



**HAL**  
open science

# Intégration d'un laser hybride DBR III-V/Si en face arrière d'une puce photonique

Jocelyn Durel

► **To cite this version:**

Jocelyn Durel. Intégration d'un laser hybride DBR III-V/Si en face arrière d'une puce photonique. Optique [physics.optics]. Université Grenoble Alpes, 2017. Français. NNT : 2017GREAT026 . tel-01689987

**HAL Id: tel-01689987**

**<https://theses.hal.science/tel-01689987v1>**

Submitted on 22 Jan 2018

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

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

## THÈSE

Pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE LA COMMUNAUTE UNIVERSITE  
GRENOBLE ALPES**

Spécialité : **Optique et radiofréquences**

Arrêté ministériel : 25 mai 2016

Présentée par

**Jocelyn DUREL**

Thèse dirigée par **Jean-Emmanuel BROQUIN, Professeur des  
Universités, Institut Polytechnique de Grenoble**

préparée au sein de l'Institut de Microélectronique,  
Electromagnétismes et Photonique, Laboratoire  
d'Hyperfréquences et Caractérisation  
dans l'École Doctorale Electronique, Electrotechnique,  
Automatisme et Traitement du Signal (EEATS)

# Intégration d'un laser hybride DBR III-V/Si en face arrière d'une puce photonique.

Thèse soutenue publiquement le **Vendredi 02 Juin 2017**,  
devant le jury composé de :

**Monsieur, Pascal, BESNARD**

Professeur des Universités (Université Rennes 1), Président du jury

**Madame, Delphine, MORINI**

Professeur des Universités (Université Paris Sud), Rapporteur

**Monsieur, Christian, SEASSAL**

Directeur de Recherche (CNRS - INL), Rapporteur

**Monsieur, Jean-Emmanuel, BROQUIN**

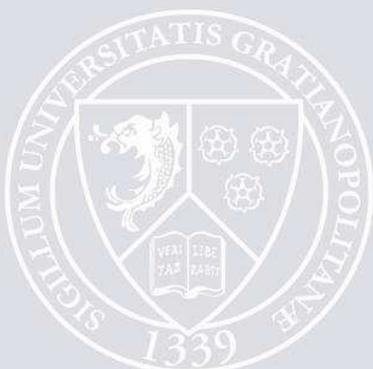
Professeur des Universités (INP Grenoble), Membre

**Monsieur, Sébastien, CREMER**

Ingénieur (STMicroelectronics Crolles), Membre

**Monsieur, Bertrand, SZELAG**

Ingénieur-Chercheur (CEA-Leti Grenoble), Membre





# Remerciements

Il est très difficile d'appréhender le travail de thèse avant d'y avoir été confronté. La réussite de ces travaux ne résulte pas seulement d'un cheminement personnel mais aussi du concours et du soutien de nombreuses personnes. Certaines ont contribué directement au succès technique et scientifique du projet tandis que d'autres ont été indispensables par leur présence, leur générosité et leur partage. Dans ces lignes, je souhaite remercier toutes ces personnes et si, pour certaines, leur nom a été oublié au moment où j'écris ces lignes, il n'en demeure pas moins qu'elles ont toutes ma gratitude.

Je tiens tout d'abord à remercier Madame Delphine Morini et Messieurs Pascal Besnard et Christian Seassal d'avoir accepté de participer au jury de la thèse.

Je remercie également tous mes encadrants, Alain Chantre, Sébastien Cremer, Badhise Ben-Bakir et Bertrand Szelag qui m'ont accompagné lors de ce projet. Grâce à leurs compétences et leur sérieux, ils ont su me guider tant dans l'apprentissage scientifique que dans la découverte de ce que sera ma vie professionnelle. Leurs conseils m'ont permis de prendre confiance en moi et en ma capacité à me sortir de situations difficiles.

En écrivant ces remerciements, j'ai une pensée toute particulière pour mon directeur de thèse, Jean-Emmanuel Broquin. En lui, j'ai trouvé directeur exigeant mais juste, qui m'a toujours poussé à me dépasser et à ne pas perdre ma volonté d'apprendre. Il a su comprendre puis tourner mon caractère un peu bougon mais tenace pour en faire une force qui m'a été indispensable lors des derniers moments. Je lui dois beaucoup dans la réussite de cette épreuve.

Comme vous le découvrirez dans ce manuscrit, le dimensionnement, la fabrication et la caractérisation d'un laser est un processus long et complexe. Pour m'aider dans ma tâche, j'ai bénéficié de l'expérience et de l'expertise de nombreux collègues.

Je souhaite ainsi remercier les autres membres de mon équipe d'STMicronics, Frédéric, Charles, Nathalie, Elise, Stéphane, Benjamin, Sylvain (même si je l'ai connu avant au CEA !), Maurin...

De même, je voudrais dire un grand merci à tout le laboratoire LCPC du CEA : Christophe, Karim, Vincent, Corrado, Stéphane M. & Stéphane B. (Allez les verts !), Benoit, Benjamin, Daivid, Olivier, André, Philippe, Karen, Toufik, Sonia, Aurélie, Julie, Laetitia, Viviane, Paul, Cécilia, Bayram, Marco, Houssein, ... ainsi qu'à Christophe J. et l'équipe du LPFE. Grâce à toutes ces personnes, à leur travail et leurs conseils, il a été possible de mener à bien ce projet qui était loin d'être gagné d'avance. J'aurai beaucoup d'anecdotes à raconter avec ces personnes mais je doublerais sûrement le volume de ce manuscrit. Je vous remercie alors tout simplement pour tous les moments passés parmi vous et pour toutes les discussions et les blagues qui font que je garderai un souvenir inoubliable de ces trois années.

Je n'oublie bien entendu pas toutes les personnes du DTSI et de salle blanche avec qui j'ai pu interagir et travailler tout au long de ce projet, en particulier Jacques-Alexandre, Nathalie, Armelle, Pierre, Vincent, Olivier, ... Ils ont su m'aiguiller dans cet univers complexe qu'est la salle blanche et m'ont donné de précieux conseils.

Je n'oublie pas non plus mes collègues thésards, Alexis (Allias Shrek !), Olivier, Simon, Mathieu, Hélène, Léopold et bien sûr mon co-bureau du tonnerre, j'ai nommé Thomas !! Grâce à eux j'ai pu partager mes expériences, avancer humainement et scientifiquement et me construire trois années de très beaux souvenirs. Je remercie ainsi Alexis pour ses superbes moelleux (euh fondants) au chocolat mais espère qu'il finira un jour ses frites au self (même si elles sont froides). Merci encore Thomas pour nos références musicales (Tenacious D) et nos délires sur les Kassos.

Et pour faire une pause parmi tous ces efforts cérébraux intenses, quoi de mieux que mes partenaires de « pause-café » : R<sup>2</sup>, Dadum, Rems, Aurélien, Jéjé, Yaya sans oublier DJ Polo (Alice Pogooooo) et notre estimé Fabi. Merci à vous pour toutes ces discussions, ces tranches de rigolade et ces belles amitiés.

Je remercie également tous mes amis d'enfance, Emilien, Amélie, Kéké, Flo, Apowe, Antoine et tous les autres, qui ont toujours été là pour moi !

J'en profite pour remercier chaleureusement Manu, qui non seulement a été là pour me guider scientifiquement mais aussi et surtout, a été là pour me rassurer et pour m'aider à prendre conscience de mon potentiel. Grâce à sa bonne humeur, à ses blagues et à sa bienveillance, j'ai réussi à tenir bon dans les moments difficiles, contre vents et marées.

Un très grand merci enfin à ma famille qui m'a soutenu et supporté tout au long de ces travaux. Je remercie ainsi mes parents qui, à travers leurs attentions constantes et leur foi inébranlable en moi, m'ont guidé dans la vie. Merci Papa pour toutes nos discussions et pour ton soutien inconditionnel. Merci Maman, Papy (sans oublier ma grand-mère qui sera éternellement dans mes pensées), Marie & Etienne, Christophe, pour m'avoir, entre autres, donné régulièrement des nouvelles de ma chère Bretagne. Grenoble est loin mais vous serez toujours dans mon cœur. Merci à Daddy et Granny, qui, de loin (géographiquement), ont continuellement gardé un œil bienveillant à mes progrès. Merci à mes beaux-parents, André et Babette, qui malgré leurs propres épreuves ont toujours su prendre du temps pour moi et me faire découvrir l'esprit stéphanois ! Merci à Kams et à Jojo 2 (le petit mais qui grandit vite !) de m'avoir accepté comme beau-frère avec tant de gentillesse.

Enfin, et en paraphrasant son propre manuscrit, ma dernière pensée va à Aurore. Sans elle, je ne serais pas l'homme que je suis aujourd'hui. Avec ses conseils (musclés...) et son amour, elle m'a épaulé sans jamais faillir. C'est une véritable fierté que d'être ton époux.

A tous, je vous remercie du fond du cœur.

# Table des matières

Introduction .....	1
Chapitre I : Contexte de la Photonique sur Silicium et Objectifs de cette Etude .....	3
I.1 Introduction .....	4
I.2 La Photonique pour les Télécommunications .....	4
1.2.1 Des connexions électriques vers les connexions optiques.....	5
1.2.2 Enjeux et avantages de la photonique sur silicium.....	7
1.2.3 Composants d'un circuit photonique intégré sur silicium .....	8
I.3 L'intégration d'une source Laser sur une puce silicium fonctionnelle.....	10
1.3.1 Intégration d'un matériau à gain sur puce photonique .....	10
1.3.2 Exemples de réalisations de sources intégrées .....	16
1.3.3 Compatibilité entre construction des interconnexions métalliques et intégration du matériau à gains.....	21
I.4 L'approche proposée : le Laser hybride III-V/Si en face arrière.....	24
1.4.1 Principe de l'intégration face arrière .....	24
1.4.2 Adaptation des autres composants à l'intégration « Back-Side ».....	25
I.5 Conclusion.....	26
Chapitre II : Validation du schéma d'intégration Back-Side .....	27
II.1 Introduction .....	28
II.2 Rappels théoriques sur l'optique intégrée .....	28
2.2.1 Théorie de la propagation guidée .....	28
2.2.2 Théorie sur les réseaux de Bragg.....	33
II.3 Etude du réseau de couplage surfacique.....	35
2.3.1 Avantages et inconvénients du réseau de couplage Back-Side .....	35
2.3.2 Adaptation du réseau de couplage à l'intégration Back-Side.....	39
II.4 Fabrication et Caractérisations .....	42
2.4.1 Fabrication d'un réseau de couplage adapté à l'intégration Back-Side.....	42
2.4.2 Caractérisations optiques.....	45
II.5 Conclusion.....	50
Chapitre III : Dimensionnement de la Cavité Laser Hybride DBR III-V/Si.....	51
III.1 Introduction .....	52
III.2 La cavité laser.....	52

3.2.1	Principe de fonctionnement d'un oscillateur opérant aux fréquences optiques.....	52
3.2.2	Amplification optique dans un semi-conducteur.....	53
3.2.3	Diode laser Fabry-Pérot.....	57
3.2.4	Présentation de la cavité laser hybride DBR III-V/Si.....	62
III.3	Le couplage entre le guide III-V et le guide SOI .....	65
3.3.1	Rappels sur le couplage de mode entre deux guides d'onde .....	65
3.3.2	Calcul du profil de l'épanouisseur.....	68
3.3.3	Vérifications numériques de l'efficacité de l'épanouisseur.....	72
III.4	Le miroir de Bragg .....	76
3.4.1	Principe et rappels théoriques sur une structure de Bragg en réflexion .....	77
3.4.2	Influence de la forme du guide d'onde.....	79
3.4.3	Influence de la période du réseau de Bragg.....	80
3.4.4	Influence de l'épaisseur de gravure et de la longueur du réseau de Bragg.....	81
III.5	Le transformateur de mode : guide laser / guide d'onde .....	82
3.5.1	Dimensionnement du transformateur de mode.....	82
3.5.1	Influence des variabilités du procédé de fabrication .....	83
III.6	Conclusion.....	85
Chapitre IV : Fabrication du Laser Hybride DBR III-V/Si.....		87
IV.1	Introduction .....	88
IV.2	La structuration de la partie silicium.....	88
4.2.1	L'enchaînement des étapes technologiques de fabrication.....	88
4.2.2	La structuration Front-Side du SOI et d'une couche métallique .....	91
4.2.3	Le collage de la poignée Silicium, le retournement de l'empilement et le retrait du substrat initial .....	98
4.2.4	La structuration du SOI Back-Side.....	101
IV.3	La structuration de la partie III-V et les métallisations du laser.....	106
4.3.1	Le collage du III-V sur SOI structuré.....	106
4.3.2	La structuration du guide III-V et les métallisations du laser.....	107
IV.4	Conclusion.....	116
Chapitre V : Caractérisations Optiques et Perspectives .....		119
V.1	Introduction .....	120
V.2	Les caractérisations optiques des cavité lasers.....	120
5.2.1	Les caractérisations des éléments passifs .....	120
5.2.2	Les caractérisations du laser en puissance et en spectre.....	123

---

5.2.3 L'accordabilité de la cavité DBR .....	128
V.3 Perspectives .....	130
5.3.1 Améliorations du processus de fabrication de la cavité laser .....	130
5.3.2 Améliorations des performances du système et développements en vue d'une industrialisation .....	132
V.4 Conclusion.....	133
Conclusions Générales .....	135
Bibliographie.....	139
Publications .....	145
Conférences.....	145



# Introduction

*L'information, c'est le pouvoir !* dit J. Edgar Hoover dans le film de C. Eastwood « J. Edgar » (2011). Que pourrait-il penser aujourd'hui des moyens mis à la disposition de l'humanité. En effet, depuis plusieurs années, le monde vit un essor technologique sans précédent dans l'histoire des civilisations. Avec l'apparition de l'ordinateur personnel, d'internet puis des smartphones, le volume d'informations et de données transitant chaque jour s'accroît de manière considérable. Aujourd'hui, et avec le développement de circuits électroniques intégrés basés sur la technologie CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor), le traitement de ces données n'est de fait plus limité par la puissance de calcul mais par le débit avec lequel elles sont transférées. Les interconnexions électriques peinent à soutenir ce flux croissant : fortes pertes, échauffements et distorsions sont des problèmes auxquels les équipementiers des télécommunications sont confrontés.

La démonstration en 1960, par Maiman, puis le développement de sources lasers ont permis de révolutionner ce domaine d'activité. En effet, l'utilisation de la lumière comme support de transfert d'information présente de nombreux avantages. Tout d'abord, les lasers combinent à la fois puissance et cohérence lumineuse. Les liens optiques quant à eux sont légers, insensibles au bruit électromagnétique et plus intéressant encore, ils ne sont pas soumis à l'échauffement. Enfin, avec le développement de systèmes de multiplexage en longueur d'onde (WDM pour Wavelength Division Multiplexing), la transmission multi-canaux permet d'obtenir des débits d'information bien plus élevés que ceux accessibles par l'électrique. Cette solution à base de fibres optiques en silice est déjà largement déployée dans les transferts de données longues distances depuis les années 90, en utilisant la troisième fenêtre de transmission, c'est-à-dire pour des longueurs d'onde situées entre  $1,53 \mu\text{m}$  et  $1,57 \mu\text{m}$ . En revanche, la plupart des composants optiques alors utilisés sont composés de matériaux onéreux : les III-V. De ce fait, pour permettre l'utilisation de l'optique pour des communications à courtes distances, des solutions ont dû être imaginées afin de minimiser les coûts de fabrication tout en assurant une production de masse.

En reprenant le concept de circuits intégrés microélectronique, des études ont démontré la faisabilité de circuits optiques réalisés sur puce. Des architectures complexes de transport et de traitement de signaux lumineux ont été développées à l'aide de différents matériaux. Parmi ceux-ci, le silicium et son oxyde, la silice, sont particulièrement adaptés à cette technologie. En effet, en plus de présenter un fort contraste d'indice et donc un très bon confinement lumineux, les méthodes de structuration de ces matériaux bénéficient des développements continus réalisés pour la microélectronique. Au cours des dernières années, plusieurs laboratoires et industriels ont mis en œuvre un large éventail de composants optiques, dits photoniques sur silicium, réalisant les fonctions élémentaires du traitement de l'information en optique (guides d'onde, modulateurs, photodétecteurs, (dé)multiplexeurs, coupleurs, ... etc.), pour les fenêtres de longueurs d'onde correspondant aux minimums de dispersion (aux alentours de  $1,31 \mu\text{m}$ ) et de perte (aux alentours de  $1,55 \mu\text{m}$ ) des fibres optiques standards.

Cependant, la difficulté majeure de l'utilisation du silicium réside dans sa très faible capacité à émettre un rayonnement laser et ceci en raison de son gap indirect. Pour faire face à ce problème, l'une des solutions explorées consiste à intégrer de manière hétérogène un empilement de matériaux III-V, connu pour ses excellentes propriétés d'émission laser, afin de réaliser une source hybride III-V/Si.

Ainsi, l'ensemble des fonctions de transfert et de traitement de la lumière du circuit est réalisé dans le silicium tandis que la fonction amplificatrice de la source est fournie par le III-V. Cette piste est à l'étude depuis 1999 dans un laboratoire du CEA-Leti. A. Descos [1] et H. Duprez [2] ont ainsi démontré l'intégration d'une telle architecture de source laser pour les longueurs d'ondes respectivement de 1,55  $\mu\text{m}$  et 1,31  $\mu\text{m}$ . Ces travaux ne tiennent en revanche pas compte de la nécessaire compatibilité de la source avec le reste du circuit photonique. T. Ferrotti [3], a démontré la modulation haute fréquence d'un faisceau lumineux produit par une source hybride intégrée sur une puce disposant d'un modulateur, ce système n'est pas compatible avec des interconnexions métalliques nécessaires au pilotage de la puce. Ainsi, au début de cette étude, aucune source laser à notre connaissance ne résout cette problématique ni n'a été intégrée sur une puce photonique complète.

En tenant compte des résultats précédents, notre objectif a donc été de proposer puis de démontrer un nouveau schéma permettant d'intégrer une source laser hybride III-V/Si compatible avec une puce photonique possédant plusieurs niveaux d'interconnexions métalliques : l'intégration en face arrière plus souvent dénommée par son équivalent anglais d'intégration *Back-Side*. Ce travail a bénéficié d'une collaboration industrielle et scientifique entre STMicroelectronics, le CEA-Leti et le laboratoire IMEP-LaHC.

Ce document présente les études, de l'approche théorique à la caractérisation des composants fabriqués, mises en œuvre pour aboutir à un prototype. Il est organisé en cinq chapitres.

Le premier chapitre présente le domaine d'application dans lequel ce travail s'inscrit ainsi que l'état de l'art des sources lasers intégrées à base de III-V sur silicium au début de cette thèse. Il pose alors la problématique liée à l'intégration d'une telle source pour enfin présenter la solution innovante envisagée.

Dans le second chapitre, la validation du nouveau schéma d'intégration vis-à-vis d'un des composants critiques d'une puce photonique, le réseau de couplage surfacique, est détaillée. Ainsi, après un rappel sur les principes de propagation d'un mode guidé, la notion d'indice effectif et le fonctionnement d'une structure de Bragg, les paramètres clés à optimiser pour le bon fonctionnement du réseau sont mis en évidence. Les étapes de fabrication et les différentes variations mises en œuvre sont présentées afin de valider les modèles théoriques et de déterminer l'impact du nouveau schéma d'intégration. Ce chapitre se termine sur les caractérisations optiques du composant fabriqué.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude de la source laser proposée. Dans un premier temps, les principes de fonctionnement d'une cavité opérant aux fréquences optiques ainsi que les figures de mérite statiques d'un laser sont abordés avant de détailler les différents modules composant le laser hybride III-V/Si étudié. Dans un second temps, les études et simulations mises en œuvre pour définir chacun de ces modules sont expliquées.

L'ensemble des étapes de fabrication utilisées pour la réalisation de la puce suivant l'intégration *Back-Side* est alors abordé dans le quatrième chapitre en deux grandes phases : la structuration de la partie silicium puis la définition du guide III-V et la métallisation des contacts du laser.

Le dernier chapitre présente les résultats des caractérisations optoélectroniques du dispositif fabriqué. Des perspectives et des recommandations sur des études complémentaires en vue de l'industrialisation d'une puce photonique complète réalisée en intégration *Back-Side* sont finalement proposées.

# Chapitre I : Contexte de la Photonique sur Silicium et Objectifs de cette Etude

## Sommaire

---

I.1	Introduction .....	4
I.2	La Photonique pour les Télécommunications .....	4
1.2.1	Des connexions électriques vers les connexions optiques.....	5
1.2.2	Enjeux et avantages de la photonique sur silicium.....	7
1.2.3	Composants d'un circuit photonique intégré sur silicium .....	8
I.3	L'intégration d'une source Laser sur une puce silicium fonctionnelle.....	10
1.3.1	Intégration d'un matériau à gain sur puce photonique .....	10
1.3.2	Exemples de réalisations de sources intégrées .....	16
1.3.3	Compatibilité entre construction des interconnexions métalliques et intégration du matériau à gains.....	21
I.4	L'approche proposée : le Laser hybride III-V/Si en face arrière.....	24
1.4.1	Principe de l'intégration face arrière .....	24
1.4.2	Adaptation des autres composants à l'intégration « Back-Side ».....	25
I.5	Conclusion.....	26

---

## I.1 INTRODUCTION

Ce chapitre est consacré à la présentation du contexte et des objectifs de cette thèse. Dans un premier temps, nous ferons un rappel historique des motivations de l'optique intégrée dans le cadre des télécommunications et des transferts de données. Nous présenterons ensuite l'une des technologies la plus adaptée pour répondre à la demande croissante de hauts débits de transferts pour une faible consommation électrique : la photonique sur silicium. Nous détaillerons finalement les différents dispositifs qui composent une puce de transmission et de réception de données pour mettre ainsi en évidence l'absence d'un composant important : la source lumineuse.

Dans un second temps, nous exposerons les différentes pistes envisagées afin de répondre à la demande d'une source intégrée à une puce photonique réalisée sur silicium. La problématique d'une source à base de matériaux à gap indirect sera abordée ainsi que la solution innovante imaginée pour pallier cette contrainte : l'intégration de matériaux semi-conducteurs à gap direct, les III-V.

Parmi les nombreuses solutions de sources lasers intégrables sur silicium déjà proposées, nous montrerons alors qu'aucune ne répond à une contrainte liée aux autres composants de la puce : la présence d'interconnexions métalliques.

Nous présenterons enfin la solution imaginée et mise en place durant cette thèse : un processus de fabrication rendant possible la compatibilité d'un empilement métallique de pilotage complet et le report de matériaux III-V nécessaire à la réalisation d'une source hybride III-V/Si.

## I.2 LA PHOTONIQUE POUR LES TELECOMMUNICATIONS

Depuis la création du premier ordinateur électronique en 1946, la microélectronique n'a cessé d'évoluer et a permis la mise en place de téléphones (smartphones) actuels vingt mille fois plus puissants, consommant moins d'énergie et de taille réduite. En 1972, M. Gordon Moore prédisait le doublement du nombre de transistors par puces électroniques tous les dix-huit mois favorisant la recherche, la production et la commercialisation de nouveaux matériels de plus en plus complexes et compétitifs. L'augmentation des puissances de calculs et de la capacité de stockage a permis de diversifier les applications de ces outils informatiques et a généré rapidement un intérêt certain pour l'échange de données entre ordinateurs ou tout autre support. Les premières télécommunications ont été possibles par le courant électrique via le transfert de messages simples. Le premier exemple de télécommunication optique reconnu est le télégraphe Chappe, mis au point en 1790 et déployé en 1793. Au départ, il utilisait un système de codage « On-Off-Keying » associé au morse. Du fait de la limitation de son utilisation à un beau temps et en plein jour, ce système de communication optique a finalement été remplacé par des transmissions via des câbles électriques, de manière analogique : c'est le principe du téléphone. Ainsi l'évolution technologique, a permis la mise en place de premiers réseaux longue distance reposant sur l'utilisation de modem et de signaux analogiques. Néanmoins le débit proposé fut un facteur limitant. Deux axes d'études permettent d'augmenter ce débit à savoir le moyen physique de transporter le signal et le codage de l'information.

Le XXI<sup>e</sup> siècle est caractérisé par l'explosion des demandes de calcul, de stockage et de communication. Dans ce contexte, l'enjeu consiste à trouver des solutions pouvant pallier les difficultés à faire circuler l'information numérique sur de longues distance à travers le monde mais aussi à plus petites échelles à savoir de puce à puce et dans les puces. Les interconnexions électriques actuelles deviennent alors limitantes pour le développement du trafic des données et d'autres options doivent être envisagées. La fabrication du premier laser par Maiman [4] en 1960 apporta une solution à ce problème : le remplacement de l'onde électrique par l'onde optique. Les propositions de S.E. Miller en 1969 [5] sur la réalisation de circuits intégrés optiques ainsi que les recherches sur des guides et des fibres optiques à faibles pertes [6], [7] permirent de développer des liaisons optiques remplaçant les liaisons électriques. Enfin, l'intégration de fonctions photoniques sur silicium aboutit à l'obtention d'un gain spectaculaire en termes de bande passante, de consommation énergétique et de densité, et autorise des flux d'information de plusieurs Térabits par seconde. Des « superpuces » optiques pour le traitement de l'information sont donc au cœur de la recherche dans le domaine des circuits photoniques intégrés depuis les années 1970.

### 1.2.1 *Des connexions électriques vers les connexions optiques*

Malgré les évolutions apportées au transport électrique des données via l'utilisation de câbles coaxiaux, codage ...), l'utilisation de transport par voie électrique s'est révélée être trop consommatrice d'énergie pour des longues distances. Les derniers câbles électriques développés ont en effet une perte linéique de 10dB/km à 1MHz [8].

L'utilisation de systèmes de transmission optique a permis d'atteindre des débits largement supérieurs. La *Figure I-1* montre l'évolution en fonction du temps de la capacité informative relative d'une transmission électrique et d'une transmission optique. Le retard pris par les connexions électriques semble difficilement rattrapable.

L'utilisation de la lumière et plus précisément des photons n'a pu être développée qu'à partir de l'émergence de deux technologies à savoir la fibre optique et le laser semi-conducteur. Le développement des diodes lasers semi-conducteurs génère un signal monochromatique, directionnel et accordable. La fibre optique et son évolution permettent de diminuer les pertes linéiques et la dispersion chromatique.

Ainsi, les systèmes de télécommunications optiques fonctionnent via l'utilisation des lasers semi-conducteurs de type III-V pour une transmission de la lumière dans des fenêtres de longueur d'ondes correspondant respectivement au minimum de dispersion (autour de 1.3  $\mu\text{m}$ ) et d'absorption (autour de 1.5  $\mu\text{m}$ ) de la silice utilisée dans les fibres optiques.

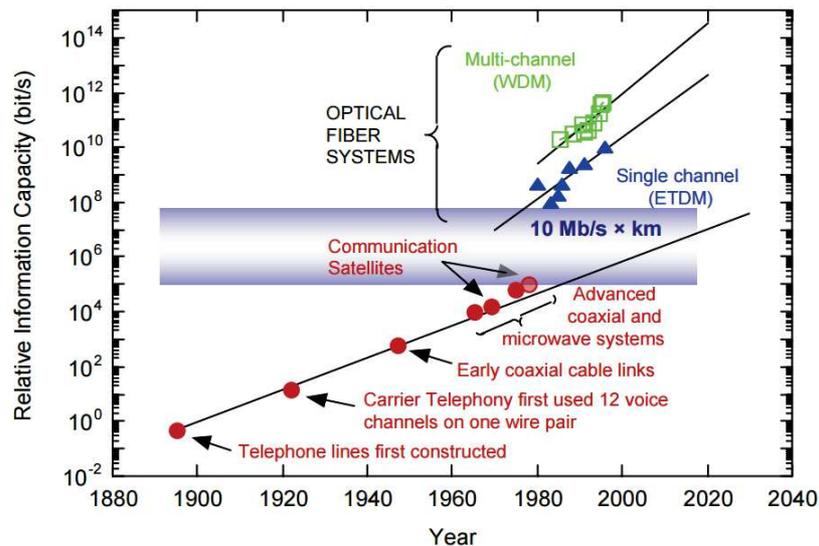


Figure I-1 : Evolution du débit des systèmes de télécommunication en fonction du temps [9].

Cependant, malgré les débits importants obtenus avec les communications optiques, celles-ci sont relativement onéreuses par rapport à leurs concurrentes électriques et leur intégration est plus complexe.

De ce fait, les transmissions optiques sont d'abord utilisées pour les grandes distances demandant de grandes capacités de transferts d'informations. Cependant, avec l'émergence d'internet, du « cloud » et de « Datacenter » de plus en plus impressionnants, la demande de bande passante ne cesse d'augmenter de manière exponentielle et requiert l'utilisation de câbles optiques. D'un autre côté, la demande émanant des utilisateurs privés est sans cesse pour des débits de plus en plus importants. Ainsi des réseaux de fibres optiques FTTH (Fiber to the Home) ont été mis en place, ouvrant aux transmetteurs optiques un marché de masse.

La Figure I-2 illustre la répartition des communications optiques et électriques en fonction de la distance de transmission de données ainsi que du débit de données transférées. La courbe orange représente la limite entre l'utilisation du cuivre et celle de l'optique. Ainsi, l'objectif est de remplacer, à plus ou moins long terme, en fonction du débit requis, le transfert de données de technologies cuivres vers des technologies optiques [10].

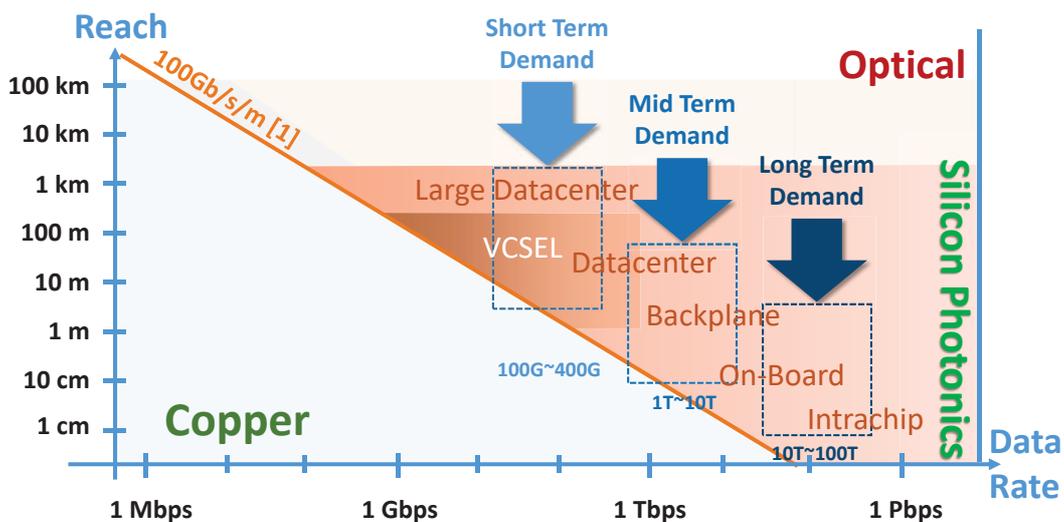


Figure I-2 : Schéma de la répartition des types de technologies de télécommunication en fonction du débit et de la distance de transmission [10].

Au final, si les connexions optiques n'étaient, qu'à la base, qu'utilisées pour des communications longues distances (> 10 km), le développement technologique, allant des fermes de serveurs à la multi-fonctionnalité et le marché potentiel des puces électroniques génère le besoin de remplacer les connexions électriques par des connexions optiques. De plus, l'intégration de fibres optiques et, à terme, de guides d'ondes optiques dans les puces, permettrait de réduire la consommation électrique des installations et limiter les échauffements dus à la résistivité des câbles métalliques.

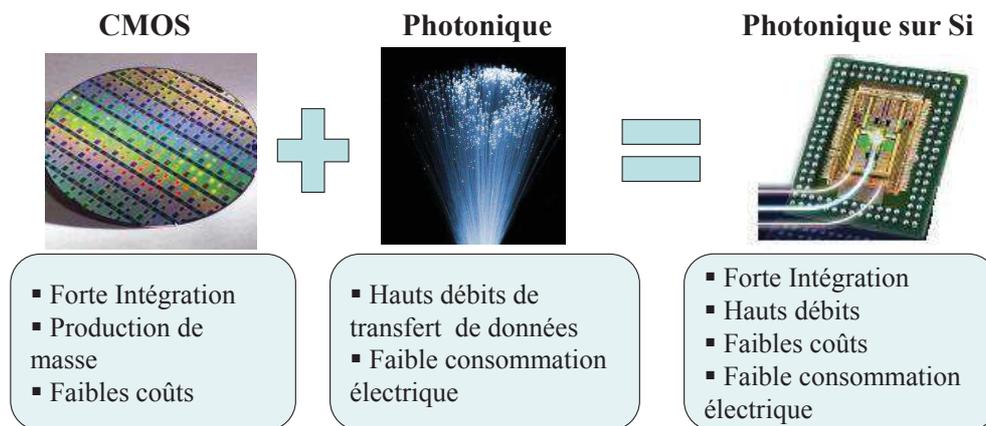
### 1.2.2 Enjeux et avantages de la photonique sur silicium

Le matériau prédominant pour la fabrication des puces CMOS est le silicium. Ce semi-conducteur est donc au cœur de l'intégration de l'optique sur les puces CMOS.

Un des principaux avantages de ce matériau pour l'optique réside dans le fort contraste d'indice entre celui-ci et son oxyde naturel (3,5 pour le silicium et 1,45 pour la silice aux longueurs d'ondes utilisées dans les télécommunications).

Un deuxième avantage à utiliser le silicium pour l'optique repose sur le fait que les procédés technologiques de fabrication ont déjà été développés par la micro-électronique. De plus, la création de plaques de silicium sur isolant SOI (en anglais *Silicon On Insulator*) permet de commencer les étapes avec directement une couche de silicium sur une couche de silice appelée BOX (*Buried OXide*).

La *Figure I-3* présente les différents avantages que combinent le CMOS et la photonique pour créer la photonique sur silicium.



**Figure I-3 : Avantages de la photonique sur silicium.**

De ce fait, la totalité (ou quasi) des fonctions passives optiques, telles que le guidage de la lumière, le traitement spectral de la lumière ou encore le couplage à une fibre optique, ont déjà été réalisées. Certaines fonctions actives sont étudiées depuis longtemps et même démontrées comme par exemple la détection d'un signal optique par une photodiode et la modulation pour générer des signaux transférables. Il existe aujourd'hui plusieurs entreprises qui fabriquent des puces de photonique sur silicium de manière industrielle [11], [12]. Il existe également des projets, pour certains communs à différentes entités, ayant pour but de développer de nouvelles améliorations ou technologies à base de photonique sur silicium [13], [14], [15].

### 1.2.3 Composants d'un circuit photonique intégré sur silicium

La photonique sur silicium est particulièrement adaptée au transfert de données en optique dans le cadre des « datacoms » dont l'exemple d'un système de communication WDM (Wavelength Division Multiplexing) répondant à la norme 100GBASE-LR4 est défini en *Figure I-4* [16]. Ce schéma nous montre que pour un transfert de données, une puce doit être composée de plusieurs blocs qui réalisent des fonctions différentes. La puce est divisée en deux grandes parties : le module de transmission et le module de réception. Chacun d'eux est composé de dispositifs pouvant être soit de type passif soit de type actif.

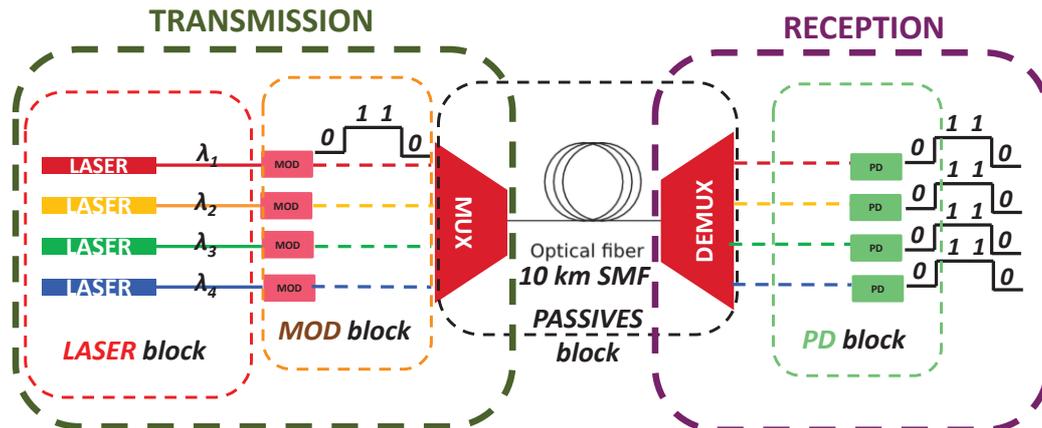


Figure I-4 : Si-PIC WDM pour la norme 100GBASE-LR4 [16].

Tout d'abord, la propagation de l'onde lumineuse entre les différents dispositifs est réalisée grâce à des guides d'ondes pouvant être monomodes ou multimodes en fonction de leur utilisation. Il existe deux types de guides d'ondes : les guides à arêtes dits *rib* et les guides rubans dits *strip*. Une illustration d'une structure, spécifique à la photonique sur silicium, de chacun de ces guides est donnée respectivement en *Figure I-5 a)* et *Figure I-5 b)*. Une description du guidage d'ondes lumineuses dans ce type de structure sera abordée dans le chapitre suivant.

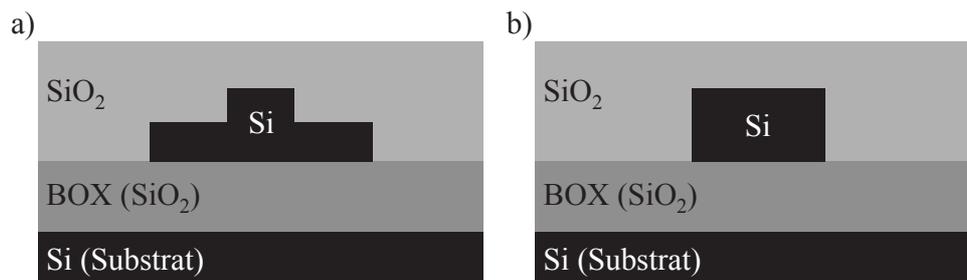
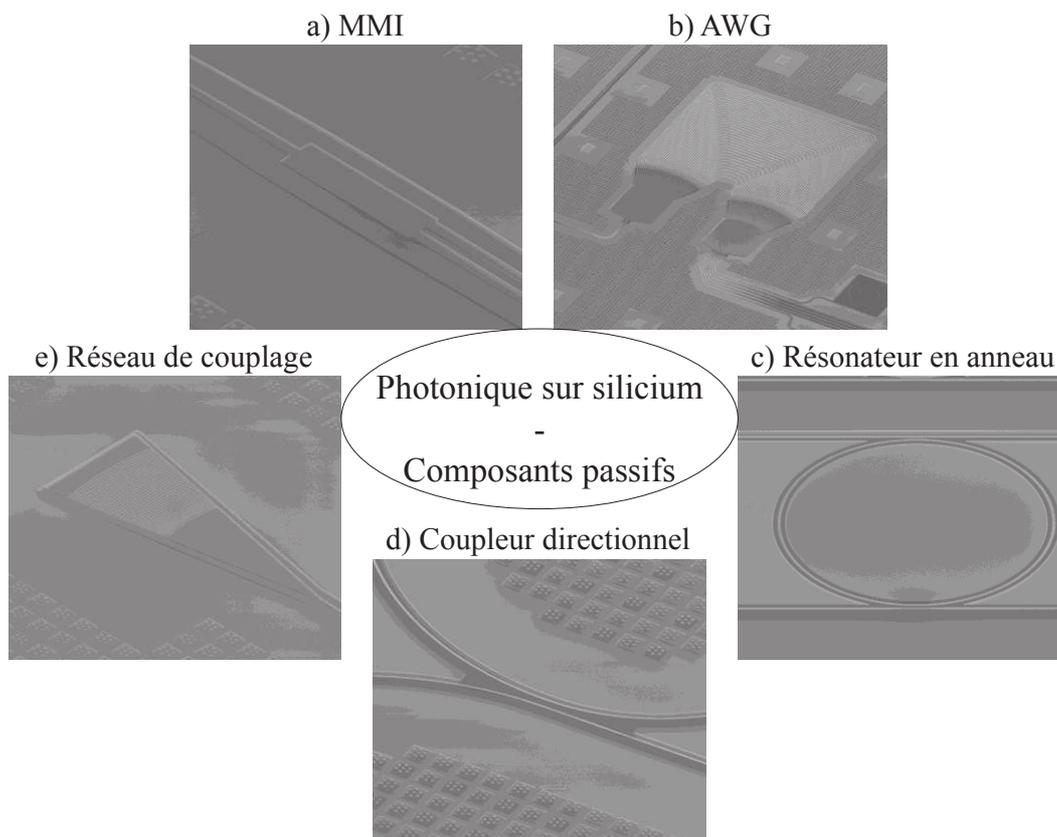


Figure I-5 : Schémas de vues en coupe de guides d'onde (photonique sur Si) avec en a) un guide *rib* et en b) un guide *strip*.

Certaines études ont été menées afin de minimiser les pertes optiques dans ces guides d'ondes [17]. Ceux-ci permettent ensuite de contacter des dispositifs entre eux.

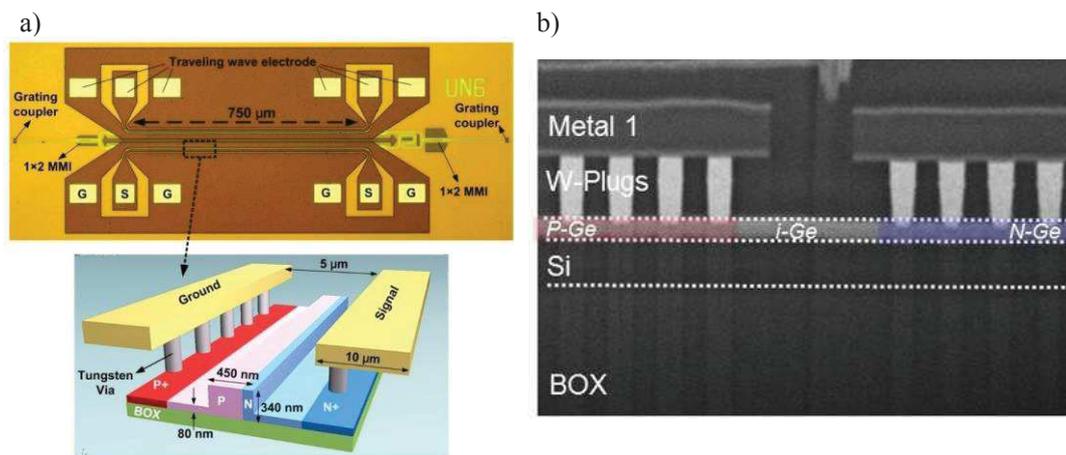
Certains de ces dispositifs, dits passifs et dont des images MEB sont illustrées en *Figure I-6*, peuvent être décrits par leur fonction :

- Les MMIs (Multi-Mode Interferometers) qui permettent par exemple, suivant le sens de propagation, de dédoubler ou d'appairer le faisceau lumineux (*Figure I-6 a*).
- Les multiplexeurs, qui combinent plusieurs signaux lumineux de différentes longueurs d'onde en un seul comportant plusieurs canaux, les AWG (Array Waveguide Gratings) (*Figure I-6 b*).
- Les démultiplexeurs qui réalisent la fonction inverse des multiplexeurs, comme par exemple les AWG ou les anneaux résonnants [18], ou les réseaux échelles [19].
- Les anneaux résonnants qui permettent de sélectionner précisément une longueur d'onde (*Figure I-6 c*) [20].
- Les coupleurs directionnels qui permettent de transférer un mode d'un guide à un autre ; dans le cadre d'un anneau résonnant par exemple (*Figure I-6 d*).
- Les coupleurs par la tranche (non illustrés sur la *Figure I-6*) [21] ou les réseaux de couplages surfaciques qui permettent de coupler l'onde lumineuse entre un guide d'ondes et une fibre optique externe (*Figure I-6 e*) [22].



**Figure I-6 : Eléments passifs d'une puce photonique avec en a) une jonction Y, en b) un AWG, en c) un anneau résonnant, en d) un coupleur directionnel et en e) un réseau de couplage [23].**

Des exemples de composants actifs d'une puce photonique sont montrés en *Figure I-7*. Ce sont principalement le modulateur (*Figure I-7 a*) [24], [25] pour le module de transmission, et le photodétecteur (*Figure I-7 b*) [26] pour le module de réception. Il existe de nombreuses études et structures différentes pour ces composants. Des exemples de ces dispositifs sont montrés.



**Figure I-7 : Éléments actifs d'une puce photonique avec en a) une image au microscope optique et le schéma associé d'un modulateur [27] et en b) un cliché MEB d'une photodiode Ge.**

Les anneaux résonnants peuvent également être considérés comme des dispositifs actifs dans le cas où leur fréquence de résonance est pilotée [28].

Il n'existe qu'un seul dispositif parmi ceux montrés sur la *Figure I-4* qui n'a pas encore été intégré sur une puce photonique complètement fonctionnelle : la source laser.

### 1.3 L'INTEGRATION D'UNE SOURCE LASER SUR UNE PUCE SILICIUM FONCTIONNELLE

A ce jour, la réalisation de la fonction de transmission d'un flux de données via une conversion électrique / optique est obtenue grâce à des puces utilisant une source lumineuse externe. La lumière laser est couplée dans les guides d'ondes de la puce au travers de coupleurs, soit surfaciques soit par la tranche ou grâce à des solutions de packaging [29].

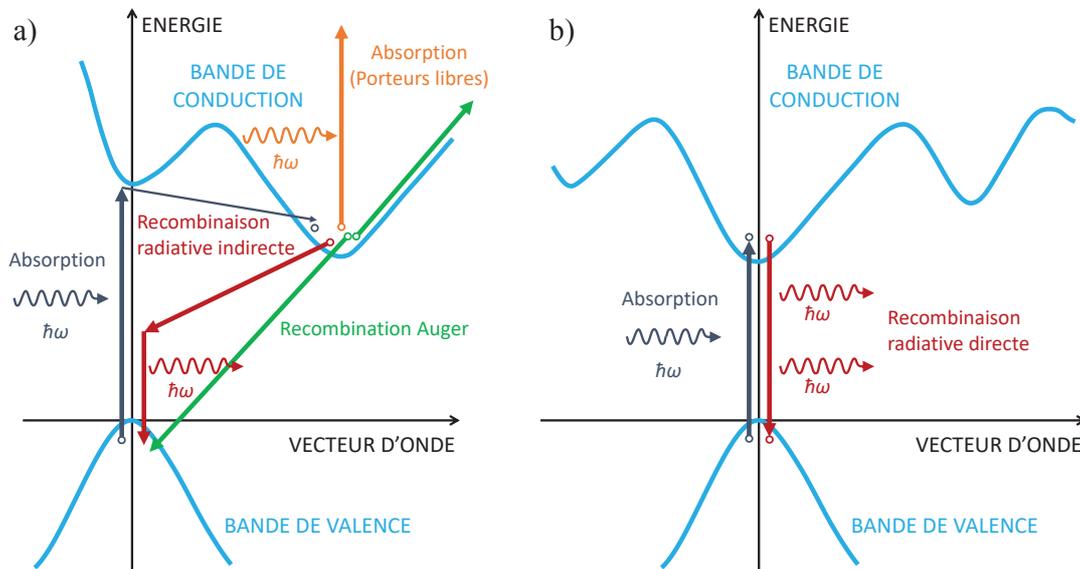
Plusieurs recherches d'intégrations d'une source laser sont en cours afin de réduire l'encombrement et le coût de production des puces photoniques à base de silicium.

#### 1.3.1 Intégration d'un matériau à gain sur puce photonique

L'intégration monolithique d'une source laser à base de silicium ou de matériaux compatibles tels que le germanium à travers une plateforme compatible avec le CMOS est un véritable défi.

Si le silicium et son oxyde sont de parfaits candidats pour la réalisation de fonctions optiques compactes, qu'elles soient passives tels que des guides d'ondes ou des structures de Bragg, ou encore actives tels que des modulateurs, ils n'en demeurent pas moins problématiques pour la fabrication de photodétecteurs et de sources lasers. En effet, en ce qui concerne le photodétecteur, le silicium est transparent aux longueurs d'ondes correspondantes aux fenêtres des télécommunications optiques qui sont 1310 nm, 1490 nm et 1550 nm. L'utilisation des bonnes propriétés d'absorption du germanium à ces longueurs d'ondes a néanmoins permis de résoudre ce problème. En revanche, le silicium comme le germanium sont des matériaux possédant des structures de bandes à gap indirect. Des schémas simplifiés montrant les mécanismes dans des matériaux à gap indirect et à gap direct sont illustrés en *Figure I-8*. La *Figure I-8 a)* nous montre que l'émission de lumière par la recombinaison d'un électron et d'un trou

nécessite, dans ce type de matériaux, l'utilisation d'une troisième particule appelé le phonon. Le temps de vie radiatif de la paire électron-trou est alors extrêmement long ce qui rend les recombinaisons non radiatives prédominantes.



**Figure I-8 : Schémas de structures de bandes simplifiés avec en a) d'un matériau à gap indirect et en b) d'un matériau à gap direct.**

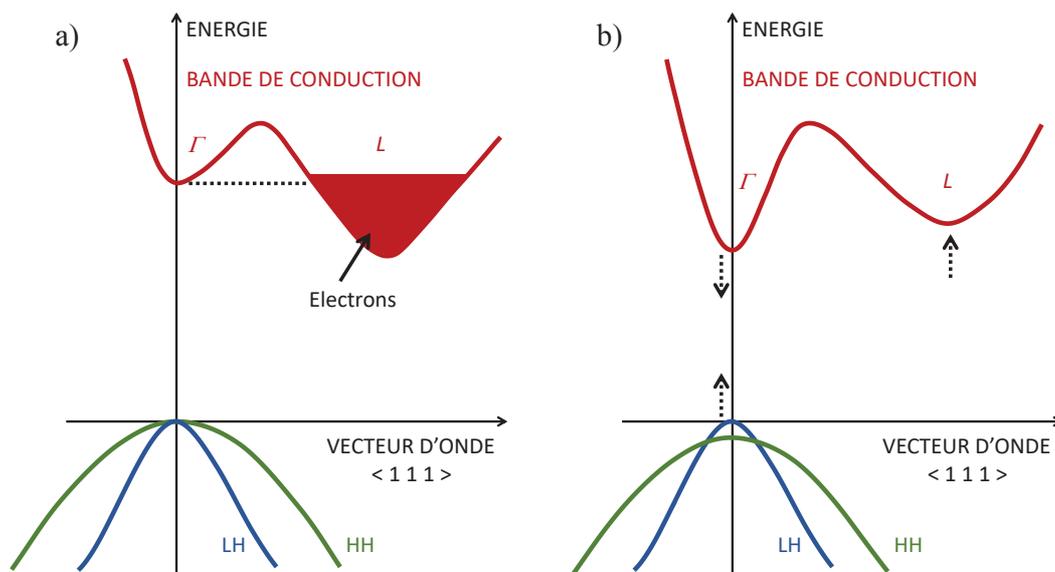
De nombreuses études ont tenté de résoudre ce problème grâce à diverses techniques. En ce qui concerne le silicium massif, plusieurs stratégies ont été étudiées. La première a été de réduire au maximum le nombre de recombinaisons non-radiatives en utilisant pour cela du silicium extrêmement pur et en structurant sa surface [30]. Cependant, les étapes technologiques nécessaires à la réalisation de ce type de composants sont très complexes à mettre en œuvre et la longueur d'ondes d'émission, proche de 1150 nm, n'est pas intéressante pour le domaine des télécoms. D'autres études ont tenté d'augmenter les recombinaisons radiatives par dislocations et injections de porteurs [31]. Nous pouvons également citer les stratégies consistant à introduire des centres d'impuretés dans le silicium comme l'erbium [32], [33], à nano-structurer le silicium [34] ou encore à utiliser des effets de confinements quantiques, des boîtes quantiques [35] ou des nanocristaux [36], [37]. Une démonstration de laser silicium a été présentée par une équipe du MIT en réalisant un laser silicium Raman [38]. Cependant aucune de ces solutions n'a encore été implantée sur une puce de transmission/réception de données en photonique sur silicium.

Une solution pour contourner le problème de l'émission dans le silicium pourrait être de réaliser un laser intégré à base de germanium.

Deux approches différentes sont actuellement suivies pour obtenir une source laser germanium compatible avec la technologie CMOS (Figure I-9). La première approche, proposée en 2007 par le MIT, consiste à doper fortement ( $N_d > 7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ) le germanium par un élément de type n pour remplir la vallée L de la bande de conduction (Figure I-9 a)). Un effet laser a été annoncé sous pompage optique pour un dopage de  $N_d = 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  [39] et sous pompage électrique pour  $N_d = 4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  [40]. Certaines études complémentaires remettent cependant en cause ces résultats [41], [42], [43], [44] et [45].

Une autre solution pour modifier la structure de bandes indirecte du germanium et favoriser les recombinaisons radiatives, est d'appliquer une forte contrainte en tension au germanium (*Figure I-9 b*) afin de le transformer en matériaux pseudo à gap « direct ». Il a été calculé qu'une contrainte tensile biaxiale de 2 % (~ 5 % pour l'uniaxiale) permettrait de transformer le Ge en un matériau à pseudo gap direct dont la longueur d'ondes d'émission serait de 2,34  $\mu\text{m}$  [46], incompatible donc pour des applications télécoms. D'autres études tendent à confirmer cette hypothèse [42], [47]. En fait, il existe plusieurs façons d'introduire une contrainte dans le germanium :

- La première consiste à épitaxier le Ge sur un substrat de silicium qui, du fait de la différence des coefficients de dilatation thermique entre les deux matériaux, induit une contrainte tensile au germanium [48], [49]. Cependant, cette technique ne permet pas d'obtenir une contrainte supérieure à 0,25 % ce qui est insuffisant pour la génération d'un mode optique dans le proche infrarouge.
- Une autre possibilité est l'utilisation d'une couche supplémentaire de SiN pour induire le stress nécessaire [50], [51], [52]. Une structuration du germanium sous la forme de pont suspendu peut également être utilisée pour générer de la contrainte uniaxiale ou biaxiale dans le matériau [53], [54], [55], [56], [57].

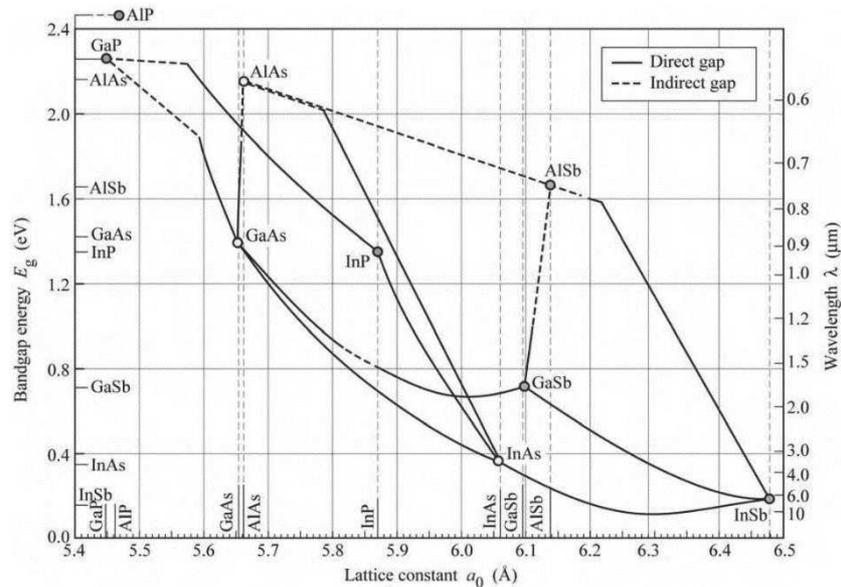


**Figure I-9 : Schémas de structures de bandes simplifiées avec en a) d'un Ge dopé n et en b) d'un Ge fortement contraint.**

Ainsi, la réalisation de lasers dans des matériaux à gap indirect constitue un défi scientifique ardu. Bien que certaines de ces études soient prometteuses, leur compatibilité avec les technologies du CMOS et leur utilisation dans les télécommunications nécessitent de nombreux approfondissements et quelques années de recherches.

Une solution à l'intégration d'une source lumineuse est l'utilisation de matériaux à gap direct (*Figure I-8 b*) tels que ceux de la famille des III-V et de leurs composés ternaires et quaternaires associés. Ces matériaux, connus pour leurs très bonnes propriétés d'émission de lumière, sont déjà utilisés de manière industrielle pour les communications à longues distances. Un quasi-accord de maille entre certains alliages de III-V permet une sélection de la longueur d'onde d'émission en fonction de la

composition chimique des couches de l'empilement qui est un des atouts qui font de III-V des candidats privilégiés à la réalisation de sources lasers (*Figure I-10*).



**Figure I-10 : Paramètre de maille en fonction de l'énergie de la bande interdite de semi-conducteurs III-V et du silicium [58].**

Pour des émissions dans certaines gammes (i.e. 600 - 800 nm et 1300 - 1500 nm) des systèmes du type AlGaAs / GaAs et InGaAsP / InP respectivement sont privilégiés. La croissance de ces matériaux se fait grâce à des techniques d'épitaxie variées. Il existe trois méthodes d'intégration de ces matériaux III-V sur plaques de silicium à savoir *Figure I-11*:

- Le flip-chip (*Figure I-11 a*) :

Cette technique d'intégration hétérogène est connue depuis longtemps et est bien maîtrisée. Elle est déjà utilisée pour la production de dispositifs III-V sur silicium. Cette méthode se différencie des deux autres par son caractère macroscopique et a comme avantage majeur de permettre l'intégration des diodes lasers hautes performances, optimisées et testées individuellement. Elle permet également d'ajouter un système de contrôle de la température à la diode, ce qui est important pour la puissance optique et la longueur d'onde d'émission. De plus, avec cette méthode, les risques de contamination du CMOS sont nuls puisque le procédé est réalisé en fin de processus.

Néanmoins, cette méthode présente certains inconvénients car les tolérances d'alignements du laser par rapport au circuit photonique qui sont très strictes ( $< 1 \mu\text{m}$ ). En effet, le faisceau doit être parfaitement aligné avec l'entrée optique du circuit pour minimiser les pertes. Cet alignement, réalisé puce par puce, engendre un surcoût de production, une vitesse de réalisation plus lente que d'autres procédés et une densité d'intégration relativement faible. Il faut également noter qu'il n'est pas possible de réaliser deux opérations de *flip-chip* l'une après l'autre tel que le report d'une puce laser sur un circuit par *flip-chip* puis l'intégration de cette puce sur un circuit imprimé via cette méthode.

- La croissance par hétéroépitaxie (*Figure I-11 b*) :

L'hétéroépitaxie consiste à faire croître un matériau III-V sur un substrat de silicium à une température comprise entre 600 °C et 700 °C. Cette intégration est réalisée en début de fabrication et est

donc dite « front-end ». Le fort désaccord de paramètres de mailles entre les matériaux III-V et le silicium constitue un réel obstacle pour la fabrication d'empilements lasers. Cette différence de paramètres de mailles est à l'origine de contraintes mécaniques dont la relaxation plastique génère de nombreux défauts comme des dislocations et des fautes d'empilements. Ces derniers sont des sites de recombinaisons non radiatives néfastes à l'efficacité quantique du laser. Cependant malgré ceci, l'émission de plusieurs dizaines de milliwatts en pompage électrique pulsé par un laser a pu être démontrée [59], [60]. Les deux inconvénients de cette démonstration résident dans l'utilisation de substrats de silicium non-standards et celle d'un *buffer* épais faisant obstacle au couplage optique vers le silicium.

Une autre réalisation à base non pas de puits quantiques mais de boîtes quantiques a été présentée dans Nature en 2016 [61]. L'avantage de cette méthode est de diminuer les pertes dues aux dislocations.

- Le collage (Figure I-11 c) :

Cette méthode permet de coller un substrat de silicium ou SOI à un empilement laser III-V épitaxié sur son substrat III-V d'origine qui est retiré par la suite par voie mécano-chimique pour ne laisser que les couches lasers. Contrairement au « flip-chip » présenté précédemment, le collage ne requiert habituellement aucune étape d'alignements critiques entre le laser et le circuit car celles-ci sont réalisées à l'étape de lithographie. L'ensemble du procédé est compatible avec l'utilisation de substrats SOI sur une ligne de production CMOS même si une adaptation des procédés de structuration du III-V est nécessaire. Il existe trois types de collages :

- Le collage métallique :

Cette méthode requiert un alliage métallique comme agent de collage. Des alliages eutectiques tels que l'or ou l'indium sont généralement utilisés. L'avantage de ce collage est que la couche métallique est à la fois utilisée comme interface de collage et comme électrode. L'inconvénient réside dans le fait que le métal est un matériau absorbant : ainsi le couplage de la lumière à un guide d'onde dans le SOI sous les couches III-V est rendu difficile à cause des pertes optiques. Néanmoins, certaines architectures de ce type de laser ont été étudiées de manière à minimiser ce désavantage [62].

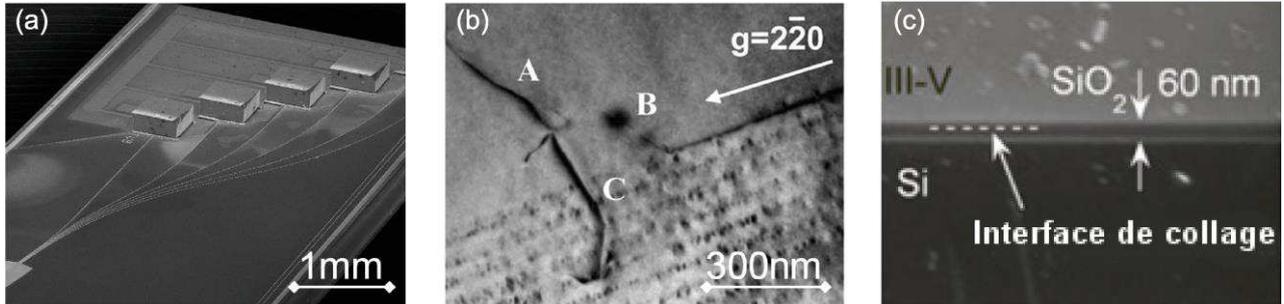
- Le collage adhésif :

Ce procédé utilise une solution polymère comme agent de collage (DVS-BCB : DiVinylSiloxane BenzoCycloButène). Le BCB est déposé sur le substrat et recuit à basse température pour éliminer les solvants et polymériser la résine. Une pression uniforme est appliquée sur les substrats pendant le recuit favorisant l'adhésion [63]. Le principal avantage de ce collage est qu'il est tolérant aux particules et à la rugosité de surface car les défauts sont compensés par la déformation du polymère. Son inconvénient est que pour des épaisseurs de collages faibles (< 100 nm) la qualité de surface des substrats reste un paramètre critique. De plus, le BCB est un mauvais conducteur thermique, ce qui limite l'évacuation de la chaleur générée par le fonctionnement du laser entraînant une dégradation de ses performances sur le long terme.

- Le collage direct  $\text{SiO}_2 / \text{SiO}_2$  :

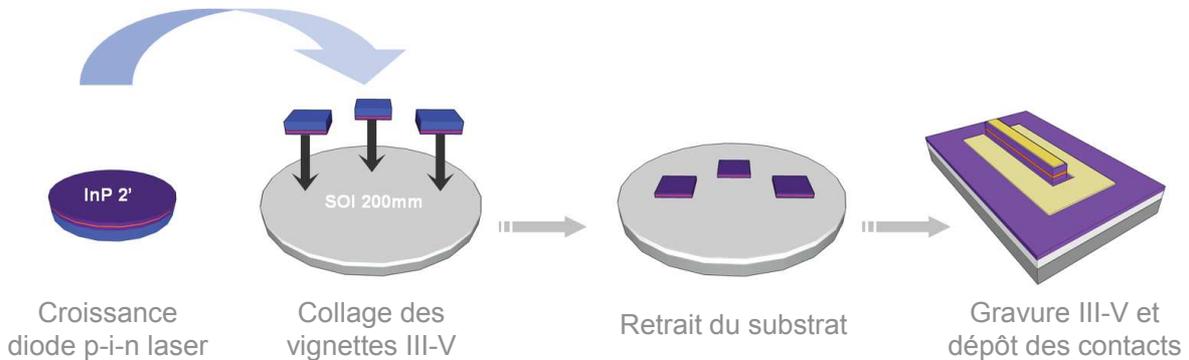
Ce collage est celui utilisé notamment au CEA-Leti [64]. Il tire parti de l'adhérence de Van der Waals créée entre deux surfaces de type hydrophiles. Ce procédé est par exemple utilisé pour la réalisation de substrats SOI par la technologie Smart-Cut<sup>TM</sup>. Si le collage direct standard fait appel à une étape de recuit haute température, celui-ci est proscrit dans le cas d'un collage InP sur silicium.

Pour ce procédé, une couche d'oxyde est déposée, planarisée par CMP ou formée par oxydation. Les surfaces oxydées sont ensuite activées par plasma et mises en contact : des liaisons de Van der Waals sont alors créées à l'interface. Le recuit basse température transforme les liaisons faibles en liaisons covalentes tout en évacuant les gaz produits. La couche d'oxyde doit être suffisamment épaisse pour éviter la formation de bulles à l'interface entre les deux matériaux. Ce collage permet de coller soit des substrats entiers d'InP soit des vignettes de quelques millimètres carrés.



**Figure I-11 : Clichés TEM et MEB de résultats de différentes intégrations de III-V sur silicium avec en (a) des lasers InP sur SOI par flip-chip [65], en (b) des dislocations dans un filtre de boîtes quantiques InAs après hétéroépitaxie [59] et en (c) des vignette d'InP reportées sur SOI par collage moléculaire [66].**

La *Figure I-12* présente le principe du report et du collage sur SOI de vignettes de matériaux III-V épitaxiés sur un substrat SOI indépendant. A l'issue de cette étape, le substrat du III-V est retiré et le III-V peut être structuré suivant un motif défini par l'architecture du laser. Enfin, le dépôt des contacts du laser termine la fabrication du dispositif.



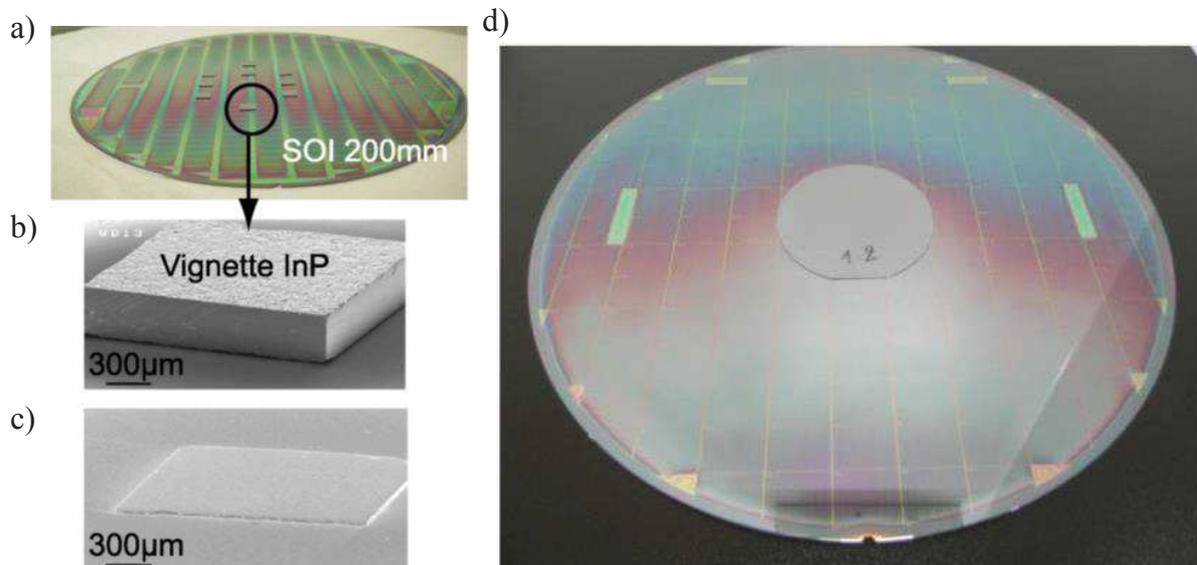
**Figure I-12 : Principe du report des substrats III-V sur plaques silicium ou SOI pour la fabrication de diodes laser sur silicium.**

Ce procédé permet un haut niveau d'intégration et l'utilisation d'épitaxie laser de bonne qualité. Il est réalisé à température ambiante et permet donc une intégration des dispositifs en fin de processus technologique (back-end).

La *Figure I-13* présente différents exemples de collages moléculaires, plus avantageux par rapport au collage adhésif sur l'aspect thermique. En effet, l'oxyde est un meilleur conducteur thermique que le BCB et permet généralement au laser de générer un échauffement moins important pendant son fonctionnement. Cependant, ce procédé est très sensible aux défauts des surfaces en contact lors de l'étape de collage.

Le collage de matériaux III-V peut être notamment fait de deux manières. Sur la *Figure I-13 a)* est illustré le collage direct de vignettes de III-V sur une plaque SOI structurée. Des images MEB du détail

d'une vignette avant retrait de son substrat et après sont montrées respectivement *Figure I-13 b)* et *Figure I-13 c)*. Cette technique nécessite une étape complexe d'alignement des vignettes par rapport aux motifs définis dans le SOI. Afin de s'affranchir de cette étape, une solution consiste à coller une plaque complète de III-V sur celle de silicium (*Figure I-13 d)*). Cependant, le pourcentage de III-V réellement utilisé est très faible ce qui en fait une technique chère à mettre en œuvre.



**Figure I-13 : Collage moléculaire III-V sur SOI avec en a) la photo d'un vignettage d'épitaxie laser III-V 5 x 5 mm sur SOI 200 mm (réalisée au CEA-Leti), en b) la vue de la vignette avant retrait substrat et en c) la vue après retrait substrat, et en d) l'illustration du collage pleine plaque d'une épitaxie laser III-V 2'' sur SOI 200 mm [2].**

### 1.3.2 Exemples de réalisations de sources intégrées

Si la première démonstration d'intégration d'un laser III-V sur du silicium pompé électriquement remonte à 1996 [67], il existe aujourd'hui, grâce à la maturation des technologies CMOS et photonique sur silicium ainsi qu'à l'effort de nombreux acteurs du marché, de nombreux exemples de réalisation de sources lasers à base de matériaux III-V et compatible avec le silicium.

#### ○ La cavité Fabry-Pérot :

Cette cavité est la plus simple des cavités laser étudiées. Le matériau actif est borné par deux miroirs généralement créés par clivage suivant un plan cristallin ou par gravure. L'interface semi-conducteur/air qui joue le rôle de réflecteur peut voir sa réflectivité augmenter par le dépôt de matériaux adaptés. Ce type de laser est la plupart du temps multimode du fait de la large bande spectrale réfléchi par les miroirs. La validation d'une technologie laser se fait généralement par la réalisation d'une cavité Fabry-Pérot.

L'une des démonstrations pionnières d'un laser hybride III-V/Si fut réalisée conjointement par UCSB et Intel sous la forme d'un Fabry-Pérot [68]. La *Figure I-14* présente un schéma de la coupe transverse de ce laser. Un report par collage moléculaire permet d'intégrer le III-V sur une plaque SOI préalablement structurée. Le laser est optimisé de telle sorte que le mode optique soit principalement confiné dans le guide silicium. Ainsi, seule la partie évanescente du mode recouvre les puits quantiques. Si une implantation H<sup>+</sup> sur les flancs du ruban III-V permet d'optimiser l'injection électrique, il en

résulte néanmoins que ce type de laser présente un courant de seuil élevé, 65 mA, et est fortement multimodes à 100 mA. Une autre démonstration du même type de laser a été faite [69].

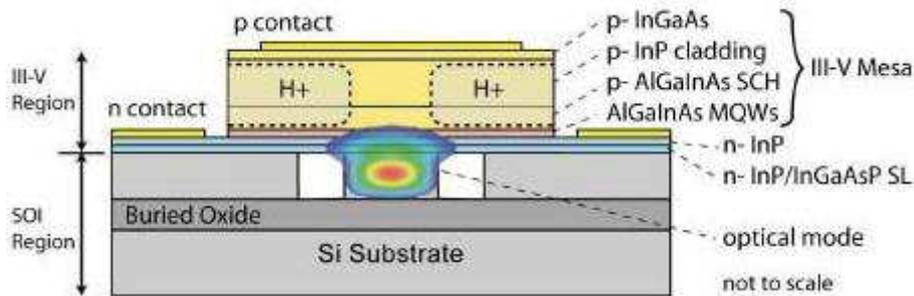


Figure I-14 : Schéma de la coupe longitudinale d'un laser Fabry-Pérot avec superposition du mode optique [68].

Des intégrations de lasers Fabry-Pérot hybride III-V/Si ont également été réalisées par Ghent University et l'IMEC et par le CEA-Leti et III-V Lab suivant des approches différentes [70], [71], [72], [73], [74].

Dans le cas de l'IMEC, un collage grâce à une couche de polymère BCB est préféré au report moléculaire. Cette technique permet de s'affranchir des contraintes d'une surface ultra propre, parfaitement plane et sans contamination nécessaire au collage moléculaire. La lumière en sortie du III-V est guidée dans un polymère puis, progressivement, couplée dans le guide silicium grâce à un épanouisseur, ou taper, structuré dans le Si [70] (Figure I-15 a)).

L'approche privilégiée par le CEA-Leti est basée sur un report direct du III-V par collage SiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>. Le transfert de mode optique entre le III-V et le Si consiste à définir un taper à chaque extrémité du ruban III-V soit dans les deux guides [71], soit seulement dans le guide SOI [72] (Figure I-15 b)). De ce fait, au sein de la zone active, le mode est principalement confiné dans le III-V augmentant ainsi le gain de la cavité.

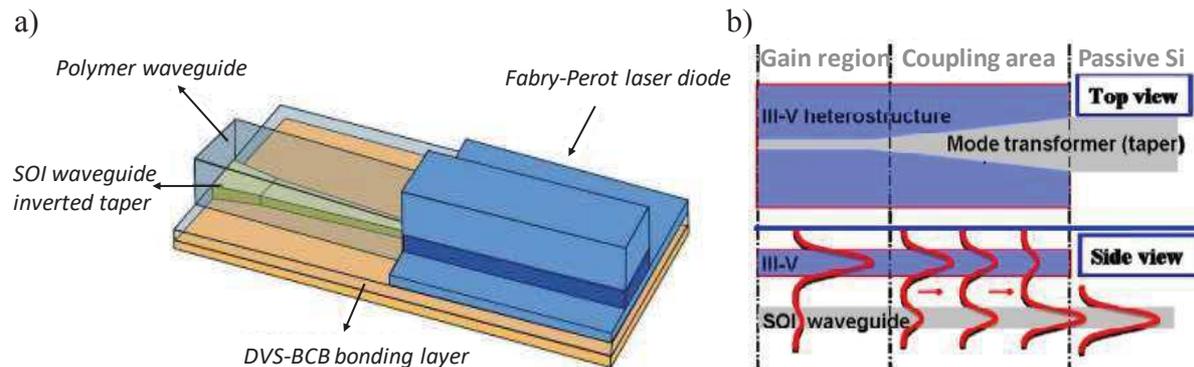
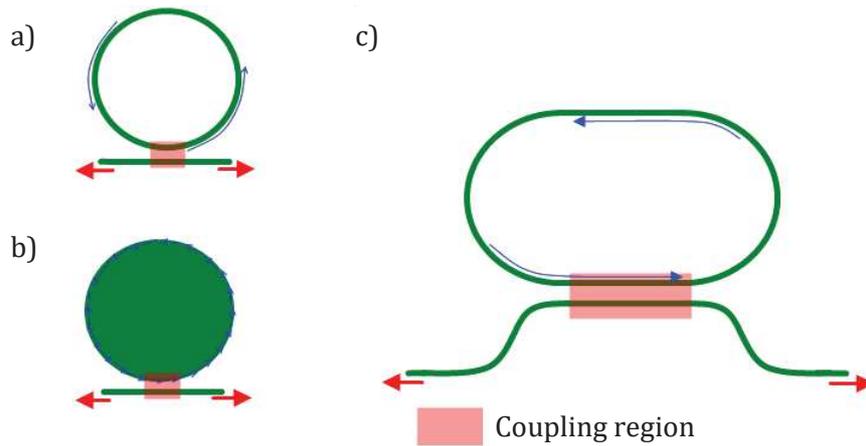


Figure I-15 : Schémas en a) de la structure de couplage de l'IMEC utilisant un taper inverse dans un guide polymère [70] et b) de la vue du dessus et de la vue de côté d'un transformateur de mode par taper dans le Si [74].

- Les cavités circulaires : lasers micro-disques, micro-anneaux et racetrack :

La Figure I-16 présente les différentes formes de cavités circulaires réalisables. La Figure I-16 a) et la Figure I-16 b) représentent deux structures très proches appelées respectivement laser micro-anneau et laser micro-disque. Une troisième structure appelée laser *racetrack* est définie en Figure I-16 c).



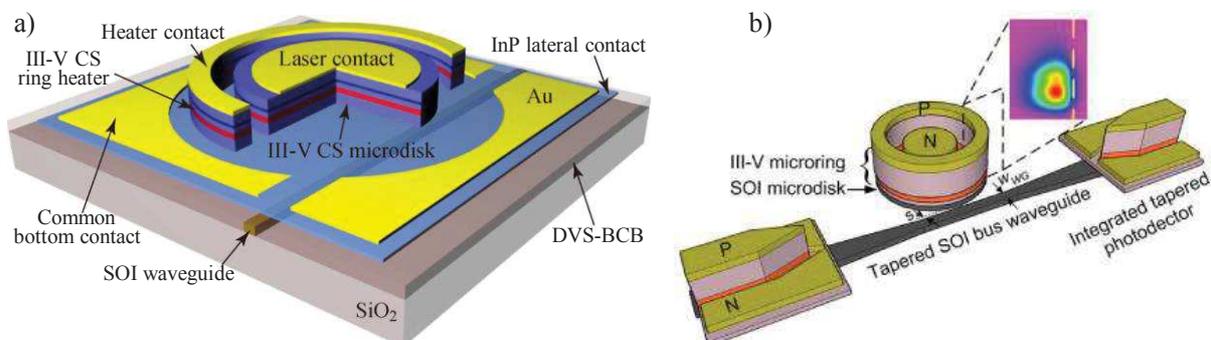
**Figure I-16 : Schéma des différentes cavités lasers circulaires avec en a) un micro-anneau, en b) un micro-disque et en c) un laser racetrack [2].**

Les types de lasers sous forme de micro-disque (*Figure I-16 a)*) ou de micro-anneau (*Figure I-16 b)*) présentent les avantages d’une capacité d’intégration extrêmement forte et d’une faible consommation électrique en raison de leurs faibles dimensions.

Comme pour d’autres types de cavités, une épitaxie de III-V est transférée sur un substrat de silicium structuré par collage moléculaire. Cette épitaxie est elle-même structurée ensuite sous la forme d’un disque ou d’un anneau d’une dizaine de microns de diamètre puis contactée. La génération de lumière au sein de l’anneau se fait à travers un mode de galerie le long du bord du guide circulaire III-V. La longueur de la cavité résonnante et donc la longueur d’ondes d’émission de ce type de laser est dépendante du diamètre de l’anneau créé. Le couplage de la lumière entre le III-V et le guide silicium, localisé sous l’anneau, s’effectue généralement par couplage évanescent.

Des lasers micro-disques, dont un exemple est illustré *Figure I-17 a)*, ont été démontrés en tant que source mono-longueurs d’ondes [75], [76], [77], [78], ou comme source multi-longueurs d’ondes avec l’association de quatre micro-disques de diamètres différents [79]. Ces lasers développent une puissance dans le guide de l’ordre de la dizaine de  $\mu\text{W}$  pour un courant de seuil inférieur au milliampère et une longueur d’onde d’émission entre 1580 nm et 1600 nm.

De même, des lasers sous forme de micro-anneaux (*Figure I-17 a)*) ont été réalisés et affichent une puissance de 250  $\mu\text{W}$  pour un courant de seuil d’environ 6 mA [80]. La longueur d’onde émise est de 1530 nm à un courant d’injection de 16 mA.

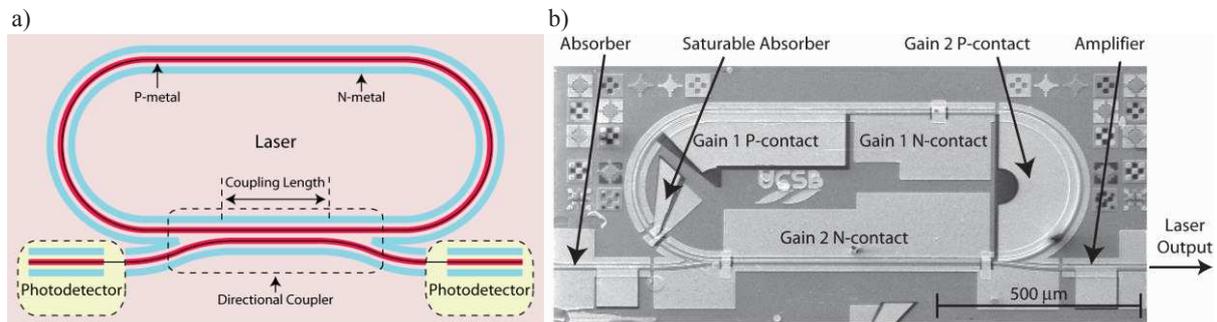


**Figure I-17 : Schémas des structures de lasers a) micro-disque [78] et b) micro-anneau [80].**

Le type de cavité *racetrack*, consiste à former une cavité en forme de boucle et est composée de deux portions de guides droites et de deux demi-arcs de cercle. L'avantage de la cavité *racetrack* est de ne pas nécessiter de structuration de miroirs

Une réalisation de ce laser montrée en *Figure I-18* a été démontrée par UCSB en utilisant une technique de couplage évanescent développée pour des lasers Fabry-Pérot [81], [82]. Un coupleur directionnel permet de transférer la lumière entre la cavité et un guide d'ondes. En *Figure I-18 a)*, des photodétecteurs placés de part et d'autre du guide d'ondes de sortie permettent de détecter la lumière émise.

Un absorbant saturable « mode locking » est intégré à la cavité laser en *Figure I-18 b)* afin d'obtenir un fonctionnement pulsé de type modes bloqués. La longueur d'ondes d'émission de ces réalisations est de l'ordre de 1590 nm pour une puissance max de 29 mW et un courant de seuil de 175 mA.



**Figure I-18 : Cavité laser *racetrack* avec en a) un schéma d'une vue du dessus de la cavité avec photodétecteurs intégrés [81] et en b) une image MEB du dispositif [82].**

Ces lasers ont une plus grande empreinte sur puce que ceux à base de micro-disques et de micro-anneaux. Outre la forte consommation électrique due au haut courant de seuil, un inconvénient majeur de cette technologie est la présence d'une compétition modale entre le mode horaire et le mode anti-horaire générés par la cavité faisant apparaître des sauts de modes entre les deux sorties et donc une instabilité dans le spectre optique.

- Les cavités basées sur des réseaux de Bragg :

La réflectivité de ce type de cavité laser provient d'une structure périodique à changement d'indices appelée réseau de Bragg. Elle permet de réaliser des diodes lasers puissantes et monomodes particulièrement prisées par le domaine des télécommunications. Il existe trois types de laser basés sur des réseaux de Bragg : le VCSEL (*Vertical Cavity Surface Emitting Lasers*), le DFB (*Distributed FeedBack*) et le DBR (*Distributed Bragg Reflector*).

Les lasers VCSEL, dont un exemple est représenté en *Figure I-19*, sont intéressants pour les télécommunications en raison de leur puissance initiale élevée compensant les pertes de couplage avec la fibre. La structure de Bragg est réalisée par une alternance de couches semi-conductrices dopées n et p de part et d'autre de puits quantiques.

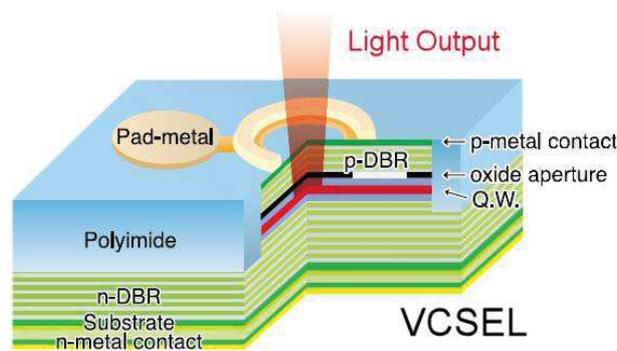


Figure I-19 : Schéma d'une cavité laser de type VCSEL (Lasers pointer forum).

Néanmoins, leur utilisation dans le cadre d'une intégration sur une puce photonique silicium est problématique, du fait d'une émission de lumière par la surface, perpendiculairement au substrat, qui rend le couplage dans un guide d'ondes SOI extrêmement complexe.

Dans le cas d'un laser DFB, le réseau de Bragg est réalisé au niveau même de la zone de gain fournissant ainsi de multiples réflexions tout du long de la direction de propagation de la lumière (Figure I-20). Pour les lasers DFB hybrides III-V/Si, le réseau peut être structuré soit dans le III-V [83], [84] tel que présenté dans la Figure I-20 a), soit dans le silicium dont un exemple est illustré en Figure I-20 b), [85], [86], [87], [88], [89], [90].

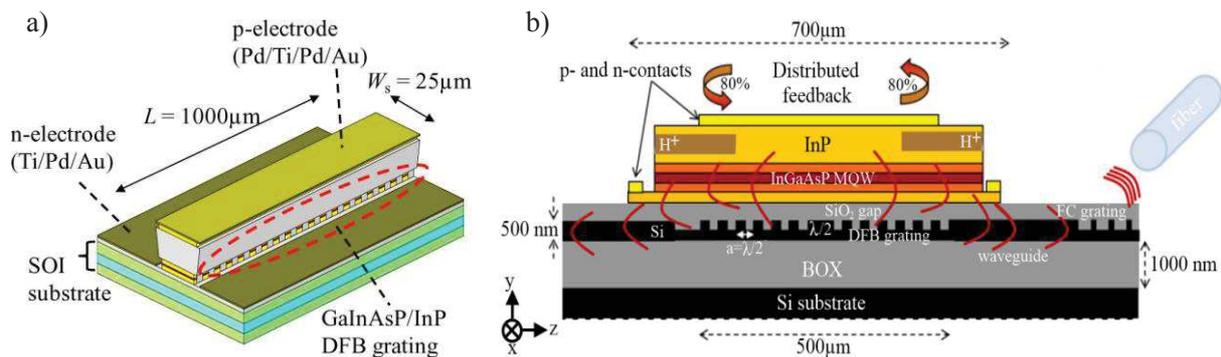


Figure I-20 : Schémas de cavités laser de type DFB avec en a) le réseau structuré dans le III-V [84] et en b) le réseau structuré dans le silicium [89].

Les lasers hybrides DFB sont recommandés en cas de besoin d'un laser intégré fortement monomode. En revanche, du fait de la localisation de réseau, aucune accordabilité ne peut être réalisée sur ces lasers.

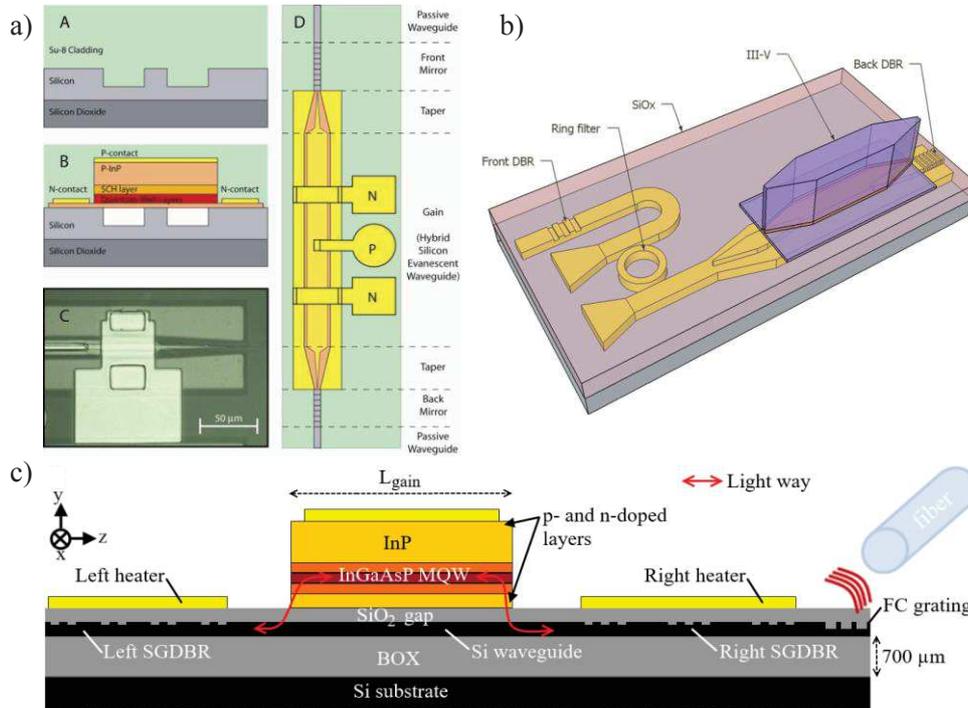
Enfin, les lasers dits DBR sont composés d'au moins un miroir de Bragg structuré sur l'un des côtés d'une zone de gain, dans le sens de la propagation de la lumière (Figure I-21). Généralement, on retrouve les miroirs de Bragg de part et d'autre de la zone de gains.

Différentes structures de lasers DBR ont été expérimentées. L'adaptation de la structure hybride développée par UCSB et Intel pour leur laser Fabry-Pérot en un laser DBR a été réalisé en 2008 et a permis d'obtenir une puissance de 11 mW à 1596 nm [91] (Figure I-21 a). Une version accordable a également été faite et a montré une accordabilité du laser sur 13 nm [92].

Des lasers DBR couplés à un anneau résonnant, telle que la structure montrée en Figure I-21 b), ont été démontrés par l'IMEC et III-V Lab et présentent des puissances de l'ordre de 10 mW pour une

longueur d'ondes d'émission proche de 1540 nm [93], [94], [95]. Ces lasers sont accordables sur une plage de 8 à 9 nm.

Enfin, une dernière structure a été développée par le CEA-Leti et est présentée en *Figure I-21 c)*. Les réseaux de Bragg sont structurés dans le guide SOI de part et d'autre de la cavité avec une faible épaisseur de gravure afin d'optimiser la sélectivité des miroirs. L'un des deux est entièrement réflecteur tandis que l'autre est partiel. Ces lasers ont été réalisés pour deux longueurs d'ondes d'émission : 1550 nm [96] et 1310 nm [97].



**Figure I-21 : Schémas de cavités laser de type DBR avec en a) la structure développée par UCSB et Intel [91], en b) celle de l'IMEC et III-V Lab [94] et en c) celle du CEA-Leti [97].**

Les lasers DBR sont généralement accordés en longueur d'ondes grâce à des chaufferettes placées soit au-dessus d'un anneau résonnant, soit au-dessus des miroirs de Bragg, ce qui augmente drastiquement la consommation électrique du laser.

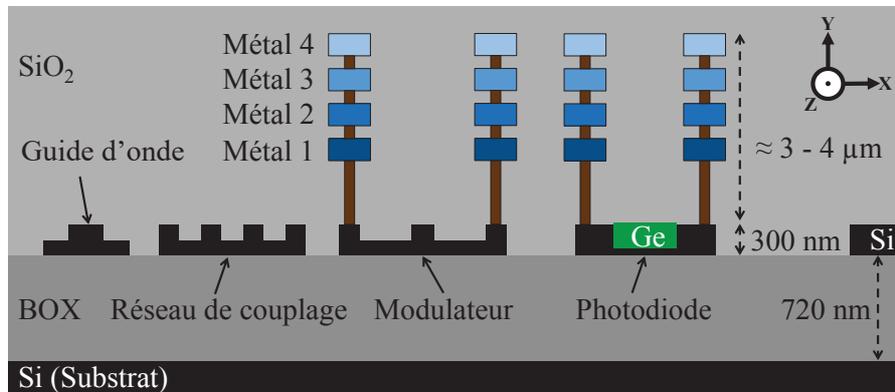
De même que dans le cas de lasers Fabry-Pérot, le couplage de la lumière du III-V vers le silicium peut être réalisé de plusieurs manières, souvent dépendantes de la technologie utilisée. Nous pouvons citer ainsi des lasers dont le couplage entre le guide III-V et le guide silicium se fait grâce à la queue évanescente du mode laser principalement confiné dans le Si [91] et ceux dont le couplage entre les deux guides est réalisé grâce à un taper [93], [97].

### 1.3.3 Compatibilité entre construction des interconnexions métalliques et intégration du matériau à gains

Les puces photoniques présentées précédemment dans le chapitre nécessitent la présence d'interconnexions métalliques afin de piloter les différents composants actifs. Un exemple de puces fabriquées par STMicroelectronics est décrit dans un article de F. Bœuf et al. publié dans *Journal of*

*Lightwave Technology* en janvier 2016 [12]. Pour ce type de puces, 4 niveaux de métallisations. Un schéma simplifié en coupe de ce composant est montré *Figure I-22*.

L'épaisseur totale de l'empilement d'interconnexions métalliques est d'environ  $4\ \mu\text{m}$ .



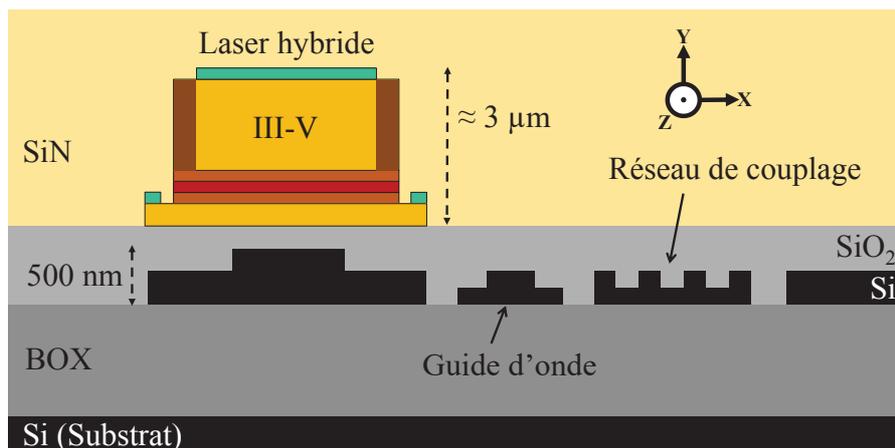
**Figure I-22 : Schéma en coupe d'une puce photonique type STMicroelectronics.**

La construction de chacun des niveaux métalliques est réalisée grâce à une brique technologique reposant sur l'utilisation de CMP (*Chemical Mechanical Polishing*) pour planariser la surface de la plaque après dépôts des métallisations.

L'objectif de cette thèse est d'intégrer une source laser sur ce type de puce photonique en modifiant au minimum l'architecture de ses connexions.

Parmi les différentes technologies de lasers sur silicium présentées précédemment, nous avons choisi de nous concentrer sur l'intégration d'une source de type DBR. L'architecture retenue est celle développée par le CEA-Leti comportant une zone de gain hybride III-V/Si bordée de deux miroirs de Bragg structurés dans le guide SOI dont un schéma en coupe longitudinale est présenté *Figure I-21 c)* [64], [97].

Un schéma simplifié d'une vue en coupe d'un tel laser est montré *Figure I-23*.



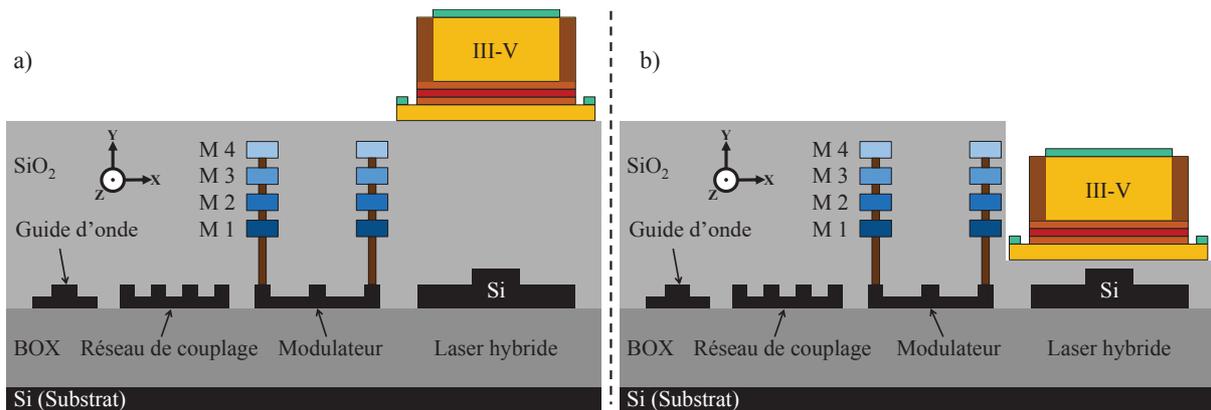
**Figure I-23 : Schéma en coupe d'un laser hybride III-V/Si développé par CEA-Leti.**

Dans ce type de source hybride, un empilement III-V d'environ  $3\ \mu\text{m}$  d'épaisseur est collé par report direct à la surface d'une plaque SOI préalablement structurée. Pour réaliser ce collage, la surface des deux empilements doit être parfaitement plane et sans impureté.

De plus, comme nous l'avons vu précédemment, le mode optique dans la zone de gain est principalement confiné dans le III-V et est adiabatiquement transféré dans le guide SOI à chaque extrémité du ruban III-V. Afin de pouvoir réaliser ce couplage de mode, l'épaisseur de SiO<sub>2</sub> servant au collage est typiquement de l'ordre d'une centaine de nanomètres.

Les différentes options pour reporter le III-V sur une plaque SOI structurée et munie d'interconnexions métalliques pourraient être :

- Le collage du matériau à gains à la surface de la plaque après l'encapsulation des composants tel qu'illustré *Figure I-24 a)*. Cette solution remplit la condition d'avoir une surface parfaitement plane pour le report. En revanche, en raison de l'épaisseur des métallisations, le III-V se trouve à plusieurs microns au-dessus du SOI, ce qui ne permet plus le couplage de la lumière entre le guide III-V et le guide SOI. Cette hypothèse est donc à exclure.
- La création d'une cavité à travers l'encapsulation des composants afin de coller le III-V au-dessus du guide SOI à une épaisseur permettant le couplage entre les deux guides (*Figure I-24 b)*). Cette technique pose de sérieux problèmes technologiques. En effet, la surface disponible après une gravure n'est généralement pas d'une qualité suffisante pour un report direct. De plus, cela nécessiterait l'utilisation de vignettes de III-V dont la manipulation et le positionnement sont de réels défis. Cette hypothèse est donc également à exclure.



**Figure I-24 : Schémas en coupe d'un laser hybride III-V/Si avec en a) le collage du III-V à la surface de la plaque SOI et en b) dans une cavité gravée.**

Aucune de ces deux possibilités ne convient à l'intégration de matériaux III-V dans le but de créer un laser hybride III-V/Si. Le problème posé par l'empilement de connexions métalliques est valable pour tous les types de cavités présentées dans le paragraphe I.2.2.

Un nouveau schéma d'intégration permettant la compatibilité entre le collage de matériaux III-V proche du guide SOI et la présence de plusieurs niveaux d'interconnexions métalliques est donc nécessaire.

## I.4 L'APPROCHE PROPOSEE : LE LASER HYBRIDE III-V/SI EN FACE ARRIERE

Les différentes démonstrations de lasers hybrides III-V/Si présentées précédemment ne convenant pas à la présence d'interconnexions métalliques de pilotage, nous avons imaginé un nouveau schéma d'intégration tenant compte de cette contrainte.

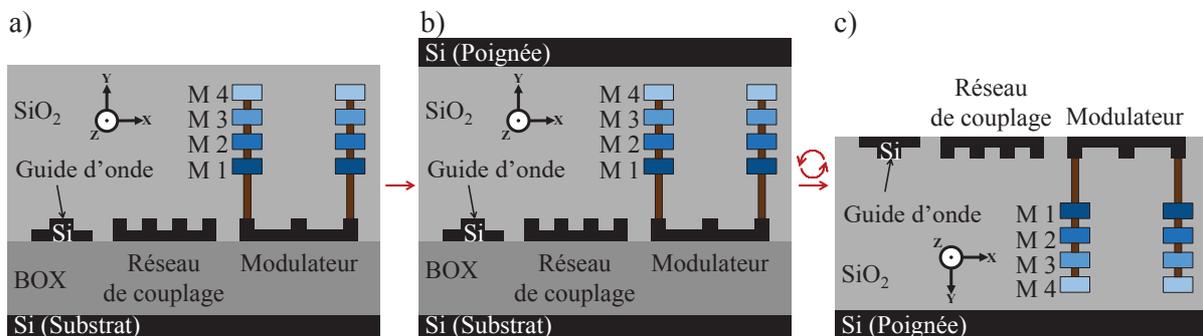
### 1.4.1 Principe de l'intégration face arrière

La surface de la plaque SOI structurée et métallisée, que nous appellerons par la suite surface « Front-Side », n'étant pas disponible pour le report de matériaux III-V, il convient d'en utiliser une autre. Cette surface doit être plane ou pouvoir être planarisée. Elle doit permettre de disposer d'une épaisseur précise et contrôlée de SiO<sub>2</sub> entre elle-même et le guide SOI encapsulé.

L'unique surface remplissant ces deux conditions est la face arrière du SOI que nous appellerons « Back-Side ». Nous avons donc développé une approche permettant de structurer la plaque SOI en Front-Side puis de retourner l'empilement pour coller le III-V en Back-Side.

La *Figure I-25* présente le procédé simplifié utilisé pour réaliser une telle opération.

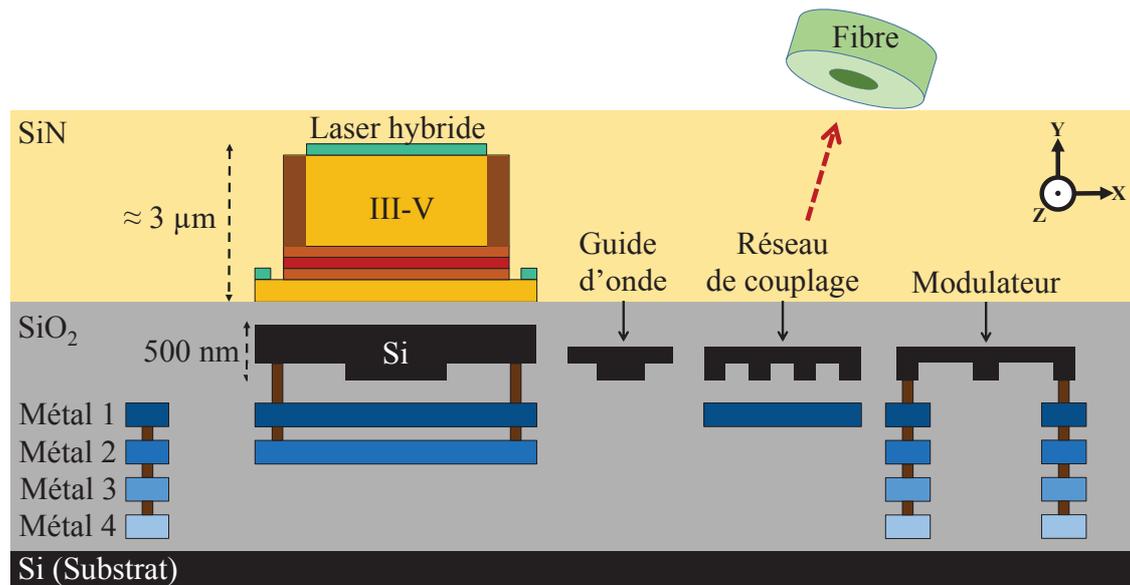
- Tout d'abord, la plaque SOI est structurée puis les interconnexions métalliques sont construites (*Figure I-25 a*).
- Après une planarisation par CMP de la surface, une poignée de silicium Bulk est collée par report direct (*Figure I-25 b*). Cette poignée deviendra le nouveau substrat de la plaque.
- Après un retournement de l'ensemble, l'ancien substrat et le BOX sont retirés (*Figure I-25 c*).



**Figure I-25 : Schémas de coupes transversales du processus de fabrication simplifié d'une plaque SOI « Back-Side » en a) la structuration du SOI et la métallisation, en b) le collage de la poignée Si à la surface de la plaque SOI et en c) le retrait de l'ancien substrat et du BOX.**

Suite à ces étapes, nous pouvons déposer une couche d'oxyde de l'épaisseur souhaitée au-dessus du Back-Side du SOI. Nous avons alors bien une surface qui valide les deux conditions nécessaires au report de III-V pour la réalisation d'un laser hybride III-V/Si.

Un schéma d'une puce photonique, avec une source laser hybride intégrée, construite en utilisant l'approche « Back-Side » est montré en *Figure I-26*. Sur cette figure, nous pouvons remarquer que les métallisations sont bien enterrées et ne gênent en rien l'intégration de matériaux III-V à une distance proche du guide SOI.



**Figure I-26 : Schéma d'une coupe transversal d'une puce photonique conçue par intégration « Back-Side ».**

L'objectif de cette étude est donc d'adapter la cavité laser hybride développée par le CEA afin qu'elle fonctionne suivant ce nouveau processus d'intégration.

Cette intégration entraîne également des changements pour certains des autres composants de la puce. Ainsi, avant de se lancer dans la fabrication d'une telle puce, le bon fonctionnement de composants essentiels à la transmission et à la réception du signal optique devra donc être vérifié.

#### 1.4.2 Adaptation des autres composants à l'intégration « Back-Side »

Concernant le laser en lui-même, la présence de métallisations enterrées pourrait permettre de réaliser un dissipateur thermique connecté aux extrémités latérales du guide SOI (*Figure I-26*). Ce drain thermique devrait améliorer les performances du laser vis-à-vis de la température. Cependant, le développement de ce dispositif ne faisant pas partie des objectifs de ce travail, son intérêt devra être démontré par une étude complémentaire.

Dans le cas des autres composants de la puce photonique, l'un des plus sensibles au changement d'intégration pour le « Back-Side » est le composant permettant de transférer la lumière depuis le guide d'ondes vers une fibre optique externe. Le retournement de plaque inhérent à notre intégration l'impacte directement : la lumière n'est plus diffractée vers la surface puis la fibre par le dispositif mais vers le substrat. Sur la *Figure I-26*, nous pouvons notamment voir la solution que nous avons envisagée pour pallier ce problème. En effet, un miroir métallique est présent sous la structure afin de réfléchir les rayons diffractés vers le substrat pour le renvoyer vers la fibre.

Les objectifs de cette étude sont donc :

- L'adaptation et la fabrication d'un réseau de couplage surfacique en configuration Back-Side ainsi que la validation de son bon fonctionnement par des caractérisations optique.
- La conception, la fabrication et la caractérisation d'un laser hybride III-V/Si en configuration Back-Side.

## I.5 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté le contexte et les objectifs de cette étude.

Nous travaillons pour le domaine des télécommunications et des transferts de données grâce à la lumière. Après un bref rappel historique de l'intérêt de l'optique dans ce domaine, nous avons montré que la photonique sur silicium est particulièrement adaptée. En effet, cette technologie permet d'atteindre de très hauts débits de transfert pour une consommation électrique compétitive. De plus, la possibilité de réutiliser des méthodes de fabrication développées pour la technologie CMOS est un atout considérable pour son industrialisation.

Nous avons montré que de nombreux dispositifs présents sur une puce de transmission et de réception de données en photonique sur silicium ont déjà été développés et certains sont même commercialisés. Un composant essentiel à ce type de communication n'est cependant toujours pas intégré directement sur la puce : la source laser.

Nous avons présenté les problèmes liés au gap indirect du silicium et du germanium pour réaliser ce type de source optique ainsi que les études en cours afin de les résoudre. Les solutions envisagées par les laboratoires de recherche ne permettant pas d'envisager une commercialisation à court terme, l'utilisation de matériaux à gap direct tels que les III-V apparaît donc comme une alternative prometteuse pour la réalisation de sources lasers intégrées sur puce silicium. De nombreuses démonstrations de telles sources ont été présentées dans ce chapitre mais aucune d'entre elles ne tient compte d'une contrainte liée aux autres composants actifs de la puce : la présence d'interconnexions métalliques de pilotage.

Nous avons mis en évidence le problème de compatibilité dans les processus de fabrication de la puce photonique sans source et d'une source laser DBR hybride III-V/Si. La nécessité d'étape de planarisation par CMP pour la construction des lignes métalliques et pour la préparation du substrat au collage du III-V ainsi que le besoin d'une faible épaisseur de SiO<sub>2</sub> entre le guide SOI et le guide III-V rendent complexe cette intégration.

Nous avons donc proposé un nouveau schéma d'intégration qui pallie ce manque de compatibilité : l'intégration du III-V en face arrière du SOI après la réalisation « classique » d'une puce photonique sans source via une étape de collage d'un nouveau substrat, un retournement et un retrait de l'ancien substrat.

Cette nouvelle intégration appelée « Back-Side » entraîne des changements vis-à-vis de la cavité laser hybride choisie mais aussi vis-à-vis d'autres composants de la puce. L'un des composants particulièrement affecté est celui permettant de diffracter la lumière entre le guide d'ondes de la puce et une fibre optique externe : le réseau de couplage surfacique.

Avant de se lancer dans l'étude de l'intégration d'une cavité DBR hybride III-V/Si en configuration Back-Side, nous devons nous assurer que nous ne dégradons pas les performances du coupleur.

# Chapitre II : Validation du schéma d'intégration Back-Side

## Sommaire

---

II.1	Introduction .....	28
II.2	Rappels théoriques sur l'optique intégrée .....	28
2.2.1	Théorie de la propagation guidée .....	28
2.2.2	Théorie sur les réseaux de Bragg.....	33
II.3	Etude du réseau de couplage surfacique.....	35
2.3.1	Avantages et inconvénients du réseau de couplage Back-Side .....	35
2.3.2	Adaptation du réseau de couplage à l'intégration Back-Side.....	39
II.4	Fabrication et Caractérisations .....	42
2.4.1	Fabrication d'un réseau de couplage adapté à l'intégration Back-Side.....	42
2.4.2	Caractérisations optiques.....	45
II.5	Conclusion.....	50

---

## II.1 INTRODUCTION

L'intégration Back-Side d'un laser hybride implique des changements à l'égard de certains des composants utilisés classiquement en Photonique sur silicium. C'est notamment le cas du réseau de couplage surfacique permettant d'interfacier la puce optique avec des fibres optiques. De plus, cette fonction est critique pour le fonctionnement de la puce photonique. C'est pourquoi, nous avons décidé de l'utiliser comme fonction test pour valider l'approche Back-Side que nous proposons.

Dans ce chapitre, nous rappellerons, dans un premier temps, les principes de la propagation d'un mode au sein d'un guide d'onde et la notion d'indice effectif. Nous présenterons alors la méthode avec laquelle nous avons déterminé chacun des modes optiques utilisés durant ce travail. Nous expliquerons ensuite le principe de fonctionnement des réseaux de Bragg en diffraction appliqué au réseau de couplage surfacique.

Dans un second temps, nous nous attacherons à l'étude du fonctionnement d'un réseau de couplage en configuration Back-Side. Après avoir défini différents axes d'optimisation d'un réseau, nous exposerons la solution imaginée pour assurer un bon fonctionnement du coupleur. Nous détaillerons alors le soin apporté à la sélection de la valeur optimale d'un paramètre critique : la distance entre le réseau et un réflecteur métallique. La fabrication de réseaux suivant différentes configurations ainsi que leurs caractérisations optiques clôtureront ce chapitre.

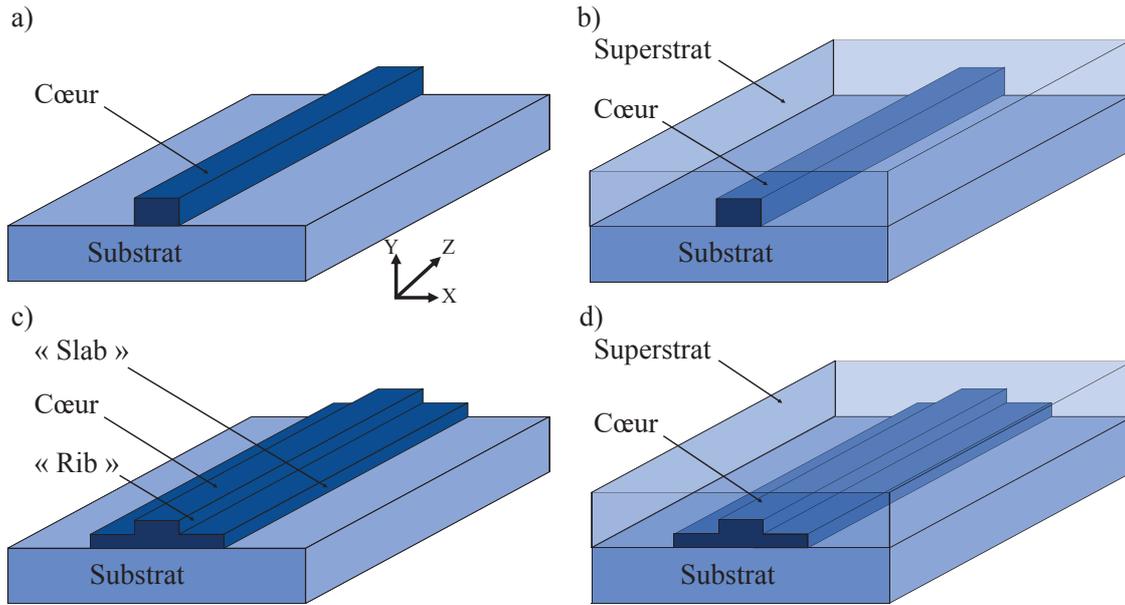
## II.2 RAPPELS THEORIQUES SUR L'OPTIQUE INTEGREE

Pour mener à bien l'intégration Back-side d'un laser, la connaissance des principes de la propagation guidée et des mécanismes des structures de Bragg est nécessaire et indispensable à la compréhension des conditions de confinement de la lumière et des enjeux du dimensionnement.

### 2.2.1 *Théorie de la propagation guidée*

Dans ce paragraphe, nous allons nous intéresser à la théorie de la propagation d'un mode optique dans un guide d'onde. Il existe plusieurs formes de guides d'onde dont les principales sont schématisées en *Figure II-1*.

- Guides d'onde et équations de propagation :
  - Les guides dont la section est rectangulaire, appelés guides ruban ou guides *strip*, sont montrés en *Figure II-1 a)* et en *Figure II-1 b)*. Le guide détaillé en *Figure II-1 b)* est encapsulé dans un superstrat.
  - Les guides arêtes, appelés guides *rib*, sont montrés en *Figure II-1 c)* et en *Figure II-1 d)*. Ces guides sont composés d'une base plus large, le *slab*, et d'une arête, le *rib*. De même que pour le guide *strip*, le guide détaillé en *Figure II-1 d)* est encapsulé dans un superstrat.



**Figure II-1: Schémas de différentes formes de guides d'onde avec en a) un guide *strip*, en b) un guide *strip* encapsulé, en c) un guide *rib* et en d) un guide *rib* encapsulé.**

Ces structures diélectriques permettent de confiner la lumière dans le plan transverse (XY) à l'axe de propagation (Z). La lumière est une onde électromagnétique : l'évolution de son champ électrique noté  $\vec{E}(x, y, z, t)$  et de son champ magnétique  $\vec{H}(x, y, z, t)$  est régie par les équations de Maxwell.

Ces équations de Maxwell sont le point de départ pour aboutir à des équations d'ondes qui peuvent décrire l'évolution spatiale des champs  $\vec{E}(x, y, z)$  et  $\vec{H}(x, y, z)$  pour une distribution connue de l'indice optique de réfraction noté  $n(x, y)$ . Nous nous plaçons dans un milieu sans charges ni courant. Dans ce cas de figure, ces équations sont les suivantes :

$$\begin{cases} \text{div}(n^2(x, y)\vec{E}) = 0 \\ \text{div}(\vec{H}) = 0 \\ \overrightarrow{\text{rot}}(\vec{E}) = -\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \\ \overrightarrow{\text{rot}}(\vec{H}) = -\varepsilon_0 n^2 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \end{cases} \quad \text{Equations 2.1}$$

Avec  $\mu_0$  et  $\varepsilon_0$  respectivement la constante magnétique (ou perméabilité) et la permittivité dans le vide.

Dans notre cas, nous travaillons à une longueur d'onde et donc à une fréquence donnée. Nous pouvons ainsi exprimer les champs, électrique et magnétique, de manière harmonique et combiner les équations de Maxwell afin d'obtenir les équations de propagation des champs  $\vec{E}$  et  $\vec{H}$  en fonction de l'indice de réfraction  $n$  :

$$\Delta \vec{E} + k_0^2 n^2 \vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}} \cdot \left( \frac{\vec{E}}{n^2} \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(n^2) \right) \quad \text{Equation 2.2}$$

$$\Delta \vec{H} + k_0^2 n^2 \vec{H} = \overrightarrow{\text{rot}}(\vec{H}) \wedge \left( \frac{\vec{\nabla} n^2}{n^2} \right) \quad \text{Equation 2.3}$$

avec  $k_0 = 2\pi/\lambda = \omega/c_0 = \omega\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}$  où  $k_0$  représente le module du vecteur d'onde dans le vide,  $\lambda$  la longueur d'onde,  $c_0$  la vitesse de la lumière dans le vide.

Les équations d'onde mettent en évidence que la variation spatiale de l'indice  $n$  est une condition nécessaire pour confiner spatialement la lumière dans une structure diélectrique. En effet, si l'indice de réfraction est constant, les termes de droite des *Equations 2.2 et 2.3* s'annulent témoignant que la lumière se propage dans un milieu homogène. Les solutions des équations d'onde deviennent par conséquent des ondes planes ou sphériques où les champs  $\vec{E}(x, y, z)$  et  $\vec{H}(x, y, z)$  peuvent s'étendre infiniment.

Dans le cadre d'un guide d'onde parfait, celui-ci est invariant par translation selon l'axe de propagation de la lumière. Nous pouvons alors écrire :

$$\vec{E}(x, y, z, t) = \vec{E}(x, y) \exp[j(\omega t - \beta z)] \quad \text{Equation 2.4}$$

$$\vec{H}(x, y, z, t) = \vec{H}(x, y) \exp[j(\omega t - \beta z)] \quad \text{Equation 2.5}$$

Avec  $\beta = \frac{2\pi n_{eff}}{\lambda}$  la constante de propagation du mode optique et  $n_{eff}$  l'indice effectif du mode à la longueur d'onde considérée. Les *Equations 2.2 et 2.3* peuvent donc être reformulées ainsi :

$$\Delta_T \vec{E} + (k_0^2 n^2 - \beta^2) \vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}} \cdot \left( \frac{\vec{E}}{n^2} \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(n^2) \right) \quad \text{Equation 2.6}$$

$$\Delta_T \vec{H} + (k_0^2 n^2 - \beta^2) \vec{H} = \overrightarrow{\text{rot}}(\vec{H}) \wedge \left( \frac{\vec{\nabla} n^2}{n^2} \right) \quad \text{Equation 2.7}$$

Avec  $\Delta \vec{E} = \Delta_T \vec{E} + \beta^2 \vec{E}$  et  $\Delta \vec{H} = \Delta_T \vec{H} + \beta^2 \vec{H}$ , où  $\Delta_T = \frac{\partial}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial y^2}$  est le Laplacien transverse.

○ Cas du guide plan à saut d'indice :

Les *Equations 2.6 et 2.7* sont en général résolues de manière numérique. Cependant, il existe un cas simple pour lequel des solutions analytiques pour  $\vec{E}$  et  $\vec{H}$  peuvent être obtenues : le guide plan à saut d'indice. Un exemple d'une coupe longitudinale d'un tel guide est représenté sur la *Figure II-2*. Cette structure est composée de trois milieux diélectriques : le cœur, d'épaisseur  $d$  et d'indice de réfraction  $n_c$ , placé entre le substrat et le superstrat, dotés respectivement d'indices de réfraction  $n_{sub}$  et  $n_{sup}$  et d'épaisseurs infinies.



**Figure II-2: Schéma d'une coupe longitudinale d'un guide plan à saut d'indice.**

Dans cette configuration, le guide est invariant suivant le plan  $xz$  et  $z$  est l'axe de propagation. Nous avons alors  $\frac{\partial}{\partial x} = 0$ . Les Equations 2.6 et 2.7 deviennent donc :

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + (n_{Sup}^2 - n_{eff}^2)\psi = 0 & y > d/2 \\ \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + (n_C^2 - n_{eff}^2)\psi = 0 & |y| < d/2 \\ \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + (n_{Sub}^2 - n_{eff}^2)\psi = 0 & y < -d/2 \end{cases} \quad \text{Equations 2.8}$$

Avec  $\psi = E_x$  si nous étudions un mode TE et  $\psi = H_x$  si nous étudions un mode TM.

Dans le cas d'un mode TE, les champs tangentiels sont  $E_x$  et  $H_z$ .  $H_z$  peut être exprimé en fonction de  $E_x$  :  $H_z = -\frac{j}{\omega\mu_0} \frac{\partial E_x}{\partial y}$ .  $E_x$  et  $\frac{\partial E_x}{\partial y}$  sont donc continus.

Nous recherchons des solutions pour lesquelles l'énergie électromagnétique est confinée dans le guide d'onde. C'est pourquoi, pour  $|y| > d/2$ , nous cherchons des solutions qui donnent un résultat nul à l'infini et pour  $|y| < d/2$  des solutions oscillatoires. Ceci implique les conditions suivantes :  $n_c > n_{eff} > \text{Max}(n_{Sup}, n_{Subs})$ .

Le champ guidé peut alors s'écrire :

$$\psi(x, y) = \psi_0 \exp(-jk_0 n_{eff} z) \begin{cases} \cos\left(k_c \frac{d}{2} + \varphi\right) \exp(\alpha_{Sup}(x - \frac{d}{2})) & y > d/2 \\ \cos(k_c x + \varphi) & |y| < d/2 \\ \cos\left(k_c \frac{d}{2} - \varphi\right) \exp(\alpha_{Sub}(x + \frac{d}{2})) & y < -d/2 \end{cases} \quad \text{Equations 2.9}$$

Où  $k_c$ ,  $\alpha_{Sup}$ ,  $\alpha_{Sub}$ ,  $n_{eff}$  et  $\varphi$  sont déterminés par les relations de continuité des champs tangentiels aux interfaces dont nous déduisons la relation de dispersion du guide d'onde :

$$k_0 d \sqrt{n_c^2 - n_{eff}^2} - \arctan\left(\frac{\sqrt{n_{eff}^2 - n_{Sup}^2}}{\sqrt{n_c^2 - n_{eff}^2}}\right) - \arctan\left(\frac{\sqrt{n_{eff}^2 - n_{Sub}^2}}{\sqrt{n_c^2 - n_{eff}^2}}\right) = m\pi \quad \text{Equation 2.10}$$

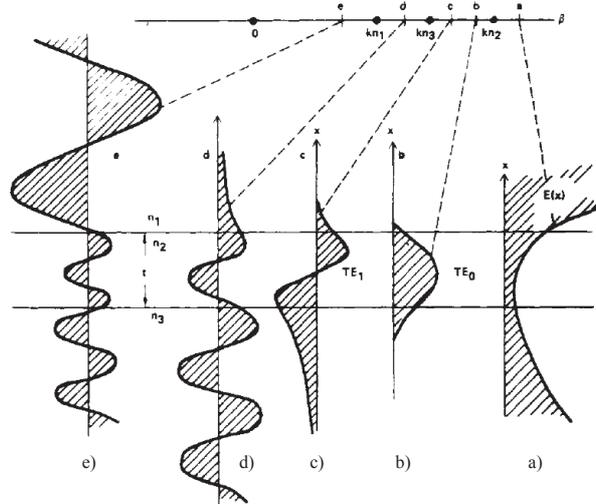
Avec  $m \in \mathbb{Z}$ .

Nous avons  $\alpha_{Sup} = k_0 \sqrt{n_{eff}^2 - n_{Sup}^2}$ ,  $k_c = k_0 \sqrt{n_c^2 - n_{eff}^2}$  et  $\alpha_{Sub} = k_0 \sqrt{n_{eff}^2 - n_{Sub}^2}$ .

La relation de dispersion lie l'indice effectif de l'onde propagée aux paramètres opto-géométriques du guide d'onde à une longueur d'onde donnée. Nous remarquons que les solutions de cette équation sont discrètes. Nous parlons de modes de propagation. Si une seule valeur de  $n_{eff}$  vérifie à la fois les conditions de confinement de l'Equation 2.8 et la relation de dispersion de l'Equation 2.10, le guide d'onde est dit monomode à la longueur d'onde considérée.

Les formes des modes en fonction de la constante de propagation  $\beta$  sont illustrées en Figure II-3. Dans cette figure,  $n_1 = n_{sup}$ ,  $n_2 = n_c$  et  $n_3 = n_{sub}$ . Les modes guidés TE sont les modes c) et d), respectivement  $TE_1$  et  $TE_0$ , représentés sur cette figure. Les autres modes sont, pour a) un mode physiquement irréalisable et pour d) et e) des modes de rayonnement, non confinés dans le guide d'onde.

Un travail similaire peut être réalisé pour le cas d'un mode TM.



**Figure II-3 : Guide plan à saut d'indice : constantes de propagation, distributions de champ électrique, et diagrammes de vecteur d'onde pour les différents types de modes. a) n'est pas physiquement réalisable ; b) et c) sont des modes guidés ; d) est un mode de rayonnement dans le substrat et e) est un mode de rayonnement du guide d'onde [98].**

○ Cas des guides d'onde canaux :

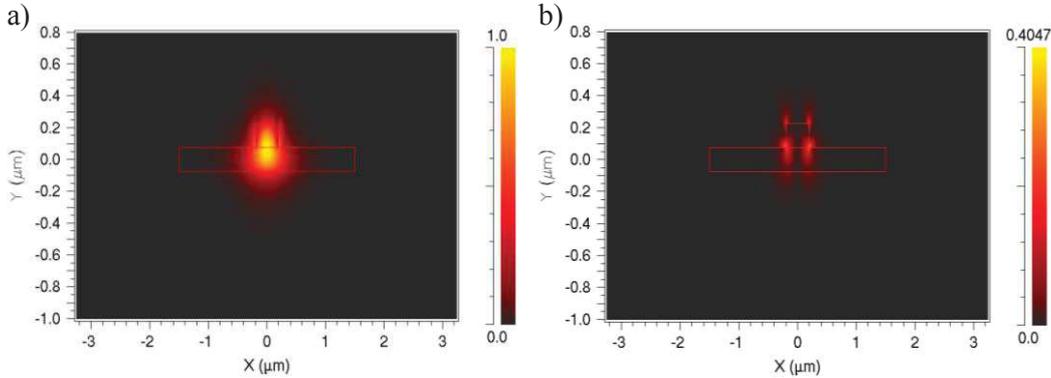
Dans notre cas, nous avons un guide d'onde 2D, tel que représenté Figure II-1 d), dont le cœur est en silicium et le substrat et le superstrat sont en  $SiO_2$ . La seule hypothèse que nous pouvons poser est que  $\partial n^2 / \partial z = 0$ . En reprenant l'Equation 2.9, on a donc :

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 E_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} + (n^2(x, y) - n_{eff}^2)E_x = -\frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{1}{n^2} \left( E_x \frac{\partial n^2}{\partial x} + E_y \frac{\partial n^2}{\partial y} \right) \right] \\ \frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_y}{\partial y^2} + (n^2(x, y) - n_{eff}^2)E_y = -\frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{1}{n^2} \left( E_x \frac{\partial n^2}{\partial x} + E_y \frac{\partial n^2}{\partial y} \right) \right] \end{cases} \quad \text{Equations 2.11}$$

Nous obtenons un système d'équations similaire pour  $\vec{H}$ . Nous remarquons un couplage entre les composantes  $E_x$  et  $E_y$  des champs à travers le terme de droite de l'Equation 2.11. Nous n'avons donc plus de modes proprement TE et de modes proprement TM mais des quasi-TE et des quasi-TM. Dans la suite du manuscrit et par abus de langage, nous appellerons ces derniers des modes TE et TM.

La résolution analytique de ces équations étant impossible, nous utilisons un logiciel dédié. Dans notre cas, il s'agit du module *FemSIM* de la suite RSoft qui utilise la méthode des éléments finis, dite FEM (Finite Element Method) afin de déterminer les modes optiques.

Un exemple de résultat obtenu à l'aide de ce logiciel est montré en *Figure II-4*. Il s'agit du mode fondamental d'un guide SOI *rib* de dimensions 150 nm d'épaisseur par 3  $\mu\text{m}$  de largeur pour le *slab* et 150 nm d'épaisseur par 400 nm de largeur pour le *rib*, pour une longueur d'onde de 1310 nm. L'indice effectif obtenu pour ce guide d'onde grâce à cette simulation est de 2,9349.



**Figure II-4 : Profils de champs du mode fondamental d'un guide *rib* obtenus par FemSIM avec en a) le champ  $E_x$  et en b) le champ  $E_y$ .**

La répartition du champ principalement selon  $E_x$  nous prouve que nous avons bien un mode quasi-TE.

En tenant compte d'un maillage de 1 nm suivant les deux directions du plan, la simulation ne dépasse généralement pas la minute. Ceci est donc une méthode rapide et efficace. Durant ce travail, tous les indices effectifs des structures étudiées ont été déterminés en utilisant cette méthode.

### 2.2.2 Théorie sur les réseaux de Bragg

Lorsqu'une onde se propage dans un milieu présentant des discontinuités périodiques, elle est diffractée.

Les travaux de W.L. Bragg et de son père W.H. Bragg sur la cristallographie par rayons X aboutissent en 1912 à une relation fondamentale qui permet de relier la direction des ondes diffractées à leur longueur d'onde et à la périodicité du réseau.

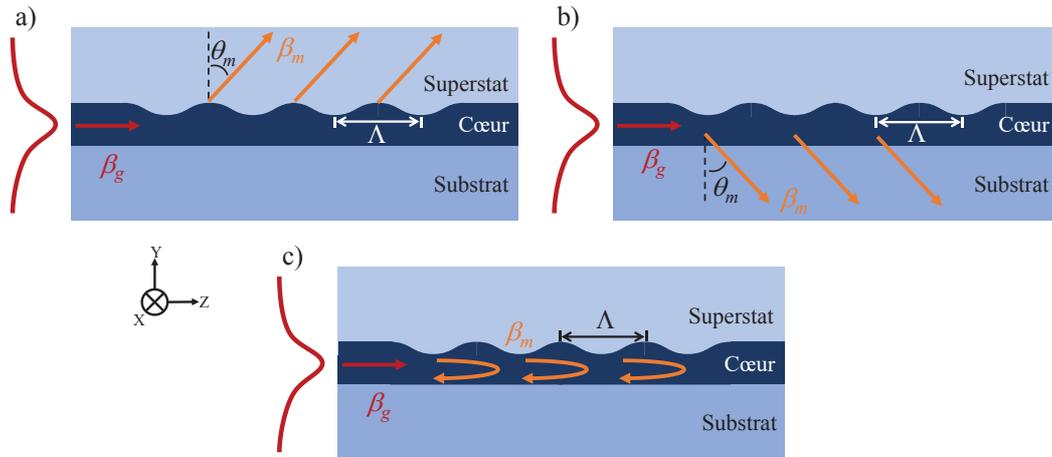
Un réseau de Bragg peut être réalisé à la surface du cœur d'un guide d'onde grâce à une gravure périodique de celui-ci. Le mode guidé pourra alors être diffracté dans le superstrat, dans le substrat voire être réfléchi.

La loi de Bragg adaptée au cas du guide d'onde s'écrit :

$$\beta_g - \beta_m = \frac{2m\pi}{\Lambda} \quad \text{avec } m \in \mathbb{Z} \quad \text{Equation 2.12}$$

Où  $\beta_g$  est le vecteur d'onde de Bragg tel que  $\beta_g = n_{eff}k_0 = n_{eff}\frac{2\pi}{\lambda_0}$ ,  $\beta_m$  est la projection du vecteur d'onde de l'ordre  $m$  diffracté sur l'axe de propagation et  $\Lambda$  est la période du réseau de Bragg.

Cette équation générale décrit plusieurs phénomènes pouvant survenir dans un guide de Bragg. Trois conditions particulières, exposées en *Figure II-5* apparaissent alors.



**Figure II-5 : Schémas de coupes longitudinales présentant les phénomènes de diffraction dans une structure de Bragg avec en a) la diffraction vers le superstrat, en b) la diffraction vers le substrat et en c) la réflexion de l'onde lumineuse dans le guide.**

- La diffraction vers le superstrat (*Figure II-5 a*) :

Dans ce cas  $\beta_m = k_0 n_{sup} \sin(\theta_m)$  avec  $n_{sup}$  l'indice de réfraction du superstrat. La constante de propagation du mode guidé doit vérifier la condition d'accord de phase exprimée à l'*Equation 2.12*. Nous obtenons alors l'angle de diffraction  $\theta_m$ , défini par rapport à la normale au réseau, grâce à la relation suivante :

$$\theta_m = \arcsin\left(\frac{n_{eff}}{n_{sup}} - \frac{m\lambda_0}{\Lambda n_{sup}}\right) \quad \text{Equation 2.13}$$

D'après cette équation, nous remarquons que  $m$  doit obligatoirement être positif et que l'ordre diffracté existe seulement si  $|\sin(\theta_m)| < 1$ . Nous avons ainsi la condition sur la longueur d'onde suivante :

$$\frac{\Lambda(n_{eff} + n_{sup})}{m} > \lambda_0 > \frac{\Lambda(n_{eff} - n_{sup})}{m} \quad \text{Equation 2.14}$$

Il existe donc des fréquences de coupure du mode diffracté en fonction de son ordre pour un guide donné.

- La diffraction vers le substrat (*Figure II-5 b*) :

Ce phénomène est décrit de façon identique à celui de la diffraction vers le superstrat en remplaçant le terme d'indice de réfraction  $n_{sup}$  pour celui du substrat  $n_{sub}$  dans les équations.

- La réflexion (*Figure II-5 c*) :

Dans ce cas particulier, le mode diffracté se couple suivant un mode contrapropagatif du guide. Nous pouvons alors exprimer  $\beta_m = k_0 n_{eff} \sin(-\pi/2) = -\beta_g$ .

Dès lors, l'Equation 2.12 nous donne :

$$\beta_g = m \frac{\pi}{\Lambda} \text{ avec } m = 1, 2, 3 \dots \Leftrightarrow \lambda_{Bragg} = \frac{2}{m} \Lambda n_{eff} \quad \text{Equation 2.15}$$

$\lambda_{Bragg}$  est la longueur d'onde de résonance de la structure. La réflectivité du réseau de Bragg est centrée sur cette longueur d'onde. Pour la valeur particulière de  $m = 1$ ,  $\lambda_{Bragg} = 2\Lambda n_{eff}$ .

La structure de Bragg peut ainsi être utilisée comme un miroir sélectif en longueur d'onde centré sur la longueur d'onde  $\lambda_{Bragg}$ .

Si la relation de Bragg permet de déterminer rapidement l'existence d'ordres diffractés ou de modes réfléchis, elle ne permet pas d'évaluer quantitativement l'efficacité d'un tel dispositif.

Pour ce faire, nous aurons recours à des simulations numériques. Nous utiliserons donc l'outil FullWAVE, basé sur la méthode FDTD (Finite-Difference Time-Domain), développé par la société RSoft afin de quantifier l'efficacité des structures et leur réponse en fonction de la longueur d'onde.

## II.3 ETUDE DU RESEAU DE COUPLAGE SURFACIQUE

Le réseau de couplage surfacique est un dispositif optique permettant de coupler de la lumière entre deux guides d'onde intégrés ou bien entre un guide d'onde intégré et une fibre optique externe.

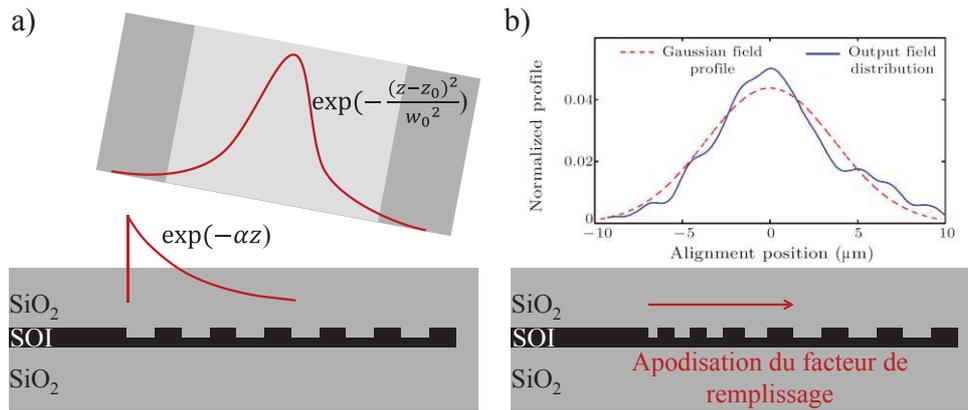
Ce dispositif est caractérisé par sa bande passante et son efficacité. Il peut fonctionner suivant un mode unique de polarisation (TE ou TM) ou bien suivant les deux simultanément. Le dispositif que nous avons étudié fonctionne suivant la polarisation TE.

L'étude de cette fonction est particulièrement critique car en cas de dysfonctionnement celle-ci peut engendrer des pertes importantes de puissance qui peuvent venir de plusieurs facteurs comme une mauvaise directionnalité de la lumière diffractée ou encore la présence de diffractions parasites.

L'intégration Back-Side permet d'adresser une nouvelle approche de résolution de ces problèmes. Dans ce paragraphe, après avoir présenté les différentes solutions d'optimisation possibles du réseau, les avantages et inconvénients de notre nouveau schéma d'intégration seront détaillés ainsi que les adaptations à prendre en compte pour permettre un bon fonctionnement du réseau en configuration Back-Side.

### 2.3.1 Avantages et inconvénients du réseau de couplage Back-Side

L'un des problèmes majeurs du réseau de couplage surfacique est la dépendance de ses pertes avec la forme de l'onde diffractée, sa directionnalité et les réflexions parasites. La Figure II-6 présente les formes de l'onde diffractée pour deux réseaux différents ainsi que le profil de champ d'une onde guidée dans une fibre optique. Dans le cas d'un réseau avec un facteur de remplissage fixe, illustré en Figure II-6 a), le profil de l'onde diffractée ne correspond pas à celui d'une fibre. En effet, l'amplitude de l'onde lumineuse diffractée par un réseau uniforme est décrite par une exponentielle décroissante tandis que l'onde guidée par une fibre optique monomode a généralement un profil gaussien. De nombreuses recherches ont été menées afin de faire correspondre au mieux la forme de l'onde diffractée avec celle d'un mode guidé par une fibre optique (Figure II-6 b)). Pour cela, il est possible de faire varier le facteur de remplissage en fonction de la direction de propagation de la lumière : le réseau est dit apodisé [99], [100], [101].



**Figure II-6 : Schémas de la forme de l'onde diffractée par un réseau de couplage surfacique comparée à celle d'une fibre optique monomode avec en a) un réseau uniforme et en b) une apodisation du facteur de remplissage [101].**

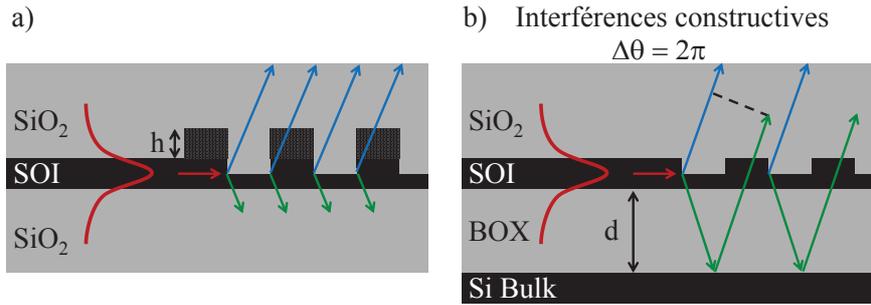
L'objectif de l'apodisation du facteur de remplissage du réseau est donc d'adapter la fraction de puissance lumineuse diffractée à chaque période du réseau afin de faire correspondre au mieux la forme de l'onde diffractée avec une gaussienne. De cette manière, plus le facteur de remplissage est faible et plus la force de découplage du réseau est faible : la fraction de l'onde diffractée est alors progressivement augmentée. Suite à un certain nombre de périodes, la puissance diffractée diminue d'autant que l'intensité de l'onde confinée dans le réseau diminue.

D'autre part, des études ont été menées afin d'augmenter la directionnalité du coupleur pour que celui-ci diffracte la majorité de l'onde lumineuse vers la fibre optique plutôt que vers le substrat.

Une première action possible est d'encapsuler le réseau de couplage avec un matériau de même indice [102]. Dans notre étude, le coupleur est structuré dans le silicium et est entouré par de l'oxyde de silicium. Cette structure symétrique permet d'égaliser la puissance émise vers le superstrat avec celle dirigée vers le substrat. Des solutions existent alors pour récupérer, au moins en partie, la puissance diffractée dans la mauvaise direction.

Deux autres pistes d'amélioration sont illustrées en *Figure II-7*. Une première solution, présentée en *Figure II-7 a)*, montre que l'ajout d'une surépaisseur  $h$  de silicium sur le réseau de couplage permet, dans certaines conditions, d'augmenter la directionnalité du réseau de couplage en changeant ses propriétés de diffraction [103], [104], [105]. Ainsi, la fraction de lumière diffractée vers le substrat est minimisée.

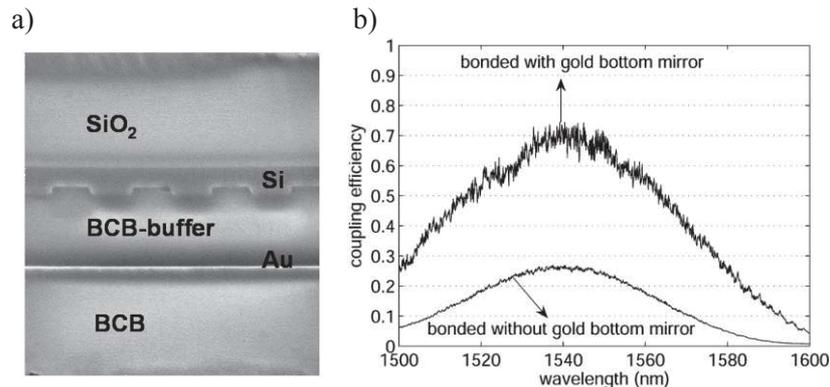
Une autre façon d'améliorer les performances du réseau de couplage est de récupérer la fraction de l'onde lumineuse qui est diffractée vers le substrat pour la renvoyer vers la fibre. Ceci peut être réalisé par une optimisation de l'épaisseur  $d$  du BOX (*Figure II-7 b)*). Pour une longueur d'onde de fonctionnement de 1310 nm, l'épaisseur de BOX utilisée est de l'ordre de 700 nm car la fraction de lumière qui est diffractée vers le substrat puis qui y est réfléchi forme ainsi des interférences constructives avec celle diffractée directement vers la fibre.



**Figure II-7 : Schémas d'un réseau de couplage surfacique à la directionnalité optimisée avec en a) l'ajout d'une épaisseur de silicium et en b) l'optimisation de l'épaisseur  $d$  du BOX.**

Cette optimisation peut également être réalisée grâce à l'ajout d'un miroir métallique entre le réseau et le substrat, dont un exemple est représenté en *Figure II-8*.

Sur la *Figure II-8 a)*, un miroir en or est placé entre le réseau de couplage et le substrat (non représenté sur le cliché). La *Figure II-8 b)* montre les résultats des mesures de l'efficacité de couplage pour le même réseau lorsqu'il dispose ou non de ce miroir en or. L'efficacité de couplage passe ainsi d'environ 28 % sans réflecteur à près de 70 % lorsque la couche d'or est présente [106]. D'autres études ont également prouvé que l'efficacité de couplage d'un réseau surfacique peut être améliorée lorsqu'un réflecteur est placé adéquatement entre le réseau et le substrat [107], [108].



**Figure II-8 : Réseau de couplage surfacique avec en a) un cliché TEM de l'empilement avec un miroir métallique et en b) un graphique de l'efficacité de couplage du dispositif avec et sans miroir [106].**

Un résumé de différentes configurations optimisées de réseaux de couplage Front-Side et de leurs performances est présenté dans le *Tableau II-1* [12], [102], [103], [106], [107].

Technologie	Efficacité de couplage	Statut	$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	Année	Titre	Auteurs
Uniforme avec surépaisseur	66 %	Simulations	1.55	2006	High efficiency Silicon-on-Insulator grating coupler based on a poly-Silicon overlay	Roelkens, et al.
Apodisé avec surépaisseur	78 %					
Uniforme sans superstrat	37 % (31 %)	Simulations (Mesures)	1.55	2006	Grating Couplers for Coupling between Optical Fibers and Nanophotonic Waveguides	Taillaert, et al.
Uniforme avec superstrat	44 % (34%)					
Uniforme avec BOX optimisé	53 %					
Uniforme avec réflecteur métallique	79 %					
Apodisé avec réflecteur métallique	92 %					
Uniforme avec réflecteur métallique	72 % (69 %)	Simulations (Mesures)	1.55	2007	Compact and Highly Efficient Grating Couplers Between Optical Fiber and Nanophotonic Waveguides	Van Laere, et al.
Uniforme avec surépaisseur (FF = 50%)	55 %	Mesures	1.55	2009	Interfacing optical fibers and high refractive index contrast waveguide circuits using diffractive grating couplers	Roelkens, et al.
Uniforme avec surépaisseur (FF = 80%)	80 %					
Uniforme avec réflecteur métallique	71 %					
Apodisé avec superstrat & BOX optimisé	60 % (air)	Mesures	1.31	2016	Silicon Photonics R&D and Manufacturing on 300-mm Wafer Platform	Boeuf, et al.
Apodisé avec réflecteur métallique	83 %		1.49			

**Tableau II-1 : Résumé des différentes études d'amélioration réalisées sur un réseau de couplage surfacique.**

Ce tableau nous montre que le gain en efficacité est significatif entre un réseau uniforme sans optimisation et un réseau bénéficiant d'une amélioration de sa directionnalité et/ou de la forme de l'onde diffractée.

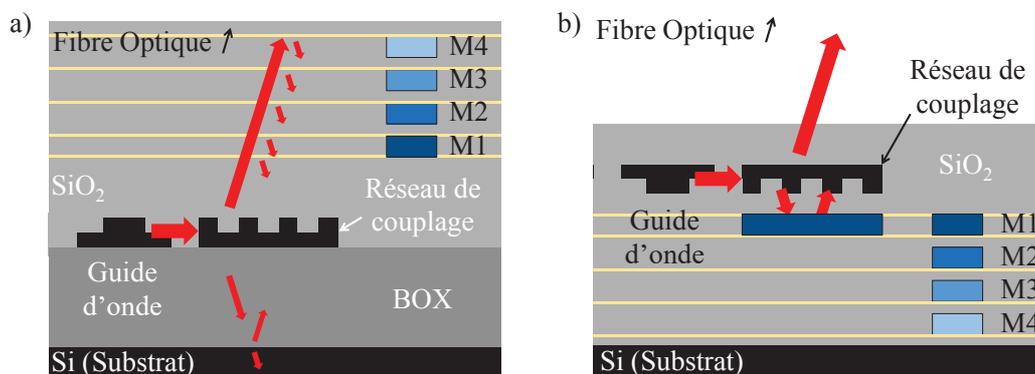
Aujourd'hui, les performances typiques des réseaux de couplage surfacique intégrés à des puces photoniques fonctionnelles sont de l'ordre de 1,8 dB de pertes pour une bande passante à -3 dB du maximum d'efficacité d'environ 20 nm, centrée sur une longueur d'onde de 1310 nm [12].

Dans le cadre de notre intégration, nous avons cherché à vérifier que le réseau de couplage actuellement développé par STMicroelectronics fonctionne toujours suivant le schéma d'intégration Back-Side. En effet, lors du processus de fabrication, la structuration du coupleur se fait avant le collage de la poignée silicium et le retournement de l'empilement. Le réseau se trouve donc dans une configuration telle que la majeure partie de l'onde lumineuse est diffractée vers le nouveau substrat.

Afin de pallier cet inconvénient, nous avons repris l'idée de positionner un miroir entre le coupleur et le substrat en utilisant une des couches d'interconnexions métalliques enterrées sous le SOI. Les schémas du réseau de couplage étudié suivant les deux configurations, Front-Side et Back-Side sont montrés en *Figure II-9*. Nous pouvons remarquer qu'en Front-Side (*Figure II-9 a*), le signal diffracté par le coupleur souffre de deux types de pertes :

- Dans un premier temps, une partie de la lumière est envoyée vers le substrat où elle n'est que partiellement réfléchi. Cependant, si l'épaisseur du BOX est optimisée pour obtenir des interférences constructives, une fraction est tout de même perdue dans le substrat.
- Dans un second temps, la partie de la lumière directement diffractée vers la fibre subit des réflexions parasites sur des lignes de nitrure. Ces lignes de SiN sont déposées lors de la construction de lignes métalliques par procédé *Damascène* [109].

L'approche d'intégration Back-Side (*Figure II-9 b*) offre des opportunités d'améliorations des performances du dispositif. Outre le fait de rediriger vers la fibre la fraction de lumière diffractée vers le substrat à l'aide d'un miroir métallique, le réseau de couplage surfacique bénéficie de l'absence de réflexions parasites sur les lignes de nitrure déposées lors de la fabrication des couches d'interconnexions.



**Figure II-9 : Schémas d'un réseau de couplage surfacique avec en a) une configuration Front-Side et en b) une configuration Back-Side.**

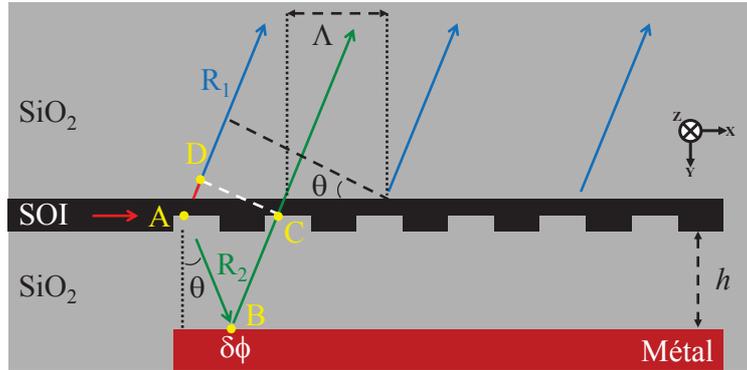
En revanche, une précaution toute particulière doit être apportée à la construction de la ligne métallique servant de miroir réflecteur au réseau de couplage. En effet, le fait que la directionnalité du réseau en configuration Back-Side soit majoritairement vers le miroir peut entraîner de fortes pertes en cas de mauvais positionnement du réflecteur. Afin de déterminer les conditions optimales de réflexion du miroir, une étude analytique ainsi que des simulations ont été réalisées.

### 2.3.2 Adaptation du réseau de couplage à l'intégration Back-Side

Comme nous l'avons vu, l'un des paramètres critiques influençant les performances du réseau surfacique est la distance entre le réseau (Si) et le réflecteur métallique également appelé *gap*. En effet, un mauvais dimensionnement de celle-ci peut entraîner des interférences destructives entre le signal provenant du réseau et le signal déjà réfléchi sur le miroir. Comme nous l'avons vu précédemment, certaines études se sont penchées sur l'optimisation de ce paramètre [106], [108].

La *Figure II-10* présente un schéma simplifié des interférences créées dans le réseau de couplage. Les rayons bleus représentent la lumière diffractée directement vers la fibre et les rayons verts, la lumière diffractée vers le miroir puis réfléchi vers la fibre. Le réseau étant dans un milieu symétrique, l'angle de diffraction  $\theta$  des deux types de rayons est le même. A l'interface avec le métal, l'onde lumineuse subit un déphasage de  $\delta\phi$  dépendant du type de métal mais proche de  $-\pi$ . La variation de

l'épaisseur  $h$  entre le réseau et le miroir permet de passer d'interférences destructives à constructives entre les deux types de rayons.



**Figure II-10 : Schéma simplifié de la diffraction de la lumière dans un réseau de couplage possédant un réflecteur métallique.**

Les équations suivantes permettent de déterminer les conditions particulières à appliquer sur l'épaisseur  $h$  de manière à obtenir des interférences constructives.

Tout d'abord, la différence de marche  $\delta$  entre le rayon directement diffracté vers la fibre  $R_1$  et celui diffracté vers le miroir puis vers la fibre  $R_2$  est calculée :

$$\delta = n_{SiO_2}(AB + BC) - n_{SiO_2}AD \quad \text{Equation 2.16}$$

$$\delta = 2n_{SiO_2}h \cos \theta \quad \text{Equation 2.17}$$

En tenant compte du déphasage  $\delta\phi$  à l'interface entre le  $SiO_2$  et le métal, le déphasage total  $\Delta\phi$  entre les deux rayons est donc de :

$$\Delta\phi = \frac{2\pi\delta}{\lambda_0} + \delta\phi \quad \text{Equation 2.18}$$

Des interférences constructives sont obtenues lorsque le déphasage entre les deux rayons est un multiple de  $2\pi$  ; ce qui donne leur ordre d'interférence  $p$  :

$$p = \frac{\Delta\phi}{2\pi} \quad \text{Equation 2.19}$$

Avec  $p = 0, 1, 2, \dots$

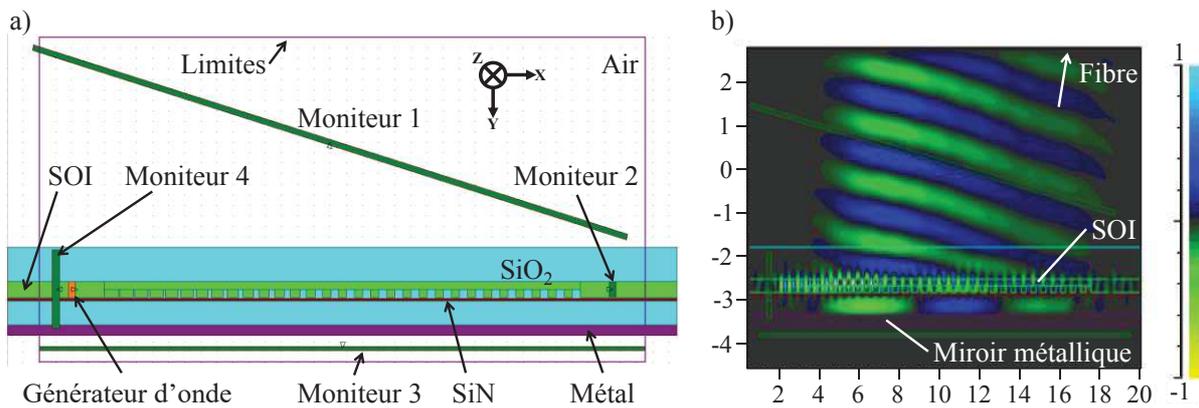
Dans le cas d'un conducteur parfait non magnétique, le déphasage d'une onde électromagnétique  $\delta\phi$  à l'interface est  $-\pi$ . En recherchant un angle de diffraction  $\theta$  de  $8^\circ$  dans la silice et pour une longueur d'onde de 1310 nm, nous trouvons ainsi des épaisseurs  $h$  entre le réseau et le métal respectivement de 228 nm et 685 nm pour les ordres d'interférences  $p = 0$  et  $p = 1$ .

Le système étudié étant une structure complexe, une série de simulations a été réalisée par FDTD afin de déterminer la valeur optimale de l'épaisseur entre le réseau et le miroir métallique. Les interfaces de dessin et de simulation du module *FullWAVE*, de la suite RSoft, utilisé pour ces simulations sont

illustrées en *Figure II-11*. La *Figure II-11 a)* présente l'interface CAD (Computer Assisted Design ou Computer-Aided Design) permettant de définir la structure souhaitée. Quatre moniteurs de puissance sont disposés autour de la structure :

- Moniteur 1 : Il récupère la puissance diffractée vers la fibre optique (dans l'air). Il confronte également la forme de l'onde avec celle d'une onde guidée par une fibre monomode SMF28 afin d'estimer la puissance couplée dans une fibre optique.
- Moniteur 2 : Il récupère la puissance de la lumière non diffractée par le coupleur. Cette puissance doit être la plus petite possible. Pour cela, la longueur du réseau est simplement augmentée jusqu'à obtenir une valeur satisfaisante.
- Moniteur 3 : Il s'assure qu'aucune lumière ne traverse la couche métallique du miroir.
- Moniteur 4 : Il récupère la puissance de la lumière qui est réfléchié à nouveau vers le guide d'onde : le « feedback ». Cette puissance doit être la plus faible possible afin de ne pas introduire de bruit dans le système en amont.

Un exemple du résultat obtenu par simulation est montré *Figure II-11 b)*. Le miroir métallique réfléchit 100 % de l'onde lumineuse qui est diffractée par le réseau dans sa direction.



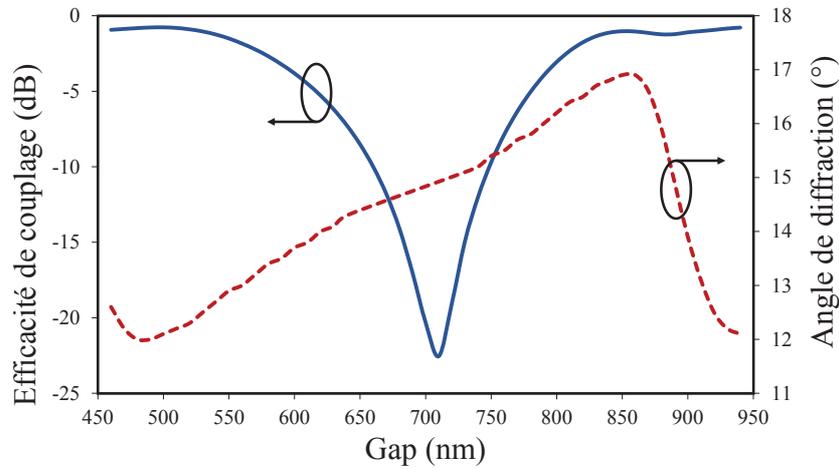
**Figure II-11 : Interfaces du simulateur FDTD (RSoft – FullWAVE) avec en a) l'interface CAD et en b) le résultat d'une simulation de la propagation de la lumière, du guide d'onde vers la fibre, dans un réseau de couplage surfacique.**

Pour déterminer l'angle de diffraction de la lumière dans l'air, une simulation de la forme de l'onde en champ lointain (« Far Field ») est réalisée.

Afin de fixer l'épaisseur optimale d'oxyde entre le réseau de couplage et le miroir métallique, une série de simulations a été lancée en faisant varier ce paramètre. Ces simulations sont réalisées avec un maillage de 1 nm suivant l'axe X et 2 nm suivant l'axe Y. Le temps d'une simulation ne dépasse pas la minute. Les résultats sur l'efficacité de couplage et sur l'angle de diffraction dans l'air de ces simulations sont montrés *Figure II-12*. Sur cette figure, la courbe bleue correspond à l'efficacité de couplage du réseau tandis que la courbe rouge représente l'angle de diffraction de l'onde lumineuse.

Les résultats des simulations, présentés en *Figure II-12*, montrent une évolution de l'efficacité de couplage en fonction de la distance entre le réflecteur métallique et le réseau. Nous obtenons une efficacité maximale pour une épaisseur proche de 500 nm et une valeur de pertes théoriques de -0,75 dB. L'angle de diffraction de la lumière pour ce *gap* est de 12° dans l'air. Cette valeur d'angle de

diffraction est plus élevée que celle souhaitée, de  $8^\circ$  pour 1310 nm. Le minimum d'efficacité est quant à lui atteint pour un *gap* de 710 nm.



**Figure II-12 : Résultats de simulations de l'efficacité de couplage et de l'angle de diffraction de la lumière (dans l'air) d'un réseau de couplage surfacique en configuration Back-Side.**

Les résultats de simulations obtenus nous montrent que nous ne pouvons pas simplifier l'étude du réseau de couplage à un modèle analytique basé sur la diffraction d'ondes planes. En effet, le *gap* optimal obtenu analytiquement est de 685 nm, ce qui correspond quasiment au minimum d'efficacité simulée.

Compte tenu de ces valeurs, nous avons défini un plan de fabrication nous permettant de valider le bon fonctionnement du réseau de couplage en configuration Back-Side. Les épaisseurs de *gap* retenues vont de 550 nm à 900 nm avec un pas de 70 nm.

## II.4 FABRICATION ET CARACTERISATIONS

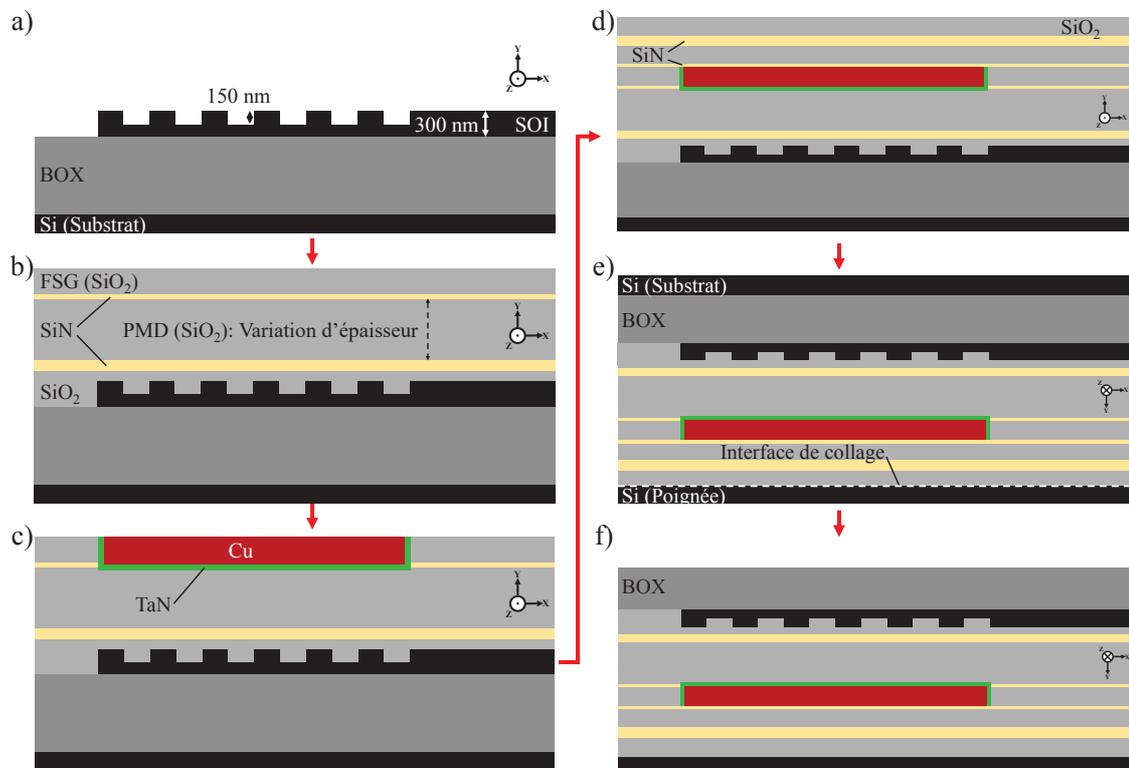
Afin de valider le bon fonctionnement du réseau de couplage en Back-Side, nous avons fabriqué une série de dispositifs selon plusieurs configurations. Nous avons réalisé des réseaux de références en Front-Side ainsi que des coupleurs Back-Side avec et sans réflecteur métallique. Enfin, nous avons fait varier l'épaisseur d'oxyde entre le miroir et le réseau pour obtenir six conditions différentes d'interférences.

Dans les paragraphes suivants, nous présentons la méthode de fabrication de nos plaques et les structures obtenues. Nous abordons ensuite les résultats des mesures de ces dispositifs.

### 2.4.1 Fabrication d'un réseau de couplage adapté à l'intégration Back-Side

Le réseau utilisé pour l'expérience est un dispositif optimisé pour une utilisation Front-Side. L'enchaînement des étapes technologiques nécessaire à la réalisation des réseaux de couplage en Back-Side est illustré *Figure II-13*. Pour la structuration de nos dispositifs, nous utilisons, pour la première partie, le processus de fabrication des puces photoniques développé par STMicroelectronics (*Figure II-13 a) à c)* :

- a) Tout d'abord, une gravure partielle de 150 nm d'épaisseur suivie d'une gravure totale de 300 nm dans le SOI structurent le réseau de couplage ainsi que les guides d'onde,
- b) Le SOI est ensuite encapsulé par plusieurs niveaux de SiO<sub>2</sub> et SiN puis une planarisation par CMP (*Chemical Mechanical Polishing*) est réalisée. L'épaisseur d'oxyde PMD (*Pre-Metal Dielectric*) est utilisée pour faire varier l'épaisseur entre le réseau de couplage et la couche réfléchissante métallique,
- c) La ligne métallique est alors créée en utilisant la brique *Damascène* : la couche d'oxyde FSG (*Fluorinated Silicate Glass*) est gravée jusqu'à la couche de nitrure puis cette dernière est également retirée. Une couche d'accroche de TaN est déposée avant le dépôt de la couche de cuivre. Enfin, une planarisation par CMP du cuivre et du TaN jusqu'à l'oxyde FSG permet de ne laisser du métal qu'au niveau de la cavité précédemment créée.

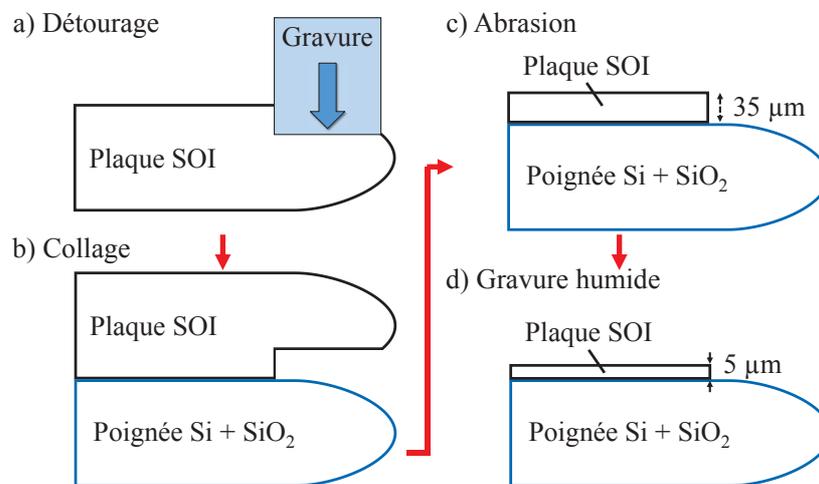


**Figure II-13 : Processus de fabrication des réseaux de couplage surfacique par intégration Back-Side.**

La fin du processus de fabrication reprend une brique, développée par STMicroelectronics, permettant le collage d'une poignée silicium sur un SOI puis le retournement de l'empilement (*Figure II-13 d) à f)*).

- d) La ligne de cuivre est encapsulée par plusieurs couches d'oxyde et de nitrure. La dernière couche de SiO<sub>2</sub> est planarisée par plusieurs CMP et dépôts successifs afin d'obtenir une surface parfaitement plane. La topographie entre deux puces et la rugosité pour le collage d'une poignée de silicium sur un oxyde ne doivent respectivement pas être supérieures à 6 nm et 0,5 nm RMS (*Roughness Mean Square*) sur un carré de 20 x 20 μm<sup>2</sup>.

- e) La poignée de silicium est collée sur la surface de la plaque SOI par report direct. Pour ce collage, la technologie *Trim First*, illustrée en *Figure II-14*, est utilisée. Cette technique consiste à détourner la plaque SOI sur une largeur de 3 mm (*Figure II-14 a*) avant de coller la poignée de silicium (*Figure II-14 b*). Ce détourage permet d'éviter une sous-gravure de la poignée lors de la dernière étape de retrait de l'ancien substrat par gravure humide. La surface de la poignée de silicium peut être préalablement oxydée afin de réaliser un collage  $\text{SiO}_2 / \text{SiO}_2$ .
- f) A l'issue du collage de la poignée silicium et du retournement de l'empilement, la majorité de l'ancien substrat est retirée par abrasion jusqu'à ce qu'il ne reste que 35  $\mu\text{m}$  (*Figure II-14 c*). Une gravure humide termine la gravure du substrat afin d'obtenir la surface d'oxyde la plus plane possible (*Figure II-14 d*).

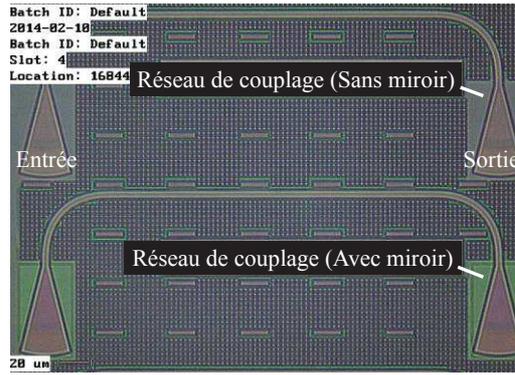


**Figure II-14 : Processus de collage par Trim First avec en a) le détourage de la plaque SOI, en b) le collage direct de la poignée de silicium et de la plaque SOI, en c) le retrait de la majorité du substrat de la plaque SOI par abrasion et en d) la gravure humide du reste du substrat.**

Les structures obtenues par ce procédé de fabrication sont montrées *Figure II-15* et *Figure II-16*.

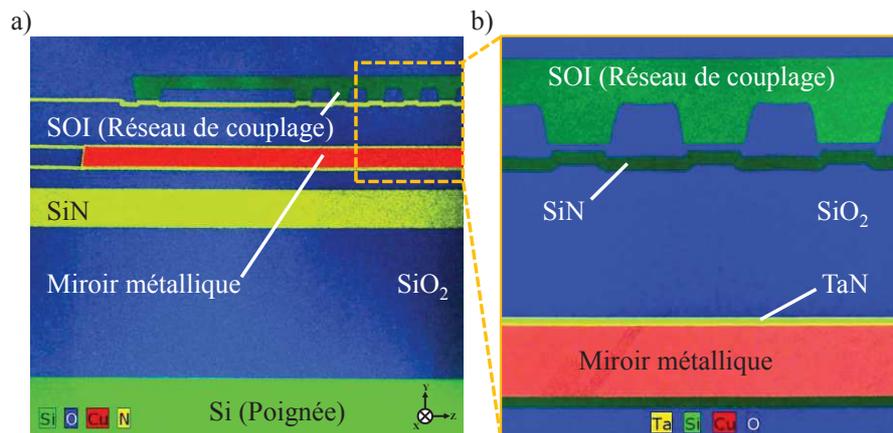
Sur la *Figure II-15*, nous remarquons deux réseaux de couplage qui sont appairés par l'intermédiaire d'un guide d'onde. L'efficacité de couplage d'un réseau est obtenue en injectant un faisceau laser dans l'un, appelé *Entrée* sur la figure, et en récupérant la puissance lumineuse en sortie de l'autre, appelé *Sortie*. La longueur du guide d'onde est suffisamment courte pour que ses pertes soient considérées comme négligeables. Le fonctionnement de la structure du réseau de couplage surfacique étant considéré comme symétrique, les pertes d'un réseau sont déterminées en divisant les pertes mesurées pour les deux.

De plus, chaque réseau de couplage est doublé : l'un possède un miroir métallique et l'autre non. Ceci nous permet ainsi de déterminer le gain de performance dû au miroir.



**Figure II-15 : Cliché d'une vue par microscope optique du résultat de la fabrication des réseaux de couplage surfacique.**

La *Figure II-16 a)* est un cliché TEM révélant l'empilement étudié. Nous remarquons, en rouge, la ligne métallique servant de réflecteur, située entre le réseau de couplage et le substrat. La *Figure II-16 b)* présente un zoom de la structure. Celui-ci détaille l'empilement situé entre le réseau de couplage et le réflecteur métallique. La construction du dispositif a donc été réalisée avec six épaisseurs différentes entre ces deux couches. Le choix de ces épaisseurs a été fait en accord avec les simulations présentées précédemment afin d'obtenir l'évolution entre deux maxima de l'efficacité de couplage.



**Figure II-16 : Résultats de la fabrication des réseaux de couplage surfacique avec en a) une TEM de la structure et en b) un zoom du réseau de couplage et de son réflecteur.**

Les mesures d'épaisseurs entre le réseau et le métal ont été réalisées grâce à deux techniques différentes : l'ellipsométrie spectroscopique et la mesure par observation TEM (Transmission Electron Microscope). Pour cet empilement, la précision annoncée pour ces mesures est respectivement inférieure à 1 % et de  $\pm 5$  % (jamais meilleure que 0,5 nm). En comparant les résultats obtenus par ces méthodes, nous avons constaté une différence d'épaisseur de l'ordre de 55 nm de moins pour les observations TEM. En raison de la précision annoncée pour ellipsométrie spectroscopique, nous avons choisi de se fier à ces mesures.

#### 2.4.2 Caractérisations optiques

Suite à la fabrication des puces, chaque variante a été caractérisée optiquement. Dans le paragraphe suivant, nous présentons la méthode de mesure utilisée ainsi que les résultats obtenus.

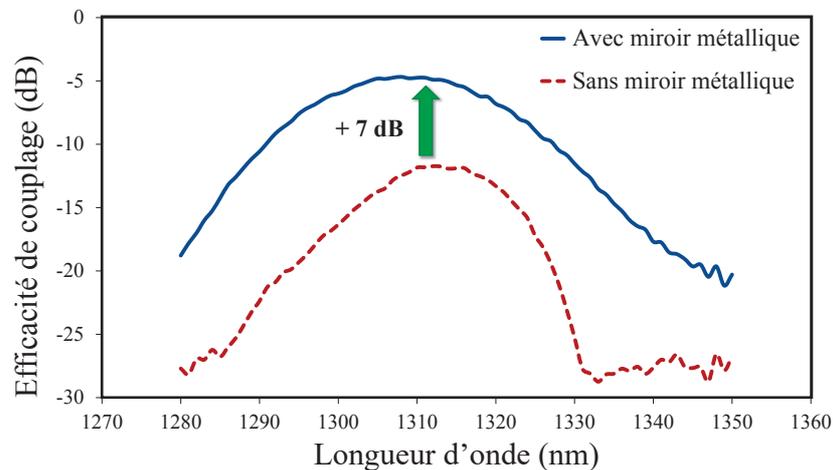
- Système de mesure :

Pour caractériser l'efficacité de couplage d'un réseau, la lumière est injectée dans un des réseaux de la paire, grâce à un laser accordable, puis est récoltée par un puissance-mètre après diffraction dans le second réseau.

L'une des spécificités de la méthode utilisée par STMicroelectronics est l'utilisation d'un pré-alignement de la fibre optique sur une structure dédiée. Les fibres d'entrée et de sortie sont montées sur une pièce de pyrex pour former un réseau de fibres. Afin de déterminer l'emplacement de l'entrée de la fibre, une source envoie une onde lumineuse à travers une structure particulière. En raison des changements induits par la configuration Back-Side, ce pré-alignement ne fonctionne pas, empêchant alors d'utiliser ce système de mesure pour nos structures. Un banc de mesure a donc été adapté dans le laboratoire de mesure du CEA afin de caractériser optiquement les dispositifs. Afin de qualifier ce banc, un réseau de couplage Front-Side, dont l'efficacité a été caractérisée à STMicroelectronics, a été mesuré. Nous observons une différence de près de 2,5 dB, en défaveur de notre banc, dans l'efficacité de couplage maximum obtenue. Ainsi, les valeurs annoncées dans la suite de ce chapitre sont relatives. Dans le cas d'une poursuite du développement de la configuration Back-Side, un banc de mesure spécifique devra être mis en place afin de pallier ce problème.

○ Impact de la présence d'un réflecteur métallique :

En premier lieu, nous avons cherché à déterminer l'impact sur les performances du réseau de couplage induit par la présence ou non d'un réflecteur métallique. En *Figure II-17*, nous présentons l'efficacité de couplage d'un même réseau, possédant ou non un réflecteur, en fonction de la longueur d'onde. L'épaisseur entre le réseau et le miroir métallique est de 550 nm lorsque ce dernier est présent. Un gain de puissance maximal de 7 dB, obtenu grâce au miroir, est observé à la longueur d'onde de 1310 nm.

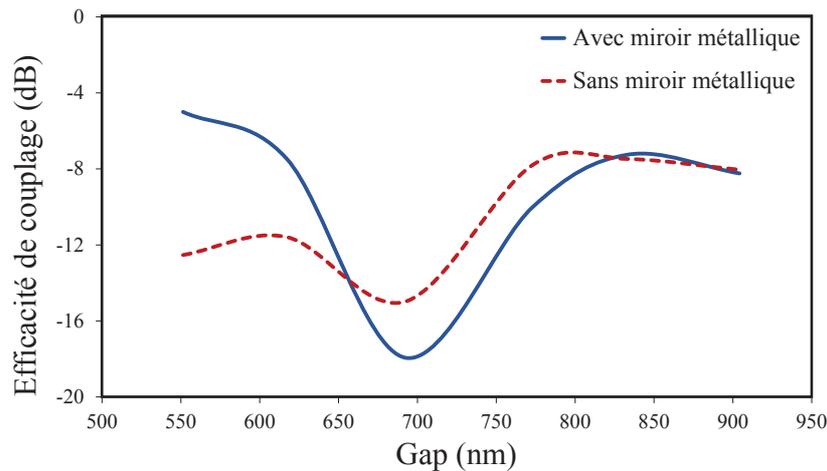


**Figure II-17 : Spectres montrant l'efficacité de couplage d'un réseau avec un miroir pour un gap de 550 nm et sans miroir.**

Si pour cette configuration spécifique, la présence du réflecteur métallique nous apporte un gain significatif dans les performances du réseau, rappelons qu'un phénomène d'interférences intervient entre l'onde lumineuse diffractée directement vers la fibre et celle diffractée vers le miroir puis réfléchi vers la fibre. Afin de déterminer la sensibilité, en termes d'épaisseurs, du gain obtenu grâce au réflecteur, chaque réseau a ensuite été mesuré, pour une longueur d'onde de 1310 nm, avec et sans miroir métallique. Les résultats sur la *Figure II-18* montrent l'efficacité de couplage obtenue en fonction du

*gap*. Nous remarquons que, pour un *gap* de 550 nm, le gain est maximal. En revanche, pour une épaisseur de *gap* située entre 660 nm et 800 nm, la présence du réflecteur produit l'effet inverse : il introduit des pertes supplémentaires.

Ce phénomène s'explique par le changement de configuration interférométrique du dispositif. En effet, lorsque le miroir est placé de manière à obtenir des interférences constructives, la puissance lumineuse diffractée directement vers la fibre et celle réfléchiée sur le métal s'ajoutent. A contrario, lorsqu'il y a des interférences destructives entre les rayons, la puissance lumineuse réfléchiée sur le miroir se soustrait à celle diffractée directement vers la fibre. Les pertes induites par ces interférences destructives peuvent alors même excéder les pertes dans le substrat d'un réseau sans réflecteur.

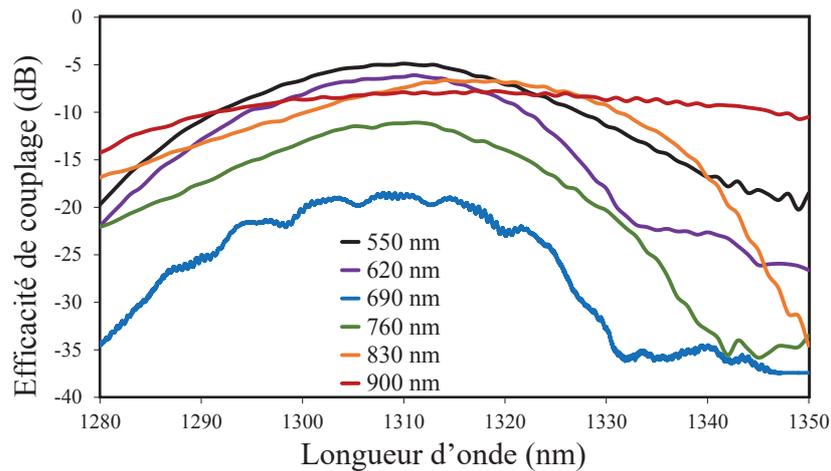


**Figure II-18 : Graphe montrant l'efficacité de couplage en fonction de la longueur d'onde d'un réseau avec et sans miroir.**

Grâce aux deux figures précédentes, nous démontrons une amélioration des performances du réseau de couplage avec un miroir métallique par rapport à celui sans miroir lorsque l'épaisseur de *gap* est optimisée, autour de 550 nm dans notre cas. En revanche, pour un *gap* entre 650 et 750 nm, les performances du coupleur avec réflecteur diminuent fortement. Ce paramètre est donc critique pour le bon fonctionnement du dispositif.

- Impact de l'épaisseur entre le réseau et le réflecteur métallique :

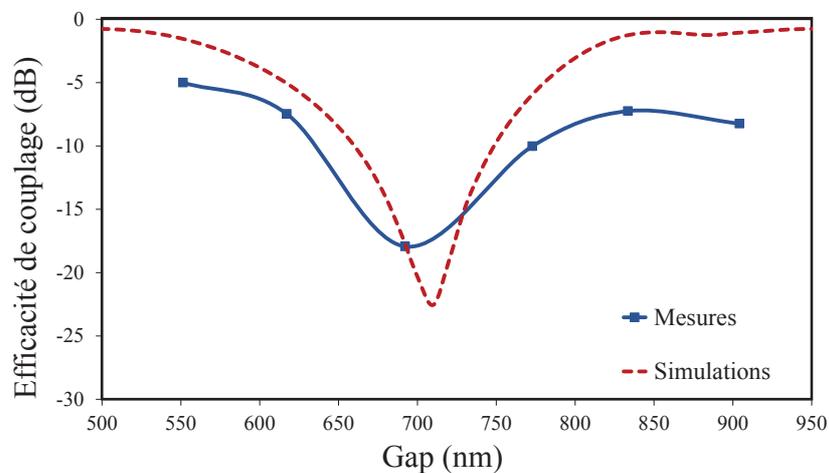
Afin de déterminer les performances du réseau en fonction de la longueur d'onde, nous avons mesuré son efficacité de couplage pour les différentes épaisseurs entre le réseau et le réflecteur métallique. Les résultats obtenus sont exposés en *Figure II-19*. Le réseau montrant les meilleures performances possède un miroir se situant à 550 nm de distance. Il est matérialisé par la courbe noire sur la *Figure II-19*. Les pertes sont de 4,8 dB à 1310 nm pour une bande passante de 25 nm à - 3 dB, centrée sur 1310 nm. Le réseau présentant les pertes les plus importantes soit 18,5 dB à 1310 nm (courbe bleue sur la *Figure II.3.v*) a une épaisseur de *gap* de 690 nm. Ceci confirme les observations faites lors des précédentes mesures.



**Figure II-19 : Spectres montrant l'efficacité de couplage d'un réseau de couplage en fonction de la longueur d'onde pour plusieurs épaisseurs de *gap*.**

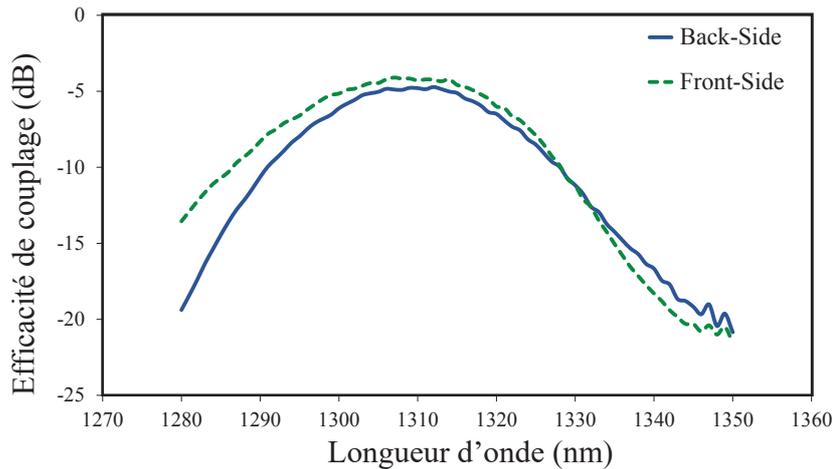
De manière à valider la méthode de simulation utilisée, les résultats des mesures de l'efficacité de couplage du réseau, avec réflecteur métallique, en fonction du *gap* ont été comparés avec les résultats théoriques obtenus. En utilisant les épaisseurs mesurées par ellipsométrie, la *Figure II-20* démontre que nous obtenons une bonne concordance sur la position du maximum de perte entre théorie et mesures. La simulation situe ce pic à une épaisseur de 710 nm entre le réseau et son miroir tandis que les mesures le place à une épaisseur de 690 nm.

Il faut cependant noter que le faible échantillonnage de distances réflecteur/miroir fabriqué nous empêche d'obtenir une parfaite concordance entre les deux courbes.



**Figure II-20 : Comparaison entre mesures et simulations de l'efficacité de couplage de la lumière du réseau de couplage dans une fibre en fonction de la distance Réseau/Miroir à 1310 nm.**

Enfin, afin de valider le bon fonctionnement du dispositif dans sa nouvelle configuration, nous avons comparé les résultats de mesures d'une structure en Back-Side, avec une épaisseur de *gap* optimale de 550 nm, avec les résultats de cette même structure en configuration Front-Side. Les résultats de l'efficacité de couplage en fonction de la longueur d'onde pour ces réseaux sont exposés en *Figure II-21*. Nous obtenons des résultats similaires entre les configurations Back-Side et Front-Side avec des pertes d'environ 5 dB pour une longueur d'onde de 1310 nm. La bande passante à - 3 dB est légèrement meilleure en Front-Side avec 30 nm contre 27 nm pour le Back-Side.



**Figure II-21 : Comparaison de l'efficacité de couplage en fonction de la longueur d'onde pour un réseau en configuration Front-Side et en comparaison Back-Side.**

En tenant compte du système non optimisé de mesure utilisé, ces derniers résultats confirment le bon fonctionnement du coupleur suivant notre nouveau schéma d'intégration lorsque l'épaisseur réseau / miroir est optimisée.

Il faut cependant noter le fait que les structures fabriquées sont des réseaux de couplage surfacique optimisés pour un fonctionnement de type Front-Side. Ainsi, des études complémentaires sur des structures adaptées au nouveau schéma d'intégration devront être menées afin de déterminer la possibilité d'obtenir une efficacité de couplage dans la fibre accrue grâce à un réflecteur métallique et ainsi atteindre, voire dépasser, des valeurs absolues d'efficacité de couplage de réseaux Front-Side, soit environ -1,8 dB de perte par coupleur dans le cas de STMicroelectronics [12].

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons montré que :

- ✓ L'efficacité de couplage du réseau surfacique dépend de l'épaisseur de silice entre le réseau et le réflecteur métallique,
- ✓ Pour une valeur particulière de  $\text{SiO}_2$ , d'environ 550 nm, nous obtenons une efficacité de couplage équivalente entre les deux configurations Front-Side et Back-Side.

Notre nouveau schéma d'intégration est donc compatible avec cet élément passif d'une puce photonique. Lors de la fabrication des puces lasers, une attention toute particulière sera accordée au contrôle de l'épaisseur de  $\text{SiO}_2$ .

## II.5 CONCLUSION

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons posé les bases de l'optique guidée appliquées à la photonique sur silicium.

Pour cela, nous avons rappelé les principes de la propagation d'un mode optique dans un guide d'onde à travers les équations de Maxwell ainsi que la définition de l'indice effectif. Nous avons ensuite rappelé succinctement la théorie du fonctionnement des structures de Bragg, appliqué à la diffraction dans le cas des réseaux de couplage surfacique et à la réflexion dans le cadre de miroirs de Bragg.

Dans la seconde partie du chapitre, nous nous sommes concentrés sur la vérification du bon fonctionnement de dispositifs autres que le laser à travers celui permettant de transférer la lumière du guide d'onde vers la fibre (ou inversement) : le réseau de couplage surfacique. Nous avons détaillé les différentes options d'optimisations de ce dispositif, et notamment la réalisation d'un métal réfléchissant le rayonnement diffracté par le réseau vers le substrat. Nous nous sommes alors penché sur l'amélioration des performances d'un coupleur doté d'un miroir métallique selon la configuration particulière de l'intégration Back-Side. Après avoir déterminé le paramètre critique de cette optimisation qu'est l'épaisseur entre le réseau et son réflecteur, nous avons montré qu'une valeur optimale pouvait être obtenue grâce à une série de simulations FDTD.

Pour valider les valeurs obtenues par simulation, des réseaux de couplage ont été réalisés sur des plaques 300 mm sur la plateforme de STMicroelectronics. Plusieurs configurations différentes ont été implémentées afin de déterminer d'une part le gain de puissance apporté par la présence d'un miroir et la bonne corrélation des mesures avec les simulations donnant l'efficacité de couplage en fonction de l'épaisseur réseau – réflecteur et d'autre part ses performances comparées à celles d'un même réseau construit par intégration Front-Side.

Nous avons démontré qu'en utilisant une épaisseur appropriée, nous ne dégradons pas les performances du réseau de couplage surfacique en configuration Back-Side par rapport à une intégration Front-Side. Néanmoins, l'efficacité de couplage absolue obtenue d'environ  $-5$  dB à 1310 nm est relativement faible comparée à celle atteinte par des études similaires [106] ou celle de réseaux Front-Side similaires [12]. Une explication pourrait venir de la méthode de mesure utilisée. En effet, le dispositif mesuré en Front-Side à STMicroelectronics montre de meilleurs résultats que lorsque nous l'avons mesuré. Une méthode pour améliorer ses performances serait de développer un banc de mesures spécifique ainsi que des réseaux de couplage spécifiques au Back-Side dont la directionnalité permettrait d'envoyer la majorité de la lumière non plus vers le miroir mais vers la fibre.

# Chapitre III : Dimensionnement de la Cavité Laser Hybride DBR III-V/Si

## Sommaire

---

III.1 Introduction .....	52
III.2 La cavité laser.....	52
3.2.1 Principe de fonctionnement d'un oscillateur opérant aux fréquences optiques.....	52
3.2.2 Amplification optique dans un semi-conducteur.....	53
3.2.3 Diode laser Fabry-Pérot.....	57
3.2.4 Présentation de la cavité laser hybride DBR III-V/Si.....	62
III.3 Le couplage entre le guide III-V et le guide SOI .....	65
3.3.1 Rappels sur le couplage de mode entre deux guides d'onde .....	65
3.3.2 Calcul du profil de l'�panouisseur.....	68
3.3.3 Vérifications numériques de l'efficacité de l'�panouisseur.....	72
III.4 Le miroir de Bragg .....	76
3.4.1 Principe et rappels théoriques sur une structure de Bragg en réflexion .....	77
3.4.2 Influence de la forme du guide d'onde.....	79
3.4.3 Influence de la période du réseau de Bragg.....	80
3.4.4 Influence de l'épaisseur de gravure et de la longueur du réseau de Bragg.....	81
III.5 Le transformateur de mode : guide laser / guide d'onde .....	82
3.5.1 Dimensionnement du transformateur de mode.....	82
3.5.1 Influence des variabilités du procédé de fabrication .....	83
III.6 Conclusion.....	85

---

### III.1 INTRODUCTION

L'objectif principal de ces travaux est d'intégrer une source laser sur une puce photonique sur silicium. Ainsi, dans ce chapitre, nous exposons les études menées en vue de la conception de la cavité laser. Tout d'abord, nous aborderons le principe de fonctionnement d'une cavité laser avant d'exposer l'architecture que nous avons retenue pour mener à bien cette intégration, la cavité laser hybride DBR III-V sur silicium. Le dispositif étudié est composé de différents modules :

- Un épanouisseur permettant de transférer un mode optique entre le guide III-V et le guide SOI,
- Des miroirs de Bragg,
- Un transformateur de mode connectant, en fin de cavité, le guide laser SOI à un guide d'onde monomode à une longueur d'onde de 1310 nm.

Nous allons donc détailler alors sur l'étude des paramètres opto-géométriques de chacun d'eux.

Ainsi, après un bref rappel du couplage de mode entre deux guides d'onde, nous détaillerons les simulations effectuées pour définir les paramètres optimaux de l'épanouisseur. Nous rappellerons ensuite les principes de fonctionnement d'une structure de Bragg en réflexion avant d'aborder la définition de leurs propriétés en termes de longueur d'onde de Bragg, de réflectivité et de sélectivité en fonction de leurs paramètres opto-géométriques. Enfin, nous présenterons le dimensionnement du transformateur de mode à 1310 nm.

### III.2 LA CAVITE LASER

Le LASER, pour "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation", est une source optique délivrant un faisceau lumineux cohérent spatialement et temporellement. Dans ce paragraphe, nous allons nous intéresser à ses mécanismes de fonctionnement et à ses caractéristiques principales.

#### 3.2.1 *Principe de fonctionnement d'un oscillateur opérant aux fréquences optiques*

Le laser est un oscillateur fonctionnant aux fréquences optiques. La *Figure III-1* illustre schématiquement le principe de fonctionnement d'un oscillateur : la sortie d'un amplificateur  $S(\omega)$ , dont la fonction de transfert est  $A(\omega)$ , est couplée à son entrée  $E(\omega)$  par une boucle de contre-réaction, de fonction de transfert  $F(\omega)$ . L'équation de transfert d'un tel système est :

$$\frac{S(\omega)}{E(\omega)} = \frac{A(\omega)}{1 - A(\omega)F(\omega)} \quad \text{Equation 3.1}$$

Nous remarquons que le dénominateur de cette équation s'annule lorsque le terme  $A(\omega)F(\omega) = 1$ . Dans ce cas, le système n'est alors plus linéaire et un signal de sortie est observable malgré un signal d'entrée nul : le système oscille à la fréquence  $\omega$ .

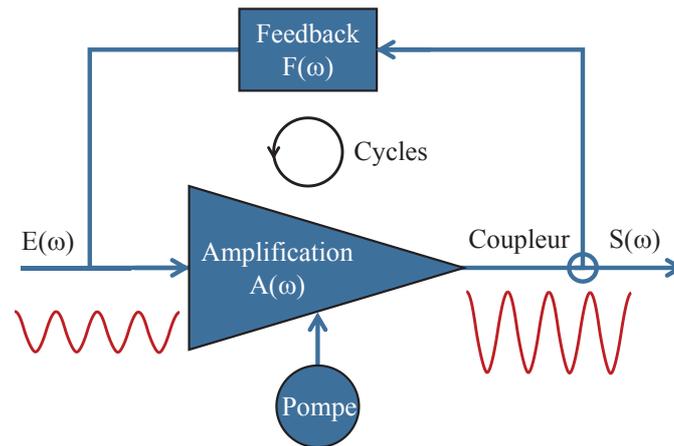


Figure III-1 : Schéma d'un oscillateur à boucle de réaction.

Dans le cadre d'un système réel, l'amplificateur, alimenté par une pompe, est bruité et présente un gain qui sature à mesure que le signal d'entrée augmente. En effet, un amplificateur réel ne peut fournir plus d'énergie au signal qu'il n'en dispose grâce à sa pompe.

Au démarrage du système, une fraction du bruit intrinsèque de l'amplificateur est rebouclée dans le système par la contre-réaction puis amplifiée, permettant ainsi l'établissement d'un régime oscillatoire. L'instauration de ce régime est possible sous certaines conditions. Le fait de respecter l'hypothèse  $A(\omega)F(\omega) = 1$  implique en effet qu'une partie du signal, amplifiée et ramenée à l'entrée de l'amplificateur, doit s'ajouter au signal déjà présent tout en compensant les pertes induites par la boucle de rétroaction. Dès que l'oscillation démarre, le signal présent à l'entrée de l'amplificateur croît rapidement jusqu'à saturer le gain de celui-ci. Lorsque le gain saturé de l'amplificateur est égal aux pertes de la contre-réaction, le régime permanent du système est atteint.

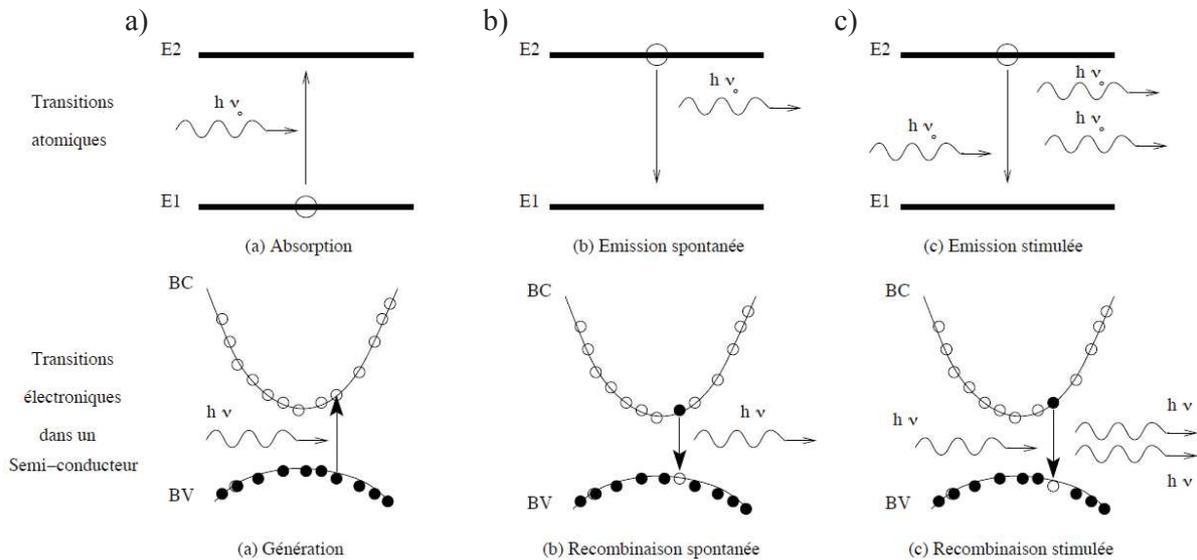
Dans le cas d'un oscillateur optique, la contre-réaction est fournie par des miroirs pouvant être de configurations variées. De son côté, la pompe est électrique, optique ou chimique. Le fonctionnement de l'amplificateur optique peut être décrit en utilisant une théorie quantique dans laquelle l'onde lumineuse et la matière sont quantifiées. Cependant, pour de nombreuses applications, le modèle semi-classique proposé par Einstein [110] est utilisé. Ce dernier est basé sur une quantification de la matière et sur un traitement classique du rayonnement électromagnétique et des photons associés.

### 3.2.2 Amplification optique dans un semi-conducteur

Selon le modèle d'Einstein, illustré *Figure III-2*, un rayonnement interagit avec la matière de trois façons possibles :

- L'absorption (*Figure III-2 a*) : Un photon incident transfère son énergie à une particule qui passe alors à un niveau d'énergie excité. Ce phénomène est utilisé notamment dans les photodétecteurs.
- L'émission spontanée (*Figure III-2 b*) : Un photon est spontanément émis par désexcitation atomique. Ce phénomène est utilisé notamment dans les diodes électroluminescentes.

- L'émission stimulée (Figure III-2 c) : Un photon incident stimule la désexcitation radiative d'une particule et ainsi l'émission d'un photon possédant les mêmes caractéristiques que le photon incident.



**Figure III-2 : Schémas des interactions photons-matière pour un système à deux niveaux d'énergie.**

Par analogie avec ces transitions atomiques, nous pouvons décrire les transitions électroniques d'un semi-conducteur comme un quasi-système à deux niveaux d'énergies. La dernière bande entièrement peuplée du matériau, la bande de valence, est alors considérée comme le niveau bas  $E_1$  tandis que la première bande partiellement peuplée, la bande de conduction, représente le niveau haut  $E_2$  du système. Cette analogie est illustrée sur la Figure III-2. Dans ce cas, l'énergie du gap  $E_g$  est égale à la différence d'énergie entre le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande de conduction.

La prédominance d'une de ces interactions dépend des conditions imposées au système.

- Le coefficient de gain du milieu amplificateur :

Une onde lumineuse peut interagir avec les porteurs du semi-conducteur lorsque sa fréquence  $\nu$  est telle que  $h\nu > E_g$ ,  $h$  étant la constante de Planck.

Dans ces conditions, l'onde suit la loi de Beer-Lambert. Après un parcours d'une distance  $d$  dans le matériau, l'intensité du rayonnement est telle que :

$$I(\nu) = I_0(\nu)e^{-\alpha d} \quad \text{Equation 3.2}$$

Avec  $\alpha$  le coefficient d'absorption du milieu et  $I_0(\nu)$  l'intensité initiale.

Dans un matériau semi-conducteur, la valeur du coefficient d'absorption est fixée par la relation [111] :

$$\alpha(\omega) = \alpha_0(\omega)[f_v(\hbar\omega) - f_c(\hbar\omega)] \quad \text{Equation 3.3}$$

Où  $f_v(\hbar\omega)$  et  $f_c(\hbar\omega)$  sont respectivement les probabilités d'occupation des niveaux d'énergie  $E_1$  de la bande de valence et de  $E_2$  la bande de conduction vérifiant  $E_2 - E_1 = \hbar\omega$ ,  $\hbar\omega$  étant l'énergie du photon absorbé. Le coefficient  $\alpha_0(\omega)$  est le coefficient d'absorption à l'équilibre thermodynamique lorsque tous les électrons sont dans la bande de valence.

Nous remarquons dans l'Equation 3.3 que si  $f_c(\hbar\omega) > f_v(\hbar\omega)$ ,  $\alpha(\omega)$  devient négatif et donc l'onde lumineuse est amplifiée au lieu d'être atténuée. Nous appelons alors  $\gamma(\omega) = -\alpha(\omega)$  le coefficient de gain du matériau.

La condition  $f_c(\hbar\omega) > f_v(\hbar\omega)$  est l'équivalent de la condition d'inversion de population dans les milieux atomiques. En effet, elle implique que la probabilité de présence des électrons dans la bande de conduction est supérieure à celle de la bande de valence, ce qui peut être obtenu en injectant des porteurs.

En remplaçant le niveau de Fermi  $E_f$  par des quasi-niveaux de Fermi  $E_{fc}$  et  $E_{fv}$ , pour respectivement la bande de conduction et la bande de valence, dans les expressions de  $f_c$  et  $f_v$ , nous obtenons la condition, dite de Bernard et Duraffourg, déterminant le seuil d'injection à atteindre pour obtenir du gain optique :

$$E_{fc} - E_{fv} > \hbar\omega > E_g \quad \text{Equation 3.4}$$

Le lien entre les quasi-niveaux de Fermi et les concentrations de porteurs injectés n'est pas trivial. Cependant, une approche empirique permet d'approximer le pic du coefficient de gain  $\gamma_p$  par la relation suivante [111] :

$$\gamma_p \approx \alpha_0 \left( \frac{\Delta n}{\Delta n_{Tr}} - 1 \right) \quad \text{Equation 3.5}$$

Avec  $\alpha_0$  le coefficient d'absorption du semi-conducteur en l'absence d'injection ( $\Delta n = 0$ ) et  $\Delta n_{Tr}$  la concentration de porteurs injectés pour atteindre la transparence lorsque l'émission stimulée compense exactement l'absorption.

Lorsque  $\Delta n > \Delta n_{Tr}$ , il y a inversion des populations de porteurs entre les bandes de conduction et de valence. Pour une structure donnée, de zone active d'épaisseur  $d$ , le coefficient de gain peut être exprimé en fonction de la densité de courant injectée  $J$  :

$$\gamma_p \approx \alpha_0 \left( \frac{J}{J_{Tr}} - 1 \right) \quad \text{Equation 3.6}$$

Avec  $J = \frac{ed}{\tau} \Delta n$ , où  $\tau$  est la durée de vie des porteurs, et  $J_{Tr}$  la densité de courant de transparence telle que  $J_{Tr} = \frac{ed}{\eta_i \tau_r} \Delta n_T$ , où  $\tau_r$  est la durée de vie d'émission radiative et  $\eta_i$  est le rendement quantique interne tel que  $\eta_i = \tau / \tau_r$ .

○ L'intérêt des hétérostructures :

Dans le cas d'une jonction p-n, la densité de courant nécessaire pour atteindre les conditions d'émission stimulée est très élevée, de l'ordre de quelques milliers d'ampères par centimètre carré pour une jonction à base d'InGaAsP de deux microns d'épaisseur.

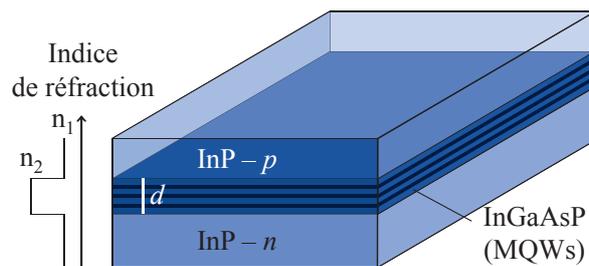
Afin de diminuer cette densité de courant, il existe plusieurs solutions :

- Réduire les dimensions de la jonction. En effet, il a été démontré que le coefficient de gain est inversement proportionnel à l'épaisseur de la zone active, à travers  $J_{Tr}$ . Néanmoins, cette démarche a ses limites, notamment concernant la longueur de diffusion des porteurs.
- Utiliser des hétérostructures afin d'augmenter le confinement des porteurs au niveau de la zone active [112].

Une double hétérostructure est formée d'une jonction p-n dans laquelle une fine couche d'un matériau différent, de plus petite bande interdite, a été insérée à l'interface des deux zones dopées. L'utilisation d'un tel empilement permet la création de barrières de potentiel autour de la région active et ainsi de confiner les porteurs dans la zone d'intérêt : à surface égale, la densité d'excitation est donc plus élevée que dans une homojonction.

Il devient alors possible de réduire les dimensions de la zone de gain grâce à cette structure. Deux types de double-hétérojonctions sont principalement utilisées dans les amplificateurs lasers aux longueurs d'ondes télécoms : l'AlGaAs / GaAs et l'InGaAsP / InP. Dans notre cas, nous utiliserons la deuxième. Le second avantage de cette configuration est la création d'un guide d'onde pour les photons générés lorsque le matériau de la couche active est choisi avec un indice de réfraction plus élevé que celui des barrières, améliorant ainsi leurs interactions avec les porteurs du matériau à gain. Un dernier avantage est la transparence des couches de barrières en raison de leurs énergies de bande interdite supérieures à celle des photons générés, réduisant ainsi les pertes.

Lorsque seule l'une des dimensions, l'épaisseur  $d$ , de la couche active est petite par rapport autres, nous parlons de « puit quantique », ou *Quantum Well* (QW) en anglais. Dans les dispositifs actuels, la zone de gain est en fait une combinaison des deux approches avec plusieurs puits quantiques, ou MQWs pour Multi Quantum Wells, présents au sein de la zone active d'une double hétérojonction. La *Figure III-3* représente un schéma d'une telle double hétérojonction à base d'InP / InGaAsP.



**Figure III-3 : Schéma d'une double hétérojonction à puit quantique.**

Dans le cadre de nos travaux, l'étude et l'optimisation du coefficient de gain de la structure III-V n'étaient pas l'objectif. Nous avons donc utilisé les mêmes empilements que ceux mis en œuvre lors des études précédentes [2] et [3].

Le mode optique n'étant pas entièrement confiné dans le matériau actif (*Figure III-4*) : une partie du champ électromagnétique se situe dans les barrières (SCHs pour *Separate Confinement Heterostructures*).

Il faut donc tenir compte d'un facteur de confinement  $\Gamma$  dans la zone active. Ce coefficient est exprimé par la relation :

$$\Gamma = \frac{\int_{-d/2}^{d/2} |E|^2 dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} |E|^2 dy} \quad \text{Equation 3.7}$$

Où  $E$  est le champ électrique de l'onde guidée.

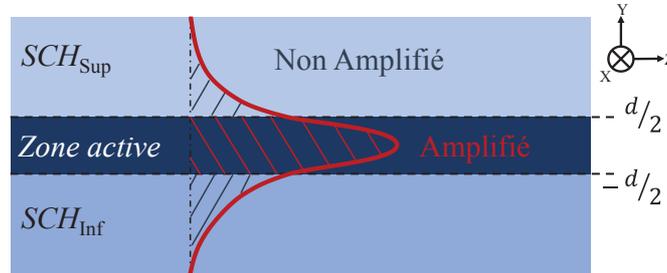


Figure III-4 : Schéma d'une coupe longitudinale d'une cavité laser.

### 3.2.3 Diode laser Fabry-Pérot

Pour obtenir un oscillateur laser, le matériau à gain ou l'empilement de la double hétérojonction est placé dans une cavité résonante. Dans le cas le plus courant, la cavité est bornée par deux miroirs. Cette cavité joue un rôle déterminant dans le fonctionnement du laser : elle confine la lumière dans la zone de gain tout en fournissant la contre réaction nécessaire à la mise en place d'un régime oscillatoire. Il existe plusieurs types de cavités lasers qui présentent chacune des réponses fréquentielles différentes.

La cavité Fabry-Pérot est la forme de cavité résonnante la plus simple. Elle est constituée de deux miroirs disposés de manière parallèle de part et d'autre de la zone active. En général, ces miroirs sont obtenus soit par clivage suivant un plan cristallin, soit par gravure. La différence d'indice entre les matériaux entraîne la formation de miroirs partiellement réfléchissants.

#### o La condition de seuil :

Lorsque la condition de phase est respectée, la condition d'une oscillation laser est que le coefficient de gain en petit signal excède le coefficient de pertes totales de la cavité. Ce coefficient de gain est proportionnel au taux de pompe apporté au milieu amplificateur. Pour une valeur particulière de pompe, l'inversion de population nécessaire à l'oscillation laser est atteinte : on parle de taux de pompe de seuil. Au-delà de cette valeur, le nombre de porteurs dans la bande de conduction n'augmente plus.

Comme nous l'avons vu au début de ce chapitre, lorsque le flux de photons interne augmente, le coefficient de gain diminue jusqu'à atteindre une valeur de saturation. Le coefficient de gain saturé  $\gamma_{sat}$  est égal à celui des pertes totales de la cavité  $\alpha_T$ . Le flux de photons cesse alors d'augmenter et le régime permanent du laser est atteint.

Ainsi, en remplaçant  $\gamma_p = \gamma_{sat}$  par  $\alpha_T$  dans l'Equation 3.6, nous obtenons une expression de la densité de courant de seuil  $J_{th}$  :

$$J_{th} = \frac{\alpha_T + \alpha_0}{\alpha_0} J_{Tr} \quad \text{Equation 3.8}$$

Où  $\alpha_T$  est défini tel que :

$$\alpha_T = \frac{\alpha}{\Gamma} + \frac{1}{2\Gamma L} \ln\left(\frac{1}{R_1 R_2}\right) \quad \text{Equation 3.9}$$

Avec  $\alpha$  les pertes de diffusion dans la cavité et  $R_1$  et  $R_2$  les réflectivités des deux miroirs de la cavité.

La densité de courant de seuil est l'un des paramètres clés des performances d'un laser : plus cette valeur est faible, meilleur le laser est. L'expression de la densité de courant de seuil souligne l'avantage des hétérostructures décrites précédemment. En effet, nous remarquons que plus l'épaisseur de la zone active est petite plus la densité de courant de transparence  $J_{Tr}$  est faible. En revanche, d'un autre côté, le facteur de confinement  $\Gamma$  diminue et donc le coefficient de pertes  $\alpha_T$  augmente. Les hétérostructures permettent d'avoir une épaisseur de zone active relativement faible tout en maintenant un bon confinement du flux de photons.

○ La puissance émise :

Lorsque le régime permanent est atteint, et pour une structure de dimensions fixées, le flux interne de photons est négligeable en dessous du seuil et proportionnel à la différence entre le courant injecté  $i$  et le courant de seuil  $i_{th}$  au-delà de celui-ci. Nous pouvons dès lors exprimer la puissance interne  $P_i$  du laser au-dessus du seuil comme étant le produit de l'énergie du photon par le flux interne [113] :

$$P_i = \eta_i(i - i_{th}) \frac{h\nu}{e}, \quad \text{avec } i > i_{th} \quad \text{Equation 3.10}$$

Lorsque seul l'un des miroirs permet à la lumière de sortir de la cavité laser, la puissance émise par le laser  $P$  est le produit de la puissance interne par l'efficacité d'émission  $\eta_e$  de la cavité :

$$P = \eta_e P_i = \eta_e \eta_i (i - i_{th}) \frac{h\nu}{e} = \eta_a (i - i_{th}) \frac{h\nu}{e} \quad \text{Equation 3.11}$$

Avec  $\eta_e = \alpha_{m1}/\alpha_T$  et  $\alpha_{m1}$  les pertes du miroir partiel.

Le rendement quantique externe différentiel est le produit du rendement quantique interne et de l'efficacité d'émission de la cavité.

Un exemple de l'expression de la puissance externe du laser en fonction du courant injecté, appelée courbe L-I, pour Light-Intensity, est schématisé en *Figure III-5*.

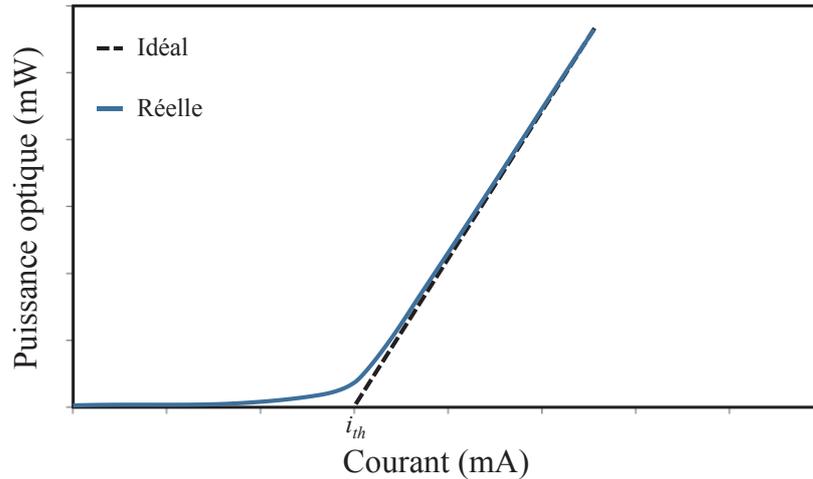


Figure III-5 : Schéma d'une courbe L-I d'une cavité laser

○ Le spectre d'émission :

Le signal lumineux étant réfléchi sur les parois des miroirs, cela entraîne la formation d'ondes stationnaires dues aux interférences constructives des champs optiques pour certaines fréquences d'oscillation laser que nous appelons les modes propres de la cavité. Ces fréquences propres  $\nu_m$  sont déterminées en calculant le déphasage total  $\Delta\Phi$  de l'onde lumineuse sur un cycle dans la cavité :

$$\Delta\Phi = 2Ln_{opt} \frac{2\pi\nu_m}{c} \quad \text{Equation 3.12}$$

Avec  $L$  la longueur totale de la cavité,  $n_{opt}$  l'indice optique dans la cavité et  $c$  la vitesse de la lumière dans le vide.

Il y a des interférences constructives si  $\Delta\Phi$  est un multiple entier de  $2\pi$ . Nous avons alors :

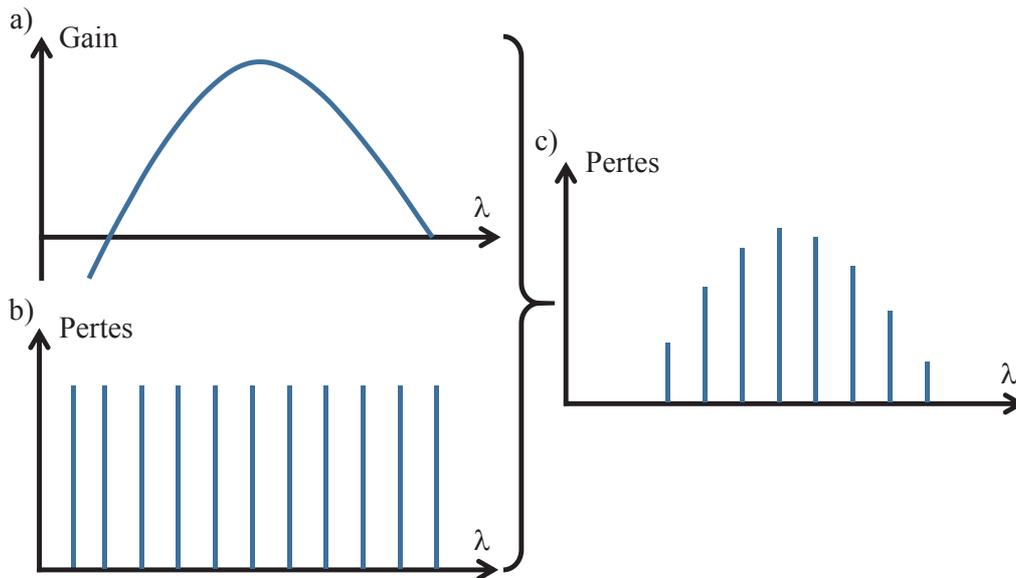
$$\nu_m = \frac{mc}{2Ln_{opt}} \quad \text{Equation 3.13}$$

Avec  $\in \mathbb{Z}$ .

Nous obtenons alors un peigne de Dirac en fréquence dont le nombre de mode propre dépend de la longueur de la cavité (Figure III-6 b)). L'écart spectral entre deux modes consécutifs, nommé intervalle spectral libre ou FSR (Free Spectral Range), est donné par la relation :

$$FSR = \frac{c}{2Ln_{opt}} \quad \text{Equation 3.14}$$

Nous remarquons que plus la cavité laser est longue plus le FSR est faible. Pour déterminer le nombre de modes laser émis par la cavité, il faut faire une convolution entre le peigne de fréquence obtenu et la courbe de gain du matériau actif (Figure III-6 a)). Un schéma du résultat obtenu est illustré Figure III-6 c).



**Figure III-6 : Schémas de spectres avec en a) celui du gain de la cavité, en b) le peigne de Dirac pour un Fabry-Pérot et en c) la convolution de deux spectres précédents.**

Dans le cas d'une cavité FP, le comportement du laser est généralement fortement multi-fréquences.

○ La sélectivité en longueur d'onde :

Nous avons démontré que plus la cavité laser est longue plus le nombre de fréquences validant la condition de phase est élevé. Pour obtenir un laser mono-fréquence, il existe plusieurs solutions :

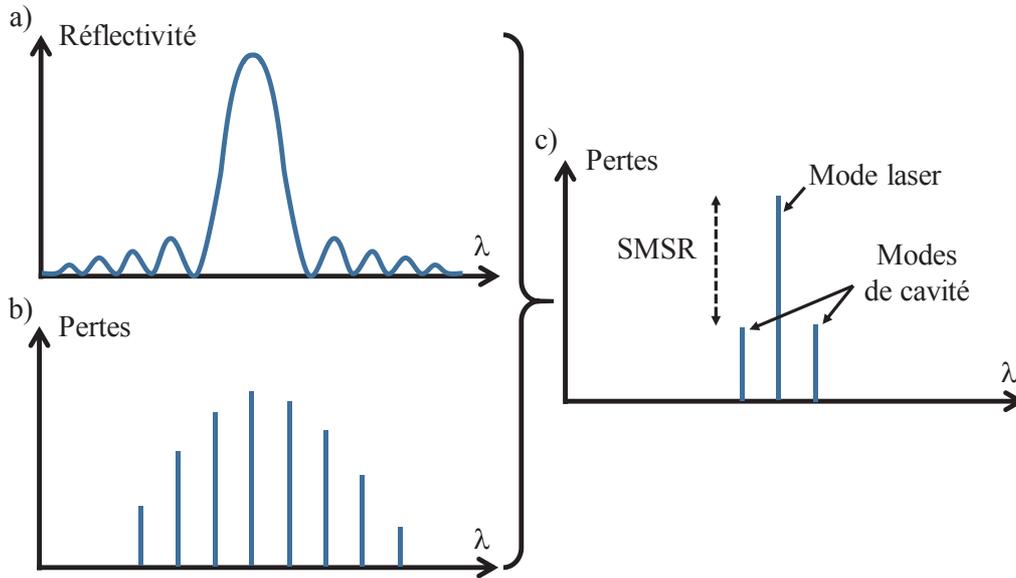
- Réduire la longueur de la cavité pour augmenter le FSR du laser. Ceci est notamment mis en œuvre dans les lasers de type VCSEL. En revanche, le raccourcissement de la cavité se fait au détriment du gain et donc de la puissance de sortie de la cavité.
- Introduire un élément de filtre en longueur d'onde de manière à rendre le laser mono-fréquence. Par exemple, il est possible de faire dépendre la réflectivité de la longueur d'onde pour l'un ou les deux miroirs de la cavité.

Dans le deuxième cas, l'*Equation 3.9* exprimant le coefficient de gain de seuil d'un dispositif dont la réflectivité de l'un des miroirs est dépendante de la longueur d'onde peut être ré-exprimée ainsi :

$$\gamma_{th}(\lambda) = \alpha + \frac{1}{2L} \ln \left( \frac{1}{R_1 R_2(\lambda)} \right) \quad \text{Equation 3.15}$$

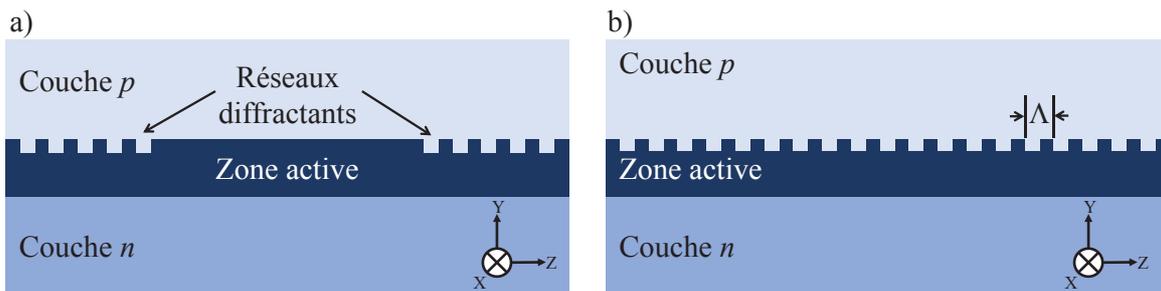
Dans le chapitre II, nous avons démontré que, sous certaines conditions, une structure de Bragg pouvait être utilisée pour induire une réflexion dans un guide d'onde autour d'une longueur d'onde de résonance. Le schéma d'un spectre d'une telle structure est grossièrement illustré en *Figure III-7 a)*. La convolution de ce spectre avec celui d'une cavité résonnante du type Fabry-Pérot (*Figure III-7 b)*) a pour effet de sélectionner une seule longueur d'onde de résonance dans la cavité laser (*Figure III-7 c)*). Les modes existants de part et d'autre du mode laser sont des modes de cavité. La qualité spectrale d'un

laser peut être définie par la valeur, en dB, de la différence entre le mode laser et le mode de cavité le plus puissant. Cette valeur est appelée le SMSR (Side Mode Suppression Ratio).



**Figure III-7 : Schémas de spectres avec en a) celui du filtre en réflectivité d'un miroir, en b) le peigne de Dirac pour un Fabry-Pérot convolué avec une courbe de gain et en c) la convolution de deux spectres précédents.**

Il existe deux manières d'utiliser une structure de Bragg pour induire la réflectivité nécessaire à une cavité laser. Une illustration de ces deux solutions est donnée en *Figure III-8*. La *Figure III-8 a)* présente une structure de type DBR dans laquelle la réflexion ponctuelle des miroirs Fabry-Pérot est remplacée par une réflexion distribuée dans l'espace. La *Figure III-8 b)* présente une structure de type DFB dans laquelle la contre-réaction est répartie tout au long de la zone active grâce à la présence d'un réseau. Le pas  $\Lambda$  du réseau définit la longueur d'onde de résonance de la structure de Bragg.



**Figure III-8 : Schémas de structures de miroirs distribués de type Bragg avec en a) un DBR et en b) un DFB**

Notre objectif est donc de tenir compte de ces paramètres afin de dimensionner une cavité laser émettant à une seule longueur d'onde.

### 3.2.4 Présentation de la cavité laser hybride DBR III-V/Si

Comme nous l'avons vu dans le Chapitre I, parmi les différentes intégrations de laser sur une puce de photonique sur silicium, nous avons choisi de nous concentrer sur la cavité laser hybride DBR III-V/Si.

Ce type de cavité avait déjà été développé pour une longueur d'onde d'émission de 1550 nm par A. Descos et B. Ben Bakir [1], [64], et était en cours de développement une longueur d'onde d'émission de 1310 nm par H. Duprez et B. Ben Bakir lors de mon arrivée [2]. En utilisant ce savoir-faire, notre objectif a donc été d'adapter ce type de cavité DBR fonctionnant à 1310 nm pour qu'elle soit compatible avec l'intégration Back-Side.

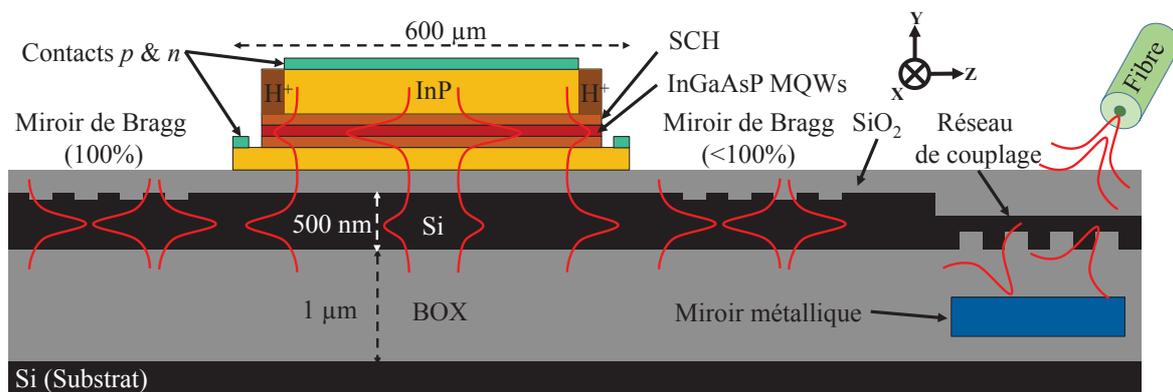
Un schéma en coupe longitudinale de ce type de cavité et de son réseau de couplage vers une fibre optique externe est illustré en *Figure III-9*. Dans cette figure, nous remarquons que la zone de gain, d'une longueur de 600  $\mu\text{m}$ , est composée d'un guide III-V placé au-dessus d'un guide silicium et séparé par une couche d'oxyde de silicium. Le ruban de III-V est composé, de haut en bas, d'une couche d'InP, de multi-puits quantiques (MQWs) en InGaAsP (en rouge) entourés par des barrières SCH (en orange) et enfin d'une nouvelle couche d'InP plus large que les couches supérieures. Les flancs du guide d'InP supérieur sont dopés avec des ions  $\text{H}^+$ .

Les contacts (en turquoise) sont déposés au sommet du guide III-V (contact  $p$ ) et en bas de part et d'autre de celui-ci (contact  $n$ ).

Les miroirs de Bragg de la cavité sont quant à eux structurés dans le guide SOI de chaque côté de la zone de gain. La cavité DBR est asymétrique : l'un des miroirs, appelé Back-Mirror ou BM, est entièrement réfléchissant à la longueur d'onde considérée tandis que l'autre, appelé Front-Mirror ou FM, est un réflecteur partiel.

En sortie de cavité, un adaptateur modal est implémenté dans le guide SOI afin de transférer la lumière émise par le laser au reste du circuit.

Finalement, le signal optique est couplé dans une fibre optique monomode grâce au réseau de couplage surfacique présenté dans le Chapitre II.



**Figure III-9 : Schéma en coupe longitudinale du dispositif étudié avec la cavité laser et le réseau de couplage surfacique.**

En reprenant l'analogie de la cavité laser avec un système amplificateur pourvu d'une boucle de réaction, nous pouvons identifier les différentes fonctions des éléments de cette cavité :

- La fonction amplificatrice  $A(\omega)$  est réalisée dans la zone de gain.
- Le pompage est réalisé par injection électrique dans l'empilement III-V.
- La boucle de réaction  $F(\omega)$  est fournie par le système des deux miroirs de Bragg.
- La fonction du coupleur permettant d'obtenir un signal en sortie de cavité est réalisée par le miroir de Bragg partiellement réflecteur.

Rappelons ici que l'objectif de cette thèse est la validation technologique de l'intégration Back-Side. Ainsi, comme nous l'avons fait dans le Chapitre II, notre but est d'adapter des composants déjà existants à ce nouveau schéma. Dans cette optique, nous avons choisi de conserver un empilement III-V très proche de celui utilisé lors de la thèse d'H. Duprez [2]. Le détail de cet empilement fabriqué par épitaxie moléculaire est rappelé dans le *Tableau III.1*.

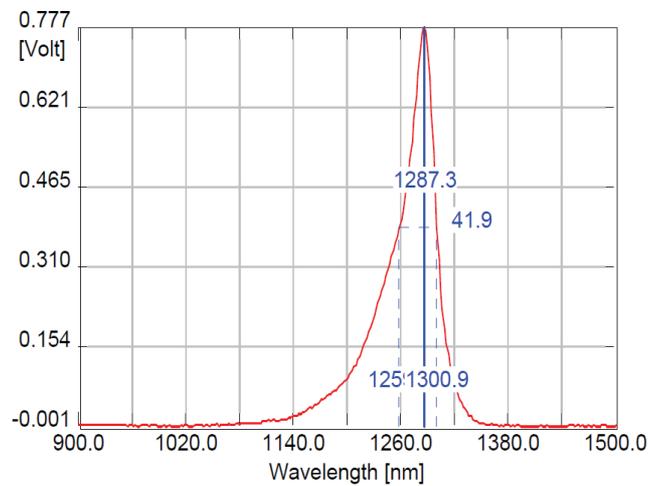
Dans cet empilement, le gain est fourni par huit QWs à base d'InGaAsP de 8 nm d'épaisseur, séparés par une barrière d'InGaAsP de composition différente et de 10 nm d'épaisseur. Afin de maximiser le confinement du mode dans les puits, cet ensemble de couches est séparé du reste par des barrières supplémentaires de 100 nm d'InGaAsP de même composition que les précédentes. De part et d'autre, des couches d'InP dopées  $p$  et  $n$  respectivement pour la couche supérieure et la couche inférieure permettent de réaliser l'injection électrique. La couche d'InP- $p$  est suffisamment épaisse pour que le mode optique ne soit pas perturbé par la métallisation du contact  $p$ . L'ajout de couches appelées « Super-lattice » entre l'InP- $n$  et la future surface de collage avec la plaque SOI permet de s'affranchir de la propagation d'éventuels défauts créés lors de l'étape de collage du III- V.

Couche	Matériau	Bande interdite (eV)	Dopage (cm <sup>-3</sup> )	Epaisseur (nm)
Substrat	InP			625 ± 25 μm
Transition	InP			50
Masque dur	InGaAs			300
Couche sacrificielle	InP			300
Couche du contact $p$	InGaAs	0,77	≥ 1,5 x 10 <sup>19</sup>	200
Transition	InGaAsP	1,13	5 x 10 <sup>18</sup>	50
Superstrat $p$	InP	1,34	2 → 0,5 x 10 <sup>18</sup>	2 μm
SCH	InGaAsP	1,13	5 x 10 <sup>17</sup>	50
			Intrinsèque	50
MQW barriers (x7)	InGaAsP	1,13	Intrinsèque	10
MQWs (x8)	InGaAsP	0,95	Intrinsèque	8
			Intrinsèque	50
SCH	InGaAsP	1,13	2 x 10 <sup>18</sup>	50
Couche du contact $n$	InP	1,34	2 x 10 <sup>18</sup>	110
Super-lattice (x2)	InGaAsP	1,13	2 x 10 <sup>18</sup>	7,5
Super-lattice (x2)	InP	1,34	2 x 10 <sup>18</sup>	7,5
Interface de collage	InP	1,34	Intrinsèque	10

Couches retirées

**Tableau III-1 : Composition de l'empilement III-V utilisé.**

La composition des QWs a été étudiée de manière à ce que la réponse photoluminescente soit centrée à une longueur d'onde proche de 1310 nm. Un exemple des valeurs transmises par le fabricant est donné en *Figure III-10*.

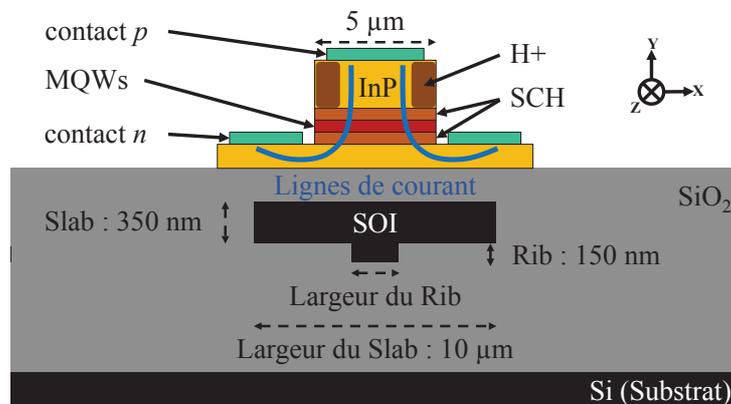


**Figure III-10 : Spectre de photoluminescence de l'empilement III-V utilisé.**

Une longueur d'onde centrale d'émission photoluminescente a été volontairement choisie plus courte que 1310 nm afin de pallier un éventuel décalage vers le rouge lors de la relaxation des matériaux III-V après le retrait du substrat InP.

Le système de pompe est réalisé par injection électrique dans la zone de gain directement dans le matériau III-V. La *Figure III-11* présente un schéma de coupe transversale au niveau de la structure hybride. Les études menées durant la thèse d'A. Descos [1] ont abouti à une forme du guide III-V telle que décrite dans la *Figure III-11*. Ainsi, la partie supérieure dopée *p*, les SCH et les MQWs du ruban d'InP sont gravés pour ne laisser qu'une bande de 5  $\mu\text{m}$  de large au niveau du guide SOI associé tandis que la partie inférieure dopée *n* de l'InP est volontairement gravée plus large.

Comme nous l'avons vu sur la *Figure III-11*, le contact *p* est déposé sur le dessus du III-V tandis que le contact *n* est déposé de part et d'autre du ruban de 5  $\mu\text{m}$ . Une implantation d'ions  $\text{H}^+$  permet en premier lieu une répartition optimale des lignes de courant au niveau des MQWs mais également de limiter les pertes dues aux rugosités des bords du guide.



**Figure III-11 : Schéma en coupe transversale de la zone de gain.**

Ainsi, la génération de lumière est faite dans les puits quantiques au sein du guide III-V tandis que la réflexion et le transport de l'onde lumineuse sont situés dans le guide SOI.

Les parties concernant le milieu amplificateur et la pompe ayant été développées par mes prédécesseurs, mon travail consiste d'une part à optimiser l'amplification optique en jouant sur le confinement optique et d'autre part à adapter les miroirs de Bragg, responsables de la partie « boucle de réaction », à la configuration Back-Side.

Afin de profiter au maximum du gain procuré par les MQWs, le mode optique fondamental est principalement confiné dans le guide III-V au niveau de la zone de gain. Les miroirs de Bragg étant structurés dans le guide SOI, le mode optique doit être confiné dans le silicium de part et d'autre de la zone active. Afin de réaliser ce changement de répartition modale, un couplage entre les deux guides compatible avec l'intégration Back-Side doit être dimensionné spécifiquement.

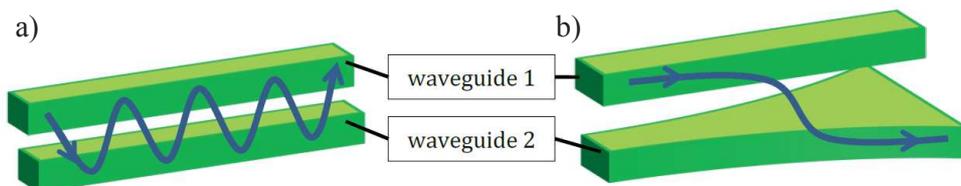
### III.3 LE COUPLAGE ENTRE LE GUIDE III-V ET LE GUIDE SOI

Dans ce paragraphe, nous allons détailler le dimensionnement du module permettant de transférer la lumière entre le guide III-V et le guide SOI en configuration Back-Side.

#### 3.3.1 Rappels sur le couplage de mode entre deux guides d'onde

Il existe plusieurs manières de transférer un mode optique entre deux guides dont le couplage directionnel ou l'utilisation de transformateurs de mode (*Figure III-12*). Le premier, décrit en *Figure III-12 a)*, consiste à dimensionner deux guides d'onde et à les espacer de telle manière que la partie évanescente du mode optique fondamental d'un guide recouvre l'autre guide [114]. Un transfert de puissance peut alors avoir lieu entre les deux guides. Dans le cas d'un guide infini, un système de battements se met en place entre les deux guides en fonction de la direction de propagation de l'onde. Si ce type de couplage permet de transférer un mode optique sur une longueur relativement faible, il n'en demeure pas moins compliqué à mettre en œuvre dans le cadre de nos technologies.

Dans notre cas, le but de notre transfert de lumière est de maximiser le confinement de la lumière dans les puits quantiques au niveau de la zone de gain et inversement dans le guide SOI au niveau des miroirs de Bragg. L'approche du couplage directionnel apparaît dès lors comme peu adaptée à notre problématique [1]. La structure retenue reprend donc les développements réalisés par H. Duprez durant sa thèse [2] à savoir un transfert de mode à l'aide d'un épanouisseur adiabatique dans le cadre d'un système couplé composé d'un guide III-V et d'un guide silicium (*Figure III-12 b)*). Le but de notre étude est donc d'adapter ce type d'épanouisseur, également appelé *taper*, à la configuration Back-Side.



**Figure III-12 : Schémas de deux types de couplage d'un mode optique entre deux guides avec en a) le couplage directionnel et en b) le couplage par transformateur de mode.**

Les transformateurs de modes adiabatiques sont structurés, soit dans les deux guides [73], soit dans l'un des deux seulement, à chaque extrémité de la zone active. Dans notre structure possédant deux guides superposés, ils permettent de transférer progressivement le supermode laser pair, largement confiné dans la partie III-V, vers le guide d'onde passif en silicium et inversement. La forme de l'épanouisseur respectant le critère d'adiabaticité permet de conserver la puissance optique principalement sur le supermode fondamental de la structure.

Si la détermination de l'évolution de la forme de telles structures peut être réalisée par simulation, il existe aussi une méthode analytique. Les équations nécessaires au dimensionnement de ces épanouisseurs sont tirées des hypothèses théoriques développées par Yariv et Sun [115].

Dans ce cas, la structure est tout d'abord assimilée à un assemblage de deux guides d'onde isolés possédant chacun une constante de propagation, tel que représenté *Figure III-12 b*). En considérant un mode TE, le champ électrique total  $E$  de cette structure peut être exprimé comme :

$$E(x, y, z) = A_1 \psi_1(x, y) \exp(-j\beta_1 z) + A_2 \psi_2(x, y) \exp(-j\beta_2 z) \quad \text{Equation 3.16}$$

Où  $\beta_{1,2} = \frac{2\pi}{\lambda} n_{1,2}$  sont les constantes de propagation de chacun des guides

Avec  $A_1, A_2, \psi_1, \psi_2, n_1, n_2$  respectivement les amplitudes, les distributions spatiales modales et les indices effectifs de chacun des deux guides séparés, à la longueur d'onde  $\lambda$  considérée.

Lorsque la distance séparant les deux guides est suffisamment grande, il n'y a pas d'échange de puissance entre eux. Cependant, lorsque cette distance est raccourcie, la distribution spatiale modale de chacun des guides recouvre l'autre guide : un couplage de puissance apparaît alors. Si la force de couplage est faible, le phénomène peut être considéré comme une perturbation faible pour chaque guide. Un système d'équations, dit équations des modes couplés, en résulte et peut être résolu grâce au formalisme des supermodes [116].

Les solutions de ce système d'équations sont les supermodes, pair ( $E_e$ ) et impair ( $E_o$ ), dont les amplitudes sont des combinaisons linéaires des amplitudes  $A_1$  et  $A_2$ . Ils sont exprimés comme des vecteurs-colonne :

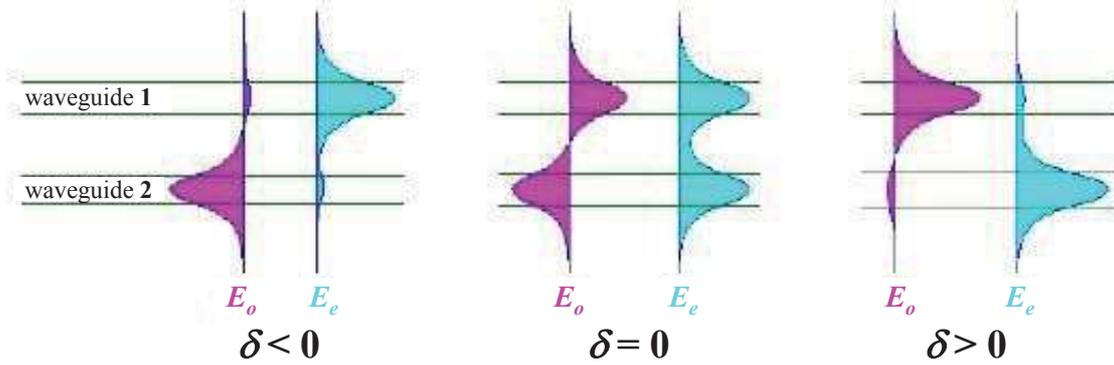
$$\begin{cases} E_e(z) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \sqrt{1 - \delta/S} \\ \sqrt{1 + \delta/S} \end{bmatrix} \exp[-j\beta_e z] = e_e \exp[-j\beta_e z] \\ E_o(z) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} -\sqrt{1 + \delta/S} \\ \sqrt{1 - \delta/S} \end{bmatrix} \exp[-j\beta_o z] = e_o \exp[-j\beta_o z] \end{cases} \quad \text{Equation 3.17}$$

Où  $\delta = \frac{\beta_2 - \beta_1}{2}$  et  $S = \sqrt{\delta^2 + \kappa^2} = \frac{\beta_e - \beta_o}{2}$

Avec  $\beta_e$  et  $\beta_o$  les constantes de propagations du supermode respectivement pair et impair et  $\kappa$  la force de couplage entre les deux guides.

Trois conditions limites, illustrés en *Figure III-13*, apparaissent alors :

- $\delta < 0$  et  $|\delta| \gg |\kappa|$ : Le supermode pair est principalement confiné dans le guide 1 et inversement le supermode impair est principalement confiné dans le guide 2 (Figure III-13 a)).
- $\beta_2 = \beta_1$ : La puissance des deux supermodes est répartie de manière équivalente entre les deux guides : c'est l'accord de phase (Figure III-13 b)).
- $\delta > 0$  et  $\delta \gg |\kappa|$ : Le supermode pair est principalement confiné dans le guide 2 et inversement le supermode impair est principalement confiné dans le guide 1 (Figure III-13 c)).



**Figure III-13 : Schémas des cas limites de la répartition modale des supermodes pair et impair avec en a) le cas où le mode pair/impair est confiné dans le guide 1/2, en b) l'accord de phase et en c) le cas où le mode pair/impair est confiné dans le guide 2/1 [115].**

En tenant compte de ce phénomène, le but de l'épanouisseur dans la cavité laser est de transférer le supermode pair du guide III-V vers le guide SOI, à chaque extrémité de la cavité laser, en minimisant la fraction de puissance, nommée  $\varepsilon$ , couplée suivant le supermode impair non souhaité. Le supermode pair étant confiné dans le guide de plus fort indice et inversement pour le mode impair, il convient donc de faire varier les dimensions opto-géométriques de l'un des deux guides pour changer son indice effectif autour de sa valeur à l'accord de phase.

Afin de réaliser une transformation de mode la plus courte possible suivant l'axe de propagation de la lumière tout en conservant le maximum de puissance sur le supermode pair, la forme de l'épanouisseur est déterminée suivant le critère d'adiabaticité énoncé par Sun [117] :

$$\gamma = \frac{\delta(z)}{\kappa} = \tan[\arcsin(u)] \quad \text{Equation 3.18}$$

Où et  $u = 2\kappa\varepsilon^{1/2}(z - z_0)$

Avec  $\gamma$  le paramètre de disparité normalisé,  $z$  la position suivant l'axe de propagation et  $z_0$  la coordonnée suivant  $z$  correspondant à l'accord de phase, c'est-à-dire  $\gamma = 0$ . Cette formule est applicable lorsque  $\kappa$  peut être considéré comme constant.

Grâce à l'Equation 3.18, nous pouvons déduire que si  $(z - z_0)$  varie de  $-\frac{1}{2\kappa\varepsilon^{1/2}}$  à  $\frac{1}{2\kappa\varepsilon^{1/2}}$ , le paramètre  $\gamma$  varie de  $-\infty$  à  $+\infty$ . Dans ce cas, la puissance du supermode pair est totalement transférée d'un guide à l'autre. La longueur maximale d'un épanouisseur respectant ce critère d'adiabaticité est donc  $L_{max} = \frac{1}{\kappa\varepsilon^{1/2}}$ .

Notre objectif est donc d'exprimer ces différents paramètres en fonction de la structure étudiée afin de déterminer l'évolution de la forme de l'épanouisseur suivant l'axe de propagation de la lumière. Dans notre structure, le paramètre  $\delta(z)$  dépend des matériaux utilisés ainsi que des dimensions des guides tandis que le paramètre  $\kappa$  dépend de l'épaisseur d'oxyde séparant les deux guides.

Dans notre cas et compte tenu de l'empilement III-V, l'épaisseur du guide SOI nécessaire à l'apparition d'un accord de phase entre les deux guides est de 500 nm. Or, à une longueur d'onde d'opérabilité de 1310 nm, l'épaisseur du guide SOI doit être de 300 nm afin que celui-ci soit monomode. Un transformateur de mode est donc nécessaire en sortie de cavité pour coupler la lumière entre le guide SOI laser et le guide SOI monomode.

Pour une structure donnée, ce transfert de mode est ainsi réalisé en changeant les constantes de propagation des deux guides ou de l'un des guides par rapport à l'autre. Dans notre cas, les matériaux composant le guide III-V sont définis et optimisés pour maximiser le confinement modal dans les MQWs et laser à une longueur d'onde proche de 1310 nm (*Tableau III-1*). Les matériaux de l'empilement et leur indice de réfraction étant fixés, les paramètres géométriques d'ajustement sont soit l'épaisseur soit la largeur des guides. Les procédés de fabrication de la partie SOI par lithographie-gravure et de la partie III-V par épitaxie ne nous permettent pas de faire varier de manière simple l'épaisseur des différentes couches. Le seul paramètre géométrique libre est donc la largeur des guides. La gravure des matériaux III-V étant plus délicate que celle du silicium, le choix a été fait de ne pas faire varier la largeur du guide III-V.

Le guide SOI, représenté sur la *Figure III-11*, est de type guide arrête ou guide *rib*. Il est composé d'une partie dite *slab* de 10  $\mu\text{m}$  de large pour 350 nm d'épaisseur et d'une partie dite *rib* de 150 nm d'épaisseur. La variable d'ajustement choisie pour ce transfert de mode de manière adiabatique est la largeur du *rib* du guide de silicium suivant la direction de propagation de la lumière  $z$ . Cette évolution de largeur est réalisée sur une centaine de microns de long et a été étudiée de manière à être suffisamment robuste pour pallier aux variations opto-géométriques induites par la fabrication.

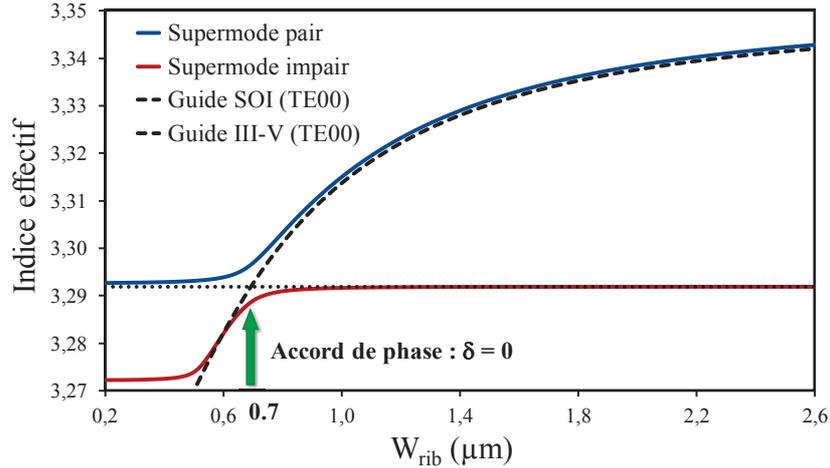
Ainsi, dans notre cas et compte tenu de l'empilement III-V, l'épaisseur du guide SOI nécessaire à l'apparition d'un accord de phase entre les deux guides est de 500 nm. Or, à une longueur d'onde d'opérabilité de 1310 nm, l'épaisseur du guide SOI doit être de 300 nm afin que celui-ci soit monomode. Une solution à ce problème sera discutée plus loin dans ce chapitre.

### 3.3.2 Calcul du profil de l'épanouisseur

Comme nous l'avons vu précédemment, la conception des épanouisseurs repose sur la connaissance des constantes de propagation des modes fondamentaux locaux des deux guides et ainsi que celles des supermodes pair et impair de la structure complète. La principale différence avec la configuration développée par H. Duprez, et dite Front-Side, est le fait que le couplage de lumière est réalisé par le *slab* et non plus par le *rib* du guide SOI. Ainsi, pour une épaisseur de  $\text{SiO}_2$  entre le guide III-V et le guide SOI donnée, une constante de couplage plus forte peut être atteinte en configuration Back-Side plutôt qu'en Front-Side.

Une série de simulations par la méthode des éléments finis (*Finite Element Method* ou FEM), grâce au module FemSIM de la suite de logiciel RSoft, a été réalisée pour déterminer les indices effectifs associés aux différents modes optiques en fonction de la variation de la largeur du *rib*,  $W_{rib}$ .

La *Figure III-14* présente les résultats de ces simulations dans le cas d'une épaisseur de SiO<sub>2</sub> de 140 nm entre le III-V et le guide SOI. Pour une largeur de *rib* de 700 nm, les deux guides d'onde possèdent des constantes de propagation égales et sont donc en accord de phase. La répartition des supermodes est telle que la moitié de la lumière est positionnée dans le III-V et l'autre dans le guide SOI. Pour une valeur de largeur de *rib* en deçà de l'accord de phase, le supermode pair est situé dans le III-V et le supermode impair dans le guide SOI. L'inverse se produit pour une largeur de *rib* placée bien au-delà.



**Figure III-14 : Variation de l'indice effectif des supermodes pair et impair et des modes locaux des guides SOI et III-V en fonction de la largeur du *rib*.**

Sur cette figure, nous remarquons que le supermode pair ne correspond pas exactement au mode fondamental local du guide silicium au-delà de l'accord de phase. Cet écart prouve que l'hypothèse du couplage faible utilisée pour obtenir les supermodes atteint ses limites lorsque l'épaisseur de SiO<sub>2</sub> entre les guides est trop faible et donc que la force de couplage est élevée.

Grâce à ces résultats, nous pouvons exprimer  $\delta$  la différence entre les constantes de propagation des deux modes locaux fondamentaux en fonction de  $W_{rib}$ .

De plus, d'après la théorie explicitée par Sun, pour le point particulier de l'accord de phase, nous pouvons remonter à la valeur de la force de couplage  $\kappa_{(\delta=0)}$  qui est la différence entre les constantes de propagation des deux supermodes en ce point [118]. Dans notre cas, pour une épaisseur d'oxyde de 140 nm,  $\kappa = 190 \text{ cm}^{-1}$ . En approximation, nous considérons que  $\kappa$  est constant sur la plage de largeurs de *rib* concernée et égal à celui calculé à l'accord de phase. Cette approximation n'est pas rigoureusement exacte car, comme nous l'avons vu, les limites de la théorie du couplage faible sont atteintes en raison d'une force de couplage trop élevée. Afin de pallier ce problème, un facteur correctif  $K$  est appliqué à  $\kappa$  :  $\kappa' = K\kappa$  avec  $K \in \mathbb{Q}_+^*$ .

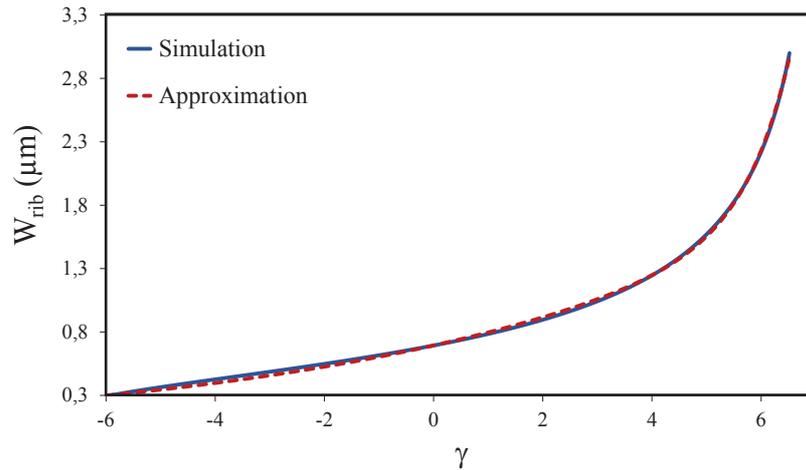
Afin de pouvoir déterminer la forme à donner à l'épanouisseur adiabatique, il nous faut une relation entre la largeur du *rib* du guide SOI et la direction de propagation de la lumière  $z$  :  $W_{rib} = f(z)$ .

Or nous avons  $\gamma = \frac{\delta(W_{rib})}{\kappa'_{(\delta=0)}}$ , et grâce à l'Equation 3.18, nous pouvons exprimer  $\gamma$  en fonction de  $z$ . L'objectif est donc de déterminer l'équation d'une courbe telle que  $W_{rib} = g(\gamma)$ . Pour cela, nous avons utilisé une équation de la forme suivante :

$$W_{rib} = g(\gamma) = y_0 + A_1 \exp\left(\frac{\gamma - x_0}{t_1}\right) + A_2 \exp\left(\frac{\gamma - x_0}{t_2}\right) \quad \text{Equation 3.19}$$

Avec  $x_0, y_0, t_1, t_2, A_1, A_2$  des constantes à déterminer.

Les résultats des simulations de la courbe inverse de  $\gamma = \frac{\delta(W_{rib})}{\kappa'(\delta=0)}$  et de l'Equation 3.19 sont illustrés en Figure III-15. La courbe d'approximation correspond presque parfaitement à celle obtenue grâce aux simulations. L'utilisation d'une fonction, du logiciel *Origin*, ajoutant une courbe de tendance à partir d'une équation donnée nous permet d'exprimer les constantes de l'Equation 3.19.



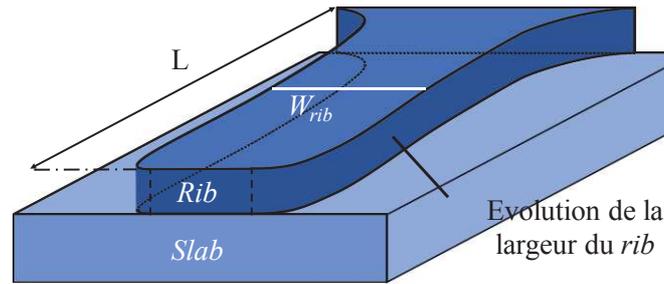
**Figure III-15 : Evolution de la largeur du rib en fonction de la constante de couplage normée.**

Nous utilisons alors l'Equation 3.18 pour obtenir une variation de la largeur de rib en fonction de la direction de propagation permettant un couplage adiabatique entre les deux guides. Nous pouvons alors exprimer  $W_{rib}$  en fonction de  $z$  :

$$W_{rib}(z) = y_0 + A_1 \exp\left(\frac{\tan\left(\arcsin\left(2\kappa\varepsilon^{1/2}(z - z_0)\right)\right) - x_0}{t_1}\right) + A_2 \exp\left(\frac{\tan\left(\arcsin\left(2\kappa\varepsilon^{1/2}(z - z_0)\right)\right) - x_0}{t_2}\right) \quad \text{Equation 3.20}$$

Arbitrairement, nous choisissons  $z_0$  comme étant le point à la moitié de la longueur de l'épanouisseur.

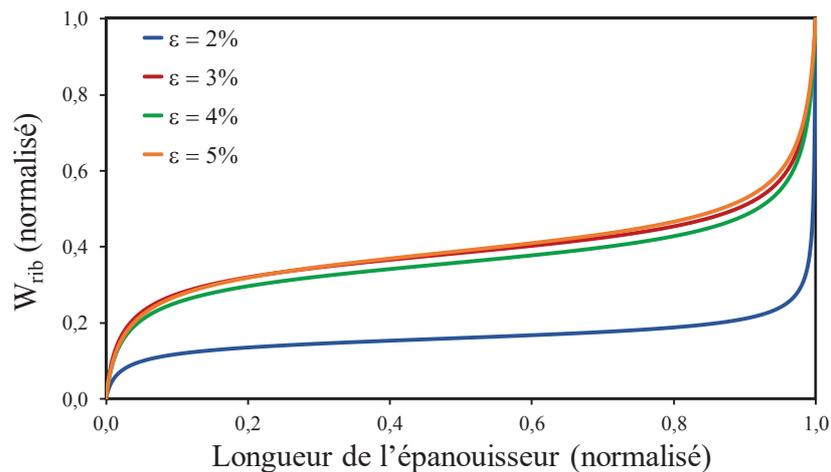
Cette équation nous permet de définir l'évolution de la largeur du rib en fonction de l'axe de propagation de la lumière et donc la forme de l'épanouisseur. Un exemple d'un tel épanouisseur est montré en Figure III-16. Comme nous pouvons le voir sur cette figure, la forme du rib obtenue est de type évasé.



**Figure III-16 : Schéma de la partie SOI d'un épanouisseur.**

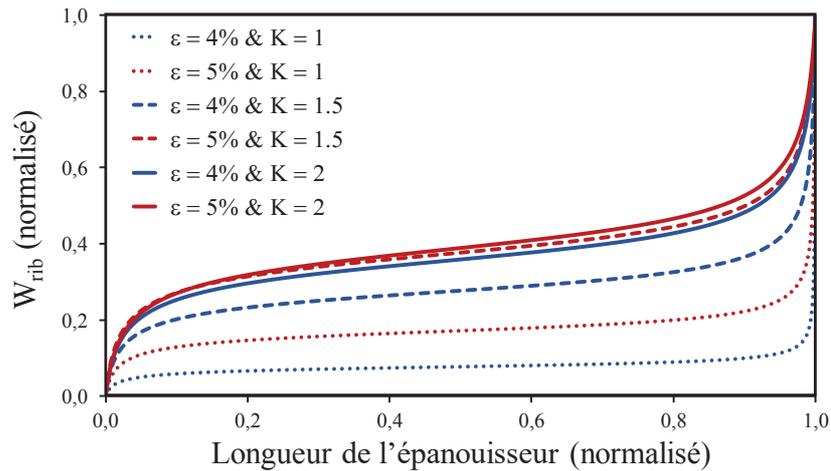
L'objectif est alors de déterminer l'évolution de la forme de l'épanouisseur la moins abrupte et susceptible de transférer la plus grande majorité du mode optique entre les deux guides. Pour cela, nous jouons sur les deux paramètres :

- Le pourcentage de puissance lumineuse  $\varepsilon$  couplée sur le mode impair (*Figure III-17*). Plus cette valeur est élevée, plus le terme de perte associé est important. Typiquement nous choisissons des valeurs inférieures à 5 %. Cette valeur ne peut pas être nulle. Nous remarquons sur la *Figure III-17* que pour une valeur faible de  $\varepsilon$ , le profil de l'épanouisseur est plus abrupt et est donc susceptible de souffrir de plus de pertes.



**Figure III-17 : Variation de la largeur du rib en fonction de la longueur de l'épanouisseur pour plusieurs profils dépendants du pourcentage de puissance couplée suivant le mode impair.**

- Le coefficient positif  $K$  devant  $\kappa$  (*Figure III-18*). Typiquement, nous avons utilisé les valeurs 1, 1,5 et 2 comme coefficients de pondération  $K$ . Nous remarquons, sur la *Figure III-18*, que plus le facteur correctif devant  $\kappa$  est faible et plus le profil de l'épanouisseur est abrupt, nuisant potentiellement à son efficacité.

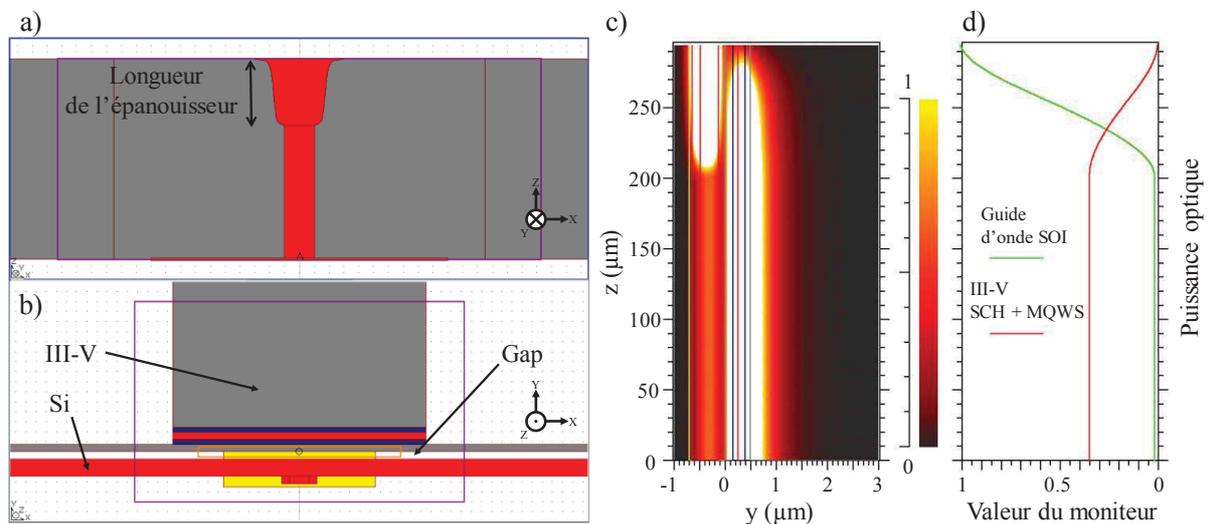


**Figure III-18 : Variation de la largeur du *rib* en fonction de la longueur de l'épanouisseur pour plusieurs profils dépendants d'un facteur correctif  $K$  de la force de couplage  $\kappa$ .**

L'étape suivant la définition de la forme de l'épanouisseur est la détermination de paramètres tels que sa longueur ou ses largeurs d'entrée et de sortie.

### 3.3.3 Vérifications numériques de l'efficacité de l'épanouisseur

La validation des paramètres et caractéristiques d'un épanouisseur a été faite à l'aide de calculs numériques basés sur la méthode de propagation des faisceaux 3D ou BPM (Beam Propagation Method). Cette méthode de calcul permet d'étudier les variations de champs électriques dans le sens de propagation en partant d'une répartition de champ entrant donné. Un exemple de l'interface de construction de la structure et des résultats de simulations BPM est donné en *Figure III-19*.

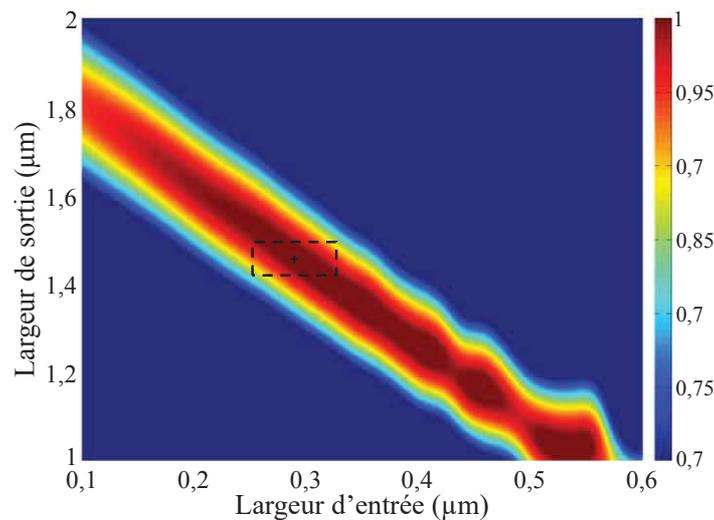


**Figure III-19 : Interfaces du Simulateur RSoft avec en a) et b) les vues respectivement de dessus et en coupe de l'interface de construction (CAD), en c) le profil longitudinal de la répartition de puissance du mode optique et en d) la valeur de cette puissance dans chacun de deux guides.**

A partir du profil de l'évolution de la largeur du *rib* en fonction de la direction de propagation, nous fixons arbitrairement une longueur de l'épanouisseur, typiquement 100  $\mu\text{m}$  et nous recherchons les paramètres de largeur de *rib* d'entrée et de sortie optimaux.

Pour cela, nous faisons varier la largeur d'entrée, appelée  $W_{in}$ , et la largeur de sortie, appelée  $W_{out}$ , entre des valeurs respectivement inférieures et supérieures à celle de l'accord de phase et nous déterminons l'efficacité de couplage associée à un couple de valeurs. Une cartographie des résultats nous permet de choisir les paramètres optimaux pour chaque épanouisseur. Un exemple de cartographie est présenté en *Figure III-20*.

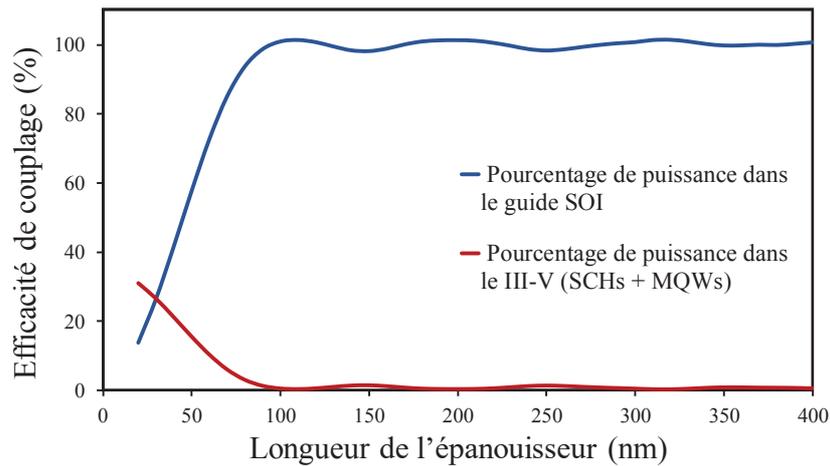
Afin de pallier les variabilités du processus de fabrication, les valeurs de  $W_{in}$  et de  $W_{out}$  sont sélectionnées de telle manière qu'un écart de  $\pm 30$  nm ne détériore pas l'efficacité de couplage de plus de 10 %. Compte tenu des contraintes de fabrication, nous n'avons pas envisagé de largeur d'entrée inférieure à 200 nm.



**Figure III-20 : Cartographie de simulations montrant l'efficacité de couplage d'un transformateur de modes selon ses largeurs d'entrée et de sortie.**

Enfin, nous vérifions le caractère adiabatique de l'épanouisseur en simulant son efficacité de couplage en fonction de sa longueur pour le couple  $W_{in} / W_{out}$  optimal. En effet, l'un des avantages du critère adiabatique du couplage est que contrairement au couplage directionnel, lorsque la longueur de couplage est atteinte, le champ électrique ne peut plus se découpler. Ainsi, l'efficacité de couplage ne doit plus changer une fois cette longueur atteinte. La présence d'oscillations pour certains épanouisseurs confirme que nous sommes aux limites de l'hypothèse du couplage faible.

Un exemple de l'efficacité d'un épanouisseur en fonction de sa longueur est donné en *Figure III-21* et indique le pourcentage de puissance lumineuse contenu dans le guide d'onde SOI et dans l'empilement des SCH et des MQWs. Les oscillations présentes dans cette figure sont suffisamment petites pour valider le critère d'adiabaticité de notre épanouisseur. Celles-ci sont essentiellement dues à la fraction de puissance couplée sur le mode impair.



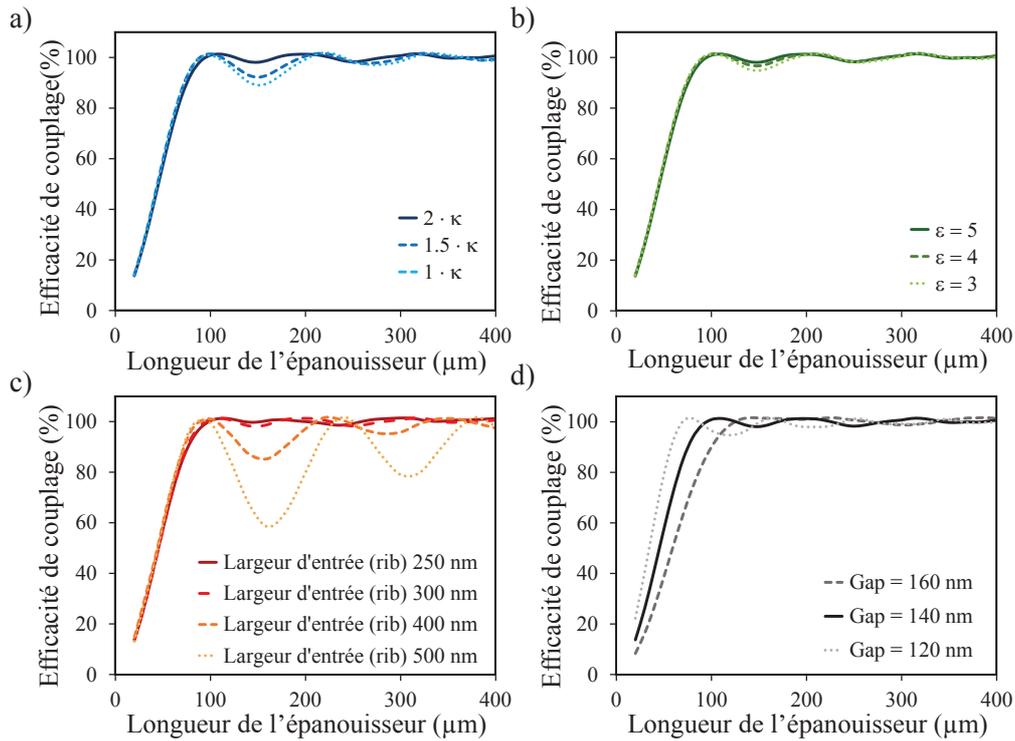
**Figure III-21 : Simulations montrant la robustesse en termes d'efficacité de couplage d'un transformateur de modes selon sa longueur.**

Ce type de simulations est réalisé sur un large panel d'épanouisseurs dont nous avons changé les variables influençant la définition du profil telles que le facteur correction de la force de couplage  $K$ , la fraction de puissance couplée suivant le mode impair  $\varepsilon$ , le couple  $W_{in} / W_{out}$  en fixant la largeur d'entrée ou encore l'épaisseur de collage de  $\text{SiO}_2$ .

Les résultats de ces simulations sont donnés en *Figure III-22* suivant ces divers paramètres. Les simulations exposées en *Figure III-22 a)* prouvent que l'utilisation d'un facteur correctif pour la force de couplage permet de ne pas la sous-estimer et donc d'obtenir des formes d'épanouisseur mieux adaptées.

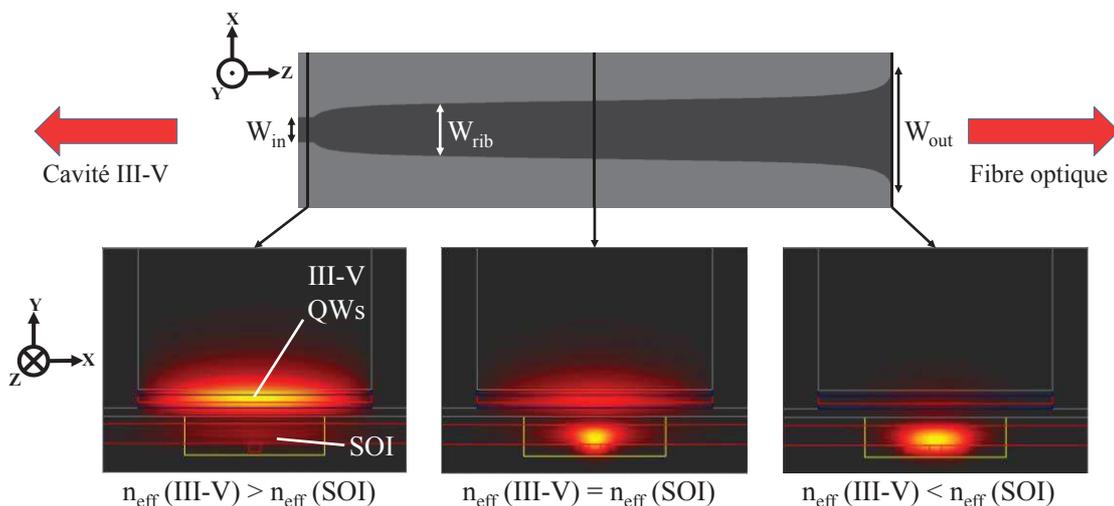
En *Figure III-22 b)*, nous observons que le paramètre  $\varepsilon$  n'influence que peu le critère d'adiabaticité contrairement à la largeur d'entrée dont les résultats sont montrés en *Figure III-22 c)*. En effet, plus cette largeur d'entrée se rapproche de la valeur de celle de l'accord de phase, et plus nous avons un épanouisseur présentant un fonctionnement de type coupleur directionnel. Pour le bon fonctionnement du laser, il convient de choisir une largeur de *rib* sous la zone de gain qui soit la plus faible possible. Ce choix a pour but de maximiser le pourcentage de puissance lumineuse couplée dans le III-V et de s'éloigner au maximum d'un régime de fonctionnement de type coupleur directionnel.

Enfin, les résultats liés à l'épaisseur de collage sont présentés en *Figure III-22 d)*. Nous remarquons que plus l'épaisseur de collage est faible plus les oscillations sont importantes mais la longueur de couplage est courte. En effet, la force de couplage augmente d'autant plus que cette épaisseur diminue. Pour une valeur trop faible, les hypothèses de calculs de l'épanouisseur utilisées ne sont plus valables : nous sommes en couplage fort.



**Figure III-22 : Simulations montrant la robustesse en termes d'efficacité de couplage d'un épanouisseur donné selon sa longueur en fonction en a) du coefficient correcteur  $\kappa$ , en b) du facteur  $\epsilon$ , en c) de la largeur d'entrée et en d) de l'épaisseur du gap de  $\text{SiO}_2$ .**

Suite au dimensionnement d'un épanouisseur, nous vérifions la répartition du champ entre les deux guides pour différentes coupes, à l'entrée, à la sortie et au centre de l'épanouisseur par exemple, grâce à des nouvelles simulations FEM. Un exemple de résultats obtenus est montré en *Figure III-23*.

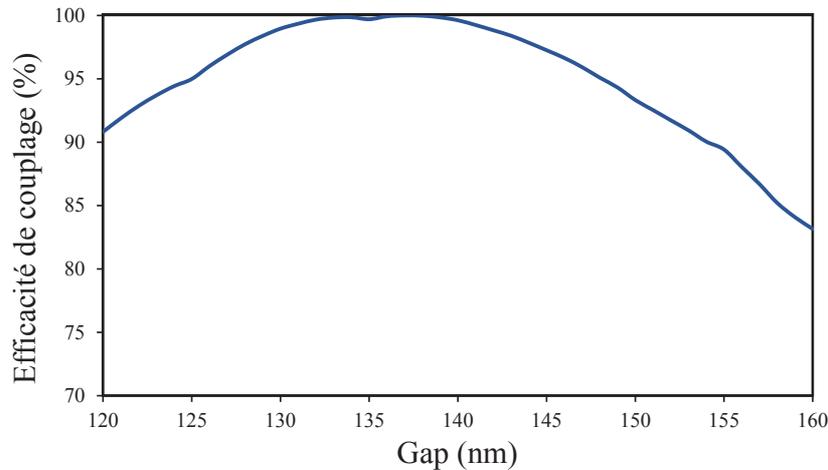


**Figure III-23 : Vue du dessus d'un épanouisseur adiabatique et vues en coupes pour différentes largeurs de l'arête du guide silicium.**

Grâce à cet épanouisseur structuré dans le SOI, nous sommes théoriquement capables de transférer près de 95 % du mode lumineux entre le guide III-V et le guide SOI.

Les performances d'un épanouisseur dimensionné pour une épaisseur de collage donné ont été simulées pour plusieurs épaisseur de  $\text{SiO}_2$  afin de vérifier qu'une variation due au processus de

fabrication, typiquement de  $\pm 15$  nm, ne les dégradait pas significativement. Les résultats obtenus pour un épanouisseur optimisé avec une épaisseur de silice de 140 nm sont donnés en *Figure III-24*.



**Figure III-24 : Graphe de l'évolution de l'efficacité de couplage d'un épanouisseur adiabatique en fonction de l'épaisseur de SiO<sub>2</sub> entre le guide SOI et le guide III-V.**

L'efficacité de couplage du dispositif reste supérieure à 90 % pour une épaisseur de SiO<sub>2</sub> variant de  $\pm 15$  nm autour de la valeur de 140 nm. Le léger décalage de la valeur optimale pour l'épaisseur est dû au fait que pour une épaisseur de 140 nm de SiO<sub>2</sub>, la longueur de couplage optimale de l'épanouisseur est d'environ 110  $\mu\text{m}$  et que notre épanouisseur n'en fait que 100.

Enfin, de manière à s'affranchir au maximum des parasites pouvant être engendrés par le couplage d'une partie de la puissance lumineuse suivant le mode impair, chaque extrémité du guide III-V est implantée par des ions H<sup>+</sup> et non-contactée sur une longueur de 10  $\mu\text{m}$  créant ainsi une zone d'absorption. En effet, en fin d'épanouisseur adiabatique, le mode impair est principalement confiné dans le III-V. Il est donc susceptible d'être réfléchi sur les miroirs créés par gravure aux extrémités du guide. Un effet Fabry-Pérot pourrait alors venir perturber le bon fonctionnement du laser.

En sortie de l'épanouisseur adiabatique, un épanouisseur de 60  $\mu\text{m}$  de long permet d'élargir le *rib* du guide SOI jusqu'à 3  $\mu\text{m}$  à partir de la largeur  $W_{out}$ . Vient alors une section de guide droit dans lequel les miroirs de Bragg sont structurés.

### III.4 LE MIROIR DE BRAGG

Structurés dans le guide silicium de part et d'autre de la zone active, les miroirs de Bragg ont pour fonction de réfléchir la lumière sur une gamme de longueur d'onde restreinte. La cavité laser nécessite un miroir entièrement réfléchissant d'un côté et partiellement de l'autre afin de disposer de suffisamment de photons dans la cavité pour créer l'émission stimulée tout en émettant un signal lumineux à l'extérieur de la cavité.

Ces miroirs sont créés dans le guide *rib* laser grâce à une alternance de lignes et d'espaces, c'est-à-dire de zones gravées et de zones non gravées, dans le guide silicium. Dans notre cas, le pourcentage de la ligne par rapport à l'espace sur une période, également appelé le facteur de remplissage, est de 50

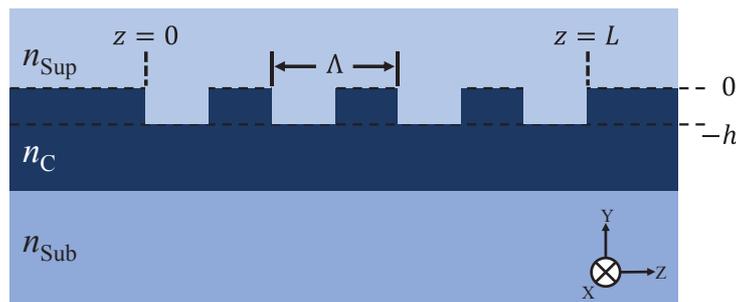
%. Deux facteurs sont particulièrement importants pour ce type de miroirs : La période de cette alternance  $a$  et la longueur du miroir.

### 3.4.1 Principe et rappels théoriques sur une structure de Bragg en réflexion

L'approche abordée dans le Chapitre II est une description qualitative des phénomènes pouvant avoir lieu lorsqu'une onde optique interagit avec une structure de Bragg. Elle permet de déterminer si un réseau donné agit en diffraction ou en réflexion et donne une bonne approximation des pics de longueurs d'onde ainsi que des directions angulaires des différents ordres de diffraction.

En revanche, elle ne tient compte ni de la forme du réseau ni du confinement de l'onde dans le guide et le réseau et ne permet ainsi pas de déterminer le comportement spectral de la structure de Bragg. Dans le cadre d'un réseau homogène introduisant des discontinuités d'indices peu importantes, l'utilisation d'un modèle basé sur des modes couplés associés à une faible perturbation permet de déterminer cette caractéristique. Dans notre cas, le réseau est faiblement gravé dans le guide SOI. Ce formalisme est donc applicable.

Pour notre application, nous considérons que nous sommes dans une structure monomode dont la longueur  $L$  du réseau est considérée comme très grande vis-à-vis de sa période (*Figure III-25*).



**Figure III-25 : Guide de Bragg monomode uniforme de forme créneau**

Pour rappel, l'amplitude du champ électrique d'un mode guidé est décrite par :

$$E(x, y, z) = A_0 \psi(x, y) \exp(-j\beta z) \quad \text{Equation 3.21}$$

Avec  $A_0$  le terme de l'amplitude initiale de l'onde,  $\psi(x, y)$  la distribution spatiale du mode et  $\exp(-j\beta z)$  le terme de phase. Nous pouvons normaliser la distribution spatiale telle que  $\iint_{-\infty}^{+\infty} |\psi(x, y)|^2 dx dy = 1$ .

Dans le cas d'un régime de faible perturbation de modes couplés, la variation de l'amplitude du mode guidé est considérée comme suffisamment lente pour que la distribution spatiale et le terme de phase ne soient pas perturbés.

D'après la théorie exposée par Yariv et Nakamura [119], seuls un mode fondamental propagatif et un mode fondamental contrapropagatif, ayant la même constante de propagation  $\beta_g = -\beta_{-g}$ , au signe près, peuvent exister dans ce type de structure.

Au voisinage de la longueur d'onde de Bragg, l'amplitude du mode propagatif  $A^{(+)}(z)$  est progressivement transférée à celle du mode contrapropagatif  $A^{(-)}(z)$  à mesure du parcours de l'onde dans le réseau. D'après la loi de Bragg décrite dans le Chapitre II, la période du réseau est alors telle

que  $\frac{2m\pi}{\Lambda} + \beta_g = \frac{2m\pi}{\Lambda} - \beta_{-g} \approx \beta_g$ . La réflectivité est maximale à la longueur d'onde de Bragg  $\lambda_{Bragg} = \frac{2}{m} \Lambda n_{eff}$ .

En posant  $\delta k = \beta_g - \frac{m\pi}{\Lambda}$ , nous avons, d'après [119], le système d'équations couplées suivant :

$$\begin{cases} \frac{dA^{(+)}(z)}{dz} = -j\kappa A^{(-)}(z) \exp[j2\delta kz] \\ \frac{dA^{(-)}(z)}{dz} = j\kappa A^{(+)}(z) \exp[-j2\delta kz] \end{cases} \quad \text{Equation 3.22}$$

Où, dans le cas d'un mode TE :

$$\kappa = \frac{\Delta n^2}{q\lambda n_{eff}} \int_{y=-h}^{y=0} |E_x(y)|^2 dy \quad \text{Equation 3.23}$$

Qui est le coefficient de couplage sur l'harmonique  $m$  du réseau de Bragg. Avec  $\Delta n^2 = n_c^2 - n_{sup}^2$  et  $q$  l'ordre de réflexion du réseau. Il faut noter qu'il n'existe pas d'ordre de réflexion  $q$  pair dans cette structure.

Le développement des équations de couplage de l'Equation 3.22 donne un système à deux équations différentielles du second ordre dont la résolution aboutit à l'expression des amplitudes incidente et réfléchie suivante :

$$\begin{cases} A^{(+)}(z) = \frac{\gamma \cosh[\gamma(L-z)] - \delta k \sinh[\gamma(L-z)]}{\gamma \cosh[\gamma(L-z)] - j\delta k} \delta k \sinh[\gamma(L-z)] \exp[-j\delta kz] \\ A^{(-)}(z) = \frac{j\kappa \sinh[\gamma(L-z)]}{\gamma \cosh[\gamma(L-z)] - j\delta k \sinh(\gamma L)} \exp[j\delta kz] \end{cases} \quad \text{Equation 3.24}$$

Où l'on pose  $\gamma^2 = \kappa^2 - \delta k^2$

Dans le cadre de notre application, la grandeur nous intéressant est le spectre de réflexion  $R(\lambda)$  du réseau de Bragg :

$$R(\lambda) = \frac{|A^{(-)}(0)|^2}{|A^{(+)}(0)|^2} \quad \text{Equation 3.25}$$

Nous remarquons que la « bande interdite » du réseau correspond au domaine de longueur d'onde tel que  $-\kappa < \delta k < \kappa$ . A  $\lambda_{Bragg}$ , nous avons  $\delta k = 0$ . D'après l'Equation 3.25, la réflexion est alors :

$$R(\lambda_{Bragg}) = \tanh^2(\kappa L) \quad \text{Equation 3.26}$$

Enfin, la longueur effective  $L_{eff}$  du miroir est telle que :

$$L_{eff} = \frac{1}{2\kappa} \tanh(\kappa L) \quad \text{Equation 3.27}$$

Pour obtenir un réseau très sélectif, il faut une perturbation très faible ainsi qu'une grande longueur. Un compromis doit donc être réalisé entre longueur de réseau et sélectivité.

### 3.4.2 Influence de la forme du guide d'onde

Compte tenu de ces caractéristiques, une étude est nécessaire afin de déterminer les paramètres du réseau de Bragg les mieux adaptés à la cavité laser que nous dimensionnons.

La constante de couplage  $\kappa$ , en  $\text{cm}^{-1}$ , dépendant directement des indices effectifs des lignes et espaces du guide d'onde, il convient donc tout d'abord de fixer sa forme. Comme nous l'avons vu précédemment, il existe deux types de guides d'onde : les guides *strip* et les guides *rib*. Dans le cas d'un guide *rib*, plus la largeur du *rib* est importante et plus grande est la constante de couplage jusqu'à atteindre un maximum pour un guide *strip*. L'Equation 3.27 nous montre que plus  $\kappa$  est grand, plus la longueur effective du miroir de Bragg est faible. En revanche, la transition entre le guide silicium *rib* en sortie d'épanouisseur et le guide silicium dans lequel est structuré le réseau doit être, à efficacité égale, d'autant plus longue que la largeur du *rib* de ce dernier est grande. Ceci entraîne un allongement de cavité laser et donc un plus grand nombre de modes remplissant la condition de phase. Un compromis doit donc être trouvé. Des études précédentes ont montré qu'à partir d'une certaine largeur de *rib*, la différence entre la constante de couplage d'un guide *strip* et celle d'un guide *rib* devient négligeable [2]. Dans leur cas, le réseau est structuré sur la partie *rib* du guide, d'épaisseur 200 nm, et cette largeur critique est de 3  $\mu\text{m}$ .

Les changements apportés par l'intégration Back-Side permettent de structurer le réseau de Bragg sur la partie *slab* du guide silicium et donc de profiter d'une constante de couplage potentiellement supérieure pour une même largeur de *rib*. Dans notre cas, le *rib* a une épaisseur de 150 nm et le *slab* une épaisseur de 350 nm. Des simulations FEM ont été réalisées afin de valider l'utilisation d'un guide *rib* par rapport à un guide *strip*. Un exemple des résultats obtenus est montré en Figure III-26. La Figure III-26 a) donne l'indice effectif d'un guide *rib* dont les épaisseurs du *rib* et du *slab* sont respectivement de 150 nm et 350 nm pour des largeurs de respectivement 3  $\mu\text{m}$  et 10  $\mu\text{m}$ . La Figure III-26 b) donne l'indice effectif d'un guide *strip* de 500 nm d'épaisseur et de 10  $\mu\text{m}$  de large.

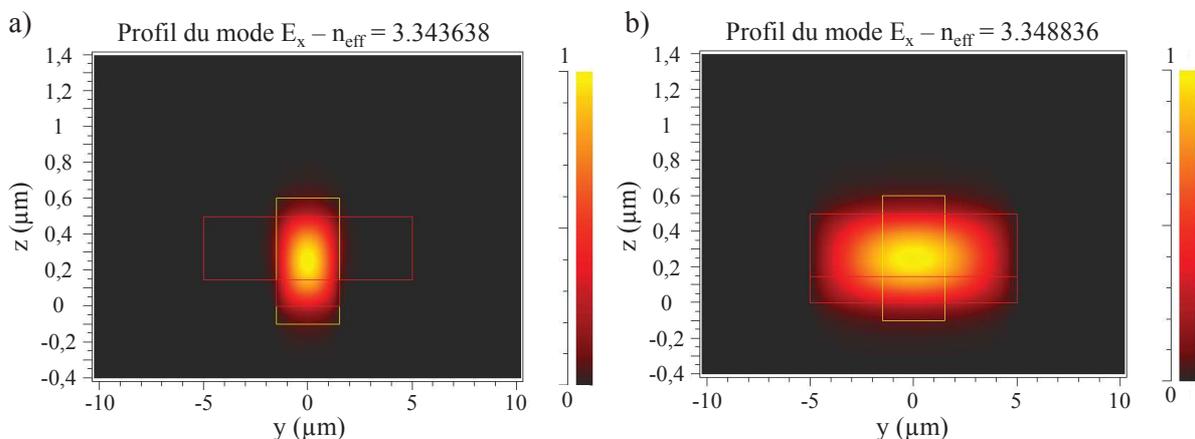


Figure III-26 : Profils de champs  $E_x$  du mode fondamental obtenus par FEMSIM avec en a) un guide *rib* et en b) un guide *strip*.

Les constantes de couplage  $\kappa$  calculées pour ces deux guides dont le réseau est structuré sur le *slab* sont respectivement de  $79,5 \text{ cm}^{-1}$  et  $78,8 \text{ cm}^{-1}$ . Nous pouvons donc considérer que, sous certaines conditions, l'utilisation d'un guide *rib* est semblable à celle d'un guide *strip* pour cette application.

La structure étudiée est donc celle d'un guide *rib* de dimensions :

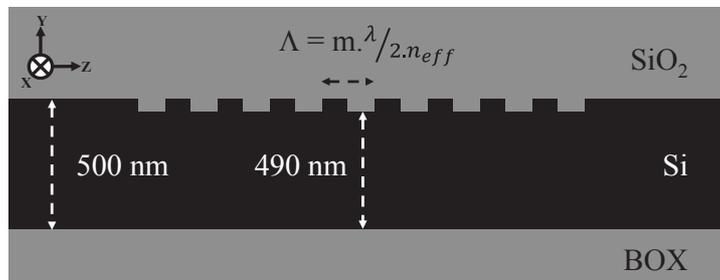
- *Rib* : 150 nm d'épaisseur pour 3  $\mu\text{m}$  de largeur
- *Slab* : 350 nm d'épaisseur pour 10  $\mu\text{m}$  de largeur

Le réseau a un facteur de remplissage de 50 %. La gravure du réseau est réalisée sur la partie *slab* du guide.

### 3.4.3 Influence de la période du réseau de Bragg

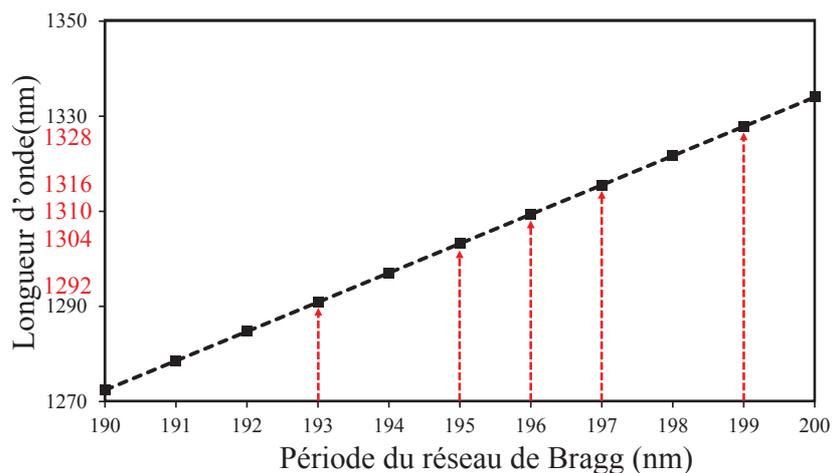
D'après la loi de Bragg énoncée dans le Chapitre II, pour une structure donnée, la période  $\Lambda$  du réseau de Bragg détermine la longueur d'onde centrale de réflexion du miroir pour le premier ordre.

La Figure III-27 nous montre un schéma en coupe longitudinale du miroir de Bragg considéré.



**Figure III-27 : Schéma d'une coupe longitudinale d'un miroir de Bragg structuré dans un guide SOI.**

Nous avons réalisé une série de simulations avec le module *Grating Mode* de la suite RSoft afin de déterminer l'évolution de la longueur d'onde centrale du miroir en fonction de la période. Les résultats obtenus sont une droite de coefficient directeur  $\Delta\lambda/\Delta\Lambda$  d'environ 6 nm / nm (Figure III-28).



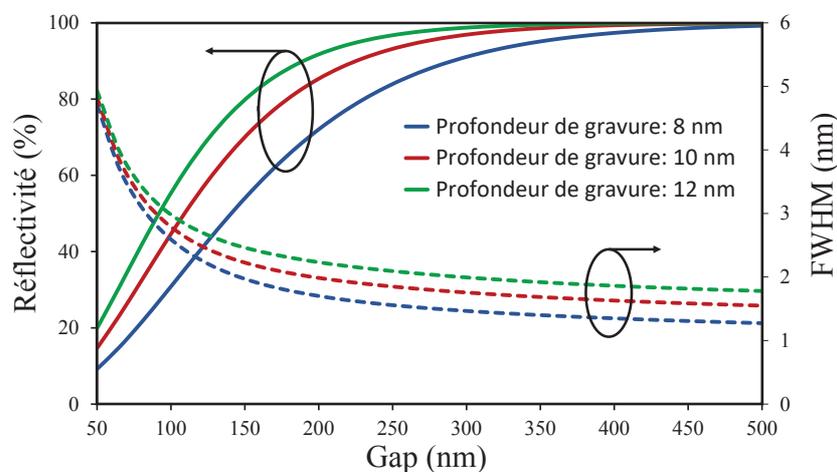
**Figure III-28 : Evolution de la longueur d'onde centrale de réflectivité d'un miroir de Bragg en fonction de sa période.**

Nous avons sélectionné plusieurs périodes afin d'obtenir des émissions lasers à plusieurs longueurs d'onde. Les cinq périodes retenues sont 193 nm, 195 nm, 196 nm, 197 nm et 199 nm pour des longueurs d'onde centrale de réflectivité de respectivement 1292 nm, 1304 nm, 1310 nm, 1316 nm et 1328 nm.

La sélection de ces cinq périodes permet de pallier d'éventuelles variations dans le procédé de fabrication qui pourrait affecter l'indice effectif moyen de la structure.

#### 3.4.4 Influence de l'épaisseur de gravure et de la longueur du réseau de Bragg

Nous avons étudié l'influence de la longueur du miroir sur la réflectivité et sur la sélectivité, avec l'expression de la largeur à mi-hauteur ou FWHM (*Full Width at Half Maximum*), pour différentes épaisseurs de gravure. La *Figure III-29* montre le résultat des simulations pour des gravures de 8 nm, 10 nm et 12 nm.



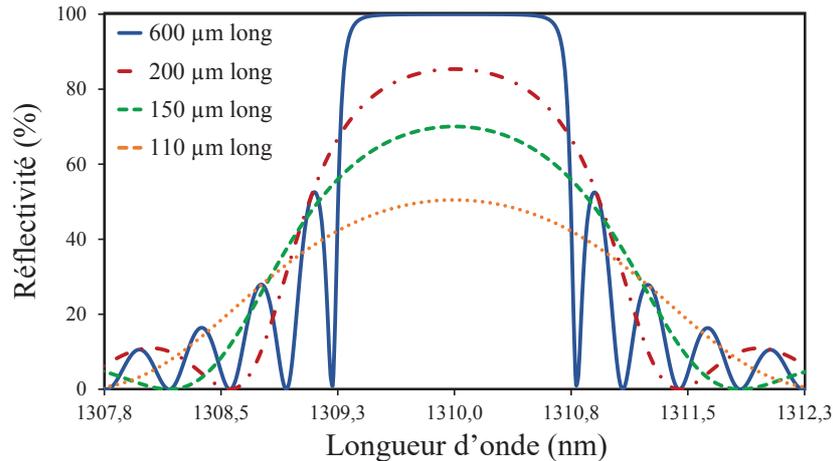
**Figure III-29 : Réflectivité et de la sélectivité (FWHM) d'un miroir de Bragg en fonction de sa longueur pour plusieurs épaisseurs de gravures différentes.**

Sur cette figure, nous remarquons que l'épaisseur de gravure est un paramètre critique pour la réflectivité. Un écart de 4 nm peut entraîner une différence de réflectivité de près de 25 % pour une longueur de miroir de 170 nm. C'est donc un paramètre sensible qu'il faut absolument contrôler lors de la fabrication du composant. Plus le réseau est gravé profondément et plus la réflectivité du réseau est grande à une longueur donnée. Ceci s'explique par le fait que l'écart d'indice effectif entre les lignes et les espaces du réseau augmente et donc que la constante de couplage augmente.

En revanche, la sélectivité du réseau diminue. Il y a donc un compromis à faire entre longueur de réflectivité et sélectivité du réseau. D'une part, plus notre miroir est long, plus sa longueur effective de réflexion et donc celle de la cavité laser est importante. Comme nous l'avons vu précédemment, le FSR diminue alors et donc le nombre de fréquences respectant la condition de phase de la cavité augmente dès lors. D'autre part, moins le miroir est sélectif et plus le nombre de fréquences pouvant y être réfléchies est important.

Dans ces deux configurations, nous risquons d'obtenir un laser multi-longueurs d'onde. En conséquence, pour notre cavité laser, nous avons choisi une épaisseur de gravure du réseau de 10 nm.

Pour un couple de période et de profondeur de gravure donné, la longueur du réseau de Bragg détermine le pourcentage de lumière réfléchi par le miroir et sa sélectivité. (*Figure III-30*).



**Figure III-30 : Réflectivité d'un miroir de Bragg en fonction de la longueur d'onde pour plusieurs longueurs différentes.**

Dans cet exemple, à 1310 nm pour une période de 196 nm, nous avons une réflectivité totale pour une longueur de miroir de 600 µm. Une réflectivité de 50 % peut être obtenue pour une longueur de 110 µm.

Une longueur de 600 µm a été retenue pour le miroir entièrement réflecteur afin de pallier toute éventualité de variation dans le procédé de fabrication. Trois longueurs différentes ont été sélectionnées pour le miroir partiellement réfléchissant : 110 µm, 150 µm et 200 µm pour respectivement 50 %, 70 % et 85 % de réflectivité.

En sortie du miroir partiel, la lumière émise par la cavité laser est confinée dans un guide d'onde de 500 nm d'épaisseur. Or, les autres dispositifs de la puce photonique sont développés pour opérer avec une épaisseur de SOI de 300 nm. Un transformateur de mode est donc utilisé afin de transférer la lumière du guide laser vers un guide d'onde monomode.

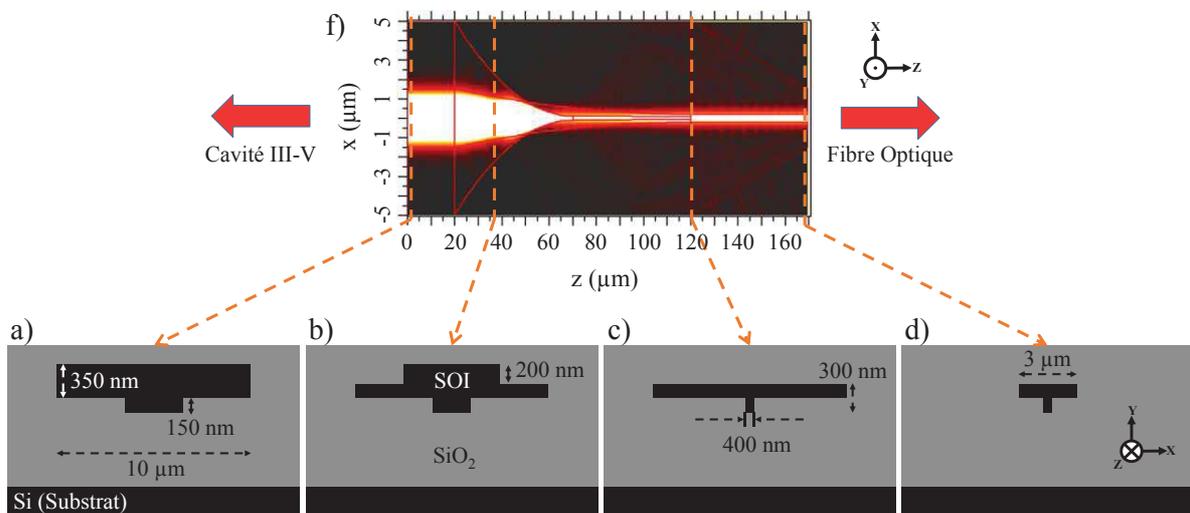
## III.5 LE TRANSFORMATEUR DE MODE : GUIDE LASER / GUIDE D'ONDE

### 3.5.1 Dimensionnement du transformateur de mode

Comme nous avons vu dans le paragraphe 3.2.1, l'épaisseur de SOI nécessaire au transfert de la lumière entre le guide III-V et le guide d'onde et à la réalisation des miroirs de Bragg est de 500 nm. En revanche, l'épaisseur de SOI utilisée lors du développement des autres composants, actifs et passifs, n'est que de 300 nm, pour obtenir des guides d'onde monomodes à la longueur d'onde considérée de 1310 nm. De plus, les miroirs de Bragg sont structurés dans un guide *rib* avec un *slab* de 10 µm de large et un *rib* de 3 µm de large tandis qu'un guide monomode à 1310 nm est un guide *rib* de respectivement 3 µm et 400 nm de large pour le *slab* et le *rib*

Un transformateur de mode optique en sortie de la cavité laser est donc nécessaire afin d'adapter l'épaisseur et les largeurs du guide SOI. De même que pour la vérification de l'efficacité de couplage de l'épanouisseur adiabatique, nous avons réalisé une série de simulations BPM dans le but de déterminer la meilleure forme possible pour ce dispositif. Le transformateur de mode considéré, réalisé sur une longueur totale de 150  $\mu\text{m}$ , est présenté en *Figure III-31*.

- Lors des 100 premiers micromètres, la partie supérieure du SOI est amincie de 200 nm d'épaisseur sous la forme d'une pointe de 10  $\mu\text{m}$  de large à la base à 125 nm à son extrémité (*Figure III-31 a) et b)*). Le *rib* du SOI est affiné pour passer de 3  $\mu\text{m}$  de large à 400 nm.
- Les 50 derniers  $\mu\text{m}$  permettent d'affiner le *slab* du guide d'onde de 10  $\mu\text{m}$  à 3  $\mu\text{m}$  (*Figure III-31 c) et d)*). Dans cette partie, l'épaisseur du SOI n'est plus que de 300 nm.



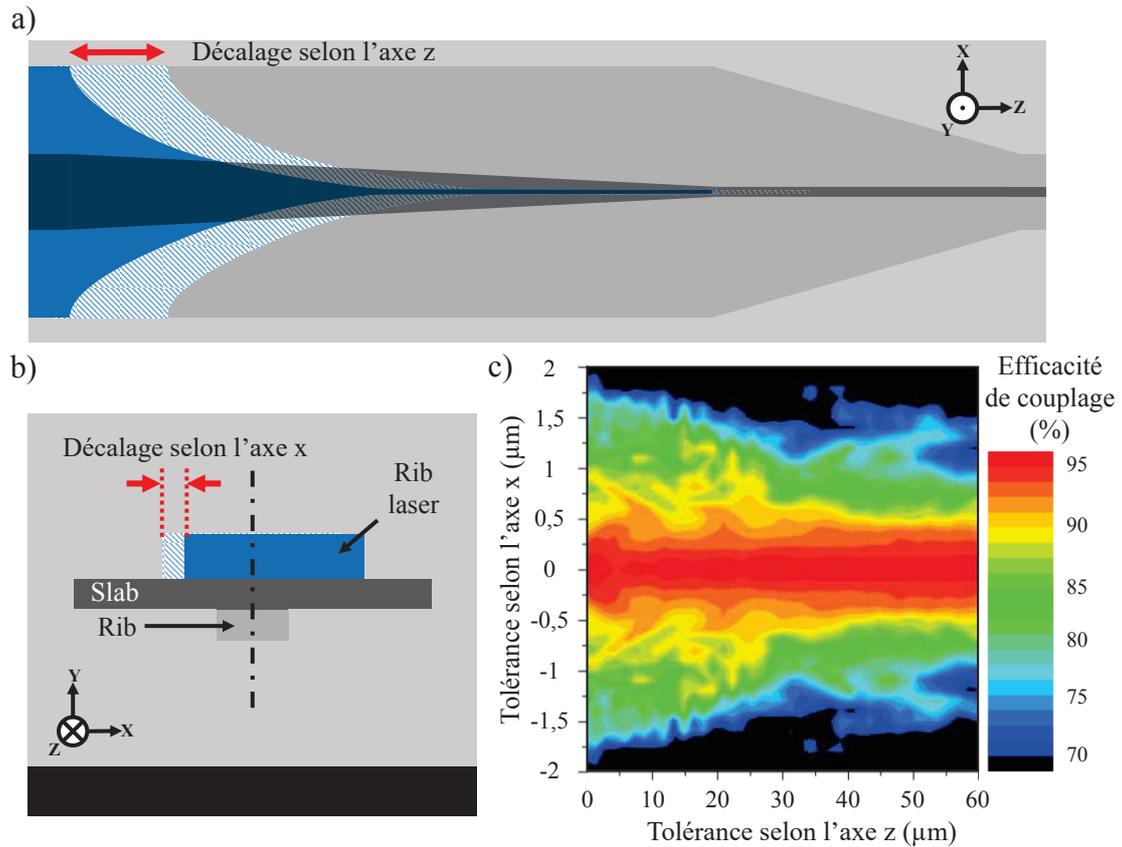
**Figure III-31 : Vues en coupes du transformateur de mode entre le guide laser SOI et un guide monomode SOI avec en a) le guide laser, en b) l'amincissement du *slab*, en c) le guide SOI en sortie d'amincissement et en d) le guide monomode en sortie du transformateur, et vue du dessus du transformateur montrant le confinement du mode optique.**

Théoriquement, ce transformateur de mode permet de transférer plus de 97 % de la puissance lumineuse du guide laser de 500 nm d'épaisseur à un guide d'onde monomode de 300 nm d'épaisseur.

### 3.5.1 Influence des variabilités du procédé de fabrication

L'influence de désalignements engendrés par la lithographie lors du processus de fabrication a été étudiée à l'aide de simulations BPM (*Figure III-32*). Ainsi, lors de l'étape création, dans le guide laser SOI, de la pointe permettant d'amincir l'épaisseur du guide SOI de 500 nm à 300 nm, deux désalignements majeurs peuvent intervenir :

- Un désalignement suivant la direction de propagation  $z$  (*Figure III-32 a)*).
- Un désalignement suivant la direction  $x$  (*Figure III-32 b)*).

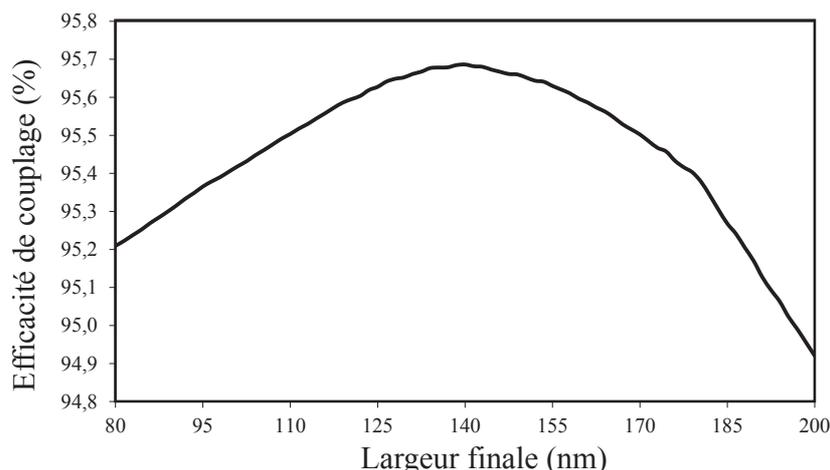


**Figure III-32 : Etude de l'impact d'un désalignement de la pointe du transformateur de mode avec en a) un schéma d'une vue de dessus et en b) un schéma d'une vue en coupe du transformateur et en c) l'efficacité de couplage en fonction des deux désalignements.**

Les résultats de l'efficacité de couplage du transformateur de mode en fonction de ces deux désalignements, présentés en *Figure III-32 c)*, nous montrent que le transformateur est peu sensible selon l'axe de propagation. En revanche, une erreur de plus de  $\pm 500$  nm suivant l'axe  $x$  entraîne une chute des performances de transfert de la structure de plus de 10 % et à  $\pm 1$   $\mu\text{m}$ , de plus de 15 %.

Ce paramètre est donc un point sensible à contrôler lors de la fabrication du dispositif.

Un autre paramètre susceptible de varier durant le processus de fabrication est la largeur de la pointe du transformateur. Les résultats de simulations d'un rétrécissement ou d'un élargissement de cette cote sont montrés en *Figure III-33*. Sur cette figure, nous observons qu'une variation de  $\pm 60$  nm entraîne seulement une perte de l'efficacité de couplage de 0,1 %.



**Figure III-33 : Réflectivité d'un miroir de Bragg en fonction de la longueur d'onde pour plusieurs longueurs différentes.**

En revanche, ces simulations ne nous permettent pas d'évaluer l'influence de la fraction de puissance lumineuse qui est réfléchi sur la pointe. Plus cette réflexion est importante, plus elle peut perturber le fonctionnement de la cavité laser. Lors de l'étape de fabrication, nous chercherons donc à diminuer au maximum cette largeur.

En sortie du transformateur, le mode optique est confiné dans un guide d'onde monomode et peut être dirigé vers un circuit photonique ou un réseau de couplage surfacique.

## III.6 CONCLUSION

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons rappelé les principes de fonctionnement d'une cavité laser. Nous avons ensuite donné différents paramètres permettant de caractériser les performances statiques d'un laser. Enfin, nous avons présenté la cavité laser retenue pour la validation de l'intégration Back-Side d'une source laser sur une puce photonique sur silicium : la cavité hybride DBR III-V/Si. L'empilement III-V ainsi que les différents modules la composant ont alors été décrits.

Dans un second temps, nous nous sommes concentrés sur le dimensionnement de chacun de ces modules. En premier lieu, nous avons abordé le cas de l'épanouisseur permettant de maximiser le confinement du mode optique au niveau des puits quantiques dans la zone de gain puis dans le guide SOI au niveau des miroirs en transférant ce mode entre le guide III-V et le guide SOI. En utilisant le critère d'adiabaticité adapté au couplage faible, nous avons joué sur les différents paramètres que sont la force de couplage et son facteur correctif, la fraction de puissance couplée suivant le supermode non désiré, la longueur et les largeurs d'entrée et de sortie de l'épanouisseur afin de déterminer ses valeurs géométriques optimales. Nous avons ainsi démontré que nous pouvions atteindre une efficacité de couplage théorique de près de 95 %.

Après un bref rappel du principe de fonctionnement d'une structure de Bragg en réflexion, nous avons ensuite déterminé les paramètres nécessaires à la fabrication de miroirs sélectifs en longueur d'onde de la cavité. Suite au choix d'une épaisseur de gravure pour le réseau, nous avons sélectionné

quatre longueurs de miroirs dont une, de 600  $\mu\text{m}$ , permettant une réflectivité totale et les autres, de respectivement 110  $\mu\text{m}$ , 150  $\mu\text{m}$  et 200  $\mu\text{m}$ , aboutissant à des miroirs partiels de réflectivité de 50 %, 70 % et 85 %. Nous avons également retenu cinq périodes, de 193 nm à 199 nm, afin d'obtenir cinq longueurs d'onde différentes d'émission laser, de 1292 nm à 1328 nm.

Enfin, nous avons défini la forme du transformateur de mode permettant de connecter le guide SOI de la cavité laser à un guide d'onde monomode pour une longueur d'onde de 1310 nm. Ce module permet de transférer théoriquement près de 97 % de la puissance lumineuse vers le reste du circuit optique.

# Chapitre IV : Fabrication du Laser Hybride DBR III-V/Si

## Sommaire

---

IV.1 Introduction.....	88
IV.2 La structuration de la partie silicium.....	88
4.2.1 L'enchaînement des étapes technologiques de fabrication.....	88
4.2.2 La structuration Front-Side du SOI et d'une couche métallique.....	91
4.2.3 Le collage de la poignée Silicium, le retournement de l'empilement et le retrait du substrat initial.....	98
4.2.4 La structuration du SOI Back-Side.....	101
IV.3 La structuration de la partie III-V et les métallisations du laser.....	106
4.3.1 Le collage du III-V sur SOI structuré.....	106
4.3.2 La structuration du guide III-V et les métallisations du laser.....	107
IV.4 Conclusion.....	116

---

## IV.1 INTRODUCTION

Ce chapitre détaille l'enchaînement des étapes technologiques qui a été utilisé pour la réalisation d'un laser hybride DBR III-V/Si dans la configuration Back-Side. La fabrication des puces lasers a nécessité la mise au point et l'utilisation d'un jeu de masques spécifique, appelé LBSI (Laser Back-Side Integration).

Le processus de réalisation du laser hybride III-V/Si est séparé en deux parties majeures. La première partie consiste à structurer l'ensemble des éléments, actifs ou passifs, présents sur une puce photonique ainsi que la partie silicium de notre laser hybride. L'autre partie concerne la structuration du III-V et la création des métallisations de la cavité laser.

Dans la première partie, nous présenterons les résultats de la structuration de la partie silicium de la puce. Nous commencerons par détailler tout d'abord les différentes étapes technologiques ainsi que les méthodes de fabrication qui ont été utilisées. Nous exposerons ensuite la structuration Front-Side du SOI et d'une couche métallique avant de développer les étapes du collage d'une poignée silicium puis de la structuration Back-Side du SOI.

Dans un second temps, nous nous attacherons à définir l'ensemble des étapes concernant la partie III-V de la puce. Parmi elles, nous montrerons dans un premier temps comment réaliser un collage III-V sur SOI ainsi que l'analyse menée pour valider cette étape. Puis nous aborderons la structuration du guide III-V et la métallisation de la cavité laser.

## IV.2 LA STRUCTURATION DE LA PARTIE SILICIUM

La structuration de la partie SOI étant réalisée avant le collage du III-V, nous pouvons donc séparer ces deux briques technologiques. L'innovation de cette thèse est la réalisation particulière de la partie silicium du laser hybride selon la configuration Back-Side.

Dans ce paragraphe, nous présentons ainsi l'enchaînement d'étapes technologiques qui a été utilisé pour la structuration du SOI utilisé pour la fabrication des lasers hybrides. Nous verrons que celui-ci peut également être séparé en plusieurs briques distinctes qui seront alors chacune détaillées.

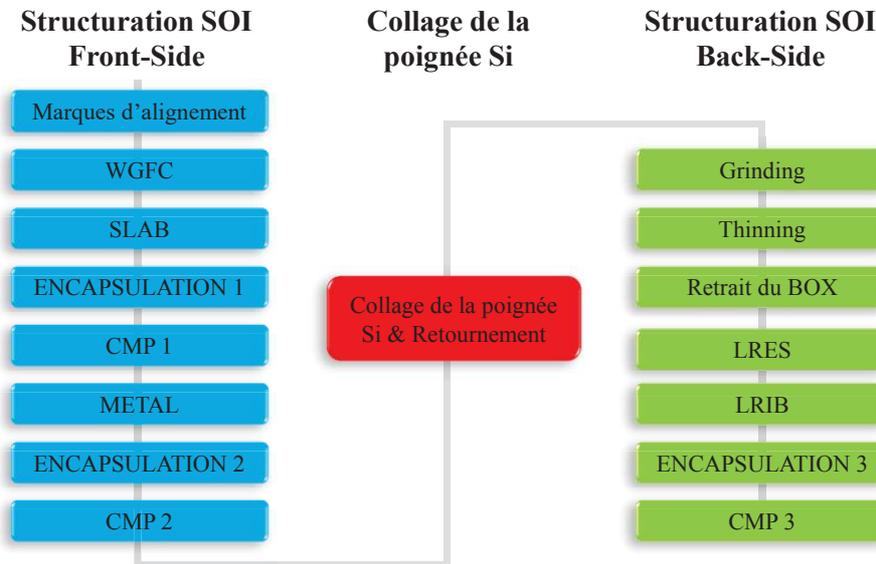
### 4.2.1 *L'enchaînement des étapes technologiques de fabrication*

Le processus de structuration du SOI est fait suivant une approche consistant à réaliser un motif par une succession de lithographies puis de gravures. Les procédés que nous avons utilisés sont issus de la micro-électronique. Durant ces travaux, la structuration de la partie silicium a été réalisée sur des substrats SOI de 200 mm de diamètre. Les épaisseurs de SOI et de BOX sont respectivement de 500 nm et de 1  $\mu\text{m}$ .

Les étapes technologiques utilisées pour fabriquer la partie SOI d'une puce avec laser hybride, en configuration Back-Side, à l'aide du jeu de masques dit LBSI spécifique à la réalisation de lasers en

Back Side, sont présentées en *Figure IV-1*. La structuration du SOI peut être séparée en trois briques importantes :

1. La structuration en Front-Side.
2. Le collage d'une poignée de silicium et le retournement de l'empilement.
3. La structuration en Back-Side.



**Figure IV-1 : Enchaînement des étapes technologiques utilisé pour la fabrication du jeu de masques LBSI.**

Les étapes nommées WGFC, SLAB, METAL, LRES et LRIB comportent chacune une lithographie, une gravure et des mesures de contrôles des dimensions et de l'aspect.

En général, après chaque étape de gravure, la plaque est contrôlée grâce à :

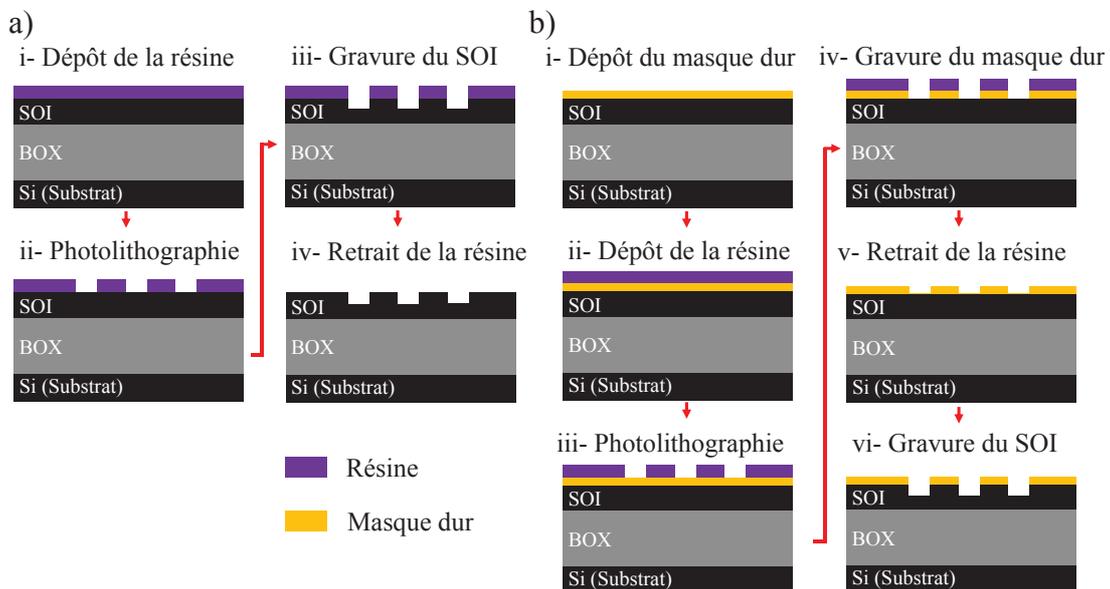
- Des mesures de l'épaisseur de la zone gravée et/ou de la zone non gravée à l'aide de l'ellipsométrie spectroscopique.
- Des mesures SEM-CD (Scanning Electron Microscope – Critical Dimension) déterminant les dimensions du motif par rapport à celles souhaitées.
- Des observations validant l'absence de résidus et/ou de défauts par microscope optique.

Les lithographies que nous avons utilisées durant la fabrication de nos puces sont soit des photolithographies DUV (*Deep UV*) 193 nm ou 248 nm soit des lithographies e-beam. Les gravures sont réalisées par RIE (*Reactive Ion Etching*). La lithographie e-beam est généralement utilisée lorsqu'une des dimensions d'un motif est inférieure à une centaine de nanomètres.

La structuration du silicium peut être réalisée selon deux manières différentes (*Figure IV-2*). Compte tenu des techniques de fabrication mises à disposition, certains motifs nécessitent l'utilisation d'un masque dur, par exemple lorsque leurs finesses sont telles qu'une simple résine ne suffirait pas à obtenir la résolution souhaitée. Ainsi, un masque dur est déposé afin d'avoir des flancs de gravure les plus verticaux possible. Le masque dur est un matériau suffisamment sélectif pour faire office de masque

lors de la gravure du silicium. Typiquement, en micro-électronique, la silice ou le nitrure de silicium sont utilisés en tant que masque dur.

Dans le cas d'une photolithographie DUV sans masque dur (*Figure IV-2 a*), le déroulement d'une séquence de structuration d'un motif suit un enchaînement précis. Tout d'abord, une résine sensible aux ultraviolets est déposée sur la plaque (*Figure IV-2 a i-*). L'épaisseur de cette résine dépend du motif et de la profondeur de gravure. La plaque est ensuite insolée à travers un masque portant le motif à créer (*Figure IV-2 a ii-*). Vient alors une étape dite de développement durant laquelle la résine soluble est retirée chimiquement. La résine non-soluble définit le motif souhaité. Le silicium est alors gravé, par RIE dans notre cas, à la profondeur désirée (*Figure IV-2 a iii-*). Une étape finale de nettoyage permet de retirer la résine ainsi que les polymères produits par la gravure. La séquence de lithographie DUV – gravure avec un masque dur (*Figure IV-2 b*) nécessite deux étapes supplémentaires par rapport à celle sans. Le masque dur est déposé avant la résine (*Figure IV-2 b i-*), qui elle ne sert qu'à graver cette couche (*Figure IV-2 b iv-*) avant d'être retirée (*Figure IV-2 b v-*). Le masque dur seul sert alors de protection lors de la gravure du motif (*Figure IV-2 b vi-*).



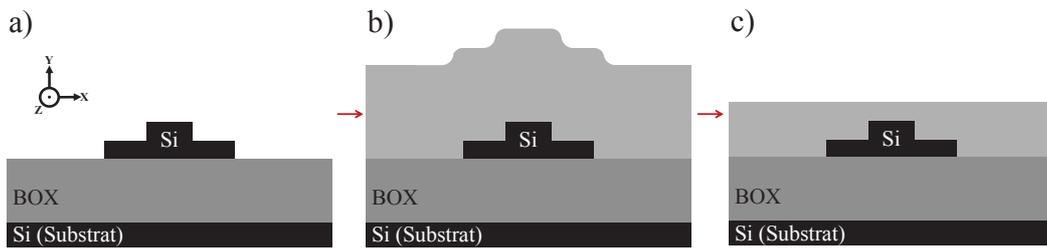
**Figure IV-2 : Schémas de l'enchaînement des étapes technologiques utilisées pour la structuration du SOI avec en a) une séquence sans masque dur et en b) une séquence avec.**

Lors d'une lithographie e-beam, l'insolation de la résine est réalisée à l'aide d'un faisceau d'électrons.

Suite à la structuration d'un motif, comme un guide d'onde silicium, des étapes d'encapsulation et de planarisation sont généralement réalisées (*Figure IV-3*). Dans notre cas, pour la partie SOI de la fabrication de la puce, les encapsulations sont faites à l'aide de  $\text{SiO}_2$ . Le type et l'épaisseur de matériau déposé dépend du type de motif et de sa topographie. Par exemple, dans le cas d'un réseau (*Figure IV-3 a*) dont le rapport d'aspect entre profondeur de gravure et largeur d'un espace est important, le dépôt d'un  $\text{SiO}_2$  très conforme, dit HDP (*High Density Plasma*), peut être privilégié (*Figure IV-3 b*). Ainsi, la formation de bulles d'air au pied du motif est évitée. Lorsque l'objectif de l'encapsulation est d'obtenir la surface la plus plane possible, un autre type de  $\text{SiO}_2$  est utilisé.

Dans le cadre de notre technologie, suite à la structuration du SOI, une combinaison de  $\text{SiO}_2$  d'encapsulation est privilégiée. Le premier oxyde, très conforme, permet de garantir que

l'environnement des dispositifs actifs et passifs de la puce est uniquement de la silice. Le deuxième, planarisant, facilite l'étape suivante de CMP (*Figure IV-3 c*), avant le dépôt des couches métalliques.



**Figure IV-3 : Schémas de coupes transversales d'un guide d'onde en a) après gravure, en b) après encapsulation dans du SiO<sub>2</sub> et en c) après planarisation par CMP.**

Pour certains motifs de trop grandes dimensions, c'est-à-dire, dans notre cas, avec une longueur et une largeur supérieures à 10  $\mu\text{m}$ , une étape dite de « contre-masque » est nécessaire avant la CMP. Cette étape consiste à graver les bosses sur une profondeur égale à leur hauteur afin de faciliter la planarisation. Une lithographie spécifique est alors nécessaire ne laissant libre à la gravure que les reliefs à éliminer.

Suite à la planarisation, un contrôle de l'épaisseur de silice restante est réalisé par ellipsométrie spectroscopique.

Les méthodes de structuration de nos puces ayant été définies, nous allons détailler, dans la suite de ce paragraphe, chacune des étapes de construction de la partie SOI de notre puce laser, utilisant le jeu de masques LBSI (*Figure IV-1*).

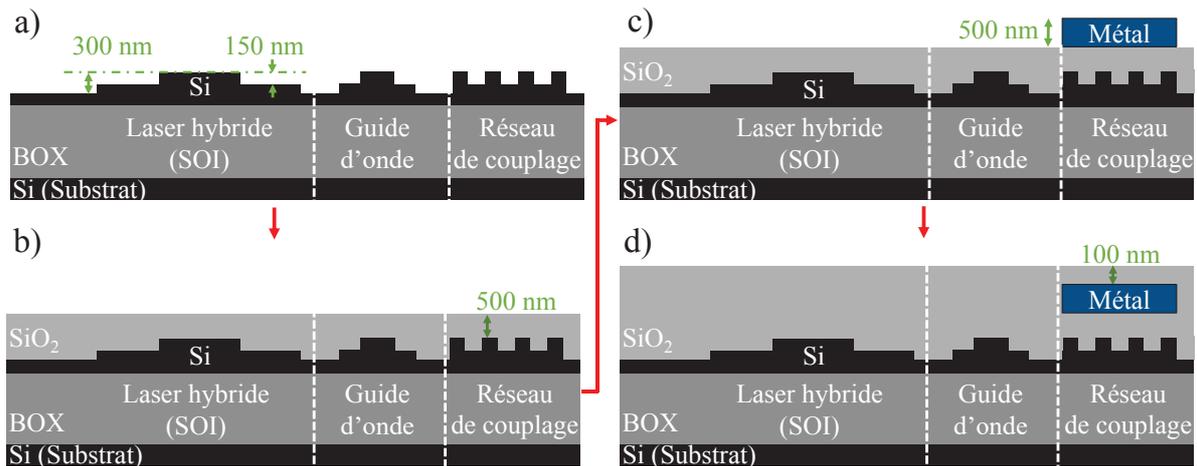
#### 4.2.2 La structuration Front-Side du SOI et d'une couche métallique

Afin de pouvoir aligner les niveaux de masques entre eux, des marques d'alignements sont structurées dans le SOI par des étapes de lithographie-gravure spécifiques. Notre enchaînement d'étapes technologiques a nécessité la présence de deux types de marques différents :

- Les marques d'alignements primaires, ou PM (*Primary Mark*) spécifiques à la photolithographie DUV. Ces marques sont présentes à quatre endroits sur la plaque. Dans notre cas, elles sont gravées à travers toute l'épaisseur du SOI, jusque dans le BOX, soit environ 550 nm de profondeur. En précaution, d'autres marques PM sont gravées sur une épaisseur de 120 nm correspondant à la profondeur généralement utilisée dans ce type de technologie photonique.
- Les marques e-beam présentes sur la périphérie de chaque puce nécessitent un masque dédié et sont alignées par rapport aux PM. Elles sont également gravées sur une épaisseur de 550 nm.

Ces marques d'alignements sont le point de départ de l'alignement de tous les niveaux utilisés durant la fabrication de la puce. Chaque niveau de masques peut également intégrer des marques d'alignements secondaires appelées SPM (*Segmentary Primary Mark*). Ces SPM sont gravées en même temps que le niveau et ont donc la même profondeur de gravure que les motifs.

Les étapes de la structuration à proprement parler de la puce en Front-Side sont décrites sur la *Figure IV-4*. Les deux premières étapes de fabrication, WGFC puis SLAB, sont des séquences de lithographies puis de gravures partielles du SOI (*Figure IV-4 a*). Le SOI est ensuite encapsulé dans de la silice puis planarisé par CMP (*Figure IV-4 b*). Une ligne de métal représentative d'un niveau d'interconnexion métallique et servant de futur réflecteur sous le réseau de couplage surfacique est alors structurée (*Figure IV-4 c*). Une deuxième encapsulation dans du SiO<sub>2</sub> et une planarisation terminent la partie Front-Side (*Figure IV-4 d*).



**Figure IV-4 : Schémas de coupes transversales de la structuration Front-Side de la puce avec en a) la définition des passifs d'une puce photonique (guides d'onde, réseaux de couplage, ...) et des tapers adiabatiques, en b) l'encapsulation du SOI dans du SiO<sub>2</sub> et sa planarisation par CMP, en c) la structuration d'une couche métallique représentative des interconnexions métalliques et en d) l'encapsulation du métal dans du SiO<sub>2</sub> et sa planarisation par CMP.**

○ La structuration du SOI en Front-Side :

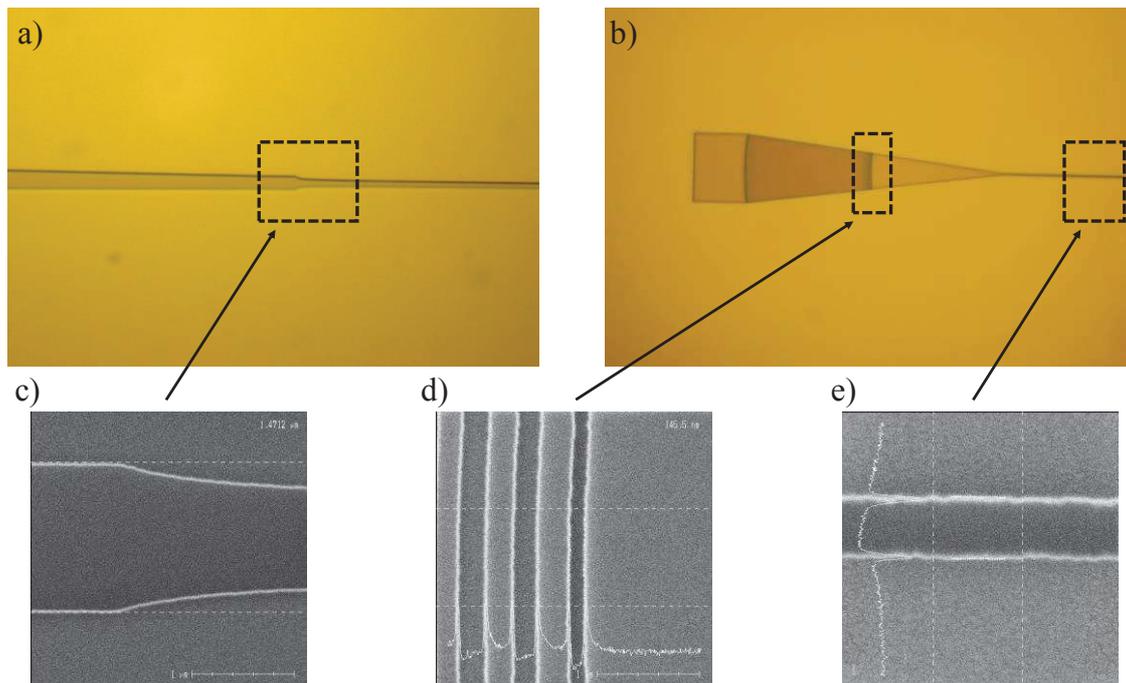
La première étape, nommée WGFC, permet de créer les arêtes « *rib* » des guides d'onde et du taper adiabatique ainsi que le réseau du coupleur surfacique. En raison des dimensions de ces motifs, l'utilisation d'un masque dur de 100 nm de SiO<sub>2</sub> a été nécessaire. La lithographie utilisée est une photolithographie DUV 193 nm. La gravure partielle du SOI est réalisée sur une profondeur de 150 nm. Ce niveau est primordial pour deux des dispositifs que nous avons étudiés :

- Le réseau de couplage surfacique dont l'efficacité dépend de la bonne définition de son réseau, du respect du facteur de remplissage et de l'absence de rugosité sur les flancs de gravure.
- Le taper adiabatique : une mauvaise définition de son profil ou une surgravure trop importante dégrade nettement ses performances.

L'une des difficultés de ce niveau est le fait de devoir réaliser un compromis au niveau des conditions d'insolation de la résine. Deux paramètres permettent de régler le faisceau UV, la focalisation et la dose. L'obtention d'une ligne ou d'un espace ne demande pas les mêmes valeurs. Dans notre cas, nous avons choisi de privilégier le respect des dimensions des lignes du réseau de couplage surfacique au détriment des lignes des arrêtes des guides d'onde. L'utilisation de correctifs, tels que l'OPC (*Optical*

*Proximity Correction*), lors de la création du jeu de masque peuvent permettre de s'affranchir de ce problème.

La *Figure IV-5* présente les observations des résultats suite à la première structuration du SOI. Nous retrouvons le *rib* d'une sortie de taper adiabatique, par microscope optique (*Figure IV-5 a*) et par MEB après l'étape SLAB (*Figure IV-5 c*). Un réseau de couplage surfacique et le *rib* de son guide monomode sont également montrés, avec en *Figure IV-5 b*) une vue microscope de la structure, et des images MEB en *Figure IV-5 d*), des premières lignes du réseau et en *Figure IV-5 e*) du *rib* du guide.



**Figure IV-5 : Résultats de l'étape WGFC avec des images au microscope optique de, en a) l'une des extrémités d'un taper adiabatique et en b) d'un réseau de couplage, et des images MEB de, en c) l'une extrémité de taper adiabatique, en d) les premiers espace d'un réseau de couplage et en e) le *rib* d'un guide d'onde.**

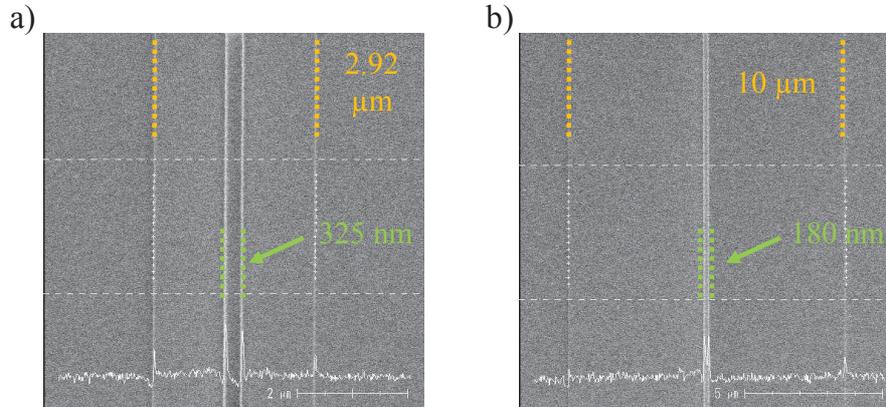
L'une des difficultés de la première séquence de photolithographie et gravure partielle WGFC a donc été de respecter les dimensions d'une part des lignes, pour le *rib* des guides d'onde par exemple, et d'autre part des espaces dans le réseau de couplage. Notre réseau de couplage est apodisé au niveau du facteur de remplissage. Le premier espace du réseau a une largeur de 120 nm pour une période de 495 nm. A l'issue de quelques périodes, le facteur de remplissage est de 50 %.

Nos choix lors de la lithographie puis de la gravure ont entraîné une surgravure latérale de 25 nm de part et d'autre du *rib* des guides d'onde et du taper adiabatique. Nous avons également fortement impacté le facteur de remplissage du réseau de couplage avec, pour les dernières périodes, un rapport de 70 % d'espace pour 30 % de ligne au lieu des 50 %.

La deuxième étape, nommée SLAB, permet de définir le *slab* des guides d'onde grâce à une photolithographie DUV 248 nm et une gravure partielle de 150 nm de profondeur. Ce niveau ne nécessite pas l'utilisation d'un masque dur. La gravure est suivie d'une oxydation thermique de la plaque de 5 nm d'épaisseur afin de diminuer la rugosité des flancs des dispositifs.

A l'issue de cette étape, nous avons remarqué une surgravure totale importante de près de 35 nm de part et d'autre des *rib* et *slab* des guides d'onde monomodes et des guides laser. La *Figure IV-6* présente les observations SEM-CD faites en fin d'étapes pour ces deux guides.

Dans le cas d'un guide d'onde monomode, le *rib* et le *slab* font respectivement 325 nm et 2,92  $\mu\text{m}$  de large au lieu de respectivement 400 nm et 3  $\mu\text{m}$  (*Figure IV-6 a*). Pour le guide laser, et donc le taper adiabatique également, le *rib* fait 180 nm de large au lieu de 250 nm (*Figure IV-6 b*). La mesure de largeur du *slab* est peu précise au-dessus de 5  $\mu\text{m}$ . On trouve ainsi une valeur de 10  $\mu\text{m}$ , correspondant à la valeur souhaitée.



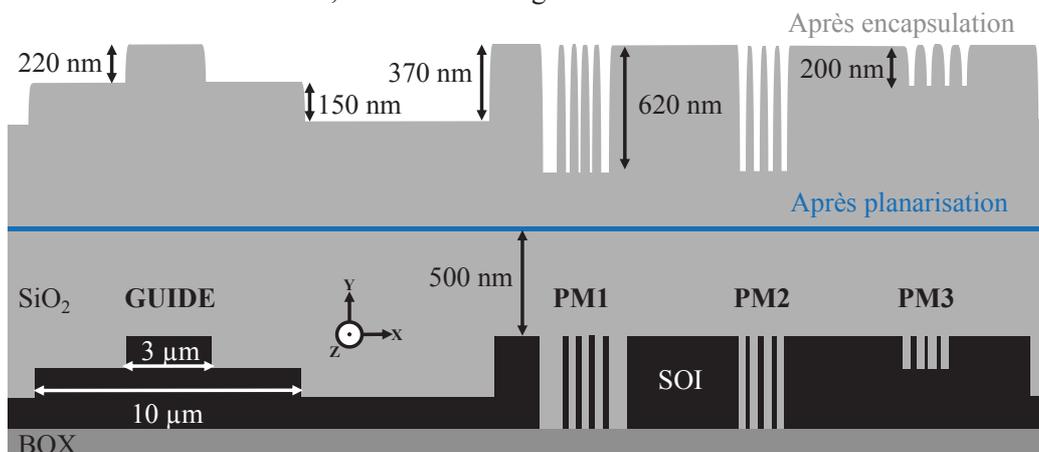
**Figure IV-6 : Résultats de l'étape SLAB avec des images MEB en a) d'un guide d'onde monomode et en b) d'un guide laser.**

La topographie à l'issue de WGFC et SLAB est de 220 nm au niveau du *rib* (150 nm de SOI et environ 70 nm de reste de masque dur  $\text{SiO}_2$ ) et de 150 nm au niveau du *slab*.

○ L'encapsulation du SOI et la première planarisation :

Suite à la structuration Front-Side du SOI, le silicium est encapsulé dans de la silice avant que la surface de celle-ci ne soit planarisée. Cette étape est particulièrement importante pour le bon fonctionnement du réseau de couplage. Dans le Chapitre II, nous avons montré que l'épaisseur de  $\text{SiO}_2$  entre le SOI et son réflecteur métallique devait avoir une valeur bien précise pour obtenir des interférences constructives entre les différentes diffractions. La valeur choisie est de 500 nm entre le réseau et le métal. Après la CMP, le métal sera déposé à la surface de la plaque et nous devons donc obtenir cette épaisseur le plus uniformément possible.

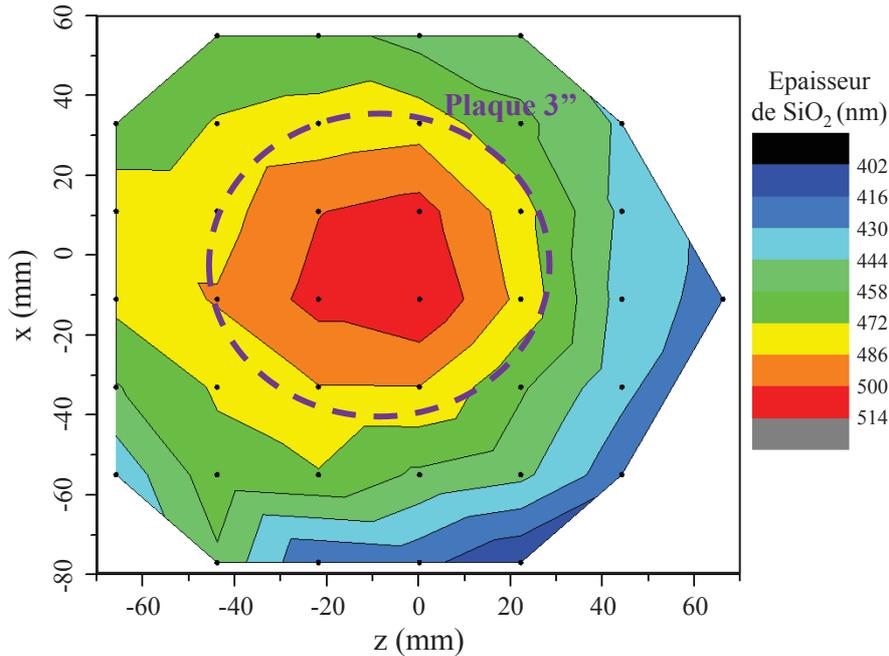
Un schéma détaillant les différentes topographies présentes sur la plaque est montré *Figure IV-7*. Les topographies nommées *PM1*, *PM2* et *PM3* représentent les différentes marques d'alignements réalisées au début de la fabrication, *PM2* étant le négatif de *PM1*.



**Figure IV-7 : Schéma de la topographie présente sur la plaque après l'encapsulation du SOI par de la silice.**

La marche la plus importante à planariser se situe au niveau de ces marques d'alignements et fait une hauteur d'environ 620 nm. Elle est due à une topographie de 550 nm dans le SOI et le BOX additionnée d'un résiduel de 70 nm de masque dur  $\text{SiO}_2$ .

Les mesures de l'épaisseur de  $\text{SiO}_2$  restante entre le haut du SOI et la surface sont montrées *Figure IV-8*. Nous avons bien une moyenne d'environ 500 nm de silice à la suite de la planarisation. Le cercle violet sur la figure représente la bordure extérieure de la plaque de matériau III-V, de 3 pouces de diamètre, qui sera collée plus tard dans le processus de fabrication. La dispersion de l'épaisseur de  $\text{SiO}_2$  sous cette empreinte est de  $\pm 20$  nm pour une valeur moyenne de 495 nm.



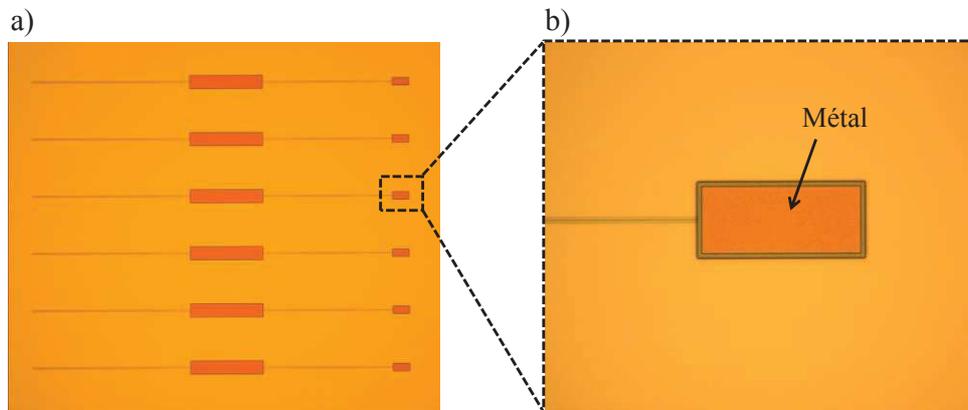
**Figure IV-8 : Cartographie de l'épaisseur de  $\text{SiO}_2$ , entre le SOI non gravé et la surface, présente sur la plaque après la première planarisation.**

○ La réalisation de la couche métallique :

Le but de cette couche métallique est de servir de réflecteur pour les rayons diffractés dans la mauvaise direction par le réseau de couplage surfacique. Elle est représentative des quatre niveaux d'interconnexions métalliques nécessaires au fonctionnement de la puce photonique décrite dans le Chapitre I. En raison des contraintes de temps et de l'absence de nécessité de la présence de trois couches métalliques supplémentaires, le choix a été fait de se limiter à cet unique niveau de métal. En profitant de cette couche, nous avons également ajouté un bloc métallique sous le centre de la zone de gain de nos lasers. Notre but est alors de déterminer s'il peut avoir le rôle de dissipateur thermique.

Suite à la première séquence d'encapsulation et de planarisation, un empilement métallique est déposé sur l'ensemble de la plaque. Celui-ci est composé de deux couches d'accroche de Ti et de TiN de respectivement 10 nm et 20 nm d'épaisseur. Une couche de 440 nm d'épaisseur d'AlCu avec 0.5 % de cuivre est alors déposée. Enfin, deux couches protectrices de Ti et de TiN, de respectivement 10 nm et 40 nm, sont déposées afin de limiter l'oxydation du cuivre. Cet empilement est alors structuré en utilisant la séquence de lithographie – gravure du niveau de masque nommé METAL. Les dimensions non critiques des motifs de ce niveau n'ont pas nécessité l'utilisation d'un masque dur.

Les résultats obtenus à la suite de ce niveau sont montrés en *Figure IV-9*. Sur la *Figure IV-9 a)* nous pouvons remarquer le bloc métallique au niveau de la future zone de gain ainsi qu'au-dessus du réseau de couplage. Un zoom au niveau du métal réflecteur du réseau est montré en *Figure IV-9 b)*.



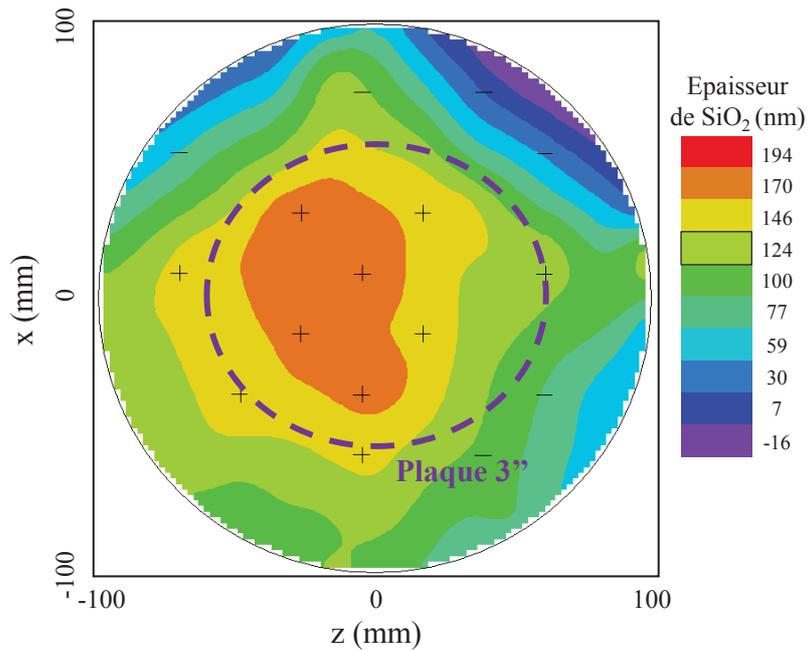
**Figure IV-9 : Résultats de l'étape METAL avec des images au microscope optique en a) du dispositif complet avec le dissipateur thermique et le réflecteur du réseau de couplage et en b) un zoom au niveau du réflecteur métallique.**

- L'encapsulation du métal et la planarisation avant le collage de la poignée Si :

Suite à la structuration du niveau METAL, une seconde encapsulation avec de la silice est réalisée. Cette fois, les motifs topographiques sont des rectangles de longueurs et de largeurs supérieures à 20  $\mu\text{m}$  et d'épaisseur de 520 nm. L'utilisation d'un contre-masque peut permettre d'obtenir une bonne planarisation. Le niveau du contre-masque reprend les mêmes motifs que le niveau METAL avec néanmoins 2  $\mu\text{m}$  de moins sur chaque longueur et chaque largeur. Une séquence de lithographie – gravure permet alors de graver les reliefs de la hauteur de la marche, soit 520 nm. Un ajout de *dummies* métalliques peut également permettre d'homogénéiser la topographie de la surface et donc favoriser une meilleure planarisation

L'étape de CMP qui suit est primordiale pour la bonne réalisation de la suite du processus de fabrication. En effet, en plus de devoir planariser la topographie générée par la couche métallique, elle doit permettre d'éliminer les imperfections éventuelles issues de la première CMP. La surface de la plaque doit être la plus plane possible pour assurer un collage de la poignée de silicium optimal. Les spécifications pour le type de collage moléculaire que nous avons utilisé doivent être au minimum d'un rapport de 1 pour 3000 entre la hauteur du relief et la longueur d'une zone plane l'entourant. En dessous de cette valeur, la formation de bulles d'air peut apparaître à la base du relief, ce qui fragilise la force du collage.

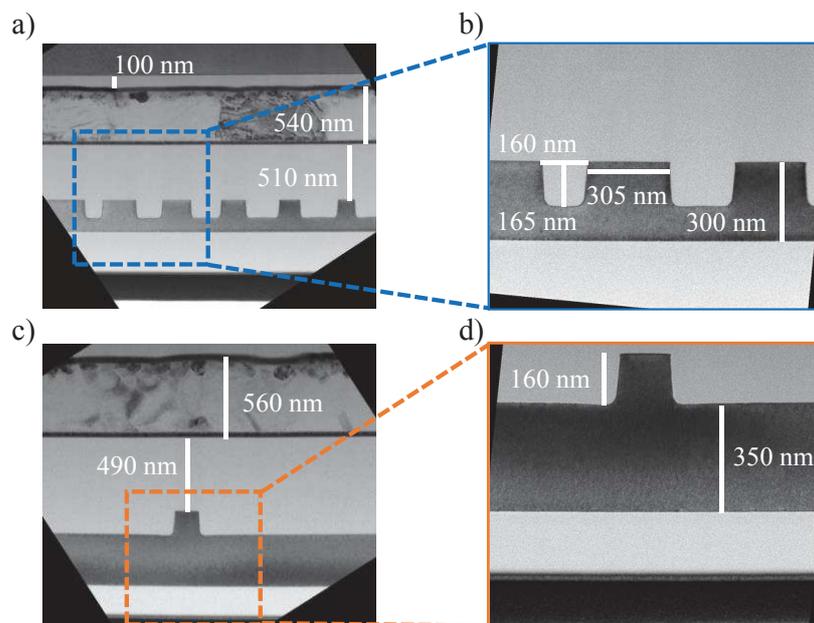
En revanche, dans notre cas d'étude, l'épaisseur de  $\text{SiO}_2$  entre le métal et la surface n'a pas une importance capitale. Il faut simplement qu'elle soit suffisamment épaisse pour assurer un bon collage. Durant notre processus de fabrication, nous avons arbitrairement choisi de laisser 100 nm de silice. La *Figure IV-10* détaille la cartographie des épaisseurs d'oxyde de silicium mesurées après la CMP. Les valeurs négatives en bord de plaque peuvent venir d'une planarisation trop importante de l'oxyde.



**Figure IV-10 : Cartographie de l'épaisseur de SiO<sub>2</sub>, entre le SOI non gravé et la surface, présente sur la plaque après la seconde planarisation.**

Cette étape de CMP finalise la structuration Front-Side de la puce laser et la plaque est alors prête pour le collage de la poignée silicium.

Afin de vérifier les motifs structurés en Front-Side, des coupes et des observations par TEM (Transmission Electron Microscope) ont été réalisées et sont exposées en *Figure IV-11*. Les résultats montrés sur un réseau de couplage surfacique et son zoom (*Figure IV-11 a) et b)* ainsi que sur un guide d'onde laser et son zoom (*Figure IV-11 c) et d)* nous prouvent que la structuration de ces motifs a engendré une surgravure par rapport aux dimensions souhaitées.



**Figure IV-11 : Images TEM après la structuration Front-Side du SOI avec en a) un réseau de couplage surfacique et son réflecteur métallique, en b) un zoom sur les premières lignes du réseau, en c) un guide d'onde laser et en d) un zoom sur le *rib* du guide d'onde laser.**

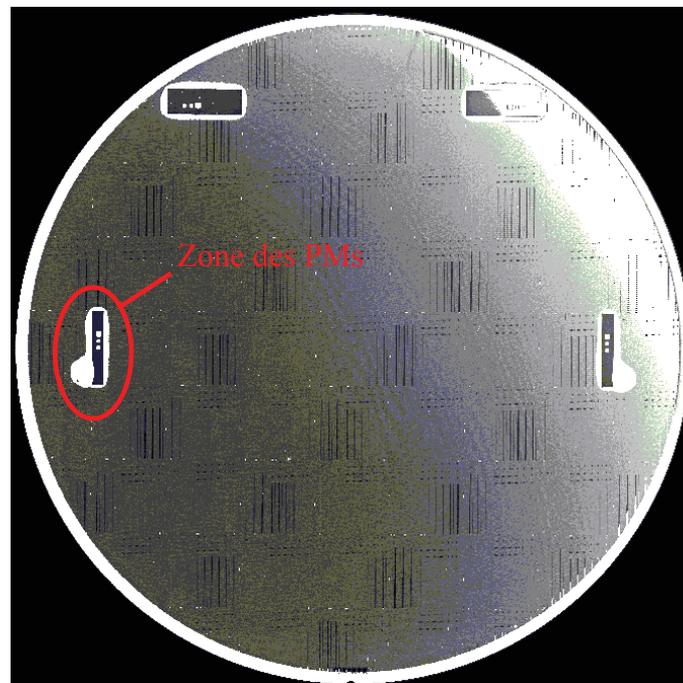
Les effets de cette surgravure seront révélés lors des caractérisations optiques de dispositifs, dans le chapitre suivant.

#### 4.2.3 *Le collage de la poignée Silicium, le retournement de l'empilement et le retrait du substrat initial*

Suite à l'encapsulation du métal par du  $\text{SiO}_2$  et à la planarisation de l'oxyde, une plaque de silicium, appelée poignée, est collée à la surface de notre plaque SOI structurée. Les surfaces de ces deux plaques doivent être parfaitement planes afin d'éviter tout décollement lors de l'étape de retrait du substrat initial.

- Le collage de la poignée Si :

Le collage utilisé pour cette étape est un collage moléculaire  $\text{Si}/\text{SiO}_2$  dont les résultats de mesures acoustiques sont présentés en *Figure IV-12*. Sur cette figure, nous remarquons d'importants décollements au niveau des marques d'alignements PM. Un effet de bord est également observé mais il est dû à un artefact de mesure et non pas à un décollement.



**Figure IV-12 : Résultat d'une mesure acoustique après le collage de la poignée silicium.**

Un incendie dans la salle blanche nous a empêché de décoller les plaques afin de rectifier ce problème en améliorant l'état de surface du SOI structuré. Les délais de remise en route de la salle blanche ont en effet permis au collage de devenir permanent en agissant comme un recuit basse température longue durée. Compte tenu du temps nécessaire au processus de fabrication, nous avons donc été contraints de poursuivre en prenant en compte ce défaut.

Ces zones non collées correspondent aux endroits pour lesquels la topographie était la plus importante et donc la plus dure à planariser lors des deux étapes de CMP. En effet, comme nous l'avons vu précédemment, la hauteur de gravure de certaines PM est deux fois plus importante que celle des motifs de la puce. De plus, aucun contre-masque n'a été utilisé lors de la première CMP. Lors de cette

dernière, le relief a donc été insuffisamment planarisé et la deuxième CMP n'a pas été en mesure de pallier cette défaillance.

○ Le retrait de l'ancien substrat et du BOX :

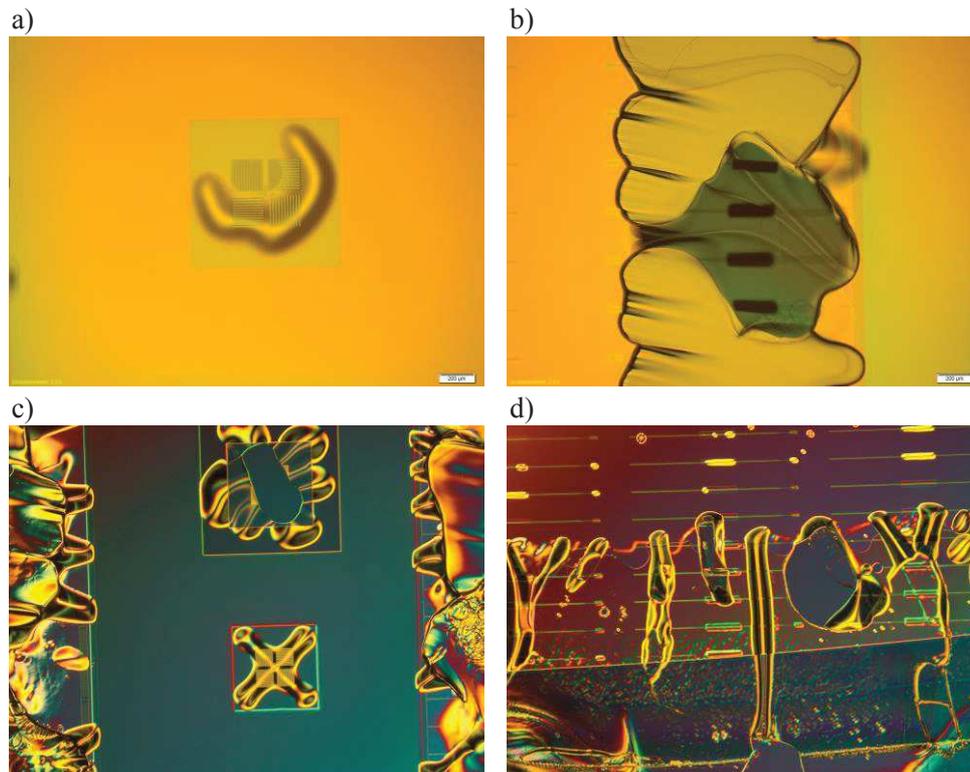
L'étape suivante consiste à retourner l'ensemble de l'empilement pour retirer le substrat initial et le BOX. Ceci nous permettra de venir structurer le SOI en face arrière avant de l'encapsuler de nouveau avec une épaisseur de SiO<sub>2</sub> contrôlée et terminer ainsi la structuration de la partie SOI de la puce laser.

Le retrait de ces couches est réalisé en quatre étapes :

1. Tout d'abord, un retrait par polissage mécanique, appelé grinding, permet d'amincir le substrat jusqu'à une épaisseur de 35 µm.
2. Un retrait chimique par gravure humide, appelé trimming, retire la fin du substrat sans attaquer le BOX.
3. Une gravure par RIE, en temps fixe, est ensuite utilisée pour amincir le BOX à 20 % de son épaisseur initiale. Afin de déterminer le temps de gravure à retenir, nous avons réalisé une gravure complète du BOX associée à une DFA (Détection de Fin d'Attaque) sur une plaque essai.
4. Enfin, une gravure humide du BOX restant permet de mettre à jour la face arrière du SOI avec un état de surface optimal.

Suite à l'étape de grinding, nous avons remarqué une forte dégradation de la surface de la plaque au niveau des zones de marques d'alignements PM. Ces dégradations sont d'autant plus accentuées suite au retrait complet du substrat et du BOX. Des observations réalisées au microscope optique sont exposées en *Figure IV-13*, avec un traitement particulier des contrastes lumineux pour certaines photos.

Nous pouvons remarquer sur cette figure qu'après le grinding, des bulles rendent les PM illisibles (*Figure IV-13 a*) et les bords de ces zones sont très décollés (*Figure IV-13 b*). A l'issue du retrait des couches de Si et de BOX, certaines PM sont complètement décollées (*Figure IV-13 c*) et les bords de plaques sont très abimés (*Figure IV-13 d*). Ces décollements sont des conséquences directes de la mauvaise planarisation suite à l'encapsulation du métal.



**Figure IV-13 : Observations au microscope optique après l'étape de grinding avec en a) une PM et en b) un bord de la zone des PM, et après le retrait total du substrat et du BOX avec en c) la zone des PM et en d) un bord de plaque.**

La conséquence de ces dégradations est l'impossibilité d'utiliser les marques d'alignement primaires et un état de bord de plaque empêchant la bonne lecture de l'orientation de la plaque par certains équipements.

Afin de pallier la mauvaise qualité du bord de nos plaques, nous avons réalisé un détourage partiel de 100 µm de profondeur sur une largeur de 4 mm. Des observations au microscope optique suite à cette étape sont montrées en *Figure IV-14*. Sur cette figure, nous pouvons remarquer que le bord de plaque est désormais net et permet une bonne lecture de l'orientation de la plaque.



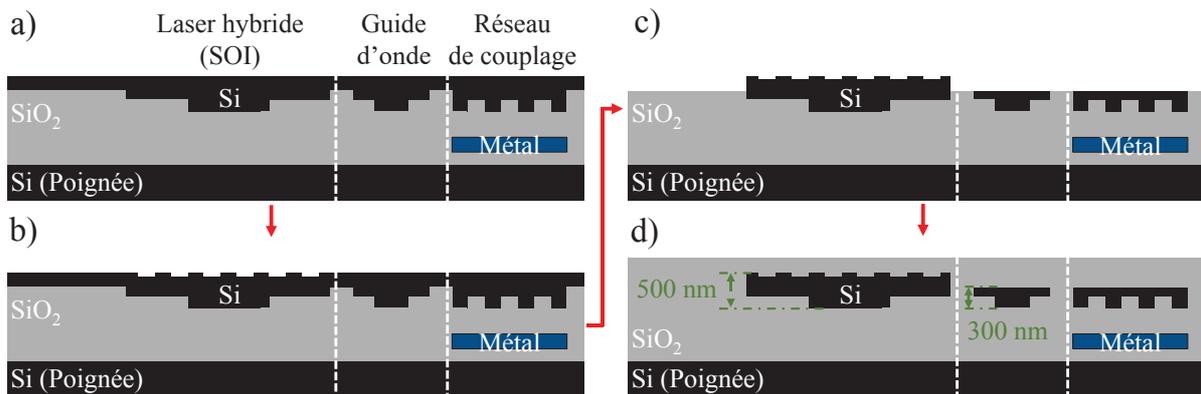
**Figure IV-14 : Observation au microscope optique d'un bord de plaque après détourage.**

Le souci du pré-alignement de la plaque étant résolu, il nous a ensuite fallu résoudre le problème de l'alignement des niveaux de masques pour la lithographie. L'utilisation des SPM des niveaux WGFC,

SLAB et METAL était également impossible car trop de ces marques étaient endommagées, en raison de leurs dimensions semblables aux PM. Il a donc fallu trouver une nouvelle solution, que nous explicitons dans le paragraphe 4.1.4, pour les deux niveaux de structuration du SOI en face arrière LRES et LRIB.

#### 4.2.4 La structuration du SOI Back-Side

Les étapes à proprement parler de la structuration de la puce en Back-Side sont décrites en *Figure IV-15*. Après le retrait du BOX (*Figure IV-15 a*), la structuration du SOI en face arrière est composée de deux séquences de lithographie et de gravure RIE, LRES (*Figure IV-15 b*) et LRIB (*Figure IV-15 c*), puis d'une encapsulation au SiO<sub>2</sub> et finalement d'une planarisation par CMP (*Figure IV-15 d*).



**Figure IV-15 : Schémas de coupes transversales de la structuration Back-Side du SOI avec en a) la plaque après retrait du BOX, en b) la structuration des miroirs de Bragg de la cavité, en c) séparation des lasers et la transition guide laser – guide d'onde et en d) l'encapsulation du SOI dans du SiO<sub>2</sub> et sa planarisation par CMP.**

Les marques d'alignements PM et SPM étant trop dégradées, nous avons dû changer de stratégie pour l'alignement des deux lithographies. Initialement, le niveau LRES devait être réalisé avec une lithographie de type EBL (Electron Beam Lithography) également appelée e-beam tandis que le niveau LRIB devait être fait grâce à une lithographie DUV.

Du fait de leurs dimensions, les marques d'alignements e-beam ont été nettement moins impactées que les autres par le phénomène de décollement lors de l'étape de retrait du substrat et du BOX. De plus, ces marques sont, comme les SPM, présentes à chaque puce. Il existe donc un plus grand nombre de marques susceptibles d'être lisibles pour l'alignement. Nous avons donc choisi de réaliser les deux niveaux de lithographies en utilisant l'e-beam.

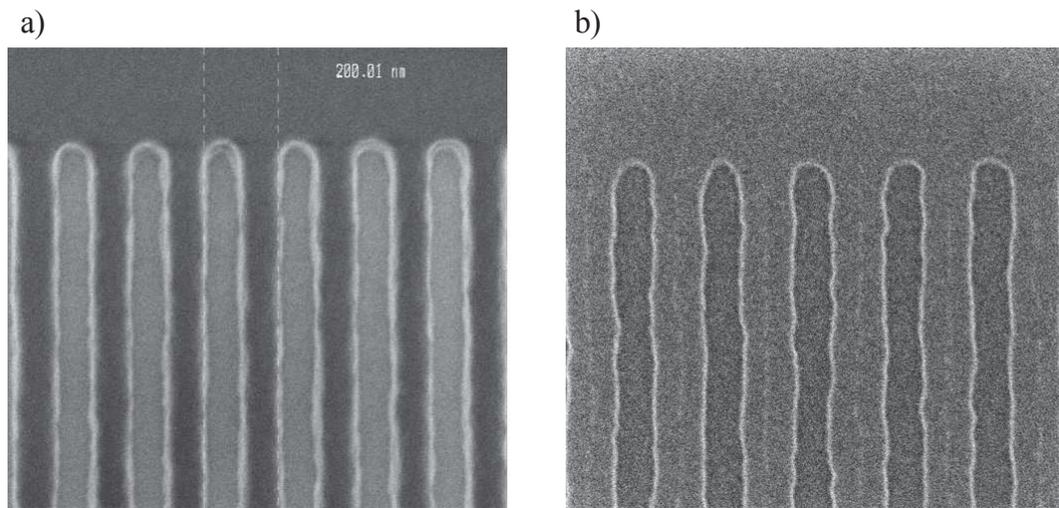
##### o La structuration des miroirs de Bragg de la cavité laser :

Cette étape, nommée LRES, consiste en une lithographie d'un réseau de lignes et espaces, dont la période a été déterminée lors des simulations présentées dans le chapitre précédent, ainsi qu'une gravure RIE partielle d'une dizaine de nanomètres dans le SOI.

En raison de la dimension du réseau, nous avons donc dû utiliser une lithographie e-beam. En effet, ce type de lithographie permet d'obtenir des motifs de plus petites dimensions qu'une lithographie DUV. De plus, parmi les hauteurs de résines disponibles, celle utilisée pour l'e-beam est plus faible ce qui réduit ainsi les risques d'effondrement pour des rapports d'aspects « hauteur de résine – largeur de motif » importants.

Les résultats obtenus lors de la lithographie et de la gravure sont exposés en *Figure IV-16*. Sur cette figure, nous pouvons observer qu'après la lithographie (*Figure IV-16 a*), les motifs du réseau présentent un pied de résine irrégulier. Ceci se traduit par une gravure (*Figure IV-16 b*) engendrant une forte rugosité sur les flancs des lignes du réseau de Bragg. Ces défauts sont susceptibles d'introduire des pertes par diffraction lors de la réflexion de la lumière sur le miroir.

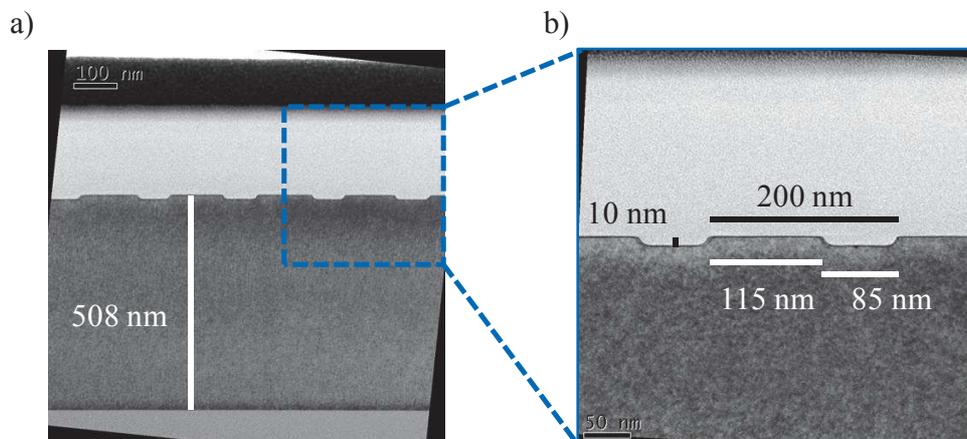
En revanche, les mesures nous montrent que la période est invariante et dépendante du layout ainsi que de la qualité du masque. La longueur d'onde d'émission du laser sera donc centrée sur la valeur théorique choisie lors des simulations.



**Figure IV-16 : Images MEB du réseau de Bragg réalisé lors de l'étape LRES avec en a) après la lithographie e-beam et en b) après la gravure.**

Afin de vérifier la structuration des réseaux des miroirs de Bragg, des coupes et des observations par TEM ont été réalisées et sont exposées en *Figure IV-17*.

Le cliché MEB présenté en *Figure IV-17 a*) nous montre que l'épaisseur du SOI dans lequel est structuré le miroir de Bragg est bien d'environ 500 nm. En revanche, les résultats montrés en *Figure IV-17 b*) nous apprennent que si la période du réseau est respectée, le facteur de remplissage ne l'est pas : les lignes sont plus larges que les espaces. Ceci entraîne une légère modification de la longueur d'onde d'émission du laser, inférieure cependant au nanomètre [2].



**Figure IV-17 : Images TEM du réseau de Bragg réalisé lors de l'étape LRES avec en a) une vue complète du SOI et en b) un zoom sur une période du réseau.**

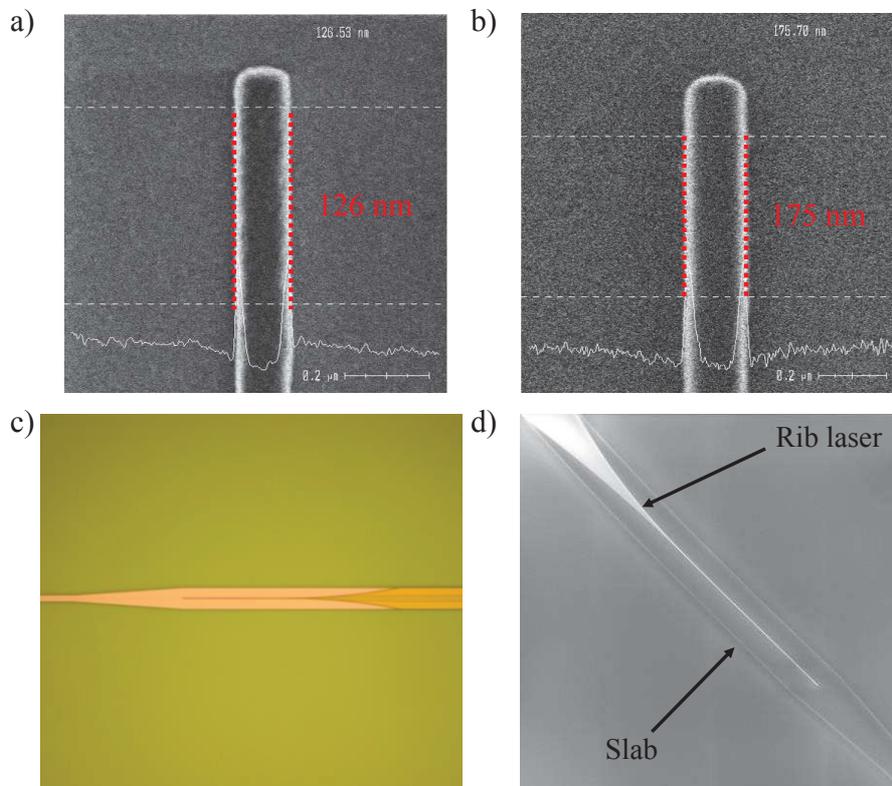
○ La définition de la transition entre le guide laser et le guide d'onde :

Cette étape, nommée LRIB, consiste donc en une lithographie e-beam suivie d'une gravure partielle RIE de 200 nm de profondeur. En raison des dimensions de la pointe de la transition entre guide d'onde laser et guide d'onde monomode, l'utilisation d'un masque dur s'est révélée indispensable. Ceci permet notamment l'utilisation d'une plus faible épaisseur de résine ce qui diminue le risque d'effondrement de la pointe.

Lors de cette étape, le temps de gravure doit être particulièrement maîtrisé. En effet, une surgravure du silicium entraînerait un amincissement des guides d'ondes et des autres dispositifs de la puce développés pour une épaisseur de SOI de 300 nm. Ce risque est l'une des limitations de l'intégration d'un laser hybride en Back-Side à partir d'un substrat SOI 500 nm. Une technique permettant de s'affranchir de ce problème sera discutée dans le paragraphe Perspectives, dans le chapitre suivant.

Des observations ont été réalisées afin de valider le bon déroulement de cette étape. Les résultats obtenus sont montrés en *Figure IV-18*. La largeur de la pointe a été vérifiée, grâce à une mesure au SEM-CD, après la lithographie (*Figure IV-18 a*) et après la gravure (*Figure IV-18 b*).

Entre les deux étapes, nous avons observé un net élargissement de cette valeur qui est passée de 125 nm à 175 nm en moyenne. Cependant, d'après les simulations (Chapitre III – *Figure III-30*), cette largeur n'entraîne pas une diminution significative de l'efficacité de couplage de la transition. L'origine d'un tel écart n'a en revanche pas été formellement identifiée et cette étape reste un point d'amélioration du processus de fabrication. Des observations au microscope optique (*Figure IV-18 c*) et au MEB tilté (*Figure IV-18 d*) nous montrent que les états de surface à la suite de cette étape ne présentent pas de défauts et qu'il n'y a effectivement pas d'effondrement d'une partie de la pointe.



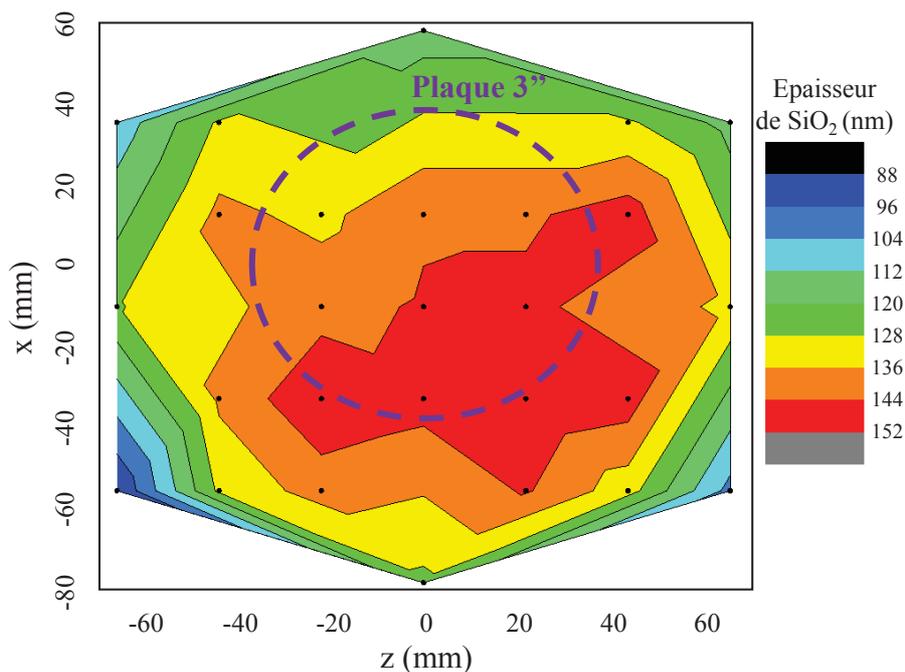
**Figure IV-18 : Observations SEM-CD avec en a) après la lithographie et en b) après la gravure, observation au microscope optique avec en c) la transition complète et image au MEB tilté avec en d) la transition complète.**

A l'issue de cette gravure, la structuration du SOI est terminée. La dernière étape consiste à encapsuler le silicium par une couche d'oxyde puis à planariser celle-ci avant le collage du III-V.

○ L'encapsulation du SOI et la planarisation de l'oxyde avant le collage du III-V :

Cette étape d'encapsulation et de planarisation est cruciale pour le bon fonctionnement du laser hybride. En effet, comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, l'épaisseur de  $\text{SiO}_2$  doit être parfaitement contrôlée à une valeur choisie, soit 140 nm pour les structures décrites dans le Chapitre III, afin de maximiser l'efficacité de couplage de notre taper adiabatique. De plus, la surface de la plaque de silicium doit être la plus plane possible pour éviter le moindre décollement lors du collage de la plaque III-V et le retrait de son substrat InP.

Dans un premier temps, après l'encapsulation avec de la silice, une CMP permet d'obtenir l'état de surface souhaité. Des mesures au profilomètre sont réalisées aux endroits critiques de la plaque afin de s'assurer de la planéité de la couche. Puis, une première série de mesures d'épaisseurs par ellipsométrie nous permet d'estimer l'épaisseur de  $\text{SiO}_2$  restant. En fonction de ce résultat, une gravure partielle pleine plaque de l'oxyde est réalisée afin d'obtenir l'épaisseur finale recherchée. Une cartographie de cette épaisseur de collage, associée avec l'équivalent de la taille couverte par un wafer de 3'' de III-V, est présentée en *Figure IV-19*.



**Figure IV-19 : Cartographie de l'épaisseur de  $\text{SiO}_2$ , entre le SOI et la surface, présente sur la plaque avant le collage du III-V.**

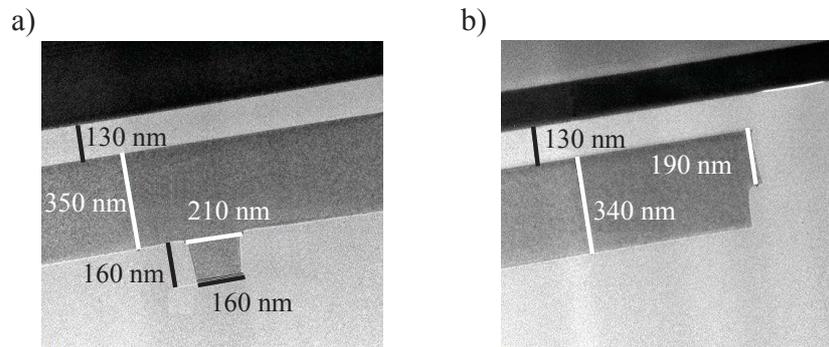
Sur cette figure, nous pouvons observer que la dispersion des valeurs sous l'empreinte de la plaque 3'' de III-V est de  $\pm 12$  nm autour de 140 nm, ce qui est un très bon résultat. D'après les simulations présentées en Figure III-22 du Chapitre III, la dégradation de l'efficacité de couplage du taper adiabatique ne devrait pas excéder 5 % dans le cas le plus extrême.

L'épaisseur de silice entre le SOI et la surface a également été contrôlée par des coupes sur un guide d'onde laser au centre de la zone de gain et des observations par TEM. Le résultat de ces observations

est présenté en *Figure IV-20*. La *Figure IV-20 a)* nous montre que l'épaisseur de SiO<sub>2</sub> est de 130 nm (pour 140 nm recherché). La surgravure de la largeur du *rib* est également bien visible sur cette image. En effet, le sommet du *rib* a une largeur de 160 nm au lieu des 250 nm souhaités.

Si cette valeur permet de maximiser d'autant plus le confinement du mode optique dans le guide III-V au sein de la zone de gain, elle peut en revanche s'avérer très préjudiciable pour le bon fonctionnement du taper adiabatique.

Sur la *Figure IV-20 b)* nous pouvons remarquer qu'il existe un décrochement à l'extrémité du *slab* du guide d'onde. Ceci est dû à un désalignement entre les niveaux SLAB et LRIB. Du fait du confinement du mode optique principalement au centre du guide d'onde, ce phénomène a un impact limité sur le fonctionnement du laser. En revanche, cela reste un point d'amélioration à réaliser lors du processus de fabrication.



**Figure IV-20 : Images TEM du guide d'onde laser avant collage du III-V avec en a) le *rib* et en b) le bord du *slab*.**

A l'issue de cette étape, la structuration de la partie SOI de la puce est terminée. La plaque est prête pour le collage de matériaux III-V.

Nous remplissons, pour la partie silicium, les critères essentiels pour le bon fonctionnement d'un laser hybride III-V sur silicium compatible avec une puce photonique contenant des interconnexions métalliques :

- Nous disposons d'une surface plane pour le collage de III-V.
- L'épaisseur de SiO<sub>2</sub> est contrôlée et correspond à la valeur souhaitée.
- La plaque dispose d'une couche métallique enterrée représentative des interconnexions métalliques.

A partir de ces plaques, il est possible de coller du III-V, et ce, sous différentes formes : plaques de 2'' ou 3'' de diamètre ou vignettes.

### IV.3 LA STRUCTURATION DE LA PARTIE III-V ET LES METALLISATIONS DU LASER

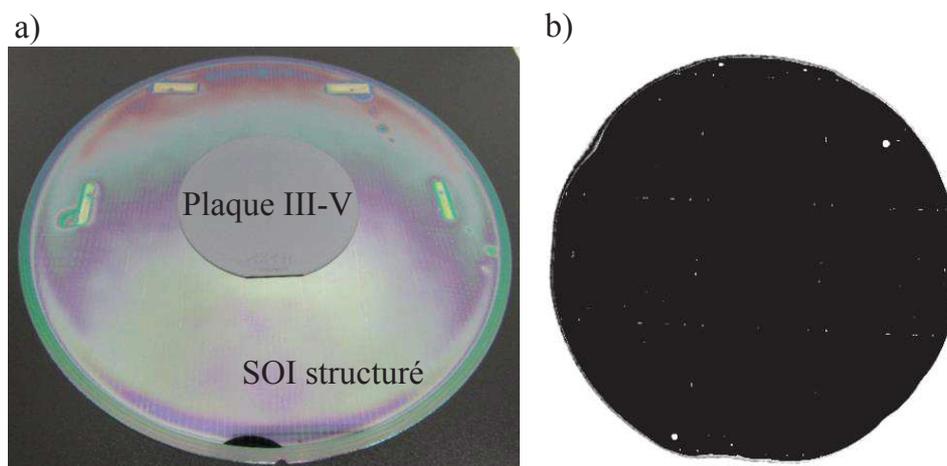
Les étapes de fabrication que nous présentons dans cette partie sont uniquement destinées à la réalisation de la cavité laser hybride III-V sur silicium. Le processus de fabrication est similaire à celui utilisé lors d'études précédentes [2], [3]. Il est composé du collage d'une plaque 3'' de matériaux III-V, de sa structuration et des métallisations du laser et des chaufferettes des miroirs de Bragg.

Seules quatre plaques ont été choisies pour réaliser le processus de fabrication sur la plateforme 100 mm après collage du III-V et détournage. Dans ce paragraphe, nous détaillons l'ensemble des étapes de fabrication du laser depuis le collage du III-V jusqu'à la métallisation finale des lasers.

#### 4.3.1 Le collage du III-V sur SOI structuré

Les plaques SOI ayant été structurées, encapsulées dans la silice et planarisées, l'étape suivante consiste donc à coller du III-V sur celles-ci. L'empilement utilisé est celui présenté dans le chapitre précédent et nous est fourni par le fabricant Landmark. Les différentes couches sont épitaxiées sur un substrat InP de 3''.

Les plaques SOI et III-V sont collées grâce à un collage moléculaire. Pour cela, les surfaces des deux plaques sont activées à l'aide d'un plasma oxygène puis elles sont collées à température ambiante. Afin de consolider le collage, un recuit à 300 °C est alors effectué pendant 2 h. Un exemple de collage est montré en *Figure IV-21*. La plaque de III-V est collée au centre de la plaque SOI structurée de manière à disposer de la meilleure uniformité de l'épaisseur d'oxyde en surface (*Figure IV-21 a*). Avant d'effectuer le recuit, une mesure acoustique est réalisée afin de déterminer la qualité du collage (*Figure IV-21 b*). Dans notre cas, la bonne planéité de la surface du SOI nous a permis d'obtenir un collage de très bonne qualité.

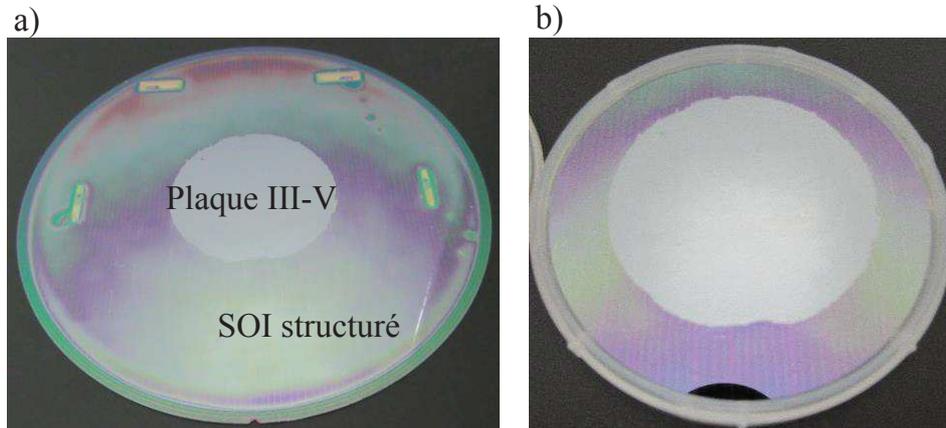


**Figure IV-21 : Résultat du collage d'une plaque III-V sur une plaque SOI structurée avec en a) une photographie des plaques collées et en b) la mesure acoustique au niveau du III-V.**

Suite au collage, le substrat InP de la plaque III-V est retiré par gravure humide dans un bain de HCl dilué avec un arrêt de gravure sur une couche d'InGaAs. Cette couche d'InGaAs est ensuite gravée dans un bain de  $\text{H}_2\text{SO}_4 / \text{H}_2\text{O}_2 / \text{H}_2\text{O}$  jusqu'à une nouvelle couche d'InP dite « couche sacrificielle ». L'objectif de cette couche est de servir de protection lors de l'étape d'implantation d'ions  $\text{H}^+$  isolant les

bords du guide III-V. Seules deux des quatre plaques ont été implantées. Les quatre plaques sélectionnées pour poursuivre le processus de fabrication en 100 mm ont été détournées.

Un exemple de ces étapes est montré en *Figure IV-22*. Sur la *Figure IV-22 a)*, nous pouvons voir que la majorité du III-V est toujours présente après le retrait du substrat et de la couche InGaAs. Ceci nous prouve que le collage de la plaque III-V est de bonne qualité. Après détournage (*Figure IV-22 b)*), les plaques sont nettoyées puis la couche d'InP sacrificielle de deux d'entre elles est retirée par gravure chimique.



**Figure IV-22 : Résultats de la fin du processus de transfert du III-V sur le substrat SOI avec en a) une photographie avec le substrat et la couche d'InGaAs gravés et en b) le détournage de la plaque collée en une plaque de 100 mm.**

La fin du processus de fabrication est entièrement réalisée sur la plateforme 100 mm du CEA-Leti. Le III-V est alors prêt à être structuré et contacté.

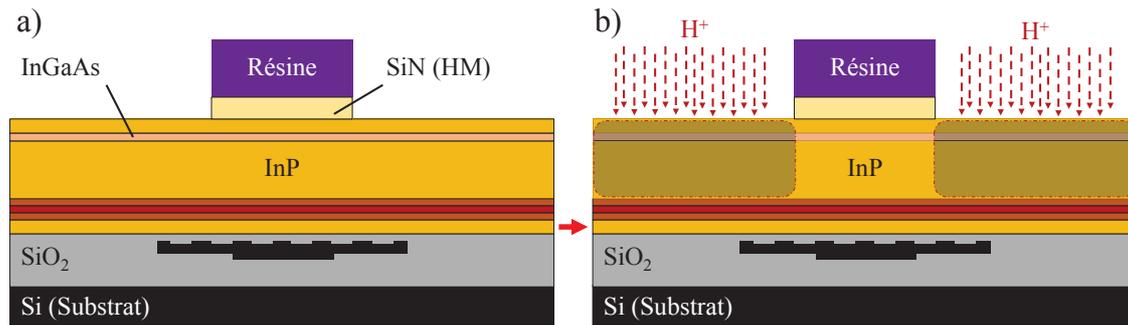
#### 4.3.2 La structuration du guide III-V et les métallisations du laser

Les matériaux III-V ayant été collés sur le SOI structuré, il faut à présent définir le guide III-V, les contacts *p* et *n* du laser ainsi que le métal des chaufferettes et enfin les pads métalliques où viendront se poser les pointes lors des caractérisations.

Dans ce paragraphe, nous détaillons les procédés utilisés sur la plateforme 100 mm pour la réalisation de ces étapes.

##### ○ L'implantation d'ions H<sup>+</sup> :

Tout d'abord, pour les deux plaques possédant toujours leur couche sacrificielle d'InP, une triple implantation d'ions H<sup>+</sup> est effectuée (*Figure IV-23*). Un masque dur de SiN de 500 nm d'épaisseur et une résine de 6,5 μm d'épaisseur sont préalablement déposés et structurés (*Figure IV-23 a)*). Les énergies utilisées pour les implantations sont respectivement de 200 keV, 220 keV et 240 keV, à dose fixe, et ont été étudiées de manière à n'implanter que l'InP-p de l'empilement III-V (*Figure IV-23 b)*).



**Figure IV-23 : Schémas de l'implantation d'ions  $H^+$  d'isolation électrique avec en a) le dépôt et la structuration d'une résine et en b) la triple implantation d'ions  $H^+$ .**

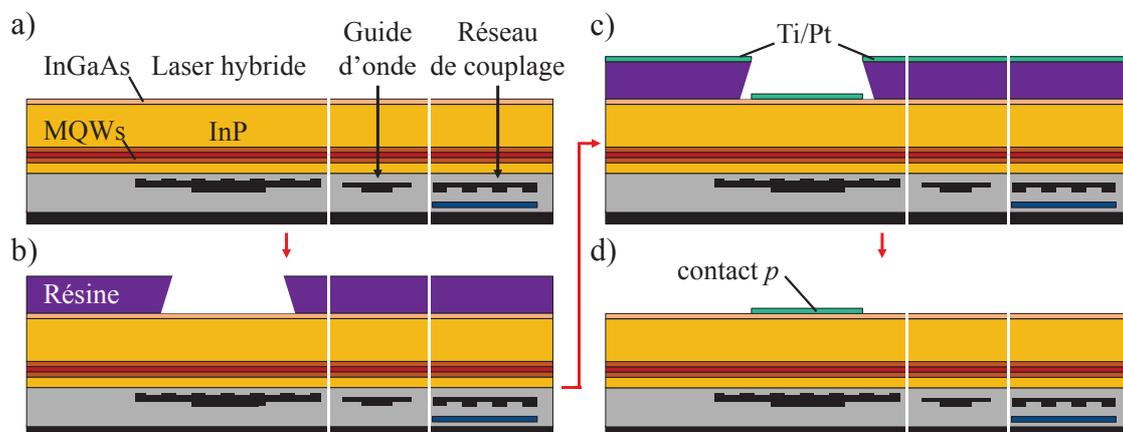
La couche d'InP sacrificielle de surface protège la couche d'InGaAs sous-jacente lors du retrait du masque dur de SiN par gravure RIE. Pour finir cette étape d'implantation, la couche sacrificielle est retirée par gravure humide. Les plaques implantées et les non-implantées ont alors le même empilement III-V.

○ La définition du contact  $p$  : CT-P :

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, la couche d'InGaAs est dopée, de type  $p$  à  $3 \times 10^{19}$  at/cm<sup>2</sup>, de manière à améliorer le contact en diminuant sa résistivité. Cette couche est, à ce stade de la fabrication, à la surface du III-V. L'étape de dépôt du contact  $p$ , nommé CT-P, est alors réalisée, bénéficiant ainsi de l'absence de topographie.

Le contact  $p$  est composé d'un empilement de 10 nm de Ti puis de 75 nm de Pt déposé soit par évaporation, soit par pulvérisation. En considérant ce type d'empilement, l'une des méthodes les plus efficaces pour définir le contact est l'utilisation de la méthode de lift-off (*Figure IV-24*).

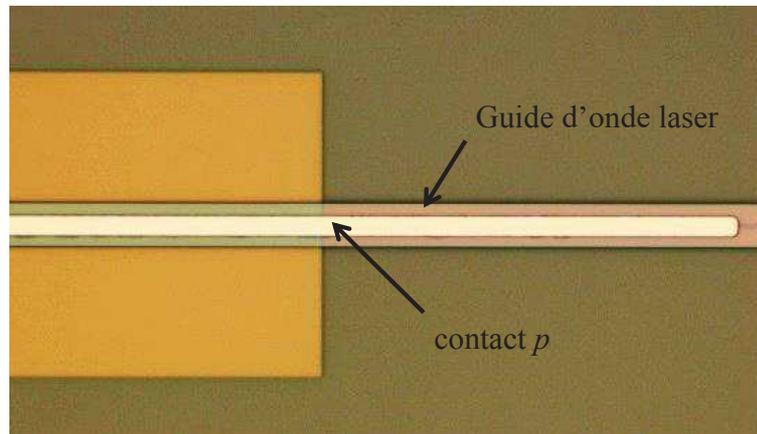
Au préalable, un nettoyage de 30 secondes dans un bain de HCl (10 %) permet de s'affranchir de tout oxyde natif (*Figure IV-24 a*). Un ensemble de deux couches de masques (non représentées sur la *Figure IV.2.iv*) dédiées au lift-off ou LOR (Lift-Off Resist) ainsi qu'une résine photosensible de type négatif sont déposés puis structurés (*Figure IV-24 b*). Les couches métalliques sont alors déposées sur toute la plaque (*Figure IV-24 c*). La pente inverse de la résine négative permet, lors du retrait de cette dernière, de ne laisser du métal qu'au centre du motif (*Figure IV-24 d*) car il n'y a pas de dépôt sur les flancs de la résine.



**Figure IV-24 : Schémas de coupes transversales de la définition du contact  $p$  par lift-off avec en a) la plaque après nettoyage HCl, en b) la structuration de la résine négative, en c) le dépôt des couches métalliques et en d) le retrait de la résine.**

Le dépôt des couches métalliques du contact  $p$  est effectué sur toute la plaque. L'alignement de ce niveau ainsi que des suivants est fait par rapport à des marques structurées dans le SOI et ainsi visibles hors de la zone de collage du III-V.

Une photographie d'une observation au microscope optique de la zone sans III-V est montrée en *Figure IV-25*. Sur cette figure, nous pouvons voir que le contact est bien centré au-dessus du guide laser SOI.



**Figure IV-25 : Image au microscope optique du contact  $p$  au-dessus du guide laser SOI.**

La largeur du contact souhaitée est de  $3,5 \mu\text{m}$ . Suivant la technique de dépôt du métal, le résultat obtenu varie. En évaporation, cette consigne est globalement respectée avec une largeur mesurée de  $3,5$  à  $4 \mu\text{m}$  tandis qu'en pulvérisation, la largeur obtenue est trop large et affiche une valeur de  $4,5 \mu\text{m}$ . Dans le cas des plaques implantées  $\text{H}^+$ , l'injection de courant est alors en partie faite dans des zones implantées ce qui diminue son efficacité.

Le désalignement suivant l'axe perpendiculaire à la longueur du contact n'excède pas les  $0,25 \mu\text{m}$ .

○ La définition du guide laser : étapes GAIN et MESA :

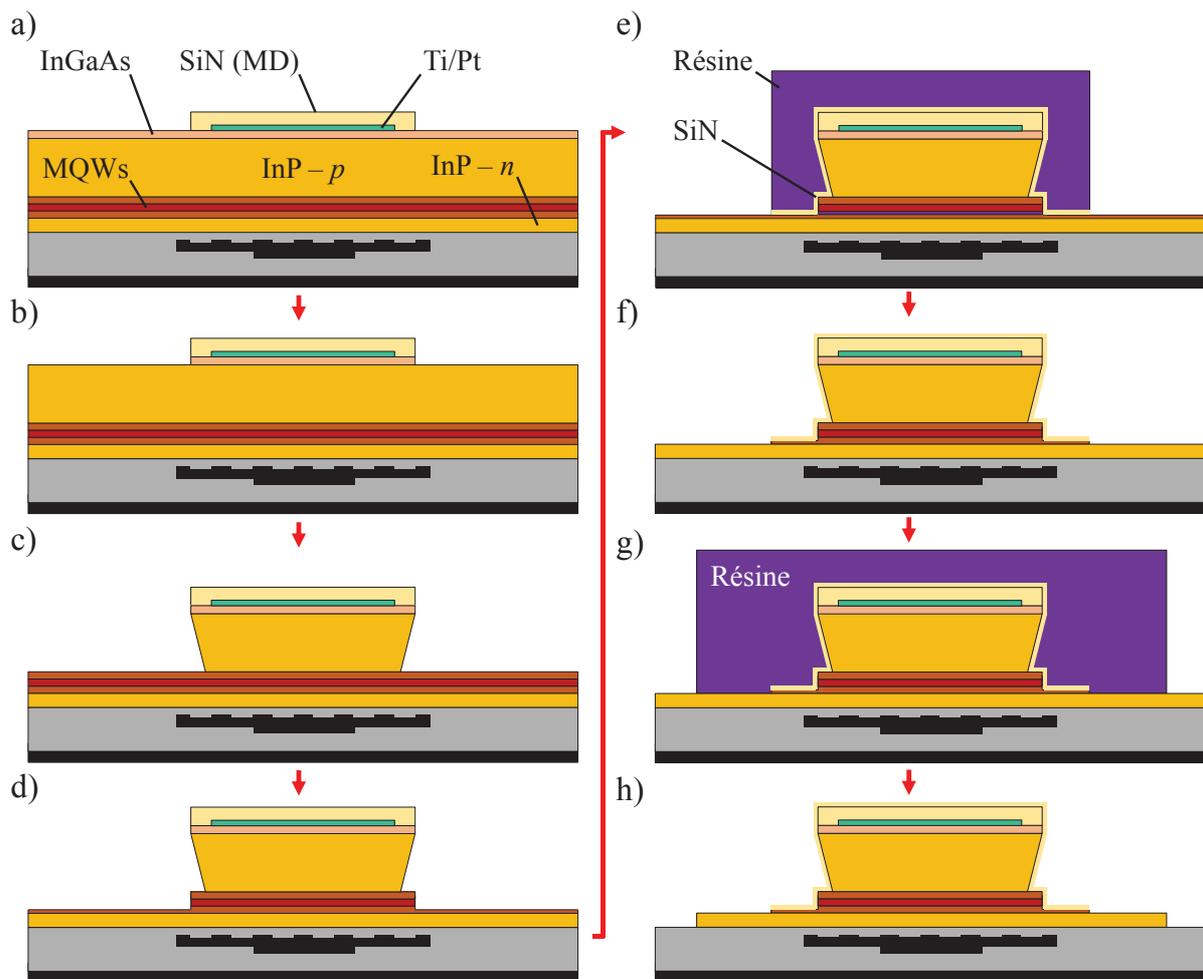
Dès lors que le contact  $p$  est déposé, nous pouvons définir la partie III-V du guide laser. Cette étape est cruciale pour le bon fonctionnement du laser. En effet, les flancs du guide III-V doivent être le moins rugueux possible afin de limiter les pertes.

La gravure de l'InP, des MQWs et des SCH est réalisée en plusieurs étapes de gravures RIE et humides et nécessite l'utilisation de trois masques distincts : GAIN, GAIN+ et MESA. La *Figure IV-26* présente l'enchaînement technologique utilisé pour la structuration de notre guide laser.

Nous pouvons séparer la définition du guide en trois sous-étapes, chacune étant liée à un masque.

- Le masque GAIN : Cette sous-étape débute par le dépôt et la structuration d'un masque dur en nitrure de silicium de  $500 \text{ nm}$  d'épaisseur (*Figure IV-26 a*). Cette couche, d'une largeur de  $5 \mu\text{m}$  joue le rôle de protection lors des gravures suivantes. Une gravure RIE, à base de  $\text{CH}_4\text{-H}_2\text{-Ar}$ , nous permet de retirer l'InGaAs de surface (*Figure IV-26 b*) puis une gravure humide, à base de  $\text{H}_3\text{PO}_4/\text{HCl}$  et sélective par rapport à l'InGaAsP des SCH, permet de définir le guide dans l'InP- $p$  (*Figure IV-26 c*). Enfin, une nouvelle gravure RIE grave la SCH supérieure et les MQWs et s'arrête dans la SCH inférieure en la préservant au maximum (*Figure IV-26 d*).

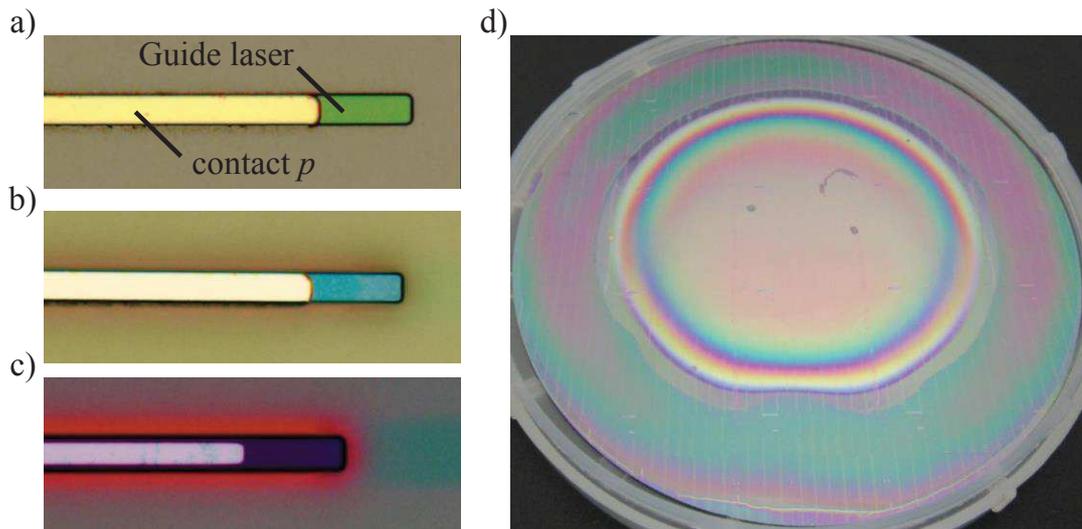
- Le masque GAIN+ : Cette sous étape vise à graver uniquement la fin de la SCH inférieure. Pour cela, un deuxième masque dur SiN de 120 nm d'épaisseur et une résine sont déposés puis structurés (*Figure IV-26 e*). Une gravure humide sulfurée, sélective avec l'InP, retire alors la fin de la SCH, ne laissant qu'un ruban d'une largeur d'une dizaine de micromètres (*Figure IV-26 f*).
- Le masque MESA : La dernière sous-étape vise à graver l'InP-n et ainsi séparer les différents guides III-V. Après la lithographie et le développement d'une résine (*Figure IV-26 g*), l'InP-n est alors retiré des zones non protégées à l'aide d'une gravure humide bromée (*Figure IV-26 h*).



**Figure IV-26** : Schémas de coupes transversales de la définition guide III-V avec en a) après le dépôt du 1<sup>er</sup> masque dur de SiN GAIN, en b) la gravure RIE de l'InGaAs, en c) la gravure humide de l'InP-p, en d) la gravure RIE de la SCH supérieure et de MQWs, en e) après la définition du 2<sup>nd</sup> masque dur de SiN et de la résine GAIN+, en f) après la gravure du reste de la SCH inférieure, en g) après la définition de la résine MESA et en h) après la gravure de l'InP-n.

Lors de ces étapes de structuration, nous avons rencontré plusieurs défauts de fabrication, que nous allons détailler dans les prochains paragraphes. Des études supplémentaires devront être engagées afin d'améliorer le processus. Une autre solution serait de développer les étapes de définition du guide III-V et des métallisations sur plateforme 200 mm voire 300 mm. Nous détaillons ces améliorations dans les perspectives, au chapitre suivant.

Les résultats du processus de structuration de la sous-étape GAIN sont présentés en *Figure IV-27*. Concernant les gravures de l'InGaAs et de l'InP-*p*, les procédés n'ont pas entraîné de problèmes structurels majeurs. En revanche, nous pouvons remarquer sur la *Figure IV-27 a)* que le contact *p* est tangent avec le bord ruban de III-V, ce qui pourrait diminuer l'efficacité de l'injection électrique. En revanche, la gravure RIE de la SCH supérieure et des MQWs s'est avérée plus délicate. Sur la *Figure IV-27 b)* nous pouvons voir le résultat d'une gravure s'étant arrêtée dans la SCH inférieure sans la consommer totalement. La *Figure IV-27 c)* nous montre le résultat d'une surgravure de la SCH inférieure sur l'une des plaques et dont le dégradé de couleurs visible sur la surface du III-V en *Figure IV-27 d)* est caractéristique. Ceci peut également entraîner des pertes dans l'injection électrique du fait de l'amincissement voire de la disparition de la couche d'InP-*n*.

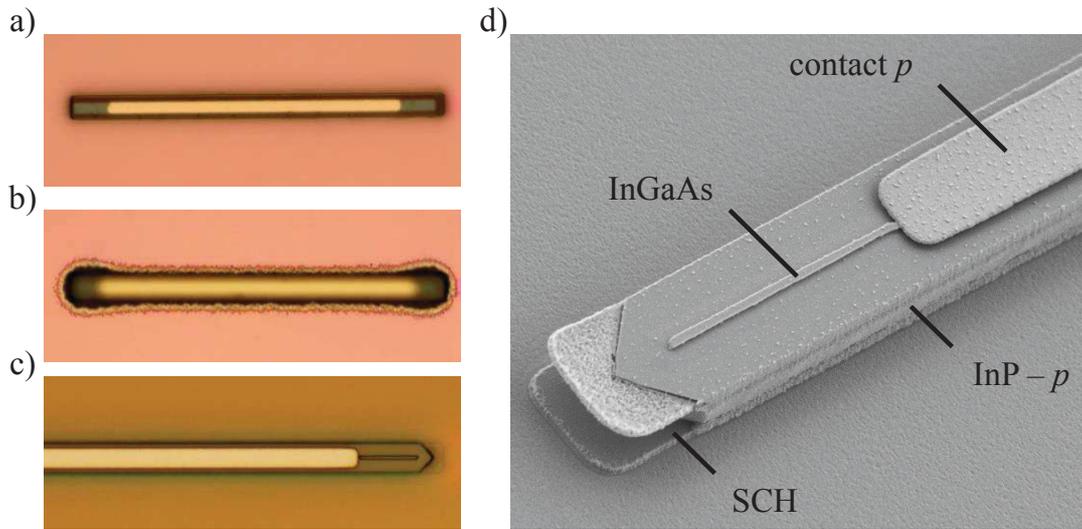


**Figure IV-27 : Images au microscope optique de la sous-étape GAIN avec en a) après la gravure de l'InGaAs et de l'InP-*p*, en b) après la gravure RIE de la SCH supérieure et des MQWs et en c) après une surgravure lors de la gravure RIE des MQWs, et en d) une photographie de la plaque après la surgravure des MQWs.**

La gravure humide de la fin de la SCH inférieure est celle qui a créé le plus de défauts structurels (*Figure IV-28*). A titre de comparaison, le résultat d'une gravure avec masque dur de SiN et résine s'étant bien déroulée est présenté en *Figure IV-28 a)*. Durant cette gravure, nous avons fait face à deux problèmes distincts :

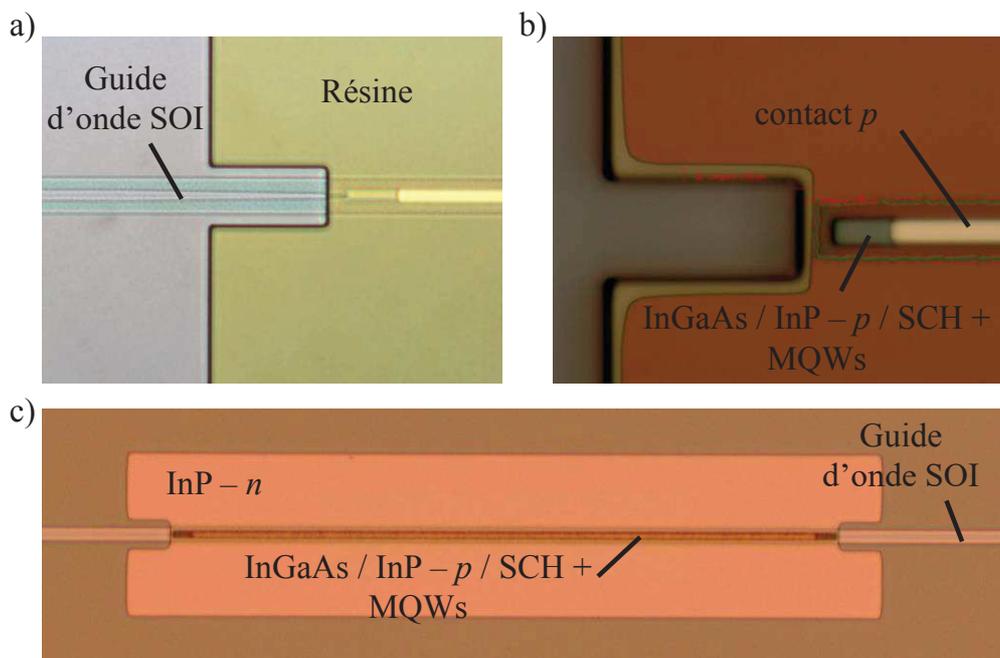
- La mauvaise définition du masque dur de SiN vraisemblablement due à un souci lors du dépôt soit du SiN lui-même, soit de la résine (un manque de données ne nous permet pas de statuer). Ceci entraîne une très mauvaise définition lors de la gravure humide de la SCH ainsi qu'une forte rugosité comme nous pouvons le voir sur la *Figure IV-28 b)*.
- La gravure humide d'une des plaques a été réalisée après le retrait de la résine et donc en présence du masque dur seul. Cette couche de SiN, trop fine, n'a pas été suffisante pour protéger le ruban de III-V. La chimie utilisée est sélective par rapport à l'InP mais pas par rapport à l'InGaAs présent entre l'InP-*p* et le contact *p*. Ceci a donc entraîné une gravure de cette couche dont nous pouvons voir, sur les images au microscope optique et MEB de la *Figure IV-28 c)* et de la *Figure IV-28 d)*, qu'il ne reste qu'un mince ruban. Sur certaines puces, le contact *p* a été presque entièrement décollé.

La recherche d'un masque dur et d'une résine adaptée à cette étape doit donc être étudiée afin d'éviter ces défauts de fabrication.



**Figure IV-28 : Images au microscope optique de GAIN+ avec en a) après la gravure de la SCH inférieure avec résine, en b) après la gravure de la SCH inférieure avec un problème de masque dur SiN et en c) après la gravure de la SCH inférieure sans résine, et en d) une image MEB d'une extrémité de guide III-V après la gravure de la SCH inférieure sans résine.**

La structuration de l'InP-n n'a pas posé de problèmes majeurs. Un exemple des résultats obtenus est présenté en *Figure IV-29*. La *Figure IV-29 a)* nous montre, après la lithographie MESA, le positionnement du futur InP - n par rapport au guide SOI sous-jacent. Sur la *Figure IV-29 b)*, nous pouvons remarquer la légère surgravure de l'InP - n, par rapport à la résine toujours présente, suite à sa gravure humide. Enfin, la *Figure IV-29 c)*, nous montre le résultat de la structuration du guide III-V suite au retrait de la dernière résine.



**Figure IV-29 : Images au microscope optique de MESA avec en a) après le lithographie, en b) après la gravure humide de l'InP-n (avec résine) et en c) après le retrait de la résine.**

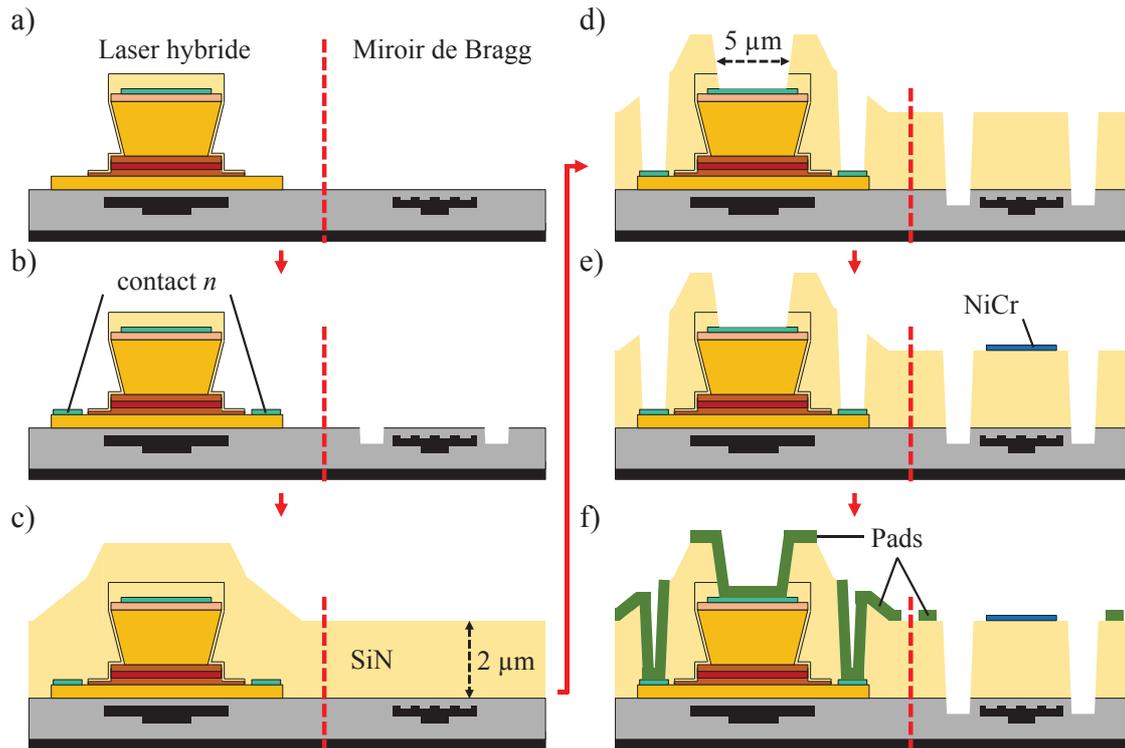
Le III-V étant structuré, les métallisations du laser et des chaufferettes peuvent être réalisées.

○ La métallisation du laser et des chaufferettes des miroirs de Bragg :

La fin du processus de fabrication des lasers est décrite en *Figure IV-30*. Après la structuration du guide III-V, le contact  $p$  est recuit afin de diminuer sa résistivité (*Figure IV-30 a*). La plaque subit quatre paliers de respectivement 40 secondes pour les températures de 150 °C, 250 °C et 350 °C et de 10 secondes pour la température maximale de 420 °C. Durant cette étape, aucun défaut notable n'a été constaté.

La structuration des métallisations de la cavité laser est alors réalisée en quatre sous-étapes majeures :

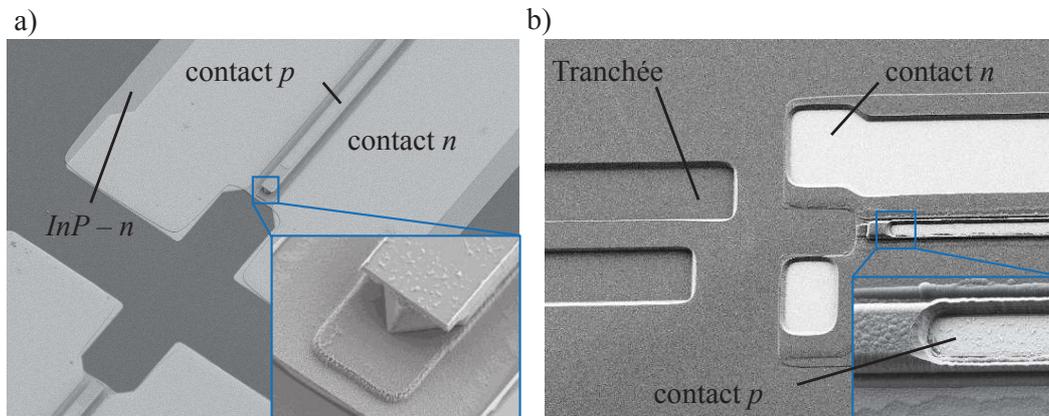
- La définition du contact  $n$  (*Figure IV-30 b*) : Durant cette sous-étape, un empilement de Ti / Pt / Au / Pt, de respectivement 10 nm, 50 nm, 200 nm et 10 nm d'épaisseur, est déposé par pulvérisation en utilisant la technique du lift-off, de la même manière que pour le contact  $p$ . La présence de Ti permet une meilleure accroche du contact métallique à la couche d'InP –  $n$ . Les couches de Pt, pour leur part, préviennent, pour l'une, de la diffusion de l'or dans l'InP et pour l'autre de la dégradation de la couche d'Au lors de la prochaine sous-étape d'ouverture des contacts. Cette métallurgie de contact ne nécessite pas de recuit à l'inverse de celle du contact  $p$ .
- L'encapsulation du III-V et l'ouverture des contacts (*Figure IV-30 c*) et *d*) : Suite au dépôt du contact  $n$ , la plaque est encapsulée dans une couche de nitrure de silicium d'une épaisseur de 2  $\mu\text{m}$ . L'avantage de ce dépôt SiN est de peu contraindre la plaque (contrainte inférieure à 50 MPa) ce qui préserve d'éventuelles déformations. En revanche, le dépôt utilisé est peu conforme et complique donc le procédé suivant. Afin de pouvoir réaliser la reprise de contact du laser, ce nitrure doit être gravé jusqu'aux différents contacts dont le niveau topographique n'est pas le même. Durant l'étape d'ouverture des contacts, présentée *Figure IV-30 d*), la gravure du SiN est faite sur trois niveaux différents : le contact  $p$ , le contact  $n$  et les tranchées des DBRs. L'intérêt de ces tranchées, s'arrêtant dans le SiO<sub>2</sub>, est de confiner la température induite par les chaufferettes aux miroirs lors de mesures d'accordabilité.
- La définition des chaufferettes des DBRs (*Figure IV-30 e*) : Un alliage de NiCr d'une épaisseur de 200 nm est déposé par pulvérisation en lift-off au-dessus des miroirs de Bragg. L'utilité de ce métal est d'induire une augmentation de température, fonction du courant le traversant, dans les DBRs afin de faire varier leur indice effectif. Ceci permet d'accorder la longueur d'onde d'émission du laser.
- La définition des métallisations finales de la cavité laser (*Figure IV-30 f*) : La fabrication de notre laser intégré hybride III-V/Si se termine par la définition de pads métalliques. Ceux-ci sont composés d'un empilement de Ti / Au / Ti / Au, de respectivement 30 nm, 300 nm, 30 nm et 1000 nm d'épaisseur. En utilisant la technique du lift-off, les deux premières couches sont déposées par pulvérisation tandis que les deux autres sont réalisées par évaporation. Ces pads servent lors de la mesure sous pointes des performances du laser.



**Figure IV-30 : Schémas de coupes transversales des métallisations de la cavité laser avec en a) après la structuration du III-V et le recuit du contact  $p$ , en b) la définition des contacts  $n$ , en c) le dépôt du SiN de protection, en d) l'ouverture des contacts et des tranchées des DBRs, en e) la définition des chaufferettes et en f) la définition des pads métalliques.**

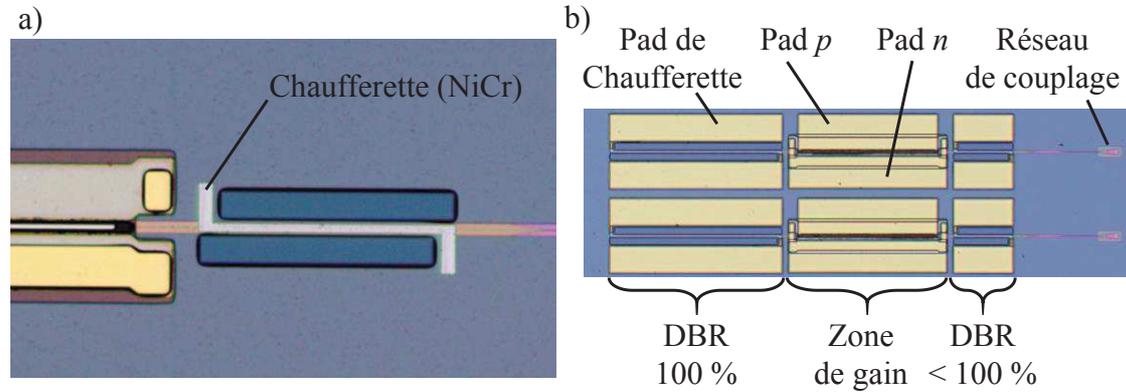
Des observations par microscope optique et par MEB ont permis de valider la bonne fabrication des métallisations de la cavité laser. La fin du processus de fabrication n'a pas engendré de défauts structurels majeurs.

La *Figure IV-31* présente les résultats obtenus après le dépôt du contact  $n$  et après l'ouverture du SiN d'encapsulation. Sur la *Figure IV-31 a)*, nous pouvons voir que le contact  $n$  recouvre bien la couche d'InP -  $n$ . Un problème de casse de la majorité des extrémités des guides III-V, dû à un problème de séchage, est cependant à noter. La *Figure IV-31 b)*, nous montre que les vias sont correctement alignés avec chacun des contacts et que les fonds de gravure ne présentent pas de résidus de polymère.



**Figure IV-31 : Images MEB de la définition des contacts du laser avec en a) après la structuration du contact  $n$  et en b) après l'ouverture, dans le SiN, des contacts et des tranchées des DBRs.**

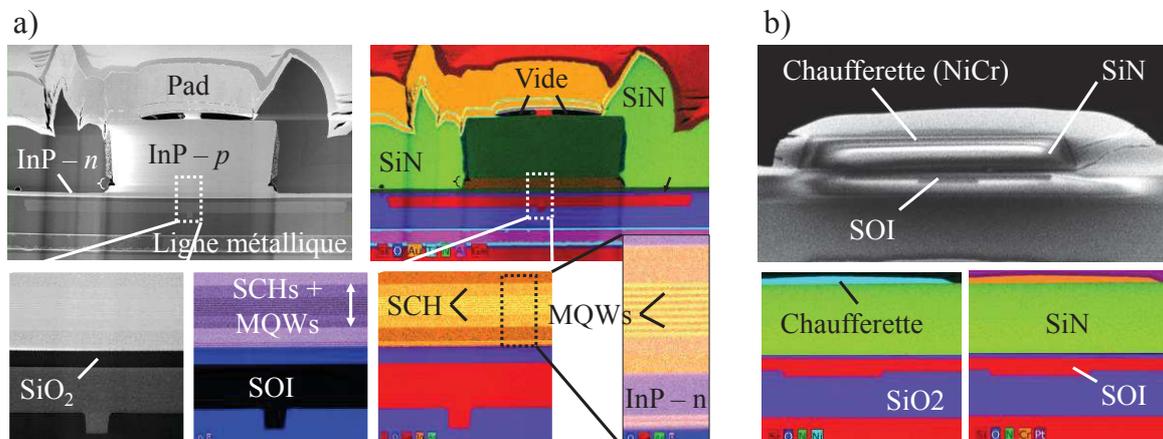
La *Figure IV-32* nous présente le résultat des dernières métallisations de la cavité. Sur la *Figure IV-32 a)*, nous pouvons voir que l'alignement de la couche de NiCr au-dessus d'un DBR et entre les tranchées est respecté. Une vue globale du dispositif fabriqué est montrée en *Figure IV-32b)*. Sur cette figure, nous pouvons voir les DBRs de part et d'autre de la zone de gain de la cavité. En sortie du dispositif, nous retrouvons le réseau de couplage associé à son réflecteur métallique.



**Figure IV-32 : Images au microscope optique des métallisations finales de la puce avec en a) la définition des chaufferettes et en b) après le dépôt des pads métalliques du laser et des DBRs.**

Enfin, des coupes TEM de la zone de gain et de DBRs nous ont permis de contrôler l'empilement des matériaux utilisés et de vérifier les aspects de flancs et d'interfaces de gravure.

Pour cela nous avons eu recours à différentes techniques de TEM dont de l'imagerie avec révélation des composés des matériaux. Des exemples de résultats obtenus sont montrés en *Figure IV-33*. La *Figure IV-33 a)* nous présente la zone de gain du laser hybride ainsi que des zooms des différentes zones d'intérêt de l'empilement, en teintes de gris et en révélation chimique. Sur ces images, nous pouvons notamment observer la surgravure latérale de la couche d'InP -  $p$  lors de sa gravure humide. Nous pouvons également vérifier l'épaisseur du SiO<sub>2</sub> entre le guide III-V et le guide laser SOI. Ces images TEM ont été réalisées sur la plaque ayant subi le problème de gravure lors du retrait humide de la fin de la SCH inférieure : nous pouvons donc remarquer qu'il existe un vide entre le contact métallique  $p$  et l'InP -  $p$  sur une grande partie de la surface du contact. Ce défaut de fabrication n'est pas présent sur les autres plaques. La *Figure IV-33 b)* nous détaille l'empilement présent au-dessus d'un miroir de Bragg. Sur ces images, le pad métallique n'est pas visible. Nous pouvons en revanche y vérifier les épaisseurs de SiN et de NiCr présents.



**Figure IV-33 : Images TEM de coupes transversales de la cavité laser avec en a) la zone de gain et en b) un miroir de Bragg.**

A l'issue de ces étapes, nous avons donc réalisé un laser hybride DBR III-V/Si compatible avec la présence d'interconnexions métalliques de pilotage, représentées par une ligne métallique servant également de réflecteur au réseau de couplage surfacique.

## IV.4 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons exposé les étapes de la fabrication d'un laser DBR hybride III-V/Si en configuration Back-Side. Nous avons montré que cet enchaînement technologique est séparable en deux parties distinctes dont la structuration est réalisée de manière indépendante : la partie SOI et la partie III-V.

Ainsi, dans la première partie du chapitre, nous avons détaillé l'innovation apportée par notre nouveau schéma d'intégration, à savoir la structuration du SOI en configuration Back-Side. Pour cela, nous avons tout d'abord présenté l'enchaînement des étapes ainsi que les techniques de structuration nécessaires à la réalisation de la partie SOI du laser hybride. Nous avons montré que le processus de fabrication pouvait être séparé en trois sous-étapes majeures :

1. La structuration en Front-Side,
2. Le collage d'une poignée de silicium et le retournement de l'empilement,
3. La structuration en Back-Side.

La structuration Front-Side nous a permis de réaliser les guides d'ondes monomodes et les réseaux de couplage surfacique, représentatifs de dispositifs existants sur une puce photonique sans laser, ainsi que le *rib* et une partie du *slab* du guide laser. Lors de cette sous-étape, une partie essentielle de notre cavité laser est définie : les épanouisseurs adiabatiques. Nous avons montré que, malgré une surgravure des motifs, nous obtenons les structures recherchées. La couche métallique représentative des interconnexions et essentielle pour le bon fonctionnement du réseau de couplage surfacique est alors réalisée.

L'innovation du schéma d'intégration est le collage d'une poignée de silicium à la surface du SOI et le retournement de l'empilement. Dans cette sous-étape, nous avons démontré qu'une attention toute particulière devait être portée à la planarisation de l'oxyde à la suite de chaque encapsulation. Enfin, après le retrait du substrat initial et du BOX, la structuration Back-Side du SOI permet de définir les miroirs de la cavité et de séparer les différents lasers. L'utilisation de lithographies e-beam a permis d'obtenir les motifs des réseaux de Bragg et des pointes du transformateur de mode en sortie de cavité laser. Suite à cette étape, nous remplissons, pour la partie silicium, les critères essentiels pour le bon fonctionnement d'un laser hybride III-V sur silicium compatible avec une puce photonique contenant des interconnexions métalliques :

- Nous disposons d'une surface plane pour le collage de III-V.
- L'épaisseur de  $\text{SiO}_2$  est contrôlée et correspond à la valeur souhaitée.
- La plaque dispose d'une couche métallique enterrée représentative des interconnexions métalliques.

Dans un second temps, nous avons montré que nous pouvions reprendre les briques technologiques de structuration du guide III-V et des métallisations de la cavité laser développées lors d'études précédentes [2], [3] afin de réaliser notre laser hybride.

Après le collage du III-V et un détournage de notre plaque SOI, le processus de fabrication a été poursuivi sur une plateforme 100 mm en raison des techniques de dépôts des métaux. Les étapes successives de lithographies et de gravures ont permis de définir le guide III-V et ainsi la zone de gain de notre cavité laser. Enfin, les étapes de métallisations du laser et des chaufferettes des miroirs de Bragg concluent le processus de fabrication de notre dispositif.

Nous avons ainsi démontré une façon d'élaborer un laser DBR hybride III-V/Si compatible avec la présence d'un empilement d'interconnexions métalliques, nécessaire aux dispositifs actifs de la puce, à travers une configuration innovante : le Back-Side.



# Chapitre V : Caractérisations Optiques et Perspectives

## Sommaire

---

V.1	Introduction .....	120
V.2	Les caractérisations optiques des cavité lasers .....	120
5.2.1	Les caractérisations des éléments passifs .....	120
5.2.2	Les caractérisations du laser en puissance et en spectre.....	123
5.2.3	L'accordabilité de la cavité DBR .....	128
V.3	Perspectives .....	130
5.3.1	Améliorations du processus de fabrication de la cavité laser .....	130
5.3.2	Améliorations des performances du système et développements en vue d'une industrialisation .....	132
V.4	Conclusion.....	133

---

## V.1 INTRODUCTION

Suite à la fabrication de la cavité laser hybride DBR III-V/Si et de son réseau de couplage surfacique, nous avons caractérisé optiquement les performances du dispositif. Ce chapitre est consacré à la présentation de ces résultats ainsi qu'à la formulation des perspectives apportées par ce travail de thèse.

Dans un premier temps, nous présenterons tout d'abord les performances des éléments passifs du système étudié, à savoir le réseau de couplage surfacique et les réflecteurs de Bragg de la cavité laser. Les caractéristiques statiques en puissance et en spectre du laser seront ensuite détaillées. Nous aborderons enfin les résultats préliminaires de l'accordabilité en longueur d'onde de la cavité ainsi que les caractéristiques de chaufferettes déposées au-dessus des miroirs de Bragg. Ces derniers résultats seront alors comparés avec ceux obtenus avec des dispositifs de type Front-Side.

Dans la seconde et dernière partie, nous présenterons les améliorations envisagées afin d'optimiser le processus de fabrication d'un dispositif en configuration Back-Side et sa répétabilité. Enfin, nous détaillerons certains des développements nécessaires afin, d'une part, d'améliorer les performances de la cavité laser et, d'autre part, de permettre une industrialisation d'une puce photonique complète dotée d'un laser hybride III-V/Si.

## V.2 LES CARACTERISATIONS OPTIQUES DES CAVITE LASERS

Durant cette thèse, les caractérisations optiques des composants ont été réalisées au CEA-Leti, dans les locaux du laboratoire LCPC (Laboratoire des Composants Photonique CMOS), possédant des instruments dédiés à la mesure de dispositifs optiques.

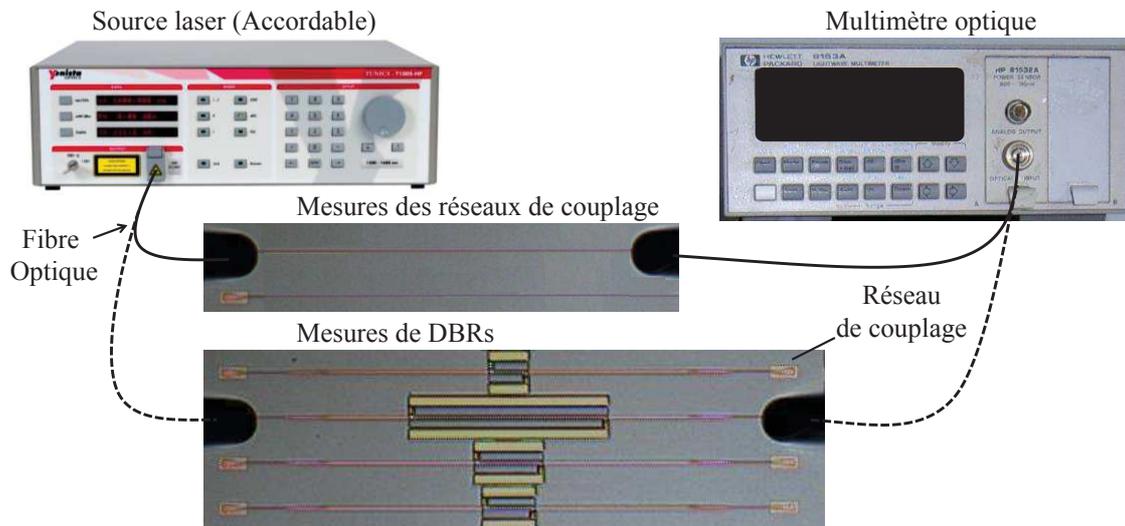
Parmi ceux-ci, et pour toutes les mesures que nous présenterons, nous avons eu recours à un support mobile appelé *prober* permettant de manipuler les plaques suivant les axes de translations et l'axe de rotation dans le plan de la plaque. Un système d'aspiration assure le maintien de la plaque sur le *prober* et un système de chauffage permet de faire varier sa température entre la température ambiante et une centaine de degré Celsius. Les différents instruments nécessaires aux mesures des performances de nos dispositifs sont alors disposés autour de la plaque et puis reliés aux appareils.

Dans cette partie du chapitre, nous présentons les résultats de la cavité laser dont la fabrication a été explicitée dans le chapitre précédent. Tout d'abord, nous abordons les performances des éléments passifs du dispositif : le réseau de couplage surfaciques et les miroirs de Bragg. Ensuite, nous détaillons les caractéristiques statiques du laser hybride Back-Side et nous terminons par l'accordabilité obtenue grâce aux chaufferettes disposées au-dessus des DBRs.

### 5.2.1 *Les caractérisations des éléments passifs*

Avant de caractériser les performances du laser, il est nécessaire de connaître les performances des éléments passifs du dispositif fabriqué. Pour cela, l'efficacité de couplage du réseau surfacique ainsi que la réflectivité des miroirs de Bragg de la cavité doivent être mesurées.

Le système permettant de mesurer ces dispositifs est présenté en *Figure V-1*. Une source laser, accordable sur une bande de longueur d'onde d'une centaine de nanomètres autour de 1310 nm, permet d'injecter le signal lumineux, typiquement d'une puissance d'un microwatt, via une fibre optique monomode, dans le réseau de couplage d'entrée du dispositif. En sortie, un deuxième réseau permet de coupler le signal lumineux dans une seconde fibre optique monomode qui est ensuite mesurée par un photodétecteur.



**Figure V-1 : Système de mesure des éléments passifs du dispositif : le réseau de couplage surfacique et les DBRs.**

Grâce à ce système, nous évaluons les performances du réseau de couplage surfacique, puis des miroirs de Bragg en fonction de la longueur d'onde du signal lumineux.

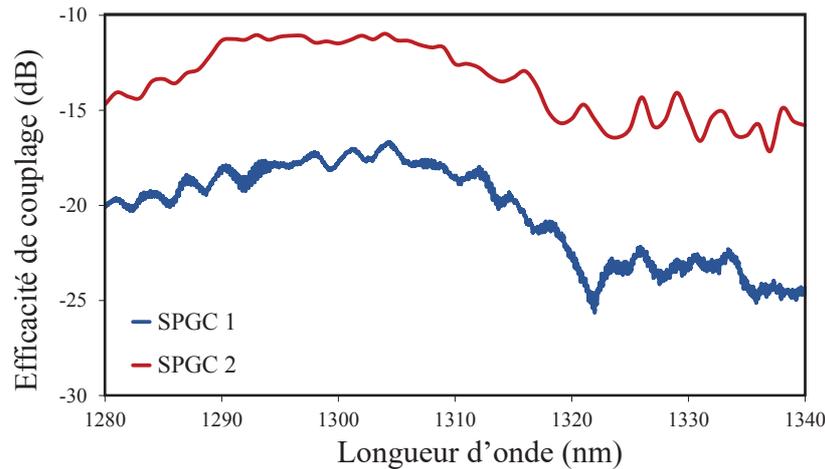
○ Le réseau de couplage surfacique :

Avant de mesurer les performances du coupleur, une vérification de son angle de sortie optimal est nécessaire. Pour cela, avec un signal réglé à une longueur d'onde de 1310 nm, les fibres d'entrée et de sortie sont alignées, le plus proche possible de la plaque, de manière à obtenir le maximum de puissance. La fibre de sortie est ensuite remontée d'une hauteur connue, typiquement 1 mm. Le faisceau diffracté par le coupleur étant considéré comme suffisamment collimaté à cette distance, un nouvel alignement de la fibre est réalisé et le décalage nécessaire pour l'obtenir est déterminé. L'angle d'émission est alors simplement déduit par trigonométrie.

Dans notre étude, le réseau de couplage surfacique est dimensionné de manière à diffracter la lumière avec un angle de  $8^\circ$  dans l'air. Cependant, en raison de surgravures constatées lors de la fabrication (Chapitre IV - 4.2.2), nous avons mesuré un angle optimal de  $4,5^\circ$ . Les performances du coupleur sont donc mesurées en tenant compte de ce changement.

De la même manière que les réseaux présentés dans le Chapitre II, l'efficacité de couplage de la paire de réseaux d'entrée et de sortie est mesurée en fonction de la longueur d'onde d'émission puis divisée par deux afin d'obtenir celle d'un seul coupleur. Les résultats de ces mesures pour deux coupleurs différents sont exposés en *Figure V-2*.

Nous remarquons que les performances obtenues sont inférieures à -10 dB par coupleur et présentent une forte dispersion (environ 6 dB pour ces deux dispositifs).



**Figure V-2 : Spectres de l'efficacité de couplage de deux réseaux de couplage surfacique en fonction de la longueur d'onde.**

Deux facteurs peuvent expliquer ces mauvaises performances :

- L'impact de la surgravure, et donc de la détérioration du facteur de remplissage, sur l'onde diffractée par le réseau.
- Une épaisseur mal adaptée entre le réseau de couplage et son réflecteur métallique.

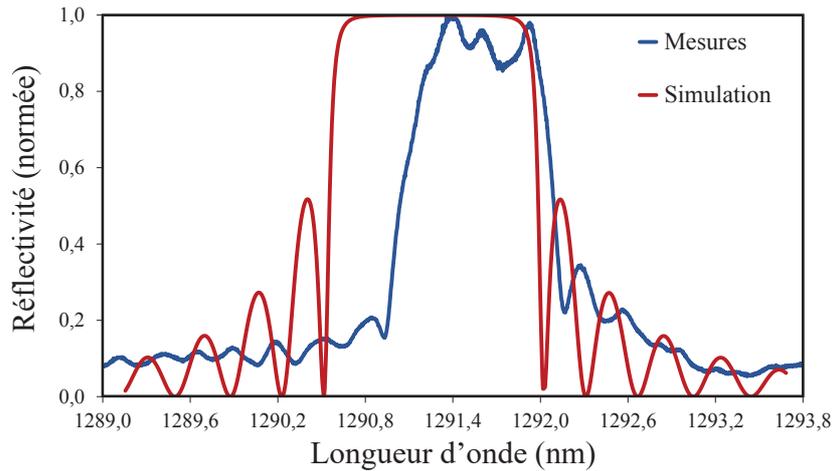
Les mesures de performances du laser exposées dans la suite de ce chapitre ne sont pas pondérées et doivent donc être mises en perspectives en tenant compte de cette faible efficacité de couplage.

Compte tenu des performances du réseau de couplage ainsi que des faibles longueurs de guides d'onde monomodes utilisées, inférieures à la centaine de microns, leurs pertes linéiques n'ont pu être évaluées.

○ Le miroir de Bragg :

Afin de vérifier le bon fonctionnement des miroirs de Bragg, une mesure de leur réflectivité en fonction de la longueur d'onde a été effectuée grâce au même système de mesure que celui utilisé pour les réseaux de couplage. Les résultats obtenus sur un DBR de 600  $\mu\text{m}$  de long, correspondant à une réflectivité théorique de 100 %, et d'une période de 193 nm, correspondant à une longueur d'onde centrale théorique de 1291 nm, sont exposés en *Figure V-3*. Ils sont comparés avec les résultats obtenus par la simulation.

Bien que le spectre mesuré sur ce premier prototype diffère sensiblement de celui visé lors du dimensionnement, nous remarquons que la longueur d'onde centrale ainsi que la réflectivité sont relativement bien respectées. La largeur à mi-hauteur de la courbe mesurée vaut environ 1 nm. Elle est plus faible que celle simulée qui est de 1,5 nm. Ceci peut provenir de la décote observée lors la gravure du réseau. Le miroir fabriqué est donc plus sélectif en longueur d'onde que ce que nous avons simulé.

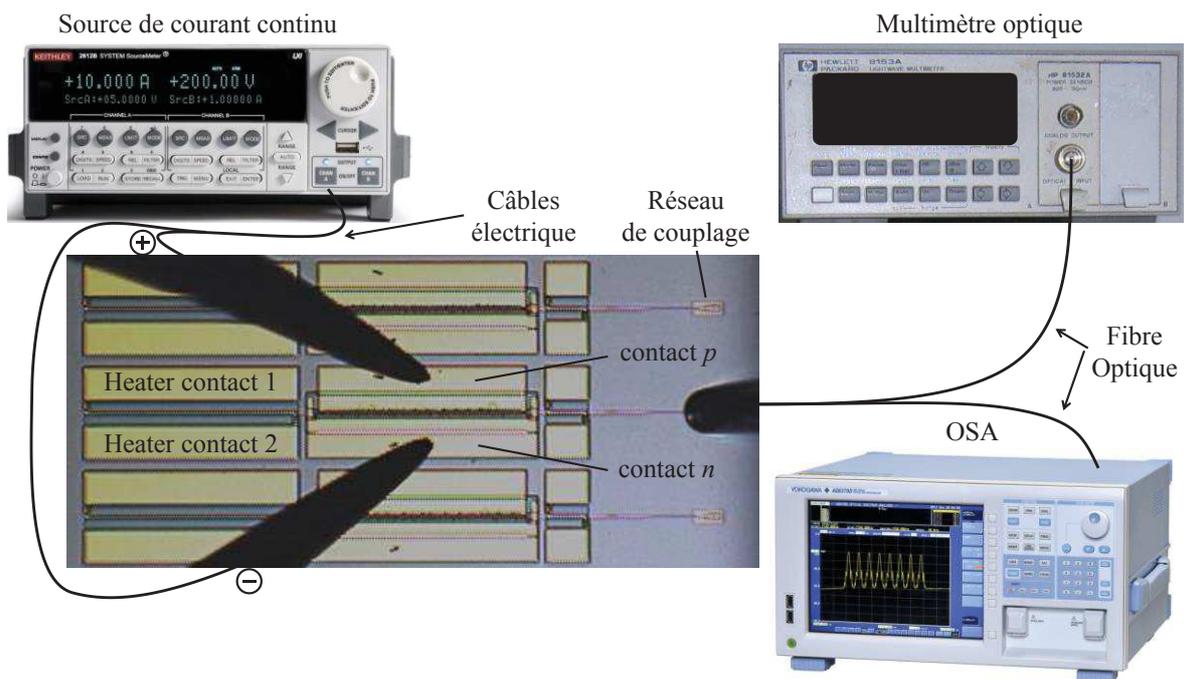


**Figure V-3 : Spectres de la réflectivité d'un DBR de 600 µm de long en fonction de la longueur d'onde.**

Les performances des dispositifs passifs ayant été mesurées, nous pouvons décorrélérer leurs effets des performances du laser.

### 5.2.2 Les caractérisations du laser en puissance et en spectre

Les mesures réalisées sur les lasers sont des mesures des performances statiques du dispositif. Elles sont effectuées sous injection d'un courant continu à température ambiante. Un schéma du système de mesure est présenté en *Figure V-4*. Le laser est donc pompé électriquement, en polarisation directe, à l'aide de deux pointes reliées à une source de courant continu. En sortie du dispositif, un réseau de couplage surface diffracte le signal lumineux généré vers une fibre optique multimodes orientée avec un angle de 4,5 ° par rapport à la verticale. Cette fibre optique peut être reliée soit à un puissance-mètre pour les mesures de puissance lumineuse, soit à un analyseur de spectre optique ou OSA (Optical Spectrum Analyser) pour les caractéristiques du laser en fonction de la longueur d'onde.



**Figure V-4 : Système de mesure des performances statiques de la cavité laser.**

Pour les mesures d'accordabilités, deux paires de pointes supplémentaires reliées à une source de courant continu sont utilisées. Les pointes, posées sur les contacts des chaufferettes des DBRs, ne nécessitent pas de polarisation particulière.

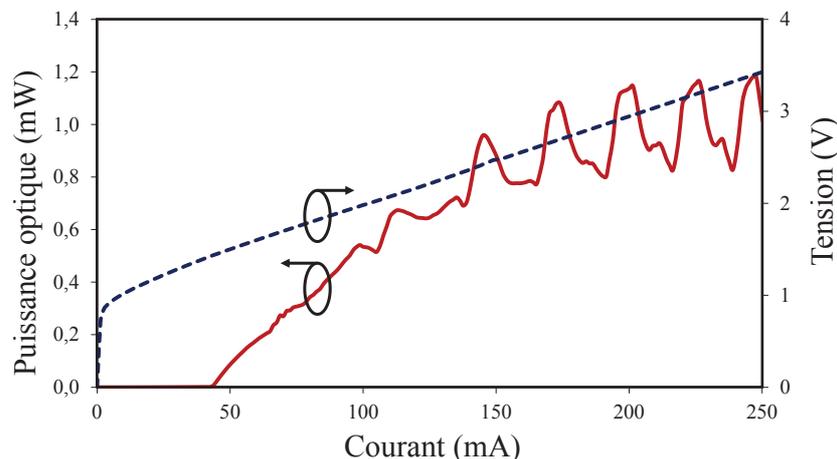
Grâce à ce système de mesures, nous pouvons caractériser les performances du laser en puissance et en longueur d'onde.

○ Les caractéristiques du laser en puissance :

Tout d'abord, nous avons réalisé une mesure des caractéristiques L-I-V (Light-Intensity-Voltage) du dispositif, c'est-à-dire de l'évolution de la puissance lumineuse récoltée et de la tension aux bornes de la diode en fonction du courant injecté. Pour cela, nous utilisons le système de mesure décrit en *Figure V-4* avec la fibre optique de sortie connectée au puissance-mètre.

Un exemple de résultat obtenu est montré en *Figure V-5*. Sur cette figure, nous remarquons, sur la courbe de la puissance de sortie en fonction du courant injecté, que le dispositif a les caractéristiques d'un laser avec un courant de seuil évalué à 45 mA, correspondant à une densité de courant de 1,5 kA/cm<sup>2</sup>. La puissance maximale, récoltée dans la fibre optique externe, de ce laser est de 1,15 mW pour un courant d'injection de 200 mA. En considérant des pertes induites par le réseau de couplage de 12 dB, nous évaluons à environ 18,2 mW la puissance lumineuse dans le guide d'onde monomode. Cette courbe met également en évidence un comportement typique d'un laser DBR, détaillé plus loin dans ce chapitre, avec des sauts de modes pour un courant injecté supérieur à 100 mA.

Grâce à la courbe de la tension aux bornes de la diode laser, nous estimons la résistance série des contacts du laser à environ 9  $\Omega$ . La tension au courant de seuil est de 1,45 V ce qui nous donne une puissance électrique nécessaire pour atteindre le seuil de transparence de 65 mW.

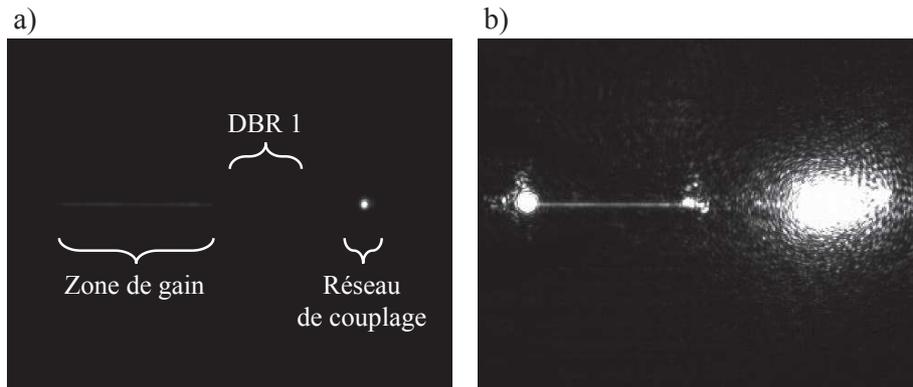


**Figure V-5 : Caractéristiques L-I-V d'un laser.**

Afin de visualiser le comportement du dispositif en fonction du courant injecté dans la cavité, des observations à la caméra infrarouge ont été réalisées. Les clichés obtenus avant et après le courant de seuil sont exposés en *Figure V-6*. Nous remarquons que lorsque le courant est supérieur à celui de seuil (*Figure V-6 b*), l'intensité lumineuse diffractée par le réseau de couplage est particulièrement importante comparée à avant le seuil (*Figure V-6 a*).

Le cliché du dispositif sous un courant d'injection de 110 mA nous montre également que nous avons des pertes non négligeables à chaque extrémité du guide III-V. Ce phénomène vient vraisemblablement des défauts de gravures lors des étapes de structuration d'une part du *rib* du taper adiabatique et d'autre part de la partie active de la zone de gain.

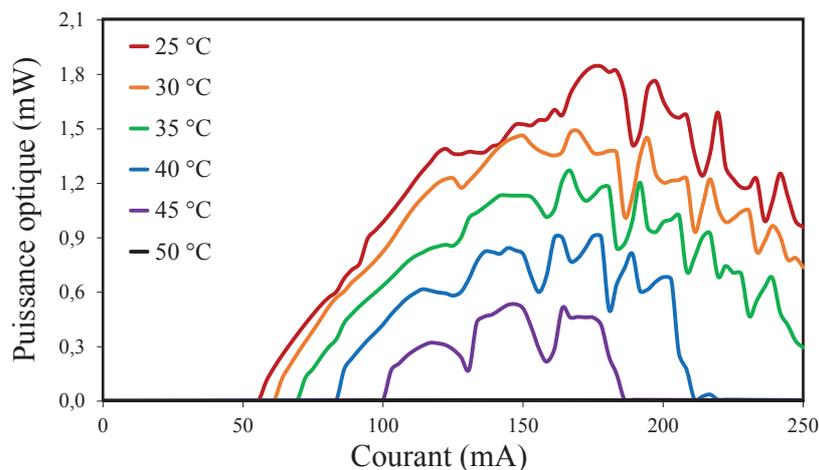
En effet, d'après une simulation du taper adiabatique avec les dimensions du motif structuré, l'efficacité de couplage du taper n'est plus que de 75 % au lieu de quasiment 100 %. Une partie non négligeable de la lumière générée dans la zone active n'est ainsi pas transférée dans le guide SOI et est soit réfléchi, soit diffractée aux extrémités du guide III-V.



**Figure V-6 : Clichés en imagerie infrarouge du dispositif avec en a) avant le courant de seuil (20 mA) et en b) après le courant de seuil (110 mA).**

Enfin, nous avons étudié l'évolution des performances L-I en fonction de la température d'un dispositif entre la température ambiante et 50 °C. La hausse de température est apportée par le module de chauffage du *prober*. Les résultats de ces mesures sont exposés en *Figure V-7*. Sur cette figure, nous remarquons que pour une température de 40 °C, la puissance émise diminue de moitié et que l'effet laser disparaît pour une température de 50 °C.

Des études complémentaires sont donc nécessaires afin d'améliorer les étapes de structuration du III-V et d'apporter une thermalisation plus efficace du laser.



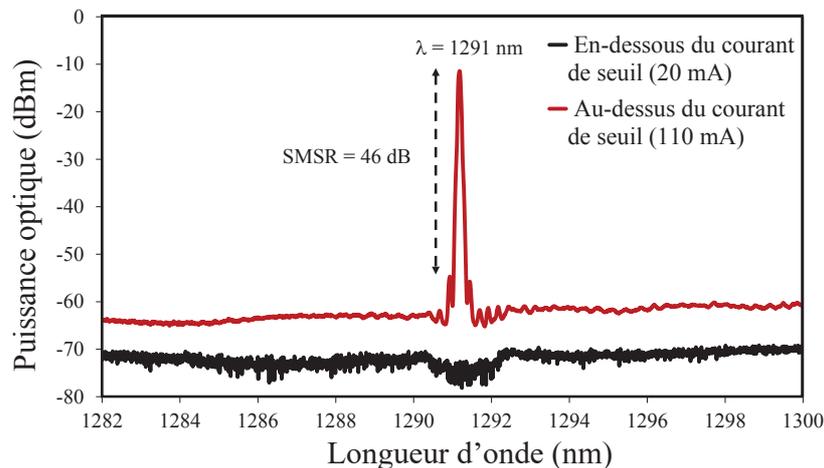
**Figure V-7 : Caractéristiques L-I d'un laser pour plusieurs températures de fonctionnement.**

Les caractéristiques en puissance et la tenue en température du dispositif fabriqué étant connues, il convient de vérifier le caractère mono-longueur d'onde du laser. Pour cela, des mesures de la puissance de sortie du laser en fonction de la longueur d'onde pour plusieurs courants d'injection ont été réalisées.

○ Les caractéristiques du laser en longueurs d'ondes :

Pour la caractérisation du spectre du laser à courant d'injection fixe, nous utilisons le système de mesure décrit en *Figure V-4* avec la fibre optique de sortie connectée à l'OSA. Les résultats obtenus pour un courant d'injection respectivement sous le seuil de 20 mA et au-dessus du seuil de 110 mA sont exposés *Figure V-8*. La période des DBRs est de 193 nm, ce qui correspond à une réflectivité théorique maximale pour une longueur d'onde de 1291 nm.

Nous remarquons que pour un courant d'injection de 20 mA, il n'y a pas d'émission laser contrairement à pour un courant d'injection de 110 mA. La longueur d'onde d'émission du laser correspond bien à celle de la réflectivité maximale des DBRs. Ces mesures nous prouvent que pour une injection de 110 mA, le laser est mono-longueur d'onde et présente un SMSR (Side Mode Suppression Ratio) de 46 dB.



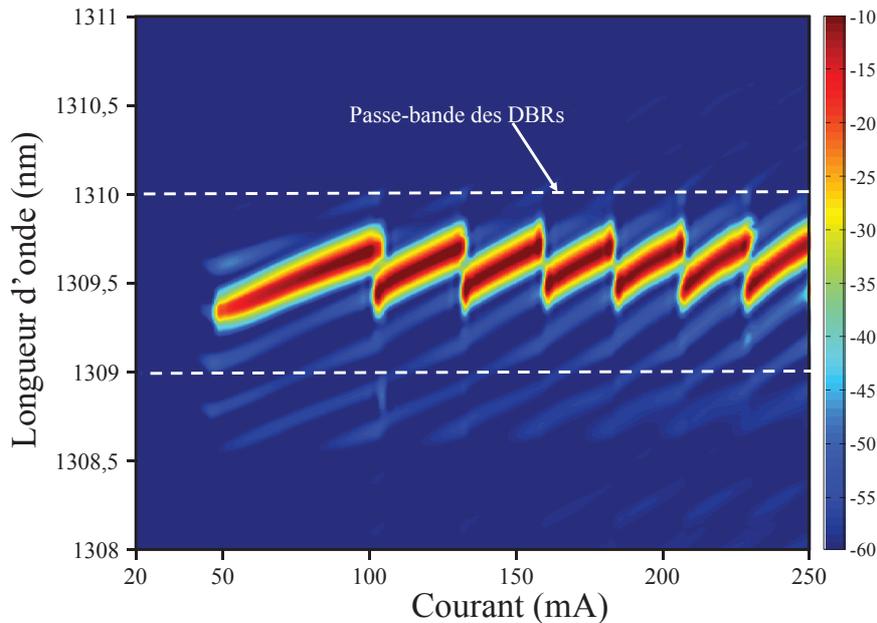
**Figure V-8 : Spectres de la puissance de sortie d'un laser avant et après le courant de seuil en fonction de la longueur d'onde.**

Comme nous l'avons vu précédemment, la courbe L-I du dispositif présente une signature typique d'un laser DBR. Dans le Chapitre III, nous avons vu que notre laser est une cavité de type Fabry-Pérot dont les miroirs ne sont plus discrets mais distribués. Le spectre d'émission d'une telle cavité est un peigne de fréquences dont les longueurs d'ondes et l'espacement (FSR) dépend des conditions et des dimensions de la cavité.

Ainsi, plus le courant injecté dans la zone active est important, plus la température au niveau des MQWs augmente, due à des effets thermo-optiques. Ceci a pour effet de changer l'indice effectif des matériaux et donc la condition d'interférences constructives et le FSR de la cavité (Chapitre III *Equation 3.12* et *Equation 3.13*). Le peigne de fréquences de la cavité est ainsi décalé vers les plus grandes longueurs d'ondes. En revanche, les conditions de température au niveau des miroirs de Bragg n'évoluent pas : la longueur d'onde du maximum de réflectivité ne varie pas.

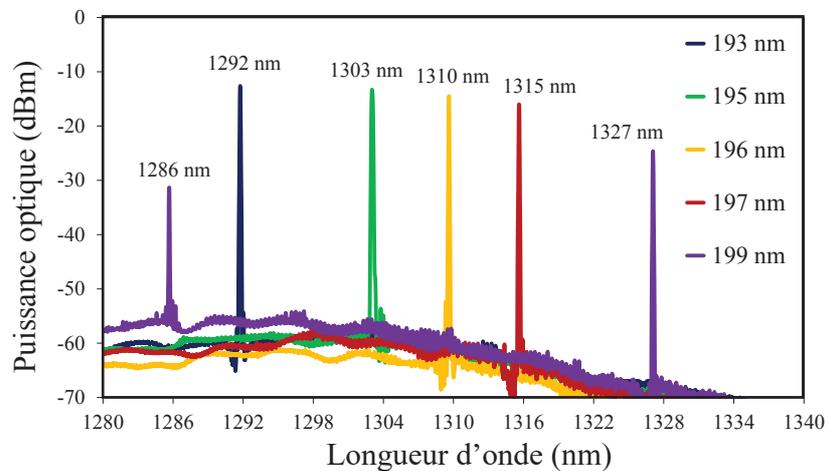
La compétition modale au sein de la cavité évolue donc en fonction du courant injecté. Pour certaines valeurs de courants, il existe deux modes remplissant les conditions de gain et de déphasage de la cavité et le laser émet donc deux longueurs d'ondes différentes.

Une cartographie de la puissance émise par le laser, possédant des DBRs de période 196 nm, dans la fibre optique en fonction de la longueur d'onde et du courant injecté est illustrée en *Figure V-9*. Sur cette figure, nous remarquons les sauts de mode de l'onde lumineuse émise. La fréquence d'émission du laser est bornée par la convolution des spectres de réflectivités des DBRs.



**Figure V-9 : Cartographie de la puissance de sortie d'un laser en fonction de la longueur d'onde d'émission et du courant injecté.**

Enfin, une caractérisation du spectre d'émission de laser disposant des mêmes dimensions mais de période de DBRs différentes a été effectuée. Les résultats pour les cinq périodes différentes, pour un courant d'injection de 120 mA, sont exposés en *Figure V-10*. Sur cette figure, nous remarquons que les longueurs d'ondes d'émissions sont toutes respectées par rapport aux longueurs d'onde de Bragg des DBRs, à l'exception de la plus grande période dont le laser possède deux pics d'émissions laser.



**Figure V-10 : Spectres de la puissance de sortie d'un laser pour cinq périodes des DBRs en fonction de la longueur d'onde.**

Pour le laser possédant des miroirs de Bragg avec la période la plus grande, les deux pics laser traduisent deux types de fonctionnement :

- La longueur d'onde de 1286 nm correspond au maximum de la photoluminescence de l'épitaxie laser collée sur la plaque SOI. Le pic d'émission laser à cette longueur d'onde est dû à un effet Fabry-Pérot sur les facettes gravées à chaque extrémité du guide III-V. Il s'agit d'une émission parasite.
- La longueur d'onde de 1327 nm correspond à la convolution du maximum de réflectivité des DBRs. Il s'agit donc de l'émission souhaitée pour ce laser hybride DBR.

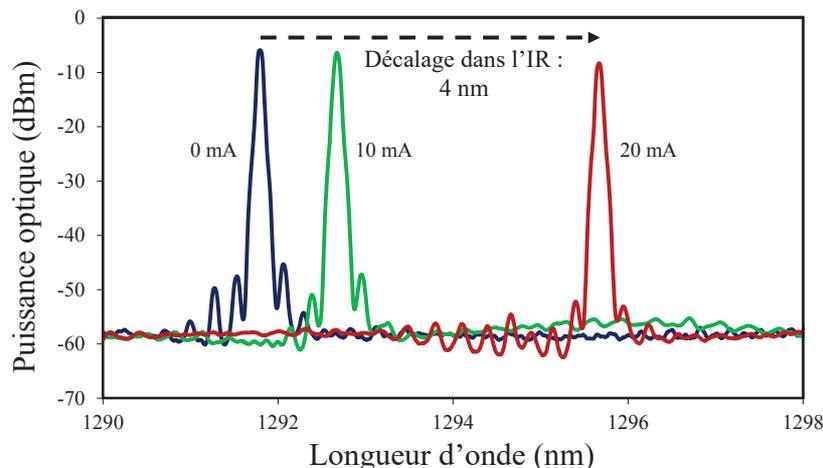
Enfin, les meilleures performances en puissance des lasers aux plus faibles longueurs d'ondes s'expliquent par le fait que le maximum de gain de l'épitaxie III-V utilisée se situe en 1295 nm et 1300 nm.

L'un des autres avantages d'une cavité DBR est de pouvoir, à courant d'injection fixe, être accordable en longueur d'onde. Pour cela, il suffit de faire varier les conditions de réflectivité de ses miroirs de Bragg, par exemple en jouant sur leurs indices effectifs.

### 5.2.3 L'accordabilité de la cavité DBR

Afin de faire varier l'indice effectif des DBRs, nous utilisons les chaufferettes métalliques déposées au-dessus de ceux-ci. A l'aide de pointes électriques, nous appliquons un courant continu aux bornes de ces chaufferettes. L'augmentation de température qui en résulte permet de décaler le spectre de réflectivité du DBR vers de plus grandes longueurs d'ondes.

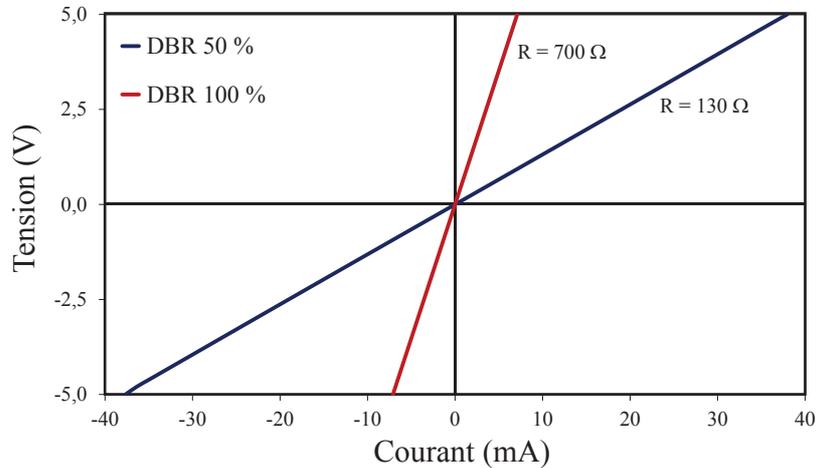
Les résultats obtenus pour trois courants d'injections différents dans les chaufferettes des DBRs d'une cavité laser dont l'émission, sans modification, est centrée à 1292 nm, sont exposés en *Figure V-11*. La zone active est alimentée par un courant de 120 mA et les mesures sont réalisées à température ambiante. Dans les trois configurations, les deux DBRs de la cavité laser sont alimentés par le même courant. Sur cette figure, nous remarquons que pour un courant de 10 mA, le décalage en longueur d'onde n'est que de 1 nm. En revanche, pour un courant de 20 mA, un décalage de 4 nm est observé.



**Figure V-11 : Spectres de la puissance de sortie d'un laser (110 mA) pour trois valeurs de courant injecté dans les chaufferettes des DBR en fonction de la longueur d'onde.**

Afin de déterminer la résistivité des chauffettes, nous avons mesuré la tension à leurs bornes en fonction du courant injecté. Les résultats pour des miroirs de Bragg de 600  $\mu\text{m}$  et de 110  $\mu\text{m}$  de long, soit respectivement 100 % et 50 % de réflectivité, sont montrés en *Figure V-12*.

Les résistances mesurées sont de respectivement de 700  $\Omega$  pour le DBR le plus long et de 130  $\Omega$  pour le plus court. Ces valeurs de résistances sont relativement élevées.



**Figure V-12 : Caractéristiques V-I des chauffettes de deux DBRs.**

Pour un décalage de 4 nm, la puissance nécessaire dans les chauffettes est donc respectivement de 280 mW pour le DBR de 600  $\mu\text{m}$  de long et de 52 mW pour le DBR de 110  $\mu\text{m}$  de long. Dans le cas du plus long DBR, au-delà de 20 mA, la chauffette métallique est généralement irrémédiablement endommagée.

Afin de comprendre les phénomènes mis en jeu, une comparaison avec une étude sur des structures similaires est nécessaire. H. Duprez, a décrit une étude plus approfondie de l'accordabilité de la longueur d'onde d'émission d'un laser DBR à l'aide de chauffettes dans son manuscrit (4.1. Tuning material [2]). Dans son cas, la structure SOI possède quasiment les mêmes dimensions que celle de notre dispositif. La couche métallique déposée n'est cependant pas 200 nm de NiCr mais 250 nm de NiFe.

En alimentant chacun des DBRs de sa structure de manière à optimiser le recouvrement des deux spectres de réflectivité de miroirs, elle a prouvé l'accordabilité d'un laser sur une plage de longueurs d'ondes de 13,8 nm. La puissance dissipée par ses miroirs de Bragg de 700  $\mu\text{m}$  et 200  $\mu\text{m}$  de long pour atteindre un décalage de 4 nm est respectivement d'environ 620 mW et 150 mW. En revanche la résistance des chauffettes n'est que de 120  $\Omega$  pour le DBR de 700  $\mu\text{m}$  et 20  $\Omega$  pour celui de 200  $\mu\text{m}$ .

Ces études nous montrent que plus la chauffette est résistive, et moins il est requis de puissance pour atteindre un certain décalage. En revanche, la plage de longueur d'onde d'accordabilité en est d'autant plus limitée.

Il faut également noter que le décalage en longueur d'onde observé n'est pas continu : il est obtenu par saut de mode lors du décalage de la convolution des spectres de réflectivité des miroirs de Bragg de la cavité. Cependant, un décalage quasiment continu est possible pour ce type de cavité en utilisant un effet Vernier [97].

### V.3 PERSPECTIVES

Durant ces travaux, nous avons prouvé la faisabilité d'un laser hybride DBR III-V/Si en utilisant une approche de type Back-Side. La fabrication et la caractérisation d'un tel prototype a mis en évidence de nombreux axes d'amélioration afin d'obtenir une puce photonique de transmission et de réception haut débit industrialisable.

Dans ce paragraphe, nous détaillons les pistes d'améliorations concernant tout d'abord les aspects de la fabrication du laser. Enfin, nous exposons les développements envisagés pour augmenter les performances du système et le rendre productible à fort volume.

#### 5.3.1 Améliorations du processus de fabrication de la cavité laser

La fabrication du dispositif étudié repose sur une structuration du SOI sur une plateforme 200 mm puis du collage d'une plaque de 3'' de matériaux III-V. Afin de pouvoir structurer le III-V et le métalliser, la plaque SOI a dû être détournée pour ne faire plus que 100 mm de diamètre. De plus, seule une infime partie du III-V collée est réellement utilisée. Ceci représente une forte perte dans le rendement des puces disponibles ainsi qu'un coût de production très élevé en raison du prix des épitaxies III-V.

Afin de régler certains problèmes rencontrés lors de la fabrication du dispositif et d'optimiser le rendement, plusieurs pistes sont envisageables.

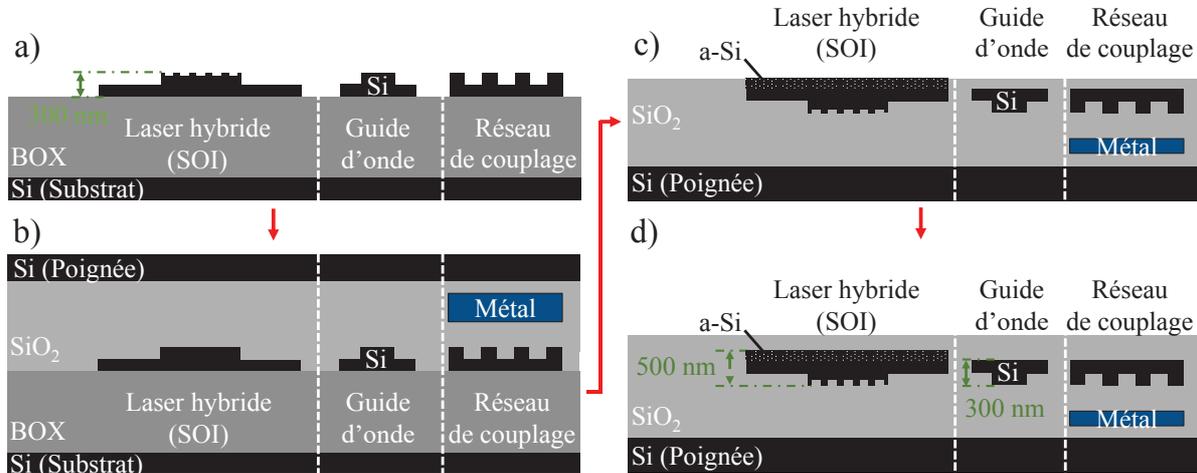
- La structuration du SOI sur une plateforme 300 mm (type STMicroelectronics) :

Lors de la caractérisation des composants, nous avons mis en évidence que les défauts de surgravures et de planarisations sont extrêmement préjudiciables pour les performances du dispositif. La structuration de la partie SOI du laser hybride sur une plateforme 300 mm dont des procédés de fabrications dédiés sont d'ores et déjà développés permettrait de s'affranchir de ce type de problèmes. De plus, l'utilisation de l'OPC faciliterait la bonne correspondance entre les dimensions de motifs souhaitées et celles obtenues sur plaque. STMicroelectronics dispose d'une plateforme compatible avec la production de puces photoniques industrialisables.

En revanche, la disponibilité de substrats de 300 mm de diamètre pour une épaisseur de SOI de 500 nm est très faible. La configuration d'intégration Back-Side doit donc être adaptée à des substrats de 300 nm d'épaisseur de SOI.

Une solution à ce problème a été étudiée par T. Ferrotti dans le cadre d'une intégration Front-Side. La parade imaginée consiste à ajouter les 200 nm de silicium supplémentaires, nécessaires à la réalisation du taper adiabatique, grâce à un dépôt de silicium amorphe. Un schéma d'un exemple d'intégration Back-Side à l'aide de ce procédé est illustré en *Figure V-13*. Sur la *Figure V-13 a)* et la *Figure V-13 b)*, nous remarquons que la structuration de la puce et de la partie SOI du laser hybride (*rib* et DBRs) ainsi que les interconnexions métalliques sont réalisées grâce aux étapes technologiques mises en œuvre pour la réalisation des puces photoniques de STMicroelectronics [12]. Suite au collage de la poignée Si, du retournement et du retrait du substrat initial et du BOX, une brique Damascène permet d'ajouter localement le surplus d'épaisseur de silicium requis (*Figure V-13 c)*). La fin du processus de fabrication demeure la même avec l'encapsulation du SOI et du silicium amorphe dans de la silice suivie d'une planarisation par CMP.

Cette méthode a pour avantage de n'impacter la fabrication des autres éléments de la puce photonique de STMicroelectronics que par la réalisation des DBRs de la cavité en début du processus. Les réseaux de Bragg n'étant gravés que de 10 nm, la topographie en résultant est négligeable. Néanmoins, en cas de problème, cette étape peut être réalisée à la toute fin de la structuration du SOI, après le dépôt du silicium amorphe.



**Figure V-13 : Schémas de coupes transversales de la structuration du SOI de la puce avec en a) la définition des passifs d'une puce photonique et des DBRs et des tapers adiabatiques, en b) les métallisations, l'encapsulation du SOI dans du SiO<sub>2</sub>, sa planarisation par CMP et le collage de la poignée Si, en c) la définition d'une couche de silicium amorphe locale par Damascène après retournement de l'empilement et en d) l'encapsulation finale dans du SiO<sub>2</sub> et sa planarisation par CMP.**

○ La structuration et les métallisations du III-V :

Les procédés de gravures du III-V ainsi que les métallisations utilisées pour contacter le laser sont, pour l'instant, incompatible avec une plateforme de fabrication CMOS. Nous avons ainsi dû réaliser ces étapes dans une plateforme 100 mm avec des étapes de dépôt de matériaux (lift-off) incompatibles avec la production de puces à grand volume.

Néanmoins, lors de la fin de mes travaux, des études étaient en cours dans le but, d'une part de démontrer la possibilité de structurer le guide III-V sur une plateforme 200 mm à l'aide de procédés de gravures RIE, et d'autre part d'utiliser des métallisations compatibles avec une plateforme CMOS.

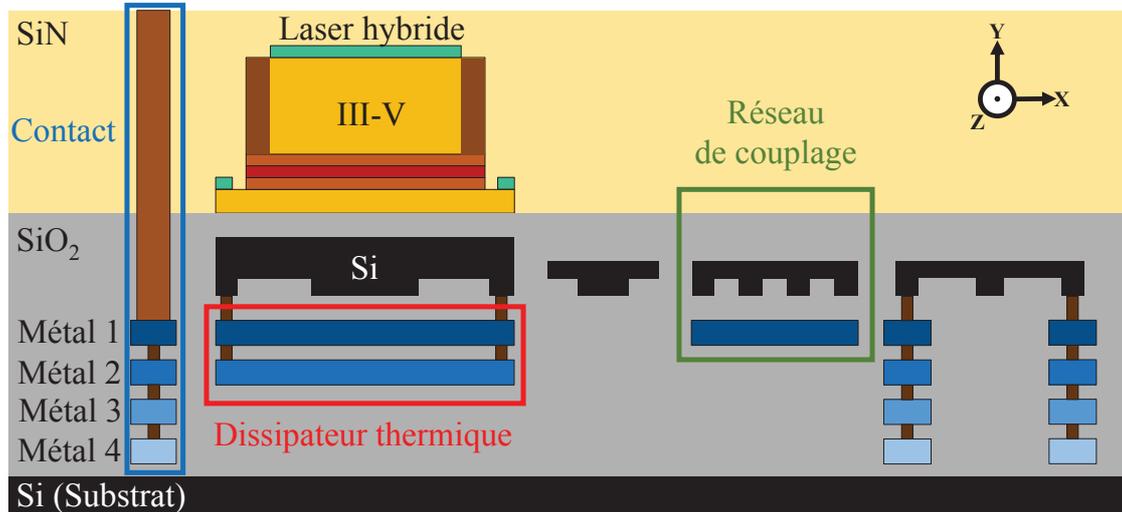
Ainsi, une démonstration d'un laser hybride III-V/Si en configuration Front-Side sur une plaque SOI 200 mm a été réalisée sans recours au détournement de la partie silicium [120].

Les solutions nécessitant le collage d'une épitaxie de 3'' de III-V sont cependant coûteuses à mettre en œuvre car seule une faible partie du matériau à gain est utilisée. Afin d'augmenter le rendement d'utilisation du III-V, des études sont en cours pour remplacer la plaque de III-V par des vignettes, localisées sur chaque puce du SOI [120], [121]. Cette solution permettrait d'augmenter notablement le rendement de fabrication des puces photoniques avec laser intégré.

Combinés, ces axes d'améliorations concernant la fabrication de la puce photonique pourraient permettre d'obtenir un rendement de fabrication et une répétabilité des performances du système compatible avec une industrialisation. En revanche, avant d'atteindre ce degré de développement, des améliorations des performances du laser et du réseau de couplage sont nécessaires.

### 5.3.2 Améliorations des performances du système et développements en vue d'une industrialisation

Trois axes de développement envisageables sur le dispositif étudié sont illustrés sur la *Figure V-14*. Ils concernent respectivement le réseau de couplage surfacique, les performances thermiques de la cavité laser et enfin la reprise des lignes d'interconnexions enterrées afin de connecter la puce photonique à une puce électronique de contrôle.



**Figure V-14 : Schéma d'une coupe transversale des points d'amélioration d'une puce photonique Back-Side.**

Durant cette étude nous avons montré que, sous certaines conditions, les performances du réseau de couplage en configuration Back-Side égalaient celles d'un réseau Front-Side. En revanche, les réseaux utilisés pour cette démonstration sont optimisés pour un fonctionnement en Front-Side. Certaines études disponibles dans la littérature ont quant à elles démontré une nette amélioration des performances du réseau avec un miroir métallique [106], [108]. Le développement d'un coupleur adapté à la configuration Back-Side pourrait permettre de meilleures performances que celles que nous avons obtenues lors de la mesure du dispositif.

Nous avons également mis en évidence que les performances thermiques du laser fabriqué ne sont pas optimales. En effet, au-delà de 45 °C, il n'y a plus d'émission laser. L'utilisation d'une puce photonique apparaît dès lors compliquée dans un environnement ne possédant pas une température contrôlée. Ce problème est essentiellement dû à l'utilisation des matériaux choisis tels que les MQWs d'InGaAsP et l'oxyde de silicium. Ces matériaux ne disposent pas d'un coefficient de conductivité thermique suffisant pour permettre à la chaleur d'être évacuée. Il existe plusieurs pistes d'améliorations pour régler ce problème tout en conservant ces matériaux :

- En configuration Back-Side, il est possible de tirer avantage de la présence de couches métalliques enterrées pour réaliser un dissipateur thermique sous la zone de gain de la cavité laser. Ce module serait connecté à chaque extrémité latérale du *slab* de la partie SOI du guide laser. Au niveau de la zone de gain, le mode optique est principalement confiné dans la partie III-V. De plus, la partie résiduelle confinée dans le SOI ne recouvre pas les extrémités latérales

du *slab*. Le mode optique ne souffrirait ainsi pas de pertes parasites induites par la présence des métallisations.

- Une étude récente propose de connecter les contacts *p* et *n* du laser avec le substrat de silicium lors de la fabrication des pads du laser en gravant localement le SiO<sub>2</sub> [122]. Ces dispositifs ont prouvé une amélioration de la température maximale de fonctionnement de plus de 30 °C.
- Une solution alternative serait d'utiliser des boîtes quantiques (QDs) à la place des MQWs. En effet, le confinement des porteurs dans ces structures est bien plus important que dans les puits quantiques. Ceci permet non seulement d'améliorer le seuil de la température maximale d'opérabilité mais aussi de diminuer le courant de seuil de la cavité.

Enfin, afin de réaliser une puce photonique complète disposant d'un laser hybride intégré en configuration Back-Side, il convient de recontacter les lignes d'interconnexions enterrées. Ceci pourrait être réalisé à l'aide d'une gravure de type TSV (*Through Silicon Via*).

Le développement de la technique de reprise des contacts devra néanmoins tenir compte de la solution retenue afin de connecter la puce photonique avec sa puce électronique de contrôle et de pilotage : contacts par fils d'or (*Wire Bonding*) ou intégration 3D grâce à des piliers de cuivre (*Copper Pillars*).

## V.4 CONCLUSION

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons présenté les caractérisations des performances du dispositif fabriqué. Ainsi, nous avons exposé les résultats des mesures obtenues sur les éléments passifs de la cavité laser. Les performances de l'efficacité de couplage du réseau surfacique, évoluant entre -12 dB et -18 dB de pertes sont très insuffisantes. De plus, l'angle de diffraction du réseau vers la fibre optique externe est également impacté, avec une valeur de 4,5 ° dans l'air au lieu de 8 °. Nous pouvons identifier l'origine de ces résultats avec les observations et mesures faites lors de la structuration Front-Side de la puce. Deux principaux défauts peuvent expliquer ces performances :

- La surgravure des lignes qui a entraîné un changement important du facteur de remplissage du réseau.
- Une distance non optimisée entre le réflecteur métallique et le réseau de couplage.

En revanche, les mesures de la réflectivité des miroirs de Bragg en fonction de la longueur d'onde ont montré une bonne correspondance avec les résultats de simulation.

Dans un second temps, nous avons détaillé les performances statiques de la cavité laser. L'un des lasers hybrides fabriqués possède un courant de seuil de 45 mA et émet une puissance lumineuse de 1,15 mW pour un courant d'injection de 200 mA. Compte tenu des pertes du réseau de couplage, ceci correspond à une puissance de 18,5 mW dans le guide d'onde. La résistance série des contacts de la diode est de 9 Ω. En revanche, au-dessus d'une température de fonctionnement de 45 °C, il n'y a plus d'émission laser. Les mesures de spectres des différents lasers ont démontré que la longueur d'onde

d'émission laser correspondait bien à la longueur d'onde de Bragg des miroirs de la cavité. Un SMSR de 46 dB a été mesuré pour un courant d'injection de 110 mA. L'étude de ces spectres en fonction du courant injecté a mis en évidence un comportement typique d'une cavité DBR avec des sauts de modes lasers, à mesure de l'augmentation du courant, dus à des effets thermo-optiques.

Enfin, nous avons validé le caractère accordable de la cavité DBR grâce à l'utilisation de chaufferettes au-dessus des miroirs de Bragg. Ces éléments chauffant nous ont permis de faire varier la longueur d'onde centrale des réseaux et ainsi d'atteindre un décalage en longueur d'onde de 4 nm pour un courant injecté aux bornes de la résistance chauffante de 20 mA. Néanmoins, des mesures de résistances des différentes chaufferettes ainsi que la comparaison avec de précédentes études ont montré que nos éléments sont trop résistifs pour atteindre un décalage supérieur à 4 nm. Un compromis entre puissance nécessaire à la chauffe et plage de longueur d'onde est obligatoire. Des études complémentaires, incluant par exemple des SG-DBRs (Sampled Grating Distributed Bragg Reflectors), devraient permettre d'améliorer ces performances [2].

Dans la deuxième et dernière partie du chapitre, nous avons détaillé certaines perspectives ouvertes par cette étude afin d'optimiser le processus de fabrication, d'améliorer les performances du dispositif et enfin d'envisager son industrialisation. Dans cet objectif, une structuration de la partie SOI sur une plateforme déjà dédiée à la fabrication de puce photonique permettrait de s'affranchir de certains défauts observés lors de la réalisation de nos puces. De même, la structuration du III-V et sa métallisation grâce à des méthodes compatibles CMOS permettraient de gagner en maturité. De plus, afin d'optimiser l'utilisation du III-V, l'utilisation de puces au lieu de plaques entières est préconisée. D'un côté structurel, l'utilisation de dissipateur thermique ou le changement de l'épitaxie III-V de MQWs et MQDs augmenterait la température maximale d'opérabilité de la diode laser.

Pour finir, et dans l'objectif d'une industrialisation, l'étude d'un réseau de couplage surfacique dédié à la configuration Back-Side ainsi que la reprise de contact des interconnexions métalliques enterrées doivent être réalisées.

# Conclusions Générales

Dans un contexte mondial où les attentes en très haut débit de transferts d'informations grâce à des solutions à faibles coûts et peu énergivores se font de plus en plus pressantes, les technologies à base de câbles électriques peinent à répondre à la demande. Depuis plusieurs années, des solutions innovantes basées sur des connexions optiques ont donc été développées. Cependant, les dispositifs utilisés pour les communications très longues distances, fabriqués à partir de matériaux onéreux, dont les III-V, sont peu adaptés à un déploiement dans les fermes de serveurs de données.

En bénéficiant des techniques de structurations de plateformes de la microélectronique CMOS, d'un fort contraste d'indice et de très faibles pertes aux longueurs d'ondes télécoms, le silicium et son oxyde sont de parfaits candidats pour la fabrication de puces photoniques. Aujourd'hui, si de nombreux dispositifs actifs et passifs sont d'ores et déjà développés dans cette technologie, aucune puce de photonique sur silicium ne possède de sources lasers intégrées.

De nombreuses études se sont attelées à la réalisation d'un tel composant, rendues complexe par la très faible capacité du silicium à émettre un rayonnement laser. L'une des solutions explorées, est la source laser hybride III-V/Si qui consiste à reporter un empilement de matériaux III-V sur une plaque SOI préalablement structurée. Cependant, les démonstrations de ce type de sources ne tiennent pas compte de la présence des autres composants de la puce et ainsi d'interconnexions métalliques de pilotage. Suivant ces schémas d'intégrations, le collage du III-V n'est pas compatible avec la réalisation des couches de métallisation.

C'est dans ce contexte que s'est inscrit cette étude dédiée à l'intégration hétérogène de l'une des dernières briques manquantes des puces de réceptions et de transmissions de données par voie optique à savoir la source laser. Les objectifs de ce travail de thèse ont été :

- L'évaluation et la définition du nouveau processus d'intégration, dit Back-Side, d'une source laser DBR hybride III-V/Si,
- La validation du fonctionnement du réseau de couplage surfacique suivant le schéma d'intégration Back-Side,
- L'intégration de ce processus innovant dans la chaîne de fabrication d'une puce sur silicium en utilisant les moyens à disposition,
- La caractérisation optique des dispositifs réalisés,
- L'analyse des données et l'étude des pistes d'optimisations.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté le contexte et les objectifs de ce travail en faisant notamment un rappel historique de l'intérêt des connexions optiques. Puis, après la définition du contexte et des enjeux dans lequel s'inscrit cette étude, un état de l'art sur les diverses sources lasers intégrées sur silicium, dont celles hybrides III-V/Si, a été présenté. Les problèmes liés au gap indirect du silicium et du germanium pour réaliser une source laser sont alors abordés. Ils permettent donc de comprendre l'intérêt des matériaux à gap direct tels que les III-V qui semblent donc indispensables et prometteurs pour la réalisation de nos dispositifs. La problématique liée à l'intégration d'une source

réalisée par collage moléculaire a alors été explicité. Enfin, ce chapitre a introduit le nouveau schéma d'intégration dit Back-Side palliant les manques de compatibilité dans les processus de fabrication de la puce photonique sans source et d'une source laser DBR hybride III-V/Si.

Le second chapitre a été dédié à la validation du nouveau schéma d'intégration vis-à-vis d'un des composants critiques d'une puce photonique le réseau de couplage surfacique. La première partie de ce chapitre a rappelé brièvement les principes de propagation d'un mode guidé, la notion d'indice effectif et le fonctionnement d'une structure de Bragg dont certains paramètres clés à optimiser pour le bon fonctionnement du réseau. Dans un deuxième temps, les étapes de fabrication et les différentes variations mises en œuvre ont été présentées afin de :

- Valider les modèles théoriques et les simulations FDTD réalisées,
- Déterminer l'impact du nouveau schéma d'intégration par rapport à un schéma classique Front-Side.

Pour valider les simulations, des réseaux de couplages ont été réalisés puis caractérisés en termes d'efficacité de couplage pour déterminer le gain apporté par la présence du miroir métallique, à savoir + 7 dB dans la meilleure configuration. L'impact de l'épaisseur entre le réseau et son réflecteur sur cette efficacité de couplage a également été mis en évidence. Une valeur optimale mesurée de 550 nm est constatée. Ce chapitre conclut sur la comparaison entre les caractérisations optiques du composant fabriqué et celles d'un même réseau en configuration Front-Side, en montrant qu'en utilisant une épaisseur appropriée, les performances du réseau de couplage surfacique en Back-Side ne sont pas dégradées. Néanmoins, il est à noter que l'efficacité de couplage absolue est plus faible que l'état de l'art (- 5 dB à 1310 nm). Des explications à ce problème sont évoquées dans ce chapitre pour donner des pistes d'optimisations possibles.

Le troisième chapitre a été consacré à l'étude de la source laser proposée et à la détermination des paramètres opto-géométriques nécessaires au fonctionnement du dispositif. Dans un premier temps, les principes de fonctionnement d'une cavité laser ont été exposés ainsi que les différents paramètres permettant une bonne caractérisation des performances statiques. Puis, la cavité hybride DBR III-V/Si a été décrite dans le contexte de l'intégration Back-Side. Dans une deuxième partie, nous avons dimensionné chacun des modules composants cette cavité. Nous avons démontré qu'il était possible d'atteindre, grâce à un épanouisseur, une efficacité de couplage théorique d'environ 95 % entre le guide III-V et le guide SOI. Nous avons également déterminé dans ce chapitre les paramètres nécessaires à la fabrication de miroirs sélectifs en longueur d'onde de la cavité en sélectionnant une épaisseur de gravure donnée. Pour finir, la forme du transformateur de mode a été définie de telle sorte qu'elle permette un transfert de près de 97 % de la puissance lumineuse entre le guide laser SOI et un guide SOI monomode à 1310 nm et le reste du circuit optique.

Dans le quatrième chapitre, la fabrication du laser hybride DBR III-V/Si a été détaillée étape par étape. Elle est divisée en deux parties distinctes : la partie SOI et la partie III/V. Une première partie a donc été consacrée à l'innovation apportée par le nouveau schéma d'intégration : la structuration du SOI en configuration Back-Side. L'enchaînement des étapes technologiques de fabrication a alors été présenté en explicitant :

- La structuration en Front-Side permettant de réaliser des guides d'ondes monomodes et des réseaux de couplage surfacique ainsi qu'une partie essentielle de la cavité laser à savoir l'épanouisseur adiabatique,
- Le collage de la poignée de silicium et le retournement de l'empilement constituant la réelle innovation du schéma d'intégration,
- La structuration en Back-Side permettant la définition des miroirs de la cavité et la séparation des différents lasers.

Puis, une deuxième section du chapitre s'est attelé à présenter les briques technologiques, déjà développées dans le passé, permettant de réaliser le laser hybride. Ainsi ce chapitre a démontré une façon innovante d'élaborer un laser DBR hybride III/V/Si en configuration Back-Side.

Le dernier chapitre a présenté en premier lieu les résultats des caractérisations optoélectroniques du système fabriqué. L'efficacité de couplage du réseau surfacique évolue entre  $-12$  dB et  $-18$  dB de pertes ce qui est insuffisant pour de tels dispositifs. Des explications à ce problème ont été mis en évidence dans ce chapitre. Néanmoins, des mesures de performances statiques de la cavité laser ont été réalisées et ont montré qu'une puissance de  $18,5$  mW est disponible dans le circuit photonique pour une puissance de  $1,15$  mW récupérée dans une fibre optique externe. L'émission laser démontre un fonctionnement spectral mono-fréquence avec un SMSR de  $46$  dB pour un courant d'injection de  $110$  mA. Pour terminer ce chapitre, nous avons dressé un ensemble de perspectives et recommandations personnelles qui pourrait permettre d'optimiser le processus de fabrication et d'améliorer les performances du dispositif pour enfin envisager son industrialisation tels que :

- La structuration du III/V et sa métallisation sur une plateforme trois cent millimètres,
- L'utilisation de vignettes de III-V à la place de plaques entières,
- L'utilisation de dissipateur thermique ou un changement de type d'épitaxie III-V
- L'étude d'un réseau de couplage surfacique dédié à une configuration Back-Side

Pour conclure, au terme de cette étude, les objectifs fixés ont été atteints puisque nous avons réussi à démontrer l'intégration d'un laser DBR hybride III-V/Si fonctionnel en configuration Back-Side. Ce type de schéma d'intégration permet d'obtenir une compatibilité entre le collage direct d'un empilement III-V et la fabrication des interconnexions métalliques de pilotage des autres composants de la puce photonique. De plus, des perspectives sur le sujet laissent place à des voies d'optimisations intéressantes qui pourront aboutir à terme à l'industrialisation de tels dispositifs.



# Bibliographie

- [1] A. Descos, *Conception, fabrication et réalisation de sources lasers hybrides III-V sur silicium*. Ecully, Ecole centrale de Lyon, 2014.
- [2] H. Duprez, *De la conception à la fabrication de sources lasers hybrides III-V sur silicium pour des circuits photoniques intégrés*. Lyon, 2016.
- [3] T. Ferrotti, *Design, fabrication and characterization of a hybrid III-V on silicon transmitter for high-speed communications*. Lyon, 2016.
- [4] T. H. Maiman, “Stimulated Optical Radiation in Ruby,” *Nature*, vol. 187, no. 4736, pp. 493–494, Aug. 1960.
- [5] S. E. Miller, “Integrated optics: An introduction,” *The Bell System Technical Journal*, vol. 48, no. 7, pp. 2059–2069, Sep. 1969.
- [6] F. P. Kapron, D. B. Keck, and R. D. Maurer, “Radiation losses in glass optical waveguides,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 17, no. 10, pp. 423–425, Nov. 1970.
- [7] T. Miya, Y. Terunuma, T. Hosaka, and T. Miyashita, “Ultimate low-loss single-mode fibre at 1.55  $\mu\text{m}$ ,” *Electronics Letters*, vol. 15, no. 4, pp. 106–108, Feb. 1979.
- [8] [http://grouper.ieee.org/groups/802/3/10GBT/public/nov03/diminico\\_1\\_1103.pdf](http://grouper.ieee.org/groups/802/3/10GBT/public/nov03/diminico_1_1103.pdf), C. DiMinico, *Data Center Design Considerations*, 2003.
- [9] <https://mphotronics.mit.edu/docman/ctr/ctr-1/290-1-ctr2005-overview/file>, MIT Microphotonics Center Industry Consortium, *Communication technology roadmap: Executive Overview*, 2005.
- [10] A. V. Krishnamoorthy *et al.*, “Progress in Low-Power Switched Optical Interconnects,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 17, no. 2, pp. 357–376, Mar. 2011.
- [11] N. B. Feilchenfeld *et al.*, “An integrated silicon photonics technology for O-band datacom,” in *2015 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)*, 2015, p. 25.7.1-25.7.4.
- [12] F. Boeuf *et al.*, “Silicon Photonics R&D and Manufacturing on 300-mm Wafer Platform,” *J. Lightwave Technol., JLT*, vol. 34, no. 2, pp. 286–295, Jan. 2016.
- [13] A. Novack *et al.*, “A 30 GHz silicon photonic platform,” 2013, vol. 8781, pp. 878107-878107–4.
- [14] C. Baudot *et al.*, “Introducing photonic devices for 40Gbits/s wavelength division multiplexing transceivers on 300-mm SOI wafers using CMOS processes,” 2014, vol. 8988, p. 898800–898800–16.
- [15] A. E. J. Lim *et al.*, “Review of Silicon Photonics Foundry Efforts,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 20, no. 4, pp. 405–416, Jul. 2014.
- [16] <http://standards.ieee.org/about/get/802/802.3.html>, IEEE 802.3™: ETHERNET 2016.
- [17] D. H. Lee, S. J. Choo, U. Jung, K. W. Lee, K. W. Kim, and J. H. Park, “Low-loss silicon waveguides with sidewall roughness reduction using a SiO<sub>2</sub> hard mask and fluorine-based dry etching,” *J. Micromech. Microeng.*, vol. 25, no. 1, p. 015003, 2015.
- [18] W. Bogaerts *et al.*, “Silicon-on-Insulator Spectral Filters Fabricated With CMOS Technology,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 16, no. 1, pp. 33–44, Jan. 2010.
- [19] C. Sciancalepore *et al.*, “Low-Crosstalk Fabrication-Insensitive Echelle Grating Demultiplexers on Silicon-on-Insulator,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 27, no. 5, pp. 494–497, Mar. 2015.
- [20] M. S. Dahlem, C. W. Holzwarth, A. Khilo, F. X. Kärtner, H. I. Smith, and E. P. Ippen, “Reconfigurable multi-channel second-order silicon microring-resonator filterbanks for on-chip WDM systems,” *Opt. Express, OE*, vol. 19, no. 1, pp. 306–316, Jan. 2011.
- [21] B. B. Bakir *et al.*, “Low-Loss ( 1 dB) and Polarization-Insensitive Edge Fiber Couplers Fabricated on 200-mm Silicon-on-Insulator Wafers,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 22, no. 11, pp. 739–741, Jun. 2010.
- [22] A. Mekis *et al.*, “A Grating-Coupler-Enabled CMOS Photonics Platform,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 17, no. 3, pp. 597–608, May 2011.
- [23] B. Szelag, B. Blampey, T. Ferrotti, V. Reboud, K. Hassan, S. Malhouitre, G. Grand, D. Fowler, S. Brisson, T. Bria, G. Rabillé, P. Brianceau, J. M. Hartmann, V. Hugues, A. Myko, F. Elleboode, F. Gays, J. M. Fédéli and C. Kopp, “Multiple wavelength silicon photonic 200 mm R+D platform for

- 25Gb/s and above applications,” Photonics Europe, Proc. SPIE 9891, Silicon Photonics and Photonic Integrated Circuits V, 98911C, Brussels (2016).
- [24] L. Liao *et al.*, “High speed silicon Mach-Zehnder modulator,” *Opt. Express, OE*, vol. 13, no. 8, pp. 3129–3135, Apr. 2005.
- [25] D. Marris-Morini, L. Vivien, J. M. Fédéli, E. Cassan, P. Lyan, and S. Laval, “Low loss and high speed silicon optical modulator based on a lateral carrier depletion structure,” *Opt. Express, OE*, vol. 16, no. 1, pp. 334–339, Jan. 2008.
- [26] L. Virot, “Développement de photodiodes à avalanche en Ge sur Si pour la détection faible signal et grande vitesse,” phdthesis, Université Paris Sud - Paris XI, 2014.
- [27] X. Xiao *et al.*, “High-speed, low-loss silicon Mach-Zehnder modulators with doping optimization,” *Opt. Express, OE*, vol. 21, no. 4, pp. 4116–4125, Feb. 2013.
- [28] J. V. Campenhout *et al.*, “Low-Voltage, Low-Loss, Multi-Gb/s Silicon Micro-Ring Modulator based on a MOS Capacitor,” in *Optical Fiber Communication Conference (2012), paper OM2E.4*, 2012, p. OM2E.4.
- [29] A. J. Zilkie *et al.*, “Power-efficient III-V/Silicon external cavity DBR lasers,” *Opt. Express, OE*, vol. 20, no. 21, pp. 23456–23462, Oct. 2012.
- [30] M. A. Green, J. Zhao, A. Wang, P. J. Reece, and M. Gal, “Efficient silicon light-emitting diodes,” *Nature*, vol. 412, no. 6849, pp. 805–808, Aug. 2001.
- [31] W. L. Ng, M. A. Lourenço, R. M. Gwilliam, S. Ledain, G. Shao, and K. P. Homewood, “An efficient room-temperature silicon-based light-emitting diode,” *Nature*, vol. 410, no. 6825, pp. 192–194, Mar. 2001.
- [32] N. Daldosso *et al.*, “Er-Coupled Si Nanocluster Waveguide,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 12, no. 6, pp. 1607–1617, Nov. 2006.
- [33] A. Pitanti *et al.*, “Further improvements in Er<sup>3+</sup> coupled to Si nanoclusters rib waveguides,” 2008, vol. 6996, pp. 699619–699619–11.
- [34] D. J. Lockwood, “Light Emission in Silicon Nanostructures,” in *Nanoscale Science and Technology*, N. García, M. Nieto-Vesperinas, and H. Rohrer, Eds. Springer Netherlands, 1998, pp. 185–209.
- [35] P. M. Fauchet, “Light emission from Si quantum dots,” *Materials Today*, vol. 8, no. 1, pp. 26–33, Jan. 2005.
- [36] S. G. Cloutier, P. A. Kossyrev, and J. Xu, “Optical gain and stimulated emission in periodic nanopatterned crystalline silicon,” *Nat Mater*, vol. 4, no. 12, pp. 887–891, Dec. 2005.
- [37] L. Pavesi, L. Dal Negro, C. Mazzoleni, G. Franzò, and F. Priolo, “Optical gain in silicon nanocrystals,” *Nature*, vol. 408, no. 6811, pp. 440–444, Nov. 2000.
- [38] [34] H. Rong *et al.*, “A continuous-wave Raman silicon laser,” *Nature*, vol. 433, no. 7027, pp. 725–728, Feb. 2005.
- [39] J. Liu, X. Sun, R. Camacho-Aguilera, L. C. Kimerling, and J. Michel, “Ge-on-Si laser operating at room temperature,” *Opt. Lett., OL*, vol. 35, no. 5, pp. 679–681, Mar. 2010.
- [40] R. E. Camacho-Aguilera *et al.*, “An electrically pumped germanium laser,” *Opt. Express, OE*, vol. 20, no. 10, pp. 11316–11320, May 2012.
- [41] L. Carroll *et al.*, “Direct-Gap Gain and Optical Absorption in Germanium Correlated to the Density of Photoexcited Carriers, Doping, and Strain,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 109, no. 5, p. 057402, Aug. 2012.
- [42] M. Virgilio, C. L. Manganelli, G. Grosso, G. Pizzi, and G. Capellini, “Radiative recombination and optical gain spectra in biaxially strained  $\beta$ -type germanium,” *Phys. Rev. B*, vol. 87, no. 23, p. 235313, Jun. 2013.
- [43] B. Dutt, D. S. Sukhdeo, D. Nam, B. M. Vulovic, Z. Yuan, and K. C. Saraswat, “Roadmap to an Efficient Germanium-on-Silicon Laser: Strain vs. n-Type Doping,” *IEEE Photonics Journal*, vol. 4, no. 5, pp. 2002–2009, Oct. 2012.
- [44] D. Peschka *et al.*, “Modeling of Edge-Emitting Lasers Based on Tensile Strained Germanium Microstrips,” *IEEE Photonics Journal*, vol. 7, no. 3, pp. 1–15, Jun. 2015.
- [45] R. Geiger *et al.*, “Excess carrier lifetimes in Ge layers on Si,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 104, no. 6, p. 062106, Feb. 2014.
- [46] M. El Kurdi, G. Fishman, S. Sauvage, and P. Boucaud, “Band structure and optical gain of tensile-strained germanium based on a 30 band k·p formalism,” *Journal of Applied Physics*, vol. 107, no. 1, p. 013710, Jan. 2010.

- 
- [47] P. Vogl, M. M. Rieger, J. A. Majewski, and G. Abstreiter, "How to convert group-IV semiconductors into light emitters," *Phys. Scr.*, vol. 1993, no. T49B, p. 476, 1993.
- [48] Y. Ishikawa, K. Wada, D. D. Cannon, J. Liu, H.-C. Luan, and L. C. Kimerling, "Strain-induced band gap shrinkage in Ge grown on Si substrate," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 82, no. 13, pp. 2044–2046, Mar. 2003.
- [49] Y. Ishikawa *et al.*, "Strain-induced enhancement of near-infrared absorption in Ge epitaxial layers grown on Si substrate," *Journal of Applied Physics*, vol. 98, no. 1, p. 013501, Jul. 2005.
- [50] A. Ghrib *et al.*, "High tensile strain transfer into germanium microdisks using all-around strained SiN," in *11th International Conference on Group IV Photonics (GFP)*, 2014, pp. 229–230.
- [51] G. Capellini *et al.*, "Tensile Ge microstructures for lasing fabricated by means of a silicon complementary metal-oxide-semiconductor process," *Opt. Express, OE*, vol. 22, no. 1, pp. 399–410, Jan. 2014.
- [52] R. W. Millar *et al.*, "Expanding the Ge emission wavelength to 2.25  $\mu\text{m}$  with SixNy strain engineering," *Thin Solid Films*, vol. 602, pp. 60–63, Mar. 2016.
- [53] M. J. Süess *et al.*, "Analysis of enhanced light emission from highly strained germanium microbridges," *Nat Photon*, vol. 7, no. 6, pp. 466–472, Jun. 2013.
- [54] D. Nam *et al.*, "Strain-Induced Pseudoheterostructure Nanowires Confining Carriers at Room Temperature with Nanoscale-Tunable Band Profiles," *Nano Lett.*, vol. 13, no. 7, pp. 3118–3123, Jul. 2013.
- [55] D. S. Sukhdeo, D. Nam, J.-H. Kang, M. L. Brongersma, and K. C. Saraswat, "Direct bandgap germanium-on-silicon inferred from 5.7%  $\langle 100 \rangle$  uniaxial tensile strain [Invited]," *Photon. Res., PRJ*, vol. 2, no. 3, pp. A8–A13, Jun. 2014.
- [56] R. Geiger *et al.*, "Uniaxially stressed germanium with fundamental direct band gap," *arXiv:1603.03454 [cond-mat, physics:physics]*, Dec. 2015.
- [57] K. Guilloy *et al.*, "Germanium under high tensile stress: nonlinear dependence of direct band gap vs. strain," *arXiv:1606.01668 [cond-mat]*, Jun. 2016.
- [58] E. F. Schubert, T. Gessmann, and J. K. Kim, "Light Emitting Diodes," in *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- [59] J. Yang, P. Bhattacharya, and Z. Mi, "High-Performance In<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>As/GaAs Quantum-Dot Lasers on Silicon With Multiple-Layer Quantum-Dot Dislocation Filters," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 54, no. 11, pp. 2849–2855, Nov. 2007.
- [60] J. Yang, Z. Mi, and P. Bhattacharya, "Groove-Coupled InGaAs/GaAs Quantum Dot Laser/Waveguide on Silicon," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 25, no. 7, pp. 1826–1831, Jul. 2007.
- [61] S. Chen *et al.*, "Electrically pumped continuous-wave III–V quantum dot lasers on silicon," *Nat Photon*, vol. 10, no. 5, pp. 307–311, May 2016.
- [62] [58] C. Ting *et al.*, "Electrically Pumped Room-Temperature Pulsed InGaAsP-Si Hybrid Lasers Based on Metal Bonding," *Chinese Phys. Lett.*, vol. 26, no. 6, p. 064211, 2009.
- [63] G. Roelkens *et al.*, "III-V/Si photonics by die-to-wafer bonding," *Materials Today*, vol. 10, no. 7–8, pp. 36–43, Jul. 2007.
- [64] B. B. Bakir *et al.*, "(Invited) Heterogeneously Integrated III-V on Silicon Lasers," *ECS Trans.*, vol. 64, no. 5, pp. 211–223, Aug. 2014.
- [65] T. Mitze *et al.*, "CWDM Transmitter Module Based on Hybrid Integration," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 12, no. 5, pp. 983–987, Sep. 2006.
- [66] G. Roelkens *et al.*, "III-V/silicon photonics for on-chip and intra-chip optical interconnects," *Laser & Photon. Rev.*, vol. 4, no. 6, pp. 751–779, Nov. 2010.
- [67] H. Wada and T. Kamijoh, "Room-temperature CW operation of InGaAsP lasers on Si fabricated by wafer bonding," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 8, no. 2, pp. 173–175, Feb. 1996.
- [68] A. W. Fang, H. Park, O. Cohen, R. Jones, M. J. Paniccia, and J. E. Bowers, "Electrically pumped hybrid AlGaInAs-silicon evanescent laser," *Opt. Express, OE*, vol. 14, no. 20, pp. 9203–9210, Oct. 2006.
- [69] H.-H. Chang *et al.*, "1310nm silicon evanescent laser," *Opt. Express, OE*, vol. 15, no. 18, pp. 11466–11471, Sep. 2007.
-

- [70] G. Roelkens, D. V. Thourhout, R. Baets, R. Nötzel, and M. Smit, "Laser emission and photodetection in an InP/InGaAsP layer integrated on and coupled to a Silicon-on-Insulator waveguide circuit," *Opt. Express, OE*, vol. 14, no. 18, pp. 8154–8159, Sep. 2006.
- [71] S. Stankovic, G. Roelkens, D. V. Thourhout, R. Jones, M. Sysak, and J. Heck, "1310 nm Evanescent Hybrid III-V/Si Laser Based on DVS-BCB Bonding," in *Advanced Photonics (2011), paper IWC3*, 2011, p. IWC3.
- [72] T. Dupont *et al.*, "Continuous wave InGaAsP/InP Fabry-Perot lasers on silicon," in *2008 20th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials*, 2008, pp. 1–2.
- [73] M. Lamponi *et al.*, "Heterogeneously integrated InP/SOI laser using double tapered single-mode waveguides through adhesive die to wafer bonding," in *7th IEEE International Conference on Group IV Photonics*, 2010, pp. 22–24.
- [74] B. B. Bakir *et al.*, "Electrically driven hybrid Si/III-V Fabry-Pérot lasers based on adiabatic mode transformers," *Opt. Express, OE*, vol. 19, no. 11, pp. 10317–10325, May 2011.
- [75] H. T. Hattori *et al.*, "Heterogeneous integration of microdisk lasers on silicon strip waveguides for optical interconnects," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 18, no. 1, pp. 223–225, Jan. 2006.
- [76] P. R. Romeo *et al.*, "InP on silicon electrically driven microdisk lasers for photonic ICs," in *2006 International Conference on Indium Phosphide and Related Materials Conference Proceedings*, 2006, pp. 60–63.
- [77] J. V. Campenhout *et al.*, "Electrically pumped InP-based microdisk lasers integrated with a nanophotonic silicon-on-insulator waveguide circuit," *Opt. Express, OE*, vol. 15, no. 11, pp. 6744–6749, May 2007.
- [78] L. Liu, T. Spuesens, G. Roelkens, D. V. Thourhout, P. Regreny, and P. Rojo-Romeo, "A Thermally Tunable III-V Compound Semiconductor Microdisk Laser Integrated on Silicon-on-Insulator Circuits," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 22, no. 17, pp. 1270–1272, Sep. 2010.
- [79] J. V. Campenhout *et al.*, "A Compact SOI-Integrated Multiwavelength Laser Source Based on Cascaded InP Microdisks," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 20, no. 16, pp. 1345–1347, Aug. 2008.
- [80] D. Liang *et al.*, "Electrically-pumped compact hybrid silicon microring lasers for optical interconnects," *Opt. Express, OE*, vol. 17, no. 22, pp. 20355–20364, Oct. 2009.
- [81] A. W. Fang *et al.*, "Integrated AlGaInAs-silicon evanescent racetrack laser and photodetector," *Opt. Express, OE*, vol. 15, no. 5, pp. 2315–2322, Mar. 2007.
- [82] A. W. Fang *et al.*, "A racetrack mode-locked silicon evanescent laser," *Opt. Express, OE*, vol. 16, no. 2, pp. 1393–1398, Jan. 2008.
- [83] T. Okumura, T. Maruyama, H. Yonezawa, N. Nishiyama, and S. Arai, "Injection type GaInAsP/InP/Si DFB lasers directly bonded on SOI substrate," in *2008 20th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials*, 2008, pp. 1–4.
- [84] T. Okumura, T. Maruyama, H. Yonezawa, N. Nishiyama, and S. Arai, "Injection-Type GaInAsP/InP/Si Distributed-Feedback Laser Directly Bonded on Silicon-on-Insulator Substrate," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 21, no. 5, pp. 283–285, Mar. 2009.
- [85] A. W. Fang, E. Lively, Y.-H. Kuo, D. Liang, and J. E. Bowers, "A distributed feedback silicon evanescent laser," *Opt. Express, OE*, vol. 16, no. 7, pp. 4413–4419, Mar. 2008.
- [86] [82] T. Dupont *et al.*, "A III-V on silicon distributed-feedback laser based on exchange-Bragg coupling," in *7th IEEE International Conference on Group IV Photonics*, 2010, pp. 19–21.
- [87] S. Stankovic, R. Jones, M. N. Sysak, J. M. Heck, G. Roelkens, and D. V. Thourhout, "Hybrid III-V/Si Distributed-Feedback Laser Based on Adhesive Bonding," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 24, no. 23, pp. 2155–2158, Dec. 2012.
- [88] S. Keyvaninia *et al.*, "Demonstration of a novel III-V-on-Si distributed feedback laser," in *Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference 2013 (2013), paper OTh1D.6*, 2013, p. OTh1D.6.
- [89] H. Duprez *et al.*, "1310 nm hybrid InP/InGaAsP on silicon distributed feedback laser with high side-mode suppression ratio," *Opt. Express, OE*, vol. 23, no. 7, pp. 8489–8497, Apr. 2015.
- [90] H. Duprez, A. Descos, C. Jany, C. Seassal, and B. B. Bakir, "Hybrid III-V on Silicon Laterally Coupled Distributed Feedback Laser Operating in the -Band," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 28, no. 18, pp. 1920–1923, Sep. 2016.

- 
- [91] A. W. Fang *et al.*, “A Distributed Bragg Reflector Silicon Evanescent Laser,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 20, no. 20, pp. 1667–1669, Oct. 2008.
- [92] M. N. Sysak, J. O. Anthes, D. Liang, J. E. Bowers, O. Raday, and R. Jones, “A hybrid silicon sampled grating DBR tunable laser,” in *2008 5th IEEE International Conference on Group IV Photonics*, 2008, pp. 55–57.
- [93] G.-H. Duan, J.-M. Fedeli, S. Keyvaninia, and D. Thomson, “10 Gb/s Integrated Tunable Hybrid III-V/Si Laser and Silicon Mach-Zehnder Modulator,” in *European Conference and Exhibition on Optical Communication (2012), paper Tu.4.E.2*, 2012, p. Tu.4.E.2.
- [94] S. Keyvaninia *et al.*, “Demonstration of a heterogeneously integrated III-V/SOI single wavelength tunable laser,” *Opt. Express, OE*, vol. 21, no. 3, pp. 3784–3792, Feb. 2013.
- [95] G.-H. Duan *et al.*, “New Advances on Heterogeneous Integration of III-V on Silicon,” *J. Lightwave Technol., JLT*, vol. 33, no. 5, pp. 976–983, Mar. 2015.
- [96] A. Descos *et al.*, “Heterogeneously integrated III-V/Si distributed Bragg reflector laser with adiabatic coupling,” in *39th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC 2013)*, 2013, pp. 1–3.
- [97] 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, OE*, vol. 24, no. 18, pp. 20895–20903, Sep. 2016.
- [98] H. F. Taylor and A. Yariv, “Guided wave optics,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 62, no. 8, pp. 1044–1060, Aug. 1974.
- [99] A. Mekis *et al.*, “A Grating-Coupler-Enabled CMOS Photonics Platform,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 17, no. 3, pp. 597–608, May 2011.
- [100] D. Benedikovic *et al.*, “High-directionality fiber-chip grating coupler with interleaved trenches and subwavelength index-matching structure,” *Opt. Lett., OL*, vol. 40, no. 18, pp. 4190–4193, Sep. 2015.
- [101] Z. Can *et al.*, “High Efficiency Grating Coupler for Coupling between Single-Mode Fiber and SOI Waveguides,” *Chinese Phys. Lett.*, vol. 30, no. 1, p. 014207, 2013.
- [102] 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.
- [103] G. Roelkens, D. V. Thourhout, and R. Baets, “High efficiency Silicon-on-Insulator grating coupler based on a poly-Silicon overlay,” *Opt. Express, OE*, vol. 14, no. 24, pp. 11622–11630, Nov. 2006.
- [104] G. Roelkens *et al.*, “High efficiency diffractive grating couplers for interfacing a single mode optical fiber with a nanophotonic silicon-on-insulator waveguide circuit,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 92, no. 13, p. 131101, Mar. 2008.
- [105] D. Vermeulen *et al.*, “High-efficiency fiber-to-chip grating couplers realized using an advanced CMOS-compatible Silicon-On-Insulator platform,” *Opt. Express, OE*, vol. 18, no. 17, pp. 18278–18283, Aug. 2010.
- [106] F. V. Van Laere *et al.*, “Compact and Highly Efficient Grating Couplers Between Optical Fiber and Nanophotonic Waveguides,” *J. Lightwave Technol., JLT*, vol. 25, no. 1, pp. 151–156, Jan. 2007.
- [107] G. Roelkens *et al.*, “Interfacing optical fibers and high refractive index contrast waveguide circuits using diffractive grating couplers,” 2009, vol. 7218, pp. 721808–721808–10.
- [108] W. S. Zaoui, M. F. Rosa, W. Vogel, M. Berroth, J. Butschke, and F. Letzkus, “High-efficient CMOS-compatible grating couplers with backside metal mirror,” in *2012 38th European Conference and Exhibition on Optical Communications*, 2012, pp. 1–3.
- [109] M.-F. Chow. “*Method of forming fine conductive lines, patterns and connectors*”. 1987: United States.
- [110] A. Einstein, *Zur Quantentheorie der Strahlung*, *Phys. Z.* **18** (1917).
- [111] E. Rosencher and B. Vinter, *Optoelectronics*. Cambridge University Press, 2002.
- [112] B. E. A. Saleh and M. C. Teich, *Fundamentals of Photonics*, 2nd ed. Hoboken, N.J: Wiley, 2007 p.653.
- [113] B. E. A. Saleh and M. C. Teich, *Fundamentals of Photonics*, 2nd ed. Hoboken, N.J: Wiley, 2007 p.721.
- [114] B. E. A. Saleh and M. C. Teich, *Fundamentals of Photonics*, 2nd ed. Hoboken, N.J: Wiley, 2007 p.315.
- [115] A. Yariv and X. Sun, “Supermode Si/III-V hybrid lasers, optical amplifiers and modulators: A proposal and analysis,” *Opt. Express, OE*, vol. 15, no. 15, pp. 9147–9151, Jul. 2007.
-

- [116] A. Yariv, “Coupled-mode theory for guided-wave optics,” *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 9, no. 9, pp. 919–933, Sep. 1973.
- [117] X. Sun, H.-C. Liu, and A. Yariv, “Adiabaticity criterion and the shortest adiabatic mode transformer in a coupled-waveguide system,” *Opt. Lett., OL*, vol. 34, no. 3, pp. 280–282, Feb. 2009.
- [118] X. Sun, “Supermode Si/III–V lasers and circular Bragg lasers,” phd, California Institute of Technology, 2010.
- [119] A. Yariv and M. Nakamura, “Periodic structures for integrated optics,” *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 13, no. 4, pp. 233–253, Apr. 1977.
- [120] <https://static1.squarespace.com/static/55ae48f4e4b0d98862c1d3c7/t/578e71229de4bb5b172a1fd3/146%208952923570/2016-06-09+AIM+meeting+-+LETI+-+ChristopheKOPP.pdf.%E2%80%9D>, C. Kopp, *III-V On Silicon Integration Technology*, 2016.
- [121] K. Yamada, J. Liu, T. Baba, L. Vivien, and D.-X. Xu, *Photonic Integration and Photonics-Electronics Convergence on Silicon Platform*. Frontiers Media SA, 2015.
- [122] C. Zhang, D. Liang, G. Kurczveil, J. E. Bowers, and R. G. Beausoleil, “Thermal Management of Hybrid Silicon Ring Lasers for High Temperature Operation,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 21, no. 6, pp. 385–391, Nov. 2015.

# Publications

## CONFÉRENCES

### Premier auteur :

J. Durel, T. Ferrotti, A. Chantre, S. Cremer, J. Harduin, S. Bernabé, C. Kopp, F. Boeuf, B. Ben-Bakir, J-E. Broquin, “Realization of back-side heterogeneous hybrid III-V/Si DBR lasers for silicon photonics,” 2016, vol. 9750, p. 975000–975000–12.

J. Durel, B. Ben-Bakir, C. Jany, S. Cremer, B. Szelag, T. Bria, V. Larrey, L. Sanchez, P. Brianceau, J-A Dallery, R. Guiavarch, T. Card, R. Thibon, J-E. Broquin, F. Boeuf, “First demonstration of a back-side integrated heterogeneous hybrid III-V/Si DBR lasers for Si-photonics applications,” in *2016 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)*, 2016, p. 22.2.1-22.2.4.



---

## Résumé :

Ces dernières années, la photonique sur silicium est apparue comme une solution prometteuse pour la fabrication en grande série d'émetteurs-récepteurs optiques répondant aux besoins des centres de données en termes d'augmentation du débit et de coûts réduits. Plusieurs plateformes de photonique sur silicium ont été démontrées en utilisant la technologie Si standard. Bien que ces plateformes diffèrent à bien des égards, elles manquent toutes d'une source de lumière intégrée. Pour résoudre ce problème, l'approche la plus couramment proposée consiste à coller un empilement InP sur une plaque SOI afin de fabriquer un laser hybride III-V/Si. Cependant, aucune des démonstrations n'a été réalisée avec un empilement d'interconnexions métalliques BEOL (Back-End Of Line) standard, empêchant ainsi une intégration électronique-photonique appropriée. Pour résoudre le problème topographique posé par cet ajout de couches, un nouveau schéma d'intégration, appelé intégration Back-Side, a été développé et est présenté dans ce document. Tout d'abord, le contexte de cette étude, un état de l'art ainsi que la présentation du Back-Side est abordé. La nouveauté apportée par cette intégration, à savoir le collage du III-V sur la face arrière du SOI après la structuration de celui-ci, y est alors détaillé. Le bon fonctionnement d'un élément essentiel à la puce photonique, le réseau de couplage, est ensuite abordé à travers des simulations, sa fabrication et des caractérisations optiques. Nous avons prouvé que, sous certaines conditions, ce dispositif possède les mêmes performances mesurées en Back-Side qu'en Front-Side. Le principe de fonctionnement d'une cavité oscillante puis les différents modules composants le laser hybride sont détaillés. Le laser étudié est une cavité hybride DBR (Distributed Bragg Reflector) III-V/Si. Afin d'augmenter le confinement du mode dans le MQWs (Multi Quantum Wells) et donc d'assurer un gain optique élevé, le mode optique est progressivement transféré entre le guide III-V et le guide silicium du laser hybride par des épanouisseurs adiabatiques, structurés dans le SOI de part et d'autre de la zone de gain, pour être enfin réfléchi par les miroirs DBR dans le silicium. Enfin, son processus de fabrication est explicité avant que ses caractérisations opto-électroniques ne soient finalement présentées. Les lasers à pompage électrique ont été testés dans des conditions de courant continu et la lumière générée a été collectée à travers un réseau de couplage par une fibre optique externe multimode. Les pertes de couplage ont été mesurées supérieures à 10 dB. La puissance de sortie est de 1,15 mW à un courant d'injection de 200 mA. Le seuil laser est de 45 mA, ce qui correspond à une densité de courant de 1,5 kA / cm<sup>2</sup> et la résistance série des contacts laser est d'environ 9 Ω. La tension de seuil est de 1,45 V. Les spectres lasers reflètent un fonctionnement mono-fréquence, pour différents courants d'injection, avec une longueur d'onde centrale correspondant à la longueur d'onde de Bragg des miroirs. Un SMSR (Side Mode Suppression Ratio) de plus de 35 dB a été mesuré, ce qui prouve la bonne pureté spectrale de ce laser. Un décalage de la longueur d'onde de 4 nm a été observé en injectant un courant de 20 mA dans des chauffettes métalliques au-dessus des DBRs. L'intégration hétérogène d'un laser DBR hybride en face arrière d'une plaque SOI, entièrement compatible CMOS, a été démontrée pour la première fois, la mise en place d'interconnexions électriques compatibles CMOS et de sources optiques sur une même puce a pu être réalisée. Ce dispositif ouvre la voie à un émetteur-récepteur optique entièrement intégré sur une plateforme Si.

Mots clés : Intégration, Photonique sur silicium, Laser hybride III-V/Si, Réseau de couplage surfacique

---

## Abstract:

Recently, Silicon Photonics has emerged as a solution for the mass manufacturing of optical transceivers addressing datacenter's needs in terms of increasing data-rate and reduced cost. Several Silicon-Photonics platforms have been demonstrated using standard Si technology. While these platforms differ in many regards, they all lack a solution for an integrated light source. To solve this problem, the most commonly proposed approach consists in bonding an InP-stack onto a Si-wafer in order to fabricate a Hybrid III-V/Si laser. However, none of those demonstrations have been made with a standard CMOS-BEOL, preventing a proper electronic-photonic integration. To solve the topographical problem induced by the additional layers, a new integration scheme, called Back-Side, has been developed and is presented in this document. First, the context of this study, a state of the art as well as the presentation of the Back-Side is discussed. The innovation brought by this integration, namely the bonding of the III-V on the back side of the SOI after the structuring of the latter, is then detailed. The correct behavior of a key element to the photonic chip, the grating coupler, is then treated through simulations, fabrication and optical characterizations. We have proved that, under specific conditions, this device has the same measured performances in Back-Side and in Front-Side. The principle of an optical oscillator and then the various modules composing the hybrid laser are then detailed. The implemented laser is based on a hybrid DBR (Distributed Bragg Reflector) III-V/Si cavity. In order to increase the mode confinement in the MQWS (Multi Quantum Wells) and hence ensure a high optical gain, the optical mode is gradually transferred between the III-V waveguide and the silicon waveguide of the hybrid laser by adiabatic tapers, patterned on both sides of the gain zone, to finally be reflected by the mirrors DBR in the silicon. Finally, its manufacturing process is explained before its opto-electronic characterizations are presented. The electrically pumped lasers have been tested under continuous-wave current conditions and the generated light has been collected through the grating coupler to a multi-mode fiber. The fiber coupling losses has been measured to be higher than 10 dB. The output power is up to 1.15 mW at an injection current of 200 mA. The lasing threshold is 45 mA which corresponds to a current density of 1.5 kA/cm<sup>2</sup> and the series resistance of the laser contacts is approximately 9 Ω. The threshold voltage is 1.45 V. The laser spectra reflect its single-wavelength laser operation, for different injection currents, with a central wavelength corresponding to the Bragg wavelength of the mirrors. A Side Mode Suppression Ratio (SMSR) of more than 35 dB has been measured. A 4 nm wavelength shift has been observed when injecting 20 mA into both metallic heaters above DBRs. The heterogenous integration of a fully CMOS compatible hybrid DBR laser on the backside of a SOI wafer being demonstrated for the first time, implementing CMOS compatible electric interconnects and optical sources on a same chip has could be achieved. This device opens the route to a fully integrated optical transceiver on a Si platform.

Key words: Integration, Silicon Photonic, Hybride III-V/Si Laser, Grating coupler

---