



**HAL**  
open science

# Approches de l'intégration photonique dans les microsystèmes

Philippe Arguel

► **To cite this version:**

Philippe Arguel. Approches de l'intégration photonique dans les microsystèmes. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2005. tel-00129453

**HAL Id: tel-00129453**

**<https://theses.hal.science/tel-00129453>**

Submitted on 7 Feb 2007

**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.

# **HABILITATION**

## **A Diriger des Recherches**

Préparée au  
*Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes du CNRS*

En vue de l'obtention du diplôme de  
*L'Université Paul Sabatier de Toulouse*

par

**Philippe ARGUEL**  
*Docteur de l'Université Paul Sabatier – Toulouse III*  
*Maître de Conférences UPS*

## **APPROCHES DE L'INTEGRATION PHOTONIQUE DANS LES MICROSYSTEMES**

Soutenue le 8 décembre 2005 devant le jury :

Président	J. MARTINEZ-VEGA
Responsable scientifique	F. LOZES-DUPUY
Rapporteurs	C. BOISROBERT D. DECOSTER A. JOULLIE
Examineurs	P. DESTRUEL A. SENTENAC



A Romain et Sylvain  
qui sont capables de m'expliquer  
tout ce que je ne comprends pas...



## Remerciements

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été réalisés au Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes du CNRS, au sein du groupe de recherches d'abord intitulé « Structures III-V », et devenu par la suite le groupe « Photonique ».

Je tiens à remercier Messieurs Alain Costes, Jean-Claude Laprie et Malik Ghallab, directeurs successifs du LAAS-CNRS qui, depuis mon arrivée en 1992, m'ont permis de mener sereinement mes activités de recherche au sein de ce grand laboratoire.

Mes travaux couvrent ainsi une période d'une bonne douzaine d'années, avec des aspects aussi bien théoriques que pratiques, et je souhaite exprimer ma profonde gratitude à tous les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à l'ensemble de mes activités de recherche et pour avoir accepté de les évaluer. Je suis très reconnaissant à Monsieur Juan Martinez-Vega, Professeur à l'Université Paul Sabatier de Toulouse, d'avoir accepté de présider ce jury.

Je remercie très sincèrement Messieurs Christian Boisrobert, Professeur à l'Université de Nantes, Didier Decoster, Professeur à l'Université de Lille I et André Joullié, Professeur à l'Université de Montpellier II, pour avoir accepté de se plonger dans la lecture minutieuse de l'ensemble de mes travaux et d'en être les rapporteurs.

Je remercie chaleureusement Madame Anne Sentenac, Chargée de Recherches à l'Institut Fresnel de Marseille, et Monsieur Pierre Destruel, Professeur à l'Université Paul Sabatier de Toulouse, pour avoir accepté d'être membres de ce jury.

Il va sans dire que l'ensemble des travaux présentés dans ce mémoire est le fruit de nombreuses collaborations, discussions, échanges avec des personnes de tous horizons sans lesquelles mes recherches n'auraient pu avancer. Je ne vais pas me lancer dans une énumération qui serait bien longue et certainement incomplète, mais je voudrais que chacune d'elles trouve, dans ces quelques lignes, l'expression de mes très sincères remerciements et soit assurée de ma profonde reconnaissance. Je ne vais donc citer personne, à l'exception toutefois de deux collègues qui partagent « mes joies et mes peines » depuis mon arrivée au laboratoire et à qui je dois d'avoir présenté cette Habilitation à Diriger les Recherches.

J'adresse un immense merci à Françoise Lozes-Dupuy qui, après avoir dirigé mes travaux de thèse, m'a épaulé dans mes premiers encadrements avec toute la disponibilité, la rigueur, la clairvoyance et l'enthousiasme qu'on lui connaît. C'est une véritable chance de mener des activités de recherche à ses côtés et de profiter de l'excellente ambiance de travail qu'elle a su créer autour d'elle.

J'adresse un autre immense merci à Sophie Bonnefont avec qui j'ai étroitement mené la grande majorité des travaux présentés dans ce mémoire. Que ce soit en modélisation, en technologie ou en caractérisation, elle m'a toujours fait bénéficier de ses grandes compétences et a apporté son précieux concours à l'avancé de nos recherches.

Enfin, le bon déroulement de toutes ces années passées au LAAS-CNRS doit beaucoup à des moments conviviaux, à de franches rigolades et à de véritables amitiés qui se sont tissées.

Merci à tous...



# Approches de l'intégration photonique dans les microsystèmes

## Résumé

Les travaux de recherches présentés dans ce mémoire ont débuté en 1992 au sein du groupe "Photonique" du LAAS-CNRS. Ils s'inscrivent dans le cadre général des recherches menées par l'équipe animée par F. Lozes-Dupuy, Directrice de Recherches au CNRS.

Après une étude approfondie des diodes laser DBR (Distributed Bragg Reflector) monofréquences à émission surfacique, l'étude de ce type d'émetteurs a été poursuivie en recherchant le contrôle et l'optimisation de leurs performances par l'adjonction d'une cavité optique étendue hybridée. Ces travaux ont conduit à élargir le domaine de recherches à celui des microsystèmes et aux technologies associées en vue de proposer une microsource laser stabilisée en fréquence. L'orientation «microsystème» des activités a ensuite été renforcée par des travaux de collaboration sur les microsystèmes optiques et, plus spécifiquement, sur le verrou que constitue l'intégration photonique dans les microsystèmes. Dans une première approche, en mettant à profit les acquis de la technologie conventionnelle de type CMOS, les travaux ont concerné l'étude de nouveaux concepts d'intégration sur silicium. Ces travaux se sont appuyés sur un objet d'étude constitué par un capteur optique de déplacement et ont montré que la microélectronique, l'optoélectronique et l'optique intégrée pouvaient être associées sur silicium pour proposer des fonctions optiques "intelligentes" à partir d'une technologie compatible CMOS. Une deuxième approche d'intégration photonique a ensuite été explorée pour tirer profit des propriétés des cristaux photoniques dans la perspective du développement de nouveaux types de diodes laser compatibles avec une intégration photonique planaire dense.

**Mots-clés :** diode laser DBR, laser à émission surfacique, micro-source laser, intégration photonique, micro-système optique, capteur optique.

## Towards photonic integration in microsystems

### Summary

Research work presented here started in 1992 in the group "Photonique" of LAAS-CNRS. It is part of a larger work done in the team driven by F. Lozes-Dupuy, Director of Research.

After a detailed study of single mode surface emitting Distributed Bragg Reflector laser diodes, we looked towards control and optimisation of their performances by adding an hybridized extended external cavity. From there, our research domain got to the one of microsystems and their associated technologies. Our main goal was the realization of a stabilized frequency laser micro-source. This "microsystems" orientation was then supported through collaborative work on optical microsystems, and more precisely on the critical step of photonic integration in microsystems. At first, our work concentrated on developing new concepts of photonic integration on silicon benefiting from CMOS standard technology. Our case study was a displacement optical sensor and we showed that microelectronics, optoelectronics and integrated photonics could be associated on a silicon wafer to propose smart optical functions based on CMOS compatible technology. A second direction of integration, based on photonic crystals properties, explores new designs of laser diodes compatibles with dense planar photonic integration.

**Keywords:** DBR laser diode, surface emitting laser, laser microsource, photonic integration, optical microsystem, optical sensor.





# SOMMAIRE

Avant-propos .....	1
--------------------	---

## 1<sup>ère</sup> Partie

### Présentation générale des activités de recherche

1. Activités de recherche .....	5
1.1 <u>Résumé des travaux de recherche</u> .....	5
1.1.1 Présentation générale .....	5
1.1.2 Les principaux axes de recherche .....	5
a) Diode laser DBR à émission surfacique .....	6
b) Microsource laser stabilisée en fréquence .....	7
c) Intégration photonique dans les microsystèmes .....	7
1.1.3 Travaux de collaboration .....	9
a) Mesure d'indice de réfraction de nouveaux matériaux pour la photonique .....	9
b) Etude de couches organo-minérales pour l'optique intégrée .....	9
c) Caractérisation de réseaux de diffraction .....	9
d) Intégration de fonctions photodétectrices accordables .....	10
1.1.4 Encadrement scientifique .....	10
a) Stages de DEA .....	10
b) Thèses de doctorat .....	11
1.2 <u>Implications scientifiques</u> .....	12
1.2.1 Réseau doctoral en microtechnologies .....	12
1.2.2 Jurys de thèse .....	12
1.2.3 Organisation de conférences .....	12
1.2.4 Animation de projets scientifiques .....	13
1.2.5 Mission d'expertise .....	13
2. Liste des publications .....	15
2.1 <u>Thèse de doctorat</u> .....	15
2.2 <u>Articles dans des revues ou des ouvrages</u> .....	15
2.3 <u>Communications dans des congrès internationaux</u> .....	16
2.4 <u>Communications dans des congrès nationaux</u> .....	17

## 2<sup>ème</sup> Partie

### Axes de recherche, principaux résultats et perspectives

Introduction .....	23
1. Diodes laser DBR à émission surfacique .....	25
1.1 <u>Contexte et objectif des travaux</u> .....	25
1.2 <u>Analyse du comportement d'une diode laser DBR</u> .....	27
1.2.1 Méthodologie d'analyse .....	27
1.2.2 Modèle numérique .....	28
a) Structure à puits quantique .....	28
b) Zone de gain .....	28
c) Zone de réseau .....	28
d) Cavité optique .....	29
1.2.3 Type de structures étudié .....	29

1.2.4	Principaux résultats de modélisation .....	30
a)	Influence du pas du réseau .....	30
b)	Influence des paramètres d'accord .....	31
1.3	<u>Technologie d'une diode laser DBR à émission surfacique</u> .....	33
1.3.1	Réalisation du réseau diffractant au pas de 250 nm .....	33
1.3.2	Procédé complet d'élaboration de la diode laser DBR à émission surfacique .....	34
1.4	<u>Résultats expérimentaux</u> .....	35
1.5	<u>Conclusion</u> .....	37
2.	Microsource laser stabilisée en fréquence .....	39
2.1	<u>Contexte et objectif des travaux</u> .....	39
2.2	<u>Proposition d'un concept original de cavité étendue</u> .....	40
2.2.1	Méthodologie d'analyse .....	40
2.2.2	Description de la structure étudiée .....	41
2.2.3	Principaux résultats de modélisation .....	41
2.3	<u>Validation expérimentale de la cavité étendue proposée</u> .....	42
2.4	<u>Réalisation et caractérisation de la microsource laser</u> .....	43
2.5	<u>Conclusion</u> .....	46
3.	Intégration photonique dans les microsystèmes .....	47
3.1	<u>Contexte et objectif des travaux</u> .....	47
3.2	<u>Intégration multifonctionnelle dans un microsystème optique</u> .....	48
3.2.1	Le capteur optique de déplacement .....	48
3.2.2	Approches d'intégration .....	49
a)	Intégration des fonctions de détection et de conditionnement et traitement du signal ...	49
b)	Intégration des fonctions de mise en interférence et de détection .....	50
3.3	<u>Intégration photonique planaire</u> .....	53
3.3.1	Le choix de la structure .....	53
3.3.2	Modélisation d'un miroir à cristal photonique unidimensionnel .....	54
3.3.3	Principaux résultats de modélisation .....	55
a)	Influence de la largeur des fentes .....	55
b)	Influence de la profondeur des fentes .....	56
c)	Tolérance aux dérives géométriques .....	56
3.3.4	Procédé de fabrication de diodes laser comportant un miroir à cristal photonique 1D ..	57
a)	Réalisation du miroir à cristal photonique unidimensionnel .....	57
b)	Procédé complet d'élaboration de la diode laser .....	58
3.4	<u>Conclusion</u> .....	59
4.	Conclusion et Perspectives de recherche .....	61





## Avant-propos

Au cours de l'année 1992, j'ai débuté à la fois mes activités de recherche au LAAS-CNRS et mes activités d'enseignement à l'Université Paul Sabatier (UPS) de Toulouse.

Dans la suite de ce document, seul le premier aspect de mes activités est développé et je souhaiterais donc donner ici quelques précisions sur leur volet pédagogique qui représente une part importante de mon investissement.

Mes activités d'enseignement à l'UPS se sont déroulées sur trois périodes successives :

- 3 années en tant que Moniteur de l'Enseignement Supérieur
- 2 années en tant qu'Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche
- 8 années en tant que Maître de Conférences

Après avoir enseigné les Mathématiques pour l'EEA, l'Optique, l'Electricité et l'Electronique Analogique, mes interventions se sont progressivement stabilisées autour de matières étroitement liées à mes travaux de recherche. Ainsi, aujourd'hui, j'interviens uniquement dans les domaines de la Microélectronique et de l'Optoélectronique qui représentent respectivement environ 20% et 80% de mes activités d'enseignement.

D'autre part, au cours des dix dernières années, je me suis impliqué dans diverses actions pédagogiques ou dans des instances administratives en étroite relation avec l'enseignement. Certaines de ces activités ont été ponctuelles, d'autres se poursuivent aujourd'hui, telles que la responsabilité d'année L3 de l'IUP AISEM (Institut Universitaire Professionnalisé en Architecture et Ingénierie des Systèmes Electroniques et Microélectroniques), l'animation, avec cinq collègues, de la Structure Universitaire de Pédagogie de l'UPS, ou mon implication au sein de la Commission Enseignement de la Société Française d'Optique. Il s'agit là d'activités riches et passionnantes qui permettent de resserrer les liens entre le monde de la Recherche et celui de l'Enseignement.

En ce qui concerne la présentation de mes activités de recherche, j'ai choisi de scinder ce mémoire en deux grandes parties proposant un approfondissement progressif de mes travaux :

- Dans la première partie, une présentation générale de mes activités de recherche est suivie d'un résumé des trois principaux axes selon lesquels mes travaux se sont orientés. Des travaux de collaborations sont également décrits succinctement, ainsi que mes diverses activités d'encadrement. Cette partie porte ensuite sur les divers projets ou actions dans lesquels je me suis impliqué et elle se termine par la liste de mes publications et communications.
- La deuxième partie est consacrée à une synthèse de mes travaux de recherche selon les trois axes principaux mis en évidence dans la partie précédente. Pour chacun de ces axes, le contexte et l'objectif des travaux sont rappelés, la méthodologie mise en œuvre est décrite et les principaux résultats obtenus sont présentés. Enfin, après une conclusion générale sur l'évolution de mes travaux, mes perspectives de recherche dans le domaine de l'intégration photonique sont développées.



## **1<sup>ère</sup> Partie**

### **Présentation générale des activités de recherche**





# 1. Activités de recherche

La présentation de mes activités de recherche se décompose en deux volets :

- une première partie, intitulée « Résumé des travaux de recherche », retrace le déroulement de mes activités de recherche depuis le début de ma thèse. Dans cette partie, l'accent est mis essentiellement sur les travaux et les collaborations menés dans le cadre de thèses que j'ai encadrées ou co-encadrées.
- une deuxième partie, intitulée « Implications scientifiques », présente les diverses actions, collaborations ou programmes que j'ai pilotés ou dans lesquels je me suis impliqué, parallèlement aux travaux de recherche indiqués précédemment.

## 1.1 Résumé des travaux de recherche

### 1.1.1 Présentation générale

Depuis février 92, je mène mes activités de recherche au sein du groupe Photonique du LAAS-CNRS. Mes travaux s'inscrivent dans le cadre général des recherches menées par l'équipe animée par M<sup>me</sup> Lozes-Dupuy, Directeur de Recherches au CNRS.

De 1992 à fin 2000, mes travaux de recherche ont concerné la conception et la réalisation de sources laser à semiconducteur innovantes par leurs grandes qualités spectrales. Ces travaux se sont déroulés en deux phases principales : dans un premier temps, j'ai étudié de façon approfondie les diodes laser DBR (Distributed Bragg Reflector) monofréquences à émission surfacique qui ont constitué mon sujet de thèse ; dans un deuxième temps, j'ai poursuivi l'étude de ce type d'émetteurs en recherchant le contrôle et l'optimisation de leurs performances par l'adjonction d'une cavité optique étendue hybridée. Ces derniers travaux m'ont conduit, dès 1998, à élargir mon domaine de recherche à celui des microsystèmes et aux technologies associées en vue de proposer une microsource laser stabilisée en fréquence.

A partir de 1999, j'ai renforcé l'orientation « microsystème » de mes activités par des travaux de collaboration sur les microsystèmes optiques et, plus spécifiquement, sur le verrou que constitue l'intégration photonique dans les microsystèmes. Dans une première approche, en mettant à profit les acquis de la technologie conventionnelle de type CMOS, j'ai étudié de nouveaux concepts d'intégration sur silicium. Ces travaux s'appuient sur un objet d'étude constitué par un capteur optique de déplacement et montrent que la microélectronique, l'optoélectronique et l'optique intégrée peuvent être associées sur silicium pour proposer des fonctions optiques "intelligentes" à partir d'une technologie compatible CMOS. Dans le cadre de ces travaux, j'ai exploré une deuxième approche d'intégration photonique exploitant les propriétés remarquables des cristaux photoniques dans la perspective du développement de nouveaux types de diodes laser compatibles avec une intégration photonique planaire dense.

Les travaux qui viennent d'être indiqués, et qui constituent l'essentiel de mes activités de recherche, m'ont conduit à travailler sur des thèmes connexes avec des équipes issues de laboratoires français ou étrangers. Ces travaux de collaboration, parfois ponctuels, parfois courant sur plusieurs années, sont décrits dans la section 1.1.3.

### 1.1.2 Les principaux axes de recherche

La présentation générale de mes activités de recherche met en évidence un enchaînement de travaux s'articulant principalement autour de trois axes :

- diode laser DBR à émission surfacique ;
- microsource laser stabilisée en fréquence ;
- intégration photonique dans les microsystèmes.

Un résumé de chacun de ces axes et des travaux de thèse qu'il ont engendrés va faire l'objet des paragraphes suivants.

Le contexte et le développement de ces trois axes, quant à eux, sont présentés dans la deuxième partie du document.

### a) Diode laser DBR à émission surfacique

La conception et la réalisation de diodes laser DBR à émission surfacique dans la filière GaAs a constitué le sujet de mes travaux de thèse. Ce type de diodes offre de multiples avantages tels qu'un fonctionnement monomode à faible largeur de raie, un diagramme de rayonnement de faible ouverture, une émission cohérente puissante et une structure compatible avec la réalisation de circuits d'optique intégrée. Les travaux sur ce composant étaient originaux en France et ils ont été initiés par le programme national OSTI (Optoélectronique et Systèmes pour le Traitement de l'Information) regroupant le LCR-Thomson, l'IOTA, le CNET et le LAAS.

La première étape de mes travaux a porté sur le développement d'un modèle global qui regroupe, de façon consistante, les propriétés spectrales de la cavité formée par les deux réseaux de diffraction et celles de la structure à puits quantique caractéristique d'une diode laser DBR. Ce modèle original a été mis en œuvre tant comme outil de simulation que de conception, et il a permis d'étudier l'influence des paramètres géométriques de la structure sur les performances du composant. Les résultats les plus importants dégagés de cette étude concernent trois points :

- nous avons établi, de façon rigoureuse, comment devait être déterminé le pas du réseau de Bragg pour obtenir un fonctionnement optimal du composant ;
- nous avons montré que le rendement différentiel du rayonnement émis par la surface ne peut dépasser des valeurs de l'ordre de 50% ;
- nous avons été les premiers à montrer comment les performances d'émission par la surface dépendent, de façon prépondérante, de déphasages liés à des paramètres géométriques incontrôlables technologiquement : la valeur du rendement différentiel ne peut être qu'aléatoire, entre deux limites, et il est impossible de prévoir la forme du diagramme de rayonnement qui peut présenter une allure monolobe ou bilobe.

Le second volet de mes travaux a porté sur les techniques de réalisation de diodes laser à émission par la surface au moyen de réseaux de diffraction du second ordre. L'étape de réalisation des réseaux, élément-clés des diodes laser DBR, est particulièrement critique puisque le pas de celui-ci, sa position par rapport à la couche active et la géométrie du motif gravé sont déterminants quant à la réflectivité obtenue et aux performances du composant. La technique d'élaboration de ces réseaux diffractants fait appel à un procédé de photolithographie holographique à l'aide d'un banc d'insolation spécifique que j'ai mis en place et optimisé. J'ai montré que ce montage permet la réalisation de réseaux de diffraction dont le pas peut être compris dans la gamme 0,2 à 1  $\mu\text{m}$ , avec une précision de l'ordre de l'Angström, sur une surface d'environ un centimètre carré. J'ai ensuite établi les conditions optimales de dépôt, d'insolation, et de développement de résines photosensibles ainsi que les conditions de gravure des matériaux épitaxiés utilisés.

Cette étape étant maîtrisée, j'ai dû concevoir et mettre en œuvre deux bancs de mesures indispensables à la poursuite du processus technologique : un banc de mesure de pas de réseau et un banc de mesure de l'indice effectif des structures épitaxiées.

Après la mise au point de l'enchaînement technologique complet, j'ai procédé à la réalisation de diodes laser DBR à émission surfacique dans la filière GaAs au début de l'année 1995. J'ai ensuite procédé aux caractérisations optiques et électriques de ces composants dont les performances, tant sur le plan spectral que spatial, montraient une très nette amélioration par rapport aux composants conventionnels : spectre d'émission monomode à la longueur d'onde de 850 nm, largeur de raie inférieure à 0,05 nm (limite de résolution du monochromateur utilisé), ouverture du faisceau inférieure à 0,1°, puissance émise supérieure à 150 mW avec un rendement quantique différentiel de l'ordre de 30%. Enfin, les caractéristiques de fonctionnement des composants réalisés se sont révélées en bon accord avec les prévisions du modèle théorique proposé en début d'étude et ont démontré sa validité.

Publications associées à cet axe de recherche :

- ma thèse
- 1 publication dans une revue internationale : [R2]
- 3 conférences internationales : [C1], [C2], [C3]
- 10 conférences nationales : [c1], [c2], [c3], [c4], [c5], [c8], [c9], [c11], [c12], [c14]

Co-encadrement : 1 DEA (S.Mariojouis)

## **b) Microsource laser stabilisée en fréquence**

Les travaux précédents ont permis d'étudier l'influence des paramètres structuraux sur les performances d'une diode laser DBR à émission surfacique, notamment sur ses performances spectrales. L'amélioration et le contrôle des propriétés spectrales de ce type de composants peuvent être envisagés par la mise en place d'une cavité optique étendue. Cependant, la complexité, l'encombrement et le coût de systèmes optiques conventionnels procurant la stabilisation fréquentielle d'une diode laser limitent le développement de certaines applications. La métrologie, l'instrumentation ou encore les réseaux multicolores pourraient ainsi bénéficier de l'existence de microsources laser, compactes et robustes, présentant un encombrement et des conditions d'utilisation similaires à celles d'une diode laser monolithique.

Dans ce contexte, j'ai participé à l'encadrement de la thèse d'**Olivier Delléa** au cours de laquelle nous avons proposé une source laser originale obtenue par hybridation, sur silicium, d'une diode laser associée à une cavité optique étendue. Cette source met en œuvre une diode laser DBR à émission surfacique et une réinjection optique, via le réflecteur de Bragg, procurée par un micromiroir silicium externe ajustable électrostatiquement.

Dans un premier temps, en collaboration avec le laboratoire RESO de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Brest, nous avons développé une analyse théorique de la cavité qui repose sur une extension de la modélisation des diodes laser DBR par la théorie des modes couplés. Au voisinage de la fréquence de Bragg, le réflecteur de Bragg et le miroir plan sont considérés comme un réflecteur de Bragg équivalent dont on établit la réflectivité effective en fonction des paramètres structuraux de la diode laser, de la réflectivité du miroir plan et de la distance qui sépare ces deux éléments. La simulation de cas typiques de diodes laser en cavité étendue a montré que le déplacement du miroir plan offre un moyen de stabiliser la longueur d'onde d'émission au voisinage de la longueur d'onde de Bragg et d'optimiser le courant de seuil ou le rendement d'émission par la face clivée, selon le critère requis.

La mise en œuvre pratique de la cavité laser proposée a alors constitué le deuxième volet de nos travaux. Pour cela, nous avons d'abord procédé à la validation expérimentale de cette cavité étendue à l'aide d'éléments optiques macroscopiques. Ce montage a permis de mettre clairement en évidence l'effet bénéfique de cette nouvelle cavité sur les performances de la diode laser DBR prise isolément. Nous avons alors conçu et réalisé une microsource laser compacte mettant en œuvre ce principe de cavité. La partie de l'étude relative au micromiroir ajustable et à son hybridation sur le système a été effectuée en collaboration avec le Laboratoire de Physique et de Métrologie des Oscillateurs (LPMO) de Besançon. La fabrication de la diode laser DBR, le micro-usinage de la plate-forme en silicium et l'assemblage des différents éléments ont été réalisés au LAAS.

La caractérisation de la microsource ainsi obtenue a montré que l'objectif d'une source laser DBR stabilisée en fréquence était parfaitement atteint. En effet, la comparaison des performances de la diode DBR seule et de la diode couplée au micromiroir a mis en évidence l'absence de saut de mode longitudinal dans le fonctionnement de la microsource, quelle que soit la puissance émise. De plus, le réglage fin de la position du miroir à l'aide de sa tension de commande procure un fonctionnement optimal de la microsource en minimisant le courant de polarisation et en améliorant le rendement. Cette première réalisation a démontré l'intérêt et la faisabilité d'une microsource associant un concept optique novateur et un procédé de fabrication s'appuyant sur des techniques génériques et des composants bien maîtrisés. L'ensemble de ces travaux a été réalisé avec le soutien du CNES.

Publications associées à cet axe de recherche :

- 1 conférence invitée dans un congrès international : [C12]
- 2 conférences internationales : [C10], [C17]
- 3 conférences nationales : [c22], [c25], [c32]

Co-encadrement : 1 DEA (F.Flye) et 1 Thèse (O.Delléa)

## **c) Intégration photonique dans les microsystèmes**

Les problématiques liées à l'intégration photonique dans les microsystèmes ont été traitées selon deux types d'approches.

Les travaux relatifs à la première voie se sont appuyés sur la miniaturisation d'un capteur optique de déplacement et ils ont été initiés par le projet II 27 du programme CNRS "Microsystèmes" regroupant différents partenaires académiques et industriels, dont le Laboratoire de Traitement du Signal et

Instrumentation (LTSI) de Saint-Etienne avec qui nous avons développé une collaboration fructueuse ayant conduit à 9 publications. Dans ce contexte, j'ai dirigé les travaux de thèse de **Sabine Fourment** qui avaient pour objectif de proposer une voie d'intégration multifonctionnelle dans le cadre de la miniaturisation du capteur étudié. Le principe de celui-ci est basé sur l'interférométrie diffractive obtenue au moyen de deux réseaux de diffraction en mouvement relatif. En relation avec le LTSI, nous avons recherché la configuration conduisant à une grande compacité du système et permettant, à terme, d'associer sur une même plate-forme de silicium les fonctions d'émission, de diffraction, de mise en interférence, de photodétection, de conditionnement et de traitement du signal.

Dans cette perspective, et dans la recherche d'une solution à faible coût, nous avons étudié l'intégration monolithique de photodétecteurs CMOS et de leurs circuits de traitement du signal. Nous avons travaillé sur des ASICs MPW (Multi Project Wafer), en technologie CMOS 0,6  $\mu\text{m}$ , afin d'établir les propriétés optiques et électriques de différentes configurations de photodiodes et des circuits associés. Les travaux de conception relatifs à ces ASICs ont été menés en collaboration avec l'Atelier Interuniversitaire de Micro-Electronique (AIME) de Toulouse.

L'étape suivante a concerné l'intégration sur une même puce de silicium des fonctions optiques (mise en interférence) avec les fonctions photodétectrices déjà testées. Ces travaux, initiés et menés en collaboration avec le LTSI au cours de la thèse de Sabine Fourment, constituent une part significative de la thèse de **Jérôme Valentin** que j'ai co-encadrée et pour laquelle nous avons effectué une approche théorique du dispositif en simulant le fonctionnement optique par une résolution temporelle des équations de Maxwell (méthode FDTD). Les résultats de cette collaboration nous ont conduits à proposer un composant photonique monolithique particulièrement innovant assurant la fonction de détection de déphasage optique. Nous avons alors développé, en relation avec le groupe TMN (Technologie Micro et Nanostructures) du LAAS, un procédé complet de réalisation de photodétecteurs sur silicium incluant les conditions de gravure, à leur surface, de réseaux de diffraction au pas micrométrique. Les premiers dispositifs monolithiques intégrant les fonctions de mise en interférence et de détection de déphasage ont pu être testés fin 2002 et ils ont confirmé la validité du concept proposé.

Le deuxième type d'approches d'intégration photonique porte sur une exploitation des propriétés et des concepts liés aux cristaux photoniques pour miniaturiser les composants actuels, développer des fonctionnalités innovantes et renforcer l'approche planaire d'intégration photonique. Depuis 2003, je participe ainsi aux développements menés par notre équipe de recherche sur l'introduction de structures à bande interdite photonique dans les diodes laser. Dans le cadre de la thèse de **Jérôme Valentin**, et dans le prolongement de mes travaux antérieurs sur les sources laser, nous avons étudié les potentialités de miniaturisation et d'intégration apportées par une structure DBR délimitée par des miroirs à cristaux photoniques. Dans un premier temps, notre étude a concerné la modélisation de la réflectivité et des pertes engendrées par un miroir à cristal photonique unidimensionnel inséré à l'extrémité d'une structure laser à ruban nervuré GaAlAs/GaAs. Cette étude montre qu'il existe une gamme de paramètres géométriques compatibles avec la fabrication de miroirs composés de quelques périodes et présentant la réflectivité nécessaire au fonctionnement du composant. Dans un deuxième temps, nous avons développé un procédé de fabrication de diode laser incorporant ce type de miroirs dont la réalisation fait appel à des étapes de lithographie électronique et de gravure ionique réactive. Ces travaux se poursuivent aujourd'hui dans le cadre de la thèse d'**Olivier Bouchard** qui a pour thème l'élaboration de nouvelles sources laser pour la nanophotonique.

Par ailleurs, en collaboration avec l'Institut Fresnel de Marseille, je participe à l'étude d'une nouvelle génération de filtres optiques basée sur l'association monolithique d'un empilement multicouche et d'une nanostructuration de surface de type cristal photonique bidimensionnel. L'étude théorique du fonctionnement de ces filtres est menée par l'Institut Fresnel et nous étudions, au LAAS, la faisabilité technologique de ces structures pour valider leurs propriétés. Dans le cadre de ces travaux, je participe à l'encadrement de la thèse de **Stephan Hernandez** qui se déroule en cotutelle entre le LAAS et l'Institut Fresnel et qui est cofinancée par le CNES et EADS Astrium SAS.

Publications associées à cet axe de recherche :

- 3 publications dans des revues ou ouvrages : [R7], [R10], [12]
- 4 conférences internationales : [C11], [C13], [C14], [C19]
- 7 conférences nationales : [c23], [c24], [c26], [c27], [c31], [c33], [c35]

Encadrement : 2 DEA (S.Fourment, O.Bouchard) et 2 Directions de thèse (S.Fourment, O.Bouchard)

Co-encadrement : 2 Thèses (J.Valentin, S.Hernandez)

### 1.1.3 Travaux de collaboration

Les travaux de recherche et d'encadrement selon les trois axes principaux décrits dans la partie précédente reposent, pour la plupart, sur des collaborations avec des équipes de laboratoires partenaires tels que le RESO de Brest, le LPMO de Besançon, le LTSI de Saint-Etienne ou l'Institut Fresnel de Marseille. Parallèlement à ces travaux, je me suis investi dans d'autres collaborations avec des équipes française ou étrangères sur des thèmes connexes à mes principaux axes de recherches.

Chronologiquement, ces travaux de collaboration concernent essentiellement :

- la mesure d'indice de réfraction de nouveaux matériaux pour la photonique ;
- l'étude de couches organo-minérales pour l'optique intégrée ;
- la caractérisation de réseaux de diffraction ;
- l'intégration de fonctions photodéectrices accordables.

#### a) Mesure d'indice de réfraction de nouveaux matériaux pour la photonique

Les techniques de mesure d'indice effectif que j'ai élaborées au cours de mes travaux sur les diodes laser DBR à émission surfacique m'ont permis d'entreprendre, en collaboration avec l'équipe du Professeur Claude Alibert du Centre d'Electronique et de Micro-optoélectronique de Montpellier (CEM2), une détermination extensive des indices de réfraction de divers alliages semi-conducteurs sur GaSb ou InP. La connaissance précise, à  $10^{-3}$  près, de l'indice de réfraction de ces matériaux encore mal caractérisés, était indispensable pour la conception et la réalisation de composants optoélectroniques.

La mesure de ces indices a été obtenue grâce à la technique du « couplage par réseau » pour laquelle le banc d'insolation holographique que j'ai mis au point au laboratoire a été largement utilisé. De plus, l'étude de ces nouveaux alliages et la technique de mesure d'indice utilisée supposent la mise en œuvre de procédés de gravure spécifiques que j'ai développés et optimisés.

Dans ce cadre, en 1995, un contrat de collaboration d'une durée de 18 mois a été établi avec le CNET et le CEM2 pour mesurer des indices de réfraction d'alliages à base d'InP. Ces travaux ont permis d'obtenir un ensemble de mesures précises d'indices de réfraction indispensables pour la conception de dispositifs avancés dans le domaine des télécommunications optiques.

Publications associées à ces travaux : [R1], [R3], [c6], [c7], [c10] + Thèse de P.Martin (CEM2/1996)

#### b) Etude de couches organo-minérales pour l'optique intégrée

Au cours des années 1997 et 1998, en collaboration avec une deuxième équipe de CEM2 animée par Yves Moreau, j'ai mené une étude sur les potentialités offertes par des couches organo-minérales pour des applications en optique intégrée. Il s'agissait de démontrer la faisabilité de guides planaires et de réseaux de diffraction par de simples insolutions UV dans des couches minces organo-minérales obtenues par procédé sol-gel sur différents substrats. Ces matériaux hybrides, composés d'un élément inorganique et d'un élément polymérisable sous UV, présente des propriétés optiques modulables par une insolation et un traitement thermique appropriés.

Le banc d'insolation holographique mis au point pour la réalisation des diodes laser DBR m'a permis de démontrer la faisabilité de la photoinscription de réseaux de diffraction dans de telles couches déposées sur verre et sur silicium. Ce résultat original montrait que la maîtrise de la photosensibilité de ces films alliée à diverses techniques de masquage pouvait ouvrir la voie à la réalisation de composants optiques intégrés (coupleurs, filtres, multiplexeurs, miroirs, ...) de faible coût et d'un grand intérêt pour de nombreuses applications, notamment dans le domaine des capteurs.

Publications associées à ces travaux : [R4], [C7], [c15], [c16].

#### c) Caractérisation de réseaux de diffraction

L'utilisation massive des réseaux de diffraction dans les domaines de l'optoélectronique ou de l'optique intégrée, impose la réalisation de structures au profil spécifique et procurant les effets adaptés aux applications visées. La mise en œuvre d'une méthodologie de contrôle précise, rapide, peu coûteuse et non destructive présente alors un fort intérêt pour la production de ces structures.

Face aux techniques conventionnelles, basées essentiellement sur la microscopie électronique ou la microscopie à force atomique, l'équipe IMO du LTSI de Saint-Etienne a étudié deux nouvelles méthodes de résolution de problème inverse de la diffraction faisant appel, d'une part, à l'algorithmique génétique et, d'autre part, aux réseaux de neurones. Ces méthodes sont basées sur la mesure des efficacités de diffraction d'un réseau et sur la reconstruction de son profil à partir de celles-ci.

Dans ce contexte, en 2001, j'ai travaillé en collaboration avec cette équipe pour réaliser, sur silicium, des réseaux de diffraction de profils variés, de pas micronique ou submicronique, et pour les caractériser avec les moyens développés au laboratoire dans le cadre de mes travaux antérieurs sur les réflecteurs de Bragg. Les caractérisations portaient essentiellement sur la mesure du pas et sur la détermination des paramètres géométriques du profil par des observations au microscope électronique à balayage. Ces structures ont ainsi permis d'affiner la mise au point de la méthodologie développée au LTSI et ont contribué à la valider.

Publications associées à ces travaux : [R8], [c28] + Thèse de S.Robert (LTSI/2003)

#### **d) Intégration de fonctions photodéectrices accordables**

A la fin 2002, dans le cadre du réseau européen IMPACT (IMProving multidisciplinary Access to microsystems Technologies) j'ai débuté des travaux de collaboration avec le National Institute for R&D in Microtechnologies (IMT) de Bucarest (Roumanie) et l'Université d'Athènes (Grèce). Ce projet, intitulé "Micromechanical tunable interferometer for optical communications and interconnections", avait pour but la conception et l'élaboration d'un interféromètre accordable, sur silicium, associé à un photodétecteur. Parmi les différentes structures et solutions technologiques envisageables, nous avons opté pour une cavité Fabry-Perot micro-usinée, surmontant une photodiode PN sur substrat de silicium. La cavité optique accordable est constituée par une zone évidée comprise entre la face supérieure de la photodiode et une membrane suspendue semi-transparente dont la position est ajustable électrostatiquement. Après l'étude de simulation de contraintes mécaniques sur différentes géométries de membranes, nous avons établi l'enchaînement technologique et dessiné le jeu de masques (8 niveaux) nécessaire à la réalisation du composant. L'intérêt et la complexité du projet nous ont conduits à prolonger notre collaboration au-delà du programme IMPACT qui a pris fin au printemps 2003. Ainsi, dans le cadre du Programme d'Action Intégrée BRANCUSI, nous avons déposé un nouveau projet de collaboration que je pilote et qui a été accepté pour la période 2005-2006. Ce projet concerne l'intégration de nouveaux composants photoniques dans les microsystèmes en faisant appel à une technologie faible coût, compatible CMOS.

Publications associées à ces travaux : [R11], [C15], [C16].

#### **1.1.4 Encadrement scientifique**

Dans le cadre de mes travaux de recherche et de collaborations scientifiques, j'ai encadré de nombreux stagiaires en provenance de diverses formations, telles que BTS, Ecole d'Ingénieurs ou Université. Le niveau de ces étudiants et la durée de leur stage pouvaient varier fortement d'une formation à l'autre. Dans ce qui suit, je n'indique que les encadrements de stage de DEA (ou M2R) et les encadrements ou directions de thèses.

##### **a) Stages de DEA**

<i>Nom</i>	<i>Sujet de stage</i>	<i>Encadr.</i>	<i>Année</i>
S. Mariojouis	Simulation de l'insolation de résines par voie holographique en vue de la réalisation de cavités de Bragg de diodes laser	50 %	1994
S. Fourment	Etude de photodiodes en technologie CMOS pour la réalisation d'un capteur opto-mécanique	100 %	1999
F. Flye	Etude d'une diode laser DBR en cavité externe	50 %	2000
O. Bouchard	Contribution à l'étude d'un capteur monolithique de déphasage optique	100 %	2004

**b) Thèses de doctorat**

<b>Nom du doctorant</b>	<b>Olivier Delléa</b>
<i>Diplôme</i>	Doctorat de l'Université de Bretagne Occidentale
<i>Spécialité</i>	Optoélectronique
<i>Titre</i>	Etude et réalisation d'une microsource laser stabilisée en fréquence
<i>Date de début</i>	Septembre 1997
<i>Date de soutenance</i>	18 Décembre 2000
<i>% Encadrement</i>	25 %
<i>Directeur de thèse</i>	Codirection par F. Lozes-Dupuy et J. Le Bihan

<b>Nom du doctorant</b>	<b>Sabine Fourment</b>
<i>Diplôme</i>	Doctorat de l'Université Paul Sabatier de Toulouse
<i>Spécialité</i>	Microélectronique, Microsystèmes optiques
<i>Titre</i>	Intégration multifonctionnelle dans un microsystème optique : application à un capteur de déplacement
<i>Date de début</i>	Septembre 1999
<i>Date de soutenance</i>	2 Juillet 2003
<i>% Encadrement</i>	100 %
<i>Directeur de thèse</i>	P. Arguel

<b>Nom du doctorant</b>	<b>Jérôme Valentin</b>
<i>Diplôme</i>	Doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse
<i>Spécialité</i>	Nanophysique, Nanocomposants, Nanomesures
<i>Titre</i>	Nouvelles approches d'intégration pour les microsystèmes optiques
<i>Date de début</i>	Septembre 2001
<i>Date de soutenance</i>	6 Juillet 2004
<i>% Encadrement</i>	50 %
<i>Directeur de thèse</i>	F. Lozes-Dupuy

<b>Nom du doctorant</b>	<b>Olivier Bouchard</b>
<i>Diplôme</i>	Doctorat de l'Université Paul Sabatier de Toulouse
<i>Spécialité</i>	Optoélectronique
<i>Titre</i>	Nouvelles sources laser pour la nanophotonique
<i>Date de début</i>	Septembre 2004
<i>Date de soutenance</i>	Fin 2007
<i>% Encadrement</i>	50 %
<i>Directeur de thèse</i>	P. Arguel

<b>Nom du doctorant</b>	<b>Stephan Hernandez</b>
<i>Diplôme</i>	Doctorat de
<i>Spécialité</i>	Nanophotonique
<i>Titre</i>	Conception et réalisation de filtres optiques nanostructurés accordables
<i>Date de début</i>	Novembre 2004
<i>Date de soutenance</i>	Fin 2007
<i>% Encadrement</i>	30 %
<i>Directeur de thèse</i>	Codirection par F. Lozes-Dupuy et A. Sentenac



## 1.2 Implications scientifiques

Parallèlement aux travaux de recherche et aux collaborations qui viennent d'être décrits dans la partie 1.1, je me suis impliqué dans diverses actions ou projets que je vais présenter dans les sections suivantes.

### 1.2.1 Réseau doctoral en microtechnologies

La Direction de la Recherche et des Etudes Doctorales (DRED) du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche a créé, fin 1993, le Réseau Doctoral en Microtechnologies réparti sur cinq pôles inter-régionaux. En janvier 1994, j'ai été élu Président de ce réseau sur le Pôle Grand Sud-Ouest regroupant les sites universitaires de Bordeaux, Montpellier et Toulouse.

Après avoir procédé à la mise en place effective du réseau sur notre pôle, j'ai coordonné l'organisation de son premier séminaire, en relation avec le monde industriel, qui s'est déroulé le 16 mars 1994 à Toulouse et qui avait pour thème la micro-fabrication et le micro-assemblage 3D. Ce séminaire a rassemblé une soixantaine de participants et a initié une série de rencontres du même type organisées successivement et périodiquement par les trois sites universitaires de la région.

Au cours de l'année 1994, j'ai également organisé la participation de notre pôle à deux rassemblements nationaux :

- la Journée Nationale des Doctorants en Microtechnologies qui s'est tenue à Paris le 28 mars ;
- l'Ecole d'été du Réseau Doctoral en Microtechnologies qui s'est déroulée du 12 au 16 septembre à Besançon.

Enfin, en tant que membre du Bureau National du réseau, j'ai participé à la constitution de l'Annuaire National des Doctorants qui, début 1995, a été largement diffusé auprès de nombreux partenaires potentiels concernés par les microtechnologies.

### 1.2.2 Jurys de thèse

Mes activités de recherche et d'encadrement doctoral, ainsi que mes travaux de collaboration, m'ont amené à participer à quatre jurys de thèse :

- thèse de **Sabine Fourment**, intitulée « Intégration multifonctionnelle dans un microsystème optique : application à un capteur de déplacement », soutenue à Toulouse le 2 juillet 2003 devant le jury composé de : P.Destruel (Prés.), C.Boisrobert et M.de Labachelerie (Rapp.), P.Arguel, T.Bosch et O.Parriaux (Ex.) ;
- thèse de **Stéphane Robert**, intitulée « Caractérisation optique de réseaux de diffraction submicroniques par des techniques génétiques et neuronales », soutenue à Saint-Etienne le 10 juillet 2003 devant le jury composé de : A.Cachard (Prés.), H.Giovannini et S.Thiria (Rapp.), P.Arguel, G.Granet et A.Mure-Ravaud (Ex.) ;
- thèse de **Gianandrea Quadri**, intitulée « Contribution à l'étude de liaisons optiques analogiques pour la distribution de signaux de référence en gamme RF et micro-ondes », soutenue à Toulouse le 23 juin 2004 devant le jury composé de : J.Graffeuil (Prés.), V.Giordano et M.Prigent (Rapp.), P.Arguel, C.Gonzalez et O.Llopis (Ex.), B.Benazet et O.Gilard (Inv.) ;
- thèse de **Jérôme Valentin**, intitulée « Nouvelles approches d'intégration pour les microsystèmes optiques », soutenue à Toulouse le 6 juillet 2004 devant le jury composé de : X.Marie (Prés.), L.Escoubas et A.Joullié (Rapp.), P.Arguel, F.Lozes-Dupuy, A.Ramdane et M.Saccoccio (Ex.), T.Bosch et Y.Jourlin (Inv.).

### 1.2.3 Organisation de conférences

**Au niveau national**, mon implication dans le développement de la Photonique et de ses applications s'est traduite, notamment, par l'organisation de deux rassemblements phares :

- Journées Nationales d'Optique Guidée : Les 20, 21 et 22 novembre 2000, en collaboration avec deux collègues du laboratoire (F. Lozes-Dupuy et S. Bonnefont), j'ai organisé à Toulouse les Journées Nationales d'Optique Guidée (JNOG 2000). Ces journées rassemblent chaque année la communauté française concernée par les études fondamentales et les applications de l'optique guidée, en particulier dans les domaines des télécommunications par fibre optique, capteurs et

instrumentation. Les 190 participants à l'édition 2000 ont pu assister à 39 communications orales et à 60 communications par affiche. De plus, le contexte alors très actif des télécoms optiques nous a conduits à organiser une session spécifique "Entreprises émergentes en photonique" qui a comporté 6 conférences invitées et une "table ronde" faisant intervenir des entrepreneurs (*GN Nettest-Photonetics, Teem Photonics, Highwave Optical Technologies, Keopsys Optocom, Algety Telecom, Ipsis, Photline Technologies, Tronic's Microsystems*) et des représentants de divers organismes (*ANVAR, INPI, Capital-risques, Universités, CNRS*).

- Horizons de l'Optique : En collaboration avec des collègues de divers laboratoires et organismes toulousains (*LAAS, IRSAMC, INSA, CNES, CERT-ONERA*), j'ai participé à l'organisation des "Horizons de l'Optique'03" qui se sont déroulés conjointement au "8<sup>ème</sup> Colloque sur les Lasers et l'Optique Quantique – COLOQ8" du 3 au 5 septembre 2003. L'organisation commune de ces conférences bi-annuelles a favorisé la rencontre de nos deux communautés scientifiques, et nous avons accueilli à Toulouse près de 400 personnes à qui nous avons proposé 38 conférences invitées, spécifiques ou communes aux deux manifestations, et 167 communications par affiche.

**Au niveau international**, les organisateurs du "26<sup>th</sup> International Semiconductor Conference (CAS 2003)" qui se déroulait du 28 septembre au 2 octobre 2003 à Sinaia, en Roumanie, m'ont invité à être co-chairman de la session "Microoptics and Microphotonics" et à siéger au comité de sélection et de récompense des meilleures communications.

Pour l'édition 2005 de cette conférence (du 2 au 4 octobre 2005 à Sinaia), j'ai été à nouveau sollicité pour occuper la fonction de chairman durant la session "Microphotonics".

#### **1.2.4 Animation de projets scientifiques**

Dans le cadre de la thèse de Sabine Fourment, la diversité des compétences nécessaires à l'aboutissement du projet de miniaturisation du capteur de déplacement (optique, électronique, microélectronique, mécanique, traitement du signal, assemblage,...) m'a conduit, durant trois années (2000-2002), à coordonner des activités menées par différents partenaires : le Laboratoire de Traitement du Signal et Instrumentation (LTSI) de Saint-Etienne, le groupe Technologie Micro et Nanostructures (TMN) du LAAS, l'Atelier Interuniversitaire de Micro-Electronique (AIME) de Toulouse et l'entreprise Select Design de Labège spécialisée dans le dessin et la réalisation de cartes électroniques. Ce projet concernait au total une douzaine de personnes.

Le LAAS-CNRS a été un pôle du réseau européen IMPACT (de fin 1999 à mars 2003) et, durant cette période, j'ai siégé au comité scientifique local de sélection des projets. J'ai alors souhaité devenir correspondant scientifique pour le projet "Micromechanical tunable interferometer for optical communications and interconnections" proposé par le National Institute for R&D in Microtechnologies (IMT) de Bucarest (Roumanie) en collaboration avec l'Université d'Athènes (Grèce). Ce projet, décrit précédemment dans la partie 1.1.3.d, m'a conduit à accueillir à plusieurs reprises des chercheuses de l'IMT de Bucarest (Dr. R.Muller et Dr. D.Cristea). Au-delà du programme IMPACT, l'intérêt de nos échanges nous a conduits à élaborer un nouveau projet que je pilote et qui concerne la collaboration d'une douzaine de personnes dont environ la moitié de doctorants. Ce projet a été élaboré dans le cadre du Programme d'Action Intégrée BRANCUSI et bénéficie d'une aide pour la période 2005-2006.

#### **1.2.5 Mission d'expertise**

En octobre 2004, j'ai été sollicité par le Canadian Institute for Photonic Innovations (CIPI) pour expertiser le projet de recherche déposé par un groupement de six équipes universitaires canadiennes épaulées par huit entreprises partenaires dont la moitié sont des multinationales.

Le CIPI, fondé par le gouvernement fédéral du Canada dans le cadre de son réseau national de centres d'excellence, est l'organisme de recherche canadien de pointe en photonique. Fin 2004, le CIPI était chargé de l'attribution de crédits pour financer de nouveaux programmes de recherche sur une durée de quatre ans, une dotation supplémentaire pour trois nouvelles années pouvant être attribuée au vu des avancées réalisées durant la première phase. C'est dans le cadre de ce programme que j'ai été sollicité, l'objectif de ce dernier étant de démontrer l'excellence et le rôle moteur, au niveau mondial, des groupes de recherche canadiens, en privilégiant les retombées pour l'industrie nationale.



## 2. Liste des publications

### 2.1 Thèse de doctorat

**"Conception et technologie de diodes laser GaAlAs/GaAs émettant par la surface au moyen de réflecteurs de Bragg distribués"** - Thèse de Doctorat de l'Université Paul SABATIER soutenue le 13 Décembre 1995 - n° d'ordre 2183.

### 2.2 Articles dans des revues ou des ouvrages

[R1] **"Indice de réfraction de GaSb, Ga<sub>0,88</sub>In<sub>0,12</sub>As<sub>0,1</sub>Sb<sub>0,9</sub> de 2100 nm à 2160 nm"** - E.M.Skouri, P.Martin, P.Arguel, P.Grech, L.Chusseau, F.Lozes-Dupuy, C.Alibert - **Entropie**, Numéro Spécial 192/193 : "Procédés et modèles pour la micro-optique passive", pp.69-71, 1995.

[R2] **"Analysis of the sensitivity of grating-coupled surface emitting lasers to geometrical parameter variations"** - S.Bonnefont, B.Dagens, P.Arguel, H.Martinot, F.Lozes-Dupuy - **IEEE Journal of Quantum Electronics**, vol.32 (8), pp.1469-1477, Août 1996.

[R3] **"Carrier-induced change due to doping in refractive index of InP : Measurements at 1.3 and 1.5 μm"** - L.Chusseau, P.Martin, C.Brasseur, C.Alibert, P.Hervé, P.Arguel, F.Lozes-Dupuy, E.V.K.Rao - **Applied Physics Letters**, vol.69 (20), pp.3054-3056, Novembre 1996.

[R4] **"Direct printing of gratings on sol-gel layers"** - Y.Moreau, P.Arguel, P.Coudray, P.Etienne, J.Porque, P.Signoret - **Optical Engineering**, vol.37 (4), pp.1130-1135, Avril 1998.

[R5] **"Strain optimization for high differential gain and low current operation in 1.55 μm InGaAs/InGaAsP quantum well lasers"** - O.Gilard, F.Lozes-Dupuy, G.Vassilieff, S.Bonnefont, P.Arguel, J.Barreau, P.Le Jeune - **Journal of Applied Physics**, vol.86 (11), pp.6425-6430, Décembre 1999.

[R6] **"An experimental approach to the study of semiconductor laser sources"** - P.Arguel - *Edité dans "Microelectronics Education"*, ISBN 0-7923-6456-2, Kuwer Academic Publishers, 2000, pp.177-180.

[R7] **"Réalisation d'un codeur optique miniature"** - Y.Jourlin, O.Parriaux, J.Jay, J.L.Noullet, P.Arguel, S.Fourment, F.Lozes-Dupuy, G.Sarrabayrouse - *Edité dans "Systèmes et microsystèmes pour la caractérisation"* - Vol.2 - ISBN 2-7462-0209-3, Hermes, 2001, pp.163-170.

[R8] **"Experimental characterization of subwavelength diffraction gratings by an inverse scattering neural method"** - S.Robert, A.Mure-Ravaud, S.Reynaud, S.Fourment, F.Carcenac, P.Arguel - **Journal of Optical Society of America A**, Vol.19 (12), pp.2394-2402, Décembre 2002.

[R9] **"Approche expérimentale d'une ligne de transmission par fibre optique"** - P.Arguel, P.Destruel - **Journal de l'Enseignement des Sciences et des Technologies de l'Information et des Systèmes (J3eA)**, Edition électronique d'EDP Sciences, ISSN 1638-5705 - <http://www.edpsciences.org/j3ea> - Vol.2, N°8, Juin 2003.

[R10] **"A silicon integrated opto-electro-mechanical displacement sensor"** - S.Fourment, P.Arguel, J.L.Noullet, F.Lozes-Dupuy, S.Bonnefont, G.Sarrabayrouse, Y.Jourlin, J.Jay, O.Parriaux - **Sensors & Actuators A**, Issues 1-3, Vol.A110, pp.294-300, Février 2004.

[R11] **"Micromachined tunable optical microfilters design and experimental processing"** - D.Cristea, R.Muller, P.Arguel, M.Kusko, C.Tibeica, D.Syvridis - **MEMS, MOEMS and Micromachining** - Proceedings of SPIE, Vol.5455 - ISBN 0-8194-5378-1 - 2004 - pp.252-263.

[R12] **"A Monolithic Optical Phase-Shift Detector on Silicon "** – P.Arguel, J.Valentin, S.Fourment, F.Lozes-Dupuy, G.Sarrabayrouse, S.Bonnefont, Y.Jourlin, S.Reynaud, N.Destouches, A.Tishchenko, J.Jay - **IEEE Sensors Journal**, Vol.5 (6), pp.1305-1309, Décembre 2005.

### 2.3 Communications dans des congrès internationaux

[C1] **"Modelling of quantum-well second-order distributed Bragg reflector lasers"** - S.Bonnefont, F.Lozes-Dupuy, B.Dagens, P.Arguel, H.Leymarie, H.Martinot - **CLEO'94 Conference on Lasers and Electro-Optics** - Amsterdam (NL) - 28 Août-2 Septembre 1994.

[C2] **"Modelling of edge-emitting DBR GaAs QW Lasers"** - S.Bonnefont, F.Lozes-Dupuy, B.Dagens, P.Arguel, H.Leymarie, H.Martinot - **SIOE'95 Semiconductor and Integrated Optoelectronics** - Cardiff (GB) - 28-30 Mars 1995.

[C3] **"Modelling of grating surface emitting lasers"** - S.Bonnefont, B.Dagens, P.Arguel, H.Martinot, F.Lozes-Dupuy - **SIOE'96 Semiconductor and Integrated Optoelectronics** - Cardiff (GB) - 1-3 Avril 1996.

[C4] **"Modelling of strained quantum-well lasers for optical communication systems"** - O.Gilard, S.Bachmann, P.Spiesser, P.Arguel, S.Bonnefont, G.Vassilieff, F.Lozes-Dupuy, O.Issanchou, J.Barrau - **SIOE'97 Semiconductor and Integrated Optoelectronics** - Cardiff (GB) - 24-26 Mars 1997.

[C5] **"Modelling of optical power amplifier"** - S.Bonnefont, S.Mariojouis, C.Vergnenègre, O.Gilard, P.Arguel, G.Vassilieff, F.Lozes-Dupuy - **1997 Semiconductor laser workshop** - Pitlochry (Scotland) - 20-21 Septembre 1997.

[C6] **"A new concept of flared amplifier for high brightness source"** - B.Dagens, C.Vergnenègre, S.Mariojouis, O.Gilard, P.Arguel, S.Bonnefont, G.Vassilieff, F.Lozes-Dupuy - **ICSO International Conference on Space Optics** - Labège (France) - 2-4 Décembre 1997.

[C7] **"Index modulation Bragg gratings directly imprinted on sol-gel layers"** - Y.Moreau, P.Arguel, P.Coudray, J.Porque, P.Etienne - **Optoelectronics'98 / Photonics West** - San Jose (California, USA) - 24-30 Janvier 1998.

[C8] **"Thermal limitations in high brightness sources"** - S.Bonnefont, S.Mariojouis, O.Gilard, C.Vergnenègre, P.Arguel, G.Vassilieff, F.Lozes-Dupuy - **European Semiconductor Laser Workshop 1999** - Paris (France) - 24-25 Septembre 1999.

[C9] **"La technologie microélectronique en deuxième cycle universitaire"** - P.Arguel, P.Austin - **Première Rencontre des Acteurs de la Formation Technologique d'Europe et d'Amérique Latine** - La Havane (Cuba) - 17-21 Avril 2000.

[C10] **"A MOEMS solution for the frequency stabilization of a DBR semiconductor laser "** – M.de Labachellerie, C.Chappaz, O.Dellea, S.Bonnefont, P.Arguel, F.Lozes – **IEEE International Conference on Optical MEMS and Their Applications (IEEE/LEOS Optical MEMS 2001)** – Okinawa (Japan) – 25-28 Sept 2001.

[C11] **"A silicon integrated opto-electro-mechanical displacement sensor "** - S.Fourment, P.Arguel, J.L.Noullet, F.Lozes-Dupuy, S.Bonnefont, G.Sarrabayrouse, Y.Jourlin, J.Jay, O.Parriaux – **16th European Conference on Solid-State Transducers (EUROSENSORS XVI)** – Prague (Rép. Tchèque) – 15-18 Sept 2002.

[C12] **"A frequency stabilized semiconductor laser microsource based on MOEMS technology"** – P.Arguel, S.Bonnefont, F.Lozes-Dupuy, O.Dellea, M.de Labachellerie, C.Chappaz – **Conférence invitée – 26<sup>th</sup> International Semiconductor Conference (CAS 2003) Sponsorisée par IEEE** – Sinaia (Romania) – 28 Sept / 2 Oct 2003.

[C13] **"Monolithic diffractive interference detector on silicon"** – Y.Jourlin, S.Reynaud, N.Destouches, A.Tishchenko, S.Fourment, P.Arguel, F.Lozes-Dupuy, G.Sarrabayrouse, J.Valentin – **Optical Systems Design 2003 (Conférence SPIE)** – Saint-Etienne (France) – 30 Sept / 3 Oct 2003.

[C14] **"A monolithic phase measurement photodetector"** – P.Arguel, J.Valentin, S.Fourment, F.Lozes-Dupuy, G.Sarrabayrouse, S.Bonnefont, Y.Jourlin, S.Reynaud, N.Destouches, A.Tishchenko, J.Jay – **IEEE International Conference on Sensors (IEEE SENSORS 2003)** – Toronto (Canada) – 21-24 Oct 2003.

[C15] **"Micromachined tunable optical microfilters design and experimental processing"** – D.Cristea, R.Muller, P.Arguel, P.Pons, M.Kusko, C.Tibeica, D.Syvridis – **Photonics Europe** – Strasbourg (France) – 26-30 Avril 2004.

[C16] **"Tunable Fabry-Perot surface micromachined interferometer. Experiments and modelling"** – R.Muller, D.Cristea, C.Tibeica, P.Pons, P.Arguel, D.Syvridis – **Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP'2004)** – Montreux (Suisse) – 12-14 Mai 2004.

[C17] **"New optical technology for cold atom experiments"** – D.Holleville, N.Dimarcq, F.Rigaud, M.Saccoccio, J.Berthon, J.Loesel, C.Chappaz, M.de Labachellerie, J.Valentin, S.Bonnefont, P.Arguel, F.Lozes – **5<sup>th</sup> International Conference on Space Optics (ICSO'2004)** – Toulouse (France) – 30 Mars- 2 Avril 2004.

[C18] **" Optical devices and laser sources for compact space atomic instruments"** – M.Saccoccio, J.Berthon, J.Loesel, D.Holleville, N.Dimarcq, F.Rigaud, P.Bouyer, A.Bresson, A.Langevin, J.Valentin, S.Bonnefont, P.Arguel, F.Lozes, C.Chappaz, M.de Labachellerie, F.J.Vermersch, M.Krakowski – **1<sup>st</sup> ESA International Workshop on Optical Clocks** – Noorwdijk (Netherlands) – 8-10 Juin 2005.

[C19] **"Analysis of the sensitivity of a monolithic optical phase-shift detector to geometrical parameter variations "** – J.Valentin, P.Arguel, O.Bouchard, F.Lozes-Dupuy, S.Bonnefont – **28<sup>th</sup> International Semiconductor Conference (CAS 2005) Sponsorisée par IEEE** – Sinaia (Romania) – 2-4 Oct 2005.

#### **2.4 Communications dans des congrès nationaux**

[c1] **"Diodes laser GaAlAs/GaAs émettant par la surface au moyen de réseaux de Bragg du deuxième ordre"** - S.Bonnefont, F.Lozes-Dupuy, B.Dagens, P.Arguel, J.Chevalier, B.Rousset, H.H.Pham, N.Fabre, H.Martinot, A.Talneau - **4<sup>èmes</sup> Journées Microélectronique et Optoélectronique III/V** - La Grande Motte - 21-23 Octobre 1992.

[c2] **"Diodes laser à émission surfacique : conception et réalisation de composants à réseaux de Bragg du deuxième ordre"** - S.Bonnefont, F.Lozes-Dupuy, B.Dagens, P.Arguel, J.Chevalier, B.Rousset, H.H.Pham, N.Fabre, H.Martinot, A.Talneau - **13<sup>èmes</sup> Journées Nationales d'Optique Guidée** - Marseille - 26-27 Mai 1993.

[c3] **"Etude de réseaux diffractants pour diodes laser à émission surfacique"** - P.Arguel - **Journées du Réseau FIRTECH Microélectronique/Optronique** - Toulouse - 10-12 Janvier 1994.

[c4] **"Epitaxie de diodes laser GaAlAs/GaAs à émission surfacique"** - B.Dagens, S.Bonnefont, P.Arguel, F.Lozes-Dupuy, H.Martinot - **10<sup>ème</sup> Séminaire National d'Epitaxie par Jets Moléculaires** - Saint-Aigulf - 30 Mai-1<sup>er</sup> Juin 1994.

[c5] **"Modélisation de diodes laser à puits quantique et à réseaux de Bragg du second ordre"** - S.Bonnefont, F.Lozes-Dupuy, B.Dagens, P.Arguel, H.Leymarie, H.Martinot - **5<sup>èmes</sup> Journées Microélectronique et Optoélectronique III/V** - Lyon - 22-24 Juin 1994.

- [c6] **"Réalisation de réseaux de diffraction par une technique interférométrique : Application à la mesure d'indice et à la réalisation de diodes laser à émission surfacique"** P.Arguel, F.Lozes-Dupuy, S.Bonnefont, B.Rousset, H.Martinot, P.Martin, L.Chusseau, C.Alibert - **5<sup>èmes</sup> Journées Microélectronique et Optoélectronique III/V** - Lyon - 22-24 Juin 1994.
- [c7] **"Mesure d'indice des guides plans  $Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}$  sur GaSb par la technique de couplage par réseau"** - E.M.Skouri, P.Martin, P.Grech, C.Alibert, L.Chusseau, F.Lozes-Dupuy, P.Arguel - **Journées Nationales d'Optique Guidée** - Besançon - 25-26 Octobre 1994.
- [c8] **"Modélisation de diodes laser à puits quantique et à réseaux de Bragg du second ordre"** - S.Bonnefont, H.Martinot, B.Dagens, P.Arguel, H.Leymarie, F.Lozes-Dupuy - **Journées Nationales d'Optique Guidée** - Besançon - 25-26 Octobre 1994.
- [c9] **"Réalisation de réseaux diffractants par photolithographie holographique : Application à la réalisation de diodes laser DBR à émission surfacique"** - P.Arguel, F.Lozes-Dupuy, S.Bonnefont, H.Martinot - **2<sup>ème</sup> Journée Nationale du Réseau Doctoral en Microtechnologies** - Lille - 27 Mars 1995.
- [c10] **"Mesure des indices de réfraction de semiconducteurs composés III-V et de guides plans par la technique de couplage par un réseau de diffraction"** - E.M.Skouri, P.Martin, P.Arguel, P.Grech, L.Chusseau, F.Lozes-Dupuy, C.Alibert - **Georgia Tech Lorraine** - Metz - 11-12 Avril 1995.
- [c11] **"Diodes laser DBR AlGaAs/GaAs : conception et réalisation de sources maître pour MOPA et de diodes laser à émission surfacique"** - S.Bonnefont, P.Arguel, B.Dagens, S.Mariojouis, H.Martinot, F.Lozes-Dupuy, G.Vassilieff - **Journée Nationale "Perspectives sur les lasers et les amplificateurs à semiconducteurs"** - Toulouse - 14 Décembre 1995.
- [c12] **"Diodes laser émettant par la surface au moyen de réseaux diffractants"** - S.Bonnefont, P.Arguel, B.Dagens, H.Martinot, F.Lozes-Dupuy - **5<sup>èmes</sup> Journées de la Matière Condensée (SFP)** - Orléans - 28-30 Août 1996.
- [c13] **"Ingénierie de bande interdite à 1,3  $\mu m$  et 1,55  $\mu m$  en vue de la conception de dispositifs optoélectroniques"** - O.Gilard, S.Bachmann, P.Spiesser, P.Arguel, S.Bonnefont, G.Vassilieff, F.Lozes-Dupuy, O.Issanchou, J.Barrau - **6<sup>èmes</sup> Journées Nationales de Microélectronique et Optoélectronique III/V** - Chantilly - 29-31 Janvier 1997.
- [c14] **"Sources laser de grande luminance : diodes DBR à émission surfacique et sources MOPA"** - P.Arguel, B.Dagens, S.Mariojouis, O.Gilard, C.Vergnenègre, S.Bonnefont, G.Vassilieff, F.Lozes-Dupuy, H.Martinot - **6<sup>èmes</sup> Journées Nationales de Microélectronique et Optoélectronique III/V** - Chantilly - 29-31 Janvier 1997.
- [c15] **"Réseaux de Bragg à modulation d'indices par voie sol-gel"** - Y.Moreau, P.Arguel, P.Coudray, P.Etienne, J.Porque, P.Signoret - **Horizons de l'Optique 97** - Paris - 6-7 Octobre 1997.
- [c16] **"Réseaux diffractifs photoinscrits sur couche sol-gel"** - Y.Moreau, P.Arguel, P.Coudray, J.Porque, P.Etienne - **17<sup>èmes</sup> Journées Nationales d'Optique Guidée** - Saint-Etienne - 3-5 Novembre 1997.
- [c17] **"Analyse du gain optique dans les diodes laser et les amplificateurs optiques pour télécommunications optiques"** - O.Gilard, A.Vicet, S.Bonnefont, S.Bachmann, P.Spiesser, S.Mariojouis, C.Vergnenègre, P.Arguel, G.Vassilieff, F.Lozes-Dupuy, J.Barrau - **18<sup>èmes</sup> Journées Nationales d'Optique Guidée** - Marly-le-Roy - 26-28 Octobre 1998.
- [c18] **"Analyse de l'influence des effets thermiques sur les performances d'une source laser de type MOPA"** - S.Bonnefont, S.Mariojouis, O.Gilard, C.Vergnenègre, P.Arguel, G.Vassilieff, F.Lozes-Dupuy - **18<sup>èmes</sup> Journées Nationales d'Optique Guidée** - Marly-le-Roy - 26-28 Octobre 1998.

- [c19] **"Méthodologie d'analyse des performances intrinsèques des diodes laser et des amplificateurs optiques"** - O.Gilard, A.Vicet, S.Bonnefont, S.Bachmann, P.Spiesser, S.Mariojous, C.Vergnenègre, P.Arguel, G.Vassilieff, F.Lozes-Dupuy - **7<sup>èmes</sup> Journées Nationales de Microélectronique et Optoélectronique** - Egat - 6-8 Janvier 1999.
- [c20] **"Analyse des limitations en puissance d'un amplificateur optique à contact évasé"** - S.Mariojous, C.Vergnenègre, S.Bonnefont, O.Gilard, P.Arguel, G.Vassilieff, F.Lozes-Dupuy - **7<sup>èmes</sup> Journées Nationales de Microélectronique et Optoélectronique** - Egat - 6-8 Janvier 1999.
- [c21] **"Optimisation de la contrainte dans les lasers InGaAs/InGaAsP émettant à 1,55  $\mu\text{m}$ "** - O.Gilard, F.Lozes-Dupuy, G.Vassilieff, S.Bonnefont, P.Arguel, S.Bachmann, P.Spiesser, J.Barreau - **19<sup>èmes</sup> Journées Nationales d'Optique Guidée** - Limoges - 6-8 Décembre 1999.
- [c22] **"Etude théorique d'un laser DBR contrôlé par miroir externe"** - O.Déllea, S.Bonnefont, P.Arguel, F.Lozes-Dupuy, Y.Boucher, J.Le Bihan - **19<sup>èmes</sup> Journées Nationales d'Optique Guidée** - Limoges - 6-8 Décembre 1999.
- [c23] **"Codeur optique miniature haute résolution"** – Y.Jourlin, O.Parriaux, J.Jay, J.L.Noullet, P.Arguel, S.Fourment, F.Lozes-Dupuy, G.Sarrabayrouse – **Méthodes et Techniques Optiques pour l'Industrie** - Biarritz - 21-24 Novembre 2000.
- [c24] **"Réalisation d'un codeur optique miniature"** – Y.Jourlin, O.Parriaux, J.Jay, J.L.Noullet, P.Arguel, S.Fourment, F.Lozes-Dupuy, G.Sarrabayrouse – **Colloque Instrumentation et Interdisciplinarité (C2I)** – Paris – 31 Janv.-1<sup>er</sup> Fév. 2001.
- [c25] **"Microsource laser stabilisée en fréquence"** - O.Déllea, S.Bonnefont, P.Arguel, F.Flye, F.Lozes-Dupuy, C.Chappaz, M.De Labacherie, Y.Boucher, J.Le Bihan - **8<sup>èmes</sup> Journées Nationales de Microélectronique et Optoélectronique** - Aussois - 15-17 Janvier 2001.
- [c26] **"Etude et réalisation d'un micro-capteur de déplacement intégré"** - P.Arguel, S.Fourment, J.L.Noullet, G.Sarrabayrouse, F.Lozes-Dupuy, Y.Jourlin, O.Parriaux, J.Jay - **8<sup>èmes</sup> Journées Nationales de Microélectronique et Optoélectronique** - Aussois - 15-17 Janvier 2001.
- [c27] **"Contribution à l'étude d'un micro-capteur de déplacement intégré"** – S.Fourment, P.Arguel – **Journées Nationales du Réseau Doctoral en Microélectronique** – Strasbourg – 24-25 Avril 2001.
- [c28] **"Résolution d'un problème inverse par une approche neuronale. Application à la caractérisation de réseaux optiques"** – S.Robert, S.Reynaud, A.Mure-Ravaud, S.Fourment, F.Carcenac, P.Arguel, D.Lacour – **Contrôle et mesures optiques pour l'industrie** – Trégastel – 19-23 Novembre 2001.
- [c29] **"Etude et réalisation d'une liaison optique RF à faible bruit de phase"** – G.Quadri, H.Martinez-Reyes, P.Arguel, O.Llopis – **Journées Nationales d'Optique Guidée** – Dijon – 23-25 Septembre 2002.
- [c30] **"Télécommunications optiques : étude expérimentale en filière EEA"** – P.Arguel, P.Destruel – **7<sup>èmes</sup> Journées Pédagogiques du Comité National de Formation en Microélectronique** – Saint-Malo – 27-29 Novembre 2002.
- [c31] **"Intégration photonique dans un capteur de déplacement"** - S.Fourment, P.Arguel, J.Valentin, F.Lozes-Dupuy, G.Sarrabayrouse, S.Bonnefont, J.L.Noullet, Y.Jourlin, J.Jay, O.Parriaux, S.Reynaud – **Horizons de l'Optique 2003** - Toulouse – 3-5 Septembre 2003.
- [c32] **"Développement de systèmes lasers pour horloges et interféromètres atomiques compacts spatiaux"** – M.Saccoccio, J.Berthon, N.Dimarcq, D.Holleville, C.Chappaz, M.de Labacherie, O.Delléa, J.Valentin, S.Bonnefont, P.Arguel, F.Lozes-Dupuy – **Horizons de l'Optique 2003** - Toulouse – 3-5 Septembre 2003.



[c33] **"Détection intégrée d'interférences"** - J.Valentin, S.Fourment, P.Arguel, F.Lozes-Dupuy, G.Sarrabayrouse, S.Bonnefont, Y.Jourlin, O.Parriaux, S.Reynaud – **Journées Nationales d'Optique Guidée** - Valence – 12-14 Novembre 2003.

[c34] **"Complément multimédia à l'étude pratique des lasers à semiconducteur"** – P.Arguel, P.Destruel – **Colloque sur l'Enseignement des Technologies et des Sciences de l'Information et des Systèmes en Electronique, Electrotechnique et Automatique (CETSIIS-EEA 2003)** – Toulouse – 13-14 Novembre 2003.

[c35] **"Capteur monolithique de déphasage optique"** – J.Valentin, S.Fourment, O.Bouchard, P.Arguel, F.Lozes-Dupuy – **X<sup>e</sup> Journées Nationales de Microélectronique et Optoélectronique** – La Grande Motte – 8-11 Juin 2004.

[c36] **"Etude expérimentale d'un laser Nd:YAG pompé par diode"** – P.Arguel, G.Molénat, J.Léotin – **Rencontres pédagogiques du 9<sup>e</sup> Colloque sur les lasers et l'optique quantique** – Dijon – 7-9 Septembre 2005.

## **2<sup>ème</sup> Partie**

### **Axes de recherche, principaux résultats et perspectives**



## Introduction

Les travaux présentés ici reflètent les principaux défis et problématiques qui ont jalonné les recherches sur les diodes laser et, plus récemment, la photonique. Les verrous, encore actuels, sur lesquels j'ai successivement porté mon attention concernent :

- la montée en puissance des diodes laser avec un fonctionnement monomode stable ;
- le contrôle spectral de l'émission ;
- l'intégration de la source et de diverses fonctions optiques dans un système photonique.

Ainsi, depuis mon arrivée au laboratoire, mes travaux ont progressivement évolué de l'étude du composant élémentaire à l'étude de son intégration dans un microsystème.

A la fin des années 1980, la recherche d'émetteurs puissants selon une bonne qualité de faisceau avait conduit les équipes de Spectra Diode Laboratories et David Sarnoff Research Center à explorer différents types de couplage optique pour assurer un fonctionnement en phase de plusieurs sources. Malgré le gain en puissance procuré par des structures matricielles, la difficulté de coupler en phase plusieurs émetteurs se traduisait par une forte instabilité du fonctionnement. La croissance de besoins en émetteurs puissants, selon un faisceau de bonne qualité spectrale et spatiale, a conduit notre équipe à explorer, à partir de 1990, une voie originale en France consistant à tirer profit des trois ordres de diffraction issus d'un réseau du second ordre. Les structures laser DBR (Distributed Bragg Reflector) intégrant un élément de ce type pouvaient alors procurer une émission puissante par la surface, selon un faisceau faiblement divergent, tout en permettant le couplage avec des émetteurs voisins.

Au milieu des années 1990, l'obtention de diodes laser de forte puissance ayant été démontrée, un défi essentiel à relever consistait à proposer une source laser présentant une grande qualité spectrale et un fort potentiel d'intégration pour des applications notamment en métrologie et instrumentation. Nos travaux se sont alors orientés vers le domaine des MOEMS (Micro Opto Electro Mechanical System) et ont porté sur l'incorporation d'une diode laser DBR dans une cavité externe, en faisant appel au micro-usinage du silicium et aux techniques de report. Il s'agissait là d'une problématique nouvelle pour notre équipe et dans laquelle je me suis engagé, à partir de 1998, dans le cadre de la réalisation d'une microsource laser stabilisée en fréquence.

Depuis cette époque, mes travaux portent essentiellement sur l'étude de l'important verrou que constitue l'intégration photonique dans les microsystèmes. En effet, la variété des filières technologiques relatives aux composants optiques, optoélectroniques, mécaniques et électroniques rendent les procédés de fabrication très difficilement compatibles. De plus, cette difficulté est accentuée par la variété des fonctions, des dimensions et des géométries des éléments à associer. De nos jours, l'hybridation constitue la voie la plus avancée pour la réalisation de microsystèmes opto-électromécaniques, et la problématique de l'intégration photonique présente un champ très vaste et peu défriché. Dans ce contexte, mes premiers travaux ont porté sur l'intégration monolithique de fonctions photodétectrices et électroniques sur silicium, en leur associant, dans un deuxième temps, une fonction optique. Cette approche de l'intégration multifonctionnelle monolithique sur silicium a été utilisée comme support expérimental d'un capteur optique de déplacement et a fait appel à un procédé de réalisation compatible avec la technologie CMOS pour autoriser des productions collectives à faibles coûts.

Le volet le plus récent de mes travaux, quant à lui, a concerné l'étude de l'intégration de fonctions photoémettrices. Dans ce cadre, les possibilités offertes par les cristaux photoniques pour la réalisation d'une cavité laser miniature ont été explorées. La maîtrise de ce type de structures est nécessaire pour ouvrir la voie à l'intégration planaire dense de fonctions émettrices et optiques en vue de la réalisation de sources laser aux fonctionnalités nouvelles et à fort potentiel d'intégration.

Ainsi, mes travaux de recherche m'ont conduit à explorer différentes approches de l'intégration de fonctions optiques, optoélectroniques et électroniques. Mes activités se sont essentiellement déroulées suivant les trois grands axes successifs présentés dans la première partie du document :

- diode laser DBR à émission surfacique ;
- microsource laser stabilisée en fréquence ;
- intégration photonique dans les microsystèmes.

Mes travaux selon ces trois axes et les principaux résultats obtenus vont maintenant être développés.



# 1. Diodes laser DBR à émission surfacique

## 1.1 Contexte et objectif des travaux

L'histoire du développement des diodes laser illustre les progrès accomplis, depuis le début des années 1960, tant sur le plan des concepts que sur la maîtrise des procédés de fabrication. Au fil des ans, l'essor de domaines d'applications toujours plus nombreux (traitement optique du signal, interconnexions optiques, communications spatiales, pompage de lasers solides, stockage et impression optique,...) a apporté de nouvelles exigences en terme de puissance optique, de qualité spectrale, de qualité géométrique du faisceau et de diversification des longueurs d'onde. Ces évolutions ont contribué à la percée, dans les années 1990, de nouvelles structures laser procurant une émission par la surface, c'est-à-dire perpendiculaire à celle des cavités conventionnelles.

L'attrait pour les composants à émission surfacique réside, en particulier, dans les propriétés suivantes :

- possibilité de réaliser des matrices bidimensionnelles d'émetteurs ;
- simplification des opérations de test et de montage qui ne nécessitent plus le clivage ;
- simplification de l'interfaçage avec une fibre ou un autre composant optique ;
- possibilité d'obtenir de fortes puissances sans dégradation des facettes, point qui constitue un inconvénient majeur des diodes laser de puissance dans la filière GaAlAs/GaAs.

Trois approches distinctes ont alors été suivies pour la réalisation de telles structures :

- exploiter le matériau à couche active dans la direction perpendiculaire au plan des couches en incorporant des réflecteurs parallèlement à ce plan et en créant ainsi une cavité verticale ;
- conserver une cavité horizontale conventionnelle et orienter le faisceau dans la direction verticale à l'aide de défecteurs à 45° ;
- utiliser les propriétés des réseaux de diffraction du second ordre afin de constituer une cavité horizontale à émission verticale, l'ordre 2 des réseaux permettant l'oscillation laser et l'ordre 1 procurant l'émission par la surface.

Les diodes laser à cavité verticale faisant l'objet de la première approche sont de type VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) et elles constituent des composants clés pour la réalisation de matrices bidimensionnelles à forte densité d'intégration. Elles sont très bien adaptées à de vastes domaines d'applications tels que les interconnexions optiques, les systèmes de communication optique, le traitement optique du signal,... La faible épaisseur de la cavité optique, qui est de l'ordre du micromètre, procure une émission monofréquence pouvant être modulée à haut débit. Le faisceau émis est de section circulaire et de faible divergence, ce qui facilite tout particulièrement le couplage avec une fibre optique. Cependant, du point de vue technologique, le faible volume du milieu actif impose la réalisation de miroirs d'une réflectivité voisine de 99%, obtenus généralement par des réflecteurs de Bragg intégrés, constitués par un empilement périodique de nombreuses couches quart d'onde alternant des matériaux de faible et fort indice de réfraction.

A la suite des premiers résultats obtenus sur ces composants, de nombreux progrès ont permis d'améliorer les confinements électrique et optique, réduire les effets thermiques, étendre le domaine spectral d'émission, et réaliser des sources accordables ou sélectionnables [1]. Ainsi, dans le milieu des années 1990, des matrices de diodes fonctionnant en régime continu avec des courants de seuil de l'ordre du mA et des puissances optiques de quelques dizaines de mW étaient disponibles sur le marché.

La seconde approche explorée dans les années 1990 pour l'émission surfacique concerne plus particulièrement les applications de puissance dans le domaine du pompage des lasers solides, de l'optronique militaire ou du spatial. Ces diodes laser ont remplacé avantageusement les lampes flash utilisées comme source de pompage de cristaux dopés avec des terres rares en apportant des améliorations spectaculaires en terme de fiabilité, rendement, encombrement et fréquence de modulation. L'émission surfacique est obtenue en incorporant des défecteurs à l'intérieur ou à l'extérieur de la cavité [2]. La technologie de ces diodes laser est plus conventionnelle et facile à maîtriser que celle des diodes à cavité verticale, et elle présente l'avantage d'être compatible avec la réalisation de circuits intégrés photoniques. Si la divergence du faisceau émis verticalement peut s'avérer pénalisante pour une utilisation directe, il est possible de la corriger à l'aide de micro-lentilles disposées parallèlement au plan de la structure, ou en réalisant des défecteurs de profil parabolique.

D'autre part, l'intégration de ces diodes en matrices bidimensionnelles, associée à la réduction des effets thermiques, permettait d'atteindre, dans le milieu des années 1990, des densités de puissance optique de l'ordre du kW/cm<sup>2</sup> en fonctionnement quasi-continu et de quelques centaines de W/cm<sup>2</sup> en fonctionnement continu.

Face à la croissance de besoins en diodes laser émettant des puissances hautement cohérentes dans un faisceau de très faible divergence, la troisième approche a porté sur des structures à cavité horizontale émettant par la surface au moyen de réseaux de diffraction du second ordre. Comparativement aux cavités conventionnelles émettant par les facettes, la présence d'une grande fenêtre d'émission permet d'extraire des puissances plus élevées selon un faisceau moins divergent (Fig.1) et, de plus, la sélectivité des miroirs distribués procure une émission laser de très faible largeur spectrale, stable en régime dynamique.

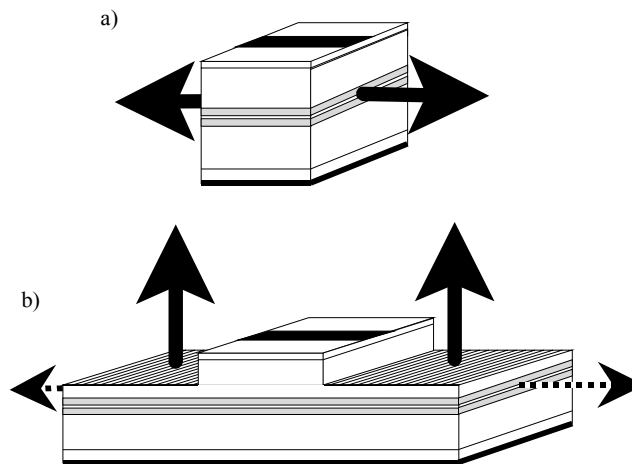


Fig.1 : Emission par les faces clivées d'une diode laser à cavité conventionnelle (a) et émission par la surface d'une diode laser DBR à réseaux de Bragg du second ordre (b).

A la suite de premiers essais effectués en 1975 sur des structures à double hétérojonction [3], la faisabilité de dispositifs DBR fonctionnant en régime continu a été démontrée une douzaine d'années plus tard. Ce fonctionnement a pu être obtenu grâce à l'introduction d'une couche active à puits quantique dont les propriétés d'absorption et de confinement optique ont permis de limiter la part des pertes optiques dans les zones non pompées [4]. Dès lors, des diodes laser à rétroaction répartie de type DFB (Distributed FeedBack) ou à réflecteurs de Bragg distribués de type DBR (Distributed Bragg Reflector) ont été réalisées, ces dernières présentant l'avantage technologique de ne pas nécessiter de reprise d'épitaxie après la réalisation du réseau diffractant. Ces divers composants à émission surfacique sont caractérisés par une émission monomode et un diagramme de rayonnement dont la divergence est inférieure à 1° dans la direction perpendiculaire aux traits des réseaux. Cependant, malgré des raffinements successifs de la structure (substrat transparent, réflecteur multicouche dans le substrat, puits quantique contraint, association de réseaux du premier et second ordre,...), les performances atteintes au moment de notre étude étaient limitées par une densité de courant de seuil de l'ordre du kA/cm<sup>2</sup> et des rendements différentiels situés entre 10 et 30%.

D'autre part, des matrices linéaires ont été réalisées en couplant longitudinalement l'émission de plusieurs diodes par la mise en commun de leurs réseaux [5]. Elles ont permis d'atteindre des performances caractérisées par une puissance optique de quelques Watts, une divergence du faisceau de l'ordre de 0,01° , une largeur de raie inférieure au MHz et la possibilité d'ajuster électriquement le pointage du faisceau. La réalisation de matrices bidimensionnelles [6], couplant latéralement les émetteurs par le recouvrement de leurs champs évanescents ou au moyen de branchements en Y, ont permis également d'accroître les performances en puissance optique tout en réduisant la divergence latérale du faisceau.

Cependant, quelle que soit la configuration considérée, les performances en courant de seuil et en rendement différentiel de ces dispositifs restaient inférieures à celles des diodes laser conventionnelles. Par ailleurs, pour ce type de structures, la forme du diagramme de rayonnement (monolobe ou bilobe) s'avérait impossible à prédire et la mise en phase de l'émission de plusieurs sections de réseaux ne

pouvait être atteinte technologiquement. L'origine de ces difficultés était généralement attribuée à des non-uniformités dans les réseaux, sans qu'une étude théorique n'ait approfondi l'influence des paramètres technologiques sur le comportement modal de ces dispositifs.

Pour surmonter ces limitations, les diodes laser de puissance à émission surfacique ont alors évolué vers des configurations de type MOPA (Master Oscillator Power Amplifier) [7]. Ces sources procuraient l'amplification, et la diffraction vers la surface, de l'émission d'une diode laser DBR ou DFB du premier ordre. L'amplification et l'émission surfacique étaient obtenues grâce à un ou plusieurs amplificateurs émettant par la surface au moyen de réseaux de Bragg désaccordés par rapport à l'oscillateur pour éviter les ré-injections optiques parasites dans la cavité laser (l'émission surfacique n'étant alors pas normale à la surface). Toutefois, la mauvaise qualité optique du faisceau obtenu, résultant de l'impossibilité de contrôler électriquement la phase de l'onde émise le long de la section amplificatrice, a compromis le développement de ce type de structures.

L'analyse des études théoriques et des réalisations pratiques concernant les sources laser émettant par la surface au moyen de réseaux de diffraction du deuxième ordre mettait en évidence que les différents essais avaient été effectués à partir de considérations théoriques qualitatives ou de modèles se limitant au comportement électromagnétique, sans tenir compte de son interaction avec les propriétés électriques et optiques de la structure laser à puits quantique.

Dans ce contexte, mon travail de thèse a eu pour but de proposer et valider une méthodologie globale d'analyse du comportement de la diode laser DBR à émission surfacique. Mes travaux se sont appuyés sur un logiciel de simulation original développé au sein de notre équipe. L'objectif était d'établir des critères de conception et d'étudier les limites de performances du dispositif à partir des paramètres technologiques de la structure. Le support expérimental a été la réalisation et la caractérisation de diodes laser DBR à émission surfacique, dans la filière GaAlAs/GaAs, les performances étant analysées à partir du modèle théorique élaboré.

## **1.2 Analyse du comportement d'une diode laser DBR**

Les structures multicouches des diodes laser DBR considérées dans le cadre de mes travaux sont des structures classiques à puits quantique, de type GRIN-SCH, dans la filière GaAlAs/GaAs. Chaque diode laser est composée d'une région centrale soumise au pompage électrique (zone de gain) encadrée par deux réflecteurs distribués du second ordre non pompés (zones de réseaux).

L'analyse du comportement d'un tel composant fait appel à un modèle s'articulant autour du fait que la réflectivité des miroirs distribués est fonction de la longueur d'onde du rayonnement incident. Un mode oscillant de la cavité à réseaux de Bragg peut ainsi être déterminé de manière analogue à celui d'une cavité conventionnelle, à condition de prendre en compte cette dépendance de la réflectivité des miroirs à la longueur d'onde.

### **1.2.1 Méthodologie d'analyse**

La méthodologie d'analyse proposée est une méthodologie globale qui prend en compte l'imbrication des différents mécanismes physiques mis en jeu. Elle associe les propriétés spectrales, en gain et en absorption, d'une couche active à puits quantique avec les phénomènes de propagation dans un guide diélectrique multicouche surmonté d'un contact électrique ou d'un réseau, et avec les conditions d'oscillation dans une cavité optique présentant à la fois des pertes par transmission et par diffraction.

Ainsi, la méthodologie mise en œuvre dans le cadre de ces travaux consiste à établir, dans un premier temps, les caractéristiques optiques de fonctionnement d'une diode laser DBR à émission surfacique par les déterminations successives :

- des propriétés de gain et d'absorption de la structure à puits quantique ;
- de la constante de propagation dans la zone de gain ;
- de la constante de propagation et des coefficients de diffraction dans les zones de réseaux ;
- des conditions d'oscillation dans la cavité optique fermée par des réflecteurs distribués.

L'ensemble de ces résultats permet de déduire la valeur du gain au seuil de la structure complète, la position des modes longitudinaux de la cavité, leur discrimination respective, ainsi que la forme du diagramme de rayonnement.



Dans un deuxième temps, l'aspect électrique du fonctionnement de la diode laser DBR à émission surfacique est précisé par la détermination, à partir des résultats précédents, de son courant de seuil et de son rendement différentiel.

Dans ce qui suit, le modèle numérique complet mis en œuvre pour l'étude des diodes laser DBR va faire l'objet d'une présentation succincte décrivant la prise en compte des divers phénomènes physiques. Ensuite, les résultats essentiels issus de la modélisation menée sur ce type de composants et les critères de conception qui s'en dégagent seront exposés.

### **1.2.2 Modèle numérique**

Ce modèle s'articule autour de quatre axes principaux relatifs respectivement à la structure à puits quantique, à la zone de gain, à la zone de réseau, et à la cavité optique.

#### **a) Structure à puits quantique**

Pour atteindre l'effet laser dans un composant DBR, il est nécessaire de limiter les pertes par absorption dans les zones de réseaux qui sont des zones non pompées, tout en y favorisant une émission par la surface. L'absorption dans ces zones est minimisée par les propriétés d'une couche active à puits quantique qui, suite à la réduction de bande interdite associée aux niveaux d'injection caractéristiques de l'émission laser, présente le maximum de son spectre de gain à une énergie typiquement inférieure de 20 à 30 meV à celle de son front d'absorption. Ce décalage entraîne une faible absorption dans le puits quantique passif et, grâce au faible facteur de confinement optique de la structure, une absorption « effective » très faible (de l'ordre de quelques  $\text{cm}^{-1}$ ) dans le guide optique situé sous les réseaux.

Le spectre d'absorption dans le puits passif est déterminé à partir d'une expression analytique du coefficient d'absorption près du front d'absorption [8] et de l'énergie de liaison de l'exciton [9]. Le spectre de gain est calculé à l'aide du logiciel CADILAC développé au laboratoire [10]. Ce logiciel utilise un modèle approfondi des puits quantiques qui tient compte, en particulier, de la non parabolicité des bandes, des effets de renormalisation de bande interdite et des effets de relaxation intrabande sur l'élargissement du spectre de gain.

#### **b) Zone de gain**

L'étude de la propagation de l'onde lumineuse dans la zone de gain du composant suppose la détermination de la constante de propagation de cette onde dans le guide planaire multicouche situé dans la zone pompée. Cette détermination est obtenue en considérant une injection de porteurs uniforme sur la totalité de la zone et en considérant un mode transverse électrique de cette structure se propageant parallèlement au plan des couches. La connaissance de la constante de propagation du mode considéré permet ensuite de déterminer l'indice effectif complexe du guide multicouche de la zone de gain.

#### **c) Zone de réseau**

L'étude de la propagation de l'onde lumineuse dans les zones des réseaux se fait, quant à elle, à partir du modèle proposé par Hardy et Streifer [11]-[12]. Le principe consiste à écrire l'équation de propagation des modes transverses de cette structure en décomposant l'indice complexe de celle-ci en série de Fourier. La solution de cette équation est alors un champ électrique résultant de la superposition d'une infinité d'ondes partielles dont chacune a pour constante de propagation  $\beta_m = \beta_0 + m(2\pi/\Lambda)$ , où  $m$  est un entier relatif associé à l'onde partielle considérée, et où  $\beta_0$  est la constante de propagation de Bragg du réseau d'ordre 2 et de pas  $\Lambda$ , soit :  $\beta_0 = 2\pi/\Lambda$ . Parmi ces ondes partielles, celle qui correspond à  $m = -1$  présente une constante de propagation nulle selon le plan des couches et elle est donc diffractée perpendiculairement à ce plan, procurant ainsi l'émission surfacique recherchée. D'autre part, toute onde se propageant dans la structure avec une constante de propagation  $\beta$ , est caractérisée par le paramètre  $\delta$  qui représente l'écart entre sa propre constante de propagation et la constante de propagation de Bragg :  $\delta = \beta - \beta_0$ .

L'application de ce modèle conduit à la détermination, en fonction de la longueur d'onde, du coefficient de réflexion et de transmission du guide multicouche surmonté du réseau. Elle permet également de déterminer les coefficients de diffraction perpendiculairement au plan des couches, vers le milieu

extérieur et vers le substrat. Enfin, l'étude de ces différents paramètres prend en compte l'absorption ainsi que la possibilité d'une réflexion partielle de l'onde sur la face clivée limitant le guide optique à l'extrémité de la zone de réseau.

#### d) Cavité optique

Pour déterminer les caractéristiques de fonctionnement du composant, l'étude de la propagation dans les zones de gain et de réseaux est complétée par la condition d'oscillation dans la cavité laser. Pour cela, la cavité DBR est analysée à partir d'une cavité équivalente constituée par la zone de gain du composant limitée par deux miroirs équivalents sélectifs en longueur d'onde. Le coefficient de réflexion et le déphasage induit à la réflexion sur ces miroirs dépendent ainsi de la longueur d'onde incidente. En tenant compte de ces propriétés, on écrit ensuite la condition d'oscillation sous la forme habituelle de deux relations couplées : une relation sur le gain et une relation sur la phase.

L'application de la condition d'oscillation permet alors d'accéder au gain au seuil de la structure complète, aux modes longitudinaux de la cavité et à leur discrimination qui est définie par l'écart séparant le gain au seuil du mode considéré et celui du mode dominant.

Le diagramme de rayonnement, quant à lui, est déterminé par l'état d'interférence des champs lointains associés à chaque réseau, et les caractéristiques électriques du fonctionnement sont établies à partir des résultats précédents, en reliant la densité de courant au gain de la structure grâce aux propriétés du puits quantique (gain différentiel, facteur de confinement).

Sur la base de la méthodologie d'analyse qui vient d'être présentée, le logiciel GSEL (Grating Surface Emitting Laser) a été développé au sein de l'équipe « Diodes laser » du LAAS. Ce logiciel est conçu pour la simulation de tout type de diodes laser à cavité DBR. Dans le cadre de ces travaux, il a été largement utilisé pour analyser l'influence des paramètres géométriques sur les performances caractéristiques du composant et pour en établir des règles de conception. Le type de structures étudié et les principaux résultats issus de notre analyse sont présentés dans la section suivante.

#### 1.2.3 Type de structures étudié

Le modèle décrit précédemment a été appliqué à une diode laser DBR présentant une structure de type GRIN-SCH avec un puits quantique en GaAs de 80Å d'épaisseur et des couches graduelles de 1700Å pour des pourcentages d'aluminium variant de 20 à 60%.

La longueur d'onde correspondant au maximum du spectre de gain a été considérée indépendante du niveau d'injection de porteurs et elle a été notée  $\lambda_m$ .

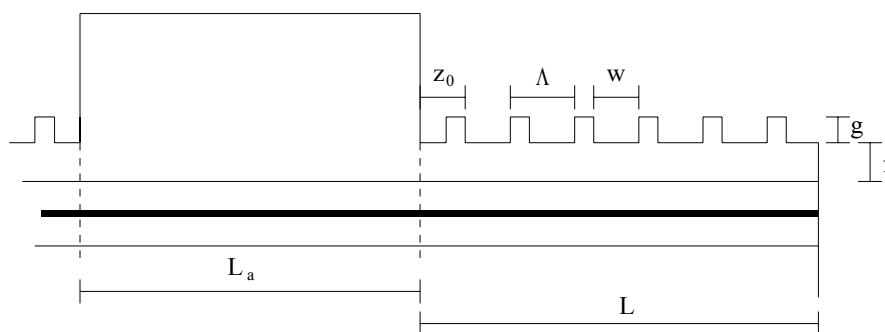


Fig.2 : Paramètres géométriques caractérisant un composant DBR.

Le composant DBR considéré est symétrique, c'est-à-dire que les deux réseaux sont identiques. Sa géométrie, représentée sur la figure 2, est définie par la longueur de la zone de gain ( $L_a$ ), la longueur de la zone de réseau ( $L$ ), le pas du réseau ( $\Lambda$ ), la largeur d'un sillon ( $w$ ), la profondeur de gravure d'un sillon ( $g$ ), la distance entre le fond de gravure des sillons et la limite supérieure de la couche graduelle ( $f$ ), et la position, par rapport à l'origine de la zone de réseau, du début du premier sillon entier ( $z_0$ ). Ce dernier paramètre a été introduit dans l'étude pour prendre en compte la « phase du réseau » et analyser son influence sur la phase de l'onde oscillant dans la cavité. L'ensemble de ces paramètres est complété par le paramètre noté  $x$  et défini par :  $L_a = a_0 \cdot \lambda_a + x \cdot \lambda_a$ , où  $\lambda_a$  est la longueur d'onde, dans la zone de

gain, correspondant au maximum du spectre de gain,  $a_0$  est un entier (on note :  $a_0 \cdot \lambda_a = L_{a0}$ ), et le paramètre  $x$  est un réel de valeur absolue inférieure à 1. Le paramètre  $x$  joue, pour la zone de gain, un rôle analogue à celui de  $z_0$  pour la zone de réseau.

Suivant leur nature, les paramètres géométriques du composant sont répartis en trois catégories :

- les paramètres longitudinaux :  $L_{a0}$ ,  $L$ ,  $w$  et  $\Lambda$ , selon l'axe de propagation dans le guide ;
- les paramètres transverses :  $f$  et  $g$  qui caractérisent le confinement du réseau ;
- les paramètres d'accord :  $z_0$  et  $x$ , relatifs à la phase de l'onde dans le composant.

Nos travaux ont alors consisté à analyser, de façon systématique, l'influence de ces différents paramètres géométriques sur les performances d'une diode laser DBR afin d'en extraire des critères de conception. Les résultats les plus marquants sont présentés dans la section suivante.

### 1.2.4 Principaux résultats de modélisation

Dans le cadre de l'optimisation des performances du composant, la mise en œuvre de la méthodologie décrite précédemment, associée à la prise en compte de contraintes technologiques, a conduit à la détermination de gammes de valeurs conventionnelles pour la plupart des paramètres géométriques caractéristiques de la structure :  $L_{a0} = L = 300 \mu\text{m}$  ;  $w/\Lambda = 0,5$  ;  $f = 0$  et  $1250\text{\AA} < g < 1500\text{\AA}$ . Cependant, l'étude de l'influence du pas  $\Lambda$  et des paramètres d'accord ont conduit à des résultats originaux mettant clairement en évidence, pour le premier, la nécessité de maîtriser la détermination et la réalisation du pas du réseau avec une précision sub-nanométrique et, pour les seconds, une importante dispersion des performances dont les origines sont incontrôlables technologiquement.

#### a) Influence du pas du réseau

Le pas du réseau n'étant plus ici accordé à  $\lambda_m$ , l'étude consiste à résoudre la condition d'oscillation pour différentes valeurs de  $\Lambda$  en tenant compte des propriétés d'absorption du puits quantique dans les zones de réseau. Les modes longitudinaux dominants de la cavité sont alors reportés sur le spectre de gain modal de la structure établi pour différents niveaux d'injection. On peut ainsi déterminer la densité de courant de seuil correspondant au mode dominant de chaque structure caractérisée par  $\Lambda$ . Le résultat obtenu est reporté sur la figure 3 où la densité de courant de seuil minimum est notée  $J_{th-min}$ .

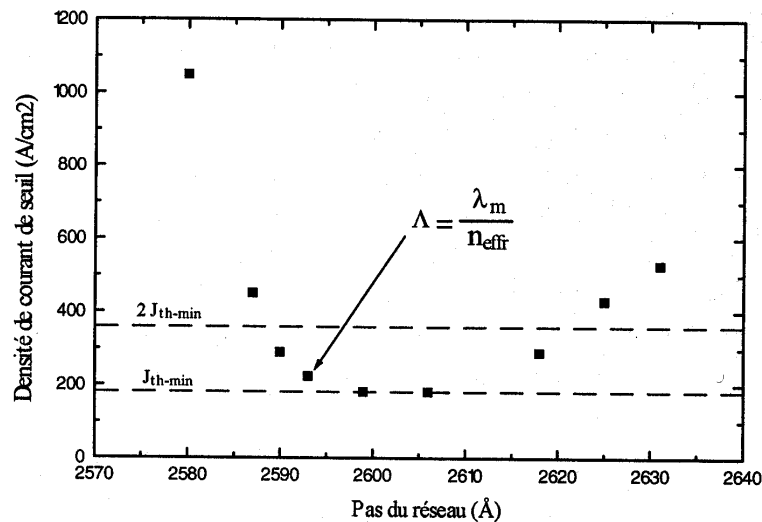


Fig.3 : Influence du pas du réseau sur la densité de courant de seuil du composant.

On observe une forte sensibilité de la densité de courant de seuil à la valeur du pas du réseau. En effet, pour se placer dans des conditions de fonctionnement présentant un courant de seuil non prohibitif ( $J_{th-min} < J_{th} < 2 J_{th-min}$ ), le pas du réseau doit être déterminé et réalisé avec une incertitude absolue inférieure à  $15 \text{\AA}$ .

D'autre part, on peut noter que notre choix d'accorder le pas sur la longueur d'onde  $\lambda_m$  est légitime puisque la densité de courant de seuil correspondante n'est supérieure à  $J_{th-min}$  que d'environ 20%.

En dehors de la zone d'accord, le courant de seuil s'élève rapidement : pour les faibles valeurs de pas, on observe l'effet de l'absorption dans les zones de réseau, et pour les fortes valeurs, c'est l'effet de l'augmentation du niveau d'injection qui devient pénalisant. Enfin, la dissymétrie de la courbe  $J_{th}(\Lambda)$  met en évidence qu'il paraît judicieux, lors de la réalisation pratique de composants DBR, de considérer des pas légèrement désaccordés vers les grandes longueurs d'onde car toute imprécision dans cette portion de la courbe est moins pénalisante sur les performances du composant. Il est à noter que la détermination de  $\Lambda$  est directement liée à la détermination de l'indice effectif  $n_{eff}$  de la zone de réseau qui constitue donc une étape décisive dans l'élaboration du composant.

### b) Influence des paramètres d'accord

L'étude de l'influence de ces paramètres sur les performances du composant consiste, dans un premier temps, à résoudre la condition d'oscillation. La résolution de l'équation sur la phase conduit tout d'abord à la détermination des modes longitudinaux de la cavité, tout mode  $q$  étant caractérisé par son écart  $\delta_q$  à l'accord de Bragg. Les valeurs de  $\delta_q$  sont ensuite reportées sur le spectre de gain au seuil de la structure. On en déduit alors la valeur de gain au seuil des modes considérés ainsi que leur discrimination. Dans un deuxième temps, les performances du composant sont analysées au travers du diagramme de rayonnement, du rendement différentiel et de la caractéristique de fonctionnement  $P(I)$  liés au mode dominant de la structure.

- Influence de  $z_0$  :

Le paramètre  $z_0$  définit le positionnement longitudinal du réseau par rapport à la zone de gain et, par suite, il a une influence directe sur l'équation de phase de la cavité. Toute variation de  $z_0$  se traduit par une modification des modes longitudinaux, de leur gain au seuil et de leur discrimination.

L'étude précise de l'oscillation des modes de la cavité et de la discrimination entre les deux modes présentant le plus faible gain au seuil conduit au résultat indiqué sur la figure 4. En raison de la symétrie du composant DBR étudié, l'analyse se limite ici aux valeurs de  $z_0$  comprise entre 0 et  $\Lambda/2$ , soit donc entre 0 et  $w$ . Pour cette structure, lorsque  $z_0$  varie sur le domaine étudié, les modes de plus faible gain au seuil sont successivement les modes 2326 ; 2327 et 2328. La discrimination modale est notée DM(i-j) où  $i$  et  $j$  représentent le dernier chiffre du mode considéré et indiquent sa parité. De plus, on observe, avec une période en  $z_0$  égale à  $w/2$ , la présence simultanée de deux modes de parités différentes indiquée par une discrimination modale nulle. Ces valeurs particulières de  $z_0$  correspondent donc à un saut de mode induisant une modification du diagramme de rayonnement qui devient alternativement monolobe ou bilobe (Fig.5).

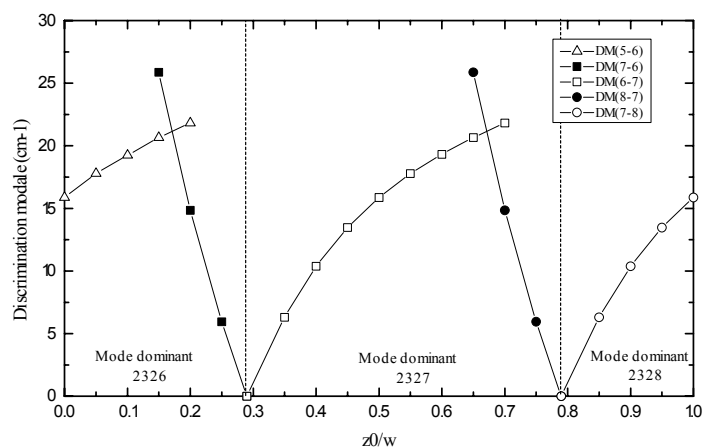


Fig.4 : Evolution de la discrimination modale en fonction de  $z_0$ , et détermination du mode dominant.

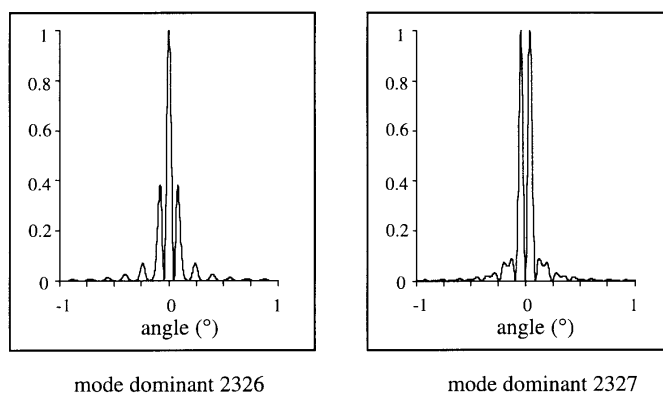


Fig.5 : Diagramme de rayonnement d'un mode dominant pair et impair correspondants à deux modes successifs indiqués sur la figure 4.

L'analyse suivant le paramètre  $\delta_q$  montre que, pour la structure considérée ici, un mode  $q$  est dominant tant que  $\delta_q$  appartient à l'intervalle  $\Delta\delta = [-26,5 \text{ cm}^{-1} ; +44,8 \text{ cm}^{-1}]$ . Si on considère alors le rendement différentiel du composant, il suffit de s'intéresser à son évolution en fonction de  $z_0$  sur l'intervalle  $\Delta\delta$ . Le rendement évolue ainsi entre deux valeurs correspondant aux bornes de l'intervalle  $\Delta\delta$  et repérées sur la figure 6 par les points A1 et A2. Pour des valeurs croissantes de  $z_0$ , le rendement différentiel associé à un mode  $q$  décrit la courbe du point A1 au point A2. Une fois en A2, le mode  $q$  s'efface devant le mode  $q+1$  devenu dominant à son tour et situé en A1. Le saut de mode s'accompagne donc d'un saut de rendement différentiel qui chute brusquement de la valeur 40% à 23%.

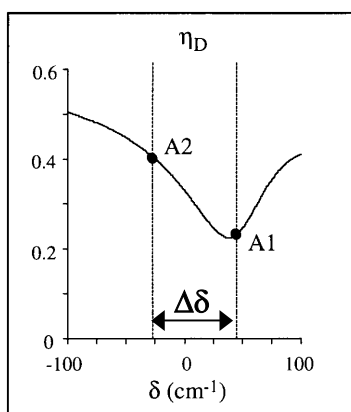


Fig.6 : Rendement différentiel du composant DBR et domaine de variation.

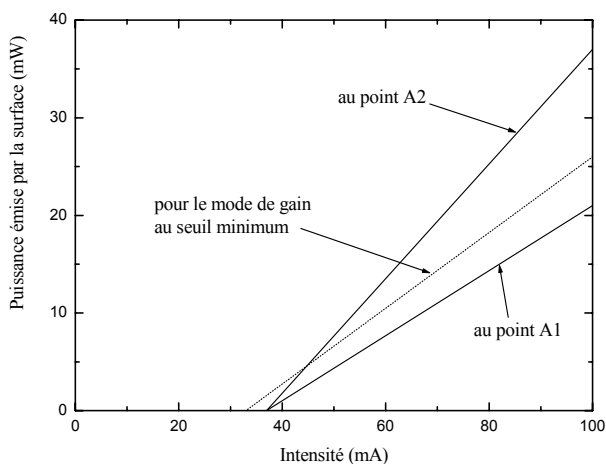


Fig.7 : Caractéristiques P(I) pour différentes valeurs  $\delta$  du mode dominant

Une visualisation du fonctionnement de la diode laser est obtenue par le tracé des caractéristiques P(I) correspondant aux points A1 et A2 (Fig.7). Ce tracé est complété par la caractéristique correspondant au mode présentant le gain au seuil minimum. Les courants de seuil ont été calculés pour un composant portant une électrode de contact de  $50 \mu\text{m}$  de large. On observe que, selon les valeurs du paramètre  $z_0$  et les conditions qu'il impose sur la phase dans la structure, la puissance émise par la surface du composant varie pratiquement du simple au double pour un courant de polarisation donné.

- Influence de  $x$  :

Le paramètre  $x$  représente la partie décimale du nombre de longueurs d'onde, dans le matériau, nécessaire pour couvrir la longueur totale de la zone de gain. Pour une valeur donnée de  $z_0$  et  $a_0$ , chaque valeur de  $x$  caractérise donc une cavité. Comme précédemment, les modes longitudinaux de celle-ci et leur gain au seuil sont déterminés par la résolution de la condition d'oscillation.

Les conséquences d'une variation du paramètre  $x$  sur les performances du composant sont alors identiques à celles dues à une variation du paramètre  $z_0$  : les sauts de modes ont lieu avec une périodicité en  $x$  égale à 0,5 et ils entraînent une modification du diagramme de rayonnement qui devient

alternativement monolobe ou bilobe. L'étude des variations de  $\delta_q$  avec les valeurs de  $x$  conduit au même intervalle  $\Delta\delta$  que celui déterminé précédemment, et le rendement différentiel subit les mêmes variations. Enfin, le tracé des caractéristiques  $P(I)$  est celui qui est indiqué sur la figure 7.

L'analyse de l'influence des paramètres d'accord a ainsi mis clairement en évidence leur impact direct sur la dispersion des performances d'une diode laser DBR à émission surfacique. Le contrôle de l'allure du diagramme de rayonnement imposerait une maîtrise de la longueur de la zone active ou de la position de la première dent du réseau à mieux que  $\Lambda/10$ . Si on souhaitait contrôler la valeur du rendement différentiel à 10% près, cela supposerait alors une maîtrise des caractéristiques précédentes à mieux que  $\Lambda/20$ , soit donc environ une dizaine de nanomètres pour la filière GaAlAs/GaAs. Ces ordres de grandeurs montrent que le contrôle direct de ces paramètres géométriques n'est pas envisageable au niveau technologique et que toute prévision précise des performances de ce type de composants paraît donc compromise.

Cependant, une compensation de l'influence des paramètres d'accord peut être envisagée en introduisant une « zone de phase » active dans la structure, entre les zones de gain et de réseau. Ainsi, en ajustant sa polarisation, on pourrait rechercher la relation de phase optimale de la cavité et limiter ainsi considérablement la dispersion des caractéristiques de fonctionnement qui a été évoquée.

### **1.3 Technologie d'une diode laser DBR à émission surfacique**

La validation de l'étude théorique du composant repose sur son élaboration pratique et sur l'analyse de ces caractéristiques. D'après les résultats de modélisation, et outre l'influence des paramètres d'accord, l'élaboration d'une diode laser DBR à émission par la surface nécessite un contrôle très fin de son pas, de son profil, de son rapport d'ouverture, de sa profondeur de gravure et de sa position dans la structure multicouche à puits quantique. A l'époque de ces travaux, la centrale de technologie du laboratoire disposait de tous les équipements nécessaires à l'élaboration complète de ce type de composants, sans toutefois disposer d'un banc d'insolation holographique de réseaux. Seules quelques réalisations avaient été obtenues par lithographie électronique. L'élaboration du composant envisagé a donc nécessité des études spécifiques organisées en deux phases principales : la mise au point du procédé de réalisation d'un réseau diffractant avec un pas dans la gamme des 250 nm sur substrat de GaAs plan, puis l'inclusion et l'adaptation de cette étape technologique au sein du procédé complet d'élaboration du composant. Ces deux phases sont décrites dans les sections suivantes.

#### **1.3.1 Réalisation du réseau diffractant au pas de 250 nm**

La maîtrise des caractéristiques du réseau de diffraction représente un point fondamental dans le processus de réalisation du composant. Deux techniques d'insolation étaient envisageables pour la réalisation de réseaux au pas de 250 nm : soit l'écriture par faisceau d'électrons, soit l'insolation holographique. La deuxième méthode a été retenue en raison de sa précision, de sa rapidité de mise en œuvre et de l'excellente uniformité du pas engendré. De plus, parmi les différentes configurations relatives à cette technique, et en s'appuyant sur de fructueuses discussions avec Claude Alibert que je tiens particulièrement à remercier, nous avons opté pour l'utilisation d'un dièdre au sein duquel ont lieu la séparation du faisceau et les interférences produisant l'insolation. Cette configuration très versatile permet, par simple rotation du dièdre, d'accéder à une gamme de pas comprise entre 0,2 et 1  $\mu\text{m}$ . Une étude spécifique de ce montage a été menée en vue de définir sa précision et ses tolérances. Elle a montré que le banc d'insolation mis spécialement en œuvre au laboratoire permettait la réalisation de réseau dont le pas pouvait être défini, dans la gamme des 250 nm, avec une incertitude absolue inférieure à l'Angström. La réalisation proprement dite des réseaux a alors nécessité la mise au point des étapes technologiques successives d'enduction, d'insolation et de développement de la résine photosensible, ainsi que la gravure du matériau GaAs au travers du masque obtenu. L'étape d'insolation se faisant sous une incidence voisine de  $45^\circ$ , une simulation du procédé complet de photogravure a mis en évidence la forte perturbation engendrée par le phénomène d'ondes stationnaires apparaissant dans l'épaisseur de la couche de résine, notamment pour l'étape de développement. De nombreuses méthodes sont envisageables pour résoudre ce problème, chacune faisant appel à des techniques et des équipements divers visant à obtenir des masques de résine aux flancs lisses et verticaux (couche anti-reflet, masque multicouche, coloration de la résine, ...). La méthode retenue en raison de sa simplicité et de sa rapidité de mise en œuvre est celle qui consiste à diminuer l'épaisseur de la couche de résine, de

sorte que l'interface résine/air se situe au niveau du premier ventre d'intensité. Dans le cas du procédé décrit ici, cette épaisseur est de l'ordre de 60 nm, ce qui constitue une valeur atypique qui a nécessité une dilution appropriée et un étalonnage des conditions d'enduction, de développement et de recuits. Le choix du type de gravure s'est porté, quant à lui, sur une gravure sèche en raison de sa forte anisotropie, qualité indispensable pour l'obtention d'un réseau au profil rectangulaire : il s'agit d'une gravure ionique réactive à base de  $\text{SiCl}_4$ . Des exemples de résultats obtenus sur substrat de GaAs sont présentés sur la figure 8.

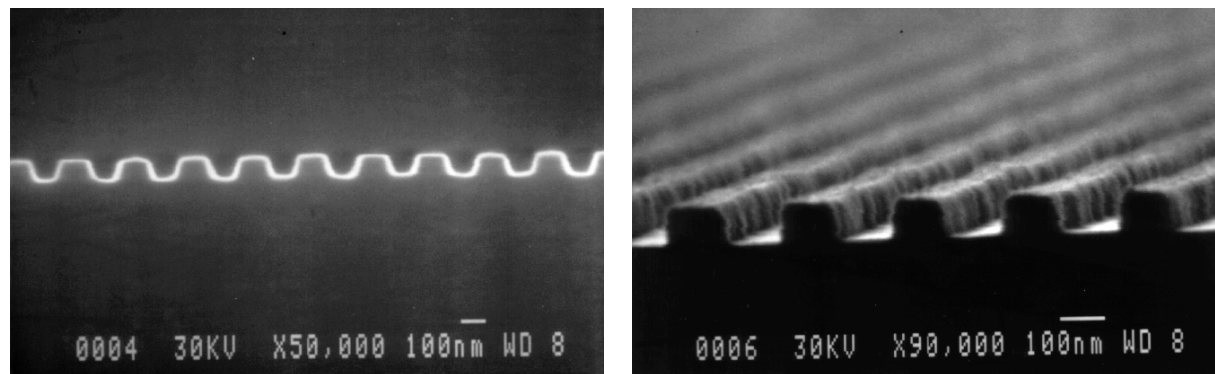


Fig.8 : Vues au MEB de deux réseaux au pas de 250 nm gravés dans GaAs.

Ces réseaux sont caractérisés par un pas de 250 nm, un profil quasi-rectangulaire, un rapport d'ouverture voisin de 0,5 et une profondeur de l'ordre de 100 nm qui, si nécessaire, peut être augmentée en réduisant les dimensions du support de gravure. La qualité et la reproductibilité des résultats obtenus sur GaAs plan ont alors permis d'envisager l'élaboration de la diode laser DBR à émission surfacique.

### 1.3.2 Procédé complet d'élaboration de la diode laser DBR à émission surfacique

La réalisation de diodes laser à puits quantique GaAlAs/GaAs et à réflecteurs de Bragg du second ordre doit tenir compte de deux types de contraintes : le premier est inhérent à la filière GaAlAs, et le second est lié à la technologie imposée par la cavité à réflecteurs distribués.

Dans la filière GaAlAs, le contrôle des épaisseurs et des compositions des couches, ainsi que leur homogénéité sur la plaque épitaxiée est difficile et peu précise. En effet, la croissance de structures de diodes laser par épitaxie par jets moléculaires impose de hautes températures ( $T \approx 700^\circ\text{C}$ ) et, dans ces conditions, les vitesses de croissance du GaAs et du GaAlAs sont difficiles à maîtriser en raison de la très grande sensibilité du taux de réévaporation du gallium à la température du substrat. D'autre part, compte tenu de ces conditions de croissance, les couches graduelles de structures de type GRIN-SCH rendent délicate la maîtrise d'un profil de composition donné et limitent le contrôle des profondeurs d'attaque par manque de procédé sélectif associé à de lentes variations de composition. Enfin, la présence d'aluminium dans le matériau favorise les mécanismes d'oxydation qui sont indésirables lors de l'élaboration du composant et lors de son fonctionnement ultérieur.

La technologie de la cavité à réflecteurs distribués nécessite, quant à elle, la gravure de réseaux dans des zones encaissées, au pied de marches d'une hauteur d'environ  $1,5 \mu\text{m}$ . La position du fond de ces zones par rapport au guide optique doit être contrôlée de façon précise pour obtenir le confinement souhaité du réseau. D'autre part, il est nécessaire de reproduire, dans ces nouvelles conditions, des réseaux d'aussi bonne qualité que ceux réalisés sur substrat plan. Enfin, on doit déterminer avec précision la valeur du pas du réseau à graver ( $\Lambda = \lambda_m/n_{\text{eff}}$ ), ce qui suppose la détermination préalable de deux paramètres : la longueur d'onde d'émission  $\lambda_m$  caractéristique de la structure épitaxiée et, pour cette longueur d'onde, la valeur de l'indice effectif  $n_{\text{eff}}$  des futures zones de réseau.

Pour permettre le contrôle précis de la position des zones de réseau par rapport au guide optique et pour offrir des conditions de gravure analogues à celles qui ont été pratiquées sur substrat de GaAs, nous avons choisi d'incorporer, lors de l'épitaxie, une couche « marqueur » de GaAs convenablement située dans la structure. Lors de la réalisation du composant, et plus particulièrement lors de la gravure des zones de réseaux, ce marqueur joue le rôle de couche d'arrêt dans le cadre d'une attaque chimique sélective et il permet ainsi de maîtriser la position du plan du réseau. De plus, le choix d'un marqueur

en GaAs permet de bénéficier d'une surface de bonne morphologie, évitant les problèmes d'oxydation associés aux alliages GaAlAs et compatible, par sa composition, avec le procédé technologique de réalisation de réseaux développé préalablement sur substrat plan de même nature.

Pour déterminer la valeur du pas à graver, on procède à la mesure de la longueur d'onde d'émission d'une diode laser à cavité conventionnelle issue des mêmes couches épitaxiées que celles qui sont destinées au composant DBR. En effet, la couche active étant à puits quantique, le spectre de gain du matériau présente un maximum dont l'énergie peut être considérée comme indépendante de la densité de courant de seuil. Le niveau des pertes dans la cavité influe donc peu sur la longueur d'onde d'émission et la valeur mesurée sur le composant conventionnel sera très voisine de celle de la diode à réflecteurs distribués. Cependant, le nombre de modes émis par la diode conventionnelle ne permet pas de mesurer la longueur d'onde d'émission avec une incertitude absolue inférieure au nanomètre. Une fois cette mesure réalisée, on doit déterminer la valeur de l'indice effectif de la future zone de réseau. Sa détermination par le calcul manque de précision en raison d'une connaissance insuffisante des indices des couches GaAlAs, des épaisseurs réalisées et de leur composition. Face à ces lacunes, nous avons conçu et mis en œuvre un banc de mesure destiné à la détermination de l'indice effectif de guides plans multicouches. Ce banc, mettant en œuvre la technique du couplage par réseau, permet d'accéder à l'indice effectif des futures zones de réseau en effectuant la mesure sur une partie des couches épitaxiées, voisine de la portion utilisée pour l'élaboration de la diode laser DBR et ayant subi l'attaque complète des couches situées au-dessus du marqueur. La mesure est effectuée pour deux longueurs d'onde du proche infrarouge, et la valeur de l'indice effectif pour la longueur d'onde souhaitée est ensuite obtenue par extrapolation, avec une incertitude absolue voisine de  $10^{-2}$ . La détermination de la valeur du pas du réseau à graver sur la structure multicouche est ainsi obtenue avec une incertitude absolue de l'ordre de  $10\text{\AA}$ .

Le procédé complet d'élaboration de la diode laser DBR consiste alors en un enchaînement précis de nombreuses étapes technologiques dont les principales sont chronologiquement : l'épitaxie de la structure GRIN-SCH à puits quantique et à couche marqueur, la définition et la métallisation des contacts des zones de gain en surface de la plaquette, la gravure des zones de réseau par attaque sélective des couches supérieures de la structure en utilisant le métal des contacts comme masque, la réalisation des réseaux de diffraction sur une surface partiellement occupée par les proéminences des zones de gain, l'amincissement de la plaquette, la métallisation de la face arrière, la découpe et le montage des composants sur support de type TO.

#### **1.4 Résultats expérimentaux**

Les composants élaborés dans le cadre de ces travaux ont fait l'objet de caractérisations permettant la confrontation de leurs performances aux prévisions issues du modèle numérique mis en œuvre. Pour cela, les caractérisations de chacun d'eux ont consisté en trois étapes principales :

- le tracé de la caractéristique  $P(I)$  ;
- l'enregistrement du diagramme de rayonnement ;
- l'enregistrement du spectre d'émission.

Afin d'éviter toute dégradation due à un échauffement excessif, les diodes laser sont polarisées par un courant impulsionnel présentant une fréquence de quelques kHz et une largeur d'impulsion de  $0,5\ \mu\text{s}$ .

Le tracé de la caractéristique  $P(I)$ , obtenue pour deux composants issus de la même plaquette et contigus sur celle-ci, est reporté sur la figure 9. On relève des courants de seuil présentant un écart d'environ 20%, et la comparaison des rendements différentiels (21% et 28%) met en évidence un écart de l'ordre de 30%. Même si l'influence de la non-uniformité des couches épitaxiées n'est pas à exclure dans l'analyse de ces écarts, il est important de noter qu'une structure multicouche idéale et parfaitement maîtrisée pourrait conduire à un résultat identique. En effet, selon l'analyse théorique exposée dans la section 1.2, les écarts observés peuvent avoir pour unique origine les valeurs des paramètres d'accord  $x$  et  $z_0$  qui sont incontrôlables technologiquement.

Les diagrammes de rayonnement des deux composants DBR précédents sont enregistrés à l'aide de l'analyseur de faisceau 13 SPC 001 commercialisé par Melles Griot. L'analyse du faisceau se fait dans le plan perpendiculaire aux traits du réseau et conduit aux résultats indiqués sur la figure 10 où les angles de divergence caractéristiques sont toujours inférieurs à  $0,1^\circ$ . Ces observations sont conformes aux prévisions de l'analyse théorique qui a décrit l'influence des paramètres d'accord sur l'allure du



diagramme de rayonnement. D'autre part, la mesure précise des angles de divergence pour chacun des diagrammes conduit à des valeurs présentant un écart inférieur à 10% par rapport aux valeurs théoriques, ce qui contribue à conforter la validité du modèle mis en œuvre.

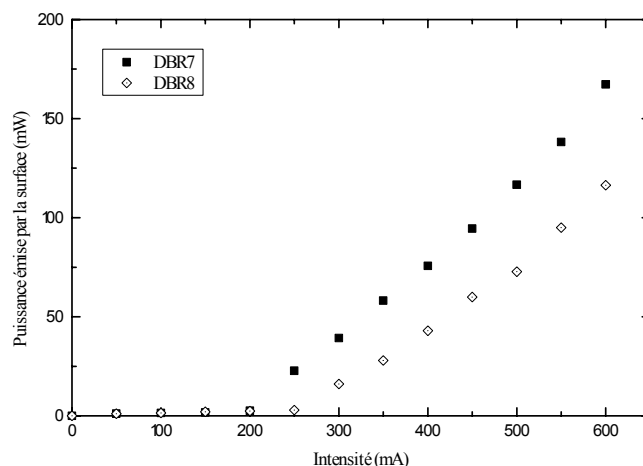


Fig.9 : Caractéristique P(I) pour deux composants contigus.

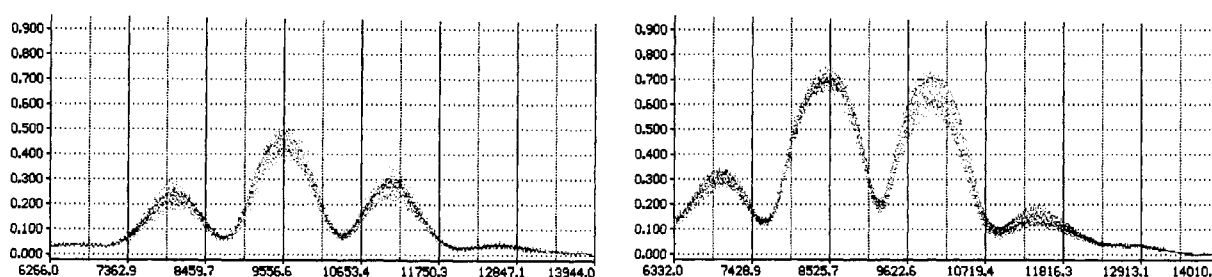


Fig.10 : Diagrammes de rayonnement de deux composants contigus.  
A gauche : largeur à mi-hauteur du pic central = 0,056°. A droite : écart pic à pic = 0,085°

Le spectre d'émission, quant à lui, est relevé à partir d'un monochromateur HR 1000 commercialisé par Jobin-Yvon. Un exemple des résultats obtenus est indiqué sur la figure 11. Par rapport au spectre d'émission d'une diode laser à cavité conventionnelle, on observe clairement l'influence des réseaux de Bragg qui opèrent une sélection très efficace parmi les modes longitudinaux, conduisant ici à une réduction importante (au moins par un facteur 20) de la largeur spectrale d'émission.

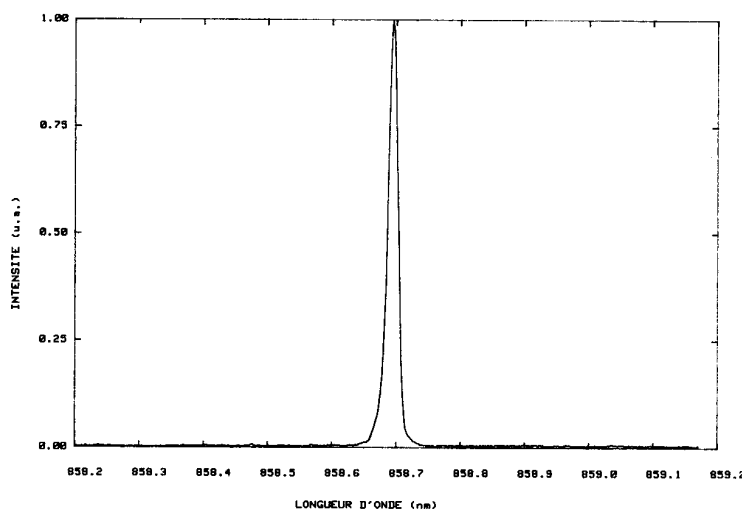


Fig.11 : Spectre d'émission d'une diode laser DBR.

## 1.5 Conclusion

L'objectif général de ces travaux était de mener une approche globale sur le comportement et les limites de performances des diodes laser DBR à émission surfacique.

En l'absence d'étude théorique prenant en compte les propriétés quantiques, électriques et optiques de la structure, j'ai contribué, au sein de notre équipe, au développement d'un nouveau modèle global d'analyse qui regroupe, de façon consistante, les propriétés spectrales de la cavité formée par les deux réseaux de Bragg et celles de la structure à puits quantique, notamment en ce qui concerne le gain dans les régions pompées ou l'absorption dans les régions non pompées. Ce modèle complet a été mis en œuvre tant comme outil de simulation que de conception. Il a été ainsi possible d'établir les propriétés des réseaux au travers de leurs coefficients de diffraction dans les différents ordres en fonction du désaccord par rapport à la condition de Bragg. Les propriétés d'émission du dispositif ont ensuite été explicitées en terme de longueur d'onde du mode oscillant, de discrimination modale, de courant de seuil, de rendement différentiel et de diagramme de rayonnement. Les résultats les plus importants de ces investigations concernent deux points :

- il a été établi, de façon rigoureuse, comment devait être déterminé le pas du réseau en fonction des propriétés d'émission et d'absorption de la structure à puits quantique pour minimiser la valeur de la densité de courant de seuil ;
- il a été montré, pour la première fois, comment les performances d'émission par la surface dépendaient de façon prépondérante des déphasages provoqués soit par la position de la première dent du réseau, soit par l'écart entre la longueur de la zone de gain et un nombre entier de fois la longueur d'onde dans cette région. Comme la maîtrise de ces deux paramètres se situe bien en-dessous de la précision des techniques d'élaboration des composants, les valeurs du courant de seuil et du rendement différentiel ne peuvent être qu'aléatoires, entre deux limites, et il est impossible de prévoir, *a priori*, la forme du diagramme de rayonnement qui peut être monolobe ou bilobe.

Le second volet de mes travaux a porté sur les techniques de réalisation des diodes laser DBR à émission par la surface. Le montage holographique développé pour la réalisation des réseaux s'est révélé simple, robuste et précis. Le processus de gravure a été complètement maîtrisé dans le cas de surfaces planes de GaAs avant son incorporation dans le procédé complet d'élaboration des composants. Dans le cadre de cette élaboration, deux points ont fait l'objet d'études plus particulières : le contrôle de la position du réseau par rapport au guide optique au moyen d'une couche marqueur insérée au sein de la structure multicouche, et la détermination du pas du réseau par la mesure de la longueur d'onde d'émission de la structure à puits quantique et par la mesure de l'indice effectif des zones de réseau. Enfin, les performances des diodes laser DBR réalisées se sont révélées en bon accord avec les prévisions du modèle proposé.

En conclusion, au-delà de la conception et de la mise au point du processus de réalisation de ces composants, le résultat essentiel a été d'avoir mis en évidence que l'impossibilité de contrôler les déphasages, induits à la fois par les réflectivités des réseaux et la propagation dans la zone de gain, était à l'origine de la limitation et de la dispersion des performances des diodes laser à émission par la surface au moyen de réseaux de Bragg du second ordre. Par suite, nous avons proposé les directions générales envisageables pour améliorer les caractéristiques de ces composants :

- soit adjoindre une « électrode de phase » pour contrôler le mode oscillant par une polarisation propre à chaque dispositif ;
- soit mettre en œuvre une nouvelle configuration de cavité où le réseau de Bragg aurait la seule fonction de couplage vers l'extérieur, la cavité étant fermée par un réflecteur externe. De plus, ce nouveau type de structures permettait d'envisager des possibilités d'accordabilité ou de contrôle modal.

### Références :

- [1] K. Iga et al. ; *Surface emitting semiconductor lasers and arrays* ; Academic Press ; Chap.3 ; pp.71-117 (1993)
- [2] R.C. Williamson et al. ; *Surface emitting semiconductor lasers and arrays* ; Academic Press ; pp.217-267 (1993)
- [3] P. Zory et al. ; *IEEE J. Quantum Electron.* ; vol.11(7) ; pp.451-457 (1975)

- [4] K. Kojima et al. ; Appl. Phys. Lett. ; vol.50(24) ; pp.1705-1707 (1987)
- [5] S.H. Macomber et al. ; SPIE *Laser-diode technol. and appl. II* ; vol.1219 ; pp.228-232 (1990)
- [6] G.A. Evans et al. ; Appl. Phys. Lett. ; vol.53(22) ; pp.2123-2125 (1988)
- [7] N.W. Carlson et al. ; IEEE Phot. Tech. Lett. ; vol.2 ; pp.708-710 (1990)
- [8] D.S. Chemla et al. ; IEEE J. Quantum Electron. ; vol.20(3) ; pp.265-275 (1984)
- [9] H. Mathieu et al. ; Phys. Rev. B ; vol.46(7) ; pp.4092-4101 (1992)
- [10] H. Leymarie et al. ; Proc. Inst. Elect. Eng. ; Part J ; vol.142 ; pp.5-12 (1995)
- [11] W. Streifer et al. ; IEEE J. Quantum Electron. ; vol.13(4) ; pp.134-141 (1977)
- [12] A. Hardy et al. ; IEEE J. Quantum Electron. ; vol.25(10) ; pp.2096-2105 (1989)

## 2. Microsource laser stabilisée en fréquence

### 2.1 Contexte et objectif des travaux

Les diodes laser sont devenues des composants clés pour de nombreux systèmes optiques mais leurs performances spectrales sont encore insuffisantes pour répondre aux exigences de certains domaines d'applications. Dans le domaine de l'instrumentation, par exemple, le remplacement de lasers à gaz conventionnels par des diodes laser est nécessaire pour le développement des systèmes de métrologie embarqués ou pour l'insertion de fonctions de mesure au sein même du système étudié. Dans ce contexte, l'amélioration des performances ou des fonctionnalités des diodes laser, telles que l'accroissement de la stabilité fréquentielle, la réduction de la largeur de raie ou l'accordabilité de la longueur d'onde d'émission, peut être obtenue par deux types d'approches :

- améliorer les performances intrinsèques du composant monolithique par l'ingénierie de la structure active à puits quantique et par la conception de cavités à multiple électrodes ou à multiple sections ;
- tirer profit de la sensibilité de la diode laser à la réinjection optique en la couplant à une deuxième cavité ou en l'incorporant dans une cavité externe qui renferme un élément sélectif en longueur d'onde.

Les essais de cavités relatifs à la première approche ont d'abord concerné les cavités à multiples électrodes, obtenues simplement par gravure d'un sillon de séparation dans l'électrode d'origine. L'application de courants propres à chaque électrode conduit alors, via les modifications engendrées sur le gain et l'indice de réfraction, à modifier les conditions d'oscillation dans la cavité laser et à sélectionner un mode. Dans le cas d'un laser à cavité conventionnelle, on peut ainsi obtenir une accordabilité, par saut, sur une plage de quelques nanomètres. Le besoin de diodes laser procurant une émission monofréquence a orienté les efforts vers des cavités à rétroaction distribuée et à multiple électrodes, de type DFB, et vers la mise au point de cavités laser à multiple sections. Ces dernières comportent généralement des sections de gain, de phase et de réflexion, ajustables individuellement grâce à un courant de polarisation. Elles sont plus difficiles à fabriquer que les diodes laser à multiple électrodes mais elles permettent le contrôle de la longueur d'onde d'émission sur une plage pouvant dépasser 20 nm.

L'approche tirant profit de la réinjection optique peut, quant à elle, s'orienter selon deux voies. La première concerne les diodes laser à cavités couplées et clivées, appelées  $C^3$ , qui sont composées de deux cavités conventionnelles en série, de longueurs différentes. Le mode oscillant dans cette structure est alors le mode excité par les deux cavités à la fois. D'autres structures permettent d'obtenir un effet similaire en associant un miroir et une diode laser conventionnelle. Cependant, les difficultés technologiques et opérationnelles liées à la mise en œuvre de ce type de cavités n'en ont pas favorisé le développement. La deuxième voie concerne les diodes laser à cavité externe pour lesquelles la sélection spectrale est obtenue par un élément dédié, généralement un réseau de diffraction, incorporé dans la même cavité optique que la diode laser. Ce type de cavités, tout en procurant une réduction de la largeur de raie de la diode laser d'origine, offre des possibilités de contrôle modal ou d'accordabilité par une action appropriée sur l'élément sélectif en longueur d'onde.

Toutefois, pour de nombreuses applications, aucune des approches précédentes n'est pleinement satisfaisante. En effet, l'amélioration des performances du composant monolithique concerne principalement les sources émettant dans le domaine des télécommunications optiques. De ce fait, les sources émettant à des longueurs d'onde inférieures au micromètre avec de bonnes qualités spectrales sont encore peu développées et onéreuses.

D'autre part, l'incorporation d'une diode laser dans une cavité externe est difficile à mettre en œuvre par les techniques conventionnelles. Outre le traitement anti-reflet d'au moins une facette du composant, cette opération nécessite la mise en place de montages optiques complexes, mécaniquement fragiles, sensibles aux effets thermiques et souvent encombrants. Cependant, le développement des microsystèmes a conduit à mettre au point un ensemble de techniques permettant d'envisager la réalisation de sources laser performantes basées sur une cavité externe miniature et robuste [1]-[5].

Dans ce contexte, nos travaux ont eu pour objectif de concevoir et réaliser une microsource laser innovante procurant une bonne qualité spectrale d'émission tout en présentant le faible encombrement et la facilité d'utilisation des diodes laser monolithiques. Mettant à profit nos travaux antérieurs sur les diodes laser DBR, nous avons proposé un nouveau concept de cavité étendue basée sur ce type de sources et destinée à contrôler ses performances, notamment en terme de stabilité modale et de largeur spectrale. Ces travaux ont été menés en collaboration avec le LPMO de Besançon et avec le soutien du CNES.

## 2.2 Proposition d'un concept original de cavité étendue

Les travaux relatifs aux diodes laser DBR ont mis en évidence l'influence prépondérante, sur les performances du composant, de déphasages incontrôlables technologiquement. Dans le but d'accéder à un contrôle externe de ces déphasages, nous avons proposé un concept original de cavité mettant en œuvre une diode laser DBR à émission surfacique dont le réseau est surmonté d'un miroir ajustable qui impose de nouvelles conditions de phase dans la cavité optique. La diode laser considérée dans ce cas est dissymétrique, c'est à dire qu'elle comporte un seul réseau et que le faisceau utile émerge par la face clivée du composant opposée à ce réseau (Fig.1).

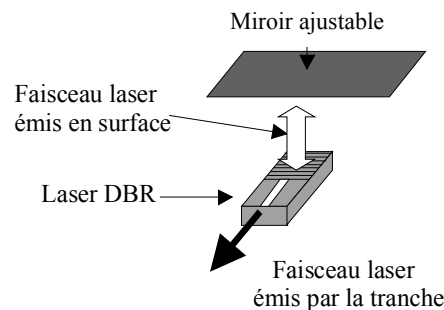


Fig.1 : Schéma de principe de la diode laser en cavité étendue.

### 2.2.1 Méthodologie d'analyse

La méthodologie d'analyse mise en œuvre pour l'étude de cette nouvelle source est semblable à celle qui a été développée dans le cadre de l'étude précédente sur les diodes laser DBR à émission surfacique. Il s'agit d'une méthodologie globale qui associe les propriétés spectrales de la couche active avec les phénomènes de propagation dans les différentes zones de la structure et avec les conditions d'oscillation dans la cavité optique étendue. Cependant, nous avons opté ici pour le formalisme mathématique des matrices de transfert qui permet une approche simple des cavités multisections en caractérisant chaque zone de la cavité et chaque interface par une matrice appropriée. De plus, ce formalisme étendu à la dimension (3x3) a été utilisé pour prendre en compte le phénomène d'émission spontanée dans la structure et en déduire les propriétés de la diode laser en cavité étendue en terme de largeur de raie [6].

L'analyse de l'influence du miroir ajustable est alors menée en considérant que, vu de la zone active, l'ensemble (zone de réseau + miroir externe) se comporte comme un réflecteur d'extrémité équivalent. Hormis les propriétés de diffraction du réseau étudiées précédemment, ce réflecteur équivalent prend en compte la réflectivité en amplitude  $r_M$  du miroir externe et son éloignement  $d$  au plan du réseau (Fig.2). Pour de petits déplacements du miroir externe, et en l'absence de pertes optiques entre le réseau et ce miroir, la réflectivité équivalente présente une partie réelle constante. En revanche, la phase de cette réflectivité dépend étroitement de l'éloignement  $d$ . Ainsi, le déphasage  $\varphi_{equ}$  subi par l'onde au cours d'un aller-retour entre le réseau et le miroir externe s'exprime sous la forme :  $\varphi_{equ} = 2 \cdot (2\pi / \lambda_0) \cdot d + \varphi_M$  où  $\lambda_0$  est la longueur d'onde de la radiation considérée, et  $\varphi_M$  est la phase de la réflectivité du miroir externe.

Cette expression met clairement en évidence deux propriétés du réflecteur équivalent :

- hormis la dépendance en  $\varphi_M$ , le déphasage introduit par le réflecteur équivalent dépend de l'éloignement du miroir et de la longueur d'onde diffractée par le réseau de Bragg vers celui-ci ;

- un déplacement du miroir égal à une demi-longueur d'onde génère un déphasage de  $2\pi$  : pour de petits déplacements, le réflecteur équivalent présente donc une réflectivité de périodicité en  $d$  égale à  $\lambda_0/2$ .

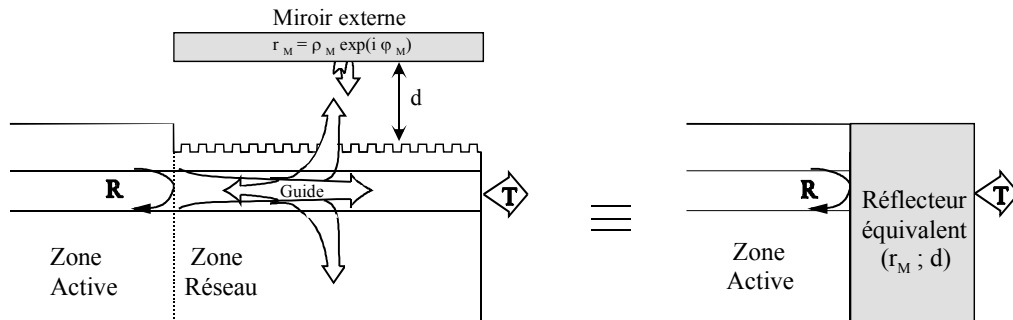


Fig.2 : Modélisation du réflecteur réel par un réflecteur équivalent.

Cette approche permet ainsi d'analyser la cavité laser DBR surmontée du miroir externe comme une cavité DBR ordinaire délimitée par une face clivée et un réflecteur équivalent dont les propriétés dépendent de l'éloignement du miroir et de la longueur d'onde considérée. Dans ce cadre, pour analyser l'influence du miroir externe sur les performances de la source, nous avons choisi d'associer celui-ci à une diode laser DBR qui, prise isolément, présente un fonctionnement bimode en raison de la valeur de son paramètre d'accord  $z_0$  ( $z_0$  est défini dans la section 1.2.3). L'étude doit ainsi permettre d'établir les conditions procurant une amélioration des caractéristiques de fonctionnement de cette diode laser prise isolément.

### 2.2.2 Description de la structure étudiée

La diode laser est constituée d'une structure GRIN-SCH à puits quantique identique à celle qui a été considérée dans le cadre de l'étude des diodes laser DBR à émission surfacique. De même, les dimensions caractéristiques du composant étudié ici sont identiques à celles qui ont été utilisées précédemment (section 1.2.4).

Une étude préalable des caractéristiques de fonctionnement de la diode laser DBR montre qu'elle présente un régime bimode pour une valeur du paramètre  $z_0$  égale à  $0,25 \Lambda$ , où  $\Lambda$  représente le pas du réseau de Bragg. Dans la suite, nous considérerons uniquement cette valeur de  $z_0$  qui induit une discrimination nulle entre les deux modes longitudinaux de gain au seuil le plus faible et qui provoque donc leur émission simultanée par la diode laser DBR.

A partir de cette configuration, l'influence d'un miroir externe est analysée pour deux valeurs typiques de son éloignement au réseau :  $d_1 = 250 \mu\text{m}$  et  $d_2 = 1250 \mu\text{m}$ . D'autre part, en raison de la divergence du faisceau émis par le réseau vers le micromiroir, la partie réelle de la réflectivité de ce dernier est ajustée en fonction de son éloignement : elle est prise égale à 95% pour un éloignement de  $250 \mu\text{m}$ , et 75% pour un éloignement de  $1250 \mu\text{m}$ .

Enfin, la réflectivité du miroir équivalent étant périodique en fonction de l'éloignement au voisinage de chaque position  $d_1$  et  $d_2$ , il suffit de considérer les plages telles que  $d = d_i + m \lambda_{\text{réf}}$ , où  $m$  est un réel compris entre 0 et 0,5 et  $\lambda_{\text{réf}}$  est la longueur d'onde d'émission de la diode laser DBR prise isolément.

### 2.2.3 Principaux résultats de modélisation

De façon générale, le réflecteur équivalent à l'ensemble (réseau + miroir) montre des caractéristiques pouvant s'éloigner radicalement des caractéristiques du réflecteur de Bragg pris isolément. Ainsi, dans les différents spectres de diffraction, la contribution du miroir externe se traduit fréquemment par l'apparition de plusieurs bandes spectrales. Selon les valeurs du paramètre  $m$  défini précédemment, on peut observer des spectres de réflectivité présentant un maximum très éloigné de la condition de Bragg ou dont la valeur peut atteindre 95%. De même, les spectres de transmission ou de diffraction vers le substrat peuvent être totalement annulés ou au contraire renforcés pour certaines longueurs d'onde.

L'étude de l'influence de la position du miroir externe sur le mode dominant de la cavité étendue conduit alors aux résultats indiqués sur la figure 3.

Il apparaît que l'utilisation du miroir externe permet de couvrir une gamme spectrale d'émission d'environ 1 nm pour une valeur d'éloignement voisine de 250  $\mu\text{m}$ . Cette plage se réduit à environ 0,3 nm pour un éloignement de 1250  $\mu\text{m}$ . Le miroir externe procure ainsi une accordabilité par saut autour de la longueur d'onde de Bragg qui, même si elle est restreinte, couvre une plage trois fois plus étendue que celle qui découle de la variation du seul paramètre d'accord  $z_0$ . De plus, pour certaines gammes de valeurs du paramètre  $m$ , on observe des plateaux de stabilisation de la longueur d'onde d'émission qui constituent un atout significatif de la microsource par rapport à la diode laser DBR.

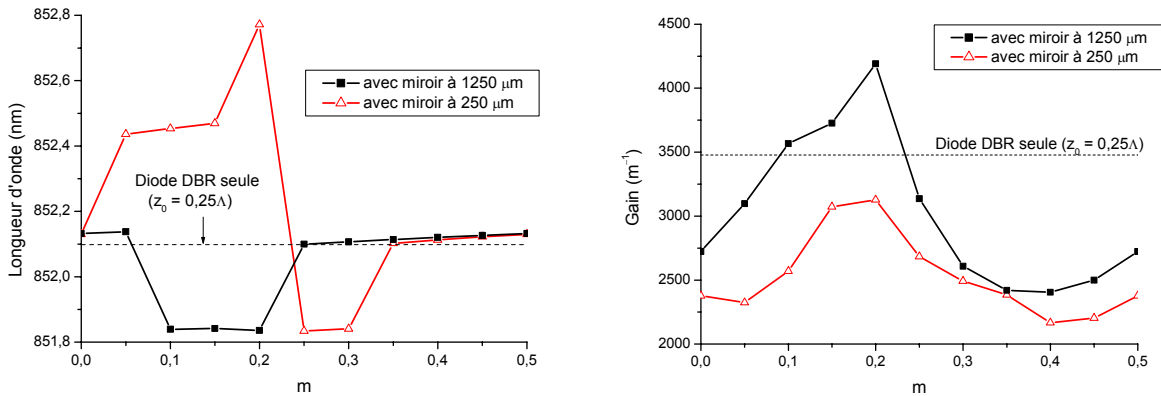


Fig.3 : Variation des caractéristiques du mode dominant de la cavité étendue en fonction du paramètre  $m$ .

Concernant le gain au seuil de la structure, la présence du miroir externe apporte dans la plupart des cas une réduction importante de sa valeur. Toutefois, on observe de fortes variations de celui-ci en fonction du mode sélectionné qui se traduiront, dans la pratique, par d'importantes variations du courant de seuil du composant accompagnant certains déplacements du miroir. Il s'agit là d'une propriété dont on pourrait tirer profit pour accroître la fonctionnalité de cette source. En effet, outre le meilleur contrôle de l'émission laser, le miroir externe autorise ainsi un fonctionnement du composant en porte optique par son influence sur les différents coefficients de diffraction du réseau : selon sa position, le miroir peut favoriser la part de rayonnement transmise vers l'extrémité du guide ou diffractée vers le substrat. La mise en œuvre du modèle d'analyse spectrale permet, quant à elle, de confirmer l'influence critique du paramètre  $m$  sur les caractéristiques d'émission liées à la cavité étendue. En reliant la largeur de raie au niveau d'injection imposé par le gain au seuil de la structure, elle montre l'intérêt de l'utilisation du miroir externe pour améliorer la largeur spectrale d'émission qui peut être réduite d'un ordre de grandeur.

Cette étude, complétée par le calcul du rendement d'émission par la face clivée et la connaissance de la discrimination modale associée à chaque configuration, permet alors de déterminer les valeurs de paramètres procurant un fonctionnement optimal de cette source laser.

### 2.3 Validation expérimentale de la cavité étendue proposée

Avant la réalisation effective d'une microsource laser basée sur le principe de cavité originale qui vient d'être proposé, nous avons procédé à la validation pratique de ce principe. La démonstration et l'analyse expérimentale de l'influence de la position d'un miroir externe sur les performances d'une diode laser DBR ont alors nécessité la conception et la mise en place d'un banc de caractérisation spécifique devant permettre :

- le contrôle précis de la position relative du miroir externe et du réseau sur des intervalles de déplacements égaux à la demi-longueur d'onde d'émission du composant ;
- l'interception et l'analyse du rayonnement émis par la face clivée de la diode laser située au cœur du montage expérimental.

Pour répondre à ces exigences, le miroir est fixé sur un support piézoélectrique permettant un contrôle très fin de son éloignement au réseau et de son assiette. La sensibilité du système à des déplacements nanométriques nous a conduits à limiter toute perturbation dans ce domaine en régulant la température des différents éléments au moyen de modules à effet Peltier et en construisant le banc expérimental sur une table optique antivibratoire. En raison de l'encombrement du système et de la diversité des

éléments assemblés, une fibre optique est utilisée pour intercepter le faisceau lumineux au plus près de la face de sortie de la diode laser. Le signal optique est ensuite acheminé vers un système d'acquisition des caractéristiques P(I) et spectrales. Enfin, l'ensemble du montage expérimental est observé à l'aide de trois caméras CCD permettant une visualisation des différents éléments pour faciliter leur positionnement.

Afin d'analyser l'influence du miroir externe sur le comportement de la source, les caractéristiques de fonctionnement de celle-ci ont été relevées en deux temps : tout d'abord, les caractéristiques d'une diode laser DBR seule ont été relevées, ensuite le miroir a été inséré pour procéder à de nouvelles caractérisations.

Concernant la diode laser prise isolément, son analyse spectrale met en évidence des instabilités modales lors de sa montée en puissance. Ainsi, à proximité du seuil, le spectre d'émission présente un seul mode longitudinal. Lorsque le courant de polarisation augmente, il apparaît un second mode décalé de 0,2 nm par rapport au premier, ce second mode devenant dominant pour des courants plus élevés.

Lorsque le miroir externe est positionné à environ 1250  $\mu\text{m}$  du réseau de la diode laser, les nouvelles caractérisations en fonction du déplacement de celui-ci conduisent aux observations suivantes :

- les caractéristiques évoluent de façon périodique en fonction du déplacement du miroir, la période étant égale à la demi-longueur d'onde d'émission ;
- les caractéristiques P(I) évoluent ainsi entre deux caractéristiques limites présentant leur propre courant de seuil et leur propre rendement différentiel ;
- sur chaque période, les spectres présentent successivement un mode unique vers les faibles longueurs d'onde, deux modes, et un mode unique vers les grandes longueurs d'onde.

Cette démarche de validation expérimentale de la cavité proposée a clairement montré l'influence du miroir externe sur les caractéristiques de la diode laser DBR. Le comportement observé est qualitativement analogue de celui qui a été obtenu précédemment par simulation. Outre l'évolution périodique des caractéristiques avec de petits déplacements du miroir, l'ajustement de sa position permet d'obtenir un fonctionnement sur un mode longitudinal unique ou permet d'optimiser la valeur du courant de seuil ou du rendement différentiel de la structure.

Après l'approche théorique, nous avons ainsi montré expérimentalement que le miroir externe est un moyen d'améliorer les performances d'une diode laser DBR, à condition de maîtriser de façon très précise son déplacement sur un intervalle égal à la demi-longueur d'onde d'émission. Ceci a imposé un montage encombrant et délicat à mettre en œuvre mais qui peut être évité par la réalisation de la microsource laser intégrée faisant l'objet de la section suivante.

## **2.4 Réalisation et caractérisation de la microsource laser**

Afin de surmonter les inconvénients communs à la plupart des systèmes optiques mettant en œuvre une source laser en cavité étendue, nous avons proposé un type de microsources élaboré à partir des techniques de fabrication des microsystèmes. La microsource considérée ici est constituée par l'intégration hybride, sur une plate-forme en silicium, d'une diode laser DBR à émission surfacique et d'un micromiroir à commande électrostatique. Les éléments sont assemblés selon la disposition étudiée précédemment avec, toutefois, un mouvement différent du miroir. En effet, notre choix s'est porté sur un micromiroir à bras de torsion autorisant un débattement angulaire plutôt qu'une translation. Ce choix a été motivé par le caractère générique de ce type de miroir et la perspective d'étendre la fonctionnalité de la microsource en disposant d'un moyen d'accordabilité en longueur d'onde par l'association de ce type de miroirs à une diode laser portant un réseau avec un pas adéquat.

Les diodes laser DBR ayant été réalisées dans le cadre de travaux précédents, leur hybridation et l'assemblage de la microsource nécessitent alors :

- la conception et la réalisation d'une embase en silicium permettant le report précis d'une diode laser DBR et d'un micromiroir. A cet effet, des logements ou des surfaces destinés à recevoir les éléments sont définis avec précision selon les trois dimensions. Cette embase doit également comporter la contre-électrode du micromiroir et des pistes métallisées permettant les différentes connexions électriques ;
- la conception et la réalisation d'un micromiroir orientable dont la surface réfléchissante doit recouvrir entièrement la zone de réseau du laser pour minimiser les pertes. En régime statique, les dimensions caractéristiques de ce micromiroir et de son support doivent permettre un débattement angulaire de quelques degrés pour des tensions de commande



inférieures à la centaine de volts. Ce micromiroir a été conçu et réalisé par nos partenaires du LPMO de Besançon.

L'assemblage de la microsource consiste alors à reporter la diode laser DBR dans son logement spécifique sur l'embase en silicium et à reporter cette embase sur un support de type TO afin de procéder aux connexions électriques du composant. Ensuite, le micromiroir est reporté au-dessus de la zone de réseau de la diode laser et il est connecté à son tour (Fig.4).

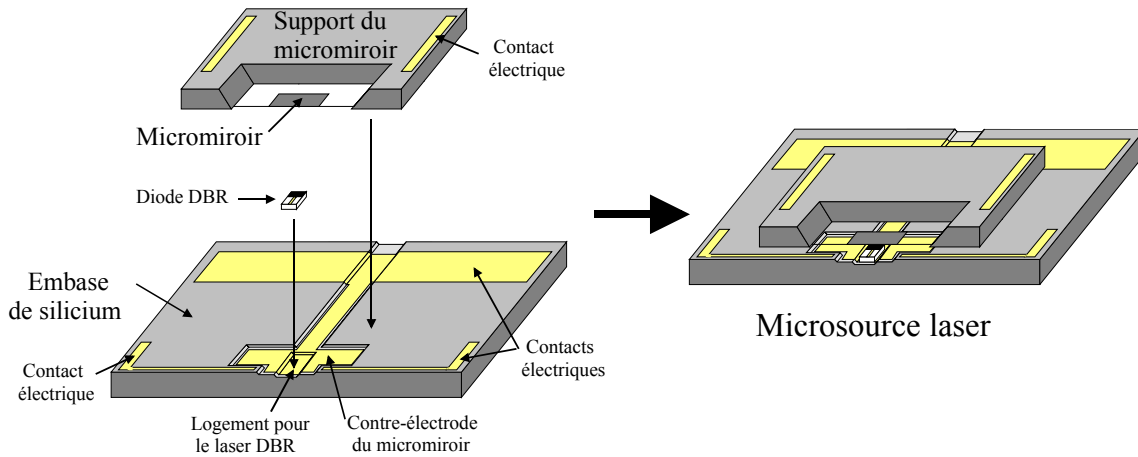


Fig.4 : Schéma d'assemblage de la microsource laser.

La technique de report de la diode laser sur l'embase en silicium fait appel à une étape de collage au moyen d'une colle conductrice polymérisée sur un four plan à 100°C et sous une pression mécanique calibrée.

Le report du miroir, quant à lui, est réalisé à l'aide de quatre billes calibrées de colle isolante polymérisée en étuve à 100°C. Ce procédé permet de contrôler les espacements verticaux entre les différents éléments assemblés. La figure 5 montre une vue générale et une vue détaillée de la microsource.

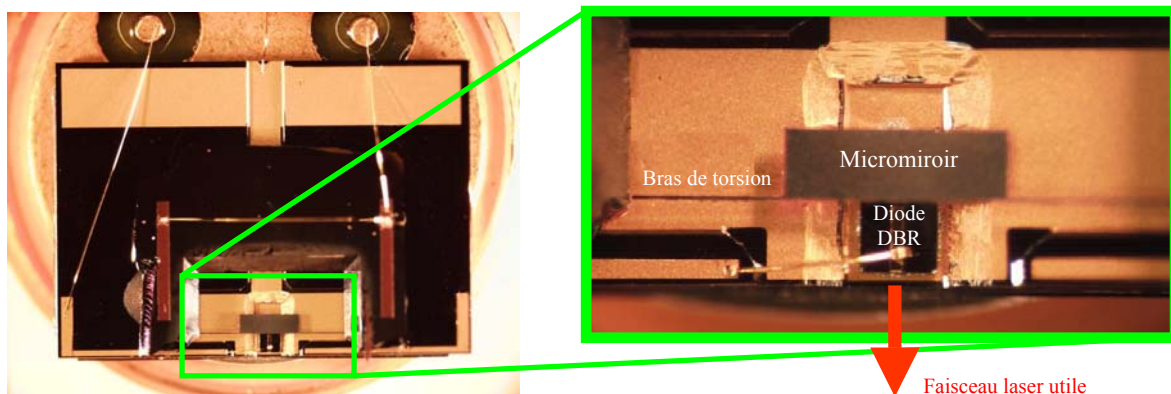


Fig.5 : Vues générale et détaillée de la microsource laser.  
(Le micromiroir a une longueur de 1 mm et une largeur de 300 µm)

Les caractéristiques de fonctionnement de la microsource sont établies selon une procédure analogue à celle mise en œuvre lors de la validation expérimentale de la cavité étendue : dans un premier temps, on procède à la caractérisation de la diode laser DBR seule et, après le report du miroir, on caractérise la microsource dans son ensemble. Toutes les caractérisations sont faites en régime impulsionnel, la température du support TO étant maintenue à 23°C, et une fibre optique recueille le faisceau laser en sortie du composant.

Lorsque l'orientation du micromiroir est modifiée, le relevé des caractéristiques P(I) de la microsource montre qu'elles évoluent entre deux caractéristiques extrêmes. On retrouve ainsi le comportement déjà observé sur le banc de validation expérimentale. Ici, l'angle  $\theta$  du micromiroir par rapport à sa position

d'équilibre apparaît comme un paramètre d'ajustement de la phase qui peut être réglé de façon précise par la valeur de la tension d'actionnement. La figure 6 regroupe les valeurs expérimentales du courant de seuil et du rendement différentiel au voisinage du seuil, pour différentes valeurs de l'angle  $\theta$ . La ligne horizontale à 170 mA correspond au courant de seuil de la diode laser DBR seule. Ces résultats montrent que la position du miroir a une influence déterminante sur le fonctionnement de la microsource. En effet, sur les exemples relevés, le courant de seuil varie d'environ 15% et le rendement différentiel d'environ 20% par rapport à leur valeur moyenne. Dans la plupart des cas, on observe que la présence du micromiroir entraîne une réduction de la valeur du courant de seuil. Toutefois, il apparaît plus rarement une optimisation simultanée du courant de seuil et du rendement différentiel.

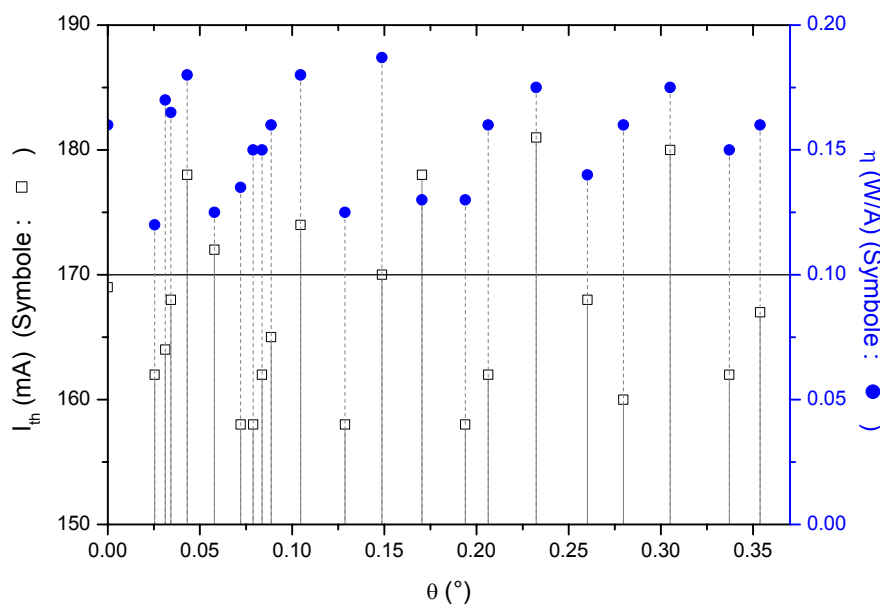


Fig.6 : Courant de seuil ( $I_{th}$ ) et rendement différentiel ( $\eta$ ) en sortie de fibre, pour différentes orientations  $\theta$  du micromiroir.

L'analyse spectrale du comportement de la microsource a été menée soit pour un courant de polarisation constant (Fig.7), soit pour une orientation donnée du micromiroir (Fig.8). Dans les deux cas, il est reporté le spectre relevé précédemment pour la diode laser DBR seule. Toutefois, ce spectre n'est comparable aux nouveaux relevés qu'en ce qui concerne la longueur d'onde d'émission car on ne peut garantir un positionnement identique de la fibre optique pour la caractérisation de la diode laser seule et la caractérisation de la microsource.

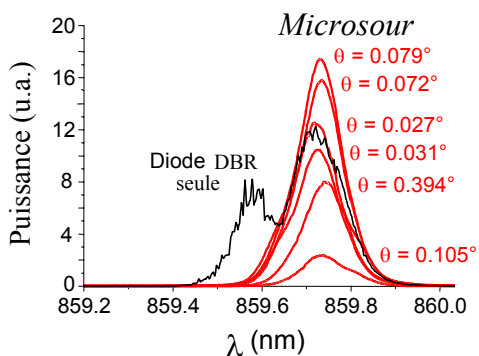


Fig.7 : Spectres d'émission obtenus pour une polarisation constante de la diode laser DBR ( $I = 175$  mA).

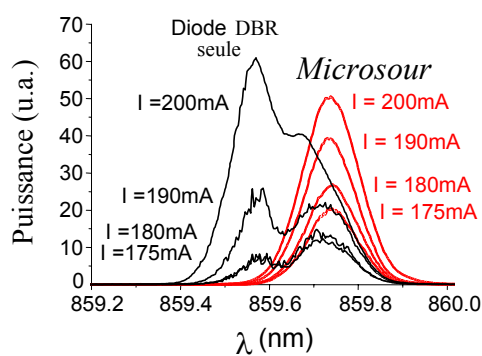


Fig.8 : Spectres d'émission obtenus pour une orientation donnée du micromiroir ( $\theta = 0,135^\circ$ ).

La présence du micromiroir procure une très nette stabilisation de la longueur d'onde d'émission, son orientation jouant essentiellement sur la valeur de la puissance optique émise. On note également une

forme épurée des spectres issus de la microsource résultant du filtrage fréquentiel produit par la cavité étendue.

## 2.5 Conclusion

Les performances spectrales des diodes laser peuvent nécessiter la mise en place d'une cavité étendue pour améliorer la stabilité de l'émission, réduire la largeur de raie ou faire varier la plage spectrale d'utilisation. Ce type de cavités est généralement difficile à mettre en œuvre par les techniques conventionnelles, et les travaux menés dans le cadre de cette étude ont contribué à explorer une voie alternative. Nous avons proposé une source laser stabilisée en fréquence selon un encombrement et des conditions d'utilisation similaires à celles d'un composant monolithique.

En nous appuyant sur les travaux précédents relatifs aux diodes laser DBR à émission surfacique, nous avons conçu une cavité étendue originale permettant de réinjecter dans ce type de composants une partie du rayonnement qu'il émet. Cette réinjection est procurée par un miroir placé au-dessus du réseau de la diode laser et dont la position peut être ajustée avec précision. Le déplacement du miroir est alors un moyen optomécanique externe pour ajuster la phase optique pendant le fonctionnement de la diode laser et permettre ainsi le contrôle et l'optimisation de ses performances.

Dans un premier temps, une analyse théorique de la cavité étendue a été développée par une modélisation assimilant le réseau de Bragg et le miroir externe à un réflecteur équivalent dont les propriétés dépendent des paramètres structuraux de la diode laser, de la réflectivité du miroir externe et de son éloignement au réseau. A proximité d'une position donnée, l'effet périodique du déplacement du miroir a été mis en évidence et des cas typiques de diodes laser en cavité étendue ont été simulés. Ces études ont montré que le déplacement du miroir externe offre un moyen de stabiliser la longueur d'onde d'émission au voisinage de la longueur d'onde de Bragg et permet d'optimiser le courant de seuil ou le rendement d'émission par la face clivée, selon le critère requis. Un faible accord en longueur d'onde, par saut de mode, peut éventuellement être obtenu au détriment des performances en courant et rendement. Toutefois, la recherche d'une large plage d'accordabilité imposerait une contribution du réseau en dehors de l'accord de Bragg, condition qui n'a pas été analysée dans le cadre de cette étude.

A la suite de l'analyse théorique, une étude expérimentale réalisée sur banc optique a permis de valider le concept de cavité proposé. L'effet périodique de petits déplacements du miroir et le contrôle que ce dernier permet d'exercer sur les caractéristiques de fonctionnement de la diode laser ont été confirmés. La réalisation et la caractérisation de la microsource ont alors démontré l'intérêt considérable d'une source laser de taille réduite, conviviale et robuste. L'utilisation d'un micromiroir à commande électrostatique permet l'ajustement de sa position de façon simple et précise, procurant ainsi un contrôle efficace des caractéristiques d'émission du composant. Enfin, la configuration du micromiroir et de l'embase en silicium est compatible avec la technologie des microsystèmes, ouvrant ainsi la voie à la réalisation de ce type de microsources par des procédés de fabrication collective.

### **Références :**

- [1] Y. Uenishi et al. ; Electron. Lett. ; 32 (13) ; pp.1207-1208 (1996)
- [2] F. Sugihwo et al. ; Appl. Phys. Lett. ; 72 ; pp.10-12 (1998)
- [3] P. Tayebati et al. ; IEEE Photon. Tech. Lett. ; 10 (12) ; pp.1679-1681 (1998)
- [4] T. Tanaka et al. ; Electron. Lett. ; 35 (2) ; pp.149-150 (1999)
- [5] N. Kaou et al. ; Proc. SPIE ; 3680 ; pp.765-772 (1999)
- [6] J.P. Weber et al. ; IEEE J. Quantum Electron. ; vol.27 (10) ; pp.2256-2266 (1991)

## 3. Intégration photonique dans les microsystèmes

### 3.1 Contexte et objectif des travaux

Le développement de nouvelles technologies et la maîtrise des techniques d'intégration ont ouvert de vastes domaines d'applications aux microsystèmes, tels que les télécommunications, l'automobile, le bio-médical, l'espace, ... Outre les avantages liés à la réduction simultanée de l'encombrement, du poids et de la consommation du dispositif, une amélioration des performances et l'accès à de nouvelles fonctionnalités peuvent être obtenus par l'intégration, au sein d'un même microsystème, de fonctions variées (mécaniques, thermiques, électrostatiques, ...). Toutefois, l'introduction de fonctions optiques se heurte à de nombreuses difficultés dues essentiellement à la variété des filières technologiques qui rendent les procédés de fabrication peu compatibles entre eux. D'autre part, selon leur fonction, les éléments optiques présentent des formes et des dimensions qui rendent leur association difficile et engendrent des pertes de couplage pouvant s'avérer prohibitives pour le fonctionnement du système.

A ce jour, la voie la plus avancée pour la réalisation de microsystèmes opto-électro-mécaniques (MOEMS) repose sur l'hybridation des différents éléments optiques, actifs et passifs, sur une plate-forme en silicium pouvant comporter des éléments mécaniques ou électroniques préalablement réalisés. L'utilisation d'une technologie silicium pour l'élaboration de la plate-forme offre ainsi l'avantage de permettre la réalisation de structures d'alignement (micro-bancs), d'éléments mobiles (membranes, poutres, ...), de guides optiques, ou de fonctions électroniques de commande et de contrôle afin d'obtenir un microsystème « intelligent ».

En marge des microsystèmes optiques, les technologies liées à l'optique intégrée permettent, quant à elles, l'association monolithique de différentes fonctions. Cependant, hormis les commutateurs ou les modulateurs propres au domaine des télécommunications optiques, les dispositifs réalisés en optique intégrée consistent essentiellement en l'association de guides optiques et d'éléments passifs. L'intégration monolithique d'éléments actifs, tels que des détecteurs ou des sources, avec des éléments passifs n'est encore que très peu développée.

Cependant, l'intégration de fonctions photodétectrices peut bénéficier de l'utilisation du silicium qui offre la possibilité de leur associer, de façon monolithique, des fonctions électroniques de conditionnement et de traitement du signal, par la mise en œuvre d'une technologie CMOS. Ainsi, des procédés de fabrication collective à faible coût peuvent être envisagés pour obtenir des composants compacts et robustes dont un atout supplémentaire réside dans la suppression de la plupart des liaisons électriques externes contribuant ainsi à une bonne immunité aux interférences électromagnétiques et à une amélioration des performances par la réduction d'effets capacitifs parasites.

Les fonctions photoémettrices, quant à elles, reposent quasi-essentiellement sur les technologies des semiconducteurs III/V. L'intégration monolithique de sources avec des fonctions actives ou passives demeure limitée à des associations de quelques éléments (guide, coupleur, filtre, ...), une des principales raisons étant l'absence de technologie générique pour les divers composants considérés. Dans ce domaine, les propriétés des cristaux photoniques offrent des perspectives prometteuses en autorisant le confinement de la lumière dans des structures dont les dimensions sont de l'ordre de la longueur d'onde, et en permettant la réalisation de fonctions optiques innovantes. L'aspect générique de ces structures ouvre ainsi la voie à la réalisation de circuits intégrés optiques planaires de forte densité.

Dans le cadre relatif à l'intégration photonique dans les microsystèmes, l'objectif de nos travaux était d'explorer deux types d'approches.

Dans un premier temps, il s'agissait d'exploiter les potentialités de la microélectronique et des microtechnologies sur silicium pour proposer une voie générique d'intégration multifonctionnelle dans un microsystème optique. En nous appuyant sur l'étude de la miniaturisation d'un capteur optique de déplacement, nous avons mené nos recherches en étroite collaboration avec le Laboratoire de Traitement du Signal et Instrumentation (LTSI) de Saint-Etienne et l'Atelier Inter-universitaire de Micro-Electronique (AIME) de Toulouse.

Le second type d'approches porte sur une exploitation des propriétés des cristaux photoniques dans la perspective du développement de nouveaux types de diodes laser compatibles avec une intégration photonique planaire. La diode laser considérée dans le cadre de notre étude comporte un miroir à cristal photonique unidimensionnel à forte réflectivité, ouvrant la voie à des microcavités horizontales pouvant être intégrées dans un circuit photonique.

Ces deux types d'approches explorés dans le cadre de l'intégration photonique dans les microsystèmes sont développés dans les parties suivantes.

### 3.2 Intégration multifonctionnelle dans un microsystème optique

La faisabilité de l'intégration multifonctionnelle dans un microsystème optique est étudiée au travers de la miniaturisation d'un capteur optique de déplacement à résolution nanométrique et à grande course. Notre étude se focalise sur la proposition d'approches génériques d'intégration basée sur la technologie silicium et mettant à profit ses potentialités pour le capteur considéré ainsi que pour tout microsystème optique reposant sur les mêmes fonctions.

#### 3.2.1 Le capteur optique de déplacement

Le fonctionnement des capteurs optiques de déplacement repose généralement sur deux principes conduisant à des propriétés de caractère opposé :

- l'interférométrie laser permet d'accéder à la mesure de déplacements avec une résolution nanométrique, mais la course est limitée par la cohérence du rayonnement nécessaire à l'obtention du phénomène d'interférence ;
- le codage optique, basé sur les règles de Moiré, permet de mesurer des déplacements dont la course n'est limitée que par la longueur de la règle en mouvement mais avec une résolution limitée généralement à quelques micromètres par les phénomènes de diffraction.

Le capteur considéré dans le cadre de cette étude repose sur une approche dérivée du codage optique pour laquelle les phénomènes diffractifs et interférométriques sont exploités [1]-[2]. La mesure du déplacement est obtenue par l'analyse des interférences découlant du mouvement relatif de deux réseaux de diffraction en regard (Fig.1). Un faisceau collimaté est diffracté en plusieurs ordres par un réseau mobile (réseau de mesure) en direction d'un réseau fixe (réseau de lecture) qui provoque la recombinaison partielle de ces ordres en direction de deux photodétecteurs. La comparaison des signaux électriques délivrés par ces détecteurs permet la détermination du déphasage optique induit par le déplacement  $\Delta x$  du réseau de mesure sur ses propres ordres de diffraction. La connaissance du déphasage conduit alors à la détermination de la valeur du déplacement. Cependant, afin de connaître le sens de celui-ci, on utilise un second réseau de lecture décalé d'un quart de période par rapport au premier et associé à deux nouveaux détecteurs : la quadrature des signaux renseigne ainsi sur le sens. La recherche d'une solution à faible coût conduit au choix d'une longueur d'onde de travail dans la gamme du rouge, ce qui implique des pas micrométriques pour les réseaux de diffraction. Les fonctions mises en œuvre par les différents éléments du capteur sont indiquées sur la partie gauche de la figure 1.

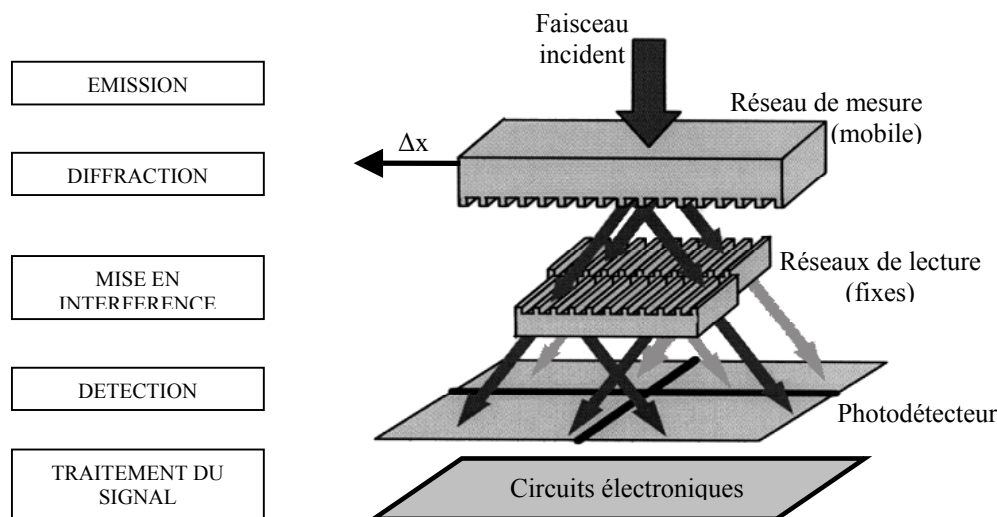


Fig.1 : Schéma de principe du capteur de déplacement et différentes fonctions mises en œuvre.

Ce principe de fonctionnement permet d'accéder à des mesures de déplacements caractérisées par :

- une course maximum égale à la longueur du réseau de mesure (elle peut être décimétrique),
- une résolution nanométrique obtenue par interpolation sur les signaux d'interférence,
- une précision qui dépend uniquement de la qualité et de la stabilité des réseaux.

Pour répondre à un objectif de compacité et de robustesse, nous avons étudié une configuration en réflexion oblique sur le réseau de mesure [3]. Cette configuration fait appel au même principe de fonctionnement mais elle permet de regrouper tous les éléments fixes du capteur (source lumineuse, réseaux de lecture, photodétecteurs et circuits de traitement du signal) du même côté du réseau mobile. Ainsi, ces différents éléments pourront être insérés dans un boîtier unique, appelé « tête de lecture », devant lequel défilera le réseau de mesure.

### 3.2.2 Approches d'intégration

Quelle que soit la configuration du capteur, en transmission ou en réflexion, les fonctions mises en œuvre par ses différents éléments sont inchangées. La recherche de l'intégration de ces fonctions a alors consisté à les considérer deux à deux dans une démarche progressive. En vue d'une première phase d'intégration, la technologie CMOS est évaluée pour intégrer les fonctions de détection et de traitement du signal sur un même substrat de silicium. Une deuxième phase concerne l'intégration originale des fonctions optiques de mise en interférence avec les fonctions de détection, par un procédé compatible avec la technologie CMOS. Cette deuxième phase offre ainsi la perspective d'une association monolithique, sur silicium, des trois fonctions qui viennent d'être considérées.

#### a) Intégration des fonctions de détection et de conditionnement et traitement du signal

Dans le domaine des capteurs et de l'imagerie, il existe plusieurs exemples d'intégration de fonctions de détection lumineuse et de conditionnement et traitement du signal réalisés en technologie CMOS [4]-[5]. Cependant, pour l'application visée et dans la perspective d'un développement à faible coût, nous avons évalué les possibilités offertes par une technologie standard proposée en fonderie.

- La première étape de ce travail a consisté à concevoir un opto-ASIC de test et à le faire réaliser en technologie CMOS 0,6  $\mu\text{m}$  par la fonderie AMS (Austria Mikro System international). Cet opto-ASIC comprend plusieurs photodiodes de structures différentes, accessibles individuellement ou par paire, associées à des circuits électroniques de conditionnement du signal (Fig.2a). L'évaluation des performances de chaque élément du dispositif a nécessité la mise en œuvre d'un banc de caractérisation spécifique permettant, entre autre, la focalisation et le pointage précis d'un faisceau lumineux à la longueur d'onde de 670 nm. Les tests optiques et électriques ont révélé de meilleures performances pour les photodiodes sans caisson qui ont donc été retenues par la suite. Ils ont mis en évidence de faibles densités de courant d'obscurité ( $\sim 10 \text{ nA/cm}^2$ ), des sensibilités voisines de 0,45 A/W comparables à celles de photodiodes classiques du commerce, et une diaphotie inférieure à 0,3% pour des photodiodes distantes de 50  $\mu\text{m}$ . Les circuits de conditionnement du signal (soustracteurs de courant et convertisseurs analogique-numérique) ont montré un comportement linéaire en fonction de l'éclairement des photodiodes. Enfin, les tests ont montré que les courants parasites induits par l'éclairement des circuits analogiques intégrés à proximité des photodiodes n'ont pas d'incidence notable sur le fonctionnement du dispositif. Ainsi, la technologie CMOS standard peut être mise à profit dans le cadre d'une intégration des fonctions de photodétection et de conditionnement du signal selon le cahier des charges du capteur considéré.

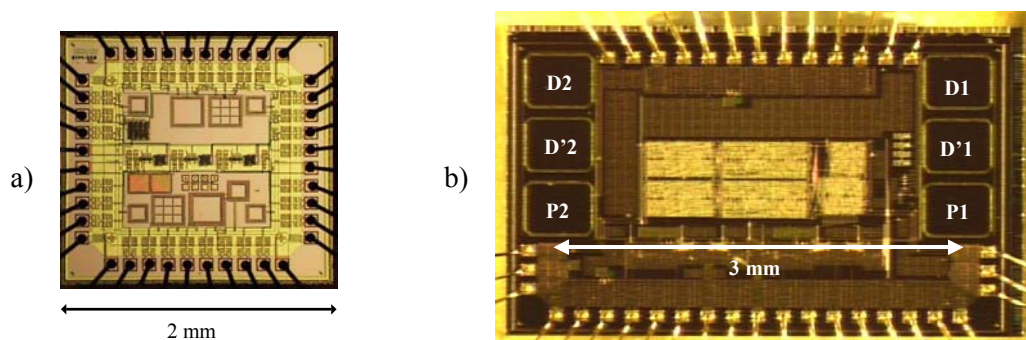


Fig.2 : Opto-ASIC de test (a) et opto-ASIC de démonstration (b)

- Ces premiers résultats nous ont conduits à concevoir un deuxième opto-ASIC, réalisable selon la même technologie, et dont la topographie des photodiodes et les fonctions de l'électronique associée permettent son utilisation dans un démonstrateur de capteur de déplacement (Fig.2b). Cette nouvelle

étape a donc débuté par la définition précise des fonctions, dimensions et localisation des différents éléments du démonstrateur. Un point crucial étant l'analyse des produits d'interférence, une étude opto-géométrique préalable a permis de déterminer le diamètre du faisceau incident et la dimension des photodiodes nécessaires à l'interception des zones de recouvrement des ordres de diffraction. A la suite de cette étude, les principales caractéristiques retenues pour le nouvel opto-ASIC sont les suivantes :

- les deux paires de photodiodes (D1/D'1 et D2/D'2) nécessaires au fonctionnement du capteur sont espacées de 3 mm, chaque photodiode ayant une dimension de  $400\ \mu\text{m} \times 500\ \mu\text{m}$  et étant séparée de sa voisine de  $100\ \mu\text{m}$ . Deux photodiodes supplémentaires (P1 et P2) sont insérées pour la réalisation de tests.
- les circuits de conditionnement et traitement du signal comprennent la soustraction des courants issus des photodiodes associées par paire, la mise en forme des signaux et leur amplification, ainsi que le comptage des passages par zéro. Les signaux numériques sont délivrés par un convertisseur analogique/numérique de type  $\Sigma\Delta$  et ils sont traités, pour l'interpolation, par un micro-contrôleur externe que nous avons choisi de ne pas intégrer dans l'opto-ASIC à ce stade de l'étude.
- l'interface avec l'extérieur permet la récupération directe des signaux analogiques et numériques pour contrôle, elle permet la lecture des valeurs des compteurs et elle permet également l'écriture de données pour fixer la valeur de paramètres (courant de référence, seuil des comparateurs, gain de conversion courant/tension).

Au retour de la fonderie, ce deuxième opto-ASIC a d'abord été testé pour vérifier ses fonctionnalités. L'étude de son comportement en situation de mesure a nécessité la mise en place d'un banc expérimental reproduisant le capteur optique de déplacement selon une configuration éclatée. Les résultats issus de ces tests ont montré que l'opto-ASIC respectait parfaitement son cahier des charges. Son incorporation au sein même d'un capteur opérationnel de dimensions réduites a alors conduit à la réalisation d'un prototype de tête de lecture dont un schéma en coupe et une photographie sont donnés sur la figure 3.

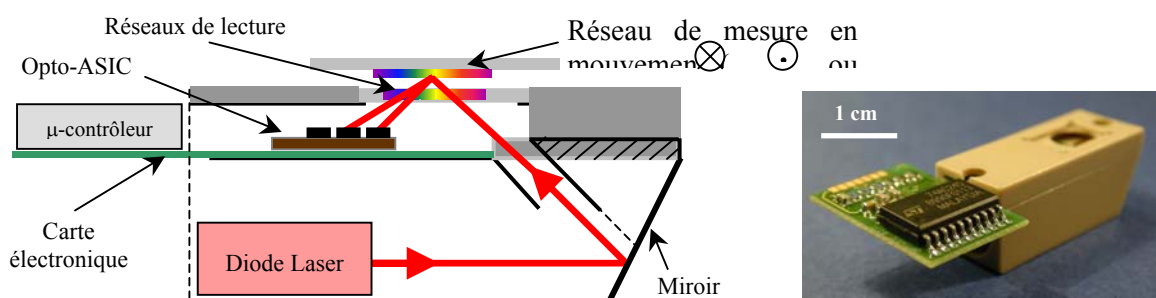


Fig.3 : Schéma et photographie du prototype de tête de lecture.

Cette tête de lecture comporte une diode laser collimatée émettant un rayonnement à la longueur d'onde de  $650\ \text{nm}$ , un miroir incliné réfléchissant le faisceau laser vers le réseau de mesure, un double réseau de lecture gravé sur une lame de quartz, et l'opto-ASIC reporté sur une carte électronique spécifique. Le tout est inséré dans un boîtier dont le volume total, d'environ  $3\ \text{cm}^3$ , représente une avancée significative dans la voie de la miniaturisation de ce type de capteurs, et ce pour des performances en terme de résolution identiques voire supérieures à celles des produits commercialisés.

Le test de ce prototype a alors permis de confirmer la fonctionnalité de l'opto-ASIC dans la configuration de la tête de lecture et de démontrer la validité de la première phase d'intégration proposée dans le cadre de la miniaturisation du capteur. Une technologie CMOS standard disponible en fonderie est ainsi parfaitement adaptée à l'association monolithique de fonctions photodétectrices et de conditionnement et traitement du signal pour l'application visée. De plus, et de façon générale, compte tenu des performances mises en évidence par nos caractérisations, cette technologie paraît compatible avec l'intégration de ces fonctions au sein de nombreux microsystèmes optiques.

### b) Intégration des fonctions de mise en interférence et de détection

L'intégration à faible coût des fonctions de détection et de conditionnement /traitement du signal ayant été évaluée, la question de l'intégration des fonctions optiques et photodétectrices se pose alors. Dans la

configuration classique du capteur, la position relative du réseau de lecture et des photodiodes permet la séparation des faisceaux issus de ce réseau avant qu'ils ne soient détectés (Fig.4a). Le déphasage entre les deux faisceaux initiaux tombant sur le réseau de lecture est alors déterminé par soustraction des photocourants délivrés par les deux détecteurs associés en paire. Si on considère une configuration intégrée pour laquelle le réseau de lecture est gravé à la surface d'une photodiode, la séparation des faisceaux n'a plus lieu et on peut s'interroger sur le type de signal recueilli par la photodiode (Fig.4b).

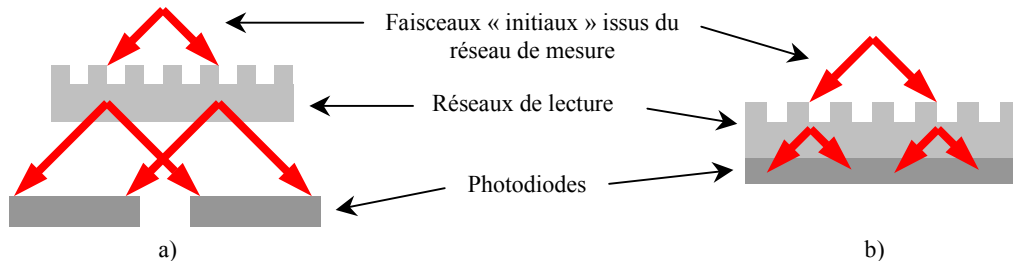


Fig.4 : Fonctions optiques et photodétectrices en configuration classique (a) et intégrée (b).

Par une approche analytique du phénomène et en se basant sur les conditions de conservation de l'énergie, nos partenaires du LTSI ont étudié la puissance totale transmise par un réseau de quartz recevant deux faisceaux déphasés en incidence de Littrow. Ils ont ainsi prédit une puissance totale transmise dont la valeur dépend du déphasage entre ces deux faisceaux [6]. A la suite de ce premier résultat, nous avons développé, dans notre équipe, une modélisation du dispositif intégré sur silicium. La mise en œuvre d'une méthode FDTD (Finite Difference Time Domaine) a permis d'étudier l'influence du déphasage  $\Delta\phi$  des deux faisceaux incidents sur la répartition du champ électrique et sur la puissance optique transmise à travers le réseau. La figure 5 montre une simulation de la répartition du champ électrique pour deux valeurs du déphasage, avant et après avoir franchi le réseau.

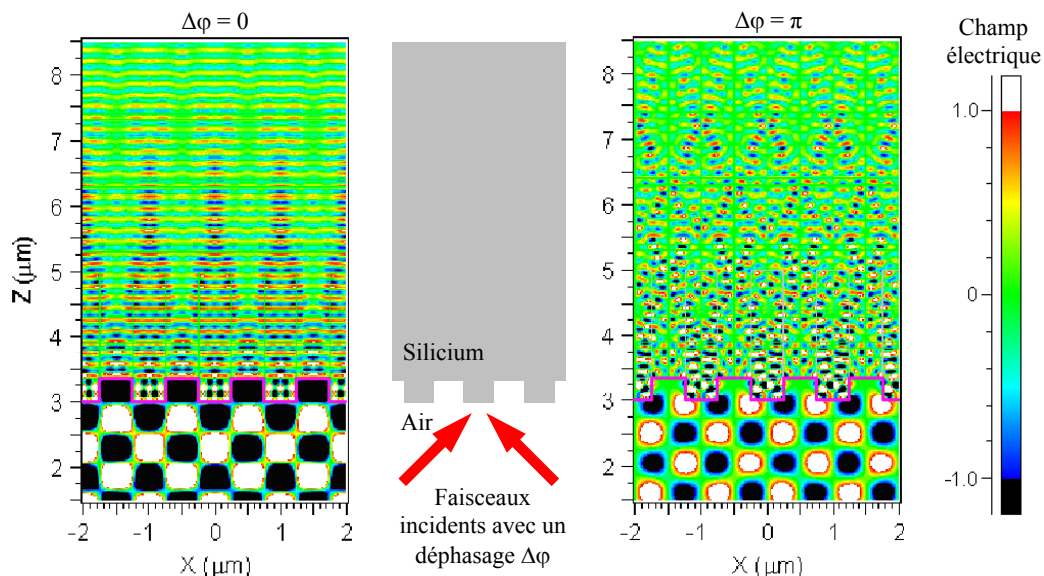


Fig.5 : Exemple de répartition du champ électrique, en mode TE, dans l'air et dans le silicium, pour deux valeurs du déphasage  $\Delta\phi$  entre les faisceaux incidents.

La modélisation du dispositif tient compte de l'absorption du silicium et les cartographies présentées ici sont déterminées à un instant quelconque du régime permanent. Cette figure montre clairement une différence de répartition du champ électrique dans le silicium entre les deux valeurs de déphasage considérées, pouvant ouvrir la voie à un capteur innovant de déphasage optique. Cependant, le contraste de modulation de ce capteur est un paramètre fondamental qui a nécessité une étude analytique. Nous avons ainsi montré que la puissance optique totale transmise par le réseau possède une composante continue et une composante alternative qui est une fonction sinusoïdale du déphasage  $\Delta\phi$ . La valeur de la composante continue et l'amplitude de la composante alternative dépendent des paramètres structuraux du dispositif. La détermination des conditions optimales de fonctionnement du capteur a été



obtenue par l'étude de l'influence des principaux paramètres géométriques sur le contraste. Pour un réseau de profil rectangulaire, gravé soit dans le silicium soit dans une couche superficielle de silice, nous avons ainsi étudié l'influence du rapport d'ouverture et de la profondeur des sillons du réseau. Nous avons mené ces études en considérant des faisceaux incidents polarisés en mode TE ou TM, et nous avons considéré des gammes de pas correspondant aux conditions de Littrow pour les ordres 1, 2 et 3, soit donc des pas variant de  $0,35\ \mu\text{m}$  à  $1,9\ \mu\text{m}$  pour des angles d'incidence compris entre  $29^\circ$  et  $65^\circ$ . Les résultats de ces études montrent que des contrastes de l'ordre de 20% peuvent être atteints avec ce nouveau type de capteurs intégrés, les tolérances les plus sévères étant de quelques centièmes de degrés sur les angles d'incidence.

L'étape de validation expérimentale a alors consisté à fabriquer le dispositif dans la centrale de technologie du laboratoire et à procéder à sa caractérisation. Dans la perspective d'une intégration multifonctionnelle à faible coût, le procédé de réalisation mis en œuvre est un procédé compatible avec la technologie CMOS considérée précédemment. Des photodiodes de tailles et dispositions diverses ont ainsi été réalisées en vue de la gravure d'un réseau à leur surface. La réalisation de ces derniers a été obtenue soit par lithographie conventionnelle, avec un pas fixe, soit par lithographie électronique pour ajuster le pas. Le réseau est ensuite transféré dans le semiconducteur, selon différentes profondeurs, par gravure ionique réactive (Fig.6).

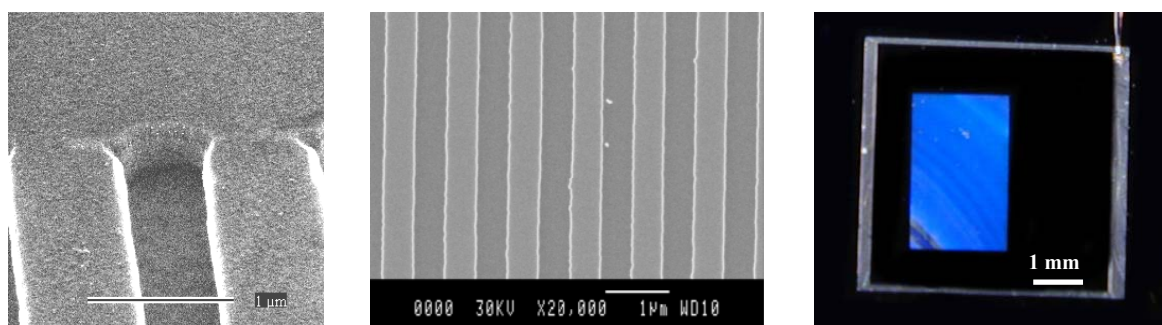


Fig.6 : Vues détaillées et générales de réseaux gravés à la surface de photodiodes.

Les composants sont soumis à une caractérisation sous pointes pendant leur réalisation et révèlent des caractéristiques de photodétection (sensibilité, courant d'obscurité) inchangées par la gravure du réseau, ce qui confirme la compatibilité de cette étape avec le reste du procédé. Leur caractérisation en tant que capteur intégré de déphasage optique est menée sur un banc simulant le fonctionnement du capteur de déplacement considéré initialement (Fig.7).

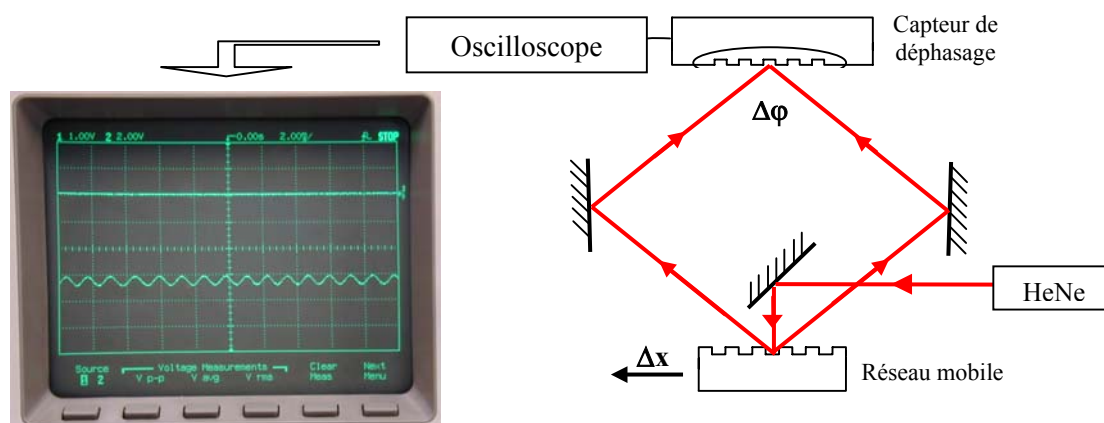


Fig.7 : Banc de caractérisation des capteurs de déphasage et exemple d'un signal obtenu.

Tout déplacement  $\Delta x$  du réseau mobile engendre un déphasage  $\Delta\phi$  entre les faisceaux diffractés en direction de deux miroirs orientables. Ces faisceaux sont alors dirigés vers la surface du capteur à caractériser. La variation de la puissance optique prédite théoriquement est confirmée par la variation du photocourant délivré par le composant. Dans le cas représenté sur la figure 7, la ligne horizontale supérieure apparaissant sur l'écran de l'oscilloscope indique le courant d'obscurité. Le signal recueilli varie sinusoidalement en fonction du déplacement  $\Delta x$  et il présente un contraste voisin de 6%. Le test de différentes structures a révélé un très bon accord entre les résultats théoriques et expérimentaux,

validant ainsi le principe de ce capteur de déphasage particulièrement innovant basé sur l'association monolithique de fonctions optiques et photodétectrices selon un procédé compatible avec la technologie CMOS.

En résumé, cette première approche d'intégration photonique explorée dans le cadre de la miniaturisation du capteur optique de déplacement nous a conduits à :

- montrer que l'association monolithique de fonctions photodétectrices et électroniques, par la mise en œuvre d'une technologie CMOS de fonderie, permet l'élaboration d'opto-ASIC dont les performances sont compatibles avec le cahier des charges de nombreux microsystèmes optiques ;
- proposer et valider un nouveau concept de capteur monolithique de déphasage optique associant les fonctions de mise en interférence et de photodétection et dont la réalisation fait appel à des procédés compatibles avec une technologie CMOS. De plus, par sa fonctionnalité et son caractère générique, ce dispositif présente l'intérêt de pouvoir être inséré dans une grande variété de capteurs basés sur la mesure d'un déphasage optique ;
- ouvrir la voie à l'association monolithique de fonctions optiques, photodétectrices et électroniques, accessible par une technologie compatible CMOS et permettant d'envisager une nouvelle génération de capteurs intégrés « intelligents » directement insérables dans des microsystèmes optiques.

### 3.3 Intégration photonique planaire

Il s'agit ici du deuxième type d'approches exploré dans le cadre de l'intégration photonique. L'incorporation de cristaux photoniques dans les structures des diodes laser est une voie prometteuse pour la réalisation de sources miniatures directement intégrables dans des circuits photoniques planaires. Cependant, si le concept de dispositif « tout cristal photonique » ouvre de nombreux axes d'étude de modélisation et de conception s'appuyant sur des outils logiciels spécifiques, la mise au point de procédés de fabrication appropriés exige d'utiliser, à leurs limites, les moyens technologiques actuellement disponibles. Dans ce cadre, l'objectif de notre approche est d'étudier et de mettre en place les outils nécessaires au développement de sources laser GaAlAs/GaAs incorporant un miroir à cristal photonique unidimensionnel, brique élémentaire de structures plus élaborées.

#### 3.3.1 Le choix de la structure

Bien que potentiellement capables de confiner la lumière selon les trois dimensions, les cristaux photoniques tridimensionnels sont particulièrement difficiles à mettre en œuvre par les techniques actuelles et leur étude reste marginale. La plupart des recherches sont alors menées sur des structures bidimensionnelles ou unidimensionnelles, le confinement selon la troisième dimension étant procuré par une structure multicouche pouvant se réduire à une membrane dans sa configuration ultime.

La mise en œuvre d'une membrane, par le fort confinement vertical qu'elle engendre, est largement étudiée pour la réalisation de sources laser à émission par la surface [7]-[9]. Cependant, la plupart des dispositifs fonctionnent en pompage optique et en régime pulsé en raison des problèmes d'injection électrique et de dissipation thermique propres à ces structures. Les composants basés sur un empilement multicouche, quant à eux, bénéficient des conditions d'injection électrique communes aux diodes laser conventionnelles, ce qui leur confère un avantage certain pour leur intégration dans un circuit photonique planaire. Nous avons donc choisi de considérer ce dernier type de structures et d'étudier le principe de diode laser à cristal photonique le plus simple : le guidage latéral est procuré par un ruban nervuré, les extrémités de la cavité optique sont constituées par une face clivée et par un miroir à cristal photonique unidimensionnel, et l'émission s'effectue par la tranche (Fig.8).



Fig.8 : Diode laser à ruban nervuré utilisant un miroir à cristal photonique 1D.

La structure multicouche considérée est une structure GRIN-SCH à puits quantique de la filière GaAlAs/GaAs présentant une zone de confinement graduel d'une épaisseur totale de 350 nm au centre de laquelle se trouve un puits quantique de 8 nm d'épaisseur. Le guide ruban gravé en surface présente une largeur de 4  $\mu\text{m}$  et son pied est séparé de la limite supérieure de la gradualité par une distance  $d$  (Fig.9). Cette distance et la largeur du ruban déterminent le confinement latéral du guide optique. En considérant les indices effectifs des zones situées sous le ruban et à côté de celui-ci, il apparaît qu'un fonctionnement monomode latéral au voisinage de 850 nm est obtenu pour des valeurs de  $d$  comprises entre 50 et 150 nm environ. D'autre part, les motifs du miroir étant gravés à partir du pied du ruban (Fig.8), la profondeur de gravure nécessaire à leur réalisation est ainsi limitée à environ 1  $\mu\text{m}$  au lieu de 2,7  $\mu\text{m}$ . Cette propriété rend leur fabrication compatible avec les conditions propres aux bâtis conventionnels de gravure ionique réactive, sans nécessiter la mise en œuvre d'équipements de gravure profonde à plasma dense. Pour la suite des travaux, une valeur de  $d$  voisine de 100 nm a donc été retenue.

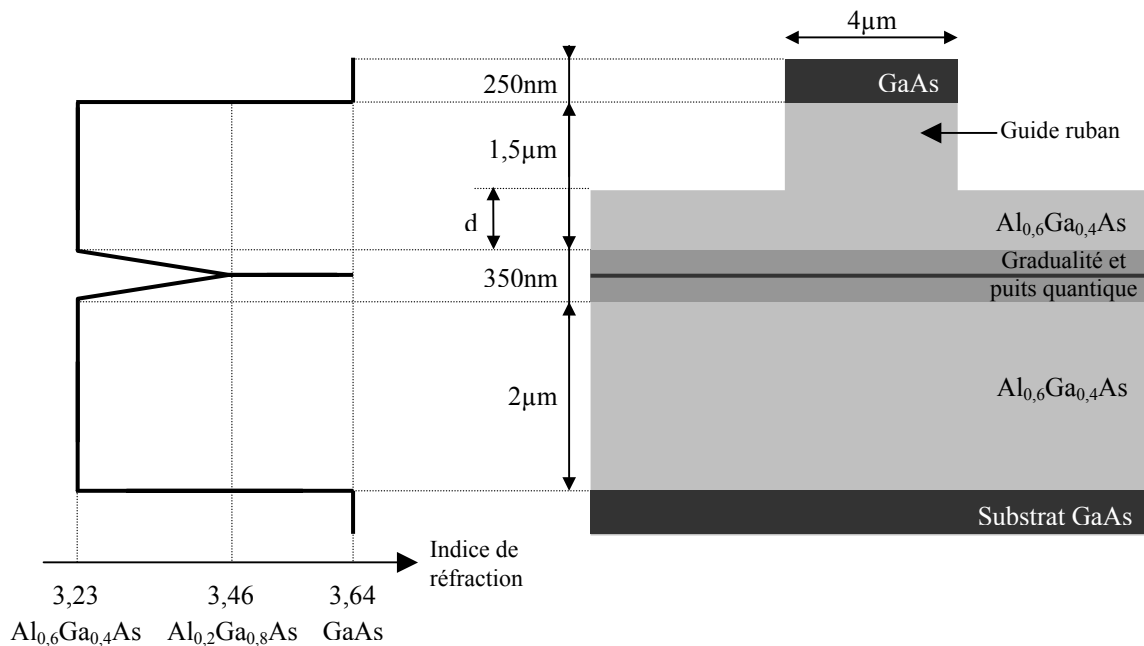


Fig.9 : Principales caractéristiques de la structure multicouche considérée pour la réalisation de la diode laser.

Enfin, la résolution de la condition d'oscillation dans la cavité laser a permis de déterminer la valeur nécessaire de la réflectivité à ses extrémités en fonction de la longueur de celle-ci. Pour un gain modal en intensité de 40  $\text{cm}^{-1}$ , caractéristique du type de structures considéré, et pour une réflectivité de la face clivée égale à 30%, une longueur de cavité égale à 200  $\mu\text{m}$  est accessible avec une réflectivité du miroir 1D égale à 70%, tandis qu'une longueur de 150  $\mu\text{m}$  nécessite une réflectivité proche de 100%. Nous avons alors étudié la sensibilité de la réflectivité du miroir à ses caractéristiques géométriques afin d'optimiser le profil de ses motifs pour la réalisation de la diode laser envisagée. Cette étude fait appel à une modélisation de la structure pour laquelle les gammes de paramètres géométriques sont établies en tenant compte des contraintes technologiques liées aux équipements et à l'enchaînement complet du procédé de réalisation.

### 3.3.2 Modélisation d'un miroir à cristal photonique unidimensionnel

Nos travaux de modélisation concernent la réflectivité et les pertes du miroir à cristal photonique unidimensionnel placé à l'extrémité de la cavité laser qui vient d'être présentée. En raison du faible confinement latéral procuré par le ruban ( $\Delta n \approx 10^{-2}$ ), la modélisation de la structure est menée en s'appuyant uniquement sur une coupe longitudinale 2D représentée sur la figure 10. De plus, dans le cas particulier où les phénomènes de diffraction hors du plan de la couche graduelle sont négligeables, la modélisation du miroir peut se résumer à celle d'un empilement de couches 1D et peut être abordée par la méthode des matrices de transfert. Toutefois, dans le cas général, la prise en compte de ces phénomènes de diffraction fait appel à la modélisation 2D et à des calculs numériques par la méthode FDTD déjà mise en œuvre pour la modélisation du capteur de déphasage.

Le miroir est constitué d'un réseau de fentes de largeur  $L_f$ , de période  $\Lambda$  et de profondeur  $p$ . Pour déterminer la réflectivité du miroir, l'intensité du faisceau réfléchi est mesurée suffisamment loin de celui-ci (environ  $10\ \mu\text{m}$ ) afin de permettre une large séparation entre le faisceau considéré et d'éventuels faisceaux diffractés.

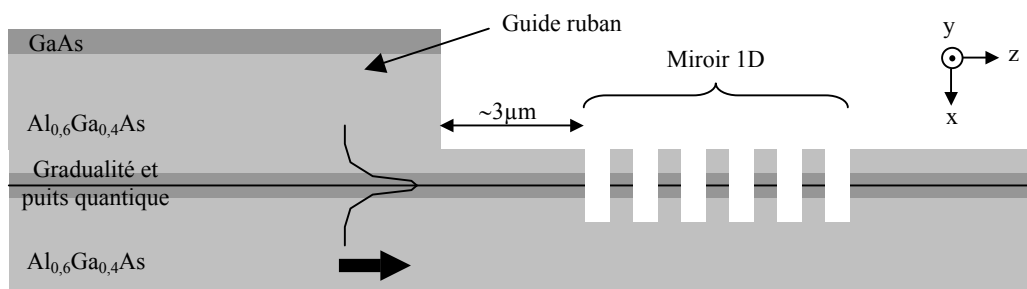


Fig.10 : Coupe longitudinale 2D de la structure modélisée.

Contrairement aux réflecteurs distribués étudiés précédemment dans le cadre des diodes laser DBR à émission surfacique, le miroir actuel présente un fort contraste d'indice qui engendre une réflectivité élevée sur une courte distance (quelques périodes) mais avec une faible sélectivité spectrale.

La modélisation du miroir à cristal photonique 1D a concerné l'ensemble de ses caractéristiques géométriques. Une attention particulière a porté sur les tolérances des performances à des paramètres dont le contrôle technologique est difficile.

### 3.3.3 Principaux résultats de modélisation

La modélisation porte sur un miroir du troisième ordre dont la valeur du pas permet la gravure de fentes profondes et favorise la solidité des lamelles verticales formant le réflecteur. L'influence de la largeur et de la profondeur des fentes sur la réflectivité du miroir est alors étudiée.

#### a) Influence de la largeur des fentes

Cette étude est menée en considérant des fentes de profondeur infinie. La largeur des fentes a une influence considérable sur le niveau de pertes du miroir, ces pertes étant dues essentiellement à la diffraction subie par le rayonnement lorsqu'il émerge du guide optique.

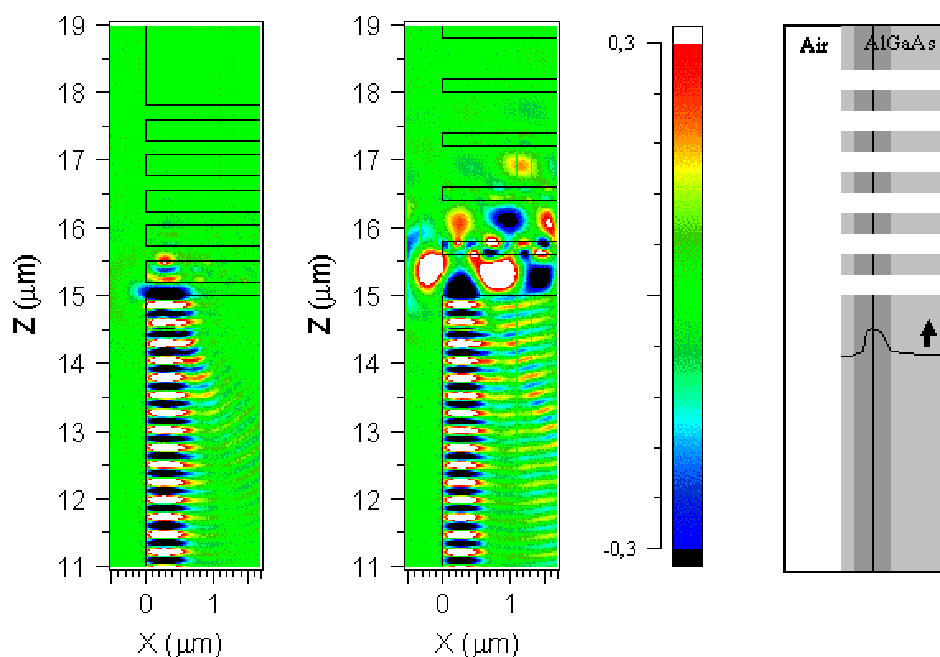


Fig.11 : Répartition du champ électrique pour un miroir à la longueur d'onde de 850 nm caractérisé par des largeurs de fentes de 200 nm (à gauche) et de 600 nm (à droite).

La figure 11 illustre le phénomène pour des miroirs caractérisés par des largeurs de fentes égales à 200 nm et 600 nm et pour des valeurs de pas égales respectivement à 520 nm et 800 nm procurant une réflectivité optimale à 850 nm. On observe que des fentes larges, en permettant un étalement plus important du front d'onde au cours de leur traversée, augmente le niveau des pertes engendrées par le phénomène de diffraction. Afin de minimiser ces pertes, on veillera donc à réaliser des fentes étroites et, pour la suite de l'étude, seules des largeurs de fentes comprises entre 100 et 300 nm ont été considérées.

### b) Influence de la profondeur des fentes

L'influence de la profondeur des fentes sur la réflectivité du miroir est étudiée dans le cas d'une structure présentant une largeur de fente de 150 nm se traduisant par un pas de 480 nm. Le calcul des coefficients de réflexion, de transmission et de diffraction vers la surface et vers le substrat a conduit aux résultats présentés sur la figure 12. Le coefficient de réflexion est très largement dominant sur toute la gamme de profondeurs étudiée. Il se stabilise au voisinage de sa valeur maximum pour des profondeurs de fentes supérieures à 700 nm, correspondant ici à un rapport de forme supérieur ou égal à 5. De tels miroirs sont très exigeants quant à leur réalisation et ils ont nécessité une étude de la tolérance de leur réflectivité à des dérives géométriques dues à la technologie.

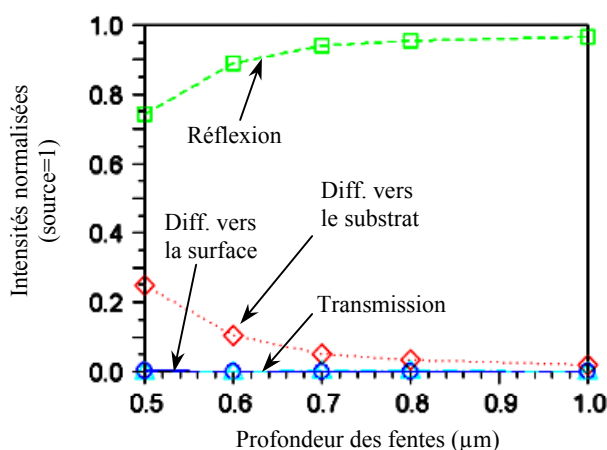


Fig.12 : Variations des coefficients de réflexion, transmission et diffraction en fonction de la profondeur des fentes du miroir 1D.

### c) Tolérance aux dérives géométriques

Les principales dérives géométriques engendrées par le procédé de fabrication concernent le pas du miroir, la largeur des fentes et la verticalité de leurs flancs. Pour une profondeur des fentes égale à 1 µm, l'étude de la sensibilité de la réflectivité à la variation de ces paramètres montre que :

- la tolérance sur la valeur du pas est d'environ  $\pm 40$  nm, en considérant un rapport d'ouverture constant. Sur cette plage de variations, la réflectivité reste supérieure à 95% ;
- en considérant un pas constant, la tolérance sur la largeur des fentes est également de  $\pm 40$  nm pour conserver une réflectivité supérieure à 95% ;
- la tolérance sur la verticalité des flancs est de  $\pm 1,5^\circ$  pour maintenir une réflectivité supérieure à 90%. Cependant, cette tolérance est modulée par la largeur correspondante des fentes au niveau du puits quantique qui constitue un paramètre plus sensible.

En résumé, les modélisations de miroirs à cristaux photoniques 1D montrent qu'il existe une gamme de paramètres compatibles avec la fabrication de miroirs à forte réflectivité à l'extrémité de cavités laser à ruban nervuré selon la configuration indiquée précédemment. Les cristaux photoniques 1D peuvent atteindre des réflectivités supérieures à 90% avec des structures dont la longueur est inférieure à 3 µm. Pour atteindre ces performances, le cristal photonique doit respecter une géométrie permettant de minimiser les pertes dues à la diffraction ou à la réflexion d'une partie du faisceau hors du plan de la couche graduelle. Les fentes du réseau doivent ainsi traverser cette couche et se prolonger de plusieurs centaines de nanomètres au-delà. Des profondeurs supérieures ou égales à 700 nm permettent de réduire l'interaction du faisceau avec le fond des fentes. La diffraction dans l'air qui se produit lorsque le

faisceau traverse les fentes est réduite à quelques % seulement si la largeur des fentes est inférieure à 200 nm. Les pertes du miroir sont également sensibles à l'inclinaison des flancs. Dans ce cas, la réflectivité décroît plus rapidement lorsque la largeur des fentes au niveau de la couche active s'écarte de la valeur optimale. Un miroir d'ordre 3 procure des lamelles de semiconducteur suffisamment épaisses (~300 nm) pour autoriser leur fabrication. Enfin, la réalisation du miroir au pied du guide ruban entraîne des pertes par diffraction qui restent de l'ordre de quelques % lorsque l'épaisseur de la couche d'AlGaAs présente au-dessus de la couche graduelle est égale à une centaine de nanomètres. Dans ces conditions, la structure considérée pour l'étape de fabrication comportera un miroir du troisième ordre dont les paramètres visés sont :  $L_f = 200$  nm,  $\Lambda = 520$  nm et  $p = 1$   $\mu$ m.

### 3.3.4 Procédé de fabrication de diodes laser comportant un miroir à cristal photonique 1D

Le procédé de fabrication développé dans le cadre de cette étude concerne une diode laser à pompage électrique et à émission par la face clivée. La structure multicouche utilisée est celle qui a été présentée précédemment. Elle comporte un guide à ruban nervuré de 4  $\mu$ m de large et dont la longueur peut être choisie entre 150 et 300  $\mu$ m. L'injection électrique se fait par le sommet de ce ruban au moyen d'un contact métallique isolé du reste de la structure par une couche de BCB (benzo-cyclo-butène). Le miroir à cristal photonique débute à quelques microns du pied du guide ruban, il est constitué de 5 à 10 périodes et il s'étend latéralement sur plus de 10  $\mu$ m afin d'agir sur la totalité du mode fondamental issu de la zone de gain de la structure (Fig.13).

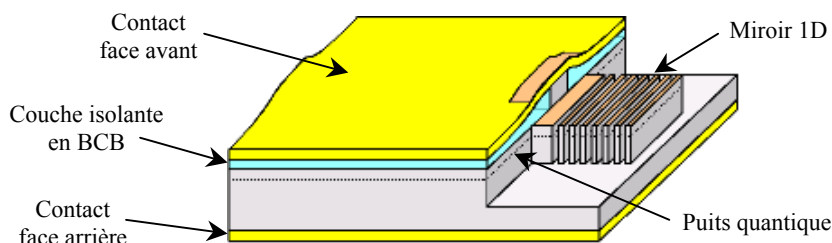


Fig.13 : Schéma de la diode laser à réaliser.

L'élaboration du composant a nécessité des études spécifiques organisées en deux phases principales : la mise au point du procédé de réalisation du miroir à cristal photonique, puis l'inclusion et l'adaptation de cette étape technologique au sein du procédé complet d'élaboration de la diode laser. Ces deux phases sont décrites dans les sections suivantes.

#### a) Réalisation du miroir à cristal photonique unidimensionnel

Le dessin du miroir à la surface du semiconducteur est obtenu par lithographie électronique mettant en œuvre un microscope électronique instrumenté pour l'écriture. Cet équipement permet la réalisation de la structure visée avec une précision d'environ 15 nm sur la largeur des motifs. La définition de la structure débute par la lithographie d'une couche de résine PMMA utilisée pour la réalisation d'un masque secondaire de gravure en nickel. Ce dernier présente une excellente sélectivité par rapport au matériau GaAlAs et il est couramment utilisé dans ce type de procédés. La dimension des motifs impose de prendre en compte les effets de proximité pour leur écriture. En particulier, la dose d'électrons, la largeur des lignes insolées et le temps de révélation doivent être ajustés de manière à obtenir en fin de procédé des fentes de 200 nm de large. D'autre part, les conditions de métallisation et de gravure sont elles aussi susceptibles d'influer sur la largeur finale des fentes, et un étalonnage tenant compte de l'ensemble de ces étapes doit donc être effectué pour obtenir les dimensions visées dans le respect des tolérances qui leur sont associées. La gravure du miroir est réalisée à base de  $\text{SiCl}_4$  dans un bâti de gravure ionique réactive dédié au matériau GaAlAs. Le résultat obtenu sur une structure de test est présenté sur la figure 14. On observe des fentes dont la profondeur est supérieure à 1  $\mu$ m, ce qui est largement suffisant dans le cadre de la réalisation de la diode laser envisagée. Les flancs de gravure sont de très bonne qualité avec une verticalité quasi-parfaite. Toutefois, la partie supérieure des motifs présente une allure biseautée sur une hauteur d'environ 300 nm. Ce profil pourrait provenir de la variation du taux d'aluminium à l'intérieur de la couche graduelle modifiant localement les conditions de gravure, ou du bombardement ionique induisant un effet de facette sur les arêtes. Pour remédier à cet

inconvenient, on pourrait tirer profit de la profondeur atteinte pour débiter la réalisation du miroir à partir d'une surface légèrement plus éloignée de la couche graduelle que le pied du ruban. Le profil biseauté se trouverait alors au-dessus de la zone efficace du miroir et ne dégraderait pas sa réflectivité.

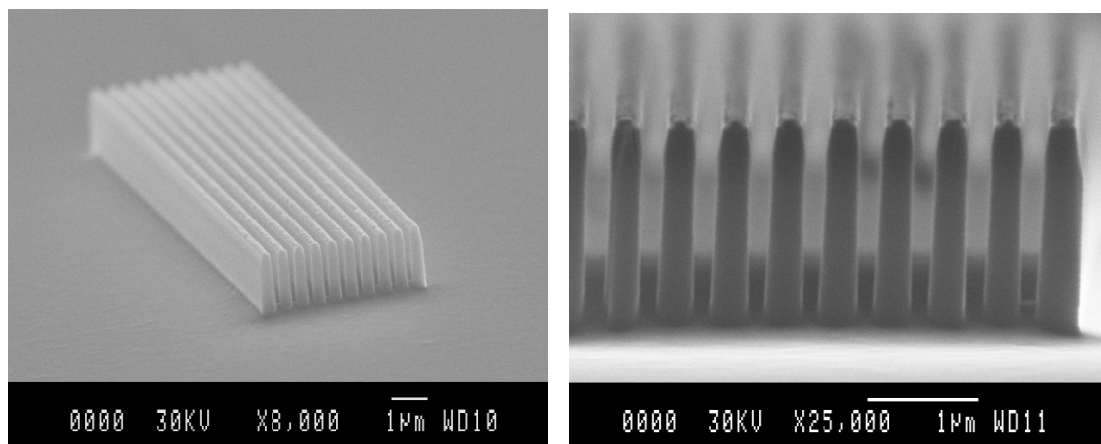


Fig.14 : Photographies d'une structure de test à l'issue de l'étape de gravure ionique réactive.

### b) Procédé complet d'élaboration de la diode laser

Le procédé d'élaboration de la diode laser débute par la photolithographie conventionnelle des rubans. La réalisation des guides est ensuite obtenue par une gravure ionique réactive à base de  $\text{SiCl}_4$ , et la profondeur de cette gravure est contrôlée au moyen d'un dispositif interférométrique.

Une couche de BCB est déposée sur toute la surface de l'échantillon et elle est réticulée par un recuit. Le procédé de dépôt conduit à une épaisseur de BCB environ trois fois plus faible au sommet du ruban qu'au niveau de la surface qui l'entoure. On met à profit cette différence d'épaisseur au cours d'une première gravure ionique réactive uniforme de la couche de BCB utilisant un mélange  $\text{CF}_4/\text{O}_2$ . Cette gravure permet de mettre à nu le sommet du ruban tout en préservant une couche isolante d'une épaisseur de plusieurs centaines de nanomètres partout ailleurs. La zone de dépôt de métal est alors définie par une nouvelle photolithographie conventionnelle, la couche métallique de contact est déposée par évaporation suivie d'une étape de lift-off.

Afin de réaliser le miroir, la zone située en bout du guide ruban est dégagée de la couche de BCB qui la recouvre par une gravure ionique réactive utilisant un mélange  $\text{CHF}_3/\text{O}_2$ . Pour cette étape, la couche métallique est protégée par une résine ayant subi une photolithographie selon le même masque que précédemment. La fabrication du miroir peut alors intervenir selon le procédé déjà décrit, avec une contrainte supplémentaire due à son orientation. Cette dernière est effectuée par une observation avant écriture, en imagerie MEB, de l'extrémité du ruban et de la limite du contact métallique. Le résultat obtenu à l'issue de la gravure du miroir est indiqué sur la figure 15.

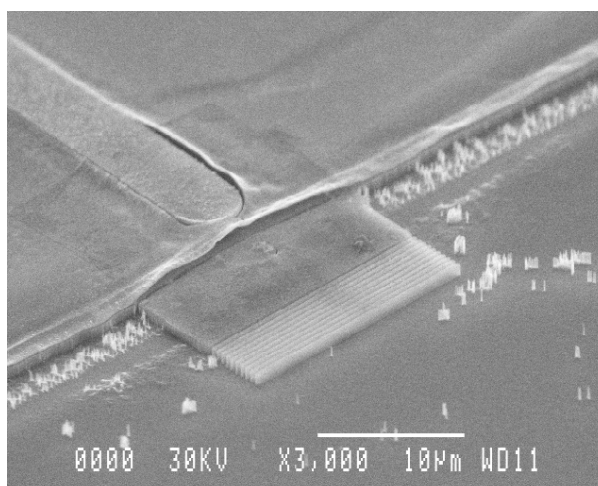


Fig.15 : Photographie de l'extrémité d'une diode laser comportant un miroir à cristal photonique 1D.

La fin du procédé est un enchaînement classique. Il consiste à amincir l'échantillon jusqu'à une épaisseur de 100  $\mu\text{m}$ , le métalliser sur sa face arrière, recuire les contacts, le cliver à la longueur visée et le monter sur un support permettant une utilisation aisée.

### **3.4 Conclusion**

Ces travaux ont permis d'explorer deux types d'approches d'intégration photonique dans les microsystèmes. Dans un premier temps, en prenant comme support d'étude la miniaturisation d'un capteur de déplacement, nous avons exploité des possibilités d'une technologie compatible CMOS pour proposer une voie générique d'intégration multifonctionnelle dans un microsystème optique. Dans un deuxième temps, nous avons étudié les propriétés de cristaux photoniques dans la perspective du développement de nouveaux composants intégrables dans des circuits photoniques planaires.

Concernant le premier type d'approches, une étude pas à pas a permis de démontrer qu'une technologie CMOS standard, proposée en fonderie, permettait l'association monolithique de photodétecteurs et de circuits électroniques de conditionnement et traitement du signal selon une configuration compatible avec l'intégration dans un microsystème optique. Les caractérisations des opto-ASIC ont de plus mis en évidence des performances autorisant leur utilisation dans une variété de microsystèmes débordant largement du cadre du capteur de déplacement ayant servi de support à l'étude.

Dans la perspective d'une nouvelle étape d'intégration, nous avons proposé un composant original intégrant les fonctions de mise en interférence et de photodétection. Une simulation du comportement électromagnétique par méthode FDTD a confirmé l'existence, à l'intérieur même du dispositif, d'un signal alternatif lié au déphasage des ondes incidentes à sa surface. Un procédé complet de réalisation de ce nouveau composant a été établi et les résultats expérimentaux issus de sa caractérisation ont confirmé la validité du concept original sur lequel il est fondé. Une étude de la sensibilité du dispositif aux différents paramètres structuraux et aux conditions de fonctionnement montre qu'une optimisation de ces paramètres permettrait d'atteindre des contrastes de l'ordre de 20%. Outre ses qualités de compacité et de robustesse, ce composant offre une fonctionnalité jusqu'alors jamais exploitée et qui mériterait d'être développée dans le cadre de microsystèmes interférométriques ou de dispositifs de contrôle de phase. D'autre part, la compatibilité de la fabrication de ce type de détecteurs avec la technologie CMOS mise en œuvre précédemment permet désormais d'envisager la réalisation de structures optiques intégrées « intelligentes » associant, de façon monolithique, des fonctions optiques de type diffractif interférométrique, des fonctions photodétectrices et des fonctions électroniques de conditionnement du signal, de traitement ou de commande.

Le deuxième type d'approches a concerné l'étude d'une cavité de diode laser originale, guidée latéralement par un ruban nervuré et limitée à une extrémité par un miroir à cristal photonique unidimensionnel. Hormis le pompage électrique, un avantage de la structure réside dans le choix d'un miroir gravé à partir d'un plan inférieur au sommet du ruban, limitant ainsi la profondeur de gravure à moins d'un micron, contrairement aux réalisations de la littérature qui nécessitent des profondeurs largement supérieures par une gravure de l'ensemble de l'empilement des couches. Malgré la simplicité de sa structure, l'incorporation d'un tel miroir dans une diode laser a conduit à mener des études spécifiques de conception et de faisabilité technologique qui ont constitué, pour notre équipe, une introduction à de nouvelles générations de sources laser à base de cristaux photoniques. Une étude théorique rigoureuse, reposant sur une analyse FDTD des phénomènes de propagation, a permis d'établir les conditions requises pour atteindre des réflectivités supérieures à 90% tout en limitant les pertes par diffraction au passage dans les fentes et les pertes de couplage à l'interface ruban/miroir. La prise en compte des contraintes technologiques associées, d'une part, aux limites de maîtrise de gravure de motifs à fort rapport d'aspect et à période submicronique et, d'autre part, aux pertes de couplage entre le ruban actif et le miroir, confirme l'intérêt de ce type de structure pour obtenir des réflectivités qui restent généralement supérieures à 80%. La faisabilité technologique est par ailleurs démontrée sur des structures périodiques au troisième ordre, le procédé complet d'élaboration étant mis au point sur un empilement caractéristique de couches de diodes laser à puits quantique émettant au voisinage de 850 nm. Au-delà de la configuration proposée, des configurations de cavité plus complexes peuvent être désormais envisagées à partir des résultats de cette étude : cavité délimitée par 2 miroirs à cristaux photoniques unidimensionnels (ou bidimensionnels), combinaison de périodes différentes entre les deux miroirs pour ajuster les performances spectrales, variation de la période ou conception spécifique du



miroir pour agir sur la mise en forme du faisceau,... Par ailleurs, l'apport de miroirs de haute réflectivité autorise l'intégration de microcavités "horizontales" avec divers éléments actifs ou passifs, ouvrant ainsi la voie à des circuits photoniques planaires denses.

**Références :**

- [1] B. Horwith ; Laser Focus World ; pp.143-148 (1996)
- [2] Y. Jourlin ; Thèse de doctorat ; Université de Saint-Etienne (2000)
- [3] Y. Jourlin et al. ; Precision Engineering ; vol.26 ; pp.1-6 (2002)
- [4] P.B. Denyer et al. ; Proc. SPIE ; vol.2415 ; pp.285-291 (1995)
- [5] E.R. Fossum ; IEEE Trans. on Electron Devices ; vol.44(10) ; pp.1689-1698 (1997)
- [6] Y. Jourlin et al. ; Optical Engineering ; vol.40 ; pp.1464-1470 (2001)
- [7] H. Benisty et al. ; Applied Surface Science ; vol.164 ; pp.205-218 (2000)
- [8] J. Hwang et al. ; Appl. Phys. Lett. ; vol.76(21) ; pp.2982-2984 (2000)
- [9] C. Monat et al. ; Electron. Lett. ; vol.37(12) ; pp.764-766 (2001)

## 4. Conclusion et Perspectives de recherche

Depuis mon arrivée dans le groupe « Photonique » du LAAS-CNRS, en 1992, j'ai progressivement orienté mes activités de recherche vers le vaste domaine de l'intégration photonique. Les réflecteurs distribués des diodes laser sur lesquelles ont débuté mes travaux de modélisation, d'élaboration et de caractérisation, ont constitué un premier pas vers une brique de base de ce type d'intégration. Ainsi, bien que l'objectif d'alors était essentiellement d'établir les critères de conception et les limites de performance du composant, sa structure le prédisposait à l'intégration dans un système photonique et des premières réalisations dans ce sens étaient reportées dans la littérature. Elles concernaient en particulier des matrices linéaires ou bidimensionnelles de ce type d'émetteurs exploitant différents types de couplage entre eux. L'amélioration des performances de la diode laser apportée par la structure à réseau de Bragg a connu une nouvelle avancée, associée à un élargissement de ses fonctionnalités, par l'incorporation du composant dans une cavité étendue. Le principe de cette cavité a pu être établi en tirant profit des propriétés du réseau de diffraction du deuxième ordre pour coupler et découpler la lumière entre la zone active du composant et un miroir externe ajustable. L'ensemble de l'étude théorique réalisée jusqu'alors a permis de développer un modèle global d'analyse du comportement de la source laser. Ce modèle complet a été mis en œuvre tant comme outil de simulation que de conception, induisant une approche « système » des structures abordées. La microsource réalisée à l'issue de ces travaux reposait sur l'association hybride de deux éléments issus de filières technologiques différentes, la filière III/V et la filière silicium, ce qui constituait une nouveauté pour notre équipe de recherche et un pas décisif pour mes travaux vers l'intégration photonique dans les microsystèmes. Le silicium, candidat incontournable pour la réalisation de microsystèmes grâce à la maîtrise de sa technologie et aux larges possibilités qu'elle offre, est alors devenu un support important de mes études. Celles-ci se sont appuyées sur la miniaturisation d'un capteur optique de déplacement pour explorer une approche d'intégration multifonctionnelle monolithique sur silicium. Dans le cadre de ces travaux, nous avons associé, deux à deux, des fonctions de natures différentes au sein d'une même puce de silicium, montrant ainsi que la réalisation de microsystèmes optiques « intelligents » intégrant à la fois des fonctions optiques, des fonctions photodétectrices et des fonctions électroniques de traitement ou de commande était envisageable par la mise en œuvre d'une technologie compatible CMOS autorisant des productions collectives à faible coût. Enfin, pour répondre à l'accroissement des besoins en capacité d'intégration élevée, je me suis impliqué dans des travaux visant à explorer les possibilités offertes par les structures à cristaux photoniques unidimensionnels pour l'élaboration d'une diode laser miniature. Une étude théorique rigoureuse a permis de définir la valeur des principaux paramètres autorisant l'élaboration d'un composant particulièrement bien adapté à l'intégration photonique planaire.

Les travaux que j'ai menés jusqu'à aujourd'hui, tant sur le plan théorique que technologique, m'ont permis d'explorer différentes approches de la réalisation de fonctions optiques ou optoélectroniques compactes sur puce. Cette problématique très vaste a concerné l'intégration de composants optiques passifs (réseaux, miroirs), de composants optiques actifs (sources, détecteurs) d'éléments mécaniques (bras de torsion, membranes) et de circuits électroniques de commande ou de traitement du signal (soustracteurs, convertisseurs, compteurs, interpolateurs,...). Elle reflète la problématique générale de l'intégration de fonctions optiques dans les microsystèmes pour laquelle la diversité des filières technologiques, des dimensions, des géométries,... pose de façon accrue le problème de la compatibilité des procédés d'élaboration.

Dans ce contexte, et pour les années à venir, j'envisage de poursuivre mon investissement sur la voie de l'intégration photonique en m'appuyant sur une conception « système » tirant profit, autant que possible, de technologies compatibles CMOS. Cette approche a montré, dans nos derniers travaux, qu'on pouvait attendre des progrès significatifs dans le domaine de l'association monolithique de diverses fonctions sur silicium. Toutefois, l'élaboration de circuits intégrés photoniques suppose encore des avancées importantes vers des principes génériques d'intégration qui doivent être étudiés. L'exploitation des propriétés des structures à cristaux photoniques apparaît comme une approche particulièrement bien adaptée dans cette voie en permettant notamment de développer l'ingénierie de composants et de fonctions optiques à structure planaire « tout cristal photonique ». Enfin, le verrou de l'intégration monolithique de la source lumineuse sur silicium constitue un défi qui devra être relevé pour ouvrir de très larges perspectives de développement aux microsystèmes optiques.

Parmi les nombreux axes de recherche relatifs à la problématique de l'intégration photonique, je souhaite m'investir dans les travaux de notre équipe selon deux voies présentant des caractères complémentaires :

- l'intégration planaire de fonctions émettrices selon des structures génériques tirant profit des propriétés des cristaux photoniques ;
- l'intégration de fonctions détectrices et optiques mettant en œuvre des cristaux photoniques ou des structures accordables, ces deux types d'éléments pouvant éventuellement être associés.

Il s'agit là de domaines qui restent encore étendus et au sein desquels je souhaite focaliser et organiser les recherches selon un plan de travail courant sur plusieurs années et dont les principaux résultats attendus sont décrits ci-dessous. Les possibilités offertes par la qualité des équipements de la nouvelle centrale de technologie du laboratoire seront largement mises à profit dans le cadre de ces travaux.

- A court terme

**Emetteur pour intégration planaire :** Le verrou de l'intégration de l'émetteur de lumière dans les microsystèmes optiques n'a pu être surmonté jusqu'à présent que par des techniques d'hybridation bénéficiant de tout le savoir faire du report sur silicium. L'approche d'intégration que nous avons explorée dernièrement par l'élaboration d'une diode laser incorporant un miroir à cristal photonique unidimensionnel me paraît actuellement la voie la plus prometteuse dans le domaine. En effet, par sa cavité horizontale, cette source se prête particulièrement bien à l'intégration planaire, et le pompage électrique prend toute son importance dans cette perspective. Toutefois, le fonctionnement du dispositif selon des performances d'intérêt pratique doit être démontré et il s'agit là du premier objectif de ces travaux. Ainsi, nous reprendrons la réalisation de diodes laser à cristaux photoniques unidimensionnels, alors interrompue par une défaillance d'équipement technologique, afin de caractériser leurs performances. Nous attacherons une importance particulière au rendement d'émission du composant qui constitue un paramètre déterminant pour son intégration dans un microsystème optique. La technique de réalisation du dispositif fera notamment appel au nouvel équipement de lithographie électronique dont le laboratoire s'est équipé. La manipulation de cet équipement pourra directement être assurée par deux membres permanents de notre équipe ayant déjà suivi la formation spécifique requise.

**Détecteur intégré de déphasage optique :** L'intégration monolithique d'une fonction optique de mise en interférence et d'une fonction détectrice a été démontrée dans nos derniers travaux. Une étude de la sensibilité du dispositif aux paramètres du réseau montre que, dans la configuration actuelle, il peut délivrer des signaux présentant un contraste maximum de 20%. Bien que de tels signaux puissent être traités par des circuits électroniques adaptés, leur contraste est très éloigné de ceux des systèmes conventionnels qui sont généralement voisins de 100%. Néanmoins, de récents résultats théoriques nous laissent penser que cet écart peut être comblé de façon significative par une optimisation de l'élément optique, en jouant notamment sur son profil ou sur la nature du matériau qui le compose. Je souhaite donc relancer une étude rigoureuse, s'appuyant sur la méthode numérique FDTD déjà mise en œuvre, des phénomènes engendrés par des structures nouvelles afin de dégager les critères de conception de dispositifs performants. Ces critères seront sélectionnés en fonction de la technologie qu'ils imposent. En se basant alors sur un procédé technologique compatible CMOS, des dispositifs optimisés seront élaborés et caractérisés avec pour objectif d'apporter la démonstration expérimentale d'un détecteur monolithique de déphasage optique, à fort contraste et à faible coût.

- A moyen terme

**Source laser miniature pour intégration planaire dense :** Des microsystèmes optiques compacts, robustes et bon marché, travaillant dans le rouge ou le très proche infrarouge intéresseraient de nombreux domaines d'applications. Cependant, la mise en œuvre de procédés d'intégration planaire nécessaires à leur élaboration suppose la maîtrise des propriétés des structures à cristaux photoniques et celles de procédés génériques de réalisation. Afin de progresser dans cette voie, j'envisage deux types d'approches prenant appui sur les expériences récentes de notre équipe de recherche :

- Dans la poursuite des travaux sur la diode laser à miroir à cristal photonique unidimensionnel, je souhaite étudier les possibilités d'améliorer ses performances par l'introduction de structures nouvelles compatibles avec une intégration planaire. L'apport d'un réflecteur de Bragg, en remplacement de la face clivée du composant, sera analysé en terme de performances spectrales, de rendement et

d'encombrement. Par l'ajustement de ses paramètres géométriques, on cherchera le meilleur compromis pour favoriser à la fois son intégration et les performances du dispositif. Une deuxième voie d'amélioration concernera le contrôle de la phase au sein de la cavité laser. En effet, dans le but de lutter contre les instabilités modales accompagnant fréquemment les variations de puissance optique, je souhaite étudier l'intérêt d'une structure à multi-électrode. Ce type de dispositifs permettrait ainsi, par simple ajustement des courants de polarisation, un contrôle du mode oscillant et, éventuellement, une légère accordabilité, ce qui constituerait un progrès significatif par rapport aux performances du premier composant étudié.

- Dans le domaine des longueurs d'onde des télécommunications optiques, plusieurs membres de notre équipe s'investissent depuis plus de deux ans, en collaboration avec des partenaires nationaux, dans le projet CRISTEL qui a pour but d'étudier les éléments constitutifs d'une source laser sélectionnable entièrement réalisée à base de cristaux photoniques bidimensionnels. Des résultats marquants ont été obtenus, tels que la démonstration expérimentale de l'effet laser, en régime pulsé, dans des guides à cristaux photoniques et à injection électrique, ou celle d'un combineur de type 1 vers 4, lui aussi entièrement à base de cristaux photoniques. Ces résultats montrent les larges possibilités offertes sur le plan pratique par les structures à cristaux photoniques et indiquent toute la pertinence de cette voie d'intégration. La transposition des structures étudiées vers d'autres domaines de longueurs d'onde n'est cependant pas immédiate. En effet, les matériaux, les technologies, les dimensions,... sont différents et imposent des études spécifiques. Toutefois, l'expérience acquise dans le cadre du projet CRISTEL constitue une solide base sur laquelle je compte m'appuyer pour conduire des travaux dans la filière GaAlAs/GaAs. Ainsi, dans un premier temps, l'étude consistera à dégager l'ensemble des paramètres nécessaires à l'élaboration de sources laser miniatures à base de cristaux photoniques bidimensionnels, en vue de leur démonstration expérimentale. On s'attachera à définir des structures génériques obtenues par la mise en œuvre de procédés collectifs et autorisant leur association avec d'autres éléments à cristaux photoniques. Dans un deuxième temps, ce type d'associations avec des éléments optiques de base tels que des guides ou des coupleurs sera étudié dans le but de réaliser un premier circuit photonique planaire dans la gamme des longueurs d'onde voisines de 850 nm.

**Filtre optique à bande spectrale étroite :** Les filtres optiques utilisent principalement des empilements multicouches aux indices et épaisseurs parfaitement contrôlés, ou des structures diffractives telles qu'un réseau. Ces filtres ont fait l'objet de nombreuses études et sont, pour la plupart, disponibles commercialement. Les filtres visés par nos travaux présentent des spécifications propres à l'instrumentation spatiale et nécessitent une rupture technologique avec les approches précédentes. Parmi ces spécifications, on note une transmission proche de 100%, centrée sur 850 nm, avec une largeur spectrale inférieure à 0,3 nm et accordable sur 20 nm... Le développement de tels filtres exige de nouveaux concepts s'appuyant sur les travaux théoriques les plus avancés en électromagnétisme. Des résultats récents, obtenus par l'Institut Fresnel de Marseille, ont ainsi montré que des filtres à bande spectrale étroite pouvaient théoriquement être réalisés en couplant un empilement multicouche à une nanostructuration de surface de type cristal photonique bidimensionnel. Cette nouvelle structure de filtre reste à valider expérimentalement et nécessite donc, au préalable, la mise au point de procédés technologiques spécifiques permettant notamment la réalisation pratique de la nanostructuration de surface selon les critères de conception. Par ailleurs, un fonctionnement en transmission sans perte et l'accordabilité large bande de la réponse spectrale sont des caractéristiques qui imposent des contraintes supplémentaires sur la conception et la technologie du filtre, ces caractéristiques étant pratiquement inexplorées dans les filtres actuels.

Ces travaux ont débuté à la fin 2004 dans le cadre de la thèse de Stephan Hernandez, en co-tutelle avec l'Institut Fresnel et en co-financement par le CNES et ASTRIUM. L'Institut Fresnel étudie le fonctionnement de ces filtres d'un point de vue théorique, et nous étudions, au LAAS, la faisabilité technologique de ces structures pour apporter une validation expérimentale de leurs propriétés. Il est à noter qu'aucun prototype de filtre basé sur le principe étudié n'a encore été réalisé. Il s'agit donc là d'un véritable défi à relever, suivi d'un travail de caractérisation important à mener. Notre premier objectif est de réaliser un prototype comportant un empilement multicouche surmonté d'une nanostructuration de surface. Cette étude préliminaire permettra ensuite de dégager une gamme de paramètres technologiques pertinents pour l'étude de conception du filtre, et d'établir les conditions du procédé complet d'élaboration associant des étapes de dépôt, écriture et gravure, compatibles entre elles. L'ensemble de ce travail doit permettre de démontrer un concept de filtre innovant, compatible avec un procédé de fabrication réaliste.

A ce jour, l'Institut Fresnel a dégagé une première gamme de paramètres physiques et géométriques procurant théoriquement le filtrage recherché. Après avoir affiné les valeurs de ces paramètres, la réalisation des structures correspondantes va débiter dans la centrale de technologie du LAAS.

L'amélioration de la fonctionnalité du dispositif peut, d'ores et déjà, être envisagée selon deux voies : l'intégration de fonctions détectrices ou de fonctions d'accord.

Le type de technologie mis en œuvre pour la réalisation du filtre est compatible avec l'intégration monolithique de fonctions détectrices. Cette fonctionnalité pourra donc être exploitée dans une démarche ultérieure, après caractérisation rigoureuse des propriétés de filtrage de la structure étudiée. La réalisation du filtre étant *a priori* l'étape ultime du procédé d'élaboration, on n'a pas à craindre de détérioration de ses performances par l'ajout de la nouvelle fonctionnalité. L'association monolithique des deux fonctions permettra alors de proposer un composant aux performances supérieures à celles des dispositifs conventionnels, tant sur le plan de la sélectivité spectrale qu'au niveau de l'encombrement, de la robustesse, du poids et du coût.

Le potentiel d'accordabilité, quant à lui, paraît plus incertain. L'objectif dans ce domaine restera modeste et, aujourd'hui, nous envisageons simplement d'utiliser les effets piezo-électrique ou opto-électrique pour modifier l'indice ou l'épaisseur des couches du filtre. Cela supposera d'introduire dans le procédé de nouveaux matériaux dont la technologie devra être compatible avec celle du filtre et ne pas dégrader ses performances. Une étude spécifique devra donc être menée dans cette voie.

**Micro-interféromètre accordable :** L'intégration de fonctions avancées à base de photodétection au sein de microsystèmes optiques est encore peu étudiée et constitue une brique technologique essentielle pour le développement des MOEMS. Dans le cadre d'une collaboration avec l'IMT de Bucarest (programme Brancusi), je souhaite poursuivre les travaux que nous avons initiés et qui ont pour but de développer un microsysteme à faible coût sur silicium intégrant monolithiquement des fonctionnalités « intelligentes » de photodétection et de sélectivité en longueur d'onde. Le microsysteme étudié devra fonctionner dans le spectre visible ou très proche infrarouge, pour des applications en métrologie ou communications optiques au voisinage de 850 nm. L'étude d'intégration présente deux axes essentiels : l'optimisation du photodétecteur pour son intégration dans les MOEMS, et le micro-usinage du filtre spectral au-dessus du photodétecteur. La fonction de sélectivité spectrale est basée sur un interféromètre Fabry-Pérot, accordable électrostatiquement, obtenu par un micro-usinage de surface ou de volume utilisant diverses configurations de couches sacrificielles et actives. La combinaison des diverses fonctionnalités optiques intégrées (détection, filtrage, ...) offre une grande versatilité quant aux domaines d'applications.

La coopération entre nos équipes sera axée sur la définition et la validation de procédés génériques de réalisation de nouveaux composants photoniques basés sur la technologie des microsystèmes. Les compétences complémentaires et transversales des deux équipes couvrent l'ensemble des disciplines mises en jeu dans ce projet et ont conduit à la répartition suivante des tâches : l'IMT pilote les travaux de modélisation et conception des composants ainsi que les caractérisations de surface ; le LAAS organise les réalisations technologiques et les caractérisations optiques et électriques des structures intégrées.

Des doctorants des deux laboratoires sont impliqués dans ce projet et, dans le cadre des échanges nécessaires à l'avancée des travaux, ils effectueront des stages de recherche dans le laboratoire partenaire sur le domaine que ce dernier a la charge d'organiser. Les échanges menés au cours de cette collaboration contribueront à renforcer les liens entre les deux laboratoires et seront mis à profit pour initier des projets européens faisant appel à de nouveaux partenaires.

- A long terme

**Emetteur de lumière dans la filière silicium :** Le silicium présente plusieurs caractéristiques s'opposant à une émission lumineuse (gap indirect, grande efficacité des recombinaisons non radiatives, recombinaisons Auger) alors que les sources à base de semiconducteurs III/V permettent de couvrir une large partie du spectre. Cependant, l'introduction de ces dernières sur substrat de silicium implique une intégration hybride qui nécessite un alignement actif pour l'optimisation des couplages optiques interdisant la fabrication collective et engendrant des surcoûts.

Au cours des dix dernières années, un effort important en ingénierie des matériaux a permis d'espérer que des propriétés d'émission pourraient être exploitées sur du silicium sous forme nanostructurée, laissant entrevoir le développement de sources optiques compatibles avec la technologie CMOS. Leur

association avec des composants existants d'optique intégrée sur silicium (guide d'onde, détecteurs, modulateurs,...) ouvre de très larges perspectives en matière d'intégration photonique monolithique.

Dans ce contexte, je souhaite m'impliquer dans un projet ambitieux reposant sur plusieurs équipes de recherche et visant à relever le défi de l'intégration monolithique d'un émetteur de lumière visible, sur silicium, par une technologie compatible CMOS. Ce projet englobe l'intégralité de la démarche, partant de l'élaboration du matériau actif jusqu'à la réalisation de l'émetteur. Il repose sur des collaborations internationales impliquant des équipes italiennes, espagnoles et françaises. Au niveau de notre laboratoire, ce projet est l'objet d'une collaboration étroite entre le groupe « Technologie, Micro- et Nano-structures » et le groupe « Photonique ».

La problématique abordée, à la fois fondamentale et technologique, comporte de nombreuses étapes-clés pour aboutir à la démonstration de faisabilité d'une diode laser : obtention du matériau actif par une technique compatible CMOS et avec contrôle de ses caractéristiques, étude et réalisation d'une injection de porteurs pour réaliser une LED, étude et réalisation d'un guide et d'une cavité optique, étude du gain par pompage optique de la cavité, étude des conditions d'injection pour réaliser un laser visible à pompage électrique.

Parmi les différentes étapes, je compte m'investir plus particulièrement dans la détermination des propriétés optiques et dans la réalisation d'un émetteur de lumière.

- Détermination des propriétés optiques :

La détermination du coefficient de gain et de l'indice de réfraction sont des étapes essentielles pour entreprendre une véritable ingénierie du composant. Elles nécessiteront donc de mettre en place des techniques adaptées à l'analyse de nanocristaux de silicium et une méthodologie de caractérisation spécifique en définissant les structures de test appropriées. La conception et la fabrication de guides permettront d'exploiter différentes techniques de mesure et d'aboutir à une bonne compréhension des mécanismes de gain et de pertes dans les structures guidées. L'obtention de guide d'onde nécessitera de mener en parallèle des études de caractérisation, de modélisation et de procédé de fabrication. La mesure de l'indice de réfraction des couches de silice incorporant les nanocristaux de silicium, permettra de déterminer les paramètres de guides monomodes de type ruban nervuré. Différentes configurations seront étudiées, en relation avec la faisabilité et la reproductibilité du procédé de fabrication. Le contrôle des épaisseurs des couches, de la qualité des flancs de gravure et de la hauteur des rubans seront des points-clés du procédé de fabrication. Outre les propriétés de luminescence en fonction des caractéristiques technologiques et morphologiques des nanocristaux, une attention particulière sera portée à la caractérisation de l'émission stimulée par la mise en place de structures spécifiques dédiées à la mesure du gain optique.

- Réalisation d'un émetteur de lumière :

Si la diode électroluminescente et la diode laser n'atteignent pas le même niveau de performances, elles reposent cependant sur des concepts communs tels que l'injection électrique, le confinement des porteurs et, à un degré moindre, le confinement optique. Les diodes électroluminescentes seront étudiées en priorité, les diodes laser n'étant abordées qu'en fin de projet après confirmation de l'obtention des effets fondamentaux requis. L'étude reposera sur l'exploration de différentes configurations de guides et de cavités optiques compatibles avec un procédé de réalisation CMOS. Dans ce cadre, je m'investirai selon deux approches s'inspirant des concepts mis en œuvre dans les dispositifs à base de composés III/V. Dans un premier temps, une approche « horizontale » reposant sur un confinement optique bidimensionnel, procuré par un guide de type ruban ou enterré, sera explorée dans la perspective de réalisation de sources à émission par la tranche. Des études préliminaires, effectuées au LAAS en collaboration avec l'Université de Barcelone, ont déjà permis de démontrer la faisabilité de guides monomodes à nanocristaux présentant un faible niveau de pertes (11 dB/cm à 633 nm). Ces structures de guide seront optimisées pour l'étude de l'amplification optique, l'objectif étant de démontrer l'obtention d'un gain optique par le pompage optique de nanocristaux. L'autre approche tire profit de nanostructurations de la surface et des cristaux photoniques. Elle sera utilisée pour accroître le rendement externe des diodes électroluminescentes ou optimiser la qualité et la directivité de l'émission. L'utilisation de structures à cristaux photoniques, encore nouvelle pour les diodes laser conventionnelles, offre déjà de très nombreuses possibilités d'ingénierie en photonique. Elle est très prometteuse pour la réalisation de nanolasers individuels ou en matrices et pour l'élaboration d'une photonique intégrée planaire dense. En démontrant sa compatibilité avec une technologie CMOS, ce projet de recherche ouvre la voie au domaine très prometteur de « photonique intégrée CMOS dense et intelligente ».

