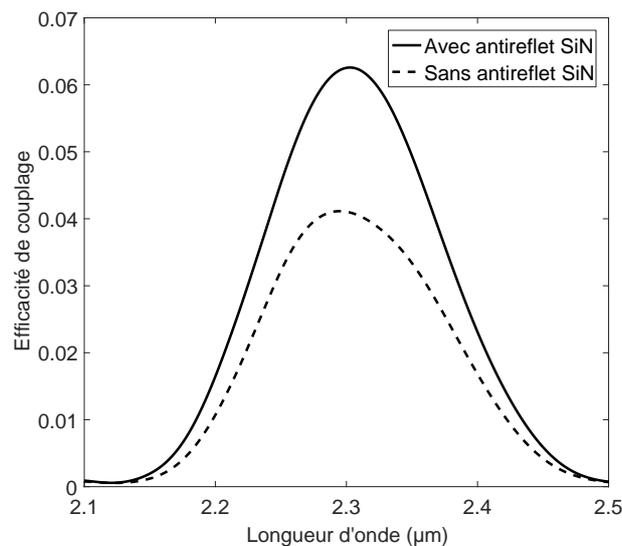


Figure VI-2 : Efficacité de couplage théorique des réseaux de couplage fabriqués avec inclusions d'air.

| DOE (40 itérations) | | | | |
|---------------------|------------------------|--------------|----------------------------|-----------------------|
| Paramètres | Facteur de remplissage | Période (nm) | Profondeur de gravure (nm) | Hauteur du guide (nm) |
| Borne inf | 0,2 | 600 | 5 | 700 |
| Borne sup | 0,9 | 850 | 600 | 1000 |
| Précision | 1.10^{-3} | 1.10^{-3} | 1.10^{-3} | 100 |

| EGO (15 itérations) | | | | | | | | | | |
|---------------------|------------------------|--------------|----------------------------|-----------------------|---|------------------|------------------|-----------------|----------------|----------|
| Paramètres | Facteur de remplissage | Période (nm) | Profondeur de gravure (nm) | Hauteur du guide (nm) | η ($\lambda=2,3 \mu\text{m}$) | P_{sup} | P_{sub} | P_{tr} | P_{r} | α |
| Résultats | 0,731 | 725 | 254 | 800 | 6,81 % | 0,08 | 0,14 | 0,57 | 0,21 | 0,018 |

Tableau VI-1 : Résumé des paramètres et résultats de l'optimisation par méthode EGO pour le redimensionnement du masque.

1.1.3. Description des motifs du jeu de masque

Le réseau de couplage SWIR ainsi redimensionné a permis de redessiner le 2^o niveau de masque. Celui-ci est constitué de plusieurs versions du réseau dont les valeurs de période et de facteur de remplissage diffèrent entre deux variantes. Les variantes sont regroupées par paire et reliées par un guide de 2 cm de long pour pouvoir être caractérisées (Figure VI-3). Un taper permet d'élargir le guide pour récolter une plus grande partie du faisceau venant éclairer la puce, soit 10 μm de large. Il y a au total 100 variantes de réseaux regroupées par série de 10 réseaux ayant la même période mais dont le facteur de remplissage varie. Entre chaque série la période varie entre 690 nm et 790 nm par pas de 10 nm. Pour chaque série, le facteur de remplissage varie entre 0,3 et 0,7 par pas de 0,04.

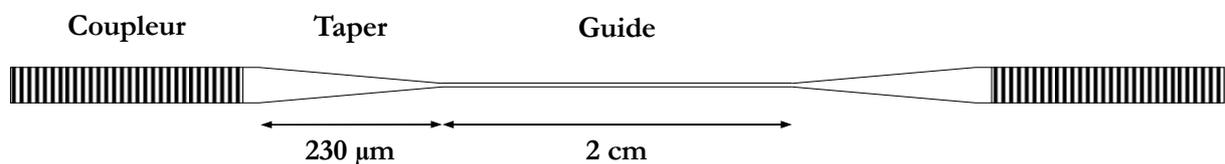


Figure VI-3 : Schéma de la structure de caractérisation des coupleurs par fibre.

1.2. Réseaux MWIR suspendus

1.2.1. Modification de la géométrie

Les réseaux MWIR précédemment dimensionnés ont été légèrement changés à cause de certaines limitations dans les techniques de fabrication. Le double *taper* s'est révélé impossible à fabriquer et le choix a été fait de ne garder que le *taper* suspendu (Figure VI-4). Il en résulte des pertes supplémentaires à la transition entre le guide suspendu et le guide enterré. La transmission est ainsi réduite à 30 % entre ces deux sections au lieu de 100 %. Deux types de réseaux ont été dessinés sur le jeu de masque à partir des simulations de conception du chapitre précédent. Le premier est un réseau dit linéaire, identique à ceux conçus pour le SWIR. Le deuxième est un réseau dit courbe qui permet de réduire la longueur du *taper* avec une structure de réseau agissant comme une lentille venant focaliser la lumière à l'entrée du guide. Les motifs de tests sont similaires à ceux pour le SWIR à l'exception que le guide les séparant est plus court et mesure 1 mm de long.

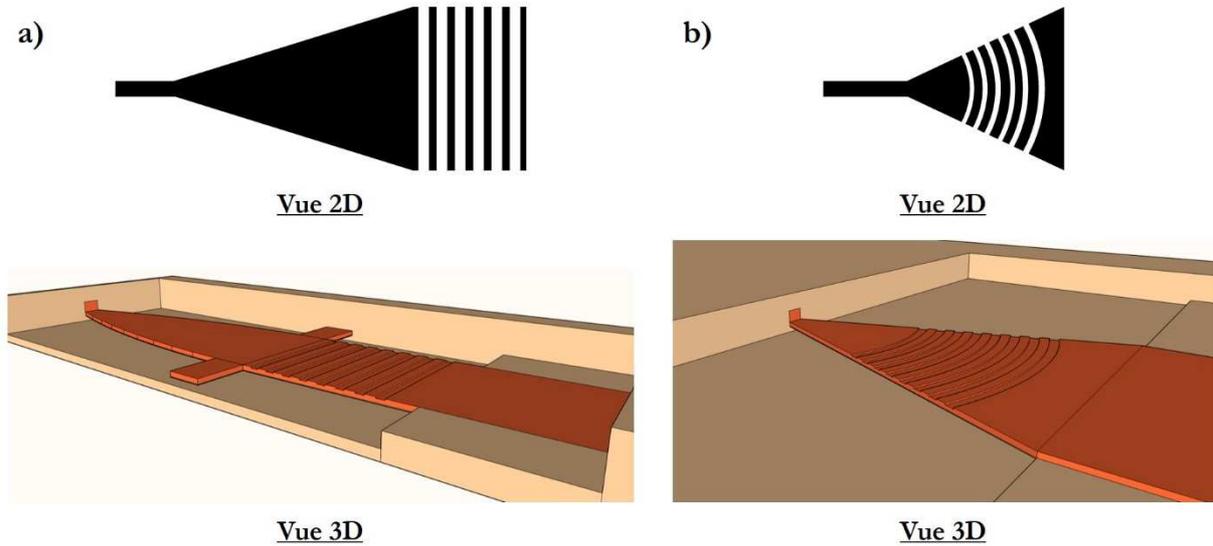


Figure VI-4 : Schéma 2D et 3D des deux géométries de réseau présentes sur le masque : a) réseau linéaire nécessitant un taper pour convertir le mode large en sortie du réseau et b) un réseau courbe permettant de focaliser la lumière directement à l'entrée du guide. Pour des raisons de faisabilité technologique, le double taper a été retiré et seul le taper suspendu a été conservé.

1.2.2. Variantes : réseaux linéaires et courbes

Les réseaux linéaires se caractérisent par une corrugation qui est strictement perpendiculaire à la direction de propagation du guide (Figure VI-4a). Ce sont les mêmes types de réseau que ceux fabriqués pour le SWIR. Les variantes présentes sur le masque sont au nombre de 61 et consistent en une variation de la période et du facteur de remplissage pour lesquels l'efficacité de couplage est supérieure à 30 % en simulation FDTD-2D. La période est comprise entre 2,3 μm et 3,3 μm et le facteur de remplissage entre 0,25 et 0,8. Ces réseaux dits « linéaires » nécessitent de convertir le mode très large en sortie du réseau vers le mode du guide « standard » constituant l'ensemble du PIC. La conversion entre ces deux modes se fait à l'aide d'un taper adiabatique qui est très long. L'empreinte du réseau complet est donc importante sur la puce. Pour remédier à ce problème il est possible d'utiliser un réseau dont les lignes sont courbées (Figure VI-4b). Ces lignes décrivent des ellipses qui partagent toutes le même point focal situé à l'entrée du guide optique. Ainsi, par un jeu d'interférence constructive la lumière sera focalisée au niveau du point focal commun de ces ellipses. Pour que ces interférences constructives se produisent, la géométrie des lignes doit suivre la relation suivante [213] :

$$q\lambda = zn_c \cos \theta - n_{\text{eff}}\sqrt{y^2 + z^2}, \quad q = 1, 2, \dots \quad (48)$$

Où, (y,z) sont les coordonnées décrivant les ellipses avec un repère dont l'origine est située au point focal des ellipses, n_c est l'indice de la gaine supérieure du réseau (l'air dans notre cas), θ est l'angle de couplage avec la fibre et n_{eff} l'indice effectif du mode optique au sein du réseau. En plus de faire varier le facteur de remplissage et la période, les variantes des réseaux courbes consistent également en une modification du demi-angle du taper droit allant de 10° à 50°.

2. Fabrication des réseaux SWIR et MWIR

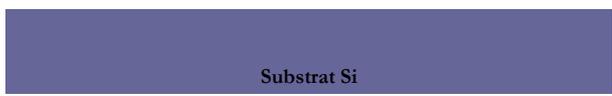
Les modifications apportées aux réseaux SWIR et MWIR pour des raisons technologiques ayant été expliqué, nous pouvons exposer l'enchaînement des étapes technologiques nécessaires à leur

réalisation. Dans un premier temps, le plan de fabrication du réseau SWIR et les observations effectuées durant l'exécution de celui-ci seront présentés. Dans un second temps, le détail de la fabrication du réseau MWIR sera également donné. Enfin, nous concluons sur les différents résultats de fabrication obtenus.

2.1. Enchaînement des procédés technologiques pour le réseau SWIR

La fabrication des réseaux SWIR a été faite dans la salle blanche du CEA-Leti sur des *wafers* Si de 200 mm de diamètre. Leur fabrication se fait en environ 20 étapes (Tableau VI-2) et s'appuie sur un procédé de type damascène que nous allons détailler ici :

1. Le substrat de départ est un wafer Si de 200 mm de diamètre non dopé.
2. Un dépôt Oxyde-Nitride-Oxyde (ONO) est réalisée par technique de LPCVD. La première couche de SiO₂ fait 9 nm d'épaisseur et sert de couche d'accroche au SiN. La couche de SiN est de 120 nm puis la dernière couche de SiO₂ déposée fait 50 nm d'épaisseur.
3. Une résine photosensible est étalée par *spin coating* pour une épaisseur finale de 820 nm. La résine est insolée par lumière DUV en utilisant le 1^{er} niveau de masque puis développée.
4. Le masque dur ONO est gravé par technique RIE.
5. Le silicium est gravé par DRIE sur 800 nm de profondeur.
6. La résine est enlevée par un procédé de *stripping*.
7. Un nettoyage chimique de préparation est réalisé avant de faire le dépôt de Si_{0,6}Ge_{0,4} de 3 µm d'épaisseur par procédé RP-CVD.
8. Une photolithographie est faite avec un contre-masque suivie d'une gravure RIE partielle pour faciliter le polissage par CMP.
9. Le surplus de SiGe est enlevé par une étape de CMP pour récupérer une surface plane. La CMP s'arrête sur le masque dur ONO.
10. Une résine photosensible est étalée par *spin coating* pour une épaisseur finale de 820 nm. La résine est insolée par lumière DUV en utilisant le 2^{ème} niveau de masque puis développée.
11. Le réseau est inscrit dans le guide par une gravure RIE sur 250 nm de profondeur. La résine est ensuite retirée par procédé de *stripping*.
12. Afin de pouvoir procéder au collage moléculaire, on procède à un dépôt de SiO₂ de 10 nm par dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma (PECVD : *Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition*).
13. Un *wafer* BSOI est retourné et collé par collage moléculaire direct sur la surface du substrat Si de départ. Les plaques SOI ont un BOX de 500 nm d'épaisseur et un silicium de surface de 5 µm d'épais qui va constituer la gaine supérieure des guides.
14. Le substrat Si du BSOI est retiré par un premier procédé de *grinding*, c'est-à-dire un rabotage grossier. Suite au *grinding*, il reste 50 µm de Si qui est retirée par gravure DRIE qui s'arrête sur le BOX.
15. Le BOX est retiré par gravure humide.
16. Une couche de Si₃N₄ de 290 nm peut ensuite être déposée pour faire office d'antireflet, mais cette dernière opération n'a finalement pas été réalisée en pratique.

| | |
|-----------------------|--|
| 1. Substrat Si 200 mm |  |
| 2. Dépôt ONO |  |

| | |
|--|--|
| 3. Etalement, insolation et développement de la résine | |
| 4. Gravure du dépôt ONO par RIE | |
| 5. Gravure silicium DRIE | |
| 6. Retrait résine par stripping | |
| 7. Epitaxie Si _{0,6} Ge _{0,4} | |
| 8. Photolithographie du contremasque, gravure partielle puis stripping | |
| 9. CMP avec arrêt sur ONO | |
| 10. Etalement, insolation et développement de la résine | |
| 11. Gravure RIE et stripping | |
| 12. Dépôt SiO ₂ PECVD | |
| 13. Collage moléculaire d'un wafer SOI | |

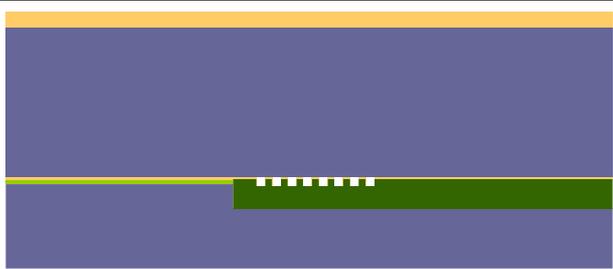
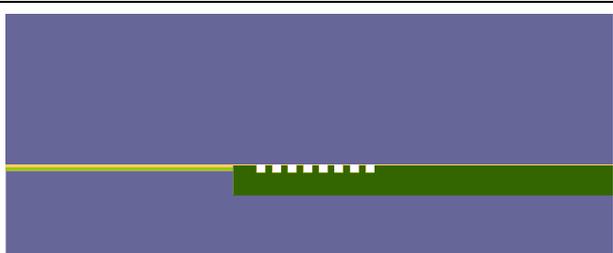
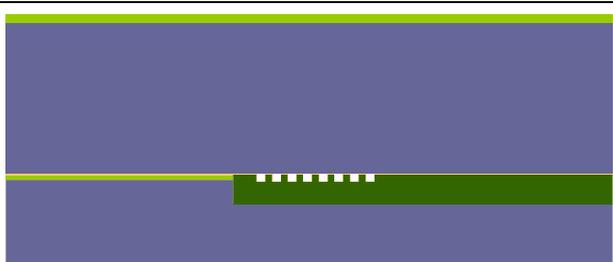
| | |
|---|--|
| <p>14. Retrait substrat par <i>grinding</i></p> |  |
| <p>15. Gravure du SiO₂</p> |  |
| <p>16. Dépôt SiN 290 nm LPCVD</p> |  |

Tableau VI-2 : Enchaînement des étapes technologiques pour la fabrication des réseaux SWIR avec inclusion. Certaines étapes sont regroupées.

Suite à l'enchaînement de tous ces procédés, les plaques obtenues (Figure VI-5) présentent des décollements à certains endroits dus au collage moléculaire qui ne s'est pas fait correctement sur l'ensemble de la surface. Notamment, on peut observer des décollements au niveau des marques d'alignement où la topographie à empêcher un collage de qualité. Une coupe MEB sur le guide d'une plaque essai (Figure VI-6) permet de voir qu'en dehors de ces zones de décollement, le contact entre les deux parties collées se fait correctement. La morphologie du guide n'est ici pas représentative des guides des autres plaques car la coupe a été faite sur une plaque essai ayant été utilisée pour les essais de gravure des guides. On retrouve encore une rugosité importante des flancs de guides réalisées en technologie damascène.

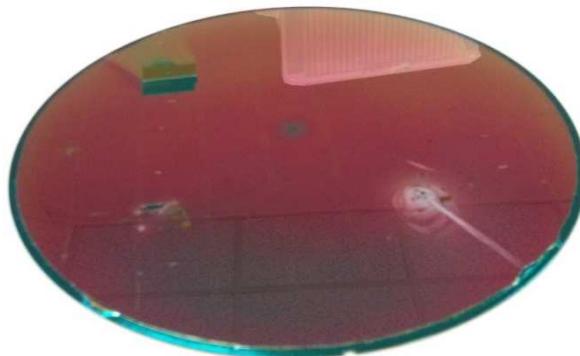


Figure VI-5 : Photographie du wafer finale contenant les réseaux SWIR.

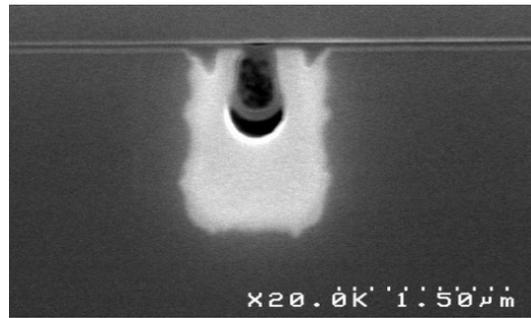


Figure VI-6 : Coupe MEB d'un guide sur une plaque essai après réalisation de l'ensemble des étapes de fabrication. Le guide est beaucoup trop haut ($\sim 1,5 \mu\text{m}$) car la plaque a été utilisée pour connaître la cinétique de gravure du Si et a été surgravée. Au vu du rapport d'aspect du guide, il est normal d'observer un void.

2.2. Enchaînement des procédés technologiques pour le réseau MWIR

La fabrication des réseaux MWIR a été faite dans la salle blanche du CEA-Leti sur des *wafers* SOI de 200 mm de diamètre. Leur fabrication nécessite un très grand nombre d'étapes procédés (>60 étapes en salle), ainsi des étapes ont été regroupés par soucis de synthèse. Celle-ci sera décrite en deux temps : la préparation du substrat nécessaire à la future suspension des réseaux ainsi que la définition des guides optiques puis la définition des réseaux MWIR à proprement parler.

2.2.1. Préparation du substrat et définition des guides

La préparation du substrat et la définition du PIC sans les réseaux (Tableau VI-3) se fait de la façon suivante :

1. Le substrat de départ est un *wafers* SOI de 200 mm de diamètre avec un BOX de $1 \mu\text{m}$ d'épaisseur et une couche de 100 nm d'épaisseur de silicium en surface.
2. Dépôt d'un masque dur ONO pour la protection des marques d'alignement de photolithographie. La couche d'accroche SiO_2 de 30 nm est obtenue par oxydation thermique puis 100 nm de SiN est déposé par LPCVD suivi de 70 nm de SiO_2 .
3. Une résine est étalée par *spin coating* pour une épaisseur finale de $2,5 \mu\text{m}$. La résine est insolée en technique DUV à travers le 1^{er} niveau de masque puis développée.
4. Le masque dur ONO et du silicium sont gravés par technique RIE avec arrêt sur le BOX. Le BOX est gravé dans un second temps par technique DRIE avec un arrêt de la gravure sur le substrat Si. On obtient ainsi des plots d'oxyde qui serviront à la suspension locale des réseaux.
5. La résine est retirée par *stripping* puis un nettoyage de type CARO RCA est effectué pour préparer la surface avant épitaxie. L'épitaxie de Si est faite avec une chimie sélective pour minimiser au maximum la croissance à partir des flancs du BOX et éviter la présence de *cluster* de poly-Si autour du BOX.
6. Un CMP permet de retrouver une surface plane en retirant l'excès de Si présent au-dessus des plots d'oxyde. La CMP consomme entièrement la couche de SiO_2 et s'arrête sur le SiN.
7. Une gravure pleine plaque RIE permet de retirer le SiN puis le SiO_2 en s'arrêtant sur le Si. La préparation de substrat est ainsi terminée et l'on peut fabriquer le circuit.
8. Après une préparation de surface, la croissance de la couche de $\text{Si}_{0,6}\text{Ge}_{0,4}$ est faite par RP-CVD puis enchaînée avec une épitaxie de Si. La couche de SiGe fait $2,7 \mu\text{m}$ d'épais et celle de Si 550 nm
9. Deux CMP, un grossier puis un dit de finition, permettent de récupérer une surface plane ($<0,3 \text{ nm RMS}$). Ces opérations consomment environ 450 nm de Si.

10. De façon similaire au chapitre III, une résine est étalée et insolée avec le 2^{ème} niveau de masque pour définir les guides optiques. Après *stripping*, le circuit est encapsulé par deux dépôts RP-CVD de silicium de 2,7 μm et 3 μm .

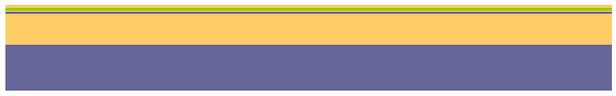
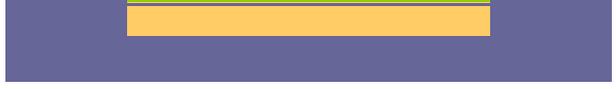
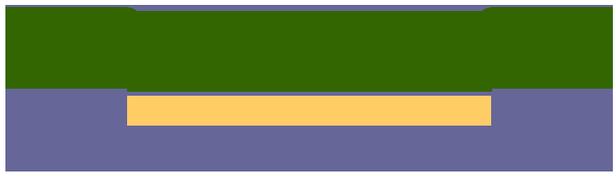
| | |
|---|--|
| 1. Substrat SOI 200 mm |  <p style="text-align: center;">Substrat SOI</p> |
| 2. Dépôt d'un masque ONO |  |
| 3. Etalement puis insolation DUV du 1 ^{er} niveau de masque |  |
| 4. Gravure du masque dur ONO, du silicium et du BOX |  |
| 5. Epitaxie Si |  |
| 6. CMP, arrêt sur SiN |  |
| 7. Retrait du SiN et du SiO ₂ |  |
| 8. Epitaxie SiGe puis Si |  |
| 9. CMP Si |  |
| 10. Photolithographie et gravure du circuit. Nettoyage puis encapsulation du circuit par épitaxie Si de 5,7 μm |  |

Tableau VI-3 : Enchaînement des étapes technologiques pour la fabrication des réseaux MWIR. Seules la préparation substrat et la fabrication du circuit SiGe à saut d'indice sont décrites.

Cet enchaînement technologique permet de définir un PIC SiGe fonctionnel sans avoir encore incorporé les réseaux de couplage MWIR, à l'image de ce qui a été fait lors du chapitre III. Les différentes coupes MEB nous ont confirmé que les guides ont été correctement définies. Le point critique de cette préparation de substrat était que la croissance du Si et du SiGe autour des plots d'oxyde se fasse de façon cristalline. Une coupe FIB à travers un plot d'oxyde (Figure VI-7) a permis de constater qu'il n'y avait pas de défauts de cristallinité rédhibitoires pour la fabrication. Les réseaux de couplage sont ensuite définis dans la 2^{ème} partie de l'enchaînement et leur réalisation va s'appuyer sur la préparation de substrat préalablement effectuée (*i.e.* définition de plots d'oxyde). Il est à noter qu'une mauvaise protection des PM nous a obligé à effectuer l'étape de photolithographie des guides avec un alignement au *notch*, le *stepper* (*i.e.* machine de photolithographie) ne pouvant s'aligner sur ces marques. Ce type d'alignement est beaucoup moins précis et les guides sont décalées de $\pm 5 \mu\text{m}$ en X et Y par rapport aux plots d'oxydes. La tolérance d'alignement initiale avec les PM était de $\pm 125\text{nm}$, la précision sur la position des guides n'est donc plus suffisante pour assurer la fonctionnalité des réseaux.

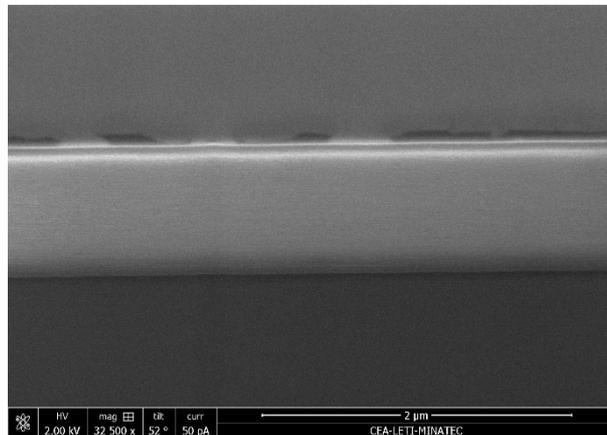


Figure VI-7 : Coupe FIB d'un plot d'oxyde. La couche de silicium au-dessus du BOX est bien présente et a permis une croissance cristalline du SiGe.

2.2.2. Définition des réseaux de couplage

Pour la suite de la description de l'enchaînement technologique, deux coupes (Tableau VI-4) sont faites pour plus de clarté : une coupe longitudinale faite le long de la structure suspendue et une coupe transverse, perpendiculaire à celle-ci. Suite aux précédentes étapes, la fabrication du réseau MWIR se poursuit de la façon suivante :

11. Suite à l'encapsulation, une topographie importante est présente sur le *wafers*. Une photolithographie et gravure de $2,7 \mu\text{m}$ est faite à l'aide d'un niveau de contremasque (3^{ème} niveau de masque). Après une étape de *stripping*, un CMP permet ensuite de récupérer une surface plane. La gaine supérieure est réduite à $3 \mu\text{m}$ d'épaisseur.
12. Une résine est étalée pour obtenir une épaisseur de $4 \mu\text{m}$ puis insolée par DUV en utilisant le 4^{ème} niveau de masque, celui définissant les cavités au fond desquelles sera défini le réseau de couplage.
13. Les cavités sont gravées en une seule fois par un procédé DRIE. La gravure est partielle et laisse une couche de 700 nm de SiGe.

14. Après *stripping*, une résine est de nouveau étalée. Pour ne pas remplir entièrement les cavités, l'épaisseur finale de résine est relativement faible, de l'ordre de 820 nm. L'insolation DUV est faite avec le 5^{ème} niveau de masque définissant les réseaux de couplage.
15. Les dents du réseau sont gravées par RIE sur 175 nm de profond suivie d'une étape de *stripping* pour retirer la résine.
16. On procède à la dernière étape de photolithographie avec le 6^{ème} niveau de masque définissant les *taper*.
17. Une gravure totale RIE avec arrêt sur SiO₂ permet de fabriquer les *taper*. La résine est ensuite retirée par *stripping*.
18. La dernière étape de fabrication consiste en la libération des réseaux pour les suspendre. Pour cela, une gravure sèche par une solution de HF en phase vapeur permet de retirer le plot de SiO₂.

| | Coupe transverse | Coupe longitudinale |
|---|------------------|---------------------|
| 11. Gravure d'un contre-masque et CMP | | |
| 12. Etalement, insolation DUV et développement d'une résine | | |
| 13. Gravure de la cavité par DRIE | | |
| 14. Photolithographie du réseau en fond de cavité | | |
| 15. Gravure partielle RIE et stripping | | |

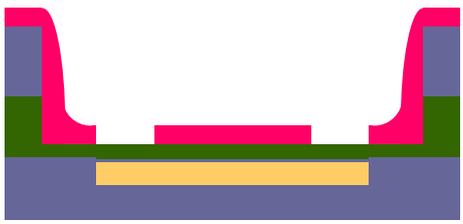
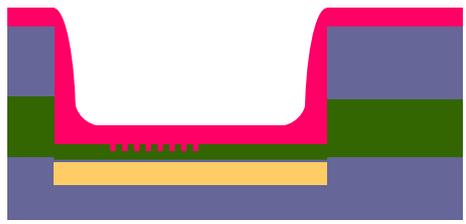
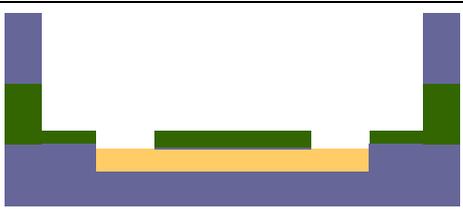
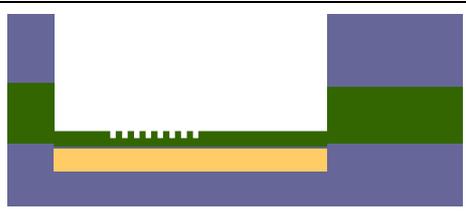
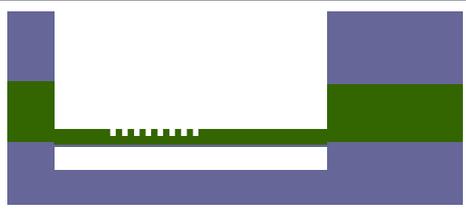
| | | |
|--|---|--|
| <p>16. Photolithographie du taper</p> |  |  |
| <p>17. Gravure SiGe et Si, arrêt sur SiO₂ puis <i>stripping</i></p> |  |  |
| <p>18. Gravure humide du SiO₂</p> |  |  |

Tableau VI-4 : Enchaînement des étapes technologiques pour la fabrication des réseaux MWIR. Le tableau décrit les étapes nécessaires pour définir la cavité, le réseau et le taper ainsi que la suspension du réseau. Les étapes de dégagement des marques nécessaires à l'alignement de la photolithographie ne sont pas précisées par souci de clarté.

Cette 2^{ème} partie de la fabrication permettant de définir les réseaux comportent un certain nombre d'étapes critiques, notamment :

- Les étapes de photolithographie du réseau puis de retrait de la résine qui sont faites au fond de cavités de 5 µm de profondeur. Les techniques de fabrication microélectronique étant par définition planaires, ces étapes ne sont pas standards.
- L'étape de libération car le SiGe est un matériau contraint et il est possible que les structures cèdent ou se plient.

Concernant l'étalement et l'insolation de la résine en fond de cavité, ces étapes n'ont finalement pas présentés de difficulté majeure. La résolution des motifs du réseau a été correctement obtenu après un réglage via une matrice « *dose-focus* ». Le retrait de la résine a été réalisée par un stripping en deux temps avec premièrement une gravure par plasma O₂ puis un bain de 30 s dans une solution de HF dilué à 1 %. Comme en atteste les images prises au MEB (Figure VI-8a), il semble que de la résine soit restée au niveau des bords des cavités. Les motifs du réseau ont été correctement transférés (Figure VI-8b) dans le sens où les dimensions ligne/espace sont respectées. En revanche, on observe une dégradation de la morphologie avec un arrondissement des angles droits et une rugosité importante sur l'ensemble des motifs (Figure VI-8c).

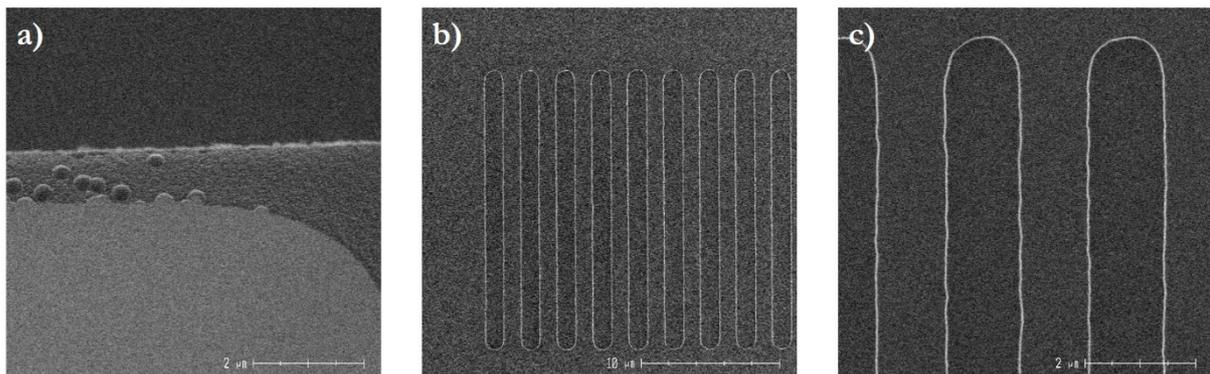


Figure VI-8 : Images prises au MEB d'une cavité après insolation de la résine avec le niveau de masque définissant les réseaux. a) Zoom sur le bord d'une cavité qui semble présenter des restes de résine. b) Résine après développement, les CD sont respectés. c) Zoom sur les motifs du réseau. On constate que la rugosité des motifs est importante. Les angles droits sont également fortement arrondis.

Reposant sur des procédés similaires, la réalisation du *taper* n'a pas posé de problème particulier. Les images prises au MEB nous permettent de voir que ceux-ci ont été correctement définies (Figure VI-9a). Il est à noter que pour l'ensemble des étapes de photolithographie de cette 2^{ème} partie de fabrication, l'alignement a pu se faire à l'aide des PM. On suppose que la non-reconnaissance des PM pour le niveau des guides est dû à une faible tolérance de la machine sur la dégradation des PM. Il en résulte que les guides sont désalignées par rapport à l'ensemble des autres niveaux de masque (Figure VI-9b).

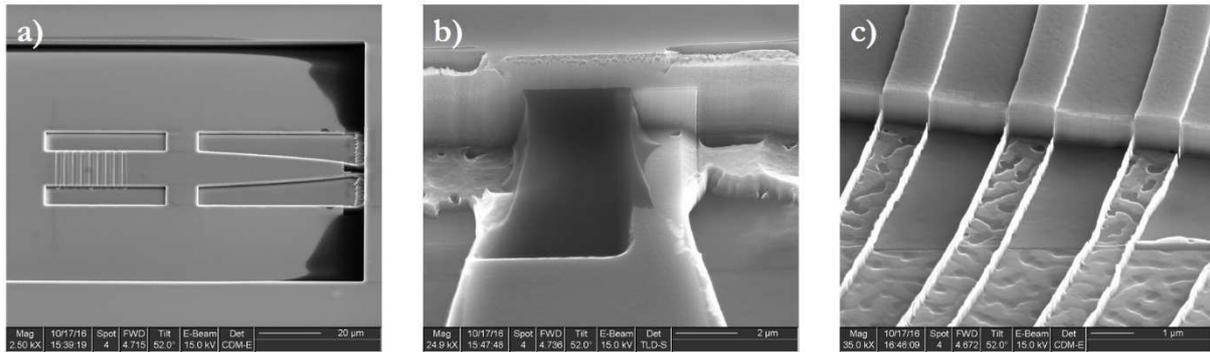


Figure VI-9 : Images MEB prises après réalisation des tapers. a) vue d'ensemble d'un réseau linéaire où l'on peut constater des restes de résines sur les bords de la cavité, b) zoom sur le bord de la cavité et la transition entre le taper et le circuit enterré où l'on peut voir le décalage entre le taper et le guide enterré, c) zoom sur les créneaux d'un réseau focalisant où l'on peut voir les défauts de gravure et le BOX soutenant l'empilement Si/SiGe constituant le futur réseau suspendu.

Enfin, l'étape finale de libération s'est faite par gravure chimique avec du HF¹ en phase vapeur pendant 415 min. Les structures sont complètement suspendues (Figure VI-10) et aucune n'a cédé ou plié sous les contraintes mécaniques du SiGe. Le désalignement du niveau de masque des guides fait que ces structures sont non fonctionnelles. En revanche, nous avons démontré que la fabrication de réseaux suspendus en SiGe est possible.

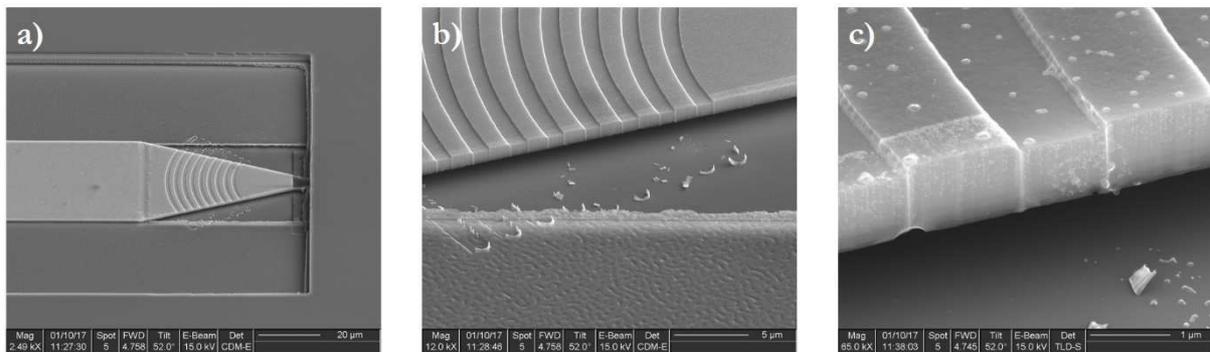


Figure VI-10 : Images MEB prises après libération des réseaux par gravure à l'aide d'acide fluorhydrique en phase vapeur. Images prises d'un réseau focalisant à un grossissement a) 2490x, b) 12000x et c) 65000x.

3. Caractérisation des réseaux de couplage SWIR

Les réseaux de couplage fabriqués doivent désormais être caractérisés pour attester de leur bon fonctionnement. Pour cela, un banc optique de caractérisation par fibre optique a été assemblé.

Dans un premier temps, celui-ci sera présenté en détails ainsi que le protocole de mesure associée. Les résultats seront ensuite exposés. Dans la suite, seul les réseaux SWIR seront traités car les défauts de fabrication des réseaux MWIR font qu'ils ne seront pas fonctionnels.

3.1. Banc de mesure par fibre optique

3.1.1. Vue d'ensemble

Le banc de caractérisation par fibre est relativement similaire au banc de caractérisation par la tranche (Figure VI-11). La différence réside dans le fait que le système de lentille est remplacé par un système de fibre afin d'injecter et récolter la lumière en entrée et sortie de puce, via des réseaux de couplage. Une caméra visible avec un zoom 12X image la surface de la puce et permet de faire le pré-alignement des fibres au-dessus des coupleurs.

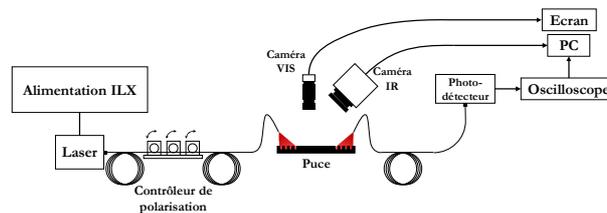


Figure VI-11 : Schéma d'ensemble du banc de caractérisation par fibre

3.1.2. Source laser et fibre

La source laser est une diode laser DFB de chez Nanoplus GmbH. La source est fibrée et émet de façon continue à $\lambda=2333$ nm en polarisation TE. Le laser est piloté à l'aide d'une alimentation Melles Griot 06DLD103 qui fait à la fois source de courant et commande en température du module Peltier intégré au laser. Typiquement, le laser opère avec un courant de 80 mA et est régulé à une température de 25 °C pour une puissance optique de 2,78 mW en sortie de la fibre du laser. A sa sortie, la fibre du laser est connectée à une fibre Nufern SM1950 monomode identique à celle utilisée par Nanoplus GmbH pour fibrer la source laser à la différence qu'elle n'est pas à maintien de polarisation. La fibre Nufern est utilisée en limite de sa fenêtre de transparence avec des pertes typiques de $-1,3$ dB.m⁻¹ à $\lambda=2333$ nm. Ainsi plus de 50 % de la puissance est perdue en sortie de la fibre d'injection avec 1,53 mW pour un courant de 80 mA (Figure VI-12). La fibre d'injection passe dans un contrôleur de polarisation manuel FPC030 de chez Thorlabs avant d'arriver au-dessus de la puce photonique. La fibre de collection est soit identique à celle d'injection soit est une fibre multimode Nufern dont les spécifications sont quasiment identiques à celle de la fibre monomode.

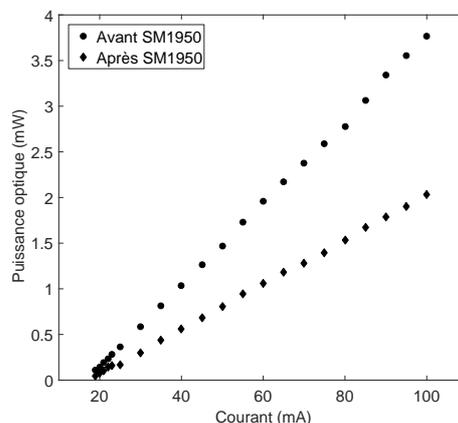


Figure VI-12 : Puissance optique émise par le laser maintenu à 25 °C avant et après le passage dans une fibre Nufern SM1950. La mesure de puissance est faite à l'aide d'un puissance-mètre Thorlabs PM400.

3.1.3. Optomécanique du banc

Les fibres de collection et d'injection sont maintenues par des portes-fibres. Les portes-fibres sont orientables afin d'atteindre des angles de couplage compris entre 0 ° et 22 ° avec une précision de 1 °. Ceux-ci sont placés sur des micro-positionneurs trois axes (X, Y, Z) équipés de piézoélectriques permettant des déplacements d'une résolution de 20 nm. Ceux-ci sont pilotés par contrôleur d'actuateur haute résolution Newport ESA-CXA. La puce photonique est placée sur une embase en aluminium usinée sur-mesure. Comme pour le banc précédent, la puce est maintenue en place grâce à une succion assurée par un réseau de vide. L'embase est également placée sur un micro-positionneur d'axe Z afin d'ajuster la hauteur de la puce avant un réglage plus fin de la position des fibres.

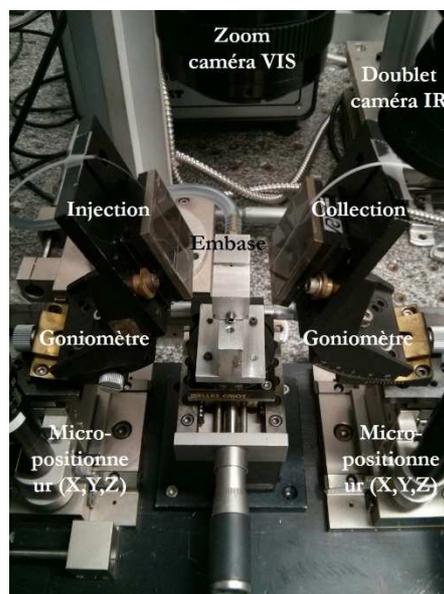


Figure VI-13 : Photographie de l'optomécanique du banc optique de caractérisation par fibre.

3.1.4. Photodétecteurs

Une fois la lumière injectée et ayant traversée le circuit, la puissance optique sortant de la puce et entrant dans la fibre de collection est mesurée par un détecteur rapide Hamamatsu G6122-03. La fibre de collection est directement reliée au photodétecteur via un connecteur FC-PC. La visualisation de la puce pour le pré-alignement des fibres se fait à l'aide d'une caméra Watec WAT-221S et d'un zoom 12X Navitar 1X-T-NIRA (Figure VI-14a). La surface de la puce peut également être visualisée à l'aide de la caméra InSb Xenics et d'un doublet de lentille (Figure VI-14b).

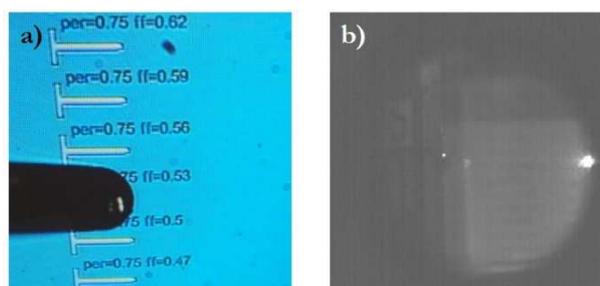


Figure VI-14 : Images de la puce obtenues avec a) la caméra visible pour le pré-alignement des fibres et b) avec la caméra infrarouge InSb Xenics.

3.2. Protocole de mesure

Les circuits fabriqués sur *wafers* 200 mm ont été découpés en puce individuelle à la scie automatique pour pouvoir être mis sur le banc de caractérisation par fibre. Le protocole de mesure pour la caractérisation de réseaux de couplage est relativement simple. La première étape consiste à régler la polarisation en sortie de fibre. Pour ce faire, un polariseur est placé devant la caméra IR Xenics, dont l'axe de polarisation est à 90° de la polarisation souhaitée. Le contrôleur de polarisation est alors réglé pour que l'on observe une extinction totale à la caméra. Pour cette étape, le laser est réglé juste au-dessus du seuil, typiquement $I=20$ mA pour $P=0,1$ mW en sortie de la fibre d'injection. Une fois cela fait, le polariseur est retiré et les fibres d'injection et de collection sont placées au-dessus et au centre des réseaux, à l'aide de la caméra visible et du zoom X12. Afin que les fibres soient le plus proche possible de la surface des réseaux, celles-ci sont amenées au contact de la puce (une légère inflexion de la fibre est alors visible) puis légèrement relevées. Une fois les fibres visuellement pré-alignées, la puissance collectée sur le photodétecteur est maximisée en optimisant la position des fibres à l'aide des micro-actuateurs piézoélectriques. La puissance du laser peut être ajustée en fonction de la puissance reçue sur le photodétecteur. Cependant le laser est initialement réglé juste au-dessus du seuil ($P=0,1$ mW) car malgré les pertes élevées attendues, entre -32 et -36 dB de la sortie de la fibre d'injection jusqu'au photodétecteur, le photodétecteur risque d'être endommagé s'il reçoit plus de 70 nW de puissance optique.

3.3. Résultats obtenus

Plusieurs puces ont été essayées sur le banc, mais aucune puissance notable en sortie de la fibre de collection n'a été mesurée sur le photodétecteur rapide malgré un laser mis au maximum de sa puissance, soit 2,03 mW en sortie de la fibre d'injection. Sachant que la limite de détection du photodétecteur Hamamatsu est de 33 pW, cela signifie qu'il y a plus de -78 dB de pertes entre la sortie de la fibre d'injection et l'entrée du photodétecteur. Les 2 m de fibre de collection provoquent environ -2,6 dB de pertes donc les deux réseaux et le guide de 2 cm entraînent des pertes supérieures à -75,4 dB. A l'aide de la caméra infrarouge Xenics, il est possible de visualiser la puce afin d'avoir un peu plus d'informations. On constate que l'ensemble de la puissance optique est diffracté et est guidé par le silicium formant la puce et non le guide (*i.e.* la puce en silicium agit comme un guide *slab* multimode). Toute la facette de sortie de la puce est éclairée mais rien ne sort spécifiquement du réseau de couplage de sortie situé 660 μm avant la facette. Deux hypothèses sont possibles : soit les réseaux ne remplissent pas leur rôle et diffractent la lumière vers le substrat, soit les guides et/ou les réseaux présentent des pertes optiques très élevées.

Afin de discriminer l'une ou l'autre de ces hypothèses, l'échantillon a été clivé près des réseaux (~ 2 -3 mm). De cette manière, on peut venir directement observer la facette du guide clivé tandis que la lumière est injectée dans le guide via le réseau de couplage. Pour se faire, le banc optique a été légèrement modifié (Figure VI-15). La fibre de collection a été remplacée par une lentille asphérique en chalcogénure identique à celle utilisée sur le banc de caractérisation par la tranche. La lentille image à l'infini la sortie du guide et possède une grande ouverture numérique ($NA=0.65$) afin de récolter l'ensemble de la lumière sortant du guide clivé. La caméra InSb est désormais placée dans l'axe optique et permet de visualiser la sortie des guides optiques. Un miroir amovible peut être placé devant la caméra et envoie le faisceau vers le photodétecteur Hamamatsu. Une sphère intégrante est également placée devant le photodétecteur. La taille du faisceau étant inconnu, cela permet de s'assurer que nous ne faisons pas d'erreur sur la mesure de puissance. Ce montage permet de mesurer la transmission de l'échantillon et de remonter à l'efficacité de couplage. En faisant

l'hypothèse que le guide n'engendre aucunes pertes, l'efficacité de couplage est égale à la transmission corrigée de la réflexion subit à la facette :

$$\eta = \frac{T_{\text{échantillon}}}{(1 - R)} = \frac{P_{\text{transmis}}}{P_{\text{fibre}}(1 - R)} \quad (49)$$

Cependant, dans le cas où le réseau présente une réflexion, le guide agit comme une cavité Fabry-Pérot modulant la puissance transmise en fonction de la longueur d'onde. La mesure de la transmission de l'échantillon en fonction de la longueur d'onde émise par le laser permet de s'affranchir des effets de résonance et d'évaluer correctement l'efficacité de couplage du réseau [206].

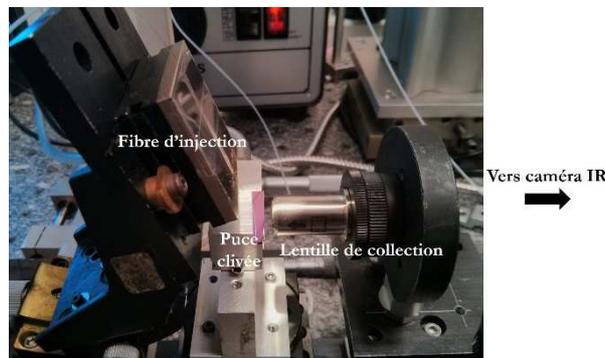
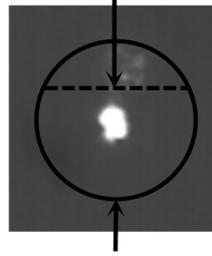


Figure VI-15 : Photo du banc d'injection par fibre modifiée. La fibre de collection a été remplacée par une lentille de collection identique à celle employée sur le banc de caractérisation par la tranche.

La fibre d'injection est imagée, sur la caméra Xenics, à l'aide de la lentille de collection afin de faire un premier alignement. La fibre est ensuite reculée, et la facette de l'échantillon est imagée à l'infini. Ensuite le laser est alimenté en courant, typiquement $I=22$ mA, et la fibre est rapprochée d'un réseau de couplage situé sur l'axe optique du banc. Les résultats présentés sont issus de mesures d'un réseau avec une période de 730 nm et un facteur de remplissage de 0,6, sur la puce 45. Lorsque la fibre est positionnée correctement au-dessus du réseau, la tranche de la puce présente un *spot* caractéristique de la sortie d'un guide (Figure VI-16). La lumière n'est donc pas diffractée et couplée au substrat mais bien couplée au guide optique. La transmission de l'échantillon a été mesurée en fonction du courant d'alimentation du laser, soit en fonction de la longueur d'onde émise (Figure VI-17). Premièrement, l'effet Fabry-Pérot attendu n'est pas visible alors que l'ISL attendu est de l'ordre de 0,2-0,8 nm. Les valeurs d'efficacité données sont donc issues de la correction décrite par l'équation (49). Pour des faibles valeurs de courant, la puissance émise par le laser est faible. L'erreur relative sur la puissance mesurée en sortie de fibre (P_{fibre}) et en sortie d'échantillon (P_{transmis}) est donc plus importante. Cela peut expliquer les valeurs de transmission plus élevées à faible courant. A plus fort courant (*i.e.* à plus forte puissance) la transmission mesurée se stabilise et se situe autour de 2,4 % soit une efficacité de couplage de 3,6 %. Nous avons donc réussi à prouver deux choses. Premièrement, l'efficacité de couplage mesurée est du même ordre de grandeur que celle prédite par la simulation FDTD. La méthode de conception des réseaux est donc valide. Deuxièmement, les guides damascènes sont la source majoritaire des pertes empêchant le bon fonctionnement du circuit. Cela confirme les résultats obtenus avec les mesures de pertes par méthode Fabry-Pérot sur des guides droits.

Surface de la puce



Lentille

Figure VI-16 : Image infrarouge de la tranche d'une puce photonique avec une fibre éclairant un réseau. La sortie du guide observé est éclairée prouvant que le réseau permet de coupler la lumière venant de la fibre.

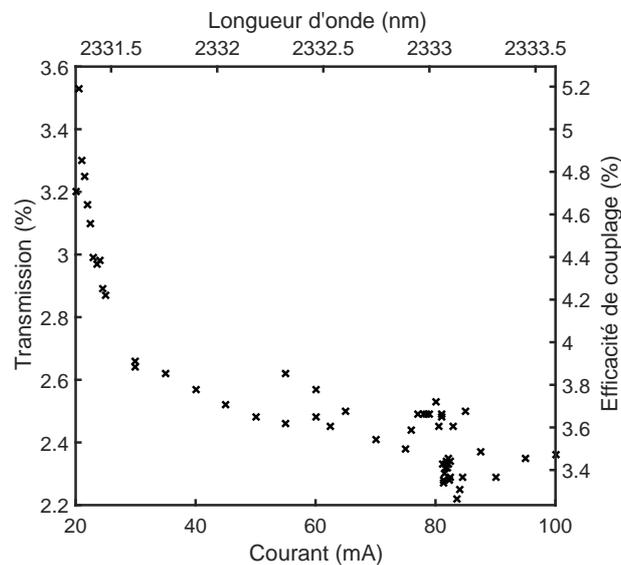


Figure VI-17 : Transmission et efficacité de couplage mesurée pour le réseau de période $p=730$ nm et de facteur de remplissage 0,6.

4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons pu explorer de façon expérimental la faisabilité technologique et les performances de réseau de couplage pour une plateforme photonique MIR. Premièrement, des réseaux dits SWIR ($\lambda=2,3$ μm en polarisation TE) dont la configuration atypique à base d'inclusion d'air à nécessiter de se baser sur une technologie damascène. Ces réseaux ont été correctement fabriqués et montre des performances correspondant à la simulation avec une efficacité de couplage de l'ordre de 3,6 %. En revanche, on retrouve des pertes extrêmement élevées et non mesurable pour les guides fabriqués avec cette technologie. Les réseaux dits MWIR ($\lambda=4,5$ μm en polarisation TM) n'ont pu être caractérisés dues à des défauts d'alignement lors de la fabrication. Cependant, leur réalisation en salle blanche était un vrai défi et nous avons pu prouver en partie leur faisabilité technologique. En plus d'étapes difficiles (ex : photolithographie avec forte topologie), nous avons démontré que la suspension de structure en SiGe ne montrait pas de problèmes mécaniques particuliers.

Conclusion et perspectives

Ces trois années de travaux de thèse, résumées dans ce manuscrit, s'inscrivent dans une démarche de recherche technologique dont le but est le développement d'une plateforme photonique sur silicium pour le moyen infrarouge.

Premièrement, le domaine d'optique intégrée appliquée au domaine du MIR est un sujet de recherche relativement jeune. Comme nous avons pu le constater lors de l'état de l'art sur le sujet, il y a très peu de publications avant 2012-2013, voire aucune si l'on exclut tous les substrats à l'exception du Si et du SOI. Ainsi, parmi un champ de solutions techniques assez large, cette thèse a pris le parti d'axer le développement d'une plateforme MIR en utilisant les outils standards de microélectronique, sur *wafers* Si ou SOI 200 mm, pour fabriquer des guides à saut d'indice en $\text{Si}_{0,6}\text{Ge}_{0,4}$. Basés sur de précédents travaux au CEA-Leti sur des guides à gradient d'indice, ces guides avaient pour but de régler les problèmes de compacité et de contrôle de fabrication que présentaient les guides à gradient d'indice. Il s'est avéré que ces guides, en plus de régler ces problèmes, se trouvent être extrêmement performants avec, à notre connaissance, les plus faibles pertes par propagation rapportées, inférieures à $0,3 \text{ dB}\cdot\text{cm}^{-1}$. De plus, les performances des différents composants dimensionnés (virages, coupleurs, croisements et MMI), sont au moins aussi bonnes que leurs équivalents à gradient d'indice. Ainsi, les virages S présentent des pertes inférieures à $-0,07 \text{ dB/virage}$ et les croisements de l'ordre de $-0,1 \text{ dB/croisement}$. Les MMI et les coupleurs ont des équilibrages correspondant à la simulation. La capacité de multiplexage-démultiplexage de la plateforme a également été évaluée à travers la caractérisation d'un AWG. Les caractéristiques spectrales sont relativement en accord avec la simulation, avec cependant un décalage total du spectre de transmission de $7,14 \text{ cm}^{-1}$. On obtient ainsi un AWG ayant des performances équivalentes à ce que l'on pouvait obtenir avec des guides à gradient d'indice, mais avec une surface occupée 3,5 fois moins importantes. Ces résultats sont donc très encourageants pour le développement de nouveaux circuits optiques intégrés fonctionnant dans le MIR et démontre la pertinence de développer ce type de plateforme.

La problématique de PIC multi- λ , contraintes nécessaires pour certaines applications, a également été traitée dans ces travaux de thèse. Inspirée des procédés damascènes de la microélectronique, une technique alternative de fabrication a été explorée. Celle-ci consiste à non plus graver une couche de SiGe pour définir les guides, mais à graver des cavités, qui une fois remplies par le SiGe, formeront les guides optiques. Cette technique présente l'avantage d'obtenir des guides avec des dimensions (largeur et hauteur) très différentes, tout en gardant une surface plane, avec la face supérieure de tous les guides à la même hauteur. Cela permet par la suite, d'envisager l'intégration par collage de laser hybride QCL ou ICL. Cependant, le procédé damascène a présenté d'importants défauts lors de son évaluation. Tout d'abord, les rapports d'aspect hauteur/largeur ne peuvent être égales ou supérieures à 1. En effet, l'épitaxie SiGe présente des *voids* à partir de ce rapport d'aspect. Les guides précédemment caractérisés ne sont donc pas réalisables avec cette technologie. De plus, les pertes par propagation des guides sont extrêmement élevées, supérieures à $-4 \text{ dB}\cdot\text{cm}^{-1}$ en moyenne sur l'ensemble des guides de $2,7 \mu\text{m}$ de haut à $\lambda=4,5 \mu\text{m}$. Pour des guides moins épais ($1,3 \mu\text{m}$) et à une longueur d'onde également moindre ($\lambda=2,3 \mu\text{m}$), les pertes sont si élevées qu'aucune puissance optique en sortie des guides n'a pu être mesurée. Dans l'état actuelle de son développement, la technologie damascène semble donc peu prometteuse.

Enfin, dans un souci de pouvoir faire monter en maturité la plateforme développée et la caractériser plus en détails, des réseaux de couplage ont été fabriqués. En effet, ceux-ci permettent d'automatiser les phases de caractérisation des circuits à l'aide de *prober*. Les mesures sont faites à

même le *wafers*, sans préparation, et de façon statistique, donnant accès aux dispersions de performances entre le bord et le centre du *wafers* ainsi qu'entre deux *wafers*. Après une étude des différentes configurations possibles, deux structures de réseaux ont été choisies : une pour la gamme SWIR avec des inclusions d'air et une pour la gamme MWIR avec un guide localement suspendu. Le choix d'une structure suspendue permet de résoudre les problèmes d'efficacité de couplage rencontrés. En effet, les réseaux infrarouges simulés présentent des efficacités de l'ordre du pourcent alors que le réseau MWIR suspendu atteint 64 % d'efficacité de couplage. Leur dimensionnement a été fait à l'aide de simulations FDTD-2D couplées à un algorithme d'optimisation globale exploitant la méthode EGO, mis au point par Cédric Durantin. Ces réseaux ont ensuite été fabriqués pour démontrer leur faisabilité technologique. Malgré un défi technique important, les réseaux SWIR et MWIR ont été fabriqués avec succès. Le point négatif étant que des problèmes d'alignement de niveau de masque empêchent le réseau MWIR d'être fonctionnelle et d'être caractérisé. Néanmoins, nous avons pu démontrer la faisabilité de suspendre des membranes en SiGe, matériau contraint mécaniquement, de 700 nm d'épaisseur. Les réseaux MWIR ne pouvant être caractérisés, seuls les réseaux SWIR l'ont été. Ceux-ci ont révélés des efficacités de couplage de l'ordre de 3,6 %, en accord avec les simulations.

Les perspectives pour ce travail sont nombreuses car l'optique intégrée moyen infrarouge est un domaine encore jeune. Ainsi beaucoup de réalisations techniques restent à démontrer pour être à un niveau de complexité comparable à ce qui peut être fait en photonique SOI. Je pense, en particulier, à tout le travail qui reste à accomplir sur les composants actifs (source laser hybride, modulateur et photodétecteur) pour le moyen infrarouge qui n'ont pas été abordés dans cette thèse. Néanmoins si l'on se concentre sur la poursuite des thématiques abordées durant cette thèse, circuit passif et interconnexions optiques, deux axes de travail peuvent être définis.

Le premier serait de poursuivre les développements technologiques autour des guides. Les faibles pertes constatées ne sont pas encore bien expliquées, une compréhension plus fine de l'origine des pertes permettrait d'améliorer encore la plateforme. Ainsi, si comme on peut le supposer, les dislocations ne sont pas le mécanisme premier pour les pertes optiques, une étude sur la croissance de germanium pur sur silicium et l'impact sur les pertes optiques serait intéressante. Les travaux de Nedeljkovic *et al.* [144] vont dans ce sens et permettrait d'avoir des guides à faibles pertes, avec un plus fort contraste d'indice et couvrant une grande partie du MIR. Enfin, il faudrait également montrer expérimentalement les limites spectrales pour lesquelles les guides restent à faibles pertes. A ce jour, les domaines de transparence donnés dans la littérature ne sont que hypothèses théoriques.

Le second axe de travail pourrait être autour des interconnexions optiques. A travers cette thèse, nous avons pu voir que, pour un réseau de couplage classique, le compromis entre efficacité et facilité d'intégration n'était pas chose facile. D'autres solutions doivent être trouvés pour faciliter le couplage fibre à circuit. La force de couplage α étant faible sur les guides développés, une solution pourrait être la mise au point de réseau à couplage vertical très long (\sim mm) et apodisé afin que leur point de focalisation se situe à plusieurs millimètres au-dessus de la surface de la puce. Ainsi, il serait possible d'atteindre des efficacités de couplages de l'ordre de 50 %, au détriment de la compacité. L'équipe de Ura *et al* [230] a théorisé le fonctionnement d'un réseau de couplage résonant qui, sans compromis de compacité, permettrait d'atteindre des efficacités de couplage importante même avec un faible contraste d'indice. Enfin, une dernière voie en dehors des réseaux de couplage, serait de venir graver des cavités à 45° dans les guides et de les recouvrir d'or pour constituer des miroirs qui viendraient réfléchir la lumière venant d'une fibre directement dans le guide.

Bibliographie

- [1] T. Salditt, S. Hoffmann, M. Vassholz, J. Haber, M. Osterhoff, and J. Hilhorst, “X-Ray Optics on a Chip: Guiding X Rays in Curved Channels,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 115, no. 20, p. 203902, Nov. 2015.
- [2] M. Bozzi, A. Georgiadis, and K. Wu, “Review of substrate-integrated waveguide circuits and antennas,” *Antennas Propag. IET Microw.*, vol. 5, no. 8, pp. 909–920, Jun. 2011.
- [3] D. Colladon, “Sur les réflexions d’un rayon de lumière à l’intérieur d’une veine liquide parabolique,” *Comptes Rendus*, vol. 15, no. 1800, 1842.
- [4] J. Babinet, “Note sur la transmission de la lumière par des canaux sinueux,” *Comptes Rendus*, vol. 15, p. 802, 1842.
- [5] “File:DanielColladon’s Lightfountain or Lightpipe,LaNature(magazine),1884.JPG - Wikimedia Commons.” [Online]. Available: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:DanielColladon%27s_Lightfountain_or_Lightpipe,LaNature\(magazine\),1884.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:DanielColladon%27s_Lightfountain_or_Lightpipe,LaNature(magazine),1884.JPG). [Accessed: 03-Apr-2017].
- [6] R. Descartes, *Œuvres de Descartes*, vol. tome V. F. G. Levrault, 1824.
- [7] J. C. Maxwell, “A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field,” *Philos. Trans. R. Soc. Lond.*, vol. 155, pp. 459–512, Jan. 1865.
- [8] J. Hecht, *City of Light: The Story of Fiber Optics*. Oxford University Press, 2004.
- [9] T. H. Maiman, “Stimulated Optical Radiation in Ruby,” *Nature*, vol. 187, no. 4736, pp. 493–494, Aug. 1960.
- [10] K. C. Kao and G. A. Hockham, “Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies,” *Proc. Inst. Electr. Eng.*, vol. 113, no. 7, pp. 1151–1158, Jul. 1966.
- [11] A. Javan, W. R. Bennett, and D. R. Herriott, “Population Inversion and Continuous Optical Maser Oscillation in a Gas Discharge Containing a He-Ne Mixture,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 6, no. 3, pp. 106–110, Feb. 1961.
- [12] “TAT-8 - Wikipedia.” [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/TAT-8>. [Accessed: 03-Mar-2017].
- [13] S. E. Miller, “Integrated Optics: An Introduction,” *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 48, no. 7, pp. 2059–2069, Sep. 1969.
- [14] B. Szilag *et al.*, “Multiple wavelength silicon photonic 200 mm R+D platform for 25Gb/s and above applications,” 2016, vol. 9891, p. 98911C–98911C–15.
- [15] E. le Coarer *et al.*, “Wavelength-scale stationary-wave integrated Fourier-transform spectrometry,” *Nat. Photonics*, vol. 1, no. 8, pp. 473–478, Aug. 2007.
- [16] D. J. Moss, R. Morandotti, A. L. Gaeta, and M. Lipson, “New CMOS-compatible platforms based on silicon nitride and Hydex for nonlinear optics,” *Nat. Photonics*, vol. 7, no. 8, pp. 597–607, Aug. 2013.
- [17] T. Kurokawa and S. Oikawa, “Optical waveguide intersections without light leak,” *Appl. Opt.*, vol. 16, no. 4, p. 1033, Apr. 1977.
- [18] W. J. Tomlinson, I. P. Kaminow, E. A. Chandross, R. L. Fork, and W. T. Silfvast, “Photoinduced refractive index increase in poly(methylmethacrylate) and its applications,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 16, no. 12, pp. 486–489, Jun. 1970.

- [19] H. Ma, A. k.-Y. Jen, and L. r. Dalton, "Polymer-Based Optical Waveguides: Materials, Processing, and Devices," *Adv. Mater.*, vol. 14, no. 19, pp. 1339–1365, Oct. 2002.
- [20] M. U. Khan *et al.*, "Multi-level single mode 2D polymer waveguide optical interconnects using nano-imprint lithography," *Opt. Express*, vol. 23, no. 11, p. 14630, Jun. 2015.
- [21] H. Huang *et al.*, "Broadband Modulation Performance of 100-GHz EO Polymer MZMs," *J. Light. Technol.*, vol. 30, no. 23, pp. 3647–3652, Dec. 2012.
- [22] Z. Zhang *et al.*, "Hybrid Photonic Integration on a Polymer Platform," *Photonics*, vol. 2, no. 3, pp. 1005–1026, Sep. 2015.
- [23] "Measurement of Optical Characteristic of Plastic by UH4150 Spectrophotometer." [Online]. Available: http://www.hitachi-hightech.com/products/images/10960/uh4150_data1_e.pdf. [Accessed: 05-Apr-2017].
- [24] M. Kagami, T. Yamashita, and H. Ito, "Polymer optical waveguide devices for low-cost WDM module," 2000, vol. 4106, pp. 11–20.
- [25] J. Nagata, S. Honma, M. Morisawa, and S. Muto, "Development of polymer optical waveguide-type alcohol sensor," 2007, vol. 6829, pp. 682920–682920–8.
- [26] T. Pradell *et al.*, "Ionic-Exchange Mechanism in the Formation of Medieval Luster Decorations," *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 88, no. 5, pp. 1281–1289, May 2005.
- [27] A. K. Varshneya, "Chemical Strengthening of Glass: Lessons Learned and Yet To Be Learned," *Int. J. Appl. Glass Sci.*, vol. 1, no. 2, pp. 131–142, Jun. 2010.
- [28] H. Osterberg and L. W. Smith, "Transmission of Optical Energy Along Surfaces: Part II, Inhomogeneous Media," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 54, no. 9, p. 1078, Sep. 1964.
- [29] A. D. Pearson, W. G. French, and E. G. Rawson, "Preparation of a light focusing glass rod by ion-exchange techniques," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 15, no. 2, pp. 76–77, Jul. 1969.
- [30] J. E. Goell and R. D. Standley, "Integrated optical circuits," *Proc. IEEE*, vol. 58, no. 10, pp. 1504–1512, Oct. 1970.
- [31] T. Izawa and H. Nakagome, "Optical waveguide formed by electrically induced migration of ions in glass plates," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 21, no. 12, pp. 584–586, Dec. 1972.
- [32] A. Tervonen, B. R. West, and S. Honkanen, "Ion-exchanged glass waveguide technology: a review," *Opt. Eng.*, vol. 50, no. 7, pp. 071107-071107-15, 2011.
- [33] R. Rogoziński and P. Karasiński, "Optical waveguides produced in ion exchange process from the solutions of AgNO₃-NaNO₃ for planar chemical amplitude sensors," *Opto - Electron. Rev.*, no. Vol. 13, No. 3, pp. 229–238, 2005.
- [34] M. Kufner and S. Kufner, "Ion exchange technology for optical waveguides," *Opt. Photonik*, vol. 6, no. 4, pp. 32–34, Dec. 2011.
- [35] S. J. Hettrick, J. I. Mackenzie, R. D. Harris, J. S. Wilkinson, D. P. Shepherd, and A. C. Tropper, "Ion-exchanged tapered-waveguide laser in neodymium-doped BK7 glass," *Opt. Lett.*, vol. 25, no. 19, p. 1433, Oct. 2000.
- [36] "Gould Fiber Optics. US based manufacturer of fiber optic products (Couplers, Splitters and combiners)," *Gould Fiber Optics*, 21-Apr-2016. [Online]. Available: <http://gouldfo.com/>. [Accessed: 06-Apr-2017].
- [37] E. Laurent *et al.*, "Integrated optics for astronomical interferometry - V. Extension to the K band," *Astron. Astrophys.*, vol. 390, no. 3, pp. 1171–1176, Aug. 2002.
- [38] M. c. Estevez, M. Alvarez, and L. m. Lechuga, "Integrated optical devices for lab-on-a-chip biosensing applications," *Laser Photonics Rev.*, vol. 6, no. 4, pp. 463–487, Jul. 2012.

- [39] J. J. Coleman, "The development of the semiconductor laser diode after the first demonstration in 1962," *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 27, no. 9, p. 090207, 2012.
- [40] A. Yariv and R. C. C. Leite, "Dielectric-waveguide mode of light propagation in p-n junctions," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 2, no. 3, pp. 55–57, Feb. 1963.
- [41] J. C. Tracy, W. Wiegman, R. A. Logan, and F. K. Reinhart, "Three-dimensional light guides in single-crystal GaAs–Al_xGa_{1-x}As," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 22, no. 10, pp. 511–512, May 1973.
- [42] S. Somekh, E. Garmire, A. Yariv, H. L. Garvin, and R. G. Hunsperger, "Channel optical waveguide directional couplers," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 22, no. 1, pp. 46–47, Jan. 1973.
- [43] U. Koren, T. L. Koch, B. I. Miller, G. Eisenstein, and R. H. Bosworth, "Wavelength division multiplexing light source with integrated quantum well tunable lasers and optical amplifiers," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 54, no. 21, pp. 2056–2058, May 1989.
- [44] M. Smit *et al.*, "An introduction to InP-based generic integration technology," *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 29, no. 8, p. 083001, 2014.
- [45] S. Adachi, "Model dielectric constants of GaP, GaAs, GaSb, InP, InAs, and InSb," *Phys. Rev. B*, vol. 35, no. 14, pp. 7454–7463, May 1987.
- [46] L.-H. Peng, T. Broekaert, W. Y. Choi, C. Fonstad, and V. Jones, "Defect activated infrared multiphonon excitation in iron-doped semi-insulating indium phosphide," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 59, no. 5, pp. 564–566, Jul. 1991.
- [47] W. Bi and A. Li, "The dispersion of the refractive index of III-V semiconductors," *J. Appl. Phys.*, vol. 71, no. 6, pp. 2826–2829, Mar. 1992.
- [48] S. Seifert and P. Runge, "Revised refractive index and absorption of In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y} lattice-matched to InP in transparent and absorption IR-region," *Opt. Mater. Express*, vol. 6, no. 2, pp. 629–639, Feb. 2016.
- [49] K. Lawniczuk *et al.*, "InP-Based Photonic Multiwavelength Transmitter With DBR Laser Array," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 25, no. 4, pp. 352–354, Feb. 2013.
- [50] "Jeppix," *Jeppix 2017*. [Online]. Available: <http://www.jeppix.eu/>. [Accessed: 06-Mar-2017].
- [51] "Infinera," *Infinera*. [Online]. Available: <https://www.infinera.com/>. [Accessed: 06-Apr-2017].
- [52] R. A. Soref and J. P. Lorenzo, "Single-crystal silicon: a new material for 1.3 and 1.6 μm integrated-optical components," *Electron. Lett.*, vol. 21, no. 21, pp. 953–954, Oct. 1985.
- [53] K. Worhoff, P. V. Lambeck, and A. Driessen, "Design, tolerance analysis, and fabrication of silicon oxynitride based planar optical waveguides for communication devices," *J. Light. Technol.*, vol. 17, no. 8, pp. 1401–1407, Aug. 1999.
- [54] A. Gorin, A. Jaouad, E. Grondin, V. Aimez, and P. Charette, "Fabrication of silicon nitride waveguides for visible-light using PECVD: a study of the effect of plasma frequency on optical properties," *Opt. Express*, vol. 16, no. 18, pp. 13509–13516, Sep. 2008.
- [55] A. M. Agarwal, L. Liao, J. S. Foresi, M. R. Black, X. Duan, and K. C. Kimerling, "Low-loss polycrystalline silicon waveguides for silicon photonics," *J. Appl. Phys.*, vol. 80, no. 11, pp. 6120–6123, Dec. 1996.
- [56] R. A. Soref and K. J. Ritter, "Silicon antiresonant reflecting optical waveguides," *Opt. Lett.*, vol. 15, no. 14, p. 792, Jul. 1990.
- [57] Y. A. Vlasov, M. O'Boyle, H. F. Hamann, and S. J. McNab, "Active control of slow light on a chip with photonic crystal waveguides," *Nature*, vol. 438, no. 7064, pp. 65–69, Nov. 2005.
- [58] R. Soref, "Silicon photonics technology: past, present, and future," 2005, vol. 5730, pp. 19–28.

- [59] W. Bogaerts *et al.*, “Basic structures for photonic integrated circuits in Silicon-on-insulator,” *Opt. Express*, vol. 12, no. 8, pp. 1583–1591, Apr. 2004.
- [60] D. J. Thomson *et al.*, “50-Gb/s Silicon Optical Modulator,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 24, no. 4, pp. 234–236, Feb. 2012.
- [61] L. Virost *et al.*, “Germanium avalanche receiver for low power interconnects,” *Nat. Commun.*, vol. 5, p. 4957, Sep. 2014.
- [62] J. Bowers *et al.*, “Integrated Optical Amplifiers on Silicon Waveguides,” in *Integrated Photonics and Nanophotonics Research and Applications / Slow and Fast Light (2007)*, paper ITuG1, 2007, p. ITuG1.
- [63] H. Duprez, C. Jany, C. Seassal, and B. B. Bakir, “Highly tunable heterogeneously integrated III-V on silicon sampled-grating distributed Bragg reflector lasers operating in the O-band,” *Opt. Express*, vol. 24, no. 18, pp. 20895–20903, Sep. 2016.
- [64] M. Piels, J. F. Bauters, M. L. Davenport, M. J. R. Heck, and J. E. Bowers, “Low-Loss Silicon Nitride AWG Demultiplexer Heterogeneously Integrated With Hybrid III–V/Silicon Photodetectors,” *J. Light. Technol.*, vol. 32, no. 4, pp. 817–823, Feb. 2014.
- [65] B. Ben Bakir *et al.*, “Electrically driven hybrid Si/III-V Fabry-Pérot lasers based on adiabatic mode transformers,” *Opt. Express*, vol. 19, no. 11, pp. 10317–10325, mai 2011.
- [66] “Home — Luxtera.” [Online]. Available: <http://www.luxtera.com/>. [Accessed: 25-Apr-2016].
- [67] “Mellanox Technologies: End-to-End InfiniBand and Ethernet Interconnect Solutions and Services.” [Online]. Available: <http://www.mellanox.com/index.php>. [Accessed: 06-Apr-2017].
- [68] L. Liu *et al.*, “An ultra-small, low-power, all-optical flip-flop memory on a silicon chip,” *Nat. Photonics*, vol. 4, no. 3, pp. 182–187, Mar. 2010.
- [69] A. L. Washburn, M. S. Luchansky, M. S. McClellan, and R. C. Bailey, “Label-free, multiplexed biomolecular analysis using arrays of silicon photonic microring resonators,” *Procedia Eng.*, vol. 25, pp. 63–66, Jan. 2011.
- [70] T. Michels, I. W. Rangelow, and V. Aksyuk, “Cantilever array with optomechanical read-out and integrated actuation for simultaneous high sensitivity force detection,” in *2016 International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics (OMN)*, 2016, pp. 1–2.
- [71] D. Thomson *et al.*, “Roadmap on silicon photonics,” *J. Opt.*, vol. 18, no. 7, p. 073003, 2016.
- [72] S. Valette, *Integrated Optics: The history and the future*. .
- [73] M. Hochberg and T. Baehr-Jones, “Towards fabless silicon photonics,” *Nat. Photonics*, vol. 4, no. 8, pp. 492–494, Aug. 2010.
- [74] “The tipping point for silicon photonics | Fibre Systems.” [Online]. Available: <http://www.fibre-systems.com/feature/tipping-point-silicon-photonics>. [Accessed: 08-Mar-2017].
- [75] M. J. R. Heck, M. L. Davenport, and J. E. Bowers, “Progress in hybrid-silicon photonic integrated circuit technology,” *SPIE Newsroom*, Feb. 2013.
- [76] J. Pleumeekers *et al.*, “Manufacturing progress for InP-based 500 Gb/s photonic integrated circuits,” in *CS Mantech Conference*, 2013, pp. 19–22.
- [77] “Yole Développement, MEMS, Compound Semiconductors, Advanced Packaging, PV, 3D-IC, LED, Optoelectronics, Power Electronics, Microfluidic, Imaging, CMOS image sensors, CIS, technology market research technology analysis strategy consulting firm - HOME.” [Online]. Available: <http://www.yole.fr/>. [Accessed: 04-Mar-2017].

- [78] “Spectroscopie infrarouge,” *Wikipédia*. 14-May-2016.
- [79] A. Lefebvre, *Simulation et conception de microsources infrarouges nanophotoniques pour la détection de gaz*. Paris Saclay, 2015.
- [80] *Gas Detection Handbook*, 5th ed. MSA, The Safety Company, 2007.
- [81] J. Hodgkinson and R. P. Tatam, “Optical gas sensing: a review,” *Meas. Sci. Technol.*, vol. 24, no. 1, p. 012004, 2013.
- [82] “Altech USA,” *Altech U.S.A.* [Online]. Available: <http://www.altechusa.com>. [Accessed: 15-Mar-2017].
- [83] “Gasera Ltd - Ultimate performance gas analysis,” *Gasera*. [Online]. Available: <http://www.gasera.fi/>. [Accessed: 15-Mar-2017].
- [84] P. Didier, “Propriétés optiques de marqueurs fluorescents d’intérêt biologique en interaction avec leur environnement : étude par spectroscopie femtoseconde,” phdthesis, Université Louis Pasteur - Strasbourg I, 2004.
- [85] “Cellule (biologie),” *Wikipédia*. 07-Jan-2017.
- [86] “Coloration de Gram,” *Wikipédia*. 29-Nov-2016.
- [87] “Microscopie à fluorescence,” *Wikipédia*. 01-Feb-2017.
- [88] “Daylight Solutions » Daylight Solutions - The source for all mid-IR applications - QCL.” [Online]. Available: <http://www.daylightsolutions.com/>. [Accessed: 20-Mar-2017].
- [89] M. J. Pilling, A. Henderson, B. Bird, M. D. Brown, N. W. Clarke, and P. Gardner, “High-throughput quantum cascade laser (QCL) spectral histopathology: a practical approach towards clinical translation,” *Faraday Discuss.*, vol. 187, no. 0, pp. 135–154, Jun. 2016.
- [90] A. Glière, J. Rouxel, M. Brun, B. Parvitte, V. Zéninari, and S. Nicoletti, “Challenges in the Design and Fabrication of a Lab-on-a-Chip Photoacoustic Gas Sensor,” *Sensors*, vol. 14, no. 1, pp. 957–974, Jan. 2014.
- [91] S. Nicoletti *et al.*, “Challenges in the realization of a fully integrated optical lab-on-chip,” in *IEEE SENSORS 2014 Proceedings*, 2014, pp. 649–652.
- [92] D. Ozcelik *et al.*, “Optofluidic wavelength division multiplexing for single-virus detection,” *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 112, no. 42, pp. 12933–12937, Oct. 2015.
- [93] “ESRF home page.” [Online]. Available: <http://www.esrf.eu/>. [Accessed: 21-Mar-2017].
- [94] M. Tacke, “Lead–salt lasers,” *Philos. Trans. R. Soc. Lond. Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 359, no. 1780, pp. 547–566, Mar. 2001.
- [95] Y. Yao, A. J. Hoffman, and C. F. Gmachl, “Mid-infrared quantum cascade lasers,” *Nat. Photonics*, vol. 6, no. 7, pp. 432–439, Jul. 2012.
- [96] M. S. Vitiello, G. Scalari, B. Williams, and P. D. Natale, “Quantum cascade lasers: 20 years of challenges,” *Opt. Express*, vol. 23, no. 4, pp. 5167–5182, Feb. 2015.
- [97] B. S. Williams, “Terahertz quantum-cascade lasers,” *Nat. Photonics*, vol. 1, no. 9, pp. 517–525, Sep. 2007.
- [98] J. Faist, F. Capasso, D. L. Sivco, C. Sirtori, A. L. Hutchinson, and A. Y. Cho, “Quantum cascade laser,” *Science*, vol. 264, no. 5158, pp. 553–556, Apr. 1994.
- [99] I. Vurgaftman *et al.*, “Interband cascade lasers,” *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. 48, no. 12, p. 123001, 2015.

- [100] R. Q. Yang, J. L. Bradshaw, J. D. Bruno, J. T. Pham, and D. E. Wortman, “Mid-infrared type-II interband cascade lasers,” *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 38, no. 6, pp. 559–568, Jun. 2002.
- [101] M. Poulain, M. Poulain, and J. Lucas, “Verres fluores au tetrafluorure de zirconium proprietes optiques d’un verre dope au Nd³⁺,” *Mater. Res. Bull.*, vol. 10, no. 4, pp. 243–246, Apr. 1975.
- [102] Thorlabs, “Mid-Infrared Optical Fiber, Fiber Patch Cables, and Bundles.” [Online]. Available: https://www.thorlabs.de/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=7062. [Accessed: 11-Jan-2016].
- [103] “Le Verre Fluoré, Fluoride Glass Experts: IR fiber, glass fiber, single mode, multimode optical fiber,” *Le Verre Fluoré*. [Online]. Available: <http://leverrefluore.com/>. [Accessed: 27-Mar-2017].
- [104] A. R. Hilton, *Chalcogenide Glasses for Infrared Optics*, 1st ed. McGraw-Hill Professional, 2009.
- [105] J. –. A. and X. Z. (Eds.), *Chalcogenide Glasses. Preparation, Properties and Applications*, 1st ed. Woodhead Publishing, 2014.
- [106] B. Bureau, C. Boussard, J.-L. Adam, and J. Lucas, “Les verres de chalcogénures et leurs applications,” *Photoniques*, no. 6, pp. 32–35, 2002.
- [107] “SelenOptics - Infrared fibers,” *SelenOptics - Infrared fibers*. [Online]. Available: <http://selenoptics-web.wixsite.com/optics>. [Accessed: 26-Mar-2017].
- [108] M. J. Weber, *Handbook of optical materials*. CRC Press, 2003.
- [109] “Hybrid integration of GaAs quantum cascade lasers with Si substrates by thermocompression bonding,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 92, no. 5, p. 051117, Feb. 2008.
- [110] A. Spott *et al.*, “Quantum cascade laser on silicon,” *Optica*, vol. 3, no. 5, pp. 545–551, May 2016.
- [111] Y.-H. Zhu, Q. Xu, W.-J. Fan, and J.-W. Wang, “Theoretical gain of strained GeSn_{0.02}/Ge_{1-x-y}Si_xSny quantum well laser,” *J. Appl. Phys.*, vol. 107, no. 7, p. 073108, Apr. 2010.
- [112] S. Wirths *et al.*, “Lasing in direct-bandgap GeSn alloy grown on Si,” *Nat. Photonics*, vol. 9, no. 2, pp. 88–92, Feb. 2015.
- [113] “Strain-free Ge/GeSiSn quantum cascade lasers based on L-valley intersubband transitions,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 90, no. 25, p. 251105, Jun. 2007.
- [114] L. Shen *et al.*, “Mid-infrared all-optical modulation in low-loss germanium-on-silicon waveguides,” *Opt. Lett.*, vol. 40, no. 2, p. 268, Jan. 2015.
- [115] M. Nedeljkovic, R. Soref, and G. Z. Mashanovich, “Predictions of Free-Carrier Electroabsorption and Electrorefraction in Germanium,” *IEEE Photonics J.*, vol. 7, no. 3, pp. 1–14, Jun. 2015.
- [116] M. Leester-Schädel, T. Lorenz, F. Jürgens, and C. Richter, “Fabrication of Microfluidic Devices,” in *Microsystems for Pharmatechnology*, A. Dietzel, Ed. Springer International Publishing, 2016, pp. 23–57.
- [117] C. Gilles, L. J. Orbe, G. Carpintero, G. Maisons, and M. Carras, “Mid-infrared wavelength multiplexer in InGaAs/InP waveguides using a Rowland circle grating,” *Opt. Express*, vol. 23, no. 16, p. 20288, Aug. 2015.

- [118] A. Malik, M. Muneeb, Y. Shimura, J. V. Campenhout, R. Loo, and G. Roelkens, “Germanium-on-silicon planar concave grating wavelength (de)multiplexers in the mid-infrared,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 103, no. 16, p. 161119, Oct. 2013.
- [119] R. Soref, “Mid-infrared photonics in silicon and germanium,” *Nat. Photonics*, vol. 4, no. 8, pp. 495–497, Aug. 2010.
- [120] M. Nedeljkovic, A. Z. Khokhar, G. Z. Mashanovich, A. V. Velasco, and P. Cheben, “Silicon-on-insulator spatial heterodyne spectrometer chip for the mid-infrared,” in *2015 IEEE 12th International Conference on Group IV Photonics (GFP)*, 2015, pp. 195–196.
- [121] M. Nedeljkovic, A. V. Velasco, A. Z. Khokhar, A. Delage, P. Cheben, and G. Z. Mashanovich, “Mid-Infrared Silicon-on-Insulator Fourier-Transform Spectrometer Chip,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 28, no. 4, pp. 528–531, Feb. 2016.
- [122] G. Z. Mashanovich *et al.*, “Silicon Photonic Waveguides and Devices for Near- and Mid-IR Applications,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 21, no. 4, pp. 407–418, Jul. 2015.
- [123] V. Singh *et al.*, “Mid-infrared materials and devices on a Si platform for optical sensing,” *Sci. Technol. Adv. Mater.*, vol. 15, no. 1, p. 014603, 2014.
- [124] P. T. Lin *et al.*, “Si-CMOS compatible materials and devices for mid-IR microphotonics,” *Opt. Mater. Express*, vol. 3, no. 9, p. 1474, Sep. 2013.
- [125] P. T. Lin, V. Singh, Y. Cai, L. C. Kimerling, and A. Agarwal, “Air-clad silicon pedestal structures for broadband mid-infrared microphotonics,” *Opt. Lett.*, vol. 38, no. 7, pp. 1031–1033, Apr. 2013.
- [126] Z. Cheng *et al.*, “Focusing subwavelength grating coupler for mid-infrared suspended membrane waveguide,” *Opt. Lett.*, vol. 37, no. 7, p. 1217, Apr. 2012.
- [127] Z. Cheng, X. Chen, C. Y. Wong, K. Xu, and H. K. Tsang, “Mid-infrared Suspended Membrane Waveguide and Ring Resonator on Silicon-on-Insulator,” *IEEE Photonics J.*, vol. 4, no. 5, pp. 1510–1519, Oct. 2012.
- [128] J. Soler Penadés *et al.*, “Suspended SOI waveguide with sub-wavelength grating cladding for mid-infrared,” *Opt. Lett.*, vol. 39, no. 19, p. 5661, Oct. 2014.
- [129] J. S. Penades *et al.*, “Suspended silicon mid-infrared waveguide devices with subwavelength grating metamaterial cladding,” *Opt. Express*, vol. 24, no. 20, pp. 22908–22916, Oct. 2016.
- [130] Z. Cheng, X. Chen, C. Y. Wong, K. Xu, and H. K. Tsang, “Broadband focusing grating couplers for suspended-membrane waveguides,” *Opt. Lett.*, vol. 37, no. 24, pp. 5181–5183, Dec. 2012.
- [131] T. Baehr-Jones *et al.*, “Silicon-on-sapphire integrated waveguides for the mid-infrared,” *Opt. Express*, vol. 18, no. 12, pp. 12127–12135, Jun. 2010.
- [132] A. Spott, Y. Liu, T. Baehr-Jones, R. Ilic, and M. Hochberg, “Silicon waveguides and ring resonators at 5.5 μm ,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 97, no. 21, p. 213501, Nov. 2010.
- [133] F. Li *et al.*, “Low propagation loss silicon-on-sapphire waveguides for the mid-infrared,” *Opt. Express*, vol. 19, no. 16, pp. 15212–15220, Aug. 2011.
- [134] S. Khan, J. Chiles, J. Ma, and S. Fathpour, “Silicon-on-nitride waveguides for mid- and near-infrared integrated photonics,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 102, no. 12, p. 121104, Mar. 2013.
- [135] R. A. Soref, S. J. Emelett, and W. R. Buchwald, “Silicon waveguided components for the long-wave infrared region,” *J. Opt. Pure Appl. Opt.*, vol. 8, no. 10, p. 840, Oct. 2006.

- [136] M. A. Duguay, Y. Kokubun, T. L. Koch, and L. Pfeiffer, "Antiresonant reflecting optical waveguides in SiO₂-Si multilayer structures," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 49, no. 1, pp. 13–15, Jul. 1986.
- [137] G. Z. Mashanovich *et al.*, "Silicon waveguides for the mid-infrared wavelength region," 2008, vol. 6898, p. 68980T–68980T–7.
- [138] R. Bernini, S. Campopiano, and L. Zeni, "Silicon micromachined hollow optical waveguides for sensing applications," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 8, no. 1, pp. 106–110, Jan. 2002.
- [139] H. Schmidt, D. Yin, J. P. Barber, and A. R. Hawkins, "Hollow-core waveguides and 2-D waveguide arrays for integrated optics of gases and liquids," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 11, no. 2, pp. 519–527, Mar. 2005.
- [140] E. Epp *et al.*, "Hollow Bragg waveguides fabricated by controlled buckling of Si/SiO₂ multilayers," *Opt. Express*, vol. 18, no. 24, p. 24917, Nov. 2010.
- [141] O. Madelung, *Semiconductors: Data Handbook*, 3rd ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004.
- [142] Y.-C. Chang, V. Paeder, L. Hvozdar, J.-M. Hartmann, and H. P. Herzig, "Low-loss germanium strip waveguides on silicon for the mid-infrared," *Opt. Lett.*, vol. 37, no. 14, p. 2883, Jul. 2012.
- [143] A. Malik *et al.*, "Germanium-on-Silicon Mid-Infrared Arrayed Waveguide Grating Multiplexers," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 25, no. 18, pp. 1805–1808, Sep. 2013.
- [144] M. Nedeljkovic *et al.*, "Surface-Grating-Coupled Low-Loss Ge-on-Si Rib Waveguides and Multimode Interferometers," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 27, no. 10, pp. 1040–1043, May 2015.
- [145] J. M. Ramirez *et al.*, "Ge-rich SiGe waveguides for mid-infrared photonics," in *Proceedings SPIE*, 2017, vol. 10108, pp. 1010812-1010812–6.
- [146] C. Grillet *et al.*, "Low loss SiGe waveguides in the MID-IR," in *Lasers and Electro-Optics Europe (CLEO EUROPE/IQEC), 2013 Conference on and International Quantum Electronics Conference*, 2013, pp. 1–1.
- [147] W. Du *et al.*, "Silicon-based Ge_{0.89}Sn_{0.11} photodetector and light emitter towards mid-infrared applications," in *Silicon Photonics XII*, 2017, vol. 10108, pp. 1010813-1010813–8.
- [148] M. Nedeljkovic *et al.*, "Silicon photonic devices and platforms for the mid-infrared," *Opt. Mater. Express*, vol. 3, no. 9, pp. 1205–1214, Sep. 2013.
- [149] M. Brun *et al.*, "Low loss SiGe graded index waveguides for mid-IR applications," *Opt. Express*, vol. 22, no. 1, p. 508, Jan. 2014.
- [150] J. C. Maxwell, "A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field.," *Proc. R. Soc. Lond.*, vol. 13, pp. 531–536, 1863.
- [151] A. W. Snyder and J. D. Love, *Optical Waveguide Theory*, 1st ed. Springer US, 1983.
- [152] D. L. Lee, *Electromagnetic principles of integrated optics*. John Wiley & Sons, Inc.
- [153] K. Okamoto, *Fundamentals of Optical Waveguides*. Academic Press, 1992.
- [154] G. T. Reed and A. P. Knights, *Silicon Photonics - an Introduction*. Wiley, 2004.
- [155] F. Ladouceur and J. D. Love, *Silica-based Buried Channel Waveguides and Devices*, 1st ed. Springer Netherlands, 1995.

- [156] P. Janassek, S. Hartmann, A. Molitor, F. Michel, and W. Elsässer, “Investigations of the polarization behavior of quantum cascade lasers by Stokes parameters,” *Opt. Lett.*, vol. 41, no. 2, pp. 305–308, Jan. 2016.
- [157] F. Ladouceur and P. Labeye, “A new general approach to optical waveguide path design,” *J. Light. Technol.*, vol. 13, no. 3, pp. 481–492, Mar. 1995.
- [158] E. a. J. Marcatili, “Bends in Optical Dielectric Guides,” *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 48, no. 7, pp. 2103–2132, Sep. 1969.
- [159] E. a. J. Marcatili and S. E. Miller, “Improved Relations Describing Directional Control in Electromagnetic Wave Guidance,” *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 48, no. 7, pp. 2161–2188, Sep. 1969.
- [160] E. C. M. Pennings, “Bends in optical ridge waveguides: Modeling and experiments,” Doctoral thesis, Delft University of Technology, Delft, 1990.
- [161] F. Ladouceur and J. D. Love, “X-junctions in buried channel waveguides,” *Opt. Quantum Electron.*, vol. 24, no. 12, pp. 1373–1379, Dec. 1992.
- [162] S. S. Gevorgyan and A. B. Hovsepyan, “The optical power distribution and scattering losses in symmetric channel waveguide X-junctions,” *Opt. Quantum Electron.*, vol. 23, no. 5, pp. 649–656, May 1991.
- [163] P. Sanchis, J. V. Galan, A. Griol, J. Marti, M. A. Piqueras, and J. M. Perdignes, “Low-Crosstalk in Silicon-On-Insulator Waveguide Crossings With Optimized-Angle,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 19, no. 20, pp. 1583–1585, Oct. 2007.
- [164] W. Bogaerts, P. Dumon, D. V. Thourhout, and R. Baets, “Low-loss, low-cross-talk crossings for silicon-on-insulator nanophotonic waveguides,” *Opt. Lett.*, vol. 32, no. 19, p. 2801, Oct. 2007.
- [165] F. Shinobu, Y. Arita, and T. Baba, “Low-loss simple waveguide intersection in silicon photonics,” *Electron. Lett.*, vol. 46, no. 16, pp. 1149–1151, Aug. 2010.
- [166] X. Li, H. Xu, X. Xiao, Z. Li, J. Yu, and Y. Yu, “Demonstration of a highly efficient multimode interference based silicon waveguide crossing,” *Opt. Commun.*, vol. 312, pp. 148–152, Feb. 2014.
- [167] S. Darmawan, S.-Y. Lee, C.-W. Lee, and M.-K. Chin, “A rigorous comparative analysis of directional couplers and multimode Interferometers based on ridge waveguides,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 11, no. 2, pp. 466–475, Mar. 2005.
- [168] O. Bryngdahl, “Image formation using self-imaging techniques,” *JOSA*, vol. 63, no. 4, pp. 416–419, Apr. 1973.
- [169] T. Mulugeta and M. Rasras, “Silicon hybrid (de)multiplexer enabling simultaneous mode and wavelength-division multiplexing,” *Opt. Express*, vol. 23, no. 2, pp. 943–949, Jan. 2015.
- [170] T. Uematsu, Y. Ishizaka, Y. Kawaguchi, K. Saitoh, and M. Koshiba, “Design of a Compact Two-Mode Multi/Demultiplexer Consisting of Multimode Interference Waveguides and a Wavelength-Insensitive Phase Shifter for Mode-Division Multiplexing Transmission,” *J. Light. Technol.*, vol. 30, no. 15, pp. 2421–2426, Aug. 2012.
- [171] M. K. Murad, “Integrated High Brightness array semiconductor lasers incorporating multimode interference couplers,” 2011.
- [172] L. B. Soldano and E. C. M. Pennings, “Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: principles and applications,” *J. Light. Technol.*, vol. 13, no. 4, pp. 615–627, Apr. 1995.

- [173] A. Yariv, “Coupled-mode theory for guided-wave optics,” *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 9, no. 9, pp. 919–933, Sep. 1973.
- [174] W.-P. Huang, “Coupled-mode theory for optical waveguides: an overview,” *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 11, no. 3, pp. 963–983, Mar. 1994.
- [175] B. G. Lee *et al.*, “DFB Quantum Cascade Laser Arrays,” *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 45, no. 5, pp. 554–565, May 2009.
- [176] G. Winzer, H. F. Mahlein, and A. Reichelt, “Single-mode and multimode all-fiber directional couplers for WDM,” *Appl. Opt.*, vol. 20, no. 18, pp. 3128–3135, Sep. 1981.
- [177] S. Kumagai, T. Shioda, and T. Kurokawa, “Wavelength division multiplexer based on multimode interference waveguide,” in *Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, 2005. CLEO/Pacific Rim 2005*, 2005, pp. 301–303.
- [178] F. Horst, W. M. J. Green, S. Assefa, S. M. Shank, Y. A. Vlasov, and B. J. Offrein, “Cascaded Mach-Zehnder wavelength filters in silicon photonics for low loss and flat pass-band WDM (de-)multiplexing,” *Opt. Express*, vol. 21, no. 10, pp. 11652–11658, May 2013.
- [179] C. Chauveau, P. Labeye, J.-M. Fedeli, J. Hazart, S. Blaize, and G. Lerondel, “Validation of an analytical model of Si-ring resonators for designing a 1×8 multiplexer in SCISSOR configuration,” *Opt. Quantum Electron.*, vol. 44, no. 12–13, pp. 541–547, Oct. 2012.
- [180] J. Song and J. Ding, “Silicon Nanowire Waveguides and Their Applications in Planar Wavelength Division Multiplexers/Demultiplexers,” 2011.
- [181] M. K. Smit and C. V. Dam, “PHASAR-based WDM-devices: Principles, design and applications,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 2, no. 2, pp. 236–250, Jun. 1996.
- [182] M. R. Amersfoort, J. B. D. Soole, H. P. LeBlanc, N. C. Andreadakis, A. Rajhel, and C. Caneau, “Passband broadening of integrated arrayed waveguide filters using multimode interference couplers,” *Electron. Lett.*, vol. 32, no. 5, pp. 449–451, Feb. 1996.
- [183] G. Tittelbach, B. Richter, and W. Karthe, “Comparison of three transmission methods for integrated optical waveguide propagation loss measurement,” *Pure Appl. Opt. J. Eur. Opt. Soc. Part A*, vol. 2, no. 6, p. 683, Nov. 1993.
- [184] F. Tardif *et al.*, “New Aspects of the Diluted Dynamic Clean Process,” *Solid State Phenom.*, vol. 65–66, pp. 19–22, 1999.
- [185] P. Labeye, “Integrated optics components for stellar interferometry,” Thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble, 2008.
- [186] P. Barritault *et al.*, “Design, fabrication and characterization of an AWG at $45 \mu\text{m}$,” *Opt. Express*, vol. 23, no. 20, p. 26168, Oct. 2015.
- [187] “Home - MIRPHAB,” *MIRPHAB*. [Online]. Available: <http://mirphab.eu/mirphab.html>. [Accessed: 04-Sep-2016].
- [188] T. Feuchter and C. Thirstrup, “High precision planar waveguide propagation loss measurement technique using a Fabry-Perot cavity,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 6, no. 10, pp. 1244–1247, Oct. 1994.
- [189] K. K. Lee, D. R. Lim, H.-C. Luan, A. Agarwal, J. Foresi, and L. C. Kimerling, “Effect of size and roughness on light transmission in a Si/SiO₂ waveguide: Experiments and model,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 77, no. 11, pp. 1617–1619, Sep. 2000.
- [190] H. Sohlström, K. B. Gylfason, M. Antelius, and V. Dubois, “KTH | Apodized waveguide-to-fiber surface grating couplers.” [Online]. Available:

<https://www.kth.se/en/ees/omskolan/organisation/avdelningar/mst/research/optics/apodized-waveguide-to-fiber-surface-grating-couplers-1.315473>. [Accessed: 22-May-2017].

- [191] G. Roelkens, P. Dumon, W. Bogaerts, D. V. Thourhout, and R. Baets, "Efficient silicon-on-insulator fiber coupler fabricated using 248-nm-deep UV lithography," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 17, no. 12, pp. 2613–2615, Dec. 2005.
- [192] M. Fritze *et al.*, "3D mode converters for SOI integrated optics," in *SOI Conference, IEEE International 2002*, 2002, pp. 165–166.
- [193] H. Park, S. Kim, J. Park, J. Joo, and G. Kim, "A fiber-to-chip coupler based on Si/SiON cascaded tapers for Si photonic chips," *Opt. Express*, vol. 21, no. 24, pp. 29313–29319, Dec. 2013.
- [194] C. Kopp *et al.*, "Silicon Photonic Circuits: On-CMOS Integration, Fiber Optical Coupling, and Packaging," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 17, no. 3, pp. 498–509, May 2011.
- [195] D. Taillaert *et al.*, "Grating Couplers for Coupling between Optical Fibers and Nanophotonic Waveguides," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 45, no. 8R, p. 6071, Aug. 2006.
- [196] Y. Ding, C. Peucheret, H. Ou, and K. Yvind, "Fully etched apodized grating coupler on the SOI platform with -0.58 dB coupling efficiency," *Opt. Lett.*, vol. 39, no. 18, pp. 5348–5350, Sep. 2014.
- [197] N. Hattasan, B. Kuyken, F. Leo, E. M. P. Ryckeboer, D. Vermeulen, and G. Roelkens, "High-Efficiency SOI Fiber-to-Chip Grating Couplers and Low-Loss Waveguides for the Short-Wave Infrared," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 24, no. 17, pp. 1536–1538, 2012.
- [198] Z. Cheng *et al.*, "Mid-Infrared Grating Couplers for Silicon-on-Sapphire Waveguides," *IEEE Photonics J.*, vol. 4, no. 1, pp. 104–113, février 2012.
- [199] X. Chen, C. Li, and H. K. Tsang, "Grating coupler for mid-infrared silicon-on-sapphire waveguide," in *OptoElectronics and Communications Conference, 2009. OECC 2009. 14th*, 2009, pp. 1–2.
- [200] R. Shankar, I. Bulu, and M. Lončar, "Integrated high-quality factor silicon-on-sapphire ring resonators for the mid-infrared," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 102, no. 5, p. 051108, Feb. 2013.
- [201] Y. Zou *et al.*, "Grating-coupled silicon-on-sapphire integrated slot waveguides operating at mid-infrared wavelengths," *Opt. Lett.*, vol. 39, no. 10, pp. 3070–3073, May 2014.
- [202] L. Chrostowski and M. Hochberg, "Optical I/O," in *Silicon Photonics Design*, Cambridge University Press, 2014.
- [203] T. Antonakakis *et al.*, *Gratings: Theory and numeric applications*, Presses universitaires de Provence. Evgeny Popov, 2012.
- [204] F. Van Laere *et al.*, "Compact Focusing Grating Couplers for Silicon-on-Insulator Integrated Circuits," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 19, no. 23, pp. 1919–1921, Dec. 2007.
- [205] G. Roelkens, D. Van Thourhout, and R. Baets, "SOI grating structure for perfectly vertical fiber coupling," *ECIO Proc.*, 2007.
- [206] D. Taillaert, "Grating couplers as Interface between Optical Fibres and Nanophotonic Waveguides," Gent University, 2005.
- [207] G. Roelkens, D. Van Thourhout, and R. Baets, "High efficiency Silicon-on-Insulator grating coupler based on a poly-Silicon overlay," *Opt. Express*, vol. 14, no. 24, pp. 11622–11630, Nov. 2006.

- [208] V. A. Sychugov, A. V. Tishchenko, B. A. Usievich, and O. Parriaux, "Optimization and control of grating coupling to or from a silicon-based optical waveguide," *Opt. Eng.*, vol. 35, no. 11, pp. 3092–3100, 1996.
- [209] N. Anastasia, X. Xi, Y. Biao, C. Tao, Y. Jin-Zhong, and Y. Yu-De, "Design and Characterization of a Top Cladding for Silicon-on-Insulator Grating Coupler," *Chin. Phys. Lett.*, vol. 29, no. 11, p. 114213, 2012.
- [210] F. V. Laere *et al.*, "Compact and Highly Efficient Grating Couplers Between Optical Fiber and Nanophotonic Waveguides," *J. Light. Technol.*, vol. 25, no. 1, pp. 151–156, Jan. 2007.
- [211] H. Zhang *et al.*, "Efficient silicon nitride grating coupler with distributed Bragg reflectors," *Opt. Express*, vol. 22, no. 18, pp. 21800–21805, Sep. 2014.
- [212] K. A. Bates, L. Li, R. L. Roncone, and J. J. Burke, "Gaussian beams from variable groove depth grating couplers in planar waveguides," *Appl. Opt.*, vol. 32, no. 12, p. 2112, Apr. 1993.
- [213] R. Waldausl, B. Schnabel, E.-B. Kley, and A. Brauer, "Efficient focusing polymer waveguide grating couplers," *Electron. Lett.*, vol. 33, no. 7, pp. 623–624, Mar. 1997.
- [214] K. Yee, "Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equations in isotropic media," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 14, no. 3, pp. 302–307, May 1966.
- [215] R. Courant, K. O. Friedrich, and H. Lewy, "On the partial difference equations of mathematical physics," *IBM J. Res. Dev.*, vol. 11, pp. 215–234, 1967.
- [216] A. Taflove and S. C. Hagness, *Computational Electrodynamics. The Finite-Difference Time-Domain Method*, 3rd ed. Artech House, 2004.
- [217] J.-P. Berenger, "A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves," *J. Comput. Phys.*, vol. 114, no. 2, pp. 185–200, Oct. 1994.
- [218] "Perfos, centre d'innovation technologique - Photonics Bretagne." [Online]. Available: <https://www.photonics-bretagne.com/fr/perfos/>. [Accessed: 10-Nov-2016].
- [219] G. de Valicourt, G. H. Duan, C. Ware, M. Lamponi, and R. Brenot, "Experimental and theoretical investigation of mode size effects on tilted facet reflectivity," *IET Optoelectron.*, vol. 5, no. 4, pp. 175–180, Aug. 2011.
- [220] D. Taillaert, P. Bienstman, and R. Baets, "Compact efficient broadband grating coupler for silicon-on-insulator waveguides," *Opt. Lett.*, vol. 29, no. 23, pp. 2749–2751, Dec. 2004.
- [221] C. Durantin, "Métamodélisation et optimisation de dispositifs nanophotoniques," Université Nice Sophia Antipolis, A paraître.
- [222] M. E. Johnson, L. M. Moore, and D. Ylvisaker, "Minimax and maximin distance designs," *J. Stat. Plan. Inference*, vol. 26, no. 2, pp. 131–148, Oct. 1990.
- [223] D. G. Krige, "A statistical approach to some mine valuation and allied problems on the Witwatersrand: by D.G. Krige," 1951.
- [224] G. Matheron, "Principles of geostatistics," *Econ. Geol.*, vol. 58, no. 8, pp. 1246–1266, Dec. 1963.
- [225] D. R. Jones, M. Schonlau, and W. J. Welch, "Efficient Global Optimization of Expensive Black-Box Functions," *J. Glob. Optim.*, vol. 13, no. 4, pp. 455–492, Dec. 1998.
- [226] C. Durantin, J. Marzat, and M. Balesdent, "Analysis of multi-objective Kriging-based methods for constrained global optimization," *Comput. Optim. Appl.*, vol. 63, no. 3, pp. 903–926, Apr. 2016.

- [227] P. Barritault, M. Brun, P. Labeye, O. Lartigue, J.-M. Hartmann, and S. Nicoletti, “Mlines characterization of the refractive index profile of SiGe gradient waveguides at 2.15 μm ,” *Opt. Express*, vol. 21, no. 9, pp. 11506–11515, mai 2013.
- [228] Z. Xiao, T.-Y. Liow, J. Zhang, P. Shum, and F. Luan, “Bandwidth analysis of waveguide grating coupler,” *Opt. Express*, vol. 21, no. 5, p. 5688, Mar. 2013.
- [229] A. Milton and W. K. Burns, “Mode coupling in optical waveguide horns,” *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 13, no. 10, pp. 828–835, Oct. 1977.
- [230] S. Ura, S. Murata, Y. Awatsuji, and K. Kintaka, “Design of resonance grating coupler,” *Opt. Express*, vol. 16, no. 16, pp. 12207–12213, Aug. 2008.

Titre : Etude et développement d'une plateforme photonique moyen infrarouge sur silicium : vers des capteurs intégrés

Mots clés : photonique sur silicium, infrarouge moyen, SiGe, réseaux de couplage

Résumé : Aujourd'hui, les puces et capteurs provenant de la microélectronique ne sont plus simplement des circuits électroniques mais peuvent désormais véhiculer des signaux électriques et optiques. En témoignent les puces dites photoniques, utilisées pour la transmission de données à très haut débit. Cependant, cette technologie exploite une part très restreinte du spectre de la lumière, située dans le proche infrarouge. L'exploitation de l'ensemble du moyen infrarouge ($\lambda=2-20\ \mu\text{m}$) permettrait la mise au point de nouveaux capteurs intégrés se servant des empreintes spectrales spécifiques des molécules dans cette partie du spectre électromagnétique.

L'objet de cette thèse est de développer des circuits optiques intégrés sur silicium capables de véhiculer ces longueurs d'onde et qui soient compatibles avec des procédés de fabrication en salle blanche 200 mm. La technologie développée dans ces travaux est basée sur des guides carrés à saut d'indice en $\text{Si}_{0,6}\text{Ge}_{0,4}$ enterrés dans le Si, afin d'obtenir des circuits compacts et à faibles pertes. La conception des fonctions optiques nécessaires à la construction des circuits est tout d'abord présentée. Ces fonctions sont ensuite assemblées pour former un circuit optique qui sera fabriqué puis caractérisé afin de valider les performances de la technologie développée. Deux circuits ont ainsi été fabriqués : un premier a été réalisé avec un procédé standard tandis que le deuxième a été fabriqué avec un procédé de type damascène. La première réalisation offre l'avantage d'utiliser des procédés connus, tandis que la deuxième permet de fabriquer des guides pour différentes longueurs d'onde sur une même puce. Ces deux circuits ont été caractérisés afin de mener une étude comparative entre les deux procédés de fabrication. Enfin, dans un souci de monter en maturité de la plateforme, une étude approfondie des réseaux de couplage sur des guides $\text{Si}_{0,6}\text{Ge}_{0,4}$ a été conduite. Celle-ci a donné lieu à la fabrication et à la caractérisation de deux réseaux : un constitué d'inclusions d'air et un deuxième localement suspendu.

Title: Study and development of a mid-infrared silicon photonics platform: towards integrated sensors

Keywords: silicon photonics, mid-infrared, SiGe, grating coupler

Abstract: Nowadays, microelectronic chips and sensors are not simply electronic circuits anymore. They are able to convey both electric and optical signal. As shown by the so-called photonic chips used to transmit data at high speed rate. However, this technology only exploits a very small part of the light spectrum, namely in the near infrared. Exploitation of the whole mid-infrared domain ($\lambda=2-20\ \mu\text{m}$) would allow to develop new integrated sensors using molecules specific spectral fingerprints in this part of the electromagnetic spectrum.

This thesis deals with the development of integrated optical circuits on silicon capable of handling these wavelengths and compatible with 200 mm clean room fabrication processes. The technology developed in this work, is based on $\text{Si}_{0,6}\text{Ge}_{0,4}$ channel square waveguides in order to obtain compact and low loss optical circuits. First of all, the design of optical functions required to build circuits is presented. Then, these functions are assembled into circuits which are manufactured and characterized in order to assess performances of the developed technology. Two circuits have been produced: one with standard processes and one with damascene processes. The first one has the advantage of using known processes, whereas the second one allows to make waveguides for different wavelengths on a single chip. These two circuits have been characterized in order to conduct a comparative study between the two fabrication processes. Finally, in order to mature the technology, an in-depth study on grating coupler for $\text{Si}_{0,6}\text{Ge}_{0,4}$ waveguides have been conducted. It has led to the manufacturing and characterization of two grating couplers: one made of air inclusions and another locally suspended.