



**HAL**  
open science

## VCSELS: technologies et intégration photonique

Véronique Bardinal

► **To cite this version:**

Véronique Bardinal. VCSELS: technologies et intégration photonique. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2009. tel-00405747

**HAL Id: tel-00405747**

**<https://theses.hal.science/tel-00405747>**

Submitted on 21 Jul 2009

**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 à Diriger des Recherches  
de l'Université Paul Sabatier de Toulouse**

**VCSELS : Technologie et Intégration Photonique**

**par**

**Véronique Bardinal**

**LAAS-CNRS**

**Soutenue le 9 avril 2009 devant le jury :**

**Rapporteurs :**

**Pr. Mireille Commandré**

**Pr. Didier Decoster**

**Pr. Alain Le Corre**

**Président :**

**Pr. Joël Jacquet**

**Examineurs :**

**Pr. Michel Pugnet**

**Pr. Hugo Thienpont**

**Directrice de Recherche :**

**Chantal Fontaine**



## Résumé

Depuis le premier concept proposé par K.Iga il y a 30 ans jusqu'aux recherches actuelles sur l'intégration photonique des VCSELs (pour Lasers à Cavité Verticale à Emission par la Surface), une forte activité de recherches a été déployée sur ces composants optoélectroniques emblématiques, du matériau au composant jusqu'au système, leur permettant d'acquérir leur position stratégique actuelle. C'est dans cette dynamique que s'est inscrit mon parcours scientifique.

Les principales activités de recherche que j'ai menées depuis 1992 sur la technologie des VCSELs et leur intégration dans des systèmes photoniques sont décrites dans ce mémoire. Je rappelle tout d'abord brièvement les avantages des dispositifs III-V à cavité verticale pour l'optoélectronique et plus particulièrement les propriétés des VCSELs, composants au centre de mes travaux. Ce contexte général étant posé, je décris les contraintes imposées lors de l'élaboration de ces dispositifs à cavité verticale sur GaAs ainsi que la technique de contrôle optique en temps réel qui m'a permis de répondre à ce défi. Je détaille ensuite mes travaux sur la photo-détection en cavité verticale, qui ont porté sur la conception, la réalisation et la caractérisation de photo-détecteurs simples à cavité massive, de VCSELs à double fonction pour la détection d'un faisceau externe, ainsi que de VCSELs avec monitoring intégré exploitant la détection latérale de l'émission spontanée dans le plan de la cavité. La thématique du contrôle de l'injection électrique dans les VCSELs de grandes dimensions pour la manipulation de solitons de cavité ou la génération de puissance est également exposée, ainsi que les études menées sur l'intégration des VCSELs dans les microsystèmes qui m'ont conduite à mettre en place une nouvelle filière sur la micro-optique intégrée à base de polymères pour ces composants. Enfin, les perspectives de recherche qu'ouvrent l'ensemble de ces travaux sont présentées ainsi que le contexte dans lequel elles s'inscrivent.



## Remerciements

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

Je tiens tout d'abord à remercier Messieurs Alain COSTES, Jean-Claude LAPRIE, Malik GHALLAB et Raja CHATILA, directeurs successifs du LAAS-CNRS qui, depuis mon arrivée en 1992, m'ont permis de mener mes activités de recherche au sein de ce laboratoire.

Mes travaux couvrent une période de plus de seize années 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 reconnaissante à Monsieur Joël JACQUET, Professeur à l'Ecole Supérieure d'Electricité de Metz, d'avoir accepté de présider ce jury et pour son aide précieuse dans l'amélioration de ce manuscrit. Je remercie très sincèrement Madame Mireille COMMANDRE, Professeur à l'Ecole Centrale de Marseille, Monsieur Didier DECOSTER, Professeur à l'Université de Lille I ainsi que Monsieur Alain LE CORRE, Professeur à l'Institut National des Sciences Appliquées de Rennes, 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 Monsieur Michel PUGNET, Professeur à l'Université Paul Sabatier de Toulouse, et Monsieur Hugo THIENPONT, Professeur au Département de Physique Appliquée et de Photonique de « Vrije Universiteit » de Bruxelles, d'avoir accepté de faire partie de mon jury.

Les pages qui suivent doivent beaucoup à de nombreux échanges, collaborations, discussions, avec mes collègues du groupe « Photonique », permanents ou temporaires. Que chacun d'entre eux soit assuré ici de ma profonde reconnaissance.

Je tiens plus particulièrement à exprimer ma gratitude aux membres de l'équipe VCSEL, équipe dont l'intitulé a évolué au cours des années : de « SEJM » (pour « Structures Epitaxiées par Jets Moléculaires ») à « EMACO » (pour « Epitaxie, Matériaux et Composants pour l'Optoélectronique ») jusqu'à sa dénomination actuelle.

Par ordre d'apparition sur « l'écran » de ma vie de chercheuse -que les cinéphiles me pardonnent mes emprunts au vocabulaire du 7<sup>ème</sup> art dans la suite de ce texte-, je remercie donc tout d'abord Antonio MUÑOZ-YAGÜE, qui m'a convaincue de venir en stage DEA au LAAS et dont l'influence sur les orientations du sujet a été considérable ; ainsi que René LEGROS, mon directeur de thèse, qui m'a fait bénéficier de ses précieux enseignements en optique instrumentale.

Mes plus profonds remerciements vont naturellement à Chantal FONTAINE, « personnage principal » et figure tutélaire entre toutes, qui m'a accompagnée et guidée avec constance tout au long de cette aventure, émaillée de joies inoubliables mais aussi de moments plus difficiles, au cours desquels son expérience et ses encouragements m'ont été plus que précieux. Je suis reconnaissante et admirative de la combativité dont elle a fait preuve pour que l'étude des composants à microcavité verticale se développe puis se poursuive malgré l'adversité « épitaxiale » et pour que l'arrivée prochaine d'un nouvel équipement couronne enfin les efforts consentis par l'équipe. Sa disponibilité et sa créativité ont été également déterminantes dans la conduite des projets nationaux et internationaux décrits dans ce mémoire, et je suis heureuse de lui dire ici tout ce que je lui dois.

Pour parvenir aux résultats présentés ici, j'ai également bénéficié du concours inestimable d'un « co-scénariste » de premier plan, Thierry CAMPS, qui m'a permis d'acquérir une

« vision » composants et systèmes à laquelle j'étais –il faut bien l'avouer- moins sensible au début de ces travaux. Travailler à ses cotés a constitué pour moi une source inépuisable de motivation et d'inspiration et je le remercie très sincèrement pour tous les encouragements scientifiques et humains qu'il m'a apportés.

J'adresse également tous mes remerciements à Guilhem ALMUNEAU, pour ses nombreuses contributions, notamment en technologie et en caractérisation, ainsi que pour son apport considérable dans la « promotion » des travaux de l'équipe.

J'opère enfin un « zoom » sur deux « personnages » de l'équipe qui me sont également chers, Elena BEDEL-PEREIRA et Emmanuelle DARAN que je remercie pour ce qu'elles m'ont apporté sur le plan scientifique et humain au sein de l'équipe ou après leur évolution vers d'autres voies.

Un grand merci également à tous les « jeunes premier(e)s » de cette aventure, c'est-à-dire les doctorants et post-doctorants, sans qui ces résultats n'existeraient pas : Frédéric VAN DIJK, Laurent AVERSENG, Charlotte BRINGER, Cédric AMAT, Eric HAVARD, Moustapha CONDE, Benjamin REIG, Thierry LEÏCHLE, Christophe LEVALLOIS et Isaac SUAREZ. Ce fut un grand plaisir de les encadrer et/ou de tout simplement de travailler à leurs cotés. Merci également à tous les stagiaires pour leurs contributions.

Le travail présenté ici comporte de nombreux aspects technologiques impliquant des acteurs ne bénéficiant pas toujours de « l'éclairage » qu'ils méritent.

Merci donc à tous les membres du service TEAM (Techniques et Equipements Appliqués à la Micro-électronique) pour leur soutien technique quotidien dans la plate-forme technologique. Je souhaite plus particulièrement « créditer au générique » les membres du service qui ont été directement impliqués dans les projets, notamment Emmanuelle DARAN, pour toutes les pistes qu'elle m'a ouvertes en optique guidée et en micro-structuration des polymères ; polymères qui me sont désormais plus familiers grâce aux compétences en chimie de Jean-Baptiste DOUCET, que je remercie également pour sa participation aux process de fabrication des VCSELs.

Je suis également très reconnaissante à Guy LACOSTE et Alexandre ARNOULT pour le travail qu'ils ont fourni en épitaxie ainsi qu'à Pascal DUBREUIL pour la réalisation des process et des oxydations de l'époque « pionnière » ainsi que pour les gravures réalisées par la suite avec ses collègues Laurent JALABERT et Djaffar BELHARET. Merci également à Ludovic SALVAGNAC et Sébastien PINAULT pour les métallisations et les dépôts d'ITO, à Hugues GRANIER, David COLIN et Thierry DO CONTO pour la mise au point des étapes d'assemblage et de montage, ainsi qu'à Franck CARCENAC pour les observations MEB.

J'adresse mes remerciements à tous les membres du service 2I pour leur aide constante durant toutes ces années, que ce soit en informatique ou en instrumentation, ainsi pour leur soutien dans le cadre de la plate-forme de caractérisation.

J'ai en particulier beaucoup appris auprès de Corinne VERGNENEGRE, qui m'a fait bénéficier de ses compétences en conception et en instrumentation optiques et qui s'est impliquée avec une maîtrise « hitchcockienne » dans l'avancée des projets ; je la remercie également pour toutes les discussions conviviales que nous avons pu avoir au cours de ces années passées à travailler ensemble.

Je suis très reconnaissante à Christian GANIBAL, Louis AMAT<sup>†</sup>, Jean-Louis RASTOUL et Bernard FRANC pour la réalisation des différents programmes de contrôle de manipulations expérimentales.

Merci également à Christian TOURTE pour son support technique dans le cadre de la plate-forme de caractérisation optique, ainsi qu'à Jean-Bernard POURCIEL pour son aide précieuse sur le robot de dépôt Bioplume, robot sur lequel nous avons eu la possibilité de travailler grâce au concours de Liviu NICU, responsable du groupe NBS, que je remercie sincèrement.

Je ne saurais oublier dans ces remerciements les coordinateurs des projets dans lequel j'ai été impliquée pour l'intérêt qu'ils ont manifesté pour mes travaux et pour les discussions instructives que nous avons menées dans le cadre de nos coopérations : Marc ILLEGEMS (EPFL), Christophe GORECKI (FEMTO), Laurent CHUSSEAU (IES), Jean-Louis BRINGUIER (METEO France), Michel FRACES (ONERA), Laura LECHUGA (CNM), Régis HAMELIN (Intexys), Robert KUZCELEWICZ (LPN) ainsi que Hugo THIENPONT et Heidi OTTEVAERE (TONA-VUB). Je remercie chaleureusement Yann BOUCHER (ENIB-RESO) pour la collaboration très enrichissante que nous avons construite au cours des années et pour les discussions qui l'ont accompagnée, que ce soit dans le domaine scientifique ou de manière plus générale sur nos tristes « Temps Modernes ».

Je présente par avance mes excuses aux personnes oubliées dans les listes ci-dessus ; je souhaite inclure dans ces remerciements l'ensemble des membres des services administratifs et techniques du laboratoire (secrétariats, gestion, personnel, communication, information, relations partenariales, documentation-édition, logistique, magasin) pour le temps gagné grâce à leur aide précieuse et pour leur contribution à l'ambiance conviviale du laboratoire.

Enfin, je terminerai par une pensée affectueuse pour mes proches, qui « hors-champ » ont toujours été présents pour me soutenir, avec au tout premier plan, Denis, « héros » flegmatique à la patience infinie, ainsi que Charlotte et Antoine, nos meilleures « réalisations ».





## Sommaire

<b>Introduction</b>	1
<b>Chapitre 1 : Des microcavités verticales au VCSEL</b>	5
1. Dispositifs à cavité verticale : une géométrie générique	5
1.1. Bref historique	6
1.2. Principe du VCSEL	7
1.3. Principaux avantages des VCSELS et domaines d'application	7
1.4. Domaine spectral d'émission des VCSELS	8
1.5. Techniques d'épitaxie des VCSELS	10
1.6. Sensibilité des VCSELS aux erreurs commises pendant l'élaboration	10
2. Travaux menés au LAAS : réalisation contrôlée de dispositifs à microcavité verticale unidimensionnelle	11
2.1. Conception de modulateurs tout-optiques à cavité massive	12
2.2. Contrôle de la croissance MBE de microcavités verticales	12
2.3. Résultats obtenus sur la caractérisation des structures	18
2.4. Conclusions : vers le pompage électrique...	20
3. Travaux menés au LAAS : Réalisation contrôlée de VCSELS monomodes	21
3.1. Ingénierie des diagrammes de bande dans les miroirs de Bragg	21
3.2. Réalisation de VCSELS sous contrôle RDA	23
3.3. Oxydation latérale enterrée (AlOx) pour le confinement électrique transverse	24
Conclusions	25
<b>Chapitre 2 : Photodétection dans les VCSELS</b>	29
1. Photodétection renforcée par effet de cavité	29
1.1. Contexte : Projet européen Eurozep	30
1.2. Modélisation de la sensibilité de détection d'une microcavité	30
1.3. Conception et réalisation	31
1.4. Résultats obtenus	32
2. Détection d'un signal externe avec un VCSEL	33
2.1. Emission-détection duale dans un VCSEL monomode à diaphragme d'oxyde	33
2.2. Détection avec deux cavités empilées verticalement	37
3. Détection latérale intégrée pour le monitoring des VCSELS	39
3.1. Etude électro-optique préalable	40
3.2. Résultats obtenus en photodétection	44
Conclusions	46
<b>Chapitre 3 : Contrôle de l'injection électrique dans les VCSELS de grande dimension</b>	51
1. Contexte et motivations	51
2. Problématique de l'injection dans les VCSEL à émission par la surface	53
3. Solutions technologiques envisagées	54

4. Simulation de l'injection électrique dans les VCSELs	55
4.1. Choix d'une simulation électrique bidimensionnelle	55
4.2. Résultats de modélisation électrique	56
5. Résultats expérimentaux	60
5.1. Optimisation du dépôt de l'ITO	60
5.2. Etude de l'interface ITO/GaAs :Be	61
5.3. Mesure du contraste d'injection obtenu par gravure localisée du cap associée à de l'ITO	63
5.4. Réalisation de composants de grande dimension	64
Conclusions	66

## **Chapitre 4 : Intégration des VCSELs dans les microsytèmes** 69

1. Intérêt des VCSELs pour les microsystèmes optiques	69
2. Microsystème SNOM basé sur la réinjection optique dans un VCSEL	69
3. VCSELs monomodes pour microcapteur biomédical	70
3.1. Contexte : Projet Optonanogen	70
3.2. Conception du sous-système optique de détection	71
3.3. Réalisation de matrices de VCSELs monomodes optimisées	71
3.4. Réduction de la divergence des VCSELs	73
3.5. Intégration dans le MOEMS final	74
3.6. Conclusions : vers la micro-optique intégrée	75
4. Micro-optique intégrée sur VCSELs	76
4.1. Démarche adoptée	76
4.2. Simulations optiques	76
4.3. Méthode de fabrication des lentilles	77
4.4. Résultats obtenus	78
Conclusions	81

## **Chapitre 5 : Perspectives** 85

1. Acteurs internationaux et nationaux du domaine	85
2. Projet de recherche : VCSELs, technologies et intégration photonique pour l'instrumentation et la biologie	89

## **Annexes** 95

Publications	
Activités d'enseignement et d'encadrement	

## **Introduction**

Ce mémoire regroupe les principales activités de recherche auxquelles j'ai participé et/ou que j'ai menées de 1992 à 2008 sur la technologie des VCSELs et les fonctions optiques associées.

La motivation principale de ces travaux visait au départ l'étude et à l'exploitation des effets optiques dans les micro-résonateurs Fabry-Pérot verticaux à base de semi-conducteurs III-V pour la réalisation de composants optoélectroniques. Cette thématique est apparue à la fin des années 80 grâce aux progrès de l'épitaxie par jets moléculaires de ces matériaux. Les concepts de réflecteurs de Bragg distribués et de résonateurs verticaux avaient déjà été largement étudiés dès les années 50 [1], [2] [3]). L'idée nouvelle a résidé dans la possibilité de réaliser monolithiquement grâce à ces structures une bande interdite de photons à une dimension à base de matériaux semi-conducteurs dans lesquels on pouvait déjà exploiter les bandes interdites électroniques, ainsi que des effets optiques à commande électrique [4], ouvrant la voie vers une nouvelle filière de dispositifs. Les avantages attendus concernaient également la possibilité de traiter les faisceaux lumineux par la surface, autorisant ainsi un traitement massivement parallèle.

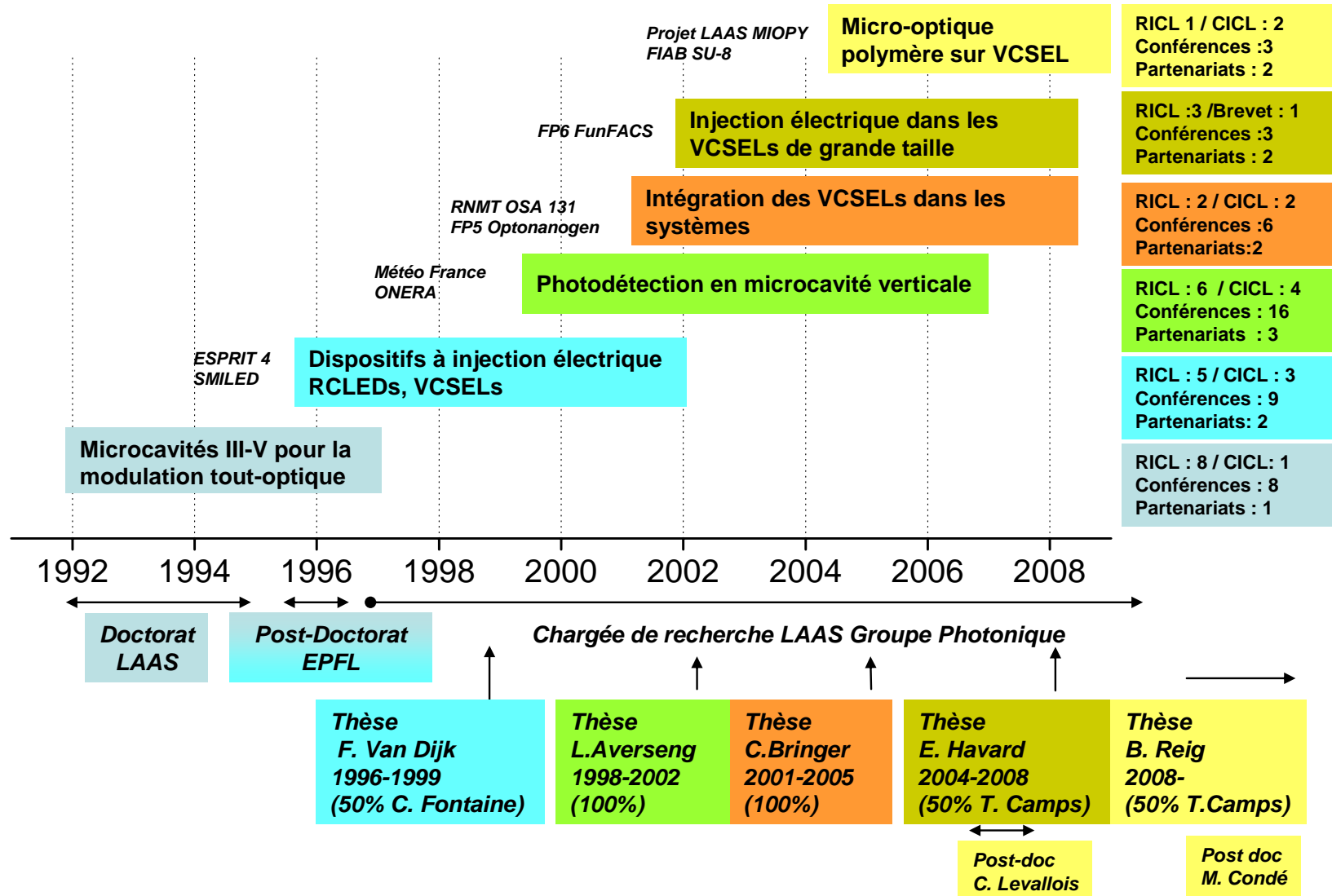
Quand l'épitaxie des hétérostructures III-V a été suffisamment maîtrisée, de nombreuses équipes dans le monde se sont lancées dans la conception et l'élaboration de structures à microcavité verticale III-V que ce soit dans le cadre d'études fondamentales (couplage fort, effet Raman ...) qu'appliquées (modulateurs, commutateurs, amplificateurs, sources lasers VCSELs, diodes électroluminescentes, détecteurs ...).

Compte tenu de l'expérience de notre groupe en physique des matériaux alliée à une expertise en épitaxie et en réalisation technologique de diodes laser, l'équipe EMACO (pour Epitaxie, MAériaux et COmposants, composée alors d'A. Muñoz Yagüe, C. Fontaine, E.Bedel-Pereira et R. Legros) a abordé cet axe de recherche en tirant parti de l'association GaAs-CaSrF<sub>2</sub> (Projet MRT-LAAS 1989-1990) [15]. L'étude de miroirs de Bragg et de microcavités verticales à base de GaAs/GaAlAs pour la modulation tout optique a ensuite été lancée : ce fut le sujet de ma thèse. Suite à mon entrée au CNRS sur cette thématique, les études que nous avons menées se sont progressivement orientées vers les composants à injection électrique (VCSELs) et leurs applications ; nous avons conçu à chaque étape les composants que nous avons réalisés, en nouant au besoin des collaborations fructueuses avec des laboratoires plus fondamentaux.

La représentation schématique de la page suivante regroupe les différentes thématiques que nous avons successivement étudiées en déclinant la même géométrie générique (modulateurs, VCSELs, détecteurs ...).

Ce mémoire s'articule autour de cinq chapitres, les quatre premiers constituant une synthèse des principales thématiques que j'ai traitées successivement ou simultanément. J'ai mentionné pour chacune de ces parties les collaborations et les encadrements relatifs aux travaux décrits ainsi que les publications correspondantes, dont on pourra trouver la liste détaillée en annexe.

# VCSELS : Technologies et intégration photonique



Le premier chapitre rappelle brièvement les principaux avantages des dispositifs III-V à cavité verticale pour l'optoélectronique, puis développe plus particulièrement les propriétés des VCSELs, composants situés au centre de nos travaux. Ce contexte général étant décrit, les travaux que nous avons menés au LAAS sur la réalisation contrôlée des dispositifs III-V à cavité verticale sur GaAs pour la modulation et l'émission laser sont ensuite présentés.

Dans le deuxième chapitre, nous détaillons nos travaux sur la photodétection en cavité verticale, qui ont porté sur la conception, la réalisation et la caractérisation de photodétecteurs simples à cavité massive, de VCSELs à double fonction pour la détection d'un faisceau externe, ainsi que de VCSELs avec *monitoring* intégré exploitant la détection latérale de l'émission spontanée dans le plan de la cavité.

Le chapitre 3 traite du contrôle de l'injection électrique dans les VCSELs pour la manipulation de solitons de cavité ou la génération de puissance. Après avoir décrit la problématique de l'injection électrique dans les VCSELs de grande dimension, nous présentons une évaluation par la simulation des solutions technologiques que nous avons proposées pour améliorer l'uniformité d'injection, puis les résultats expérimentaux que nous avons obtenus.

Enfin, nous décrivons dans le chapitre 4 les études que nous avons menées sur l'intégration des VCSELs dans les microsystèmes, et qui ont débouché sur une nouvelle activité de recherche dans l'équipe : la micro-optique intégrée à base de polymères.

Le cinquième chapitre regroupe mes perspectives de recherche sur les technologies et l'intégration photonique des VCSELs, qui reposent sur l'expérience et les compétences que j'ai développées par mes travaux, de la physique des matériaux vers les composants et les systèmes et s'inscrivent dans un des axes prioritaires du laboratoire. Ce projet s'appuie aussi sur mes interactions avec les membres de l'équipe dans laquelle je développe mes travaux et la complémentarité de nos recherches sur les VCSELs, mais aussi sur les collaborations que j'ai construites au cours de mon parcours avec des partenaires, d'autres groupes et de l'extérieur, avec lesquels je m'engage dans le domaine de l'intégration photonique.

## **Références**

1. F. Abeles, Annales de Physique, vol5 596-706 (1950)
2. Pelletier, E., Kowalczyk, R. and Fornier, A « Influence du Procédé de Contrôle Sur Les Tolérances de Réalisation des Filtres Interférentiels à Bande Etroite », Journal of Modern Optics, 20:7,509 — 526 (1973)
3. H.A. Macleod, "Thin film optical filters", Adam Hilger Ltd, second edition, Bristol, 1986
4. C. Weisbuch "Fundamental research and device applications of molecular beam epitaxy grown heterostructures" J. Vac. Sci. Technol. A Volume 12, Issue 4, pp. 1191-1200 (July 1994)
5. C. Fontaine, Ph. Requena, A. Munoz-Yagüe "Generalization of Bragg reflector geometry : Application to (Ga,Al)As - (Ca,Sr)F2 reflectors" J. Appl. Phys. 68 (1990) 5366.



# Chapitre 1

## **Des microcavités verticales au VCSEL**

Dans ce premier chapitre, nous allons brièvement rappeler l'intérêt des dispositifs à microcavité verticale unidimensionnelle pour les fonctions optiques ainsi que les avantages des VCSELs, qui constituent le composant le plus emblématique de cette famille de composants. Nous montrerons ensuite comment se sont inscrites dans ce contexte nos activités de recherche sur la réalisation contrôlée de dispositifs à microcavité verticale à commande optique et de VCSELs à injection électrique.

### **1. Dispositifs à cavité verticale : une géométrie générique**

Une microcavité est un résonateur Fabry-Pérot dont la ou les dimensions sont de l'ordre de la longueur d'onde d'opération. Dans le cas d'une cavité verticale, planaire ou encore unidimensionnelle, le confinement de la lumière a lieu dans la direction verticale, c'est-à-dire dans le sens de croissance des couches. On obtient ce confinement grâce à une cavité constituée d'une couche d'épaisseur optique multiple d'une demi-onde placée entre deux miroirs de Bragg de haute réflectivité. On peut considérer ce système comme une bande interdite de photons unidimensionnelle dans la plage spectrale considérée.

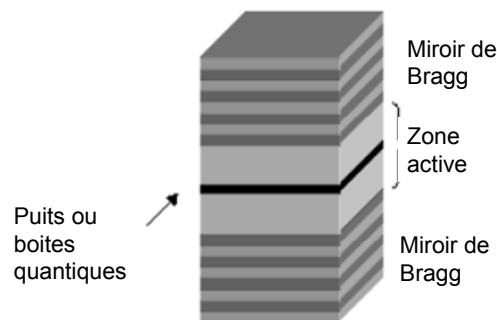


Figure 1 : Microcavité verticale unidimensionnelle

Dans une cavité, on autorise la transmission d'un mode au centre de cette bande interdite. Pour cette longueur d'onde de résonance, il y aura de multiples allers-retours de la lumière entre les miroirs, et donc une augmentation de l'interaction lumière-matière d'autant plus forte que la finesse de la cavité, qui dépend des réflectivités des miroirs, sera élevée. Si le matériau de la cavité est optiquement actif, que ce soit un matériau massif ou à base de puits quantiques, il y aura à la résonance une amplification des effets optiques générés. Pour remplir la condition au seuil laser, les miroirs devront être d'autant plus réfléchissants que la cavité sera étroite. Dans le cas d'un VCSEL (cavité réduite de l'ordre de 250nm pour les VCSELs à 850nm), les miroirs de Bragg, dont la valeur de la réflectivité maximale dépend de la différence d'indice entre les matériaux mis en jeu et du nombre de périodes empilées, permettront d'atteindre la valeur requise (>99%). On pourra donc exploiter ces effets dans des composants comprenant des couches actives de plus faible épaisseur que celles d'un composant classique, et qui fonctionneront avec des énergies de commande plus faibles et des vitesses plus élevées. Ces dispositifs pourront être commandés optiquement ou électriquement



car si l'on dope les réflecteurs de Bragg, on peut former une diode p-i-n que l'on peut polariser en direct ou en inverse suivant la fonction visée : injection de courant pour l'émission, application d'un champ électrique, détection ...

Un autre avantage de la géométrie verticale réside dans la possibilité de délimiter avec des technologies collectives des barrettes et des matrices de dispositifs sur la surface d'une plaquette. La longueur d'onde de résonance et la géométrie des structures : la nature de la zone active, la finesse du résonateur, le nombre de périodes avant et arrière seront optimisées en fonction de la fonction optique envisagée. Les composants à microcavité sont donc des éléments-clés pour un nombre croissant d'applications optoélectroniques : interconnexions, communications, traitement des données, microsystèmes...

De nouvelles géométries de cavité sont apparues ces dernières années aux côtés des microrésonateurs 1D. On peut les classer les structures à microcavité pour assurer la fonction d'émission laser en trois grandes catégories [1] :

- les microrésonateurs plans (ou PBG 1D)
- les cristaux photoniques PC ou PBG (2D, 3D)
- les cavités à mode de galerie (3D)

Au début des travaux décrits dans ce mémoire, les recherches portaient essentiellement sur les dispositifs à microcavité verticale unidimensionnelle, représentés par son composant le plus emblématique, le VCSEL.

### 1.1. Bref historique

En 1962 apparait le premier laser à hétérostructure à base de semi-conducteurs émettant par la tranche [2]. En 1977 Iga propose un nouveau concept basé sur une structure laser du même type, mais à cavité verticale, émettant verticalement par la surface (fig. 2) [4]. Une année plus tard, son équipe démontre un effet laser à  $T=77k$  en régime pulsé dans un composant en GaInAsP basé sur ce concept [4].

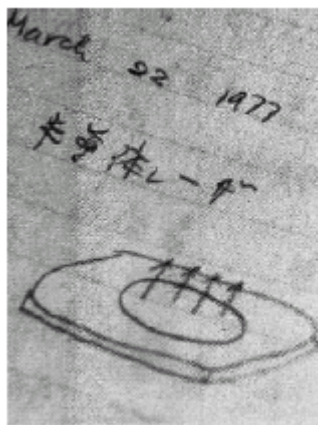


Figure 2 : Conception du premier VCSEL par Iga en 1977 (photo de son cahier de labo).

Une amélioration majeure a par la suite consisté à utiliser des puits quantiques dans la cavité avec l'obtention en 1989 d'un composant à base de puits quantiques de  $Ga_{0.8}In_{0.2}As$  sur GaAs fonctionnant à température ambiante [5]. A partir de 1994, les recherches se sont focalisées sur l'obtention de composants à injection électrique grâce à deux avancées marquantes : d'une part la réduction des résistances séries dans les réflecteurs de Bragg distribués (DBRs) grâce aux travaux sur l'ingénierie de diagramme de bandes (Coldren) [6] [7] et d'autre part l'amélioration du confinement électro-optique transverse par l'insertion

d'un diaphragme d'oxyde enterré près de la cavité (Huffaker) [7]. Cette innovation décisive a permis d'atteindre des seuils de fonctionnement sub-mA avec une émission monomode transverse (1995) [10] ainsi que des performances accrues en termes de rendement et de fiabilisation du composant, ce qui a autorisé par la suite un transfert industriel de la fabrication de ce composant pour les communications optiques.

## 1.2. Principe du VCSEL

Un VCSEL standard à injection électrique est constitué d'une zone active (dite cavité contenant des puits quantiques et entourée de deux miroirs de Bragg distribués (DBR) (Fig.3a). Les miroirs sont dopés de manière à former une diode PIN et à injecter des électrons et des trous dans les puits quantiques où ils sont piégés et se recombinent. Les photons ainsi générés effectuent de multiples allers-retours dans la cavité. Pour obtenir l'effet laser, les pertes de la cavité et des miroirs doivent être inférieures au gain optique dans la cavité. Dans un VCSEL, ce dernier est faible en raison de la faible épaisseur de la cavité (épaisseur optique égale en général à la longueur d'onde). Pour compenser celui-ci, des miroirs de très haute réflectivité sont donc nécessaires. Les DBRs sont constitués de plusieurs dizaines de périodes de couches de bas et haut indices alternées et d'épaisseur quart d'onde qui permettent d'atteindre plus de 99% de réflectivité. Le faisceau laser est émis verticalement, en général à travers le miroir supérieur de type p qui possède une réflectivité légèrement inférieure à celle du miroir de type n et sur lequel est déposée une électrode annulaire.

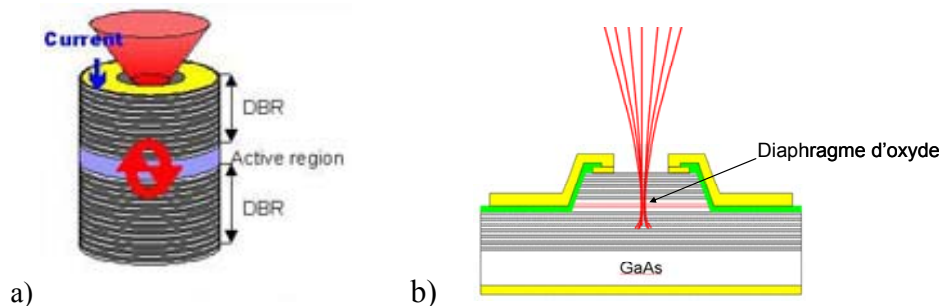


Figure 3 : a) Vue générale d'un VCSEL à injection électrique b) cas du VCSEL à diaphragme d'oxyde enterré conduisant à un confinement transverse optimal

## 1.3. Principaux avantages des VCSELs et domaines d'application

La géométrie spécifique des VCSELs leur confère des propriétés particulières. Ainsi leur cavité courte permet d'obtenir par construction un seul mode longitudinal. Des techniques de confinement transverse peuvent être de plus mises en œuvre pour obtenir un faisceau monomode transverse. Ce double caractère monomode est un atout pour de nombreuses applications.

Grâce à la forte réflectivité des miroirs et aux progrès des technologies d'oxydation enterrée (fig.3b), le VCSEL présente des densités de seuil laser faibles ( $\sim 1\text{kA/cm}^2$ ), des rendements élevés (50%) et des faibles consommations.

Par ailleurs, ces sources émettent des faisceaux circulaires, symétriques et de divergence relativement faible. L'émission par la surface permet en outre de tester les composants sur plaque et de réaliser facilement des matrices de composants émettant en parallèle. Les VCSEL sont donc facilement intégrables dans les microsystèmes et leur couplage aux fibres est aisé.

Enfin, la fréquence de coupure de ces composants dépasse 10 GHz, ce qui peut être mis à profit pour la modulation de signaux de communication optique (>20 Gbits/s).

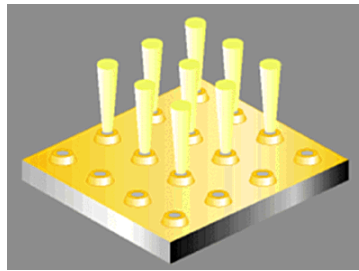


Figure 4 : Emission matricielle des VCSELs

Ces propriétés uniques expliquent le nombre croissant d'applications basées sur ce type de sources dans des domaines aussi variés que les communications optiques, l'instrumentation, les capteurs, l'analyse biomédicale, la télémétrie laser, ou encore l'analyse de gaz (cf. tableau 1). Les applications émergentes des VCSELs dans le domaine des capteurs et de l'instrumentation ainsi que les principaux acteurs nationaux et internationaux actuels du domaine seront plus détaillés dans le chapitre 5, dédié à nos perspectives de recherche.

<b>VCSELs : Domaines d'application</b>	<b>Systèmes photonique correspondants</b>
Télécommunications optiques	Réseaux LAN, liens mobiles
Liens optiques	Liens cartes processeurs, transfert de données haut débit, stockage de l'information
Mémoires optiques	CD, DVD
Equipement optoélectronique	Imprimante, pointeur laser, outils mobiles
Traitement optique de l'information	Processeurs optiques, traitement parallèle
Détection optique	Détection de gaz, Détection fibrée, lecteurs de codes barres, souris optiques
Ecrans	Matrices de sources lumineuses, TV par projection
Eclairage	Micro-illuminateurs à intensité ajustable
Instrumentation	Télémétrie, Horloge atomique
Systèmes automobiles	Contrôle et transfert des données, télémétrie laser

Tableau 1 : Domaines d'application des VCSELs et systèmes photoniques correspondants ([39])

#### **1.4. Domaine spectral d'émission des VCSELs**

De nombreuses recherches ont visé ces vingt dernières années à étendre le domaine spectral d'émission des VCSELs en fonction des applications visées : l'infrarouge pour les télécommunications avec les fenêtres accessibles des fibres à base de silice à 1.31 et 1.55 $\mu\text{m}$ , le stockage de données étant quant à lui de plus en plus demandeur en sources lumineuses à courtes longueurs d'onde pour s'affranchir des phénomènes de diffraction. Enfin, l'affichage de données et la détection d'espèces atomiques par absorption ou par luminescence justifient l'extension du domaine des longueurs d'ondes vers le moyen IR.

Parmi l'éventail de matériaux disponibles pour les puits et les barrières, seuls certains sont compatibles, c'est-à-dire en accord de maille ou faiblement contraints. L'obtention de lasers performants à une longueur d'onde est donc tout d'abord liée à la technique possible de croissance de couples puits (éventuellement boîtes) quantiques/barrières émettant efficacement à cette longueur d'onde (fig.5). Outre ce nécessaire confinement des porteurs, les VCSEL requièrent de plus la réalisation de miroirs de forte réflectivité, typiquement 99%, en raison du faible gain apporté par le volume actif. Or la réflectivité des DBR, alternances périodiques de matériaux d'indices différents, augmente avec la différence d'indice des

matériaux mis en jeu et avec le nombre de périodes empilées. Ainsi, un DBR composé d'AlAs et de GaAs d'un VCSEL nécessite typiquement une vingtaine de périodes, alors que pour d'autres systèmes de matériaux (GaInAsP), les composés remplissant les conditions d'accord de maille présentent un faible contraste d'indice et imposent donc un nombre beaucoup plus élevé de périodes.

L'optimisation des DBRs est donc un point majeur, car les propriétés des miroirs déterminent également les résistivités électrique et thermique. En effet, une résistance électrique trop élevée d'un DBR conduira à une dissipation d'énergie inutile et à un échauffement de la zone active, sa résistance thermique empêchant l'évacuation de la chaleur et l'émission en régime continu à l'ambiante. Le tableau 2 donne un bref aperçu (non exhaustif) des matériaux et des choix technologiques qui ont été mis en œuvre pour couvrir la gamme spectrale jusqu'à l'infrarouge avec des VCSELs à pompage électrique.

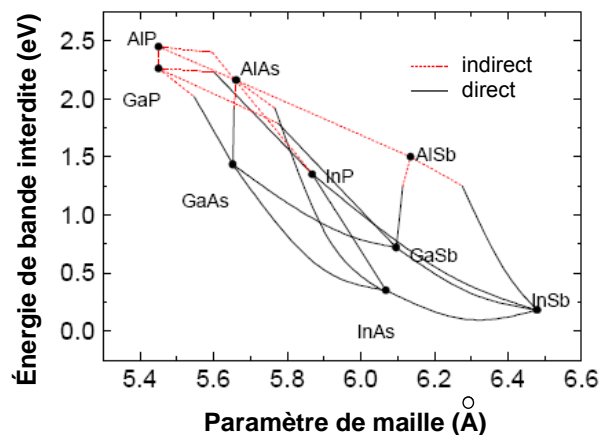


Figure 5 Energie de bande interdite en fonction de la longueur de maille des matériaux III-V

Longueur d'onde	Matériaux du puit/barrière	Matériaux des miroirs	Substrat	Remarques	Ref
1.55µm	In <sub>80</sub> Ga <sub>20</sub> As <sub>78</sub> P <sub>22</sub> / In <sub>80</sub> Ga <sub>20</sub> As <sub>38</sub> P <sub>62</sub>	DBR sup : GaAs/AlAs DBR inf : InP/InGaAsP	InP	Monolithique Bottom-Emitting Jonction-tunnel Implantation ion.	[11]
1.55µm	InGaAlAs/ InP	Al <sub>15</sub> Ga <sub>85</sub> As <sub>58</sub> Sb <sub>42</sub> / AlAs <sub>46</sub> Sb <sub>44</sub>	InP	Bottom-Emitting	[12]
1.3µm	InGaAsP/ InP	DBR sup. Si/SiO <sub>2</sub> DBR inf. AlAs/GaAs	GaAs	Wafer fusion Cavité/DBR inf.	[13]
1.3µm	Boîtes InAs/GaAs	DBR sup. Si/SiO <sub>2</sub> DBR inf. AlAs/GaAs	GaAs	Technologie émergente	[15]
850nm	GaAs/GaAlAs	Al <sub>20</sub> Ga <sub>80</sub> As/ Al <sub>90</sub> Ga <sub>10</sub> As	GaAs	Technique la plus mature	[14]
700nm	Al <sub>24</sub> Ga <sub>76</sub> As/ Al <sub>40</sub> Ga <sub>60</sub> As	Al <sub>40</sub> Ga <sub>60</sub> As/ Al <sub>96</sub> Ga <sub>4</sub> As	GaAs	Limite d'utilisation de AlGaAs	[17]
680nm	GaInP/ (Al <sub>50</sub> Ga <sub>50</sub> ) <sub>50</sub> In <sub>50</sub> P	Al <sub>50</sub> Ga <sub>50</sub> As/ AlAs	GaAs	Nbre de périodes DBR élevé	[18]
484nm	Cd <sub>20</sub> Zn <sub>80</sub> Se/ ZnSe	Diélectriques SiO <sub>2</sub> /TiO <sub>2</sub>	GaAs gravé	T=77K Bottom Emitting	[19]

Tableau 2 : Principaux matériaux étudiés pour couvrir la bande spectrale visible et infrarouge

## 1.5. Techniques d'épitaxie des VCSELs

Historiquement, la première technique utilisée pour élaborer les premiers VCSELs, qui étaient des structures hybrides (comprenant des miroirs diélectriques), a été la MOVPE [4]. Ensuite, la plupart des travaux ont porté sur la réalisation de VCSELs monolithiques par MBE, car cette technique réalise de façon plus aisée le contrôle des épaisseurs, des compositions et du dopage des couches. La possibilité d'utiliser des outils de contrôle in situ (RHEED, réflectance, analyse de surface, émissions thermiques...) a constitué également un atout pour la MBE qui a ainsi permis de démontrer les performances records de ces composants en terme de courant de seuil. Toutefois, la MOVPE autorise des vitesses de croissance plus élevées: elle semble donc être la technique la plus appropriée pour la production de VCSELs dans les filières standard (850 et 980nm).

D'autres avantages spécifiques comme la flexibilité des matériaux et dopants utilisables (ex : composition en Aluminium ajustable pour localiser finement le diaphragme d'oxyde dans les VCSELs de type AlOx) ainsi que la possibilité de réaliser des gradualités de composition continues aux interfaces lui ont même permis récemment d'obtenir des résultats supérieurs à ceux obtenus par MBE [22][20][**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**]. Actuellement les deux techniques sont utilisées. Cependant, pour mettre au point des VCSELs prospectifs, la MBE est souvent la technique la plus efficace comme en témoigne par exemple les résultats publiés sur les premiers VCSELs à base de puits de (Ga,In)(As,N) [**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**].

## 1.6. Sensibilité des VCSELs aux erreurs commises pendant l'élaboration

La croissance de VCSELs est très délicate car elle exige simultanément un contrôle très précis des épaisseurs, des compositions et du niveau de dopage des couches. Un VCSEL nécessite des profils de composition et de dopage sophistiqués aux interfaces des réflecteurs de Bragg distribués afin de réduire les résistances séries. De plus, les positions relatives des pics Fabry-Pérot et du maximum de gain des puits doivent être calculées pour coïncider à la température de fonctionnement prévue alors que leur loi de variation thermique est différente (fig.6).

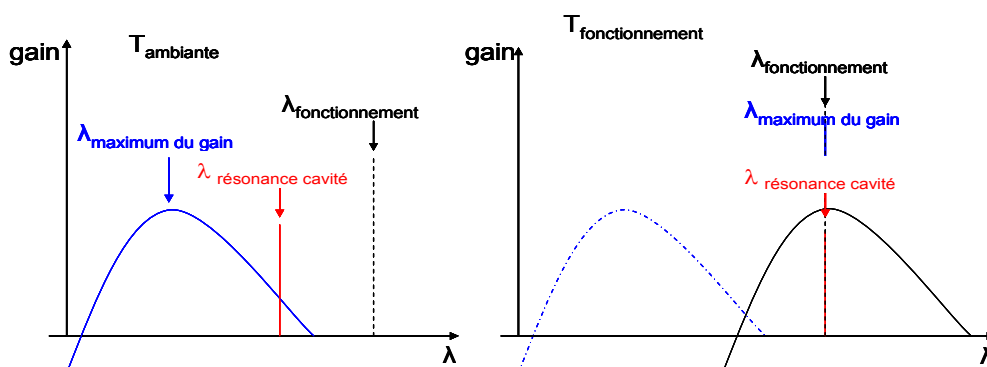


Figure 6 : Positions relatives du maximum de gain et du pic de résonance de la cavité à la température ambiante et à la température de fonctionnement

Pour élaborer des VCSELs dans des conditions optimales, il faut donc disposer d'un système d'épitaxie stable et reproductible bien étalonné ou disposer d'outils de contrôle in situ. Nous allons maintenant préciser les travaux que nous avons menés au LAAS dans ce contexte en précisant tout d'abord les résultats que nous avons obtenus sur la réalisation contrôlée de structures à commande optique, puis à commande électrique.

## 2. Travaux menés au LAAS : réalisation contrôlée de dispositifs à microcavité verticale unidimensionnelle

(Période 1992-1995) Doctorat en Physique de l'INSAT

Collaboration : équipe Optique Non Linéaire J. Collet, INSAT-LAAS

Publications : P1, P2, P3, P4, P5, P6, P12, P16, A1,

Conférences : CI.1, CI.2, CI.3, CI.4, CI.5, CN.1, CN.2, CN.3

### 2.1. Conception de modulateurs tout-optiques à cavité massive

Le premier volet de nos recherches sur les microcavités a porté sur la conception, la réalisation et la caractérisation de matrices de modulateurs tout optiques pour le traitement optique de l'information. Le principe consistait à exploiter une modification de la résonance Fabry-Pérot dans le spectre de réflectivité du micro-résonateur, couplée à des effets optiques non linéaires, pour réaliser une porte logique à commande optique conçue et caractérisée par l'équipe ONL-TI (Optique Non Linéaire et Traitement de l'Information, Jacques Collet, Michel Pugno) du Groupe Photonique.

Le principe de fonctionnement de ces modulateurs repose sur la variation non linéaire des indices optiques de la cavité sous l'effet d'une impulsion optique. Cette variation provoque un décalage spectral et en intensité de la résonance Fabry Pérot. Ainsi on peut passer d'un état bas ( $R_b$  très faible) à un état haut ( $R_h=1$ ) très rapidement et réaliser une fonction logique NON ET par réflexion. Le but final visait l'intégration de ce type de porte optique dans une architecture complète de traitement optique de l'information.

Il fallait donc maîtriser la position de la résonance avec une précision et une uniformité suffisante, diminuer le plus possible la valeur de la réflectivité à l'état initial afin d'obtenir un bon contraste et enfin disposer d'un temps de commutation de l'ordre de la nanoseconde.

Notre choix s'est porté sur la conception de structures Fabry-Pérot asymétriques à cavité en GaAs massif en nous inspirant des travaux de Tayebati sur l'exploitation des variations d'absorption dans la queue de Urbach du GaAs (effet Franz-Keldysh) sous commande électrique [21]. Cette approche permettait d'éviter les difficultés de réalisation liées au contrôle de zones actives à puits quantiques, jugées trop complexe pour une première démonstration, et de permettre une plus grande latitude spectrale pour la longueur d'onde de fonctionnement.

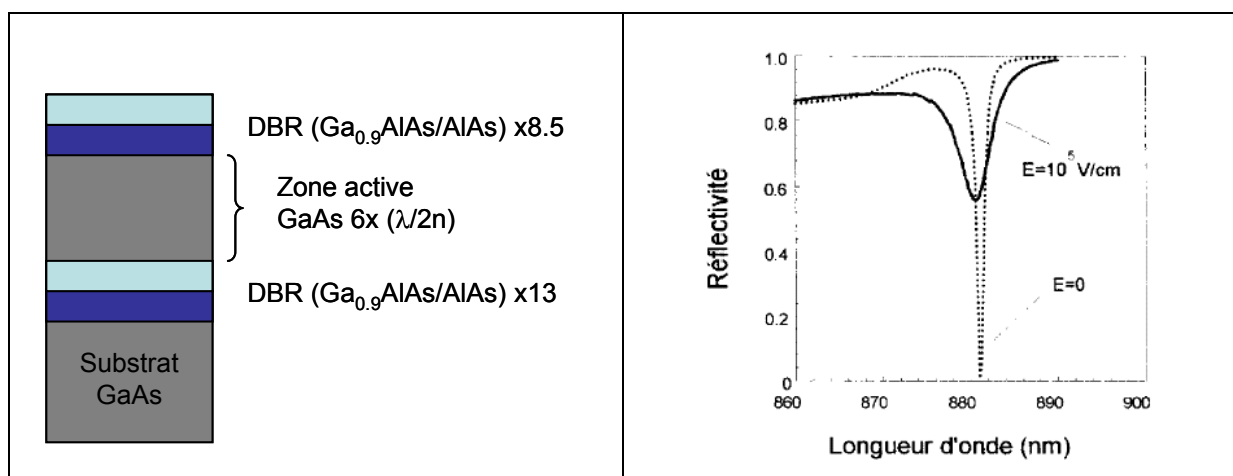


Figure 7 (a): Modulateur asymétrique à cavité en GaAs massif à 882nm basé sur la modification de la réflectivité sous excitation optique (b): spectres de réflectivité calculés en régime linéaire ( $E=0$ ) et en régime excité ( $E=10^5$ V/cm)

Nous avons donc adapté cette idée à l'application que nous visions sous commande optique à 885nm, grâce à un design de la réflectivité des structures en insérant la zone active entre deux réflecteurs de Bragg et en tenant compte de la variation des indices optiques en régime excité. Nous avons ainsi montré que l'on pouvait considérablement augmenter le contraste de réflectivité en travaillant dans la queue d'Urbach avec un modulateur comportant 8 périodes avant et 13 périodes arrière (fig. 6) [25].

Une première étude sur les multicouches  $(Ca,Sr)F_2/GaAs$  venait être menée dans l'équipe avant mon arrivée au laboratoire [26]. Cette étude avait conclu que la réalisation, dans le bâti d'épitaxie dont nous disposions, de structures résonnantes performantes passait nécessairement par le contrôle en temps réel de l'épitaxie. Ma thèse visait à développer une technique qui réalise cette opération. Nos efforts se sont donc focalisés sur la maîtrise de l'épitaxie par jets moléculaires (MBE) de ces structures à microcavité massive, par le contrôle du dépôt de chaque couche de manière à prévenir toute erreur sur les paramètres de croissance.

## 2.2. Contrôle de la croissance MBE de microcavités

L'élaboration d'une structure à cavité verticale exige une grande précision sur les épaisseurs et compositions de chacune de ses couches.

De nombreux éléments peuvent influencer sur ces paramètres et donc, en absence de contrôle in-situ, entraîner une erreur sur la géométrie des multicouches épitaxiées :

- le niveau de remplissage des cellules, modifiant la distribution spatiale du flux émis,
- la non-stabilité et reproductibilité des flux,
- les transitoires des flux consécutifs aux modifications de température des cellules,
- les transitoires des flux à l'ouverture des cellules,
- la variation de la température du substrat quand on dépasse  $650^\circ\text{C}$ , du fait de la forte influence sur la désorption du gallium de la surface,
- des problèmes mécaniques, entraînant, par exemple, un mauvais actionnement des caches des cellules.

Dans les années 90, ces difficultés rendaient la croissance des composants VCSEL très complexes. Aujourd'hui les bâtis disponibles sur le marché ont évolué et limitent ces problèmes. La réalisation de multicouches à la précision requise pour les VCSEL peut être maintenant obtenue en utilisant une méthodologie adaptée. Ce n'(était)/est pas le cas sur le bâti dont nous dispos(i)ons. La vitesse de croissance évolue très rapidement, surtout quand l'uniformité des dépôts est requise, ce qui nécessite l'utilisation d'une géométrie cellule-manipulateur (support de l'échantillon) particulière qui augmente cette sensibilité.

Pour compléter les calibrations extérieures et les mesures in situ par RHEED (Diffraction d'Electrons de Haute Energie en incidence rasante) de nombreuses techniques ont été exploitées pour effectuer le contrôle des épaisseurs déposées en temps réel. Parmi elles, se trouvent l'ellipsométrie spectroscopique (ES) [27], la pyrométrie optique [28], la mesure optique des flux en temps réel (OFM) [33] et la réflectométrie dynamique [30][31]. A ces techniques on peut ajouter la mesure résolue en longueur d'onde de l'émission thermique du substrat [29]

Nous avons développé une technique originale, basée sur des mesures de Réflectométrie Dynamique (RD). Au départ de notre étude, cette technique, utilisée par quelques laboratoires, n'était pas suffisamment performante pour l'objectif que nous visions. Ces groupes employaient comme source un laser He-ne ou argon et leurs mesures étaient limitées à une seule longueur d'onde. Notre équipe a développé une approche de cette technique, en exploitant un laser accordable (RDA), qui permet une analyse multi-spectrale, inspirée des travaux de Pelletier [35]. Nous allons rappeler brièvement le principe et l'efficacité de cette technique pour le contrôle en temps réel de la croissance des multicouches visées. Remarquons que, pratiquement simultanément à nos travaux, d'autres équipes ont développé une technique du même type, d'analyse spectrale de la réflectivité dynamique, qui est depuis commercialisée par une société américaine [32]. Toutefois, à notre avis, la technique RDA et la méthodologie associée, est plus efficace.

### 2.2.1. Réflectométrie Dynamique (RD)

La Réflectométrie Dynamique (RD) consiste à envoyer sur la surface d'une structure en cours de croissance un faisceau de lumière, de longueur d'onde fixe, sous une incidence quasi-normale et à observer les variations de l'intensité du faisceau réfléchi en fonction de l'épaisseur déposée (fig.8). La période des oscillations observée est liée à l'épaisseur optique du matériau déposé. Cette technique, bien connue des opticiens et déjà utilisée pour contrôler les dépôts diélectriques, a été appliquée dans la fin des années 80 pour le contrôle de l'épitaxie. Elle a été aussi, et est toujours exploitée pour contrôler l'attaque des structures par Gravure Ionique Réactive. Elle est en effet directement utilisable pour étalonner in situ les vitesses de croissance (ou d'attaque) de couches épaisses.

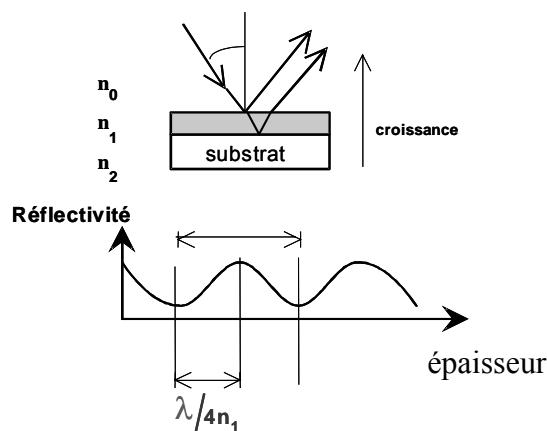


Figure 8 : Principe de la Réflectométrie Dynamique à longueur d'onde fixe

Pour les multicouches, le contrôle est plus complexe. En général, les couches d'une multicouche ne sont pas des quarts d'onde des longueurs d'onde d'analyse.

Les microcavités verticales présentent cette particularité à la température ambiante pour la longueur d'onde visée pour leur fonctionnement. Toutefois, elles s'écarteront de cette condition quart d'onde à leur température de croissance, puisque les indices optiques des différents matériaux qui les constituent varient différemment avec la température. De ce fait, leur réflectivité en croissance présente une forme complexe, quelle que soit la longueur d'onde d'analyse choisie, si elle est fixe (fig.9). La transition entre deux matériaux n'est identifiable que par un léger changement de pente dans le signal de réflectivité, difficilement repérable en cours d'expérimentation.



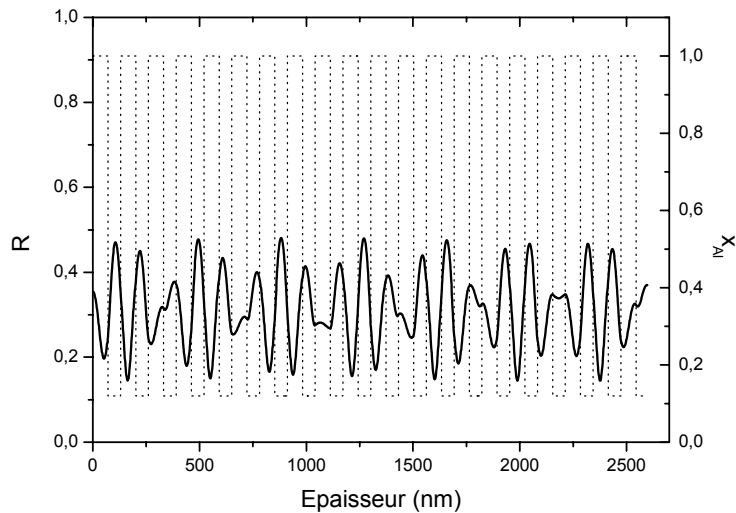


Figure 9: contrôle par RD à 633 nm de la croissance d'un miroir de Bragg GaAs-AlAs : réflectogramme calculé et composition en aluminium correspondante (mouvements des caches des cellules)

### 2.2.2. Réflectométrie Dynamique Accordable (RDA)

La Réflectométrie Dynamique Accordable (RDA), que nous avons mise au point pour les semi-conducteurs III-V en nous inspirant des travaux de Pelletier déjà réalisés sur les couches minces diélectriques, donne quant à elle la possibilité de sélectionner la longueur d'onde la plus adaptée à la commande de la croissance d'une couche d'épaisseur donnée d'une structure complexe.

Cette longueur d'onde optimale est celle pour laquelle un extremum de la réflectivité, point singulier facilement repérable, est obtenu quand l'épaisseur visée pour la couche est atteinte (fig. 10 et 11). Il suffit ensuite, lors de la phase d'élaboration, de sélectionner pour chaque couche de la structure la longueur d'onde calculée et, quand l'extremum de réflectivité est atteint, d'actionner les caches des cellules pour changer de matériau. Cette procédure garantit l'obtention de l'épaisseur visée pour chaque couche.

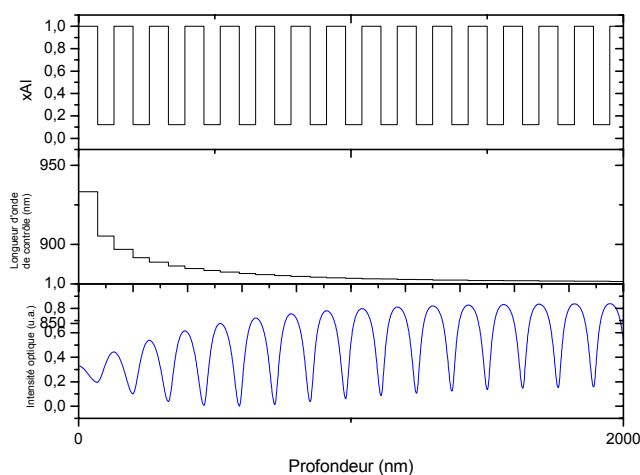


Figure 10 : contrôle par RDA de la croissance d'un miroir de Bragg de 15 périodes  $\text{Al}_{0,12}\text{Ga}_{0,88}\text{As}$ -AlAs visé centré à 840nm : composition en aluminium des couches (mouvement des caches), longueurs d'onde optimales de contrôle et réflectogramme.

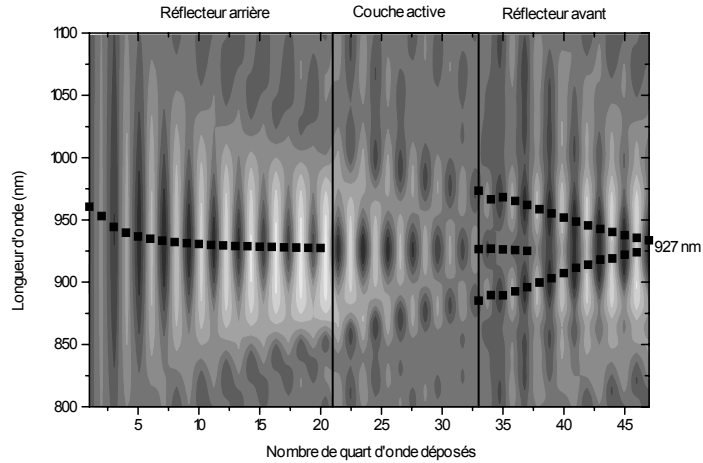


Figure 11 : Simulation 2D du spectre de réflectivité à la température d'élaboration d'une microcavité asymétrique à couche active en GaAs massif visé à 885nm au cours de sa croissance et longueurs d'onde optimales de contrôle associées.

### 2.2.3. Détermination de la dispersion des indices des alliages GaAlAs à haute température

L'application de la technique RDA à la croissance de microcavité n'aurait pas été possible sans la mesure préalable de la dispersion des indices optiques des matériaux étudiés aux températures de croissance (fig. 11). Nous avons mis au point une méthode pour extraire ces données de réflectogrammes mesurés *in situ* à différentes longueurs d'onde pendant la croissance de couches étalons, dont l'épaisseur était calibrée ensuite par double diffraction X.

Ces mesures, réalisées entre 720nm et 920nm et dans la gamme [400-600°C], ont permis de mesurer, pour la première fois, la dispersion des indices optiques des matériaux dans cette gamme de température et de longueur d'onde pour le binaire GaAs ainsi que pour les alliages ternaires (Ga,Al)As et ont démontré la validité du modèle empirique de Moss sur les III-V [36]

Ce modèle prévoit que la variation thermique des indices est liée à celle du gap [37]. Cette validation nous a conduits à l'intégrer dans notre logiciel de conception des structures qui tient également compte de la variation thermique du paramètre de maille. Ce logiciel nous permet encore aujourd'hui de simuler la réflectivité des structures en tenant compte des effets de la température, pour l'épitaxie, mais aussi pour d'autres procédés technologiques, comme le contrôle optique de l'oxydation thermique à 400°C [38].

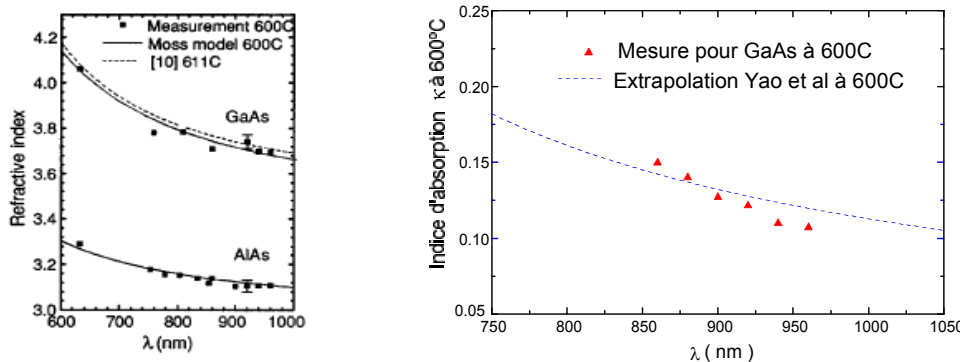


Figure 12 : Mesures *in situ* à haute température et comparaison avec la loi de Moss de la dispersion des indices de réfraction (a) et d'absorption (b) des binaires GaAs et AlAs

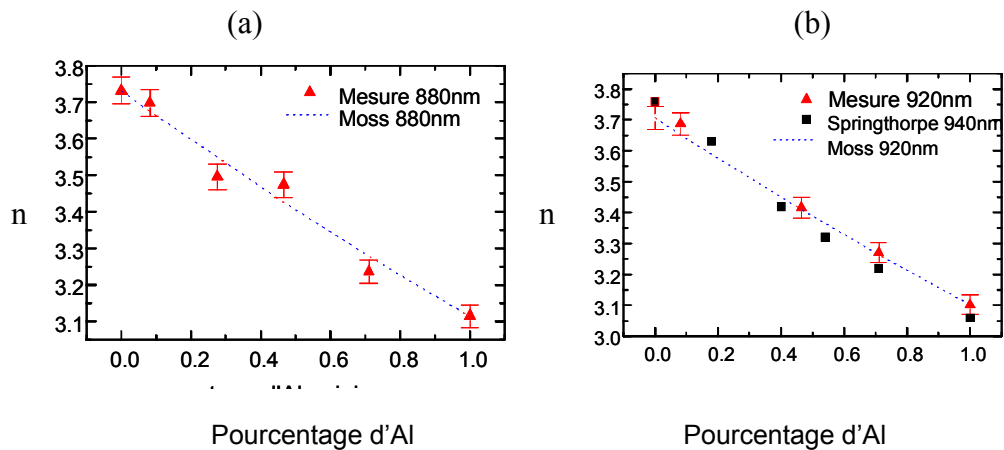


Figure 13 : Mesures *in situ* des indices de réfraction à 880nm (a) et 920nm (b) ayant permis la validation de la loi de Moss pour les alliages GaAlAs en fonction du pourcentage d'Al

### 2.2.4. Uniformité des dépôts

Pour les couches d'épaisseur mesurable par RDA, le contrôle n'est effectué que sur un point particulier du substrat. Il faut donc que l'uniformité soit garantie pour pouvoir utiliser la RDA. Dans le bâti que nous avons utilisé (Riber 32), en position standard ou "nominale", les cellules convergent vers le centre du molyblock à la surface du substrat. Cette géométrie permet d'obtenir une uniformité de l'ordre de 5% sur un rayon de 15mm, ce qui correspond à une variation de la longueur d'onde du mode de la cavité de l'ordre de 50nm (soit environ 5%), beaucoup trop importante.

On peut toutefois améliorer cette situation en appliquant la solution proposée par le constructeur, qui consiste à décaler le porte-substrat par rapport à sa position standard de  $21^\circ$ . Cette situation définit la géométrie optimale de croissance, qui permet d'obtenir une uniformité en épaisseur évaluée par le constructeur à 1,3% sur un rayon de 35 mm. La figure 14 présente schématiquement ces deux positions de croissance et l'uniformité des dépôts suivant l'angle par rapport à la position standard. Toutefois, l'uniformité n'est atteinte que si l'utilisation de la position optimale est associée à la rotation du porte-substrat. C'est cette position qui a été utilisée pour la croissance de toutes nos structures à microcavité. Un hublot spécifique a été en effet intégré dès la conception du bâti avec un hublot convenablement placé pour autoriser un accès optique pour la RDA.

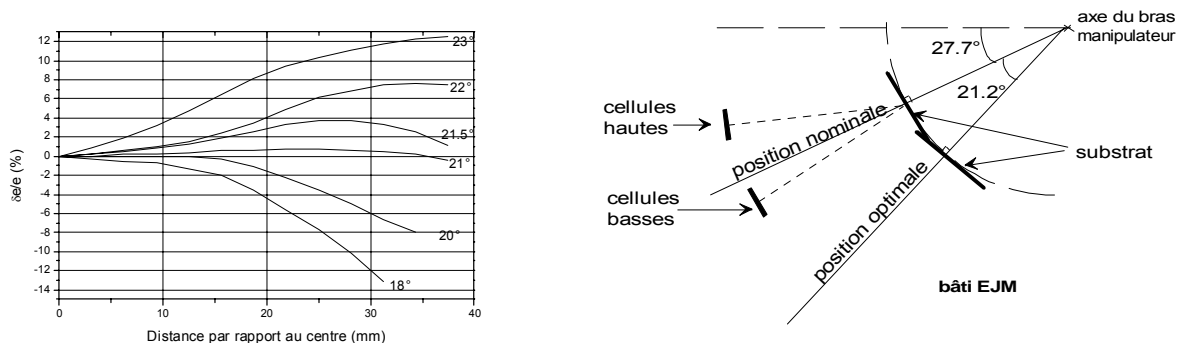


Figure 14 : Représentation schématique des positions nominale et optimale dans le bâti Riber 32

## 2.2.5. Résultats obtenus

Cette technique RDA nous a permis de contrôler la croissance de réflecteurs de Bragg et de microcavités III-V en position optimale avec une précision sur chaque épaisseur meilleure que 1% (figure 15). En utilisant aussi la géométrie d'uniformité, nous avons en particulier réalisé des structures résonnantes dont la longueur d'onde de centrage est positionnée avec une précision meilleure que 0.2% avec une uniformité meilleure que 1% sur plusieurs cm<sup>2</sup>. [39]

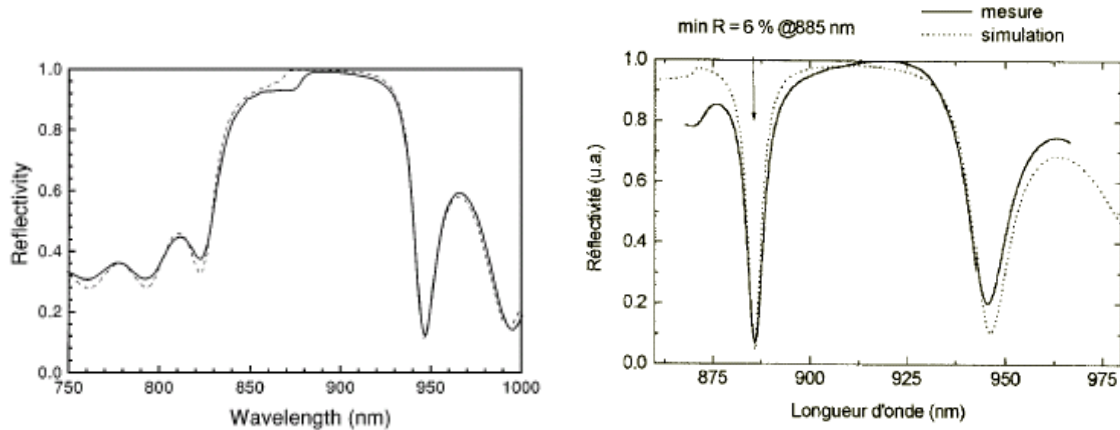


Figure 15 : Comparaison des spectres calculés (pointillés) et mesurés (traits pleins) de structures contrôlées par RDA : (a) Miroir de Bragg et (b) microcavité asymétrique à 885nm

Cette technique nous a par la suite permis de réaliser en géométrie optimale sans étalonnage préalable des microcavités de type VCSEL dont la longueur d'onde de centrage est positionnée avec une précision meilleure que 0.2% sur plusieurs cm<sup>2</sup> [**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**] (cf. paragraphe 3.2).

Le dispositif expérimental initial de la RDA était basé sur un laser accordable Titane: Saphir émettant dans la gamme 740-920nm; nous avons souhaité l'améliorer grâce à l'utilisation d'une source de lumière blanche fibrée (lampe halogène), d'une tête optique et de deux monochromateurs prévus pour les gammes de longueurs d'onde [600nm-1,1µm] et [900nm-1,5µm]. Nous visions une plus grande souplesse d'utilisation, et un choix de longueurs d'onde de contrôle beaucoup plus large, qui nous ouvrirait la possibilité de contrôler des structures pour les applications télécommunications à 1,3µm. Toutefois, l'utilisation de ce nouveau système n'a pu être exploitée dans cette perspective. L'accès optique est très délicat à réaliser sur le bâti d'épitaxie dont nous disposons qui n'est pas optimisé à cette fin.

Une variation légère de la position mécanique du manipulateur d'échantillon, après son démontage, nous a empêchés ces dernières années d'obtenir un accès optique pour la RDA en position optimale. Une étude récente a montré qu'il était impossible de réaliser des composants de ce type avec la précision requise sur les épaisseurs avec le bâti dont nous disposons sans ce contrôle optique [41]. Nous allons recevoir prochainement un nouvel équipement beaucoup plus performant (stabilité, reproductibilité). Les techniques standard de calibration permettront par l'utilisation d'une méthodologie appropriée, éprouvée dans notre laboratoire, la réalisation contrôlée de structures à microcavité. La technique y sera implémentée en vue d'un suivi et non plus d'un contrôle en temps réel, et les complètera.

## 2.3. Résultats obtenus sur la caractérisation des structures

### 2.3.1. Configuration pompe-sonde picoseconde

L'étude des structures réalisées pour la modulation a été réalisée en configuration pompe sonde picoseconde en collaboration avec l'équipe ONLTI [42,43]. Un contraste supérieur à 10 : 1 a été obtenu à température ambiante à la longueur d'onde visée et avec une uniformité de 1% sur plusieurs cm<sup>2</sup>, apportant une amélioration significative par rapport aux composants à base de matériaux II-VI étudiés jusqu'alors. Une implantation avec des protons de la zone active des modulateurs a cependant été nécessaire pour diminuer le temps de vie des porteurs photogénérés et permettre un retour à l'état initial dans des conditions acceptables (fig. 16), ce qui nous a permis d'atteindre des bandes passantes de l'ordre du GHz. L'insertion de GaAs élaboré à basse température dans la zone active a été également envisagée pour réduire de manière intrinsèque la durée de vie des porteurs [44].

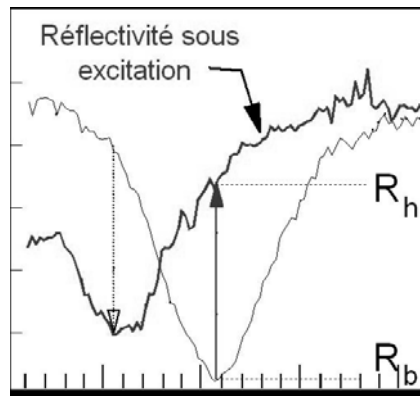


Figure 16 : Réflectivité mesurée en régime pompe-sonde picoseconde dose:  $10^{18}$  ions H<sup>+</sup>/cm<sup>2</sup> E=30- 40  $\mu$ J/cm<sup>2</sup> ( densité de plasma photogénéré  $2 \cdot 10^{18}$  cm<sup>-3</sup> )  $\Delta t=33$ ps Contraste : Rb=5-6% / Rh=60%

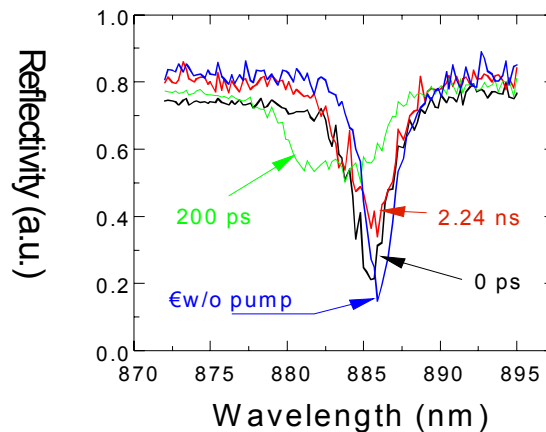


Figure 17 : Effet de l'irradiation protonique de la zone active : la réflectivité du modulateur retourne à son état initial après 2.24ns.

Bien que plus faible que celle nécessaire pour les structures à base de semi-conducteurs II-VI à température ambiante, l'énergie de commande de ces dispositifs s'est avérée encore trop élevée (20-40  $\mu$ J/cm<sup>2</sup> au lieu du  $\mu$ J/cm<sup>2</sup>). Pour la réduire, nous avons donc tenté d'appliquer un champ électrique sur ce type de structure et avons dopé les miroirs de

Bragg pour former une diode p-i-n pré-polarisable. Cependant, ces structures n'étaient pas optimisées du point de vue électrique et les miroirs comportaient des interfaces abruptes, ce qui nous a empêchés d'obtenir des améliorations suffisantes.

Ces dispositifs ont constitué la base de départ de nos études ultérieures sur les microcavités à pompage électrique.

### 2.3.2. Diffraction en mélange à 4 ondes

Des explorations complémentaires de ces structures ont été menées par l'équipe ONLTI dans des configurations en mélange à 4 ondes dégénéré (DFWM) (exploitation de non linéarités d'ordre 3) et ont permis de démontrer l'intérêt d'une microcavité pour réaliser des déflecteurs tout optiques [45,46]. Comme on peut le voir sur la figure 18, l'efficacité de diffraction peut être augmentée de deux ordres de grandeur à la résonance par rapport à un échantillon de référence ne comportant pas de cavité ( $\eta \approx 2 \times 10^{-3}$ ).

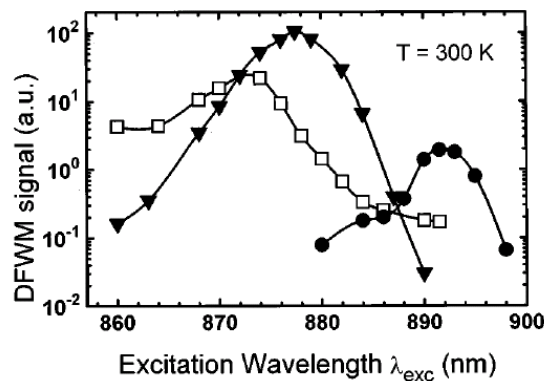


Figure 18 : Comparaison du signal DFWM d'une microcavité résonante en GaAs en incidence normale (892nm, cercles) et oblique (878nm, triangles) avec le signal obtenu sur un échantillon de référence (carrés évidés) : on observe une augmentation d'un facteur 400 grâce à l'effet de microcavité.

### 2.3.3. Exploitation de l'effet Stark tout-optique

Les structures précédemment décrites ont été également exploitées pour étudier l'intérêt de l'effet Stark tout optique dans le cadre la thèse de Stéphanie Sanchez, sous la direction de Michel Pugno et de Carlos de Matos (thèse soutenue en 2003). Comme dans le cas précédent, l'énergie des photons excitateurs est non résonnante avec l'énergie de bande interdite, c'est-à-dire que l'on ne se trouve pas en régime de couplage fort.

Cette fois-ci, contrairement aux études précédentes, on excite le matériau intra-cavité dans sa région de transparence (15 meV sous le gap, c'est-à-dire à 880nm). Le but est d'exploiter une modification de la fonction diélectrique sans phénomène dissipatif. Ainsi on peut espérer atteindre des énergies de commande plus faibles et des retours à l'état initial instantanés. Des essais comparatifs à forte ( $1.2 \text{ mJ/cm}^2$ ) et faible énergie ( $6 \mu\text{J/cm}^2$ ) ont montré que dans le dernier cas, on pouvait obtenir un effet ultra-rapide (à l'échelle de la picoseconde) avec un contraste de modulation de réflectivité de 5 : 1 à l'ambiante, ce qui représente une amélioration importante par rapport au cas précédent [47].

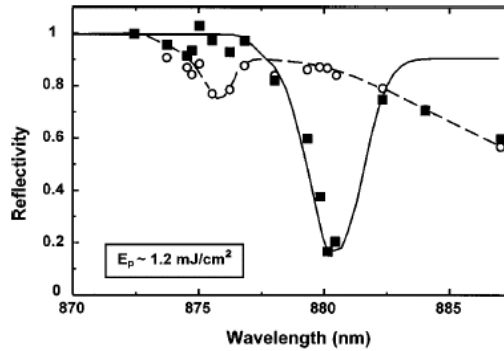


Figure 19 : Comparaison des spectres de réflectivité sans excitation et sous excitation : on atteint un contraste de 5 :1 à l'échelle sub-nanoseconde.

## 2.4. Conclusions : vers le pompage électrique...

Les principaux résultats marquants que nous avons obtenus dans cette première période concernent le développement d'une technique originale de contrôle en temps réel de l'épitaxie, la Réflectométrie Dynamique Accordable (RDA), qui a rendu possible la réalisation précise et uniforme de réflecteurs de Bragg et de microcavités verticales à base de composés III-V.

Cette technique a également permis la mesure sur une large gamme de la dispersion des indices optiques des alliages (Ga,Al)As à haute température ainsi que la validation de la loi de Moss pour ces composés. Enfin, nous avons pu réaliser et étudier dans des dispositifs modulateurs pour le traitement tout-optique de l'information (effet Franz-Keldysh et effet Stark) ainsi que pour la déflexion ultra-rapide de faisceaux lumineux.

Enfin, ces premières études nous ont ouvert la voie vers la réalisation de composants VCSELs à pompage électrique par la démonstration de notre capacité à élaborer des multicouches avec la précision requise. Outre l'intérêt pour leur application comme émetteurs matriciels, ces dispositifs constituent des démonstrateurs d'une grande richesse. Ils contiennent en effet tous les éléments critiques des structures de cette géométrie : résonateurs de haute finesse avec zone de gain à puits quantiques, injection électrique délicate, technologie complexe,... Autant de défis que nous avons souhaité relever.

La maîtrise de ces sources nous permettait en effet d'accéder aux autres fonctions optiques accessibles aux structures à microcavité verticale, modulation, déflexion, génération d'impulsions, ..., et de les associer. C'est pour l'ensemble de ces raisons que nous avons ensuite concentré nos efforts sur la réalisation de VCSELs.

### **3. Travaux menés au LAAS : Réalisation contrôlée de VCSELs monomodes**

*(Période 1996-2000)*

*Post-doctorat EPFL puis intégration au LAAS-CNRS*

*Co-encadrement de F. Van Dijk avec C. Fontaine*

*Publications : P7, P8, P9, P10, P11, A2, A3, A4,*

*Conférences : CI.6, CI.7, CN.4, CN.5, I1, I2, W1, W2, W4*

#### **3.1. Ingénierie des diagrammes de bande dans les miroirs de Bragg**

Lors de mon séjour post-doctoral à l'EPFL dans l'équipe de Marc Illegems, j'ai été impliquée dans plusieurs projets visant la réalisation par épitaxie par jets moléculaires de dispositifs optoélectroniques à microcavité pour l'étude du couplage fort (structures à cavités couplées), l'étude de diodes électroluminescentes à microcavité (P.Royo) [48] ainsi que de structures à guides d'onde pour la démonstration de matériaux à bande interdite de photons (D. Labilloy) [49][50].

Un autre aspect de mon activité a concerné l'étude de la réduction de la résistance série des réflecteurs de Bragg distribués pour la réalisation de composants à microcavité fonctionnant à l'ambiante. J'ai abordé ce problème à l'EPFL puis je l'ai approfondi avec F. Van Dijk (doctorant de 1996 à 1999) et C. Fontaine après mon intégration au LAAS en 1997 en visant la réalisation d'un VCSEL à injection électrique à diaphragme d'oxyde enterré.

Les miroirs de Bragg sont des éléments-clé des structures de type VCSELs. Ils ont une influence primordiale sur le fonctionnement électrique du composant puisqu'ils assurent la fonction d'injection de porteurs dans la cavité. A ce titre, leur résistivité doit être la plus faible possible. Elle est en effet déterminante pour la résistance série de la structure qui conditionne le comportement thermique et donc les caractéristiques optiques du VCSEL.

C'est cet objectif qui nous a poussés à porter nos efforts sur l'amélioration de la conduction des porteurs aux nombreuses interfaces que comprend un miroir de Bragg et sur la minimisation du problème de diffusion du dopant béryllium dans les miroirs de type P. D'une part, la discontinuité de la structure des bandes à l'interfaces entre couches adjacentes du miroir conduit en effet à la présence de nombreuses barrières de potentiel dont la hauteur et l'épaisseur doivent être minimisées pour faciliter la conduction des porteurs à travers la multicouche. D'autre part, le dopage des couches de type P à fort taux d'Aluminium peut conduire à une diffusion importante du Béryllium qu'il faut maîtriser.

Après avoir modélisé la structure de bande des miroirs grâce au logiciel « SimWindows » [51], nous avons d'une part introduit des pseudo-alliages aux interfaces successives des deux miroirs de façon à favoriser l'effet tunnel ; nous avons d'autre part étudié la distribution du Béryllium dans le DBR de type p au moyen de mesures SIMS (Secondary Ion Mass Spectroscopy). Nos études ont montré que ce dopant a tendance à diffuser des couches à forte composition en aluminium pour s'accumuler dans les couches riches en gallium. Ce phénomène est d'autant plus important que la température de croissance augmente. Il est donc nécessaire d'abaisser celle-ci pendant la croissance des zones de type p. La température que nous avons choisie (480°C) résulte d'un compromis entre l'obtention d'un profil de dopage correct et d'une bonne qualité cristalline du matériau élaboré. Des tests électriques ont été réalisés sur des structures optimisées et ont permis l'obtention d'une résistivité de  $3.6 \cdot 10^{-6} \Omega\text{cm}^2$  par période AlAs/  $(\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88})\text{As}$ , ce qui est comparable aux meilleurs résultats de la littérature [52].



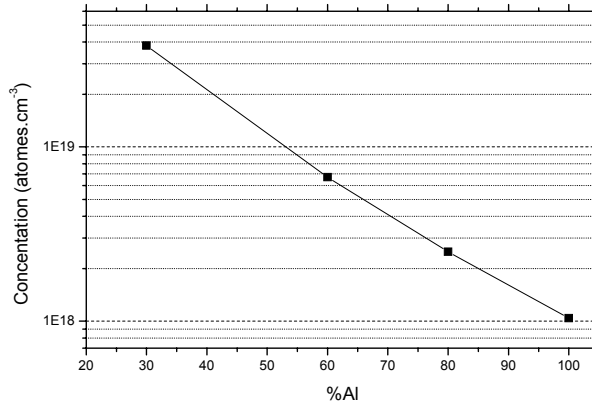


Figure 20 : Concentration maximale de béryllium incorporé en fonction du pourcentage d'Al pour un dopage nominal visé à  $4.3 \cdot 10^{19}$  atomes.cm<sup>-3</sup>.

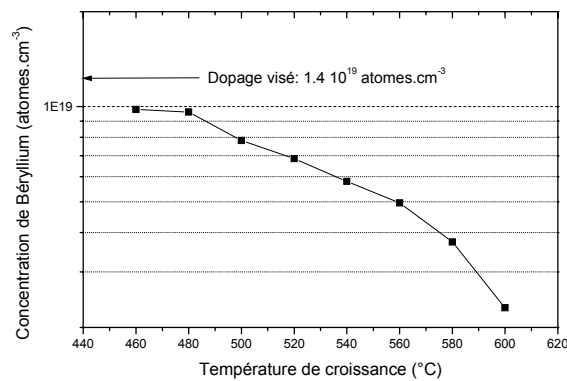


Figure 21 : Variation de la concentration de béryllium incorporé dans les couches d' $Al_{0.6}Ga_{0.4}As$  en fonction de la température de croissance

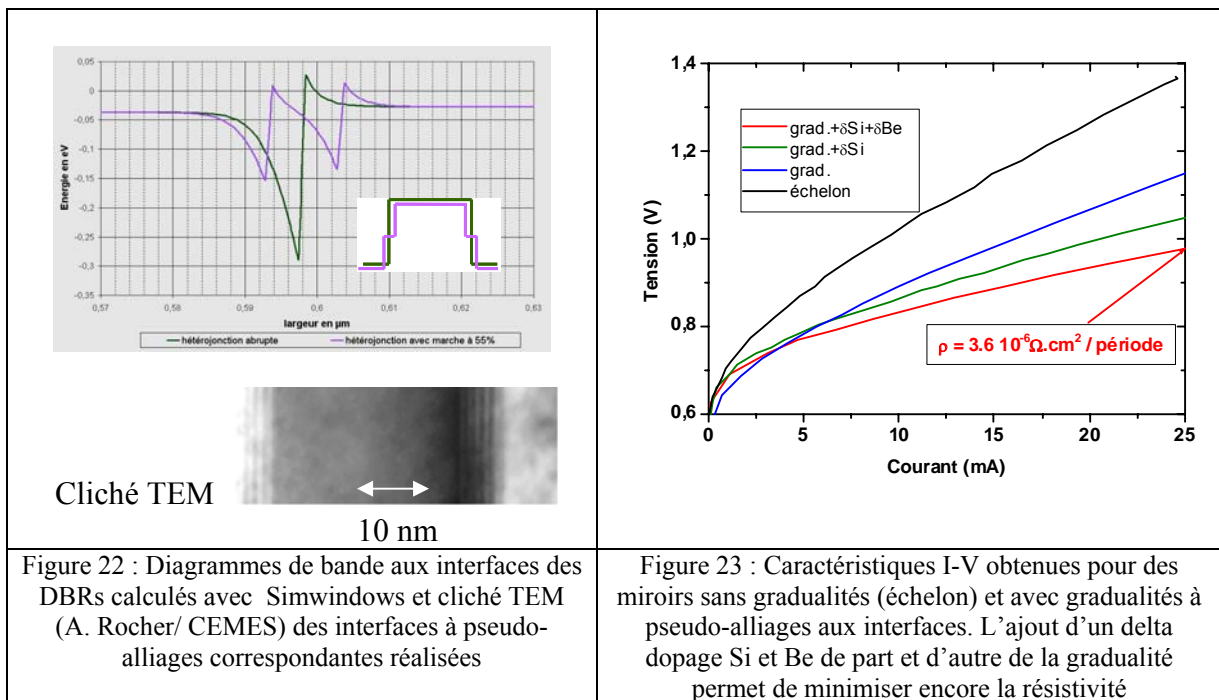


Figure 22 : Diagrammes de bande aux interfaces des DBRs calculés avec Simwindows et cliché TEM (A. Rocher/ CEMES) des interfaces à pseudo-alliages correspondantes réalisées

Figure 23 : Caractéristiques I-V obtenues pour des miroirs sans gradualités (échelon) et avec gradualités à pseudo-alliages aux interfaces. L'ajout d'un delta dopage Si et Be de part et d'autre de la gradualité permet de minimiser encore la résistivité

Ces études ont dégagé les caractéristiques des miroirs de Bragg les mieux adaptés aux VCSELs que nous visions : profil optimal des concentrations en éléments III et des dopants, et conditions de croissance.

### 3.2. Réalisation de VCSELs sous contrôle RDA

Grâce à l'expérience acquise précédemment sur la croissance de structures pour la modulation, nous avons réalisé des structures VCSELs par MBE sous contrôle optique en temps réel RDA (cf paragraphe 2.4).

Nous avons intégré les contraintes particulières imposées par les VCSELs : température de croissance variable (620, 700 et 480°C), désorption du gallium à haute température, présence de puits quantiques, pseudo-alliages aux interfaces... et modifié notre logiciel de conception de la croissance (calcul des longueurs d'onde optimales) dans ce but.

Grâce à cette technique en temps réel, les spectres de réflectivité mesurés sur les structures laser élaborées sont en très bon accord avec la simulation, résultat confirmé par des mesures par microscopie électronique à transmission (MET). Les résultats obtenus sur les valeurs mesurées des longueurs d'onde du mode Fabry – Pérot ont validé l'efficacité de la technique de contrôle en temps réel développée dans l'équipe avec une précision sur les épaisseurs déposées meilleure que 0.4% et une variation relative de cette longueur d'onde sur un rayon de 2cm de plaquette inférieure à 0.3%. Cette mesure a été ensuite confirmée par la mesure de la longueur d'onde du pic d'émission laser de VCSELs le long du rayon de la plaquette [52].

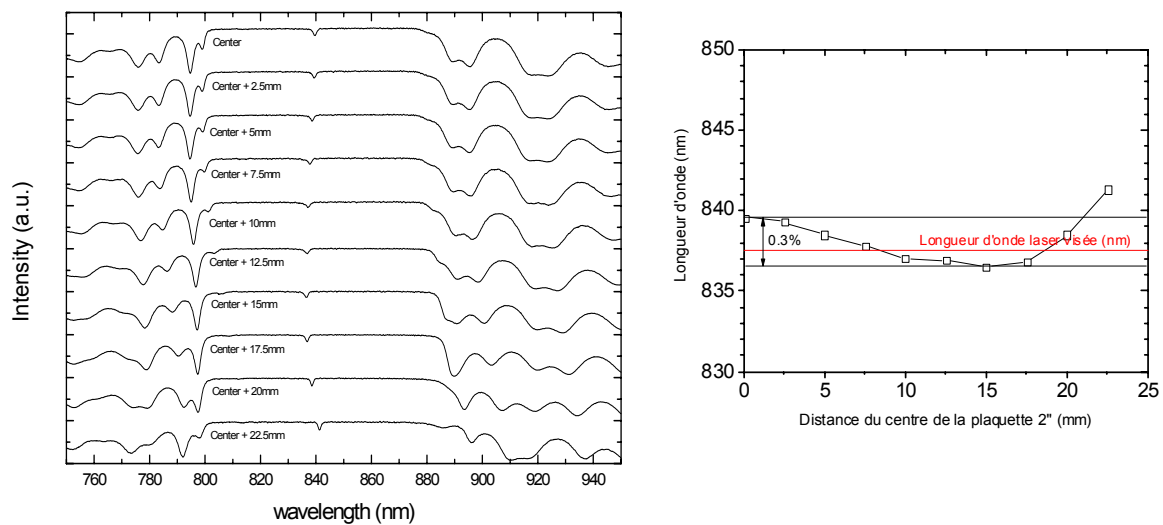


Figure 24: Spectres de réflectivité mesurés et uniformité de la longueur d'onde laser obtenue sur une plaquette VCSEL de 2'' réalisée sous contrôle RDA

### 3.3. Oxydation latérale enterrée (AlOx) pour le confinement électrique transverse

Nous avons parallèlement mis au point les étapes technologiques qu'il est nécessaire d'appliquer aux structures épitaxiées pour obtenir des composants VCSEL.

Le VCSEL est un composant laser particulier qui exige de sacrifier à un impératif qui rend sa fabrication sophistiquée : la nécessité de réaliser un confinement optique et électrique perpendiculairement à la structure épitaxiée.

Le confinement électrique transverse dans un VCSEL peut être obtenu par plusieurs techniques : l'implantation, la gravure de mésas et enfin la réalisation d'un diaphragme diélectrique enterré par oxydation latérale près de la zone active après gravure du mesa. Cette dernière technique est la seule qui permet d'obtenir simultanément un confinement électrique

et optique efficace pour les faibles tailles de zone active et a ainsi conduit à la réalisation reproductible de VCSELS monomodes [8][9][10].

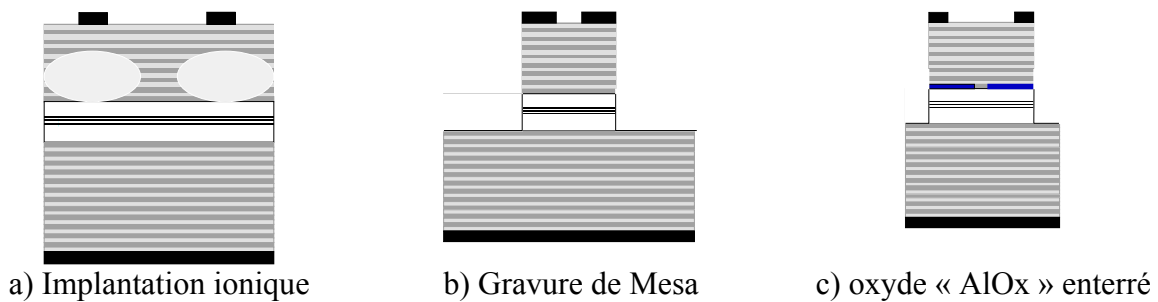


Figure 25 : Principales méthodes de confinement dans un VCSEL à pompage électrique

Ces différentes technologies ont été développées dans les années 90 par de nombreux groupes de recherche internationaux [8,9] et nationaux (Thales, IEMN, LETI-CEA, LAAS). Nous avons été les premiers à mettre en œuvre la technologie AlOx en France. Cette technologie constitue encore aujourd'hui un point fort de notre équipe.

Un four d'oxydation thermique a été développé pour réaliser cette oxydation sélective. Une étude des principes de formation des diaphragmes diélectriques par oxydation humide d'alliages (Ga,Al)As riches en aluminium a été menée en collaboration avec le service TEAM du laboratoire, en particulier avec Pascal Dubreuil qui a soutenu en décembre 2000 son mémoire CNAM sur ce thème (co-encadré avec A. Muñoz-Yagüe) [53]. Il a en particulier porté sur l'étude des moyens de contrôle de la vitesse d'oxydation et du blocage qui assure une sélectivité de ce processus d'une des couches riches en Aluminium.

La technique que nous avons développée consiste à former un diaphragme d'AlOx par l'oxydation de la couche d'AlAs du miroir supérieur la plus proche de la cavité, après blocage de l'oxydation dans le reste du miroir par un recuit rapide (figure 26).

En ce qui concerne la planarisation/passivation du composant, le BCB a été choisi pour ses très bonnes propriétés de planarisation, pour sa capacité de passivation et ses excellentes qualités optiques. Nous avons mis au point une procédure d'utilisation de ce polymère qui soit adaptée aux processus de fabrication technologique des VCSELS.

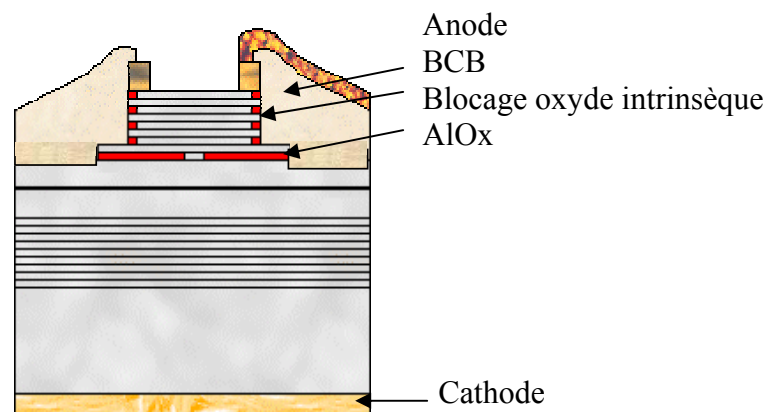


Figure 26 : Vue en coupe d'un VCSEL avec création préalable d'un oxyde de blocage périphérique par recuit RTA, avant formation du diaphragme d'oxyde enterré (AlOx) placé au dessus de la cavité. La passivation de la surface est assurée par un dépôt de BCB.

Nous avons ainsi obtenu fin 1998 les premiers VCSELs à diaphragme d'oxyde français émettant en continu à l'ambiante. La mesure de la puissance optique en fonction du courant a mis en évidence une densité de courant seuil de  $596 \text{ A.cm}^{-2}$  ce qui témoigne de la qualité optique des structures réalisées. La comparaison des puissances optiques et des tensions en fonction du courant, mesurées sur des composants avec et sans diaphragme d' $\text{AlOx}$ , a confirmé l'efficacité de cette dernière technologie qui diminue significativement et simultanément le courant et la tension de seuil laser.

C'est grâce à cette technologie qu'a été démontré un composant avec un seuil laser de  $190 \mu\text{A}$ , ce qui nous a situés au niveau des meilleurs résultats internationaux publiés sur ces composants (fig. 27). Enfin, des mesures du spectre d'émission ainsi que la visualisation du champ proche à la surface des composants ont mis en évidence les différents comportements spectraux et modaux obtenus (fig. 28) [54].

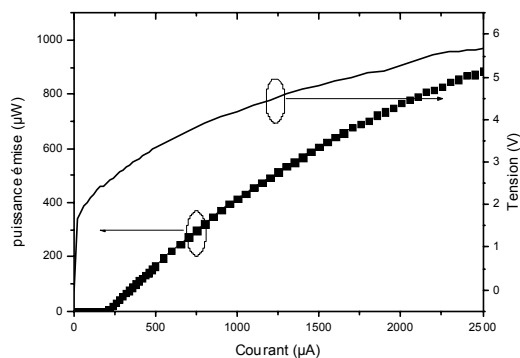


Figure 27 : Courbes puissance-courant et tension-courant d'un VCSEL à diaphragme d'oxyde enterré de  $8 \mu\text{m}$  de côté : le courant de seuil obtenu est de  $192 \mu\text{A}$ .

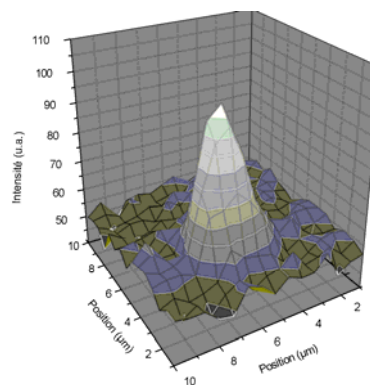


Figure 28 : Profil d'intensité en champ proche d'un VCSEL avec un diaphragme d' $\text{AlOx}$  de  $4 \mu\text{m}$  pour un courant de  $1 \text{mA}$

## Conclusions

Les efforts consentis sur la croissance, la technologie des structures multicouches à microcavité, puis sur la technologie des VCSELs à injection électrique sur GaAs nous ont permis de réaliser les premiers VCSEL à diaphragme d'oxyde en France, avec des performances d'émission au meilleur niveau international.

Comme nous le verrons par la suite, l'ensemble des briques technologiques que nous avons établies lors de cette phase fondatrice (épitaxie, étapes technologiques de fabrication : gravure, oxydation, passivation, métallisation) ont par la suite été améliorées et/ou adaptées pour répondre aux besoins nouveaux liés aux fonctions optiques avancées que nous avons étudiées pour ces sources laser. En particulier, l'étude de l'oxydation thermique humide dans les composés III-V riches en Aluminium a été approfondie depuis, car elle constitue l'axe central du projet de recherche de G. Almuneau, qui nous a rejoints en 2003 comme chargé de recherche.

Nous allons maintenant présenter les principales thématiques que nous avons ensuite traitées, qui ont toujours concerné les composants VCSEL, de la définition de nouvelles géométries de composant jusqu'à leur intégration dans des microsystèmes complets.

## Références

1. Toshihiko Baba, "Photonic Crystals and Microdisk Cavities based on GaInAsP-InP System" *IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS*, 3 (3), JUNE 1997
2. R. N. Hall, G. E. Fenner, J. D. Kingsley, T. J. Soltys, and R. O. Carlson. "Coherent Light Emission From GaAs Junctions" *Physical Review Letters* 9 (9), 1962 pp. 366-369?
3. K. Iga, T. Kambayashi, and C. Kitahara: *Ext. Abstr. (26th Spring Meet., 1978); Japan Society of Applied Physics and Related Societies*, 27p-C-11 [in Japanese].
4. H. Soda, K. Iga, C. Kitahara, and Y. Suematsu: "GaInAsP/InP surface emitting laser injection lasers" *Jpn. J. Appl. Phys.* 18, 1979 pp. 2329-30.
5. J. L. Jewell A. Scherer S. L. McCall A Y. H. Lee S. Walker J. P. Harbison L. T. Florez "Low-threshold electrically pumped vertical-cavity surface-emitting microlasers" *ELECTRONICS LETTERS* 25, 1989 pp. 1123-24.
6. M. G. Peters, B. J. Thibault, D. B. Young, A. C. Gossard L. A. Coldren. "Growth of beryllium doped  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  mirrors for vertical-cavity surface-emitting lasers" *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*. November 1994 Volume 12 pp. 3075-83
7. DL. Huffaker, D.G. Deppe and K. Kumar "Native-oxide defined ring contact for low threshold vertical-cavity lasers" *Appl. Phys. Letters* 65 (1), 1994 pp.97-99.
8. Y. Hayashi, T. Mukaiyama, N. Hatori, N. Ohnoki, A. Matsutani, F. Koyama and K. Iga "Record low-threshold index-guided InGaAs/GaAlAs vertical-cavity surface-emitting laser with a native oxide confinement structure" *Electronics Letters* 31 (7), 1995 pp. 560-2.
9. K. Iga « Vertical-Cavity Surface-emitting Laser : its conception and evolution » *Japanese Journal of Applied Physics* 47 (1), 2008 pp;1-10.
10. William J. Alford, Thomas D. Raymond and Andrew A. Allerman "High power and good beam quality at 980 nm from a vertical external-cavity surface-emitting laser" Vol. 19, No. 4/ April 2002/J. Opt. Soc. Am. B pp. 663-666.
11. J. Boucart, C. Starck, F. Gaborit, A. Plais, N. Bouché, E. Derouin, J. C. Remy, J. Bonnet-Gamard, L. Goldstein, C. Fortin, D. Carpentier, P. Salet, F. Brillouet, and J. Jacquet Metamorphic DBR and Tunnel-Junction Injection : A CW RT Monolithic Long-Wavelength VCSEL *IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS* 5, 1999 pp. 520-529.
12. S. Nakagawa, E. Hall, G. Almuneau, J. K. Kim, D. A. Buell, H. Kroemer and Larry A. Coldren, "1.55- $\mu\text{m}$  InP-lattice-matched VCSEL with AlGaAsSb-AlAsSb DBRs" *IEEE JOURNAL ON SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS* 7, 2001 pp. 224-30.
13. J. J. Dudley, D. I. Babic, R. Mirin, L. Yang B. I. Miller R. J. Ram, T. Reynolds, E. L. Hu, and J. E. Bowers Low threshold, wafer fused long wavelength vertical cavity lasers *Appl. Phys. Lett.* 64, 1994 pp. 1463-5.
14. M. G. Peters, D. B. Young, F. H. Peters, J. W. Scott, B. J. Thibeault, and L. A. Coldren, "17.3% Peak Wall Plug Efficiency Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers Using Lower Barrier Mirrors" *IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS* 6 (1), 1994 pp. 31-3
15. Lott, J.A.; Ledentsov, N.N.; Ustinov, V.M.; Maleev, N.A.; Zhukov, A.E.; Kovsh, A.R.; Maximov, M.V.; Volovik, B.V.; Alferov, Zh.I.; Bimberg, D., "InAs-InGaAs quantum dot VCSELs on GaAs substrates emitting at 1.3  $\mu\text{m}$ ," *Electronics Letters* , vol.36, no.16, pp.1384-1385, 3 Aug 2000
16. Choquette, K.D.; Klem, J.F.; Fischer, A.J.; Blum, O.; Allerman, A.A.; Fritz, I.J.; Kurtz, S.R.; Breiland, W.G.; Sieg, R.; Geib, K.M.; Scott, J.W.; Naone, R.L., "Room temperature continuous wave InGaAsN quantum well vertical-cavity lasers emitting at 1.3  $\mu\text{m}$ ," *Electronics Letters* , vol.36, no.16, pp.1388-1390, 3 Aug 2000
17. H.Q. Hou, M. Hagerott Crawford, R.J. Hickman and B.E. Hammons, "Room-temperature continuous wave operation of all-AlGaAs visible (700nm) vertical-cavity surface emitting lasers" *ELECTRONICS LETTERS* 32 (21), 1996 pp.1986-7.
18. R. P. Schneider, Jr. M. Hagerott Crawford, K. D. Choquette, K. L. Lear, S. P. Kilcoyne, and J. J. Figiel, "Improved AlGaInP-based red (670-690 nm) surface-emitting lasers with novel C-doped short-cavity epitaxial design" *Appl. Phys. Lett.* 67, 1995, pp.329-331.
19. T. Yokogawa, S. Yoshii, A. Tsujimura, Y. Sasai, J. Merz "Electrically Pumped CdZnSe/ZnSe Blue-Green Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers" *Japanese Journal of Applied Physics* 34, 1995 pp. L751-L753
20. P. Zhou, J. Cheng, C.F. Schaus, S.Z. Sun, K. Zheng, E. Armour, C. Hains, W. Hsin, D.R. Myers, G.A. Vawter, "Low series resistance high-efficiency GaAs/AlGaAs vertical-cavity surface-emitting lasers

- with continuously graded mirrors grown by MOCVD," *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol.3, no.7, pp.591-593, July 1991..
21. M.K. Hibbs-Brenner; R.A. Morgan; R.A. Walterson; J.A. Lehman; E.L. Kalweit; S. Bounnak; T. Marta; R. Gieske, "Performance, uniformity, and yield of 850-nm VCSELs deposited by MOVPE," *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol.8, no.1, pp.7-9, Jan. 1996.
  22. R.P Schneider Jr., J. A. Lott, K. L. Lear, K. D. Choquette, M. H. Crawford, S. P. Kilcoyne, J. J. Figiel "Metalorganic vapor phase epitaxial growth of red and infrared VCSELs", *Journal of Crystal Growth* 145, 1994 pp.838-845
  23. Steinle, G.; Riechert, H.; Egorov, A.Yu., "Monolithic VCSEL with InGaAsN active region emitting at 1.28  $\mu\text{m}$  and CW output power exceeding 500  $\mu\text{W}$  at room temperature," *Electronics Letters*, vol.37, no.2, pp.93-95, 18 Jan 2001
  24. Parviz Tayebati "High contrast, high reflectivity, optical modulator using the Franz-Keldysh effect in a thin film of GaAs", *Appl. Phys. Lett.* 63 (21), 1993 pp. 2878-2881.
  25. Bardinal, V., "Conception, élaboration sous contrôle optique et caractérisation de modulateurs à microcavité Fabry-Pérot »,Thèse LAAS-CNRS., Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, Toulouse, 1995.
  26. Requena P., « Conception et élaboration en épitaxie par jets moléculaires de multicouces (Ga,Al)As-(Ca, Sr)F<sub>2</sub> pour application optique » Thèse LAAS –UPS, Toulouse 1991
  27. Quinn, W.E., *et al.*, *Journal of vacuum science and technology B* 10(2), 1992 p. 759.
  28. Böbel, F.G. and H. Möller, *Journal of vacuum science and technology B* 12(2), 1994 pp. 1207-1210.
  29. Chalmers, S.A., K.L. Lear, and K.P. Killeen, "Low resistance wavelength-reproducible p-type (Al,Ga)As distributed Bragg reflectors grown by molecular beam epitaxy" *Applied Physics Letters* 62(14), 1993. pp. 1585-1587.
  30. Farrell, T. and J.V. Armstrong, *Applied Physics Letters* 59, 1991 p. 1203.
  31. Rafflé, Y., *et al.*., "In-situ metalorganic vapor phase epitaxy control of GaAs/AlAs Bragg reflectors by laser reflectometry at 514 nm" *Applied Physics Letters* 63(25), 1993 pp. 3479-3481.
  32. <http://www.oceanoptics.com/>
  33. Talghader, J.J., M.A. Hadley, and J.S. Smith, "Molecular beam epitaxy growth method for vertical cavity surface emitting laser resonators based on substrate thermal emission" *Applied Physics Letters* 67 (25), 1995 pp. 3774-3776.
  34. Pelletier, E., Kowalczyk, R. and Fournier, A. « Influence du Procédé de Contrôle Sur Les Tolérances de Réalisation des Filtres Interférentiels à Bande Etroite », *Journal of Modern Optics* 20 (7), 1973 pp.509-526.
  35. Fournier A.; Richier R. ; Pelletier E. ; Bovard B. ; Salvini G. ;"Optical monitoring of quarterwave multilayers: hybrid techniques of data processing used to increase the performances" *Annales des télécommunications* 42 (3-4), 1987 pp. 140-148.
  36. Bardinal, V., R. Legros, and C. Fontaine, "In situ measurement of AlAs and GaAs refractive index dispersion at epitaxial growth temperature" *Applied Physics Letters* 67 (2), 1995 pp. 244-246.
  37. Y.P.Varsnhi, *Physica*. 34, 1967 pp.149-157.
  38. G.Almuneau, R.Bossuyt, P. Collière, L. Bouscayrol, M.Condé, I. Suarez-Alvarez, V. Bardinal, C. Fontaine. "Real-time in-situ monitoring of wet thermal oxidation for precise confinement in VCSELs" *Semiconductor Science and Technology* 23 (10) 2008 p.1055021
  39. V. Bardinal, R. Legros and C. Fontaine. "Precision Bragg reflectors obtained by Molecular Beam Epitaxy under in situ Tunable Dynamic Optical Reflectometry control" *Applied Physics Letters* 67 (23), 1995 pp. 3390-3392.
  40. F.Van Dijk, V. Bardinal, C. Fontaine, E.Bedel-Pereira and A. Muñoz-Yague "Precise growth of vertical cavities using Tunable Dynamic Optical Reflectometry (TDOR)" *Journal of Crystal Growth* 201/202, 1999 pp. 1028-1031.
  41. M.Condé "Composants optoélectroniques à microcavité verticale sur GaAs : technologies avancées pour de nouvelles fonctions ». Thèse LAAS-CNRS 18 nov 2008 Université Paul Sabatier Toulouse.
  42. V. Bardinal, R. Legros, C. Fontaine, R. Buhleier, J.L. Iehl and J. Collet «Arrays of spatial light modulators grown by molecular beam epitaxy under high precision reflectometry control» EOS Topical Meeting on «Free-Space Micro-Optical Systems» Engelberg, Suisse (1-3 Avril 96).
  43. J.L. Iehl, R.Grac, J.H. Collet, M. Pugnet, R. Buhleier, V. Bardinal, C.Fontaine and R. Legros «Subnanosecond dynamics of the electron-hole plasma in GaAs/AlAs microcavities» *Physica B* 222 I (1-3), 1998 pp. 73-79.
  44. C.Guerret-Piécourt, M. Toufella, E. Bedel, P. Puech, G. Benassayag, V. Bardinal, C. Fontaine, A. Claverie and R. Carles «MBE (111)B LT homoepitaxial GaAs : Role of growth and annealing temperatures and layer thickness on crystal quality » NIS'98 : 3rd International Workshop on Novel Index Surfaces, LaCasona (Esp.) 6-9 Oct.98

45. R. Buhleier, M. Hübner, J.H. Collet, V. Bardinal, C. Fontaine, R. Legros and J. Kuhl, «Ultrafast coherent deflectors based on enhanced four-wave-mixing in bulk GaAs microcavities» *Electronics Letters* 31 (25), 1995 p. 2207.
46. R. Buhleier, V. Bardinal, J.H. Collet and C. Fontaine, M. Hübner and J. Kuhl «Four wave-mixing in bulk GaAs microcavities at room temperature» *Applied Physics Letters* 69 (15), 1996 pp. 2240-2242.
47. S. Sanchez, C. De Matos, V. Bardinal, C. Fontaine, M. Pugno. "Effect of bound electronic nonlinearities in semiconductor microcavities" *Physica E* 17, 2003 pp.468-469
48. P. Royo, J. F. Carlin, J. Spicher, R. Stanley, R. Houdré, V. Bardinal, U. Oesterle and M. Ilegems « High efficiency top-emitting microcavity light-emitting diodes » SPIE Conference on Light-Emitting Diodes : Research, Manufacturing and Applications III , San Jose , California 27-29 Janvier 1999, SPIE 3621 pp.151-159.
49. D. Labilloy, H. Benisty, C. Weisbuch, T.F. Krauss, V. Bardinal, U. Oesterle, « Demonstration of cavity mode between two-dimensional photonic-crystal mirrors » *Electron. Lett.* 33 (23), 1997 pp.1978-1980.
50. D. Labilloy, H. Benisty, C. Weisbuch, T.F. Krauss, R.M. De La Rue, V. Bardinal, R. Houdré, U. Oesterle, D. Cassagne, C. Jouanin « Quantitative measurement of transmission, reflection and diffraction, of two-dimensional photonic bandgap structures at near-infrared wavelengths » *Phys. Rev. Lett.* 79 (21), 1997 pp. 4147-4150.
51. Winston, D.W.; Hayes, R.E., "Optoelectronic device simulation of Bragg reflectors and their influence on surface-emitting laser characteristics," *IEEE Journal of Quantum Electronics* 34 (4), 1998 pp.707-715.
52. F. Van Dijk, V. Bardinal, P. Dubreuil , C. Fontaine, L. Averseng, E. Bedel-Pereira and A. Muñoz-Yagüe. « Resistivity improvement of Beryllium doped Bragg Mirrors for Vertical Cavity Surface Emitting Lasers » Euro MBE : Xth European Workshop on Molecular Beam Epitaxy, Les Arcs (Savoie) 28 mars- 1<sup>er</sup> avril 1999.
53. P. Dubreuil, Mémoire de diplôme-Ingénieur, "Oxydation thermique humide contrôlée de multicouches de (Ga,Al)As. Application aux lasers à cavité verticale émettant par la surface (VCSELs)" Centre National des Arts et Métiers, Toulouse, 13 Décembre 2000.
54. F. Van Dijk, V. Bardinal, P. Dubreuil, L. Averseng, E. Bedel-Pereira, C. Fontaine and A. Muñoz-Yagüe. "Single-mode Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers grown under accurate real-time optical control" CLEO'Europe 2000, Nice, France, 10-15 septembre 2000, p.234.

## Chapitre 2

### Photodétection dans les VCSELs

*Encadrements : thèses de L.Averseng et de C. Bringer*

*Collaborations : Météo-France, ONERA, ACI Gelacote Université Montpellier 2, RESO-ENIB, projet RNMT OSA131 (LETI, Intexys, Infineon)*

*Publications : P13, P14, P15, P18, P20, P23, A3, A4, A5, A8*

*Conférences : CI.11, CI.12, CI.13, CI.14, CN7, CN8, CN9, CN10, CN11, CN12, CN1, CN15, I3, I4, W4, W5*

La mise au point de sources multifonctionnelles constitue un enjeu important pour l'augmentation du niveau d'intégration et le développement de microsystemes optiques compacts. En particulier, l'association de l'émission et de la détection dans un même composant constitue un avantage décisif que ce soit pour l'instrumentation, les communications optiques ou encore les systèmes d'analyse biologique.

Dans ce contexte, nous avons étudié la photodétection en cavité verticale dès que nous avons maîtrisé la technologie de fabrication des VCSELs. En effet, ces structures de type *p-i-n* peuvent être utilisées en polarisation inverse en tant que photodétecteurs à leur longueur de résonance. Ainsi, nous nous sommes tout d'abord intéressés à la photodétection en cavité massive dans le cadre d'un projet avec le centre de recherche de Météo-France (projet Eurozep, 2000). En fonction de nos avancées technologiques et de la progression de connaissances sur ces objets, nous avons ensuite exploré les propriétés de photodétection des VCSELs selon trois axes principaux : la détection verticale dans un VCSEL comportant un diaphragme d'oxyde enterré, la détection verticale dans les systèmes à deux cavités et enfin la détection latérale pour le *monitoring* des VCSELs.

Cette thématique a ainsi constitué la base d'un des axes centraux de nos recherches : l'association des fonctions optiques d'émission et de détection dans un même VCSEL pour son intégration photonique.

#### **1. Photodétection renforcée par effet de cavité**

Le principal intérêt d'une structure à microcavité pour la photodétection réside dans la séparation sensibilité-bande passante. En effet grâce à l'augmentation de l'absorption des photons par le confinement de la lumière à l'intérieur de la cavité, l'épaisseur de la zone absorbante va pouvoir être réduite tout en conservant la même sensibilité qu'une couche plus épaisse dans une diode pin classique [1][2] (fig.1). Cette faible épaisseur de la couche active permet aussi de limiter le temps de transit des porteurs et donc d'augmenter la bande passante.

On peut de plus ajuster la réflectivité à la longueur d'onde de résonance en optimisant la structure, en particulier le nombre de périodes des miroirs inférieur et supérieur pour obtenir une réflectivité nulle sans dépôt de couche supplémentaire. Nous avons ainsi calculé que le rendement quantique d'une structure à cavité résonnante est de 4 à 10 fois (pour 800nm et 860nm) supérieur à celui obtenu avec une diode p-i-n classique de même épaisseur de couche active. Toutefois, ces composants sont surtout intéressants pour des fonctionnements dans une faible plage de longueur d'onde (quelques dizaines de nm) et un faible cône angulaire de détection (20° maximum) car leur sélectivité spectrale et angulaire est ajustable mais limitée par l'effet de résonance.



Nous avons réalisé ce type de photodétecteurs avec des cavités asymétriques en GaAs dans le cadre du projet européen Eurozep en collaboration avec le centre de recherche de Météo-France (resp. LAAS : Antonio Muñoz-Yagüe). J'ai eu la charge de l'étude et du développement de ce composant et de sa caractérisation, avec le concours de Laurent Averseng (mon doctorant) et Thierry Camps.

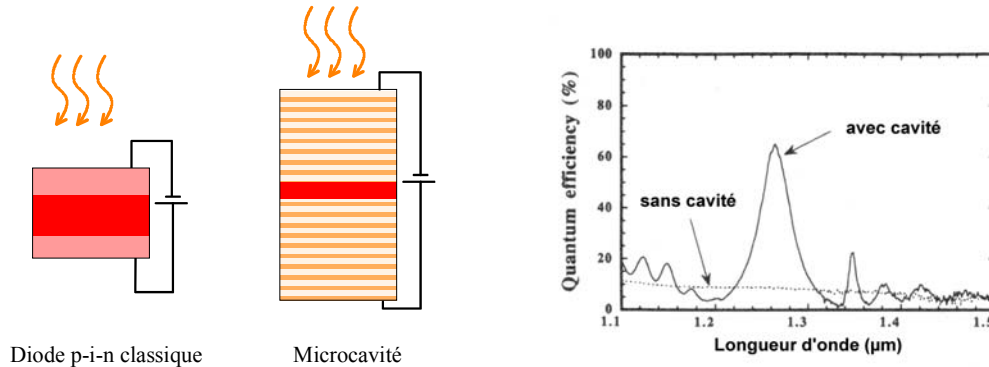


Figure 1 : Comparaison de la réponse spectrale d'un photodétecteur simple (pointillés) et d'un photodétecteur renforcé par effet de cavité (traits pleins) [1]

### 1.1. Contexte : Projet européen Eurozep

Le but du projet Eurozep, coordonné par le centre de recherches de Météo-France (CNRM) et mené en collaboration avec l'Onera/DOTA pour la conception de la partie optique du système, visait la mise au point d'une sonde granulométrique aéroportée (2000-2001) [3].

L'objectif est de caractériser la distribution de taille des particules de l'atmosphère dont la concentration peut varier de  $10$  à  $10^{-4} \text{ cm}^{-3}$ , tels que les aérosols dont le diamètre est compris entre  $0,1$  et  $10 \mu\text{m}$  mais également les gouttes d'eau dans les nuages dont la taille peut atteindre jusqu'à  $50 \mu\text{m}$  de diamètre. Le principe de ce granulomètre laser est basé sur la mesure de la diffusion produite par un échantillon mobile sur le trajet optique d'un faisceau laser (dans notre cas, des diodes laser émettant à  $808 \text{ nm}$ ) (fig.2). Le signal recueilli par le photodétecteur est alors exploité pour déduire les caractéristiques des particules (loi de Mie). La difficulté réside ici dans la nécessité de détecter rapidement la présence de particules en mouvement de taille comprise entre  $0,5$  et  $50 \mu\text{m}$ , et donc des signaux de faible et fort niveau (allant du nW jusqu'au mW).

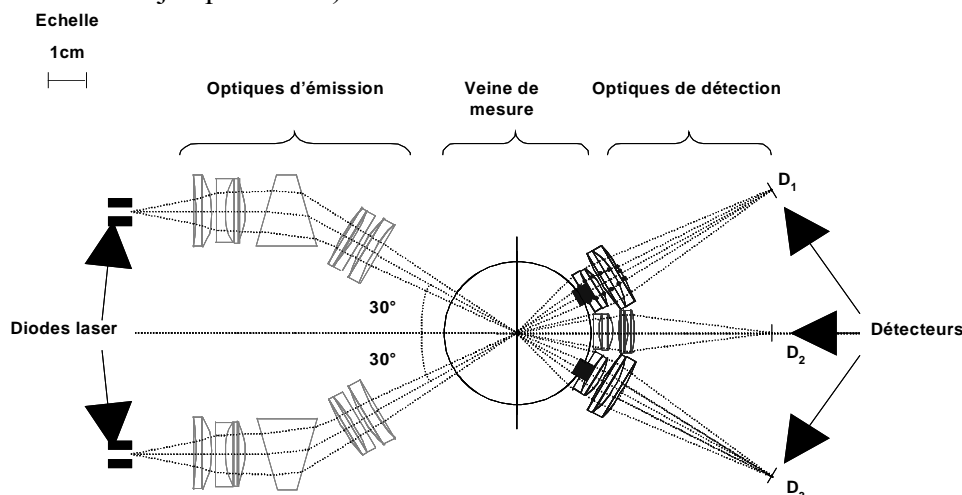


Figure 2 : Schéma de principe de la sonde granulométrique embarquée pour le projet Eurozep

Pour cela, le détecteur doit répondre à plusieurs exigences parfois incompatibles : grande sensibilité (valeur maximum théorique :  $0.65A/W$  à  $808nm$ ) sur une large gamme de fonctionnement, faible bruit (puissance minimale mesurable :  $10^{-9}W$ ) et rapidité de détection ( $>1MHz$ ). Nous avons proposé et réalisé une structure à microcavité verticale asymétrique en GaAs massif, permettant de répondre à l'ensemble de ces contraintes.

## 1.2. Modélisation de la sensibilité de détection d'une microcavité

Nous avons développé un modèle permettant de calculer l'efficacité quantique de détection d'une structure à microcavité résonnante, sur la base des travaux d'Unlü [4]. Ce calcul met en évidence la nécessité d'un compromis à réaliser entre la réflectivité totale, le rendement et la finesse de la cavité. Ainsi, dans le cas d'une microcavité asymétrique en GaAs massif, nous avons précisé l'influence du nombre de périodes avant sur l'efficacité quantique de détection (figure 3) ainsi que l'influence de l'angle d'incidence du faisceau détecté (figure 4).

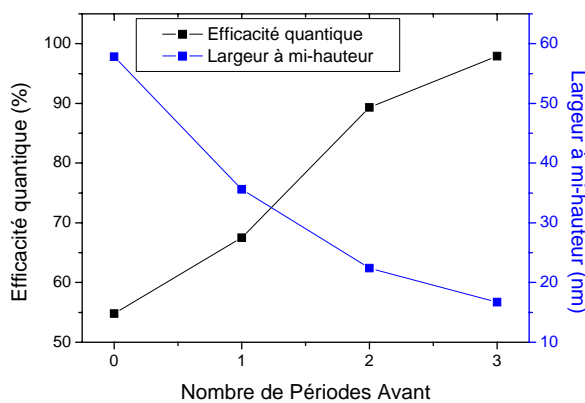


Figure 3 : Compromis rendement/finesse de détection dans une microcavité asymétrique en fonction du nombre de périodes avant

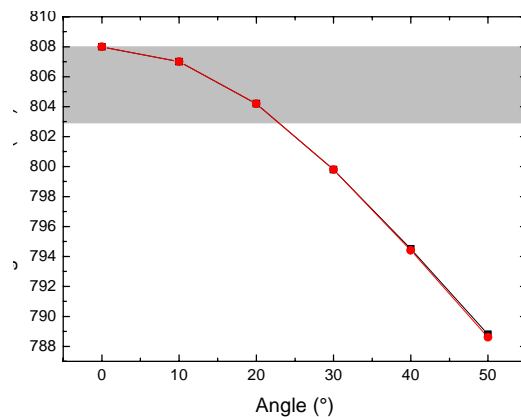


Figure 4 : Influence de l'angle d'incidence sur l'efficacité de détection de la microcavité

## 1.3. Conception et réalisation

Nos modélisations ont indiqué que le rendement quantique de la structure optimisée était 4 fois supérieur à celui obtenu avec une diode pin classique (fig.5). Cette structure a été élaborée sous contrôle optique RDA et le composant fabriqué avec des masques dédiés répondant aux contraintes.

Les photodétecteurs à réaliser devaient en effet répondre à des contraintes géométriques spécifiques. En effet, pour les besoins d'analyse, le capteur devait comprendre 3 secteurs de détection de surface identique séparés par des "zones mortes" les plus faibles possibles dont les diamètres étudiés ont été respectivement  $200$ ,  $300$  et  $400\mu m$  (fig.6). Cette géométrie permet par un effet de focalisation-défocalisation de la lumière diffusée, de repérer la position de la particule dans le volume de mesure et également de différencier les particules arrivant sur l'appareil de celles déjà comptabilisées.

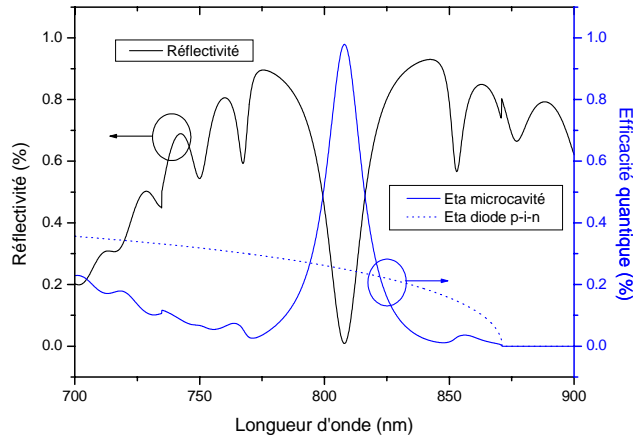


Figure 5 : Comparaison des performances de détection calculées d'une structure à microcavité optimisée et d'une diode pin classique

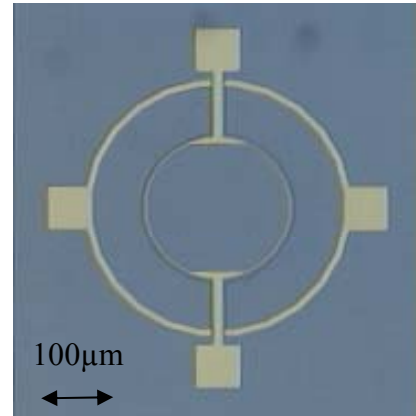


Figure 6 :Vue de dessus d'un composant de 200µm avec les trois secteurs de détection

### 1.4. Résultats expérimentaux

Nous avons caractérisé les composants sous pointes grâce au banc vertical que j'avais développé pour la caractérisation classique des VCSELs et dont nous avons étendu les possibilités.

En effet, à l'acquisition sous pointes de caractéristiques  $I(V)$ ,  $P(I)$ , de champs proches et de spectres d'émission, nous avons rajouté l'acquisition de spectres localisés (diamètre spot  $< 8\mu\text{m}$ ) de photocourant et de réflectivité avec une résolution meilleure que  $0,05\text{nm}$  sur une gamme spectrale de l'ordre de  $150\text{nm}$  grâce à l'utilisation d'un laser accordable motorisé couplé à une fibre monomode.

De façon à pouvoir mesurer le spectre de détection des photodétecteurs réalisés dans les conditions de fonctionnement finales nous avons également réalisé un circuit d'amplification du courant faible bruit (collaboration J.P Berry, service 2I du LAAS). Nous avons obtenu une sensibilité de  $0.6\text{ A/W}$  à la longueur d'onde prévue (fig. 7 et 8) [5] et une bande passante de  $25\text{MHz}$ . Par ailleurs, des mesures de bruit Basse fréquence ont été réalisées avec le groupe CISHT du LAAS (collaboration L. Bary et R. Plana), le bruit intrinsèque du composant est resté inférieur au bruit de la chaîne de mesure ( $2.10^{-26}\text{ A}^2/\text{Hz}$ ) dans les trois secteurs de détection du composant. Ces composants ont été intégrés dans une sonde prototype qui a été testée en 2001 au sol et à bord de ballons captifs et qui est toujours en cours de développement.

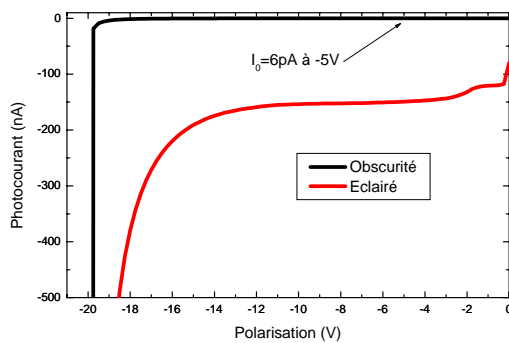


Figure 7 : Courbe I-V en inverse avec et sans éclairage du photodétecteur

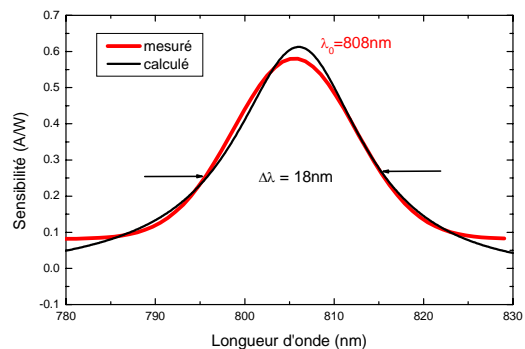


Figure 8 : Spectres de sensibilité théorique et expérimental du photodétecteur

## 2. Détection d'un signal externe avec un VCSEL

L'ensemble des outils théoriques et technologiques que nous avons développés dans nos projets antérieurs d'une part sur l'émission laser et d'autre part sur la détection en cavité nous a conduits à associer ces deux fonctions optiques dans un VCSEL tout d'abord verticalement dans une même cavité (Figure 9a) puis dans des cavités couplées (Fig.9b). Nous avons également exploré les possibilités d'intégration horizontale de la détection (cf paragraphe 3).

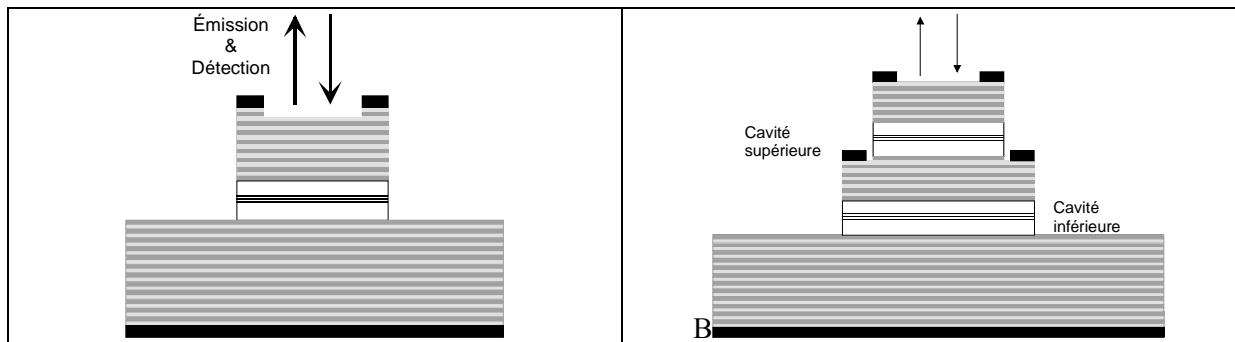


Figure 9 : Géométries des composants étudiés pour la détection verticale : composant dual alternatif à une cavité  
b) composant à deux cavités ou Bi-VCSEL

Dans la littérature, l'utilisation d'une diode VCSEL en tant que détecteur avait été observée en 1991 par Kosaka et al avec la mesure d'un photocourant aux bornes d'un VCSEL soumis à un éclairage [6]. Plus tard, la caractérisation de VCSELs standard utilisés en tant que photodiodes a été également menée par Rosinski et al (ENI de Brest) [7] et Dragas et al (Université de Bristol) qui ont quant à eux exploité des composants VCSEL en tant que photodiodes en régime d'avalanche [8].

Par ailleurs, de nombreuses équipes, notamment américaines, ont travaillé sur l'insertion monolithique verticale (Lim et al, Univ. Berkeley/Pr. Chang-Hasnain) [9] ou horizontale de zones photodéectrices dans un VCSEL : on peut citer dans ce dernier cas Geib et al (Sandia Laboratories /Pr.Choquette) [10] Knödl et al (Université d'Ulm / Pr.Ebeling) [11] Sjölund et al (SantaBarbara /Pr.Coldren) [12] ou encore Thrush et al (Stanford /Pr.Harris) [13].

L'originalité de nos travaux sur cette thématique a résidé d'une part dans l'étude et l'exploitation des propriétés particulières de détection des VCSELs à diaphragme d'oxyde enterré, sources monomodes les plus efficaces, et d'autre part sur la démonstration d'une nouvelle approche de détection latérale pour le monitoring intégré.

### 2.1. Emission-détection duale dans un VCSEL monomode à diaphragme d'oxyde

#### 2.1.1. Contexte : VCSEL dual pour la télémétrie laser

Dans le cadre d'une collaboration avec l'ONERA et le CNES visant la réalisation d'un système de télémétrie laser, nous avons conçu et réalisé des barrettes de VCSELs à double fonction : émission laser et photo-détection alternatives.

Cette application exigeait de nombreuses contraintes qui sont communes à de nombreuses applications capteurs actuelles : il fallait en effet disposer d'une source laser monomode avec des zones d'émission et de détection parfaitement alignées. De plus, elle devait présenter une surface de détection plus large que celle d'émission pour compenser l'élargissement du faisceau laser après réflexion sur la cible.

Une difficulté supplémentaire résidait dans le fait que la zone de détection devait comporter un minimum de zone morte (de type métallisations, mesas de séparation). Aucune des solutions publiées dans la littérature avec une seule cavité ne convenait.

Nous avons donc choisi d'exploiter les propriétés spécifiques des VCSELs à diaphragme d'oxyde enterré. L'idée que nous avons proposée est la suivante : élargir la zone d'injection électrique d'un VCSEL AlOx pour pouvoir l'utiliser en polarisation inverse en tant que détecteur sur toute la surface définie par ses électrodes annulaires supérieures, et ceci même dans les zones qui comportent un diaphragme d'oxyde enterré. Cela suppose que la détection est possible dans ces zones malgré le déphasage induit par la présence de l'AlOx, ce qui a été confirmé par la suite par notre étude.

L'originalité de notre approche résidait dans le découplage des zones d'électrodes de celles d'émission, permettant de répondre aux contraintes sur la taille du faisceau retour, pour un composant à simple cavité verticale [16], ce qui rendait le composant moins complexe et délicat à réaliser qu'une double cavité dont les premières réalisations commençaient à peine à apparaître [9,14,15].

Nous avons obtenu le fort découplage entre la zone d'émission et la zone de détection grâce à une étendue latérale de la couche d'oxyde la plus élevée possible (nous avons établi une limite technologique,  $35\mu\text{m}$ , au dessus de laquelle la vitesse d'oxydation n'est plus reproductible) [17].

Avant la réalisation des composants, nous avons mené une modélisation préalable de l'efficacité de détection d'un VCSEL standard de manière analogue à celle menée sur les détecteurs à cavité massive. Grâce à la mise au point d'une technologie de fabrication optimisée, nous avons réalisé avec succès des barrettes de composants duaux présentant des rapports surface de détection sur surface d'émission variés. On peut voir sur la fig. 10 un exemple de composant réalisé.

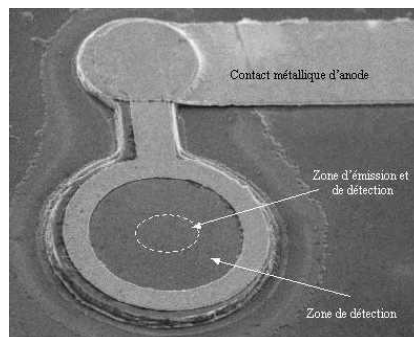


Figure 10 : Vue MEB d'un composant VCSEL AlOx monomode dual comportant une surface de détection élargie (diamètre mesa :  $80\mu\text{m}$ )

### 2.1.2. Mise en évidence des modes d'oxyde en détection dans un VCSEL AlOx

J'ai développé un banc optique qui ouvre la possibilité de réaliser des mesures localisées de spectres de réflectivité et de photo-détection, grâce auquel les dispositifs réalisés ont été qualifiés en émission et détection.

Ces VCSELs émettent en régime monomode en mode émetteur. En mode détecteur, ils présentent une sensibilité de détection compris entre  $0,1$  à  $0,2\text{A/W}$  au centre du composant, ce qui est de l'ordre de grandeur de nos résultats de modélisation. Il faut noter que l'efficacité de détection est très sensible à la valeur de l'absorption des puits quantiques à la longueur d'onde de résonance. Sur la périphérie, nous avons montré que la détection est également possible mais avec un niveau plus faible (de l'ordre de  $0,02\text{ A/W}$ ).

Nous avons ainsi mis en évidence l'existence de « modes d'oxyde » en photodétection dans les zones oxydées [18]. Ce phénomène n'avait été observé jusqu'alors qu'en émission [19]. En photodétection, ces modes d'oxyde induisent un décalage de la longueur d'onde de fonctionnement entre les zones centrales et périphériques du à des spectres de réflectivité différents (cf. Fig.11).

La confrontation des spectres localisés de détection et de réflectivité acquis simultanément sur les composants nous a permis de confirmer expérimentalement l'influence de la couche d'oxyde enterrée sur le comportement en détection (Figure 12).

L'écart spectral entre les deux zones a été réduit pour obtenir un recouvrement spectral suffisant pour l'application finale, grâce à la définition de nouvelles géométries verticales avec une réduction de l'épaisseur de la couche d'AlAs oxydée et son placement à un nœud du champ optique. La figure 13 montre les résultats que nous avons obtenus : l'écart entre les deux pics est ramené de 17 à 3nm avec une augmentation significative de la sensibilité de détection dans les zones oxydées [20].

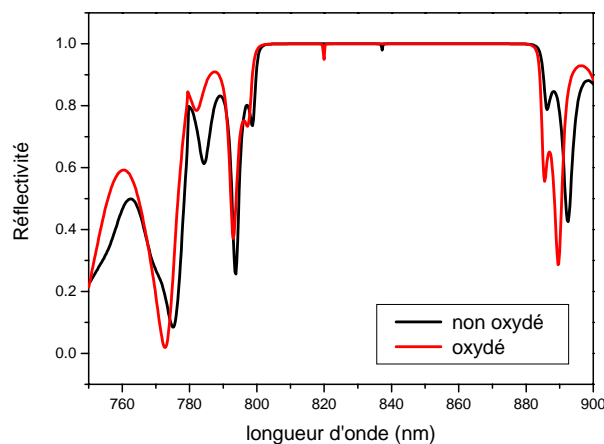


Figure 11 : Spectres de réflectivité calculés dans les zones oxydées et non oxydées d'un VCSEL AlOx standard

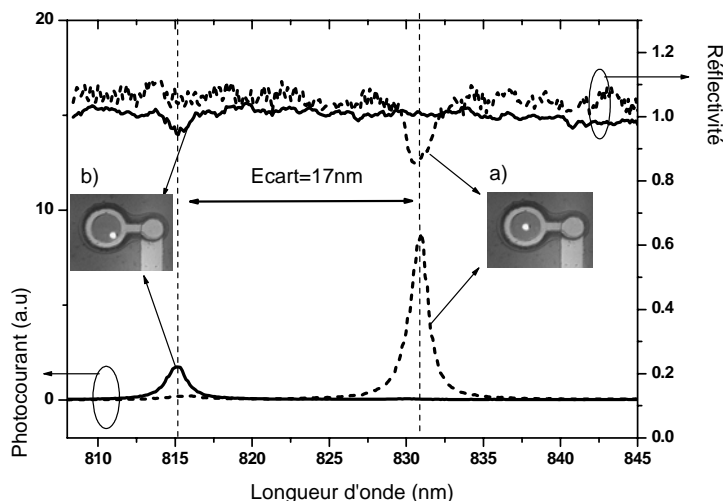


Figure 12 : Mise en évidence des modes d'oxyde en détection d'un VCSEL AlOx par mesures localisés des spectres de photocourant et de réflectivité dans la zone d'émission (a) et les zones oxydées (b)

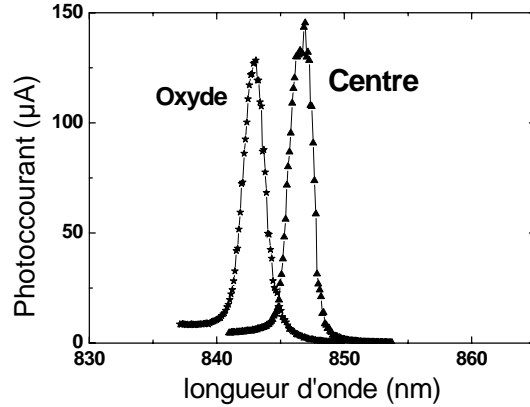


Figure 13 : Réduction des modes d'oxyde en détection dans des structures optimisées pour permettre un meilleur recouvrement spectral des zones d'émission-détection et de détection seule.

### 2.1.3. Optimisation de la sensibilité de détection

Le niveau de sensibilité de détection des dispositifs à microcavité verticale peut être ajusté en diminuant la réflectivité de ce miroir, donc en dégradant la finesse de la cavité (fig. 14). Pour jouer sur ces paramètres, nous avons attaqué les premières périodes du miroir superficiel dans une solution chimique sélective. L'évolution des spectres de réflectivité d'une microcavité asymétrique en fonction du nombre de périodes attaquées est en accord avec nos simulations, comme le montre la fig.14.

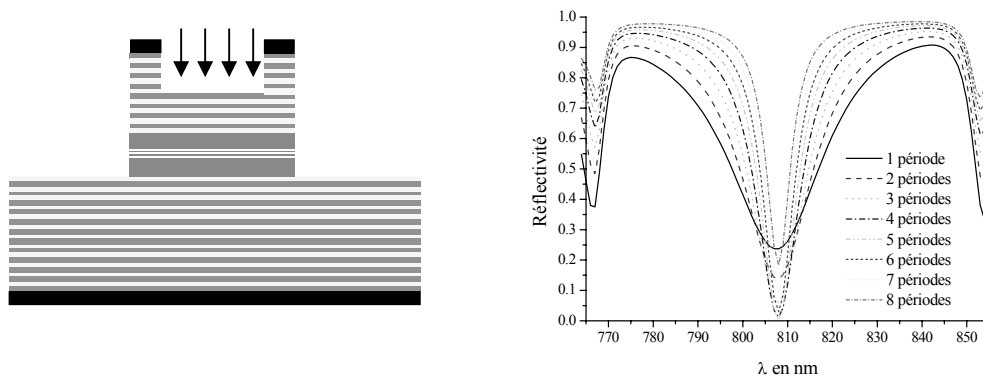


Figure 14 : Evolution de la réflectivité simulée d'une microcavité asymétrique en GaAs massif en fonction des attaques successives des périodes du miroir de Bragg supérieur

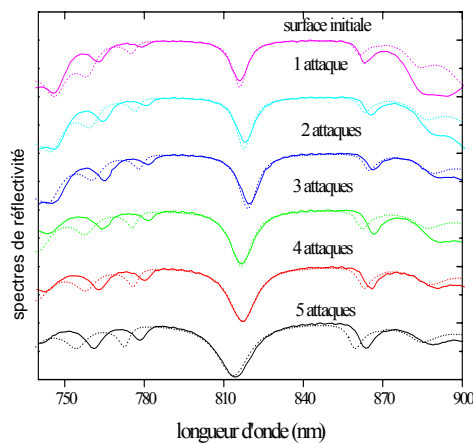


Figure 15 : Spectres de réflectivité mesurés pour 1 à 5 attaques successives du miroir supérieur

Après avoir développé cette technique sur des photo-détecteurs à microcavité, nous avons ensuite appliqué cette technique à des VCSELs duaux pour ajuster localement leur finesse sans perturber leur fonctionnement laser.

Nous avons démontré que pour l'attaque de deux périodes successives sur toute la surface du composant, on peut augmenter la sensibilité de détection de 17% tout en conservant l'état de surface initial. (Fig.16) [21]. Dans certains cas, le rendement d'émission est même augmenté car la condition au seuil optimale est plus finement ajustée.

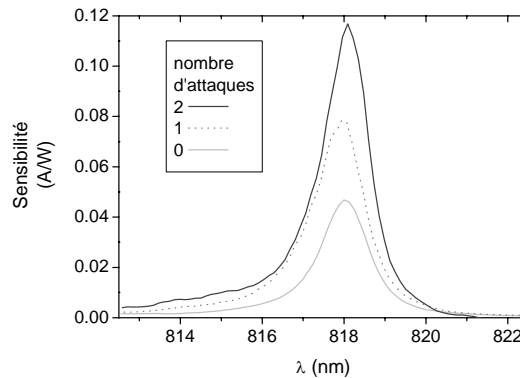


Figure 16 : Amélioration de la sensibilité de détection du VCSEL en fonction du nombre d'attaques de périodes du miroir supérieur

Bien que la technique soit maintenant au point sur des surfaces assez grandes (de l'ordre de 50 $\mu$ m de diamètre), l'uniformité sur de petites surfaces reste problématique. Cette technique pourrait donc être appliquée localement en anneau par photo-masquage en la couplant à des attaques en phase sèche pour conserver la verticalité des flancs. L'utilisation de la gravure sèche semble en effet plus adaptée pour des motifs micrométriques à condition de disposer d'une couche d'arrêt. La gravure FIB a été également utilisée par l'Université de Bristol pour ces applications [22] mais présente l'inconvénient de ne pas être collective.

## 2.2. Détection avec deux cavités empilées verticalement

Une autre voie possible pour assurer la photodétection dans un VCSEL consiste à exploiter des cavités superposées verticalement et partageant un miroir de couplage. Plusieurs équipes ont mené ces dernières années des recherches sur ce type de structures couplées pour obtenir la détection intégrée [9] mais aussi pour obtenir une modulation interne du faisceau [23] ou encore une émission simultanée à deux longueurs d'onde différentes (« Bi-VCSEL ») [14]. Plus récemment, sont même apparus des « Tri-VCSELs » pour réaliser des oscillateurs paramétriques [24].

Nous souhaitons quant à nous utiliser une cavité pour l'émission et l'autre pour la détection, mais la réalisation de telles structures couplées s'est avérée très délicate et les moyens technologiques dont nous disposons ne nous ont pas permis d'atteindre les objectifs ambitieux que nous visions. Ces structures étaient également destinées à l'étude du battement obtenu dans des cavités identiques couplées à 830nm et ont été conçues en collaboration avec le CEM2 (L.Chusseau) qui travaillait déjà sur la génération continue Thz par voie optique dans des lasers à semi-conducteurs à d'autres longueurs d'onde [25]. Cette collaboration s'est



inscrite dans le cadre de l'ACI Photonique Gelacote puis de l'AS CNRS Sources et Systèmes THz 207 (devenu un GdR européen en 2004).

Trois structures Bi-VCSELS comprenant un nombre de périodes différent dans le miroir de couplage (12, 14 et 18 périodes visant des battements compris entre 1 et 3 THz) ont été élaborées par C. Fontaine et A. Arnoult dans ce but. On peut voir sur la figure 17a) la vue en coupe d'une structure épitaxiale comportant 14 périodes de couplage. Les structures ont été fabriquées avec un jeu de masques spécifiques (collaboration T.Camps) (fig. 17b), ce qui a permis de pointer les difficultés de réalisation de ces dispositifs : contrôle du contact intra-cavité, maîtrise de la taille relative des diaphragmes d'oxyde de chaque cavité, dénivelés importants entraînant des discontinuités du métal de contact..., et nous travaillons encore actuellement à l'amélioration de ces points.

Les caractérisations de ces premiers composants ont montré qu'ils ne fonctionnaient hélas pas en régime laser en raison de la complexité de leur épitaxie. Ce sont en effet des composants trop délicats à réaliser avec nos moyens d'élaboration actuels (structure à deux diaphragmes d'oxyde enterrés qui nécessiteraient plusieurs cellules d'éléments III et contact intra-cavité difficile à contrôler avec du béryllium). Nous disposons d'un bâti RIBER 32 qui ne peut plus répondre aux structures sophistiquées que nous concevons et à la technologie dont nous disposons.

Des mesures de photodétection interne ont cependant été réalisées avec G. Almuneau dans ces structures et les résultats sont assez prometteurs [26]. L'allure du photocourant collecté en interne suit bien l'allure de la puissance émise en surface du VCSEL en régime d'électroluminescence, ce qui démontre la sensibilité de détection interne élevée de cette configuration verticale à double cavité. (Fig.18)

Plus récemment, les épitaxies de nouvelles structures, dont nous avons assuré la conception, ont été réalisées par la société Avalon Photonics et sont en cours de fabrication sous la responsabilité de G. Almuneau. La technologie de fabrication que nous avons mise au point devrait nous permettre de disposer prochainement de nouveaux Bi-VCSELS performants, que nous étudierons en régime d'émission-détection simultanée, mais également en émission bi-mode pour la génération THz.

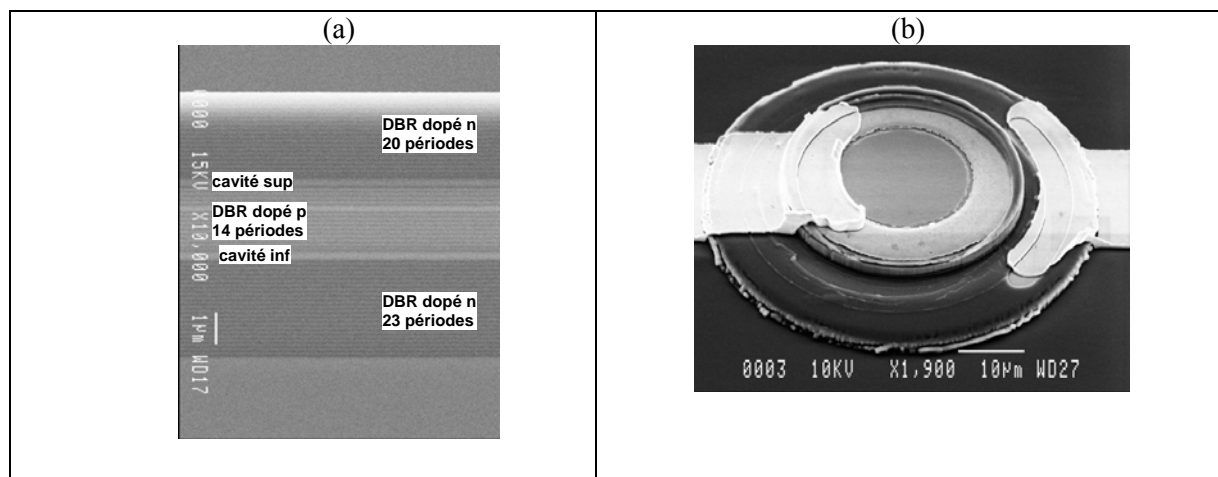


Figure 17 : a) Vue en coupe MEB d'une des structures Bi-VCSELS réalisées b) Vue de dessus d'un composant réalisé

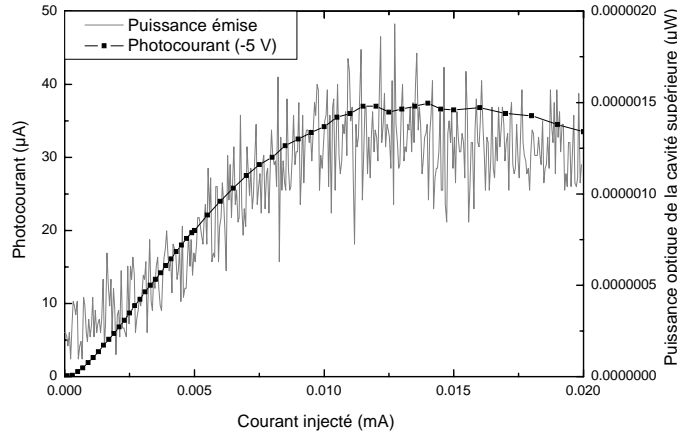


Figure 18 : Mesure de photodétection interne sur une structure BiVCSEL dont l'une des cavités est en régime d'électroluminescence.

### 3. Détection latérale intégrée pour le monitoring des VCSELs

Parallèlement à nos travaux sur la détection d'un faisceau externe par un VCSEL, nous sommes également intéressés aux possibilités de détection interne du faisceau émis par le VCSEL pour le monitoring intégré. Si l'on écarte les solutions basées sur des structures épitaxiales à double cavité, dont nous venons de voir la complexité de réalisation, il est possible d'envisager une intégration latérale de détection dans une structure standard.

Dans la littérature, la seule solution monolithique proposée consistait à détecter l'émission perdue latéralement par le VCSEL avec un VCSEL voisin [27,2829] mais le signal recueilli était très faible à cause des pertes liées à la propagation en espace libre.

Nous avons proposé une nouvelle approche basée sur l'exploitation du guidage optique de l'émission spontanée dans le plan de la cavité VCSEL, que nous avons choisi de ne pas graver lors de la phase de fabrication du *mesa*. L'intérêt principal réside dans la simplicité et l'efficacité de l'approche qui repose uniquement sur la technologie de fabrication à partir d'une structure épitaxiale standard de VCSEL. On s'attend à un niveau important du signal détecté latéralement grâce au guidage optique dans la cavité.

La détection peut s'effectuer soit par un VCSEL voisin de l'émetteur (fig. 19a) mais elle peut être également obtenue par un photo-détecteur dédié défini sur la cavité, comme nous le verrons par la suite (fig. 19b).

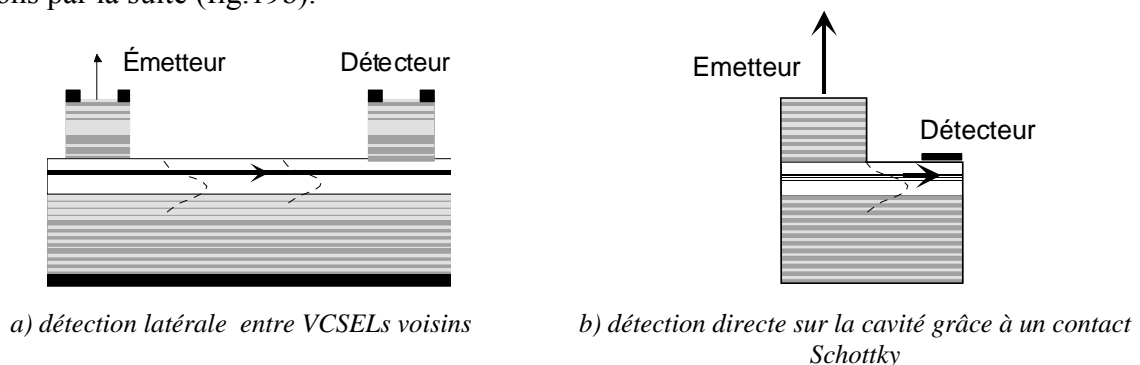


Figure 19 : Schéma des deux configurations étudiées pour la détection latérale. Dans les deux cas, la cavité a été volontairement préservée de la gravure pour permettre le guidage optique de l'émission spontanée dans le plan.

Ces travaux se sont inscrits dans le projet RMNT « OSA131 » (Intexys, CEA-LETI, Infineon, LAAS) qui visait la réalisation d'un module transducteur intégrant un VCSEL émettant à  $1.31\mu\text{m}$  associé à une diode de contrôle (déc. 2003-juin 2005).

### 3.1. Etude électro-optique préalable

Nous avons mené une étude théorique et expérimentale du guidage latéral de l'émission spontanée, Les mesures expérimentales ont été réalisées sur des structures et des matrices de composants VCSELS.

Les difficultés rencontrées dans l'étude expérimentale ont principalement porté sur l'extraction d'un signal optique représentatif et pertinent dans la configuration de mesure utilisée. C'est la reproduction de l'expérience, la possibilité de varier la distance du bord clivé au VCSEL émetteur (différents VCSELS accessibles sur une barrette) et la compréhension progressive des observations qui nous ont permis de résoudre les problèmes rencontrés et de nous assurer de la validité de nos observations. Cette étude était nécessaire à la compréhension préalable des mécanismes optiques à l'origine du photo-courant que nous visons à exploiter pour le monitoring [30].

#### 3.1.1. Modélisation unidimensionnelle du guidage latéral

Nous avons montré par un calcul unidimensionnel basé sur la méthode des indices effectifs que le guidage était efficace (fig.20a) dans chaque section traversée latéralement (centre, oxyde, mesa) quand on préservait la cavité lors de la gravure du *mesa*. On obtient un seul mode guidé dans la cavité avec un facteur de confinement de l'ordre de 5% dans la zone des puits quantiques (Fig.20b). L'épaisseur de cavité minimale permettant de conserver un guidage suffisant a été également évaluée (fig.21a) [31].

Ces résultats ont été confirmés par des modélisations à deux dimensions menées avec le logiciel camfr [32]. Nous avons en particulier calculé la transmission du guide d'onde formé par le VCSEL (fig. 21b). Ces calculs montrent que, bien que le confinement du mode guidé dans les puits quantiques soit faible, le signal latéral sera fortement absorbé en dessous de  $850\text{nm}$  si la distance émetteur-détecteur excède la centaine de microns. La discontinuité observée sur les spectres de transmission provient du modèle simplifié que nous avons utilisé pour calculer l'absorption du GaAs au niveau du gap.

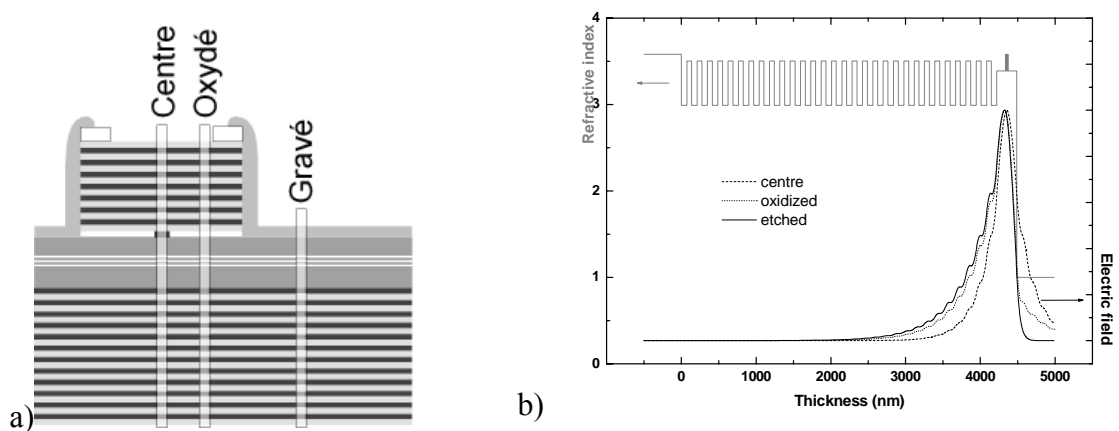


Figure 20 : a) zones du VCSEL considérées pour le calcul du guidage : centre du VCSEL, zone oxydée et zone gravée jusqu'à la cavité b) Profil de mode obtenu dans les trois sections du guide multicouche

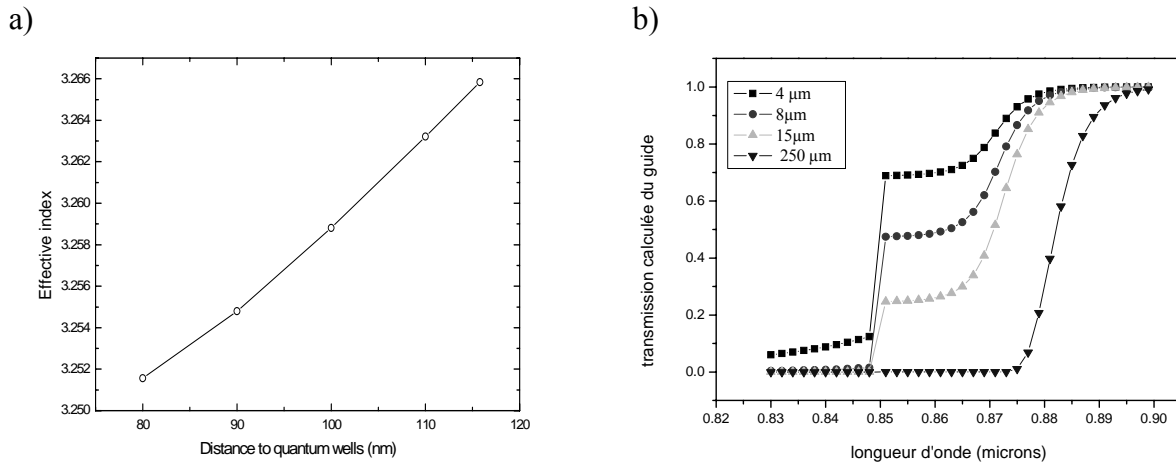


Figure 21 : a) Influence de la gravure de la cavité sur l'indice effectif du mode guidé b) Spectre de transmission calculé du guide pour plusieurs distances : 4, 8, 15 et 250 μm

### 3.1.2. Mise en évidence expérimentale du guidage latéral

Nous avons confirmé les résultats de simulation par des mesures de guidage en injectant un faisceau issu d'un laser accordable Ti:Sa motorisé par la tranche dans la cavité d'une plaque VCSEL non traitée, dont le cas se rapproche du cas simulé pour une longueur parcourue de l'ordre de 250 μm ou plus. La photo ci-dessous (fig.22) montre l'image du plan de sortie du guide que nous avons acquis pour une longueur d'onde supérieure à 850 nm : la visualisation de la lumière guidée démontre que le guidage est bien efficace.

Par ailleurs, nous avons mesuré dans cette configuration expérimentale le spectre de transmission du guide dans le domaine accessible au laser accordable (voir paragraphe 3.1.4).

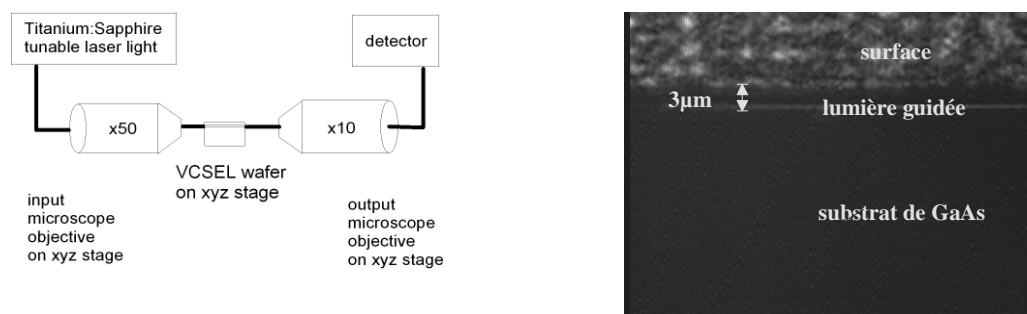


Figure 22 : Dispositif expérimental utilisé pour la mise en évidence du guidage en face de sortie d'une plaque VCSEL dans la cavité duquel on a injecté par la tranche un faisceau laser accordable. Ce même dispositif a été utilisé pour la mesure de la transmission latérale du guide (paragraphe 3.1.4)

### 3.1.3. Spectre du signal latéral guidé dans un VCSEL en fonctionnement

Nous avons mesuré les spectres d'émission latérale d'un VCSEL alimenté sous pointes (fig. 23a) pour analyser la nature du signal qui sera détecté dans la configuration finale. On peut voir sur la figure 23b les spectres obtenus par la tranche pour plusieurs courants d'injection. On observe une coupure en dessous de 860 nm, ce qui est cohérent avec les mesures de transmission du guide présentées ci-dessus. On observe également un

élargissement du pic d'émission vers le rouge lorsque l'on augmente le courant électrique appliqué au VCSEL.

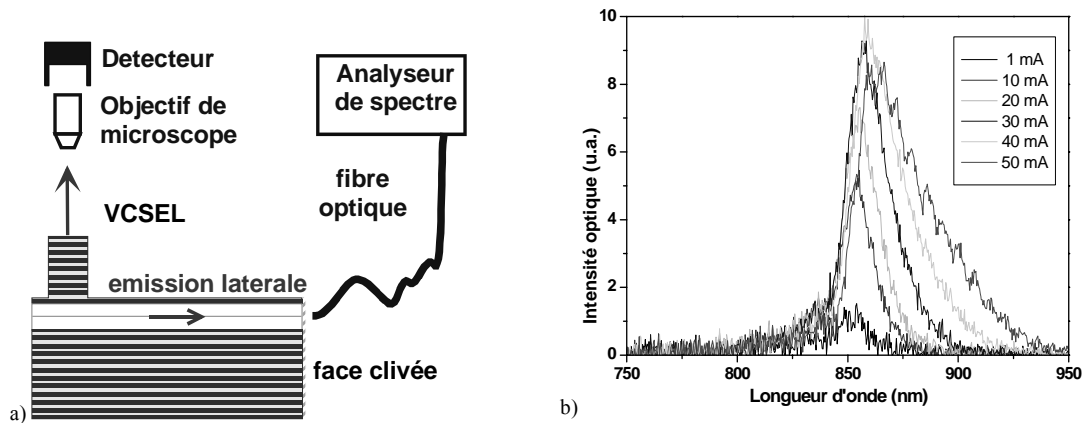


Figure 23 : mesure du signal optique guidé latéralement : principe de la mesure b) spectres mesurés pour plusieurs courants d'injection

### 3.1.4. Comparaison avec le spectre de transmission du guide latéral

Nous avons pu préciser la nature des mécanismes à l'origine du signal optique détecté latéralement. Nous avons en effet comparé la mesure optique de transmission du guide formé par la cavité VCSEL (géométrie de la fig.23) aux spectres d'émission latérale mesurés par la tranche lors du fonctionnement du VCSEL émetteur (Fig24) [33]. La largeur du spectre d'émission détecté indique que la majeure partie du faisceau guidé correspond à de l'émission spontanée et de l'émission spontanée amplifiée. La forme du spectre détecté et son évolution avec l'injection électrique ont été interprétées comme une conséquence de la variation de l'absorption du matériau actif dans les zones successives de propagation associée à des effets thermiques et à un étalement des lignes de courant sous l'oxyde. Plus précisément, le signal détecté est fortement filtré spectralement au cours de sa propagation dans le guide et lors du processus de photodétection

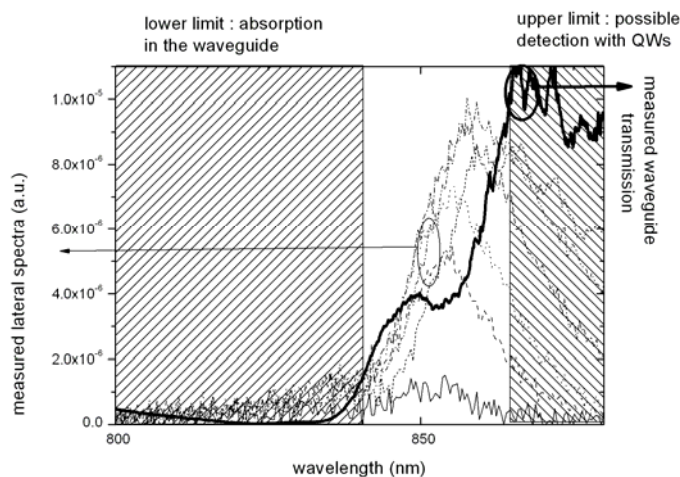


Figure 24 : Spectre de transmission du guide latéral formé par le VCSEL. Comparaison avec les spectres mesurés sur la tranche pour plusieurs courants d'injection lors du fonctionnement du VCSEL, permettant de préciser la fenêtre spectrale de détection latérale accessible.

Comme on peut le voir sur la figure 24, deux causes sont responsables de ce filtrage spectral : l'absorption de la lumière guidée dans les puits quantiques lors de la propagation entre les zones émettrices et détectrices d'une part, et la longueur d'onde maximale de détection par ces mêmes puits d'autre part.

### 3.1.5. Modélisation analytique du système complet

Pour aller plus loin dans la compréhension des mécanismes, j'ai établi une collaboration avec Yann Boucher, du laboratoire RESO de l'ENI de Brest, qui a modélisé de façon analytique le fonctionnement optique du dispositif selon ses deux axes : vertical et transverse, à l'aide d'un formalisme matriciel étendu (3×3) qui permet une approche globale du système. [34]. Un modèle simple donne rapidement accès à la densité spectrale de puissance du rayonnement émis, guidé et filtré par la tranche avec un bon accord avec nos résultats expérimentaux (fig. 25).

Ce résultat de convergence théorie-expérience a concrétisé les efforts d'une collaboration construite depuis plusieurs années entre nos deux laboratoires. Grâce à elle, nous disposons désormais d'un outil nous permettant de prévoir analytiquement l'allure du signal détectable et nous travaillons actuellement sur la modélisation complète des signaux mesurés en photodétection.

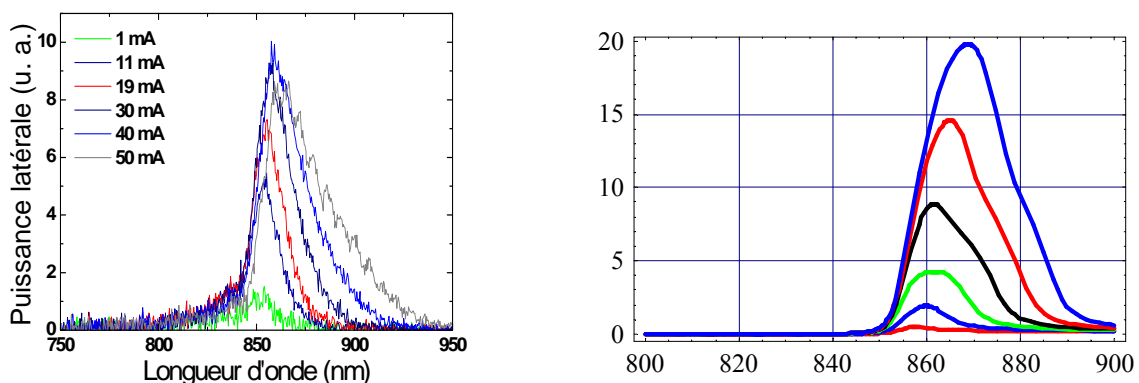


Figure 25 : a) Spectres mesurés sur la tranche pour des courants d'injection croissants lors du fonctionnement du VCSEL émetteur b) Spectres calculés à l'aide du formalisme matriciel étendu 3X3 (Modélisations Yann Boucher).

### 3.1.6. Comparaison du signal latéral intégré avec la caractéristique P(I) du laser

Lorsque l'on compare l'intensité intégrée des spectres mesurés par la tranche avec la caractéristique puissance-courant du VCSEL, on observe que le seuil et l'extinction de l'émission laser sont repérables sur le signal latéral (cf. figure 26) ce qui nous permet d'envisager son exploitation pour le monitoring du laser.

Le signal augmente dans la gamme de fonctionnement du laser. Nous expliquons ce comportement par l'étalement des lignes de champ sous le diaphragme d'oxyde, phénomène qui génère un accroissement de l'émission spontanée même en régime laser. Cette augmentation est encore plus marquée lorsque les effets thermiques sont prépondérants (courants supérieurs à 25mA).

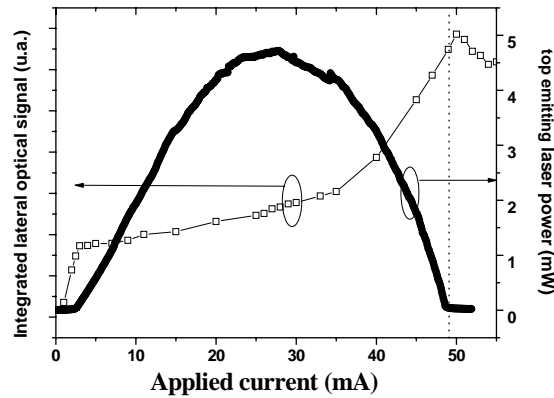


Figure 26 : Intensité optique intégrée comparée à la caractéristique puissance-courant du VCSEL.

### 3.2. Résultats obtenus en photodétection

#### 3.2.1. Photodétection dans la configuration « VCSELS voisins »

L'étude électrique a tout d'abord consisté en la mesure de la détection par un VCSEL voisin de l'émetteur en fonctionnement pour plusieurs distances entre VCSELS : 250, 500 et 750 $\mu\text{m}$  (fig. 27a).

Une analyse électrique du composant a été menée par Thierry Camps et a montré l'existence d'un courant parasite élevé entre les VCSELS qui s'ajoute au photocourant utile à détecter. Néanmoins, après traitement mathématique, les mesures ont montré que les points de fonctionnement du VCSEL (seuil, extinction) sont bien visibles sur le photocourant détecté. Les courbes de la figure 27b) montrent en fonction du courant appliqué  $I_A$  sur l'anode du VCSEL émetteur, les évolutions conjointes de la puissance optique émise et des courants  $I_D$  successivement collectées aux bornes des VCSELS adjacents distants respectivement de 250 $\mu\text{m}$ , 500 $\mu\text{m}$  et 750  $\mu\text{m}$ . La variation du niveau de photo-courant avec la distance entre composants est cohérente si l'on tient compte de l'angle solide correspondant. [35].

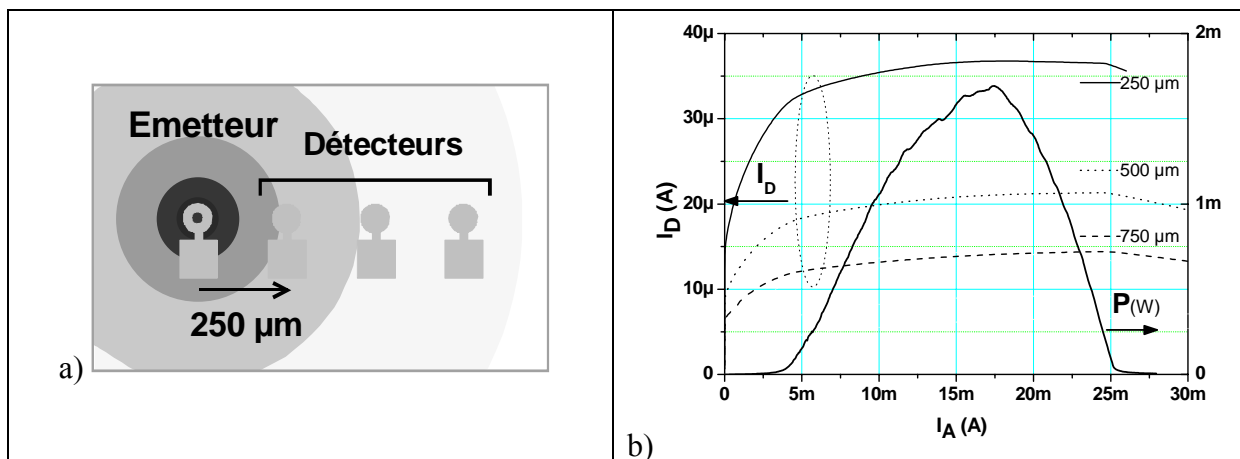


Figure 27 : a) Vue de dessus schématique des composants utilisés pour les mesures de photodétection latérale entre VCSELS voisins. b) Evolution de la puissance émise et des courants détectés par les VCSELS détecteurs à différentes distances du VCSEL émetteur avec le courant appliqué et comparaison à la puissance optique du VCSEL émetteur

Les évolutions du photocourant présentent des allures légèrement différentes de celles déduites des mesures optiques (fig 26). En effet, étant donné que dans ce cas, la détection est

réalisée grâce aux puits quantiques dont l'absorption est sélective spectralement, il est logique de ne pas retrouver ici l'augmentation du signal observée lors des mesures optiques pour les courants de polarisation élevés (correspondant à une émission spontanée à des longueurs d'onde trop élevées pour la photo-détection).

Pour conclure, le niveau de signal utile obtenu dans cette configuration est de l'ordre de quelques dizaines de microampères ce qui est encore insuffisant pour assurer l'asservissement du VCSEL recherché. La conduction parasite observée est par ailleurs préjudiciable aux performances du VCSEL dont elle augmente notamment le courant de seuil. Nous avons résolu ce problème en améliorant la géométrie du composant. Cette optimisation a été conduite avec Thierry Camps, notamment en ce qui concerne la conception des nouveaux composants.

### 3.2.3 Photodétection dans des composants dédiés à contact Schottky

Nos mesures précédentes ont montré que pour optimiser la collection de l'émission latérale isotrope, il est nécessaire d'augmenter l'angle solide de collection à l'aide d'électrodes annulaires localisées autour du *mesa* du VCSEL. Par ailleurs, l'absorption par le guide peut être limitée en réduisant la distance entre l'émetteur et le détecteur. Néanmoins, cette réduction de la distance réduit la valeur de la résistance parasite et donc augmente le courant parasite. Pour minimiser son effet, l'idée a consisté à utiliser un contact Schottky présentant une barrière de potentiel qui s'oppose à cette conduction parasite (limitation de la ddp entre VCSEL intrinsèque et contact du détecteur).

La figure 28 présente les premiers composants dédiés à cette étude que nous avons réalisés. La vue en coupe (fig28a) révèle la spécificité des composants dont la fabrication s'éloigne très peu du processus de fabrication standard. Les photographies d'un composant réalisé (fig28b) montrent le détecteur à contact Schottky annulaire disposé à une distance ( $L$ ) de  $4\mu\text{m}$ .

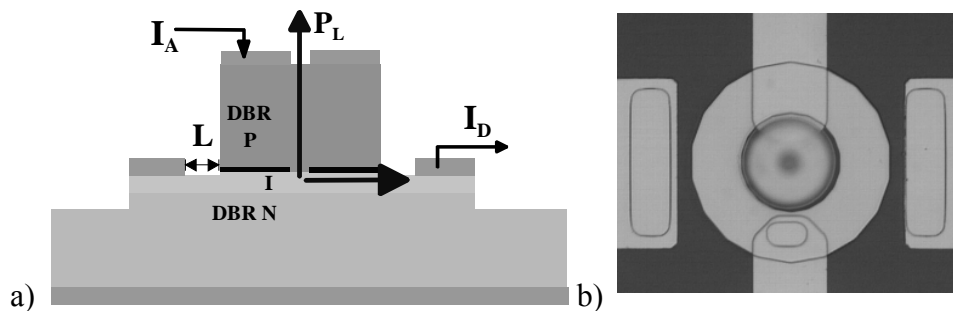


Figure 28 : VCSEL avec photodétecteur intégré : a) schéma de principe ; b) vue de dessus avec  $L = 4\mu\text{m}$

Les caractéristiques statiques de ce dispositif sont présentées sur la figure 29. On note la très nette augmentation du niveau de signal détecté par rapport à la géométrie précédente, et notamment du photocourant passant d'une quinzaine de  $\mu\text{A}$  à plus de  $700\mu\text{A}$ . De plus, l'ajout de la barrière Schottky a conduit à une prépondérance du photocourant dans le courant détecté et permet à présent de s'affranchir d'un traitement du signal. [36]. Ces résultats très satisfaisants, à comparer avec le meilleur résultat de la littérature,  $120\text{nA}$ , obtenu pour des VCSEL/détecteur à cavité gravée [28].



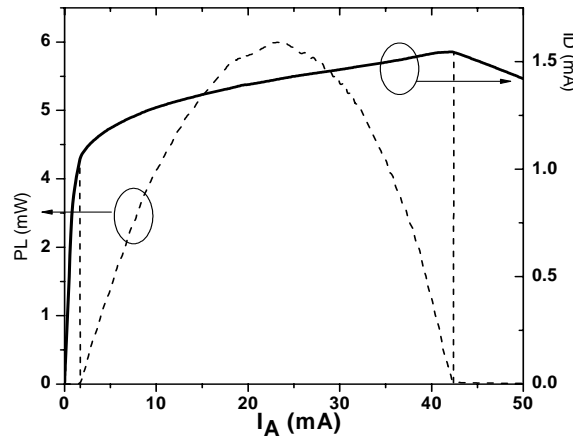


Figure 29 : Puissance émise par le VCSEL  $P_L$  et courant détecté  $I_D$  mesurés sur le composant à contact Schottky

Nous avons par ailleurs mesuré l'évolution de la puissance optique, des courants appliqué et détecté en fonction de la tension appliquée pour différentes températures allant de 20 à 100°C (figure 30) [37]. La sensibilité de détection s'améliore légèrement avec l'augmentation de la température. Pourtant, le courant de saturation du contact Schottky augmente, mais l'augmentation du courant de saturation du VCSEL est plus rapide et compense donc cette dégradation.

Enfin, des mesures en régime impulsionnel à largeur étroite d'impulsion ( $<1\mu$ s) nous ont permis d'estimer le temps de réponse du détecteur à environ 20ns. Ce temps permet de garantir le fonctionnement intégrateur à 10 GHz, ce qui est une des conditions indispensables pour l'asservissement de la puissance moyenne de l'émetteur. Néanmoins nous envisageons de procéder à une implantation de bore de la zone comprise entre le VCSEL et le détecteur de manière à optimiser le fonctionnement du composant en régime dynamique.

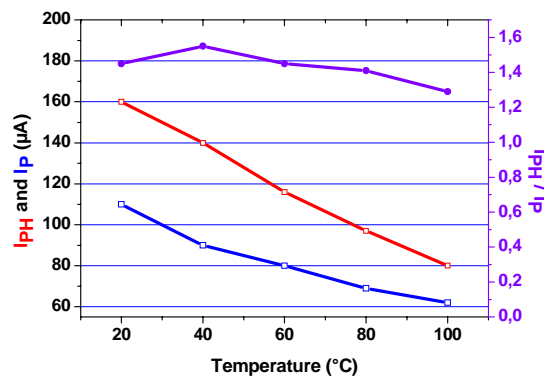


Figure 30 : Evolution avec la température du courant parasite, du photocourant et de leur rapport

## Conclusions

L'ensemble des travaux théoriques et expérimentaux que nous avons menés nous ont permis de mieux comprendre le fonctionnement optique des microcavités verticales en régime de photodétection, notamment dans le cas des VCSELs à diaphragme d'oxyde enterré à utilisation duale. Nous avons ainsi mis en évidence expérimentalement la présence de modes d'oxyde en régime de photodétection dans les VCSEL, ce qui n'avait été observé qu'en émission [19].

Ces travaux ont de plus conduit à la proposition de géométries nouvelles de composants pour la photodétection d'un signal externe ou interne.

Dans ce dernier cas, le concept original de détection intégrée par guidage optique latéral pour le monitoring des VCSELs a été validé. Nous avons précisé la nature des mécanismes à l'origine du signal optique détecté latéralement, et optimisé la géométrie du composant dual. Nous avons ainsi obtenu des courants détectés d'intensité importante (plusieurs centaines de microampères) à comparer aux quelques microampères obtenus dans la littérature pour des détecteurs latéraux sans couche de guidage. Les résultats que nous avons obtenus démontrent que la variation monotone du courant détecté avec le courant appliqué et son niveau d'intensité devrait permettre un asservissement direct de la puissance émise par l'émetteur, ce qui est l'objectif que nous recherchions.

De plus, les études que nous avons menées nous ont permis de préciser les limites de fonctionnement de ces dispositifs, il nous est donc désormais possible d'orienter les pistes technologiques pour améliorer encore le niveau du signal détecté : modification de la géométrie des puits quantiques et/ou implantation de la zone entre l'émetteur et le détecteur. Ainsi, des premiers essais d'implantation ionique localisée de la zone active ont montré que le courant de fuite entre émetteur et détecteur pouvait être fortement réduit [contribution à la thèse Cédric Amat, 2007], une étude de la minimisation des pertes optiques par recuit post-implantation reste toutefois à réaliser pour valider l'approche que nous avons proposée.

Enfin, pour améliorer encore la sensibilité, nous visons le couplage direct d'une faible portion du faisceau laser émis verticalement dans le guide horizontal plutôt que seulement l'émission spontanée. Ainsi Louderback et al [37] ont créé par lithographie électronique et reprise d'épitaxie un réseau de diffraction enterré dans un VCSEL pour coupler le laser à un guide horizontal lui-même intégré dans la structure, ce qui leur a permis d'obtenir une émission latérale et verticale simultanément

En s'inspirant de ces travaux, nous tenterons la réalisation d'une véritable intégration planaire VCSEL-détecteur dès que notre équipement de croissance nous permettra de mettre en œuvre dans des composants les briques élémentaires que notre équipe a déjà préparées (nano-structurations, reprise d'épitaxie). Nous travaillons également sur de nouvelles alternatives plus simples, robustes et si possibles applicables à des structures standard pour atteindre ce même but. Elles sont basées sur des géométries tridimensionnelles nécessitant la maîtrise fine de l'oxydation enterrée dans les VCSELs et/ou la mise en forme de polymères en surface des composants.

Les VCSELs à détecteur intégré de haute sensibilité que nous réaliserons ainsi pourront être avantageusement exploités dans des microsystemes dédiés à l'instrumentation tels que les capteurs pour la vélocimétrie laser ou encore la microscopie en champ proche.

## Références

1. Tan I-Hsing, E.L. Hu, J.E. Bowers, B.I. Miller, "Modeling and performance of wafer-fused resonant-cavity enhanced photodetectors", *IEEE Journal of Quantum Electronics* 31(10), 1995 pp.1863-1875.
2. K. Kishino, M. S. Ünlü, J.-I. Chyi, J. Reed, L. Arsenault, H. Morkoc, "Resonant cavity-enhanced (RCE) photodetectors", *IEEE Journal of Quantum Electronics* 27 (8), 1991 pp.2025-2034.
3. Rapport d'activité Recherche et Développement du CNRM, Météo France Toulouse 2000.
4. M. S. Ünlü, S. Strite "Resonant cavity enhanced photonic devices" *J. Appl. Phys.* 78, 1995 pp 607-639.
5. L. Averseng, V. Bardinal, P. Dubreuil, F. Van Dijk, T. Camps et A. Muñoz-Yagüe JNOG'2000, "Conception et Réalisation de photodétecteurs à microcavité verticale" 20èmes Journées Nationales d'Optique Guidée, Toulouse, 21-22 novembre 2000, p.185.
6. H. Kosaka, K. Kurihara, M. Sugimoto et K. Kasahara "Detector characteristics of a vertical cavity surface emitting laser" *Jpn J. Appl. Physics* 30 (7A), 1991 pp. L1172-74.
7. B. Rosinski, J. Chi, Y. Boucher, and J. Le Bihan, "Photodetection with VCSEL" *IEE SIOE Conference*, Cardiff, UK, Apr. 1996.
8. Dragas, M.; White, I.H.; Penty, R.V.; Rorison, J.; Heard, P.J.; Parry, G., "Dual-purpose VCSELs for short-haul bidirectional communication links," *Photonics Technology Letters, IEEE* 11(12), 1999 pp.1548-1550.
9. Lim, S.F.; Li, G.S.; Wupen Yuen; Chang-Hasnain, C.J., "Vertical-cavity lasers with an intracavity resonant detector," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 3 (2), 1997 pp.416-421.
10. Geib, K.M.; Choquette, K.D.; Allerman, A.; Hindi, J.J.; Nevers, J.; Hammous, B.E., "Monolithically integrated VCSELs and photodetectors for microsystem applications," *Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting, 1998. LEOS '98. IEEE*, vol.2,( 3-4), 1998 pp.27-28.
11. Knödl, T.; Choy, H.K.H.; Pan, J.L.; King, R.; Jager, R.; Lullo, G.; Ahadian, J.F.; Ram, R.J.; Fonstad, C.G., Jr.; Ebeling, K.J., "RCE photodetectors based on VCSEL structures," *Photonics Technology Letters, IEEE* 11 (10), 1999 pp.1289-1291.
12. O. Sjölund, D. A. Loudereback, E. R. Hegblom, J. Ko, and L. A. Coldren "Technique for integration of vertical cavity lasers and resonant photodetector" *Appl. Phys. Lett.* 73, (1998) p.1.
13. Thrush, E.; Levi, O.; Ha, W.; Carey, G.; Cook, L.J.; Deich, J.; Smith, S.J.; Moerner, W.E.; Harris, J.S., Jr., "Integrated semiconductor vertical-cavity surface-emitting lasers and PIN photodetectors for biomedical fluorescence sensing," *IEEE Journal of Quantum Electronics* 40 (5), 2004 pp. 491-498.
14. J. F. Carlin, R. P. Stanley, P. Pellandini, U. Oesterle, and M. Ilegems "The dual wavelength Bi-vertical cavity surface-emitting laser" *Appl. Phys. Lett.* 75, 1999 p.908.
15. Brunner, M.; Gulden, K.; Hovel, R.; Moser, M.; Carlin, J.F.; Stanley, R.P.; Ilegems, M., "Continuous-wave dual-wavelength lasing in a two-section vertical-cavity laser," *Photonics Technology Letters, IEEE* 12 (10), 2000 pp. 1316-1318.
16. C. Bringer, V. Bardinal, C. Fontaine, L. Averseng, T. Camps, P. Dubreuil, A. Munoz-Yague « Dual-purpose single-cavity oxide-confined VCSEL photodetector" *Proceedings SPIE* 4942, pp. 355-362, VCSELs and Optical Interconnects; Hugo Thienpont, Jan Danckaert; Eds. 2002.
17. P. Dubreuil, Mémoire de diplôme-Ingénieur, "Oxydation thermique humide contrôlée de multicouches de (Ga,Al)As. Application aux lasers à cavité verticale émettant par la surface (VCSELs)" Centre National des Arts et Métiers, Toulouse, 13 Décembre 2000.
18. V. Bardinal, L. Averseng, C. Bringer, J. Polesel-Mariss, T. Camps, P. Dubreuil, C. Fontaine, E. Bedel-Pereira, C. Vergnenegre, A. Muñoz-Yagüe, « Experimental demonstration of photodetection oxide modes presence in a dual-purpose single-cavity oxide-apertured VCSEL " *Appl. Phys. Lett.* 81 (10), 2002 pp.1771-1772.
19. Kent D. Choquette, K. L. Lear, R. P. Schneider, Jr., and K. M. Geib « Cavity characteristics of selectively oxidized vertical-cavity lasers" *Appl. Phys. Lett.* 66 (25), 1995 p.19.
20. C. Bringer, V. Bardinal, L. Averseng, J. Polesel-Mariss, T. Camps, P. Dubreuil, C. Fontaine, E. Bedel-Pereira, C. Vergnenegre, "Study of the photodetection behaviour of oxide-confined vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSELs)" *Physica E* 17, 2003 pp. 470-471.
21. C. Bringer, V. Bardinal, T. Camps, P. Dubreuil, C. Fontaine "Effects of selective wet etching on the the spectral properties of a vertical-cavity surface emitting laser /detector" CLEO'Europe 2003, Munich, Allemagne, 23-27 juin 2003.
22. Dragas, M.; White, I.H.; Penty, R.V.; Heard, P.J.; Parry, G., "Dual-purpose vertical-cavity surface-emitting lasers for data communications applications," 16th IEEE International Semiconductor Laser Conference, 4-8 Oct 1998. *ISLC 1998 NARA*. 1998 pp.107-108.

23. Lim, S.F.; Hudgings, J.A.; Li, G.S.; Yuen, W.; Lau, K.Y.; Chang-Hasnain, C.J., "Self-pulsating and bistable VCSEL with controllable intracavity quantum-well saturable absorber," *Electr. Lett.* 33 (20), 1997 pp.1708-1710.
24. C. Diederichs and J. Tignon "Design for a triply resonant vertical-emitting micro-optical parametric oscillator" *Appl. Phys. Lett.* 87, 2005 p.251107.
25. L. Chusseau, G. Almuneau, LA Coldren, A. Huntington, and D. Gasquet, "Coupled-cavity vertical-emitting semiconductor-laser for continuous-wave terahertz emission," *IEE Proc. J.* 149, 2002 pp. 88–92.
26. G. Almuneau, C. Bringer, V Bardinal-Delagnes, C. Amat, T. Camps, J.-B. Doucet, P. Dubreuil, C. Fontaine, L. Chusseau "Lasers à cavité verticale à double cavité pour la génération d'un battement THz »9e Journées de la Matière Condensée, Nancy, (Septembre 2004)
27. Jae-Heon Shin and Y. H. Lee "Determination of nonradiative recombination coefficients of vertical-cavity surface-emitting lasers from lateral spontaneous emission" *Appl. Phys. Lett.* 67, 1995 p.314.
28. A. Hsu, S.L. Chuang, "Measurement of spontaneous emission spectrum in vertical-cavity surface-emitting lasers," *Lasers and Electro-Optics, 2002. CLEO '02, Technical Digest. Summaries of Papers Presented at the CLEO '02 1*, 2002 p. 469
29. K.D. Choquette, N. Tabatabaie, R.E. Leibenguth, "Detector-enclosed vertical-cavity surface emitting lasers," *Electron Lett.* 29 (5), 1993 pp.466-467.
30. Bardinal, V.; Bringer, C.; Camps, A.; Daran, E.; Almuneau, G.; Amat, C.; Fontaine, C., "Integrated photodetection in VCSELs," *Transparent Optical Networks, -7 July 2005, Proceedings of 2005 7th International Conference 2*, 2005 pp. 120-125.
31. C. Bringer, V. Bardinal, E. Daran, T. Camps, Y.G. Boucher, G. Almuneau, O. Gauthier-Lafaye, P. Dubreuil, J.-B. Doucet and C. Fontaine "Detection of lateral spontaneous emission for VCSEL monitoring " *Photonics Europe, Strasbourg 26–30 April, 2004, Proceedings SPIE Micro-optics, VCSELs and Photonic Interconnect.* 5453, 2004 p. 209.
32. <http://camfr.sourceforge.net/>
33. V. Bardinal, T. Camps, E. Daran, C. Amat, G. Almuneau, C. Bringer, M. Suleiman and C. Fontaine "Lateral waveguiding properties of VCSELs for integrated optical monitoring" *Opt. Quant. Electron.* 38, 2006 pp.523–534 © Springer 2006
34. Y. G. Boucher, V. Bardinal, T. Camps and E. Daran "Spontaneous emission and lateral photo-detection in "vertical" micro-cavities". *Ann. Phys. Fr.* 32 (2-3) 2007, pp. 111-113.
35. Camps, T.; Bringer, C.; Bardinal, V.; Almuneau, G.; Amat, C.; Daran, E.; Doucet, J.B.; Dubreuil, P.; Fontaine, C., "High sensitivity integrated lateral detection in VCSELs," *Electron. Lett.* 41 (3), 2005 pp.129-131.
36. C. Amat, T. Camps, V. Bardinal, C. Bringer, G. Almuneau, E. Daran and C. Fontaine "Integrated lateral detection in VCSELs for optical system monitoring", Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics CLEO-PR'05, Tokyo, Japon 11-15 juillet 2005.
37. Loudierback, D.A.; Pickrell, G.W.; Lin, H.C.; Fish, M.A.; Hindi, J.J.; Guilfoyle, P.S., "VCSELs with monolithic coupling to internal horizontal waveguides using integrated diffraction gratings," *Electron. Lett.* 40 (17), 2004 pp. 1064-1065.



## Chapitre 3

# Contrôle de l'injection électrique dans les VCSELs de grande dimension

*Encadrement : thèse de E. Havard (50% avec Thierry Camps ; 21 mai 2008)*

*Collaborations : ACI solitons de cavité (LPN,INLN), Projet Européen FunFACS*

*Publications : P22, P24, P25, brevet sur le PAIOx,*

*Conférences : CN.14, CN.16, CN.20*

### 1. Contexte et motivations

Initialement limités aux applications nécessitant des faibles puissances ( $<1\text{mW}$ ), les VCSELs peuvent à présent être exploités pour la génération de puissance avec notamment les dispositifs émettant par le substrat et/ou un arrangement matriciel [1] [2]. Des VECSELs, dispositifs à cavité externes, peuvent aussi être mis à contribution pour les puissances très importantes.

Toutefois, les performances des composants émettant par la surface souffrent du couplage électro-thermo-optique liés à l'auto-échauffement sous forte injection électrique. En particulier, il demeure toujours difficile de réaliser des VCSELs émettant uniformément par la surface à 850nm avec de grandes dimensions transverses ( $>100\times 100\mu\text{m}^2$ ).

Or, leur emploi serait attractif pour réaliser des mémoires optiques ou des registres à décalage, en exploitant le maintien et la manipulation de solitons de cavité dans ce type de résonateur non linéaire. Les démonstrations de ces phénomènes reposent pour le moment sur des structures pompées optiquement (VCSELs ou VECSELs) ou sur des VCSELs pompés électriquement à émission par le substrat ; l'utilisation de dispositifs émettant par la surface donnerait donc un degré de liberté supplémentaire pour la manipulation électrique de solitons. Cependant, dans ces dispositifs, l'injection du courant par l'anode supérieure de géométrie annulaire entraîne inévitablement une inhomogénéité radiale rédhibitoire. Il faut donc trouver de nouvelles approches permettant d'améliorer l'uniformité de l'émission.

C'est dans ce contexte que nous avons initié en 2005 une étude sur l'injection électrique des VCSELs de grande taille, s'inscrivant dans le cadre du projet européen FunFACS (**F**undamentals, **F**unctionalities and **A**pplications of **C**avity **S**olitons<sup>1</sup>). Notre démarche a consisté à évaluer puis appliquer différentes solutions technologiques innovantes pour optimiser l'uniformité des porteurs dans la zone active de VCSELs de grand diamètre. Parmi les solutions évaluées on compte l'utilisation de grilles métalliques d'injection, d'électrodes semi-transparentes en ITO (oxyde d'indium-étain), de jonctions tunnels Esaki et enfin un contrôle localisé de l'injection.

---

<sup>1</sup> FunFACS (**F**undamentals, **F**unctionalities and **A**pplications of **C**avity **S**oliton)

Partenaires : Laboratoire de Physique et Nanostructures LPN, Institut Non Linéaire de Nice INLN, Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes LAAS, Università dell'Insubria (Como), Politecnico di Bari (Bari), University of Strathclyde USTRAT, Computational Nonlinear and Quantum Optics Group (CNQO), Photonic Group (Photonics), ULM Photonics UP.

Site internet : [www.funfacts.org](http://www.funfacts.org)

Avant de détailler nos travaux sur l'injection électrique dans les VCSEL de grande dimension, nous allons donc présenter brièvement la principale application qui les a motivés.

### 1.1. Solitons spatiaux de cavité

Lors d'une propagation d'une impulsion guidée dans une fibre optique, on observe sa déformation spectrale et temporelle de l'onde à cause de la dispersion et de l'auto-modulation de phase. Dans certaines conditions, la dispersion et les effets non-linéaires peuvent se compenser : l'impulsion garde sa forme initiale. On appelle cette onde soliton temporel ou soliton de propagation.

De manière similaire, dans les microcavités, des phénomènes d'étalement (diffraction, diffusion) et des phénomènes de focalisation (auto-focalisation, saturation de l'absorption) peuvent aboutir à une structuration lumineuse spatiale stable (fig.1). L'auto-focalisation repose principalement sur les propriétés non-linéaires de matériau : l'amplitude optique fait varier localement l'indice. En d'autres termes, on peut définir les solitons de cavité comme des ondes isolées auto-localisées spatialement dans un milieu non-linéaire [3].

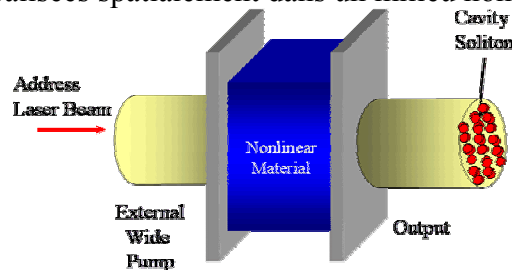


Figure 1 : Schéma de principe de création de solitons spatiaux de cavité

### 1.2. Inscription et manipulation de solitons de cavité dans les VCSELs

L'écriture de solitons de cavité dans un VCSEL à injection électrique « Bottom-Emitting » a été démontrée pour la première fois en 2002 [4]. Le VCSEL était pompé au dessus du seuil de transparence, mais en dessous du seuil laser. Dans cette expérience, la possibilité d'inscrire un spot (pixel) d'intensité plus élevée que le fond dans le composant a été démontrée à l'aide d'un faisceau laser de faible diamètre. Ce spot lumineux persiste dans le temps même après avoir interrompu celui qui lui a donné naissance (Figure 2). Par ailleurs, en changeant la phase du faisceau d'écriture, le pixel peut être éteint. Deux pixels ont été inscrits, ont cohabité et ont pu être aussi maintenus et/ou éteints indépendamment. A la fin de l'expérience, le retour à la répartition lumineuse initiale démontre bien la réversibilité de ces phénomènes.

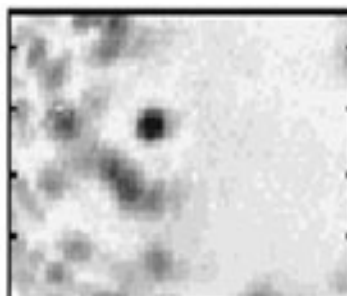


Figure 2 : Photo de champ proche en intensité inversée mettant en évidence la création d'un soliton de cavité dans un VCSEL à émission par le substrat (point sombre).

Cette première démonstration a permis de montrer la faisabilité d'un processeur d'information monolithique de deux bits tout optique. De nombreux travaux théoriques ont

été menés pour interpréter ces résultats. Les développements actuels consistent désormais à travailler sur un nombre de solitons de cavité plus élevés et à contrôler leur mouvement (les « manipuler »), ce qui implique de disposer de structures VCSEL présentant une excellente homogénéité du pompage optique et électrique. C'est dans le cadre du projet européen FunFACS que ces recherches ont été menées (2005-2008).

## 2. Problématique de l'injection dans les VCSEL à émission par la surface

Pour des paramètres fixés, les solitons présentent une taille et une amplitude fixée. Dans le cas de microcavités, leur taille est comprise entre 10 ou 20 microns. Ceci explique la nécessité de travailler sur de grandes surfaces, proches de la centaine de microns de diamètre.

La configuration de l'injection électrique et de l'extraction de la chaleur dans les VCSEL à émission par le substrat permet d'obtenir des puissances élevées ainsi qu'une illumination relativement homogène sur de larges surfaces (fig.3). Ainsi, la première démonstration de manipulation de solitons de cavité dans les microcavités à base de semiconducteurs à pompage électrique a été réalisée par Barland et al [4] sur ce type de VCSEL.

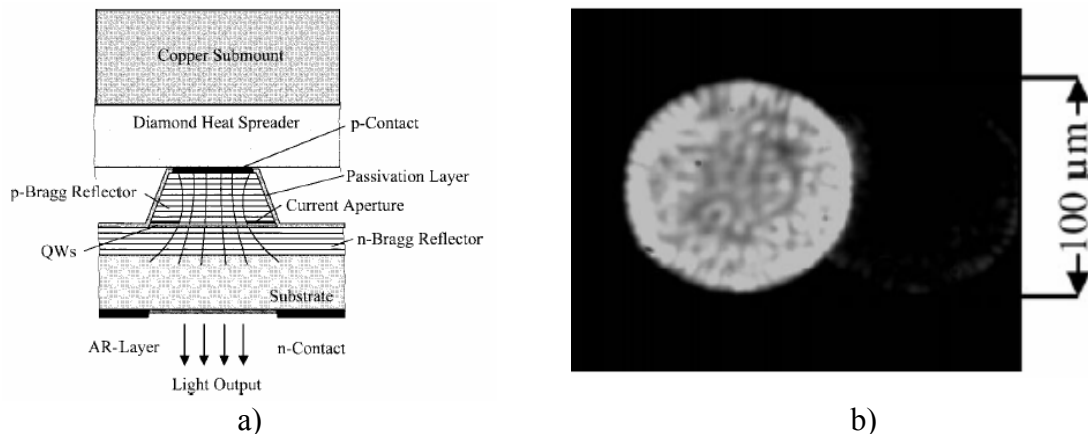


Figure 3 : VCSEL émettant par le substrat : a) schéma de principe b) champ proche d'une émission au dessus du seuil d'un composant de 100µm de diamètre.

En revanche, cette technologie n'est pas compatible avec certaines gammes de longueurs d'onde où le substrat GaAs est absorbant ( $\lambda < 873\text{nm}$ ). Il faut de ce fait exploiter la technologie émettant par la surface, qui laisse par ailleurs plus de liberté sur la définition des motifs : électrodes en forme de grilles, multi-électrodes de polarisation indépendantes permettant d'induire des gradients de porteurs... Toutefois, cette topologie à électrode annulaire supérieure souffre d'une inhomogénéité de l'émission inhérente à l'injection électrique favorisant le pompage électrique périphérique au détriment du centre.

Surmonter cette problématique a donc constitué notre contribution dans le projet FunFACS : elle vise à lever les verrous technologiques pour concevoir et réaliser des VCSELs de grande dimension émettant par la surface à 850nm avec un profil uniforme. Au-delà des retombées de ce projet, concevoir et disposer de tels composants ouvre la voie à de nouvelles applications dans le domaine de la génération de puissance ou encore des VCSELs à cavité externe (VECSELs).

Les VCSELs émettant par la surface ne peuvent laser en leur centre lorsque leur diamètre excède quelques dizaines de microns ( $\sim 30\mu\text{m}$ ) car l'injection périphérique de



l'électrode d'anode combinée aux problèmes d'auto-échauffement sont fatals pour une émission uniforme, comme le montre la figure 4 [1]. Le champ proche de ce VCSEL de grande dimension ( $\Phi=100\mu\text{m}$ ) montre que l'émission est confinée à la seule périphérie laissant apparaître de nombreux modes d'ordre élevé.

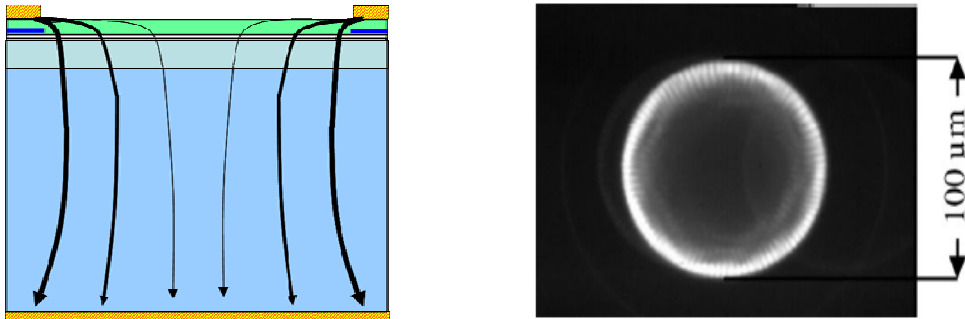


Figure 4 : Vue en coupe et champ proche d'un VCSEL de grande taille émettant par la surface [6]

### 3. Solutions technologiques envisagées

La plupart des études sur l'injection électrique dans les VCSELs portent sur des composants de faible diamètre, avec pour objectif d'optimiser le confinement optique et ainsi améliorer les performances d'émission (faisceau monomode, contrôle du mode TE ou TM, rendement, bande passante). Concernant les composants de grande dimension, la problématique s'inscrit dans un tout autre cadre : on cherche à améliorer l'uniformité des porteurs dans les puits quantiques en compensant la tendance naturelle à l'injection périphérique du courant, liée à la géométrie annulaire de l'électrode d'anode placée dans notre cas en haut du DBR (P) supérieur.

Pour remédier à ce problème, nous avons passé en revue et analysé différentes approches susceptibles d'améliorer l'uniformité de l'injection électrique. Parmi celles-ci on peut distinguer les techniques d'ingénierie des électrodes supérieures (transparentes [5][6][7] ou métalliques [8] ) des méthodes de localisation de l'injection (par implantation ionique [9], jonction tunnel [10][11], de micro-structurations de surface [12][13] ou encore d'oxydation  $\text{AlOx}$  [13] ou  $\text{PAIOx}$  (procédé d'oxydation planaire 15)).

L'analyse comparative de ces différentes solutions, répertoriés dans la littérature ou bien proposées par notre équipe, nous a permis de choisir les plus pertinentes pour remédier au problème posé en tenant compte des limites de nos moyens technologiques actuels.

En effet, les approches choisies devant rester compatibles avec l'emploi de couches épitaxiales standard en raison des problèmes que connaît actuellement notre bâti d'épitaxie et qui nous ont poussés à travailler avec des couches commerciales standard (sans aménagements spécifiques) dans l'attente d'un nouvel équipement (cf. tableaux). Cette approche « pragmatique » nous a donc conduits à privilégier des solutions simples et génériques applicables quelle que soit la longueur d'onde d'émission des dispositifs.

Solution	Avantages	Inconvénients
ITO	Transparence	Résistivité élevée
Grille métallique	Résistivité faible	Zones d'émission discrètes

Tableau 1 Récapitulatif des solutions basées sur l'ingénierie des électrodes supérieures

Solution	Avantages	Inconvénients
Implantation ionique	Simple, planaire	Résolution limitée
Jonction Esaki / PN	Fort contraste d'injection Faible chute de tension	Inadaptée au GaAs (car dopage insuffisant dans notre cas) Reprise épitaxie nécessaire
Diode Zener/ PN	Fort contraste d'injection	Chute de tension élevée Reprise épitaxie nécessaire
Micro-structuration enterrée	Contraste d'injection moyen	Reprise épitaxie nécessaire perturbation optique
PAIOx	Excellent contraste d'injection	Reprise épitaxie nécessaire perturbation optique
Gravures en surface + ITO	Simple	perturbation optique

Tableau 2. Récapitulatif des solutions mettant en œuvre une injection localisée

Finalement, à l'issue de cette première étude et en tenant compte de nos possibilités technologiques, l'ajout d'une couche d'étalement de courant en surface, l'insertion d'une jonction Zener et l'emploi d'une électrode transparente associée à une injection localisée multipoints ont été retenues lors de la phase d'évaluation par la simulation.

## 4. Simulation de l'injection électrique dans les VCSELs

Une modélisation de l'injection électrique dans les VCSELs avait déjà été initiée dans notre équipe en 2003, en vue d'améliorer les caractéristiques électriques des résistances séries des miroirs de Bragg (cf chapitre 1). Nous l'avons donc poursuivie et largement approfondie dans le cadre du projet FunFACS pour évaluer, puis mettre en œuvre, des solutions technologiques innovantes visant l'uniformité des porteurs dans la zone active de VCSELs de grand diamètre.

### 4.1. Choix d'une simulation électrique bidimensionnelle

La modélisation des diodes laser à semi-conducteurs est reconnue comme très complexe car elle fait appel à plusieurs aspects de la physique et à un couplage entre les domaines électrique, thermique et optique. De plus, la structure épitaxiale des VCSELs comporte de multiples hétérojonctions et gradualités d'interfaces (miroirs de Bragg, zones actives à puits quantiques) et rend complexe le maillage longitudinal de ces dispositifs. De nombreux travaux traitent de simulation exhaustive (électrique-optique-thermique) [16][17] et certains logiciels prennent en compte ces phénomènes couplés dans les VCSELs [18][19]. En revanche, il n'existe pas à notre connaissance de travaux d'optimisation par la simulation au sujet des VCSELs à émission par la surface de grande dimension.

Compte tenu de tous ces éléments, la résolution dans un premier temps du seul problème d'uniformité électrique nous a semblé pertinente pour améliorer le fonctionnement global de ce type de dispositif.

Fort de ce constat pragmatique, notre étude s'est donc limitée à l'analyse de la conduction électrique et à la recherche de solutions technologiques (processus et design) pour essayer d'uniformiser la répartition des porteurs, après étalement des lignes de courant lors de la conduction dans le DBR supérieur. Notre critère pour garantir une bonne uniformité du faisceau s'est restreint à l'analyse de l'uniformité du profil des porteurs dans la seule zone active (plan des puits quantiques).

Après avoir testé plusieurs logiciels commerciaux et identifié leurs limites dans le cas particulier de nos larges structures, nous avons opté pour l'utilisation du logiciel commercial Silvaco et son module « Blaze » dédié aux matériaux III-V [20]. Notre premier travail a consisté à calibrer les paramètres physiques intégrés au logiciel, et notamment leur évolution avec le niveau de dopage et la concentration d'aluminium.

## 4.2. Résultats de modélisation électrique

Nous avons prédit par simulation la répartition transversale de la densité de courant suivant une coupe transversale pour plusieurs cas : tout d'abord pour un VCSEL standard monomode ( $\Phi=5\mu\text{m}$ ) (fig. 5 et 6) puis pour des VCSELs de grand diamètre ( $100\mu\text{m}$ ) avec une topologie standard et enfin en intégrant les solutions technologiques précédemment décrites.

A partir de ces résultats, nous avons observé plusieurs phénomènes. Dans tous les cas, on note une forte densité de courant près du bord injectant du contact annulaire ainsi que près du bord du diaphragme d'oxyde enterré. Nous imputons cet accroissement de la densité de courant aux mécanismes de diffusion latérale des porteurs depuis la zone pompée vers la zone non pompée sous le diaphragme d'oxyde.

Pour mieux évaluer la répartition du courant, nous avons extrait de ces résultats l'évolution des différentes composantes de la densité de courant ( $J_{\text{Tot}}$ ,  $J_y$  et  $J_x$ ) et la densité de porteurs correspondantes dans le plan des puits quantiques. Les profils radiaux de densités de porteurs que nous avons ainsi obtenus sont similaires à ceux publiés précédemment dans la littérature dans le cas de VCSELs standard [20], ce qui constitue une première validation de notre outil de simulation électrique.

Nous avons ensuite tracé le profil radial de la répartition des porteurs dans la zone active pour toutes les solutions technologiques envisagées. Les épaisseurs des couches modifiées ou rajoutées suivant les cas ont pris en compte des contraintes optiques liées au fonctionnement du VCSEL.

Nous avons défini un critère d'homogénéité  $F = n_{\text{Lat}}/n_{\text{cent}}$  dans la zone utile correspondant au rapport entre le maximum et le minimum de la densité de porteurs et qui doit tendre idéalement vers 1. On montre que ce facteur d'uniformité est de 4.3 (pour  $3\text{kA/cm}^2$  appliqué) dans le cas d'un composant annulaire standard de  $100\mu\text{m}$  et sa valeur ne fait que croître avec le niveau de la polarisation (fig. 7).

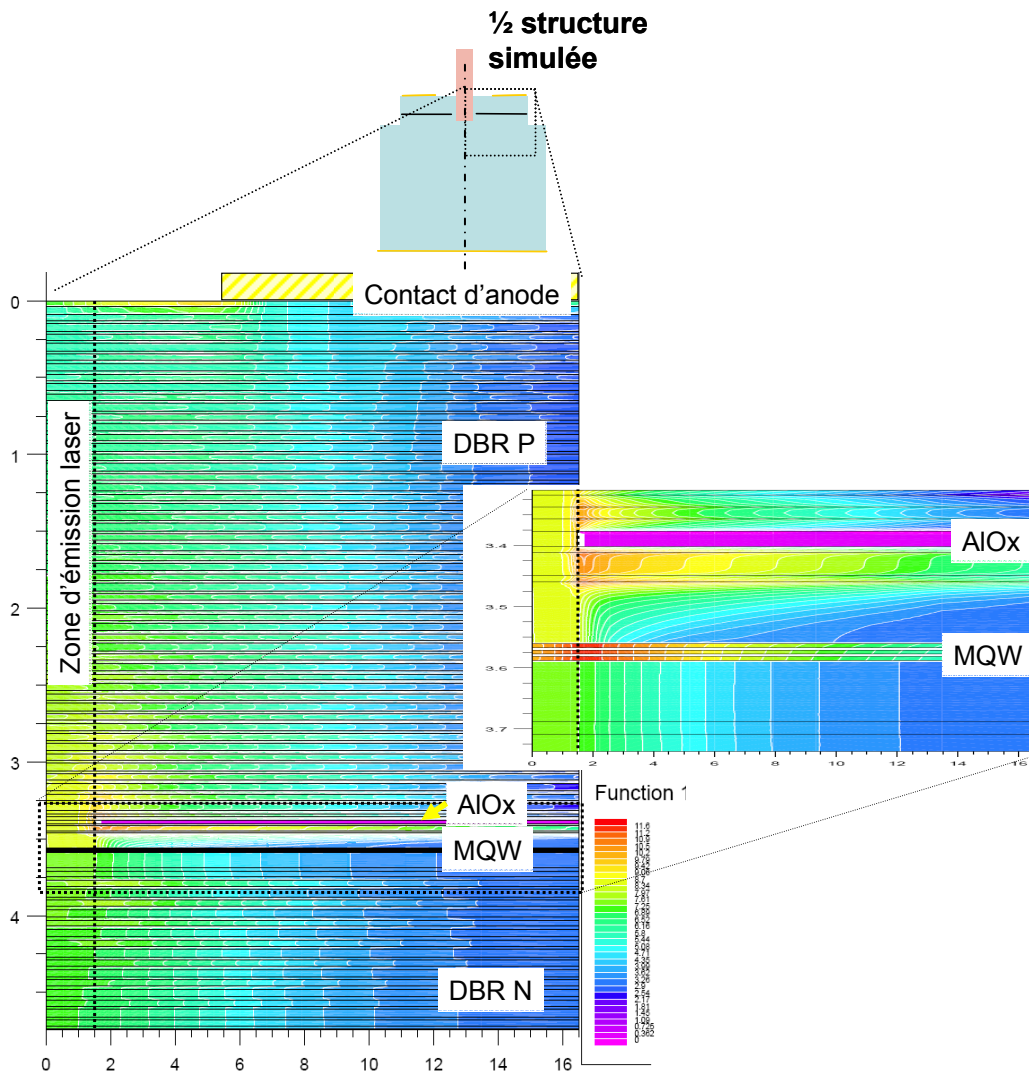


Figure 5 : Densité de courant dans un VCSEL standard monomode avec un zoom sur la zone active (échelle en  $J_n$  (J en A/cm<sup>2</sup>))

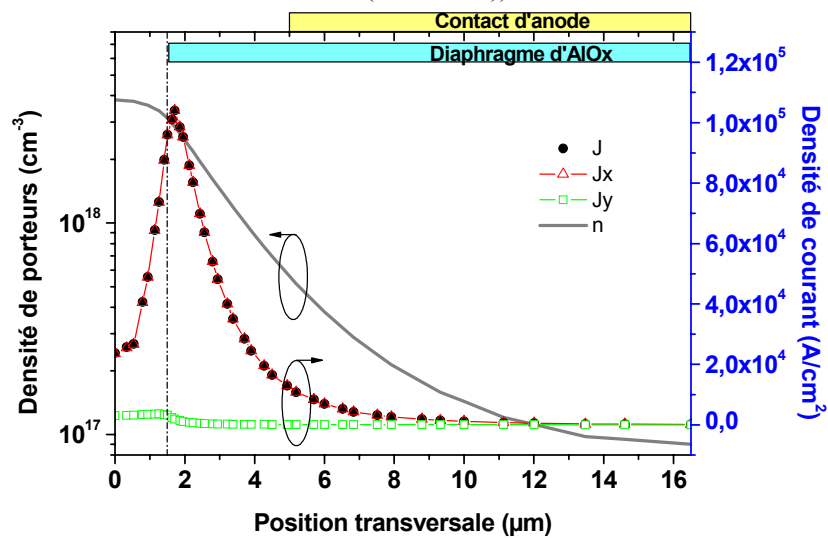


Figure 6 : Densités de courant et de porteurs calculées dans le plan des puits quantiques

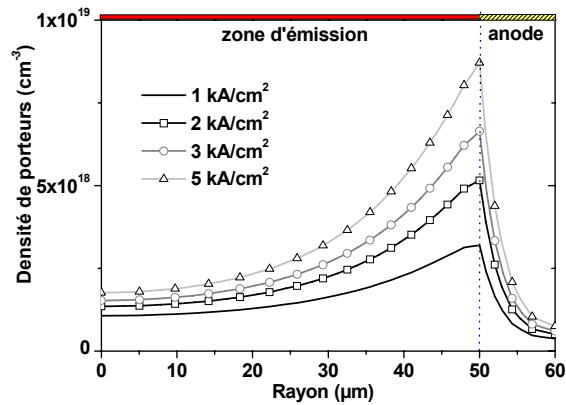


Figure 7 : Densités de porteurs dans les puits quantiques en fonction de la polarisation pour un VCSEL standard large (100 $\mu\text{m}$ )

Nous avons ensuite montré que ce facteur  $F$  peut être réduit à 2.4 en procédant au dépôt une électrode d'ITO en surface, et même à 1.9 en insérant une jonction Zener en surface. Cette dernière approche a par la suite été éliminée en raison de la chute de tension résultante ; l'ajout de jonctions tunnels fortement dopées avec une géométrie optimisée eut été nettement préférable, mais cette solution n'est pas réalisable efficacement avec notre bâti d'épitaxie actuel. Cette solution sera de nouveau considérée dès que nous aurons reçu notre nouvel équipement.

Enfin, des simulations considérant des structures à injection localisée multipoints ont démontré qu'il est possible d'atteindre une valeur de facteur d'uniformité proche de l'unité. Nous avons ainsi obtenu une quasi-uniformité du profil des porteurs dans les puits ( $F=1.09$ ) avec des faibles ondulations pouvant être réduites moyennant une réduction de la taille des zones d'injections tout en en augmentant le nombre (fig. 8).

De plus, l'étude de l'influence du niveau de polarisation permet de conclure que ce facteur varie très peu et reste proche de l'unité (fig.9). Cette insensibilité à la polarisation est encourageante pour le comportement électro-thermique global du composant.

Il nous a paru intéressant d'évaluer la sensibilité du profil de densité de porteurs à la variation de la résistance par carré de la couche d'étalement d'ITO dans la gamme [10-50  $\Omega/\square$ ]. L'évolution du profil transversal des porteurs obtenus est présentée sur la figure 10. Alors qu'on obtient un profil quasiment uniforme pour le cas standard correspondant à 20 $\Omega/\square$ , on retrouve une tendance à l'émission périphérique avec une valeur supérieure (50 $\Omega/\square$ ). Enfin, le profil est carrément inversé dans le cas d'une couche optimale ou la résistance serait réduite à 10 $\Omega/\square$  : la densité de porteurs est plus élevée au centre que sur la périphérie. Une telle répartition pourrait être mise à profit pour compenser les éventuelles dégradations de l'homogénéité de l'émission induites par le couplage électro-thermo-optique.

Les résultats de l'étude comparative de toutes les approches que nous avons envisagées sont reportés sur la figure 11. Elle montre clairement l'apport des différentes approches envisagées et souligne bien l'intérêt de l'approche à injection localisée, garantissant la meilleure uniformité du pompage électrique et limitant les écueils liés au couplage électrothermique rencontrés habituellement.

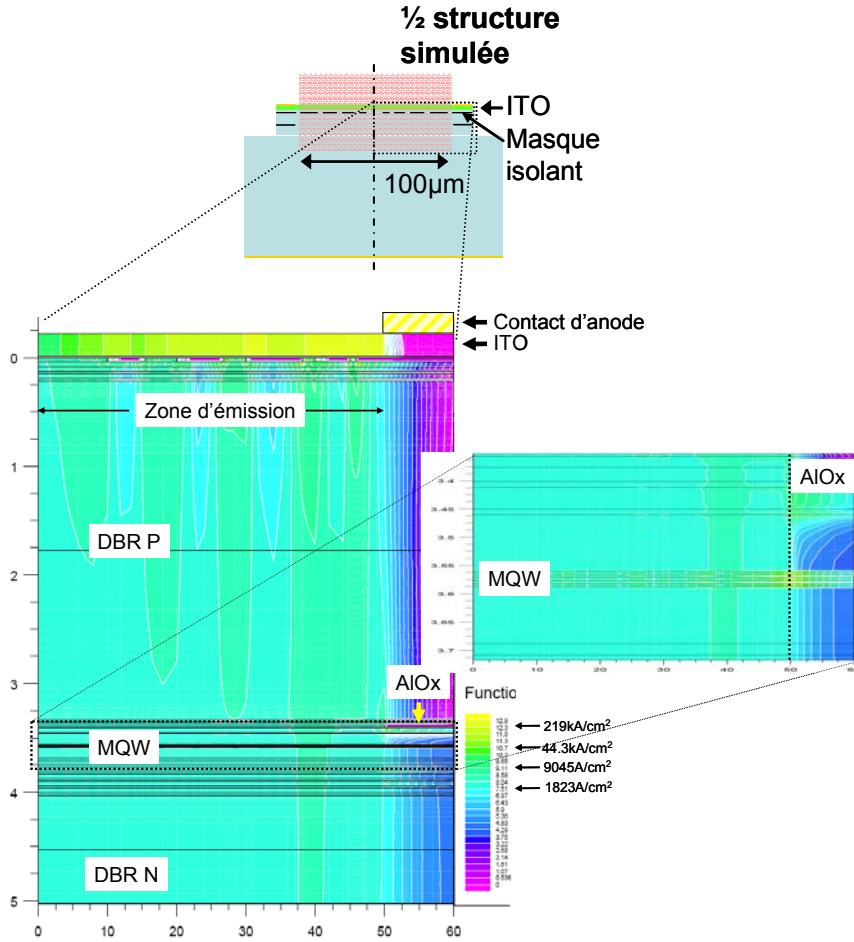


Figure 8 : Densité de courant dans la structure (échelle en logarithmique)

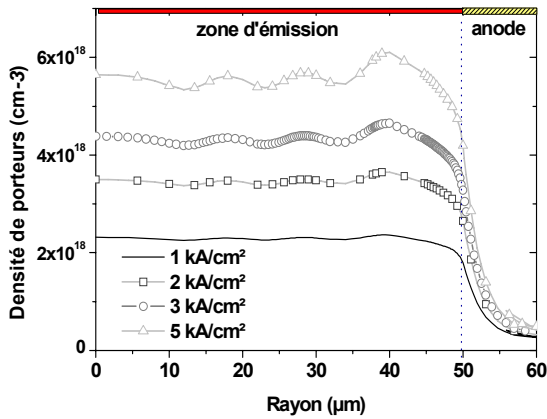


Figure 9 : Evolution du profil d'intensité de porteurs en fonction de la polarisation dans le cas de l'injection électrique multipoints.

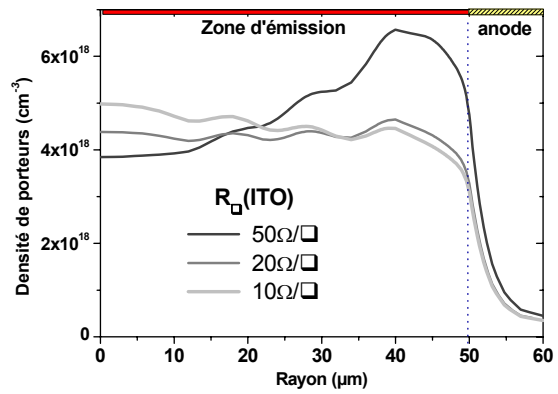


Figure 10 : Influence de la résistance par carré de l'ITO sur le profil des porteurs

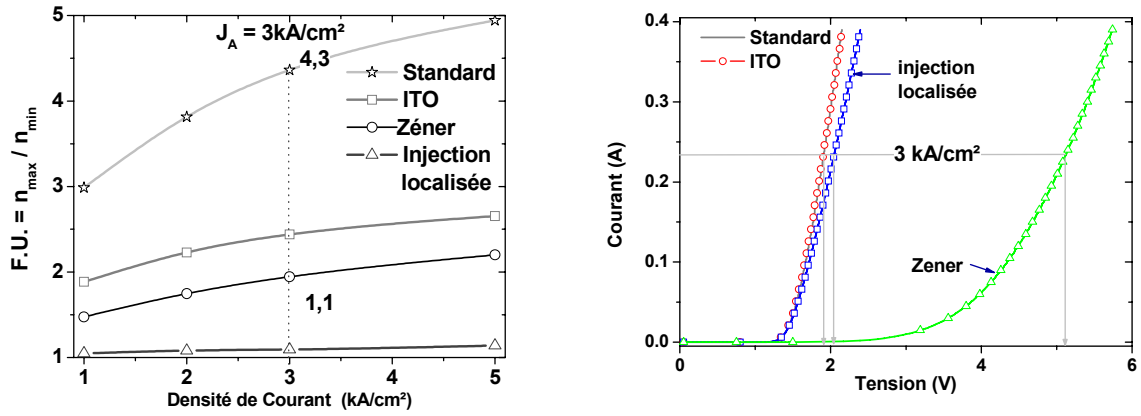


Figure 11 : Evolution du facteur d'uniformité avec la densité du courant appliqué  $J_A$  pour les différentes approches technologiques simulées sur un VCSEL de 100 $\mu$ m de diamètre b) Comparaison de la caractéristique I(V) pour chaque approche technologique

## 5. Résultats expérimentaux

A la suite de cette phase de simulation, nous avons retenu la solution technologique la plus appropriée à l'uniformisation de l'injection électrique, à savoir l'ajout d'une couche d'oxyde métallique transparent, l'ITO, associée à une injection localisée multipoints.

Cette solution est réalisable avec des motifs définis par oxydation planaire ou PAIOx [15], procédé innovant sur lequel notre groupe détient un brevet et qui nécessite une étape délicate de reprise d'épitaxie. La mise au point de ce procédé complexe n'étant pas encore achevée, nous avons opté pour la gravure localisée de la couche de contact associée à une couche d'étalement du courant en ITO (fig.12) et nous l'avons développée expérimentalement.

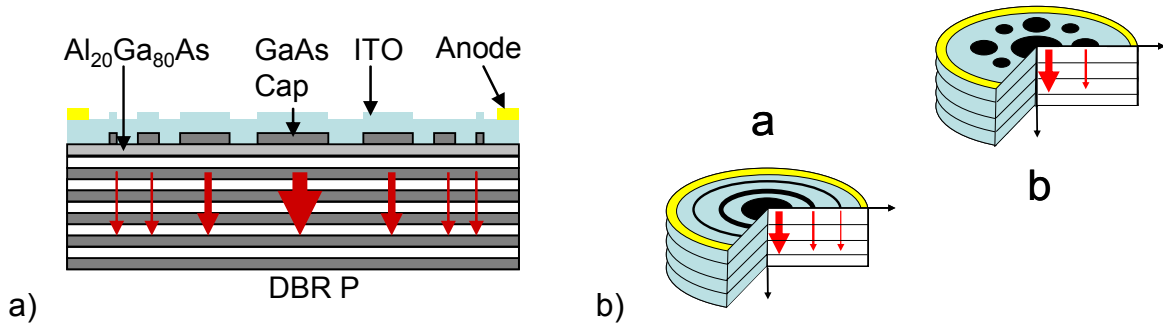
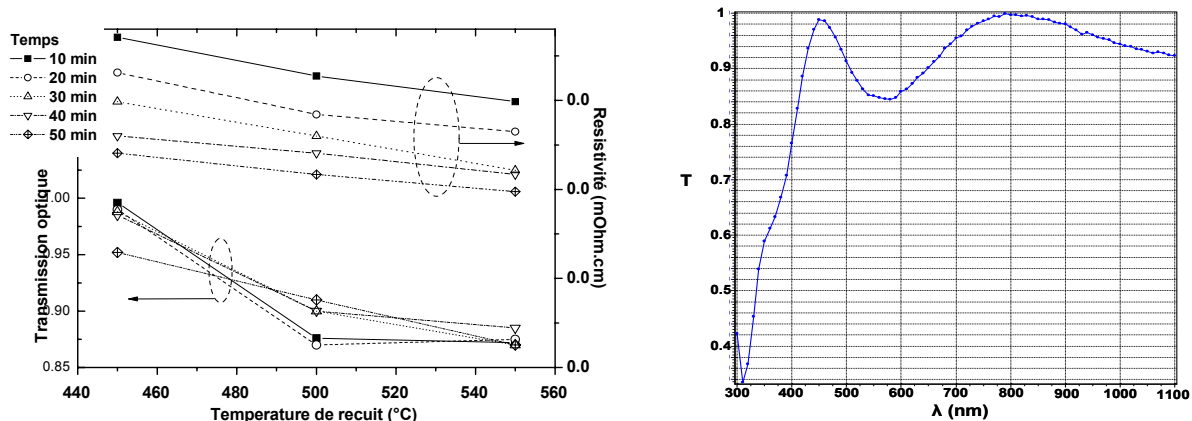


Figure 12 a) Principe de l'injection localisée multipoints par gravure localisée du cap layer en surface suivi d'un dépôt d'électrode transparente en ITO b) deux motifs sont proposés ici, zones d'injection (en noir)(a) concentriques, (b) disques de différentes tailles.

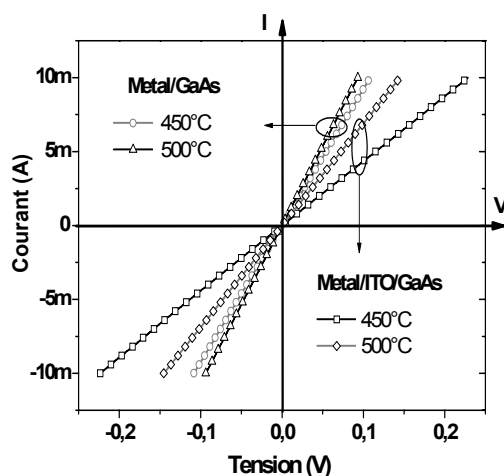
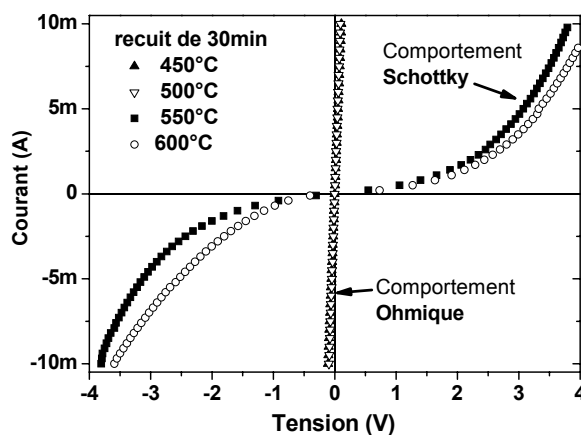
### 5.1. Optimisation du dépôt de l'ITO

Pour évaluer l'apport d'électrodes en ITO (oxyde d'indium et d'étain), nous avons tout d'abord mis au point ce dépôt d'ITO par pulvérisation cathodique au laboratoire. Puis, nous avons optimisé ses propriétés optiques et électriques sur verre par post-traitement thermique (fig. 13). Nous avons montré qu'un recuit de 30min à 500°C constitue un bon compromis pour l'optimisation conjointe des propriétés optiques et électriques : on obtient une résistance par carré de couche de 50 $\Omega$ /□, correspondant à une résistivité de 1.2 m $\Omega$ .cm, avec une transmission optique supérieure à 90% à 850nm.



## 5.2. Etude de l'interface ITO/GaAs :Be

Nous avons ensuite montré grâce à des mesures sur des motifs de type TLM que les conditions optimales de recuit de ces électrodes sur nos multicouches à base de GaAs dopées Béryllium étaient très différentes de celles obtenues généralement dans la littérature sur verre (500°C) ou sur les diodes à base de semi-conducteurs III-V [21][22].





Le recuit optimal pour l'empilement Au/Ti/ITO/GaAs correspond à une température de 500°C pendant 30 minutes et conduit à l'obtention d'une résistance de contact environ deux fois plus élevée que celle de l'interface standard (Au/Ti/GaAs (P)) à 450°C.

Pour expliquer ce résultat, nous avons mené des analyses SIMS qui ont permis d'analyser les profils d'Indium, d'étain et d'oxygène à l'interface ITO/GaAs pour des températures comprises entre 450 et 600°C (figures 16 et 17). Ces mesures ont mis en évidence une forte diffusion de l'oxygène à l'interface ITO/GaAs au delà de 550°C (figure 17a), entrainant la formation d'un complexe Be-O Ce dernier serait responsable du comportement non ohmique de l'interface [23].

L'analyse TEM de l'interface (collaboration CEMES-CNRS) a conforté ces résultats en montrant clairement la présence à l'interface, après un recuit à une température supérieure à 450°C, d'une couche épaisse et désordonnée (figure 17b). Cette couche, riche en Oxygène et en Gallium, est responsable de la forte résistance d'interface observée [24].

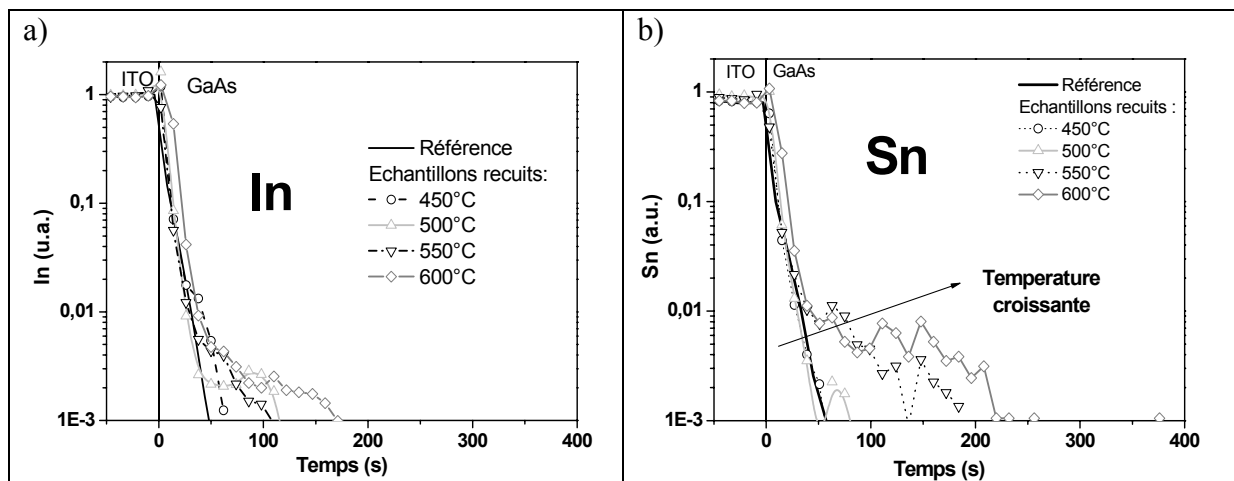


Figure 16 : Profils SIMS normalisés de l'Indium (a) et de l'étain (b) à l'interface ITO/GaAs :Be pour plusieurs températures de recuit

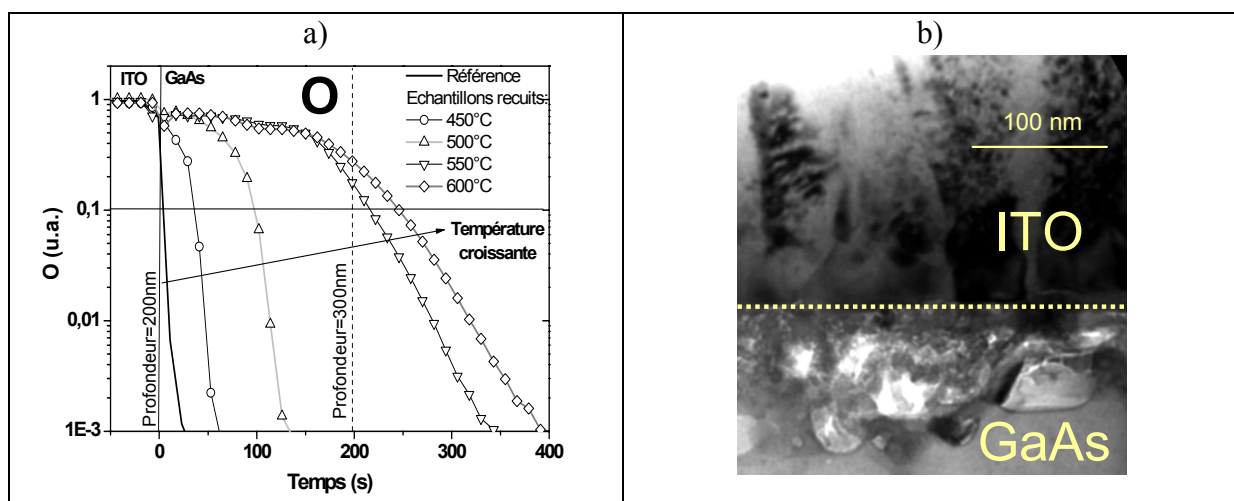


Figure 17 : a) Profils SIMS normalisés de l'oxygène à l'interface ITO/GaAs :Be pour plusieurs températures de recuit . b) photo TEM de l'interface traitée à 600°C (A. Rocher, Y. Kihn, CEMES)

Ces résultats doivent donc être pris en compte lors de la conception de composants optoélectroniques associant le dopage au Béryllium du GaAs et les électrodes en ITO : la température de recuit ne doit pas excéder 500°C dans ce cas. Pour éviter ce problème et accéder à des valeurs optimales de résistivité, nous envisageons d'améliorer encore les conditions de dépôt de l'ITO et d'insérer à l'interface ITO/GaAs une barrière à diffusion de l'oxygène (2nm de Tungstène) [25].

### 5.3. Contraste d'injection obtenu par gravure localisée du cap associée à de l'ITO

Pour évaluer la faisabilité de l'injection localisée par gravure, nous avons mesuré et comparé les caractéristiques électriques des interfaces ITO/GaAs ( $P^+$ ) (fig. 18 : structure a) et ITO/ $Al_{20}Ga_{80}As$  (P) (structure b). La première interface présente le comportement ohmique escompté, en accord avec l'étude précédente (fig.19). En revanche, l'interface ITO/ $Al_{20}Ga_{80}As$  (P) présente un comportement redresseur de type Schottky et répond favorablement à notre attente en terme de blocage à la conduction.

On obtient un comportement semblable à celui que l'on pourrait obtenir avec une jonction tunnel Esaki enterrée. Ainsi, en se plaçant à une densité de courant de 1 kA/cm<sup>2</sup>, on observe un rapport de 400 entre la valeur de la résistance de l'interface ohmique ITO/GaAs et l'interface Schottky ITO/GaAlAs. Cette valeur élevée de contraste d'injection permet d'envisager sereinement son exploitation pour garantir l'injection localisée souhaitée.

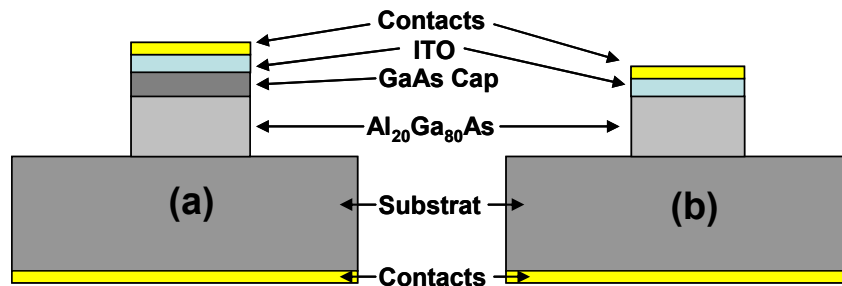


Figure 18 : Description des deux configurations comparées pour la mesure du contraste d'injection par gravure localisée : a) mesa avec interface ITO/GaAs (dopée P<sup>+</sup>) b) mesa avec interface ITO/ $Al_{20}Ga_{80}As$  (dopée P)

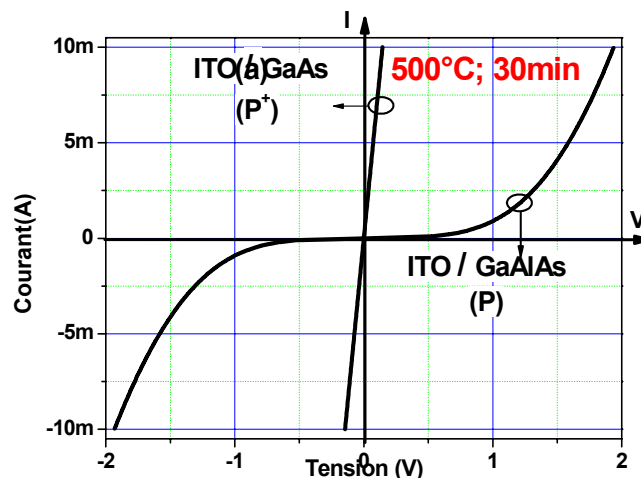


Figure 19 : Caractéristiques électriques des interfaces (a) ITO/GaAs (P<sup>+</sup>) et (b) ITO/ $Al_{20}Ga_{80}As$  (P) démontrant la faisabilité de l'injection multipoints par gravure localisée du cap GaAs (P<sup>+</sup>)

#### 5.4. Réalisation de composants de grande dimension

Parallèlement à ces études technologiques, deux générations successives de composants VCSELS ont été conçues et fabriquées. La première comportait des électrodes à grilles métalliques ; ces composants n'ont fonctionné en continu à l'ambiante uniquement dans le cas de petites surfaces actives (5 à 10 $\mu\text{m}$ ).

Elle nous a permis d'appréhender le problème de la dissipation thermique dans ce type de composant. En effet, outre notre travail sur l'optimisation de l'injection pour améliorer l'uniformité des porteurs dans la zone active, les préoccupations « classiques » de minimisation des pertes dans les amenées du courant et de réduction du seuil laser ont été considérées, nous avons ainsi mis en évidence l'utilité d'un diaphragme d'oxyde court sous les électrodes. De même, un effort important a été porté sur la réalisation de ponts à air pour améliorer la qualité des contacts (fig. 20a) et enfin sur le conditionnement (packaging) pour améliorer l'extraction de la chaleur (fig. 20b).

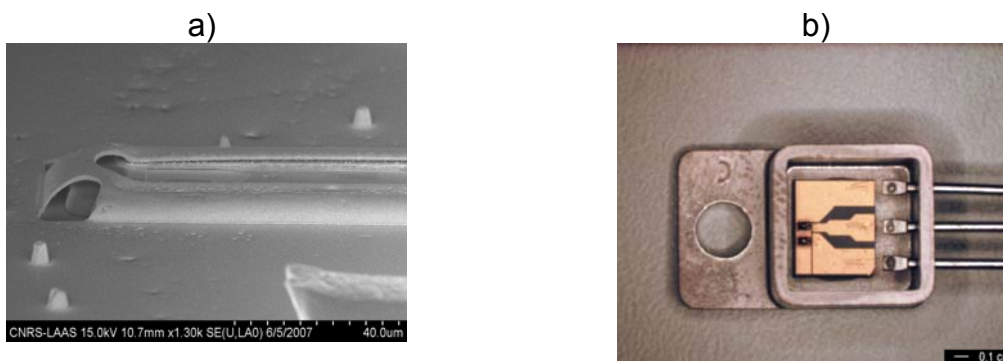


Figure 20 : a) vue MEB d'un pont à air de composant linéique de 220x20 $\mu\text{m}^2$  ; b) vue du composant monté sur embase SiC dédiée puis sur boîtier TO220

La deuxième génération de composants bénéficiant de l'ensemble de ces optimisations et comportant des électrodes en ITO a permis d'une part de valider le modèle électrique de la caractéristique I(V) des dispositifs (fig. 21a) et d'obtenir d'autre part des VCSELS de forme linéique (220 $\mu\text{m}$ x20 $\mu\text{m}$ ) capables d'émettre 50mW en régime continu à l'ambiante sur toute la surface du composant (fig. 21b). Ces composants, dont la géométrie pourrait être intéressante pour réaliser des registres à décalage pour solitons, sont actuellement en cours de test chez nos partenaires de l'INLN dans le cadre du projet FunFACS.

Par ailleurs, nous avons pu mesurer en régime impulsif l'effet positif de l'ITO sur l'étalement des lignes de courant sur des composants circulaires de même surface (fig. 22) , mais pour obtenir un fonctionnement en continu, il sera nécessaire d'améliorer encore l'uniformité d'injection et d'associer l'ITO à des plots d'injection localisée, problème sur lequel nous travaillons actuellement. Notons que le recuit d'ITO déposé sur surfaces microstructurées s'est révélé problématique en raison de contraintes très élevées qui conduisent souvent à une rupture de la continuité du dépôt au niveau des reliefs. L'insertion d'une couche d'accroche avant le dépôt de l'ITO va être prochainement étudié dans ce but.

Enfin, une étude préliminaire nous a permis de montrer que réaliser une électrode transparente faiblement résistive sans post-traitement thermique est possible en utilisant le ZnO à la place de l'ITO. Nos premiers tests réalisés en collaboration avec le CIRIMAT semblent prometteurs. Nous avons mesuré une résistivité de 2.5 m $\Omega$ .cm (le double de l'ITO) avec 94% de transmission pour du ZnO sans aucun recuit après dépôt. De plus, le ZnO semble moins contraint sur surfaces structurées.

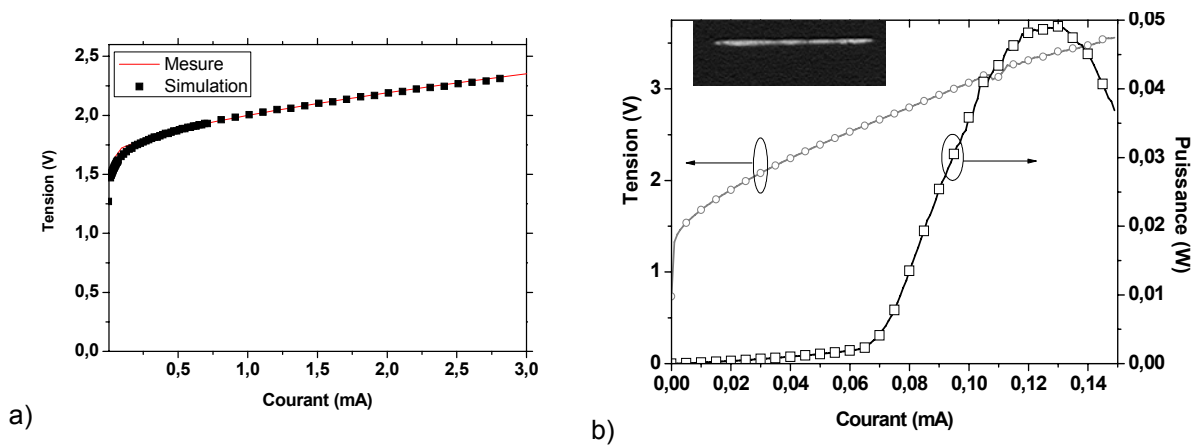


Figure 21 : a) validation du modèle électrique sur un composant de taille standard (5µm) ; b) Caractéristique P-I-V (champ proche en insert) mesuré en continu à l'ambiante pour un VCSEL linéique de 220x20µm<sup>2</sup>

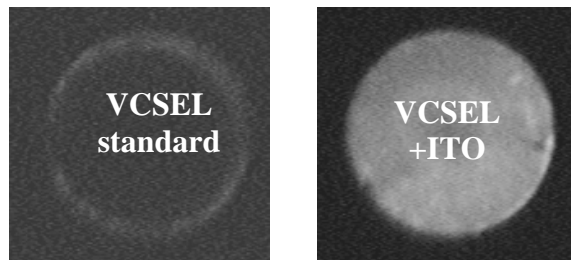
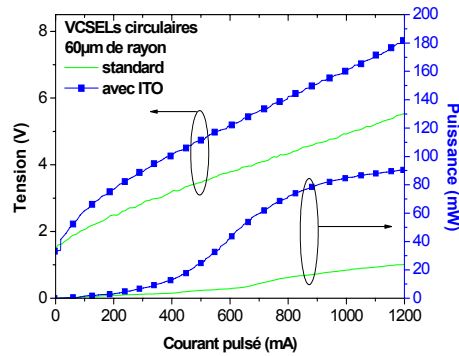


Figure 22 : Caractéristiques I(V) et P(I) en régime impulsionnel de VCSELs de 120µm de diamètre avec et sans ITO (pulse 1ms , période 5µs) et champs proches correspondants mesurés pour un courant de 1.5A.

## Conclusions

Ces travaux constituent une première contribution à l'étude de l'injection électrique et à la réalisation de VCSELs de grande dimension à l'aide d'une approche distribuée de l'injection électrique. Nous avons développé un outil de simulation prédictif permettant un « défrichage » des solutions technologiques préalable à toute réalisation.

Pour le moment, nous avons partiellement validé les approches proposées sur des composants bidimensionnels. En effet, les problèmes technologiques liés aux fortes contraintes présentes dans l'ITO que nous déposons et son comportement redresseur après recuit (diffusion de l'Oxygène) ne nous ont pas permis à ce jour de bien démontrer l'apport de notre approche d'injection répartie en régime continu.

Néanmoins, les résultats déjà obtenus sur des composants linéiques ainsi que les alternatives envisagées (couche d'accroche de l'ITO, remplacement de l'ITO par du ZnO) sont très encourageants. Nous espérons atteindre prochainement d'atteindre nos objectifs et valider cette approche générique, transposable à d'autres filières que la filière GaAs.

Enfin, nous comptons explorer les voies jusque-là inaccessibles dans un composant complètement réalisé au laboratoire grâce au prochain équipement d'épitaxie de notre laboratoire (2009) qui rendra possible la croissance de structures VCSEL à dopage carbone que nous associerons à des reprises d'épitaxie, aux micro et nano-structuration de surface et internes et à l'oxydation planaire (PAIOx).

## Références

1. M. Grabherr, M. Miller, R. Jäger, R. Michalzik, U. Martin, H.J. Unold, and K.J. Ebeling, "High-Power VCSEL's: Single Devices and Densely Packed 2-D-Arrays" *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron.* 5 (3), 1999 pp.495-502.
2. J.F Seurin, C.L. Gosh, Viktor Khalfin, A. Miglo, G. Xu, J.D. Wynn, Prachi Pradhan and A. D'Asaro. "High power vertical cavity surface-emitting arrays" *Proc. of SPIE* 6876, 2008,
3. E. Rosencher and B. Vinter, *Optoelectronique* Masson, Paris, 1998.
4. S. Barland, J.R. Tredicce, M. Brambilla, L.A. Lugiato, S. Balle, M. Giudici, T. Maggipinto, L. Spinelli, G. Tissoni, T. Knödl, M. Miller and R. Jäger "Cavity solitons as pixels in semiconductor microcavities" *Nature* 419, année pp. 699-702.
5. C. L. Chua, R. L. Thornton, D. W. Treat, V. K. Yang and C. C. Dunnrowicz. "Indium Tin Oxide Transparent Electrodes for Broad-Area Top-Emitting Vertical-Cavity Lasers Fabricated Using a Single Lithography Step". *IEEE Photonics Technology Letters* 9, 1997 pp.551-553.
6. W.J. Jiang, M.C Wu, H.C. Yu, C.Y. Huang, C.P. Sung and J.Y. Chi. "The effect of indium tin oxide as an ohmic contact for the 850 nm GaAs oxide-confined VCSEL" *Solid-State Electronics* 46, 2002 pp. 1945-8.
7. F.-I. Lai, Y.-H. Chang, T.H. Hsueh, H.W. Huang, L.H. Lai, H.C. Kuo, S.C. Wang and T.-C. Guung "Improvement of kink characteristics performance of GaAs VCSEL with a indium-tin-oxide top transparent overcoating" *Materials Science and Engineering B* 113, 2004 pp. 203-206.
8. F. Monti di Sopra, M. Brunner, H.-P. Gauggel, H.P. Zappe, M. Moser, and R. Hövel, E. Kapon. "Continuous-wave operation of phase-coupled vertical-cavity surface-emitting laser arrays" *Appl. Phys. Lett.* 77, 2000
9. A.C. Lehman and K.D. Choquette. "One- and Two-Dimensional Coherently Coupled Implant-Defined Vertical-Cavity Laser Arrays". *IEEE Phot. Technol. Let.* 19, (22) 2007
10. J.C. Garcia, E. Rosencher, Ph. Collot, N. Laurent, J.L. Guyaux, B. Vinter, and J. Nagle "Epitaxially stacked lasers with Esaki junctions: A bipolar cascade laser," *Appl. Phys. Lett.* 71, 1997 pp. 3752-4.
11. M. Mehta, D. Feezell, D.A. Buell, A.W. Jackson, L.A. Coldren and J.E. Bowers "Electrical Design Optimization of Single-Mode Tunnel-Junction-Based Long-Wavelength VCSEL" *IEEE J. Quantum Electron.* 42, 2006 pp. 675-682.
12. P. Debernardi, J. M. Ostermann, M. Feneberg, C. Jalics, and R. Michalzik "Reliable Polarization Control of VCSEL Through Monolithically Integrated Surface Gratings: A Comparative Theoretical and Experimental Study" *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron.* 11, 2005 pp. 107-117.
13. A. Haglund, S.J. Gustavsson, J. Vukusic, P. Jedrasik and A. Larsson "High-power fundamental-mode and polarisation stabilised VCSEL using sub-wavelength surface grating" *Electron. Lett.* 41, 2005
14. O. Sjolund, D. A. Louderback, E. R. Hegblom, J. Ko, and L. A. Coldren, Technique for integration of vertical cavity lasers and resonant photodetectors *Appl. Phys. Lett.* 73, 1 (1998), DOI:10.1063/1.122951
15. C. Amat, G. Almuneau, P. Gallo, L. Jalabert, S. Moudji, P. Dubreuil, T. Camps, J.B. Doucet, E. Havard, V. Bardinal, C. Fontaine and A. Munoz-Yague, "Free engineering of buried oxide patterns in GaAs/AlAs epitaxial structures" *Electron. Lett.* 43, 2007
16. L.A. Coldren, S. W. Corzine, "Diode Lasers and photonic integrated circuits." Wiley-interscience Eds.
17. H. Li. K. Iga. "Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser Devices" Springer Eds
18. Joachim Piprek. "Semiconductor optoelectronic devices. Introduction to physics and simulation " Academic Press.
19. R. Michalzik, M. Grabherr and K.J. Ebeling "High-power VCSELs: modeling and experimental characterization" *Proc. SPIE* 3286, 1998 pp. 206-19.
20. <http://www.silvaco.com/>
21. Chua C L, Thornton R L, Treat D W, Yang V K and Dunnrowicz C C "Indium Tin Oxide Transparent Electrodes for Broad-Area Top-Emitting Vertical-Cavity Lasers Fabricated using a Single Lithography Step" *IEEE Photonics Technology Letters* 9, 1997 pp. 551-3.
22. Matin M A, Jezierski A F, Bashar S A, Lacklison D E, Benson T M, Cheng T S, Roberts J S, Sale T E, Orton J W, Foxton C T and Rezazadeh A A "Optically transparent indium-tin-oxide (ITO) ohmic contacts in the fabrication of vertical cavity surface-emitting lasers" *Electron. Lett.* 30, 1994 pp. 318-20.
23. E. Havard, T. Camps, V. Bardinal, L. Salvagnac, C. Armand, C. Fontaine, S. Pinaud "Effect of thermal annealing on the electrical properties of indium tin oxide (ITO) contact on Be-doped GaAs for optoelectronic applications" *Semicond. Sci. Technol.* 23, 2008 p. 035001.
24. E. Havard, V. Bardinal, T. Camps, L. Salvagnac, J.B. Doucet, S. Pinaud et C. Fontaine, Y. Kihn et A. Rocher. Electrode ITO sur GaAs dopé Be pour applications optoélectroniques »12èmes JNMO, 3-6 juin 2008, Oléron.
25. W.J Jiang, M.C. Wu, H.C. Yu, C.Y. Huang, C.P. Sung, J.Y. Chi, "The effet of indium tin oxide as an ohmic contact for the 850 nm GaAs oxide-confined VCSELs" *Solid-State electronics* 46, 2002 pp.1945-1948.



## **Chapitre 4**

### **Intégration des VCSELs dans les microsystèmes**

*Encadrements : thèses de C. Bringer (soutenue en 2005) et de B. Reig (2008-...), post-doctorat de Christophe Levallois*

*Collaborations : ACI Photonique MOEMS, contrat européen Optonanogen, projet LAAS MIOPY, projet région FIAB SU-8*

*Publications: P19, P21, A4, A6, A7, A9, A10*

*Conférences : CI.10, CI.15, CI.16, CNI7, CN19, CN21*

#### **1. Intérêt des VCSELs pour les microsystèmes optiques**

Depuis la mise au point du VCSEL émettant à l'ambiante en continu à la fin des années 90, la maîtrise de la fabrication des VCSELs est devenue suffisamment mature pour envisager leur insertion en tant que simples éléments de base dans des microsystèmes réalisant des fonctions optoélectroniques diversifiées. Ce sont en effet des sources stratégiques en raison de leur géométrie d'émission -par la surface- qui rend possible leur utilisation matricielle pour des applications où le parallélisme est un atout. De plus, leur faisceau présente une symétrie de révolution ce qui rend aisé leur couplage aux fibres optiques. La structure d'un VCSEL monomode standard émettant à 850nm est maintenant optimisée pour réaliser un composant qui soit à la fois fiable, économe, puissant, rapide et rentable pour les applications de communication de données.

Un aspect central des recherches actuelles sur les VCSELs porte désormais sur leur intégration dans les MOEMS.

Ainsi les VCSELs sont maintenant développés pour être intégrés dans des systèmes à horloges atomiques [1], des capteurs de gaz [2] ou encore pour des systèmes d'analyse ou de manipulation biologique [3][4]. On commence même à envisager l'utilisation de VCSELs à l'intérieur desquels l'analyse de liquide pourrait être réalisée : on peut citer le concept de Bio-cavité laser [5] ou plus récemment la réalisation d'un VCSEL micro-fluidique par l'équipe de Choquette (Univ. Illinois) [6].

De manière à tirer parti des multiples capacités d'intégration de ces sources, nous avons pris part à deux projets qui exploitent des VCSELs comme éléments de microsystèmes.

#### **2. Microsystème SNOM basé sur la réinjection optique dans un VCSEL**

Nous avons tout d'abord participé à un projet mené par le LOPMD Besançon et soutenu par le Programme Microsystèmes du CNRS (2002-2004) qui visait à utiliser des VCSELs pour la réalisation d'un microscope optique à champ proche en exploitant la réinjection optique dans le VCSEL comme principe actif de détection, apportant en régime de champ proche une hypersensibilité aux perturbations externes [7].

Cette approche nouvelle, permettant d'envisager l'intégration monolithique en technologie III-V de systèmes de détection optique à l'échelle nanométrique, devait de plus améliorer la sensibilité de la détection SNOM. En pratique, l'architecture visée était



composée d'une cavité VCSEL associée à un photo-détecteur placé à l'arrière de la cavité et d'une pointe de diamètre inférieur à 50nm reportée sur le plan de sortie du VCSEL (fig. 1).

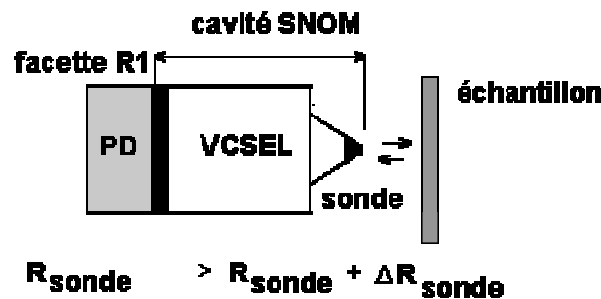


Figure 1 : Principe de détection basé sur la mesure de la réinjection optique dans un VCSEL en champ proche

Il s'agissait ici de détecter la perturbation du fonctionnement d'un VCSEL engendrée par le faisceau réinjecté à partir de la surface de manière à en imager la topographie. L'hypersensibilité à la réinjection optique en champ proche dans nos VCSELs monomodes émettant à 830nm a été tout d'abord mise en évidence [8].

Des premières images SNOM ont ensuite été obtenues au LPMO dans une configuration en Y comportant un détecteur externe et ont été comparées avec succès à des images obtenues en topographie conventionnelle (fig. 2b). Ces premiers résultats prometteurs ont donc permis une première validation l'approche proposée [9].

Nous souhaitons donc concevoir avec nos partenaires de nouveaux systèmes de détection optique simples et compacts basés sur ce principe pour l'instrumentation et la biologie. Cependant, nous n'avons pas encore résolu à l'époque le problème de la détection interne dans le VCSEL que ce soit avec une ou deux cavités et n'avons donc pas pu poursuivre cette étude.

Nous envisageons désormais de continuer dans cette voie en exploitant en particulier les résultats récents que nous avons obtenus sur la détection latérale intégrée dans les VCSELs (cf. chapitre 2) ainsi que nos avancées sur la fabrication de micro-éléments en polymère en surface des composants pour réaliser des micropointes intégrées (voir paragraphe 4 de ce chapitre).

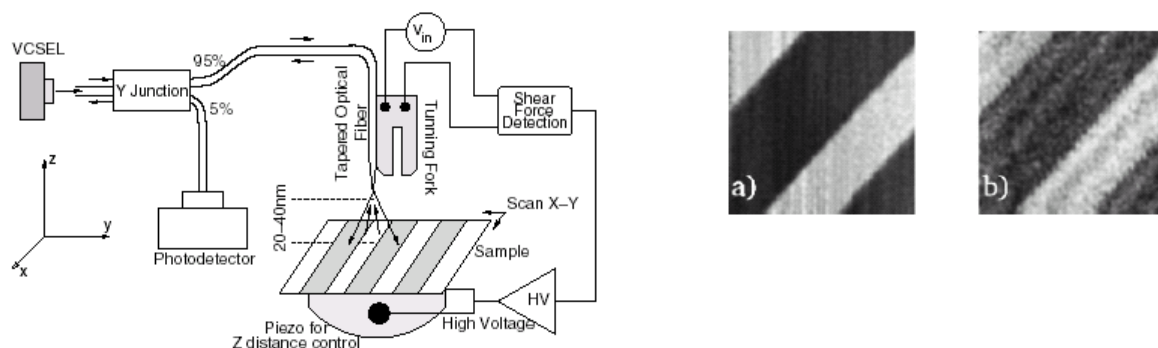


Figure 2 : a) configuration expérimentale du microscope SNOM miniature basé sur la détection de la réinjection optique dans une cavité VCSEL b) comparaison des images obtenues dans cette configuration (a) et en topographie classique (b)

### 3. VCSELS monomodes pour microcapteur biomédical

#### 3.1. Contexte : Projet Optonanogen

Le but du projet IST Optonanogen<sup>1</sup> consistait à développer un capteur biologique portable ultra-sensible, capable de détecter une hybridation d'acides nucléiques. L'application principale choisie était le dépistage du cancer du sein.

Dans ce microcapteur biomédical, les faisceaux issus d'une barrette de VCSELS sont dirigés vers une tête microfluidique où est localisée une barrette de microleviers, à la surface desquels sont immobilisées des molécules d'ADN test. Les faisceaux laser vont détecter la déflexion des microleviers sur lesquels se sera produite l'hybridation des différentes molécules ADN complémentaires présentes dans les liquides à analyser (fig. 3).

Le microsystème est composé de trois sous-systèmes :

- une tête microfluidique en polymère pour faire circuler les produits de la réaction.
- une barrette de 20 micropoutres sur laquelle est réalisée la réaction d'hybridation,
- un système optique de détection du mouvement des micropoutres lors de la réaction

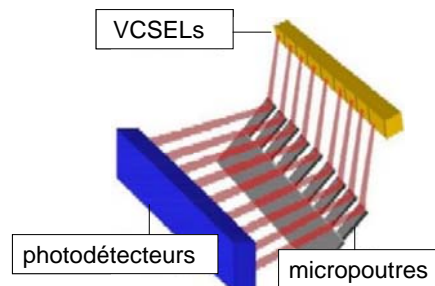


Figure 3 : Détection optique mis en jeu dans le prototype Optonanogen : 20 VCSELS visent l'extrémité de 20 micropoutres sur lesquelles peut avoir lieu une hybridation ADN. La déflexion d'une micropoutre provoque la déviation du faisceau laser correspondant, détectée par des photodétecteurs

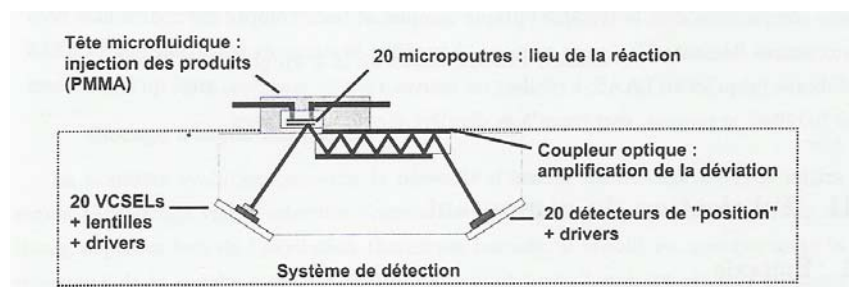


Figure 4 : Vue en coupe schématique de la tête microfluidique de détection biologique

Le principe de fonctionnement est le suivant (fig.4) : une séquence d'acides nucléiques sonde est accrochée sur la face active des poutres. Un échantillon d'ADN est isolé du tissu de l'individu et transporté via le canal microfluidique vers la zone d'analyse. Si l'individu est malade, le brin d'ADN va s'hybrider avec le gène complémentaire sur la surface active de la

<sup>1</sup> "Integrated Opto-Nanomechanical Biosensor for Functional Genomic Analysis" (2002-2005).

Ce projet européen réunissait les partenaires suivants: le CRL (Londres puis Université de Southampton) le CNM-CSIC (Madrid, Barcelone, Séville), le CNB-CSIC (Madrid), la société Genetrix (Madrid) et le LAAS. Chaque équipe de recherche a pris en charge une partie du développement du microsystème (LAAS : microsystème optique), tandis que l'intégration finale des éléments a été élaborée en commun.

poutre. Étant donné que la seconde surface est passive, le changement de contrainte va induire une courbure de la poutre. La déviation produite, de l'ordre du nanomètre, est mesurée grâce à un système optique dans lequel le faisceau réfléchi d'un laser est analysé par un photodétecteur de position.

### **3.2. Conception du sous-système optique de détection**

Notre contribution s'est inscrite dans la conception et la réalisation du sous-système optique de détection. Ce système est composé de trois éléments : les sources laser, l'élément coupleur et les photodétecteurs.

Les 20 sources laser sont élaborées sous forme de barrettes de VCSELs monomodes qui pointent sur les micropoutres. L'avantage des sources VCSELs réside dans la compacité d'un système matriciel dans lequel 20 voies peuvent être utilisées séquentiellement ou en parallèle. Le coupleur optique doit collimater les faisceaux pour éviter leur chevauchement et amplifier la déviation des signaux réfléchis de façon à détecter des déviations de l'ordre du nm. La détection est assurée par 20 photodétecteurs de position, intégrés avec leurs drivers et amplificateurs, issus de la technologie silicium.

### **3.3. Réalisation de matrices de VCSELs monomodes optimisées**

Dans le cadre de ce projet, nous avons conçu, réalisé et caractérisé des barrettes de 20 VCSELs monomodes identiques émettant sur le mode fondamental à 850nm, ce qui nous a conduits à travailler sur la stabilisation de nos procédés de réalisation technologique.

Ces travaux nous ont permis de mesurer l'écart considérable existant entre les performances ponctuelles obtenues sur un prototype de laboratoire et les performances et la reproductibilité requises sur un nombre élevé de dispositifs optimisés nécessaires dans ce type de projet.

Notre activité a porté sur l'optimisation de la structure multicouche du laser, de manière à simplifier ses étapes de fabrication et à améliorer ses caractéristiques. De nouvelles structures verticales ont été conçues et épitaxiées dans le but d'éliminer les « modes d'oxyde » en photodétection mis en évidence dans les zones oxydées par l'équipe ; elles comportaient également des couches de blocage intrinsèque de l'oxyde dans les couches d'AlAs du miroir supérieur pour éviter l'alignement délicat de deux mesas l'un sur l'autre lors de la fabrication des composants (cf. chapitre 1). Toutefois, en raison des difficultés de reproductibilité rencontrées avec notre bâti d'épitaxie, les structures verticales que nous avons finalement utilisées et processées pour ce projet ont été épitaxiées par la société Avalon, ce qui nous a permis de bénéficier de performances électriques accrues grâce au dopage carbone (au lieu de Béryllium).

Les étapes du process de fabrication des composants ont été également améliorées et fiabilisées, telle que l'étape de passivation et plus particulièrement la définition par oxydation thermique sélective du diaphragme d'oxyde enterré. Une procédure reproductible a ainsi été mise en place et nous a permis d'obtenir des barrettes monomodes à performances quasi-uniformes pour des diaphragmes d'oxyde de l'ordre de 4 $\mu$ m [10]. On peut voir sur la figure 5 les caractéristiques P(I) typiques mesurées sur les composants que nous avons réalisés et qui témoignent de la reproductibilité de la technologie développée notamment au niveau de seuil laser.

Ces travaux d'optimisation se poursuivent encore actuellement sous la responsabilité de G. Almuneau avec l'optimisation du four d'oxydation AlOx et la mise en place d'un contrôle en temps réel de la formation du diaphragme d'oxyde

Les spectres d'émission de ces composants ont été également mesurés (fig.6) démontrant un fonctionnement monomode transverse. Enfin, la divergence a été extraite de la mesure du profil de faisceau en champ lointain : on obtient une valeur de divergence de 13° FWHM pour les composants monomodes (fig. 7).

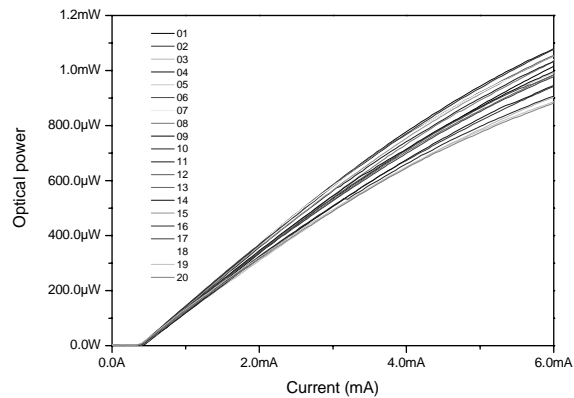


Figure 5 : Courbes P(I) typiques obtenues pour des barrettes de 20 composants de diamètre d'oxyde de 5.5µm

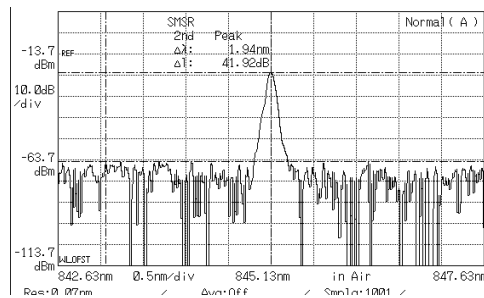


Figure 6 : Spectre d'émission monomode obtenu pour un composant de 3.5µm à 1.5mA

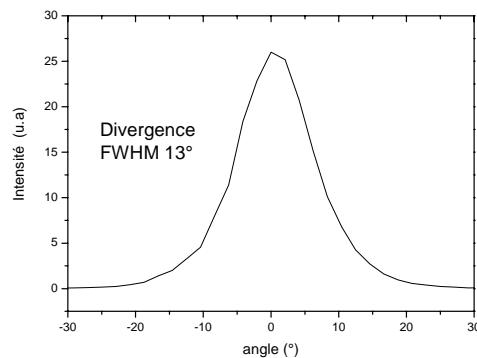


Figure 7 : Divergence d'un VCSEL de 3.5µm à 1.5mA

### 3.4. Réduction de la divergence des VCSELs

Pour de nombreux systèmes tel que celui qui était visé dans cette étude, les exigences en termes de divergence des VCSELs sont très strictes.

Même si cette divergence est plus faible et plus facile à corriger que dans le cas des diodes laser classiques (symétrie circulaire, de 10 à 14° selon les technologies pour un VCSEL monomode), elle est encore trop élevée pour que ces sources soient intégrées telles quelles dans un microsystème dans lequel une valeur inférieure de l'ordre du degré est souvent nécessaire.

Une des solutions consiste à hybrider des barrettes de microlentilles commerciales sur la surface des VCSELs avant le montage final sur boîtier. Il existe plusieurs types de microlentilles disponibles sur le marché, certaines sont directement usinées dans un matériau plastique, d'autres sont fabriquées par moulage de polymères déposés sur un substrat de verre [11]. Pour déterminer la courbure nécessaire et la distance par rapport aux VCSELs, la propagation du faisceau à travers les lentilles est optimisée à l'aide de logiciel de conception optique [12] de façon à respecter les critères de divergence précédemment cités.

Le positionnement de ces lentilles « suspendues » au-dessus des VCSELs (fig.8a) a été conçu et réalisé avec le service TEAM à l'aide de l'équipement de report FC150 disponible au LAAS. Cette étape reste extrêmement délicate. En effet, le plan de la barrette de lentilles doit être à la fois parallèle à celui des composants et simultanément chaque lentille doit être centrée sur chaque composant. La tolérance au désalignement de ce système est de quelques  $\mu\text{m}$  en x, y et de seulement  $1,5\mu\text{m}$  en hauteur. Or il est difficile de garantir de façon reproductible la distance verticale entre les VCSELs et les microlentilles, car des paramètres comme les épaisseurs de colle ou de différentes cales entrent en jeu. Le meilleur résultat que nous ayons pu mesurer est une divergence de  $0,9^\circ$  [13]. On peut voir une photographie des composants correspondants sur les fig.8b) (vue de dessus) ainsi qu'une vue globale des VCSELs avec lentilles sur support dédiés sur la figure 9b).

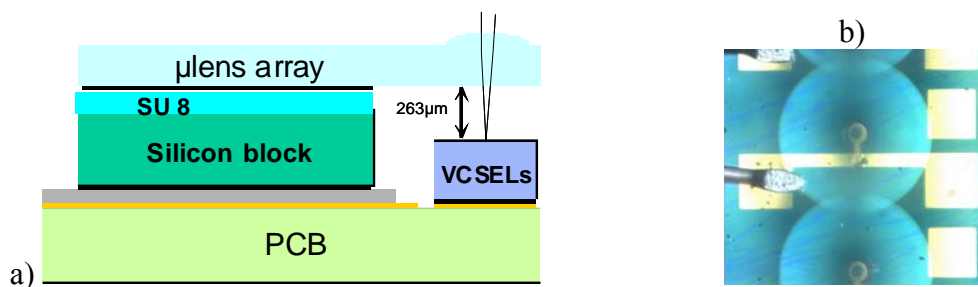


Figure 8 a) Principe de l'assemblage des barrettes de microlentilles commerciales sur les VCSELs b) vue de dessus des composants hybridés

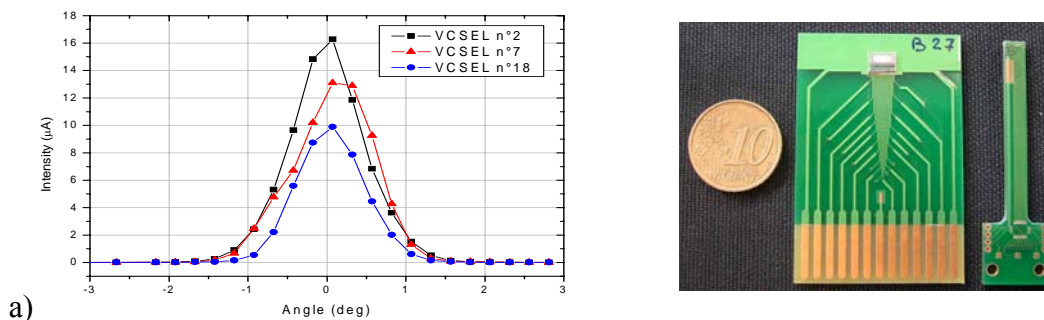


Figure 9 : a) divergence obtenue après intégration des microlentilles b) Vue globale d'une barrette de VCSELs+lentilles sur support

### 3.5. Intégration dans le MOEMS final

Notre équipe a conçu et réalisé un coupleur optique qui permet, de façon compacte, d'augmenter le déplacement du faisceau défléchi sur la surface de la matrice de détection et qui facilite l'intégration du système optique sur la tête microfluidique [12] (figure 10a). Il s'agit d'un système à faces parallèles de silicium recouvertes d'or, dont les dimensions ont été optimisées par C. Vergnenègre à l'aide du logiciel Zemax.

La conception et la réalisation du MOEMS complet à base de VCSELs oxydés associés à des lentilles hybridées et au coupleur optique a abouti à la réalisation d'un premier prototype transféré ensuite à la société Genetrix (fig.10b) [14].



Figure 10 : Photos de dessus (a) et dans l'axe (b) du coupleur proposé pour augmenter le déplacement du faisceau réfléchi par les micro-poutres

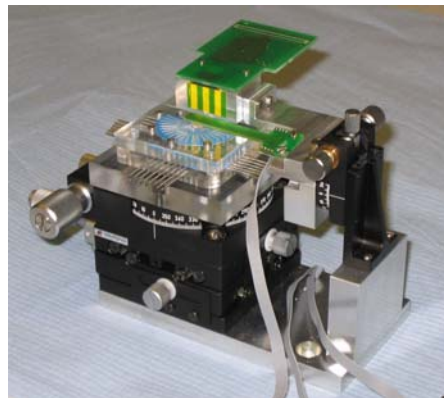


Figure 11 : Prototype final réalisé pour le projet Optonanogen

### 3.6. Conclusions : vers la micro-optique intégrée

Nous avons acquis grâce à ce projet une vue compréhensive de ces systèmes et des potentialités d'intégration des VCSELs, ce qui nous a conduits à proposer des améliorations à apporter pour ce type de composant avec l'objectif de le rendre plus adapté à son intégration dans des MOEMS.

Concernant la correction de la divergence des VCSELs, nous avons expérimenté la voie de l'hybridation de lentilles à l'aide d'un équipement de report disponible au laboratoire. Cependant, cette solution s'est avérée coûteuse et extrêmement délicate car il est difficile de garantir de façon reproductible la distance verticale entre les VCSELs et les microlentilles. Nous avons toutefois réussi ponctuellement à atteindre la valeur de divergence nécessaire ( $\sim 1^\circ$ ) ce qui a permis l'intégration de notre sous-système de détection optique dans le prototype final du microsystème [14].

Pour corriger la divergence des VCSELs, une voie plus ambitieuse consiste à intégrer directement les lentilles à la surface des dispositifs pendant leur processus de fabrication collectifs. Nous avons orienté nos efforts sur l'association monolithique de microlentilles aux VCSELs.

## 4. Micro-optique polymère intégrée sur VCSELs

### 4.1. Démarche adoptée

Suite au projet Optonagen, le développement de solutions intégrées sur la surface des VCSELs nous est apparu comme essentiel, car elles présentent l'avantage d'être compatibles avec nos process de fabrication collectifs. En effet, dans ce cas, il est possible de modifier précisément les paramètres géométriques des lentilles en fonction des paramètres effectifs de nos sources et de pouvoir ainsi optimiser en cours de process la réduction de la divergence.

Notons qu'il est alors nécessaire de déposer une couche intermédiaire (piédestal) transparente à la surface des VCSELs avant de procéder au dépôt de la microlentille qui peut être réalisée avec le même matériau ou non (fig.12). Nous avons choisi de réaliser ce piédestal en SU-8 ) [15] qui est une résine photosensible négative permettant la réalisation collective de motifs micrométriques à haut rapport de forme, de plus en plus utilisée dans les technologies microsystèmes (figure 13).

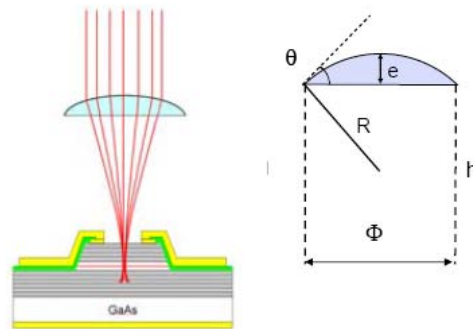


Figure 12 : Paramètres mis en jeu dans la correction de la divergence d'un VCSEL

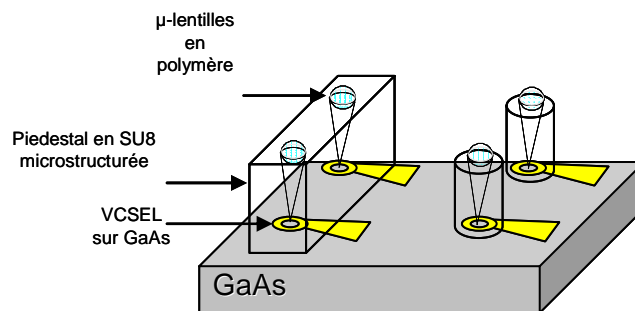


Figure 13 : Démonstrateur VCSEL avec  $\mu$ lentille+piédestal intégrés

### 4.2. Simulations optiques

Les modélisations optiques paramétrées que nous avons menées sous Zemax en collaboration avec C. Vergnenègre (service 2I) (fig. 14) ont montré que pour obtenir des lentilles optimisées en termes de divergence ( $1^\circ$ ) avec l'angle de contact mesuré sur une surface de SU-8, le piédestal doit être au moins égal à  $100\mu\text{m}$ . De plus, pour une valeur de piédestal donnée, si l'angle de contact varie, il est toujours possible de trouver un diamètre de lentille pour lequel on peut atteindre cette valeur (fig.15).

Il faut donc disposer d'une technique de fabrication permettant de faire varier soit l'angle de contact sur la surface, soit le diamètre correspondant des lentilles avec des volumes de gouttes de l'ordre de la centaine de picolitres [16].

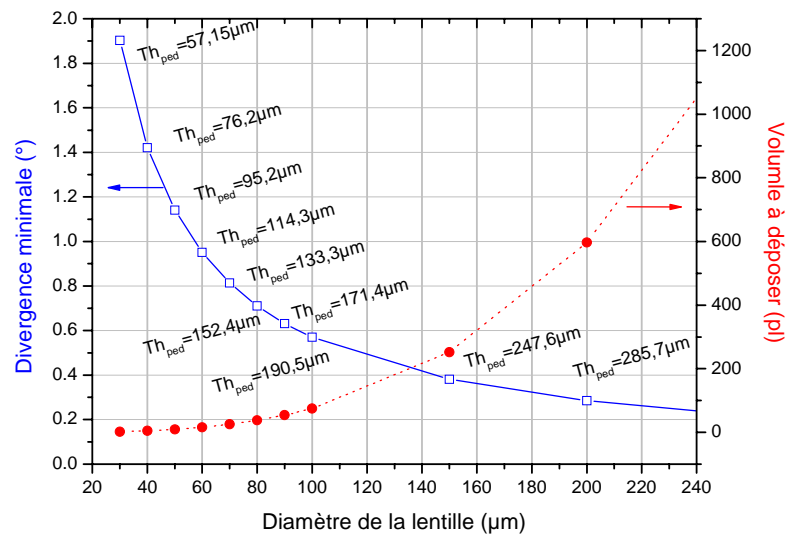


Figure 14 : Evolution de la divergence du VCSEL en fonction de la hauteur du piédestal

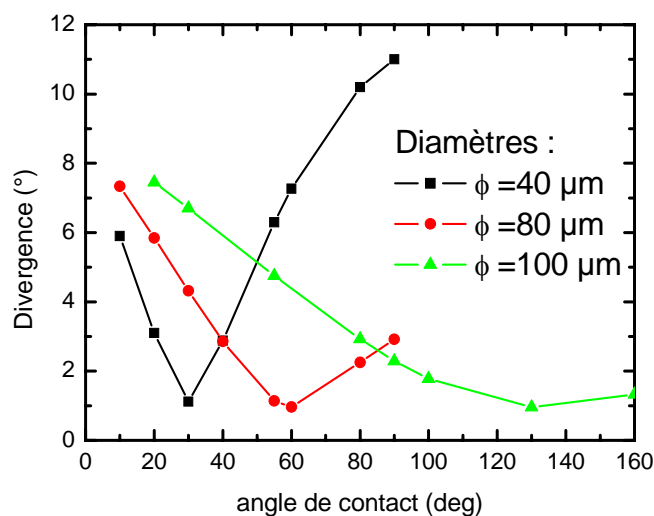


Figure 15 : Evolution de la divergence en fonction de l'angle de contact de la surface de SU-8

### 4.3. Méthode de fabrication des lentilles

La fabrication de matrices de micro-éléments optiques réfractifs ou diffractifs constitue un défi important depuis plus de 15 ans dans le domaine de la micro-optique [17]. Parmi toutes les techniques envisageables pour fabriquer des microlentilles, on peut citer le fluage de résines photosensibles [18], la lithographie profonde par protons [19], le process LIGA [20], la photo-polymérisation [21], le dépôt par jets d'encre [22], l'impression sous UV [23], l'ablation laser [24], l'écriture directe par faisceau électronique [24] ou par faisceau laser [25] ou encore l'impression à partir de moules réalisés avec des masques à niveau de gris ou encore l'auto-assemblage de polymères liquides sur surface fonctionnalisée. La plupart de ces techniques ne sont pas adaptées à l'intégration collective de microlentilles sur



VCSELs car incompatibles avec une fabrication en post-processing. En conséquence, très peu d'exemples d'intégration de microlentilles sur VCSELs ont été proposés jusqu'à présent.

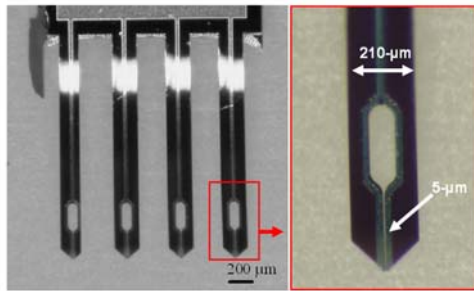


Figure 16 : Vue au microscope optique des microplumes en silicium utilisés pour le dépôt des gouttes de polymère.

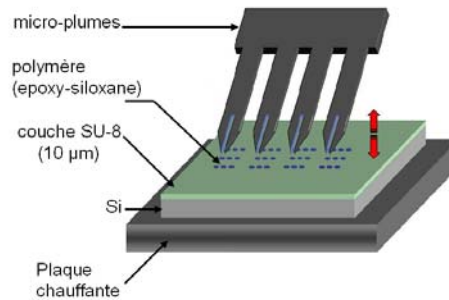


Figure 17 : Principe du dépôt par microplumes

A notre connaissance, les résultats les plus avancés sur VCSELs ont été obtenus en utilisant des méthodes de dépôt local telles que le jet d'encre qui permet de déposer de façon contrôlée des microgouttes de polymère sur des piédestaux de taille micrométriques. Puisque la formation de la lentille repose sur des phénomènes de tension de surface, ce type de méthode conduit à une très bonne homogénéité de surface et donc à d'excellentes qualités optiques.

Nous avons proposé fin 2005 une technique alternative au jet d'encre, basée sur le dépôt localisé par micro-plumes robotisées (fig.16 et 17). Cette technique originale de dépôt par contact est basée sur le savoir-faire du laboratoire en micro-manipulation (groupe NBS) [28] et présente l'avantage d'être plus simple et moins coûteuse que le dépôt par jets d'encre. L'intérêt de cette technique réside dans le contrôle précis des volumes de gouttes déposées permettant de réaliser de véritables «lentilles sur mesure».

Pour régler le rayon de courbure de la lentille, il est possible de contrôler l'angle de contact des gouttes par un traitement de la surface sur laquelle se fait le dépôt, à savoir dans notre cas la résine épaisse SU-8. Une collaboration avec Y. Segui du LAPLACE à Toulouse a été menée en 2005 sur ces aspects.

Nous avons toutefois plutôt axé nos efforts sur la technique de dépôt des lentilles et sur le contrôle de leur diamètre ainsi que sur la réalisation d'un premier prototype. Les premiers essais de dépôt de polymère thermodurcissable sur SU-8 se sont avérés très prometteurs. Ces travaux préliminaires ont permis en janvier 2006 le financement d'un projet interne au laboratoire [Projet LAAS MIOPY : MIcro Optique à base de POLYmères, sous ma responsabilité]

#### 4.4. Résultats obtenus

##### 4.4.1. Dépôt de microlentilles par microplumes robotisées

Nous avons démontré que la technique de microplumes robotisées du LAAS permet de déposer précisément la gamme de volumes de polymère nécessaires pour la collimation des VCSELs. En effet, nous avons fabriqué des microlentilles hémisphériques sur surfaces SU-8 (fig. 18) présentant un diamètre pouvant varier entre 20 et 140µm en jouant sur le temps de contact de la plume sur la surface et des rugosités très faibles ( $R_a < 2\text{nm}$ ) (fig. 19a). Les microlentilles présentent des distances focales dans la gamme [70-200µm] (fig. 19) avec des

ouvertures numériques élevées (0.3) et des aberrations optiques faibles ( $RMS < \lambda/14$ ), ce qui les place au meilleur niveau international [26].

Les caractérisations des lentilles ont été menées à la fois au laboratoire et en partenariat avec H. Ottevaere et H. Thienpont du laboratoire TONA de l'Université Libre de Bruxelles, coordinateur du réseau d'excellence européen en micro-optique NEMO, avec lesquels j'ai établi une collaboration.

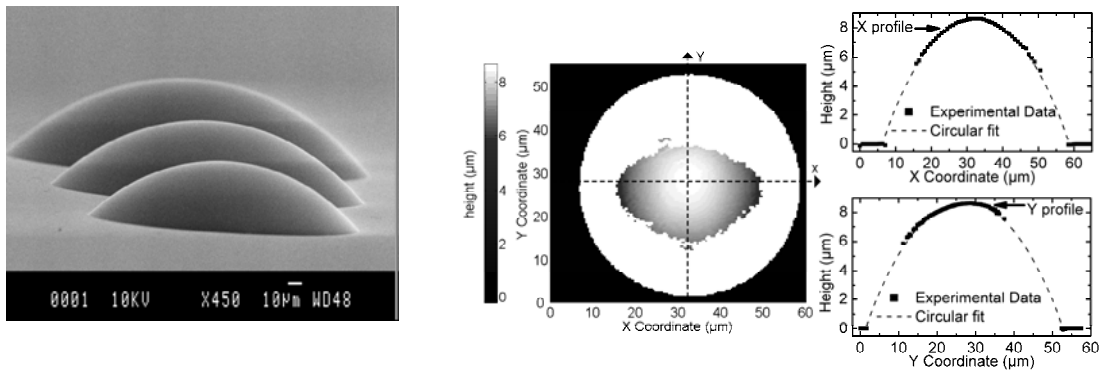


Figure 18 a) photo MEB de microlentilles de plusieurs diamètres obtenues par la technique de dépôt de microgouttes de polymère proposée dans le cas du projet MIOPIY b) Mesure du profil d'une microlentille de 52µm de diamètre obtenue à l'aide d'un profilomètre optique sans contact et ajustements circulaires correspondants suivant les axes x et y .

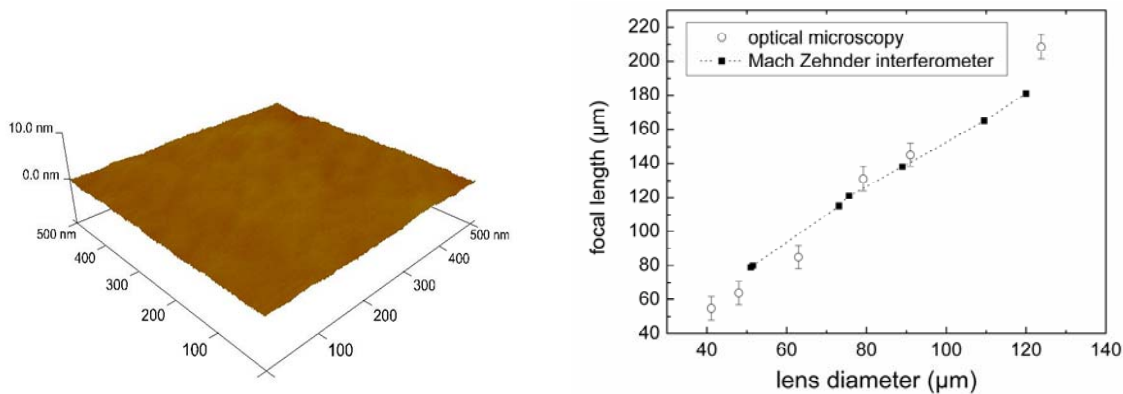


Figure 19 : a) rugosité AFM (500nmx500nm) mesurée en surface d'une lentille b) évolution de la focale avec le diamètre des lentilles

#### 4.4.2. Intégration des lentilles sur VCSELs

Sur la base de ces premiers résultats, nous avons porté nos efforts sur la réalisation d'un démonstrateur complet VCSEL avec microlentille intégrée. Cet aspect a fait plus particulièrement l'objet des travaux de Christophe Levallois, post-doctorant que j'ai encadré en 2006-2007.

L'effort a tout d'abord porté sur l'obtention de couches uniformes de SU-8 microstructurées déposées sur des substrats de petite taille tels que ceux des VCSELs, grâce à l'optimisation des conditions d'enduction et d'insolation de cette résine épaisse. Nous avons ainsi réussi à obtenir une variation maximale d'épaisseur de 1µm pour des piédestaux de 100µm sur des surfaces de 2cm<sup>2</sup> (fig. 20a).

Par ailleurs, des dépôts de polymère par micro-robot ont été également réalisés sur des surfaces micro-structurées de formes cylindriques et en bandes de différentes tailles (fig. 20b),

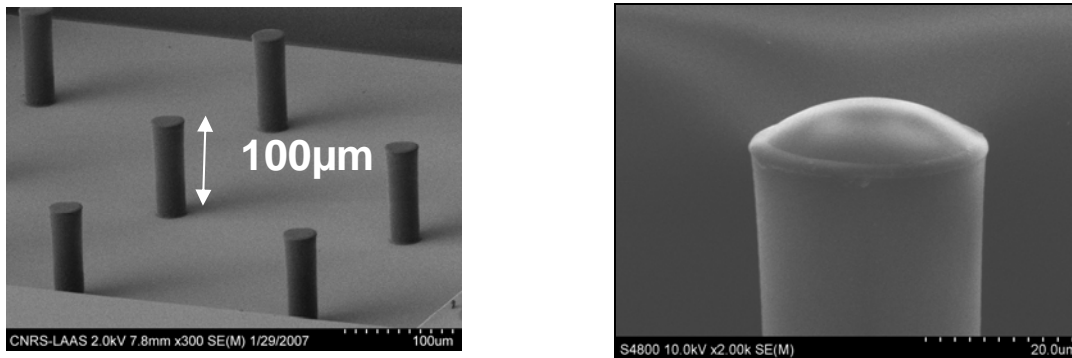


Figure 20 a): Vue au MEB réseaux de micropiliers SU-8 déposés sur substrats de taille réduite b) Microlentille en polymère auto-centrée sur un micro-pilier en SU-8 de 30µm de diamètre

Nous avons pu montrer que dans le cas des cylindres, il est possible d’obtenir un auto-centrage de la goutte de polymère par le micro-pilier au delà d’un volume minimal de polymère déposé [27][28] ce qui constitue un avantage décisif pour le centrage final sur le VCSEL. De plus, on peut accroître alors la précision sur le diamètre final de la lentille qui n’est plus dans ce cas dépendant du temps de contact, et donc contrôler plus facilement la divergence finale. La précision de l’alignement de la lentille par rapport à la source est donc dans ce cas conditionnée par l’étape de photolithographie du piédestal circulaire (précision d’alignement meilleure que 2µm) et non plus par le positionnement absolu de la goutte (précision 5 à 10 µm), ce qui constitue une avancée significative.

Pour atteindre des précisions équivalentes dans le cas des piédestaux non circulaires, nous avons évalué récemment un procédé exploitant des effets de proximité lors de la lithographie optique du piédestal de 100µm. Les premiers résultats obtenus sur la création de micro-cuvettes en surface de 1 à 10µm de profondeur pendant la définition même des piédestaux sont très prometteurs (fig.21a) : elle permet la aussi d’obtenir un auto-positionnement satisfaisant des lentilles (fig. 21b) [29].

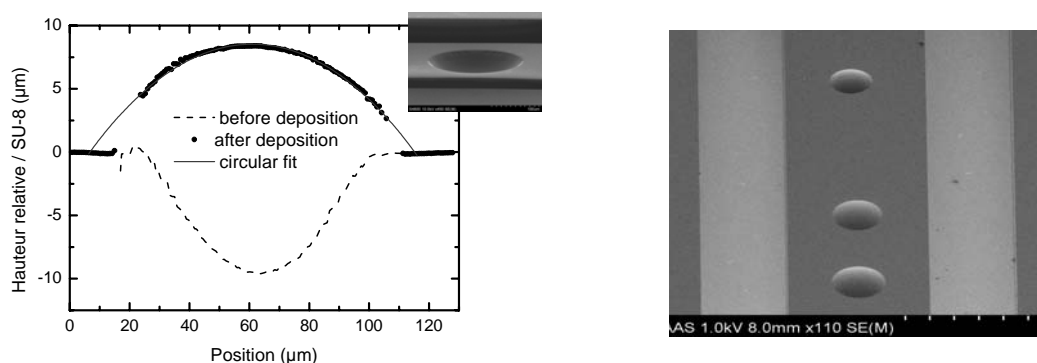


Figure 21 : a) Auto-centrage de microlentilles grâce à la définition préalable de micro-cuvettes en surface grâce à une réduction locale de la puissance d’insolation pendant l’étape de fabrication du piédestal b) photo MEB après déposition sur une bande de 200µm de large

C’est donc ces configurations, permettant de s’affranchir des problèmes d’alignement mécanique, qui ont été finalement retenues pour concevoir les masques du procédé final de fabrication de VCSELs avec lentilles intégrées. Un premier démonstrateur a été réalisé

récemment en exploitant ces résultats (fig. 22). L'étude de la divergence en fonction de la taille des diaphragmes d'oxyde et de la géométrie des piédestaux est en cours : les premières mesures montrent une réduction d'un facteur 10 de la divergence (de  $12.5^\circ$  à  $1.2^\circ$  pour les VCSELs monomodes) sans modification significative de la caractéristique P(I) des lasers (fig.23), ce qui démontre l'intérêt de notre approche (article en cours de rédaction).

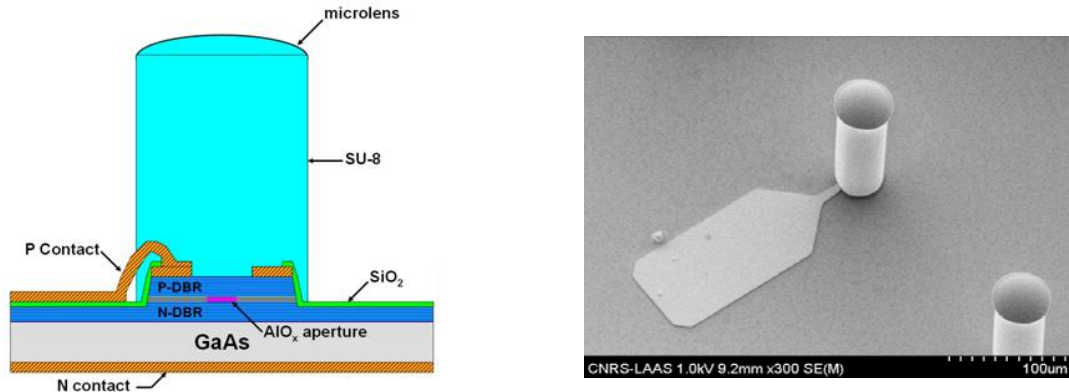


Figure 22 : a) Vue en coupe des composants réalisés b) Lentilles auto-alignées sur piédestal en SU8 sur VCSELs

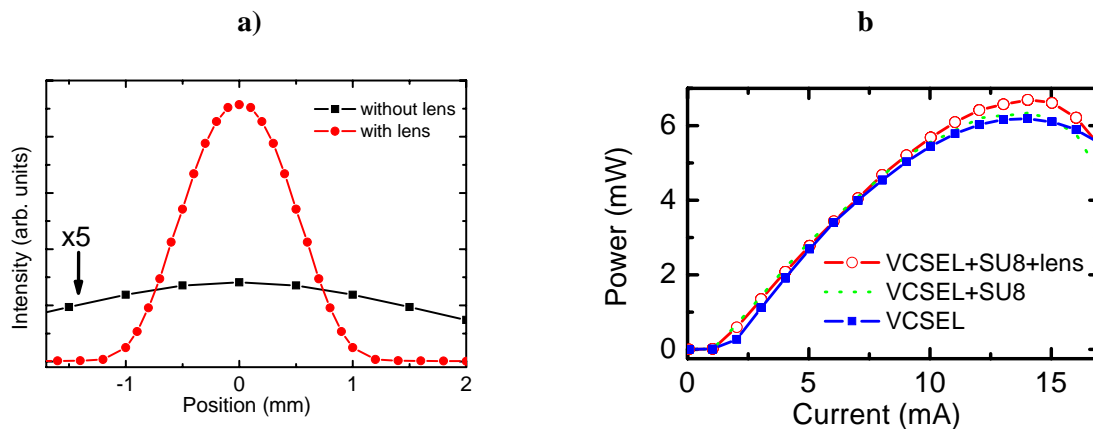


Figure 23 a) Divergence d'un VCSEL de  $3.5\mu\text{m}$  d' $\text{AlOx}$  sans ( $12.5^\circ$ ) et avec lentille intégrée ( $1.2^\circ$ )  
 b) Caractéristiques P(I) du composant seul, avec SU8 et avec SU8+lentille

## Conclusions

Dans le cadre des projets que nous venons de décrire et qui portaient sur la réalisation d'un système optique à base de VCSELs, l'objectif a plus particulièrement visé le développement de nouveaux procédés pour lever les verrous technologiques qui bloquent l'intégration de ces sources laser dans les microsystèmes, en agissant sur leur structure, leur technologie et/ou en les associant à des matériaux fonctionnels.

Ceci nous a tout d'abord permis de stabiliser notre filière technologique de fabrication, notamment en améliorant la réalisation précise des diaphragmes d'oxyde enterrés, technique sur laquelle notre équipe continue actuellement de mener des activités de recherche innovantes. Cela nous a également poussés à considérer et à traiter les problématiques d'assemblage et de packaging qui sont incontournables pour l'insertion des VCSELs dans les systèmes.

D'autre part, les contraintes en termes de divergence de faisceau de plus en plus fréquentes dans ces dispositifs, nous ont récemment conduits à développer une nouvelle

thématique dans l'équipe : la micro-optique intégrée sur VCSELS à base de polymères, dont j'assure la direction.

En effet, les VCSELS monomodes les plus performants possèdent une divergence de l'ordre de  $13^\circ$ , ce qui s'est révélé problématique pour l'application micro-capteur biomédical. Nous avons évalué l'hybridation de lentilles à la surface des VCSEL et mis en évidence les limites de cette approche. Nous avons donc développé une nouvelle méthode de fabrication de microlentilles en polymère basée sur l'emploi de micro-plumes robotisées.

Cette nouvelle méthode constitue désormais une alternative bas coût à la technique de dépôt par jets d'encre pour la réalisation collective de lentilles sur mesure. Nous avons de plus démontré que les caractéristiques des lentilles sont compatibles avec la collimation des VCSELS et leur intégration via des piédestaux uniformes en SU-8 a conduit à une réduction efficace de la divergence des VCSELS. Nous souhaitons désormais poursuivre dans cette voie en axant nos efforts sur le développement de lentilles auto-assemblées par traitement de surface et sur la réalisation de lentilles actives.

## Références

1. D. K. Serkland, G. M. Peake, K. M. Geib, R. Lutwak, R. M. Garvey, M. Varghese, M. Mescher. "VCSEL for Atomic Clocks" *Proceedings of SPIE* 6132, Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers, 2006
2. Bond, T.C.; Cole, G.D.; Goddard, L.L.; Behymer, E.M., "Photonic MEMS for NIR in-situ Gas Detection and Identification," *Sensors, 2007 IEEE*, vol., no., pp.1368-1371, 28-31 Oct. 2007
3. TE. Thrush, O. Levi, W. Ha, G. Carey, L.J. Cook, J. Deich, S.J. Smith, W.E. Moerner, J.S. Harris, Jr., "Integrated semiconductor vertical-cavity surface-emitting lasers and PIN photodetectors for biomedical fluorescence sensing," *Quantum Electronics, IEEE Journal of*, vol.40, no.5, pp. 491-498, May 2004
4. VCSEL arrays as micromanipulators in Chip-based microsystems A. L. Birkbeck, R.A. Flynn, M. Ozkan, D. Song, M. Gross and S. C. Esener, *Biomedical Microdevices* Vol. 5 num.1 2003, pp. 47-54
5. P. L. Gourley and M. F. Gourley. "Biocavity lasers for biomedicine" *Trends in Biotechnology* 18 (11), 2000 pp. 443-448.
6. K. Samakkulam, J. Sulkin, A. Giannopoulos and K.D. Choquette Micro-fluidic photonic crystal vertical cavity surface emitting laser *Electron. Lett.* 42 (14), 2006
7. S. Khalfallah, C. Gorecki, J. Podlecki, M. Nishioka, H. Kawakatsu, Y. Arakawa "Wet-etching fabrication of multilayer GaAlAs/GaAs microtips for scanning near-field optical microscopy" *Applied Physics A : Materials Science & Processing* 71(2), 2000
8. C. Gorecki, V. Bardinal, L. Averseng, F. Van Dijk, P. Dubreuil, C. Fontaine, A. Munoz-Yague, S. Khalfallah, « Vers l'intégration d'un nouveau microscope SNOM basé sur la réinjection optique dans un VCSEL » *RNMT Revue de Nano et MicroTechnologie* Editions Hermes 1 ( 3-4), 2001 pp. 271-286.
9. D. Heinis, C. Gorecki, C. Bringer, V. Bardinal, T. Camps, J.-B. Doucet, P. Dubreuil and C. Fontaine "Miniaturized Scanning Near-Field Microscope Sensor Based on Optical Feedback inside a Single-Mode Oxide-Confined Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser" *Jpn. J. Appl. Phys.* 42 (Part2, N°12A) 2003 pp. L1469-L1471.
10. C. Bringer « Technologie et caractérisation de VCSELs à diaphragme d'oxyde. Application à la détection en cavité verticale. » Thèse de doctorat LAAS-UPS Toulouse 2005.
11. <http://www.heptagon.fi/>
12. [www.zemax.com/](http://www.zemax.com/)
13. C. Vergnenègre, C. Bringer, V. Bardinal, T. Camps, C. Fontaine, A. Munoz Yagüe "Integrated optical coupling element for functional genomic analysis biosensor" *Proceedings of SPIE Optical Design and Engineering* 5249, ISBN 0-8194-5133-9, 2004 pp.648-656.
14. L.M. Lechuga, J. Tamayo, M. Álvarez, L.G. Carrasosa, A. Yufera, R. Roldán, E. Peralías, A. Rueda, J.A. Plaza, K. Zinoviev and C. Domínguez, A. Zaballos, M. Moreno and C. Martínez-A, D. Wenn, N. Harris, C. Bringer, V. Bardinal, T. Camps, C. Vergnenègre and C. Fontaine, V. Díaz and A. Bernad. "A Highly sensitive Microsystem Based on nanomechanical biosensors for genomics applications" *Sensors and Actuators B* 118 (1-2), 2006 pp. 2-10.
15. H. Lorenz, M. Despont, N. Fahrni, N. LaBianca, P. Renaudy and P. Vettiger, "SU-8: a low-cost negative resist for MEMS" *J. Micromechanics and Microengineering* 7, 1997 pp. 121-124.
16. V. Bardinal, E. Daran, C. Vergnenègre, T. Leichle, Y. Segui, T. Camps, J.B. Pourciel, V. Conedera, L. Gavin-Djidina and M. Guirardel "H Lorenz, M Despont, N Fahrni, N LaBianca, P Renaudy and P Vettiger, "Design and fabrication of polymer microlenses arrays for VCSELs using a cantilever-based microsystem" *Proc. of SPIE*.6185, 2006 p.618510.
17. Hans Peter Herzig, "Micro-Optics, Elements, systems and applications", ed. (Taylor and Francis, London, 1997.
18. Y. Siharnng C.Y. Chao Ching-Kong ; M.K. Wei, C.P. Lin, "High fill-factor microlens array mold insert fabrication using a thermal reflow process", " *J. Micromechanics and Microengineering* 14 (8), 2004 pp. 1197-1204.
19. H. Ottevaere et al., "Two dimensional plastic microlens arrays by deep lithography with protons: fabrication and characterization" *J. Opt.A: Pure Appl. Opt.* 4, 2002 pp.S22-S28.
20. P Ruther et al., "Fabrication and characterization of microlenses realized by a modified LIGA process" *Pure Appl. Opt.* 6, 1997 pp. 643-653.
21. C. Croutxé-Barghorn et al., "Fabrication of microlenses by direct photo-induced crosslinking polymerization" *Appl. Surf. Sci.* 168, 2000 pp.89-91.
22. D.L MacFarlane et al., "Microjet fabrication of microlens arrays" *IEEE Phot. Technol. Letters*, 6, n°9, (1994).

23. K. Naessens et al., "Direct writing of microlenses in polycarbonate with excimer laser ablation" *IEEE Phot. Technol. Lett.* 6 (9), 1994 pp. 1112-1114.
24. M. T. Gale et al., "Fabrication of continuous relief micro-optical elements by direct laser writing in photoresists", *Opt. Eng.* 33 (11), 1994 pp.3556-3566.
25. E.-B. Kley et al., "Realization of micro-optic and integrated optic components by electron-beam-lithographic surface profiling and ion exchange in glass" *Int. J. of Optoelectronics* 8 (5/6), 1993 pp.513-527.
26. V.Bardinal, E.Daran, T.Leichlé, C.Vergnenègre, C.Levallois, T.Camps, V.Conedera, J.B.Doucet, F.Carcenac, H.Ottevaere, H.Thienpont « Fabrication and characterization of microlens arrays using a cantilever-based spotter » *Optics Express* 15 (11), 2007 pp. 6900-6907.
27. C.Levallois, T.Leichlé, V.Bardinal, T.Camps, J.B.Doucet, E.Daran, C.Vergnenegre. 2nd European « Self-aligned polymer microlenses fabrication for VCSEL beam shaping » *Optical Society Topical Meeting Optical Microsystems OuS'07*, 30sept-3october 2007, Capri, Italie.
28. C.Levallois,V.Bardinal, T.Camps, T.Leichlé, E.Daran, J.B.Doucet C.Vergnenègre, "VCSEL collimation using self-aligned integrated polymer microlenses" *Proc. SPIE* 6992, 2008 P.69920W.
29. V. Bardinal, T. Camps, C. Levallois, T. Leichlé, B. Reig, J.B. Doucet , C. Vergnenègre and E. Daran. "Self-centered polymer microlenses deposited on SU-8 patterned surfaces by means of a cantilever-based spotter" European Optical Society (EOS) Annual Meeting 2008, Paris Villepinte, 29 sept-2 oct. 2008.

## Chapitre 5

### Conclusions et Perspectives

L'étude des composants VCSELs et de leur intégration dans les systèmes, que notre équipe mène activement depuis plus de 8 ans, nous a permis d'établir des liens forts avec les laboratoires et compagnies inscrivant leurs activités dans différents champs d'application : communications optiques, instrumentation, traitement de l'information, biologie...

Dans ce contexte, les points forts de nos travaux ont concerné plus particulièrement l'étude de sources laser à détection intégrée, l'optimisation de l'injection électrique dans les dispositifs de grandes dimensions et la conception et la réalisation d'éléments de micro-optique intégrée à base de polymères. Avant de détailler ma prospective, je vais tout d'abord décrire le contexte international dans lequel ces recherches s'inscrivent.

#### **1. Acteurs internationaux et nationaux du domaine**

Cette synthèse a été réalisée par l'équipe. Nous avons regroupé dans les tableaux ci-dessous les principaux acteurs actuels internationaux et nationaux dans le domaine des VCSELs.

Au niveau mondial, les équipes américaines, coréennes et japonaises sont les plus en pointe notamment sur les nouvelles fonctions optiques dans les VCSELs. On peut citer en particulier l'Université américaine d'Illinois (Choquette) qu'on peut considérer comme le leader du domaine, mais aussi celles de Stanford et de Berkeley, l'Institut KAIST en Corée.... Les recherches sur les matériaux pour l'extension des longueurs d'onde d'émission vers le bleu et l'infra-rouge restent toujours très développées au plan international.

USA	Université de l'Illinois: capteurs optiques, BiVCSEL, VCSEL à cristaux photoniques CP (K.Choquette)
	Universités de Stanford (J.Harris) et Berkeley (C.J. Chang-Hasnain): biocapteurs, MEMS VCSEL GaAs, micro-optique, nanosources
	Univ. Sandia, Albuquerque : VCSELs UV, 1.3 $\mu$ m, avionique
	UCSB : VCSEL bleu, LW VCSEL (grande longueur d'onde), 25Gbs (L.Coldren)
	<i>Industriels : Finisar, JDSU/Picolight, Agilent, Avago Technologies, Emcore</i>
Japon	Tokyo Tech. : LW-VCSEL, MOEMS, WDM (F.Koyama, Suda)
Corée	GIST – Corée : Intégration microoptique, modulation (Y.T. Lee)
	Institut KAIST : VCSEL à cristaux photoniques (Y.H. Lee)
	<i>Industriels : Optowell, Opticis</i>
Australie	Canberra : VCSELs GaAlAs 680nm (C.Jagadish)
	COMBS- Joondalup : microphotonique et sources VCSELs (K.Alameh)

Tableau 1 Principaux acteurs actuels du domaine hors Europe



Allemagne	Univ. Ulm : VCSELS 980nm, pinces optiques, polarisation (R. Michalzik)
	Würzburg : VCSELS, CP (Förchel)
	Un. Munich : VCSEL 1.3 $\mu$ m-2.3 $\mu$ m (M.Amann)
	Un. Berlin : QD VCSEL (Ledentsov, Bimberg)
	<i>Industriel Ulm-Photonics-Philips, Vertilas</i>
Suisse	EPFL : VCSELS GaN (N.Grandjean)
	spin-off EPFL : Beam-express : VCSELS fusion, membranes, CP (E.Kapon)
	<i>industriel Avalon-Bookham</i>
Suède	KTH, Chalmers Univ. : VCSELS télécom (Hammar, Larsson)
Finlande	ORC Tampere : GaInAsN, visible VECSEL (M.Pessa)
Belgique	TONA-VUB : micro-optique, dynamique non linéaire, polarisation (H.Thienpont)
	Gand : Intégration CMOS (R.Baets)
Grande-Bretagne	Strathclyde : GaInAsNSb, slow light VECSEL, microoptique, solitons Essex : bistabilité, polarisation

Tableau 2 : Principaux acteurs actuels du domaine en Europe

Au niveau européen, l'équipe pionnière sur les VCSELS est l'université d'Ulm en Allemagne, qui semble se focaliser désormais vers les applications de ces composants vers la biologie. On peut également citer l'Université Chalmers sur le contrôle des modes, l'ORC Tampere sur les nouvelles couches actives à base de nanostructures, l'EPFL sur les cavités couplées ou encore l'université de Bruxelles sur les études du comportement dynamique des VCSELS et sur la micro-optique intégrée... Du point de vue industriel, Ulm Photonics (qui appartient désormais au groupe Philips Technologie) et Avalon Photonics (Bookham) sont les principaux fabricants européens.

Enfin, au niveau national, de nombreuses équipes travaillent dans le domaine des VCSELS et composants associés avec des spécificités propres liées aux matériaux mis en jeu et/ou aux applications visées. Nous présentons dans le tableau suivant une liste non exhaustive des acteurs du domaine, auxquelles nous devons rajouter les équipes qui travaillent sur la modélisation et la caractérisation des composants et des systèmes telles que le LOSE ENSEEIHT, l'ISAE, l'ENSI-Caen, ....

LPN – Marcoussis	VECSEL 1.55 $\mu$ m, solitons, sources 1 photon, filières InP, GaAs
INL – Ecully	Opto InP, cristaux photoniques, technologie membranes, Intégration sur Si
INSA FOTON Rennes	opto InP - boîtes, VCSEL 1.55 $\mu$ m, VCSEL accordable
Univ. Montpellier II	Croissance VCSEL antimoniures -infrarouge moyen, lointain
LETI – Grenoble	VCSELS à 1.3 $\mu$ m, CP, filière GaAs
	Intégration opto sur silicium, FTTH
FEMTO Besançon	SNOM, instrumentation
LNIO Troyes	SNOM, plasmonique
Supelec-Metz	Polarisation, dynamique non linéaire, modèles physiques
LAAS	filière GaAs, épitaxie, technologie, composants, microsystèmes

Tableau 3 : Principaux acteurs nationaux du domaine

Contrairement à d'autres acteurs français du domaine, notre équipe n'affiche pas de travaux axés sur des matériaux nouveaux (comme par exemple l'Université de Montpellier (GaSb) ou l'INSA de Rennes (boîtes quantiques sur InP) ni des approches technologiques à base de membranes suspendues associées à des cristaux photoniques (INL-LEOM) ou encore des structures VCSELS à cavité externe (LPN).

Notre spécificité réside plutôt dans les objectifs qui sous-tendent nos activités menées sur la technologie la plus mûre pour ces composants (VCSELS GaAs à 850nm) : développer des nouveaux composants multifonctionnels en basant nos études sur les compétences en microsystèmes du LAAS et sur des conceptions originales associant des technologies déjà bien éprouvées que nous poussons à leur limite, ou sur l'étude de nouvelles technologies (nano en particulier).

Mon activité de recherche et celle de l'équipe s'appuient sur la filière GaAs, avec pour objectif le développement de procédés génériques transposables ensuite à d'autres domaines spectraux (visible, 1.55 $\mu$ m...) accessibles avec d'autres matériaux.

## **2. Projet de recherche : VCSELS : technologies et intégration photonique pour l'instrumentation et la biologie**

Ces dernières années, on constate une avancée notable de l'exploitation des VCSELS dans le domaine de la détection, de l'instrumentation et de la biologie. Ces applications émergentes ont nécessité la conception et la réalisation de nouveaux dispositifs et de nouveaux systèmes les intégrant.

Ainsi des microsystèmes à base de VCSELS ont été proposés pour la microscopie confocale [1] ou pour les horloges atomiques [2] (Honeywell). Par ailleurs, des systèmes intégrés à base de VCSELS sont exploités pour la détection de gaz dans le moyen infra-rouge [3] et plus récemment pour la détection d'oxygène dans le visible et le proche infra-rouge [4]. D'autre part, des systèmes de mesure sont actuellement développés pour la vélocimétrie ou la mesure de distance et de positionnement [5,6], pour lesquels la compacité, la faible consommation et les propriétés de stabilité de faisceau des VCSELS constituent des avantages décisifs.

En ce qui concerne la biophotonique, on peut citer la détection de bio-fluorescence à l'aide de VCSELS et de photodétecteurs intégrés [7][8], la détection de molécules sans marquage grâce à des VCSELS accordables [9], la détection d'hybridation ADN [10], la détection de liquides dans une microcavité laser [11], et plus récemment dans un VCSEL micro-fluidique [12], la culture de cellules biologiques [13] ou la manipulation par voie optique de cellules à l'aide d'un VCSEL [14][15] ou de matrices de VCSELS [16].

Pour l'ensemble de ces applications, le contrôle de la forme du faisceau émis s'avère de plus en plus crucial. La plupart des besoins concernent la collimation (divergence $\sim$ 1°) ou la focalisation à des valeurs fixes de waist (environ quelques dizaines de microns) et de distance de travail (de 10 to 1000 $\mu$ m) ; un contrôle dynamique du plan ou de la courbure de la lentille constitue un avantage considérable dans tous les cas. Par ailleurs, la détection du faisceau après propagation dans le système est toujours nécessaire et elle est souvent assurée par des photodiodes à base de silicium, ce qui implique le recours à des techniques d'assemblage hybride. Une détection intégrée dans le composant VCSEL lui-même permettrait dans de nombreux cas de réaliser des capteurs plus efficaces, sélectifs, compacts et auto-alignés.

Dans ce contexte, en tenant compte des problématiques et des acteurs actuels sur le domaine, nous axerons nos études sur la levée des verrous technologiques pour l'intégration

des VCSELs dans les MOEMS ainsi que sur l'association de fonctions optiques dans les sources VCSELs pour application à l'instrumentation et la biologie.

Parmi les défis technologiques à relever pour permettre une plus grande exploitation des VCSELs dans ces domaines, le contrôle du mode, du positionnement et de la forme du faisceau émis d'une part et l'intégration de la fonction de détection d'autre part sont incontournables. Nous souhaitons donc approfondir ces deux problématiques en nous basant sur l'expérience et les savoir-faire que nous avons déjà acquis sur la conception et la technologie de VCSELs à pompage électrique et sur l'association de fonctions en microcavité verticale.

Nous exploiterons de nouveaux effets physiques et de nouvelles géométries de dispositifs et systèmes, et je compte m'investir davantage dans la modélisation opto-électro-thermo-mécanique prédictive de ces objets de recherche. Compte-tenu de leur complexité croissante, elle nous est de plus en plus indispensable.

Notre équipe a beaucoup évolué ces dix dernières années et est actuellement composée de trois permanents, dont les compétences sont complémentaires et bien adaptées à ces objectifs (G. Almuneau, C. Fontaine et moi-même).

Ce projet sera structuré dans l'équipe selon deux axes complémentaires : d'une part, les études « intra-VCSEL » visant à insérer et à exploiter des effets de confinement à l'intérieur même des structures verticales, et d'autre part les études « méta-VCSEL » considérant le VCSEL comme une source de base élémentaire dont nous tenterons d'étendre les fonctionnalités en l'associant à des éléments externes, actifs ou passifs, de nature semi-conductrice ou non (diélectriques, polymères, films transparents conducteurs).

Le premier volet mettra en jeu des procédés centrés autour de l'épitaxie par jets moléculaires associés à des effets quantiques, des empilements multiples de cavités, des micro- ou nano-structurations ou des oxydations sélectives enterrées et des reprises de croissance.

Le second, plus transversal, concernera le développement de nouvelles technologies de fabrication, de fonctionnalisation de surface et d'association hétérogène de matériaux de type polymère pour la micro-optique intégrée sur VCSELs. C'est cet axe que je prendrai directement en charge. Cette thématique s'appuiera naturellement sur les compétences des membres de l'équipe mais aussi sur celles d'autres membres du laboratoire pour ce qui concerne l'optique adaptative, la micro-fluidique et les capteurs.

Les principaux axes que nous aborderons seront les suivants :

✓ **Etude des effets de micro- et nano-structurations dans les VCSELs**

Nous viserons le contrôle précis des propriétés modales des VCSELs en exploitant des effets de micro ou nano-structurations dans la zone active et dans les réflecteurs de Bragg distribués.

Tout d'abord, la maîtrise de l'association des techniques de nano-structuration de surface et de reprise d'épitaxie acquise récemment dans l'équipe (C. Fontaine) nous permettra d'accéder à de nouvelles propriétés d'émission, grâce par exemple à des zones actives à boîtes quantiques localisées. Dans ce cadre, je développerai la conception et l'étude de structures originales pour homogénéiser l'injection des porteurs, améliorer la qualité de l'émission ou pour réaliser des composants émetteurs/détecteurs.

Je prendrai ainsi part aux études que notre équipe mènera sur les propriétés des cristaux photoniques 1D et 2D insérés dans des VCSELs pour le contrôle spatial du mode et de la polarisation.

Nous évaluerons également les apports des cristaux photoniques pour réaliser un couplage planaire entre VCSELs adjacents ou rediriger une part du faisceau laser dans le plan de la cavité pour la détection intégrée. Ceci pourra être également réalisé par l'insertion d'un guide à réseau diffractant près de la cavité nécessitant deux étapes d'épitaxie [8], ou plus simplement encore à l'aide d'une structuration micrométrique 2D à base d'oxydes d'aluminium que j'ai conçue et sur laquelle nous travaillons actuellement.

Nous poursuivrons ainsi nos études sur la détection en géométrie latérale, mais également en configuration verticale grâce à la combinaison monolithique de plusieurs zones actives ou de plusieurs cavités empilées, qui pourront être aussi exploitées pour étudier des nouveaux effets plus fondamentaux ou atteindre de nouvelles fonctionnalités.

Enfin, notre équipe travaille également sur la conception, la réalisation et la caractérisation de nouveaux types de miroirs, formés d'une simple couche à réseau sub-longueur d'onde [18], qui pourraient remplacer avantageusement les miroirs de Bragg conventionnels, notamment dans les systèmes de matériaux où leur maîtrise est difficile, grâce à leur compacité et à la largeur de bande interdite qu'ils permettent d'atteindre (ANR Marsupilami acceptée. Coordinateur : G. Almuneau).

#### ✓ **Contrôle de l'injection électrique transverse**

Pour améliorer le contrôle de l'injection électrique transverse dans les VCSELs, nous exploiterons l'insertion de jonctions tunnels intra-cavité, ainsi que les possibilités de réalisation de plots d'injection localisés dans les VCSELs près de leur surface.

La comparaison théorie/expérience nous permettra d'enrichir la compréhension des mécanismes de conduction influant sur le comportement de ces composants, dont la géométrie complexe rend une modélisation prédictive difficile.

L'injection localisée multipoints pourra être obtenue par implantation ionique localisée près de la surface [19] ou par utilisation du PAIOx, procédé d'oxydation planaire sur lequel notre équipe détient un brevet. Des démonstrateurs VCSEL pourront être fabriqués grâce à l'arrivée prochaine d'un nouvel équipement d'épitaxie.

Nous envisageons d'associer ces nouvelles géométries transverses à des matériaux fonctionnels en surface de type Oxyde Conducteur Transparent ou TCO : ITO dont nous poursuivrons l'étude avec une fabrication mieux contrôlée par l'utilisation d'un équipement plus performant, et ZnO dont nous optimiserons les propriétés électro-optiques pour ces applications en collaboration avec A. Barnabé du CIRIMAT, avec lequel j'ai commencé des tests préliminaires.

La levée de ce verrou technologique permettra de réaliser des composants de grand diamètre. Cette possibilité ouvre un grand nombre d'applications, par exemple pour le contrôle des solitons de cavité ou la génération de puissance, pour des dispositifs émettant à 0.85-1.3 $\mu$ m de la filière GaAs. L'accès à d'autres gammes spectrales sera aussi envisageable, car nos concepts et technologies pourront être transférés à d'autres familles de matériaux : InP, GaSb, ....

#### ✓ **Optique adaptative et circuits photoniques 3D à base de polymères**

Nous accentuerons nos efforts sur la mise en forme du faisceau émis par les VCSELs pour leur intégration dans les systèmes grâce à la micro-optique intégrée à base de polymères.

Nous avons ainsi débuté récemment une étude du vieillissement thermique en atmosphère humide des polymères que nous avons exploités jusqu'ici, pour démontrer leur fiabilité (projet région FIAB SU-8 avec le CIRIMAT (A. Lamure) dont je suis la coordinatrice).

De manière plus prospective, dans le but de contrôler plus précisément le positionnement des microlentilles vis à vis des sources laser, nous allons associer notre méthode de dépôt à des procédés de fonctionnalisation de surface localisés (micro-structurations, traitements plasma). Nous comptons évaluer également d'autres techniques de mise en forme des polymères telles que le dépôt par jets d'encre, la micro-impression sous UV ou encore la sérigraphie, en recherchant à chaque fois les approches les plus pertinentes pour obtenir un auto-assemblage 3D.

Par ailleurs, dans le cadre d'une collaboration que j'ai établie avec le DPG (Département de Chimie Générale) de Mulhouse et le LNIO de Troyes, nous allons explorer prochainement une nouvelle voie pour fabriquer des micro-éléments d'optique parfaitement alignés sur les sources, grâce à l'exploitation de résines photo-polymérisables dans l'infra-rouge. Il sera ainsi possible de créer des microlentilles avec le faisceau généré par le VCSEL lui-même. La longueur ainsi que le rayon de courbure pourront être ajustés en jouant sur les paramètres d'émission du VCSEL, qui régiront l'autoguidage de la lumière dans le polymère. Les premiers résultats qu'a obtenus récemment le DPG sur la sensibilité de ces nouveaux polymères au rayonnement proche infra-rouge sont très encourageants. Au delà de la mise en forme du faisceau, cette approche très novatrice nous ouvrira de nouvelles perspectives de contrôle spatial des modes transverses dans un VCSEL (ANR NIR Optics acceptée).

Enfin, nous visons désormais la collimation active des VCSELs, grâce au développement de MEMS à base de membranes polymères sur VCSELs qui contrôleraient de façon dynamique la distance des lentilles aux sources. L'utilisation de polymères électro-actifs sera également évaluée dans cette perspective. Dans le cadre de la thèse de Benjamin Reig dont je suis la responsable (1<sup>ère</sup> année), nous avons commencé à étudier sous COMSOL le comportement thermo-mécanique de membranes suspendues à base de polymères pour pouvoir définir des géométries compatibles avec un actionnement thermo-mécanique ou électrique. L'évaluation des méthodes de fabrication possibles pour les réaliser de manière collective (double insolation, laminage..) va débiter prochainement. Ces travaux nous permettront à plus long terme de développer de nouvelles géométries de VCSELs accordables en cavité étendue et/ou d'associer des circuits microfluidiques au dessus des VCSELs pour l'analyse de liquides biologiques ou la détection de gaz.

Disposer d'outils de définition précise d'objets tridimensionnels, micrométriques, transparents et actionnables à la surface de nos dispositifs nous permettra donc d'ouvrir de nouveaux champs d'application et de nouvelles potentialités d'intégration des VCSELs dans les systèmes. Nous pourrions ainsi envisager la réalisation de guides d'onde et de coupleurs pour assurer la liaison entre VCSELs, détecteurs et circuits d'analyse associés sur un même wafer (intégration planaire hétérogène), mais aussi la fabrication de micro-pointes sur mesure pour les VCSELs dédiés à la microscopie en champ proche ou encore la réalisation matricielle de pinces optiques à distance de travail ajustable pour la manipulation de cellules ...

La photonique est sollicitée dans de nombreux domaines d'applications, communications, médical, biologie, instrumentation, où elle apporte des solutions complémentaires/alternatives à l'électronique. Nous souhaitons, par nos travaux sur l'intégration photonique, pouvoir contribuer à cette dynamique, au développement de cette discipline, « la science du 21<sup>ème</sup> siècle » d'après la roadmap européenne « Photonics 21 ».

## Références

1. Gorecki, C.; Nieradko, L.; Bargiel, S.; Dziuban, J.; Henis, D.; Sylvestre, J.A.; Alkowska, K.; Soto-Romero, G.; Thevenet, J.; Yahiaoui, R., "On-Chip Scanning Confocal Microscope with 3D MEMS Scanner and VCSEL Feedback Detection," Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference, 2007. TRANSDUCERS 2007. International , pp.2561-2564, 10-14 June 2007
2. Youngner, D.W.; Lust, L.; Carlson, D.R.; Lu, S.T.; Forner, L.J.; Chanhvongsak, H.M.; Stark, T.D., "A Manufacturable Chip-Scale Atomic Clock," Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference, 2007. TRANSDUCERS 2007. International , vol., no., pp.39-44, 10-14 June 2007
3. Cerutti, L.; Ducanhez, A.; Grech, P.; Garnache, A.; Genty, F., "Room-temperature, monolithic, electrically-pumped type-L quantum-well SB-based VCSELS emitting at 2.3  $\mu\text{m}$ ," *Electronics Letters* , vol.44, no.3, pp.203-205, January 31 2008
4. Bond, T.C.; Cole, G.D.; Goddard, L.L.; Behymer, E.M., "Photonic MEMS for NIR in-situ Gas Detection and Identification," *Sensors*, 2007 IEEE , vol., no., pp.1368-1371, 28-31 Oct. 2007
5. Perchoux, J.; Bosch, T., "Multimode VCSELS for Self-Mixing Velocity Measurements," *Sensors*, 2007 IEEE , vol., no., pp.419-422, 28-31 Oct. 2007
6. Itaru Ishikawa, Renshi Sawada, Eiji Higurashi, Shingo Sanada, Daisuke Chino Integrated micro-displacement sensor that measures tilting angle and linear movement of an external mirror *Sensors and Actuators A: Physical* Volume 138, Issue 2, 26 August 2007, Pages 269-275
7. Thrush, E.; Levi, O.; Ha, W.; Carey, G.; Cook, L.J.; Deich, J.; Smith, S.J.; Moerner, W.E.; Harris, J.S., Jr., "Integrated semiconductor vertical-cavity surface-emitting lasers and PIN photodetectors for biomedical fluorescence sensing," *IEEE Journal of Quantum Electronics* 40 (5), 2004 pp. 491-498.
8. S. Bellis, J. C. Jackson and A. Mathewson "Towards a disposable in vivo miniature implantable fluorescence detector" Proc. of SPIE: Optical Fibers and Sensors for Medical Diagnostics and Treatment Applications VI, Vol. 6083, 2006
9. C.F.R. Mateus; M.C.Y. Huang; P. Li; B.T. Cunningham; C.J. Chang-Hasnain, "Compact label-free biosensor using VCSEL-based measurement system," *Photonics Technology Letters, IEEE* , vol.16, no.7, pp.1712-1714, July 2004
10. L.M. Lechuga, J.Tamayo, M. Álvarez, L.G. Carrascosa, A. Yufera, R. Roldán, E. Peralías, A. Rueda, J.A. Plaza, K. Zinoviev and C Domínguez, A. Zaballos, M. Moreno and C. Martínez-A, D. Wenn, N. Harris, C. Bringer, V. Bardinal, T. Camps, C. Vergnenègre and C. Fontaine , V. Díaz and A. Bernad. "A Highly sensitive Microsystem Based on nanomechanical biosensors for genomics applications" *Sensors and Actuators B* 118 (1-2), 2006 pp. 2-10.
11. P. L. Gourley and M. F. Gourley. "Biocavity lasers for biomedicine" *Trends in Biotechnology* 18 (11), 2000 pp. 443-448.
12. K. Samakkulam, J. Sulkin, A. Giannopoulos and K.D. Choquette "Micro-fluidic photonic crystal vertical cavity surface emitting laser" *Electron. Lett.* 42 (14), 2006
13. Bertling, K.; Hurse, T.J.; Kappler, U.; Rakic, A.D., "Cultivation of photosynthetic bacteria using vertical-cavity surface-emitting lasers," *Lasers and Electro-Optics Society, 2005. LEOS 2005. The 18th Annual Meeting of the IEEE* , vol., no., pp. 184-185, 22-28 Oct. 2005
14. A. L. Birkbeck, R.A. Flynn, M. Ozkan, D. Song, M. Gross and S. C. Esener, "VCSEL arrays as micromanipulators in Chip-based microsystems" *Biomedical Microdevices* Vol. 5 num.1 2003, pp. 47-54
15. Kroner, A.; Kardosh, I.; Rinaldi, F.; Michalzik, R., "Towards VCSEL-based integrated optical traps for biomedical applications," *Electronics Letters* , vol.42, no.2, pp. 93-94, 19 Jan. 2006
16. Kroner, A.; Rinaldi, F.; Rosch, R.; Michalzik, R., "Optical particle manipulation by application-specific densely packed VCSEL arrays," *Electronics Letters* , vol.44, no.5, pp.353-354, Feb. 28 2008
17. Louderback, D.A.; Pickrell, G.W.; Lin, H.C.; Fish, M.A.; Hindi, J.J.; Guilfoyle, P.S., "VCSELS with monolithic coupling to internal horizontal waveguides using integrated diffraction gratings," *Electron. Lett.* 40 (17), 2004 pp. 1064-1065.
18. M. C. Y. Huang, Y. Zhou, and C. J. Chang-Hasnain, "Single mode high-contrast subwavelength grating vertical cavity surface emitting lasers" *Appl. Phys. Lett.* 92, 171108 (2008), 10.1063/1.2917447
19. A.C. Lehman and K.D. Choquette. "One- and Two-Dimensional Coherently Coupled Implant-Defined Vertical-Cavity Laser Arrays". *IEEE Phot. Technol. Let.* 19, (19) 2007 p.1421



## **ANNEXES**

**PUBLICATIONS**

**TITRES/EXPERIENCES**

**ACTIVITES D'ENSEIGNEMENT**

**ACTIVITES D'ENCADREMENT**





## PUBLICATIONS

(ordre chronologique)

### REVUES A COMITE DE LECTURE

- P1) “In situ measurement of GaAs and AlAs refractive indices dispersion at epitaxial growth temperature by Dynamic Optical Reflectometry” V. Bardinal, R. Legros and C. Fontaine **Applied Physics Letters**, vol 67 n° 2 , p. 244-246 , (1995).
- P2) «Precision Bragg reflectors obtained by Molecular Beam Epitaxy under in situ Tunable Dynamic Optical Reflectometry control» V. Bardinal, R. Legros and C. Fontaine. **Applied Physics Letters**, Vol 67 n°23, p. 3390-3392, (1995)
- P3) «Ultrafast coherent deflectors based on enhanced four-wave-mixing in bulk GaAs microcavities» R. Buhleier, M. Hübner, J.H. Collet, V. Bardinal, C. Fontaine, R. Legros and J. Kuhl, **Electronics Letters**, vol 31 (25) 2207 (1995)
- P4) «Subnanosecond dynamics of the electron-hole plasma in GaAs/AlAs microcavities» J.L. Iehl, R.Grac, J.H. Collet, M. Pugno, R. Buhleier, V. Bardinal, C.Fontaine and R. Legros **Physica B**, Vol 222 Iss 1-3 pp 73-79 (1996)
- P5) «Four wave-mixing in bulk GaAs microcavities at room temperature» R. Buhleier, V. Bardinal, J.H. Collet and C. Fontaine, M. Hübner and J. Kuhl **Applied Physics Letters**, Vol 69 n°15, p. 2240-2242, (1996)
- P6) “Subnanosecond reflectivity modulation kinetics in GaAs/GaAlAs microcavities” J.L. Iehl, R.Grac, J.H. Collet, M. Pugno, R. Buhleier, V. Bardinal, C.Fontaine and R. Legros, Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials (**JNOPM**) Vol 5 Iss 4 p.611-619 (1996)
- P7) « Demonstration of cavity mode between two-dimensional photonic-crystal mirrors » D. Labilloy, H. Benisty, C. Weisbuch, T.F. Krauss, V. Bardinal, U. Oesterle, **Electron. Lett.**, vol. 33, No. 23, pp.1978-1980 (1997)
- P8) « Quantitative measurement of transmission, reflection and diffraction, of two-dimensional photonic bandgap structures at near-infrared wavelengths » D. Labilloy, H. Benisty, C. Weisbuch, T.F. Krauss, R.M. De La Rue, V. Bardinal, R. Houdré, U. Oesterle, D. Cassagne, C. Jouanin **Phys. Rev. Lett.**, vol. 79, No. 21, pp. 4147-4150 (1997)
- P9) « Optical amplification of Raman scattering in a bulk GaAs microcavity » A Mlayah, O. Marco, J.R. Huntzinger, A. Zwick, R. Carles, V. Bardinal, C. Fontaine, A.Munoz-Yague, **J. Phys. Condens. Matter.** 10 (1998) pp. 9535-9540
- P10) « Precise growth of vertical cavities using Tunable Dynamic Optical Reflectometry (TDOR) »F.Van Dijk, V. Bardinal, C. Fontaine, E.Bedel-Pereira and A. Muñoz-Yague **Journal of Crystal Growth** 201/202 (1999) pp. 1028-1031

- P11) « Diffraction efficiency and guided light control by two-dimensional photonic bandgap lattices ». D. Labilloy, H. Benisty, C. Weisbuch, T.F. Krauss, D. Cassagne, C. Jouanin, R. Houdré, U. Oesterle and V. Bardinal **IEEE J. Quantum Elec.** 35, n°7, 1999) pp. 1045-1051
- P12) « Picosecond photodiffraction in semiconductor multiquantum wells and microcavities » J.L.Iehl, R.Grac , L. Le Gratiet, V.Bardinal , R.Buhleier , E. Bedel-Pereira, C. Fontaine, M. Pugno, J.H. Collet, **Annales des Télécommunications**, Springer, vol.52, n°11-12, pp. 627-637 (nov. 1997)
- P13) « Experimental demonstration of photodetection oxide modes presence in a dual-purpose single-cavity oxide-apertured VCSEL “ V.Bardinal, L.Averseng, C.Bringer, J. Polesel-Maris, T.Camps, P.Dubreuil, C.Fontaine, E.Bedel-Pereira, C. Vergnenegre, A.Muñoz-Yagüe, **Applied Physics Letters**, Vol.81, N°10, pp.1771-1772, Septembre 2002
- P14) “Study of the photodetection behaviour of oxide-confined vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSELs)” C. Bringer, V.Bardinal, L. Averseng, J. Polesel-Maris, T. Camps, P. Dubreuil, C. Fontaine, E. Bedel-Pereira, C. Vergnenegre, **Physica E**, Vol.17, p. 470-471, 2003
- P15) “Miniaturized Scanning Near-Field Microscope Sensor Based on Optical Feedback inside a Single-Mode Oxide-Confined Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser” Dominique Heinis, Christophe Gorecki, Charlotte Bringer, Véronique Bardinal, Thierry Camps, Jean-Baptiste Doucet, Pascal Dubreuil and Chantal Fontaine **Jpn. J. Appl. Phys.** Vol 42 (2003) pp. L1469-L1471, Part2, N°12A, 1 december 2003
- P16) “Effect of bound electronic non-linearities in semiconductor microcavities” S. Sanchez, C. De Matos, V. Bardinal, C. Fontaine, M. Pugno. **Physica E** 17 (2003) 468 469
- P17) “(111) quantum wells of dilute nitrides grown on GaAs by molecular beam epitaxy” A.Arnoult, F. Gonzales-Posada, S. Blanc, V. Bardinal and C. Fontaine, **Physica E: Low-dimensional systems and nanostructures**, Issues 3-4, Vol.23, pp.352-355, 2004
- P18) “High sensitivity integrated lateral detection in VCSELs” T. Camps, C. Bringer, V.Bardinal, G. Almuneau, C. Amat, E. Daran, P. Dubreuil, J.B. Doucet and C. Fontaine, **Electronic Letters**, janvier 2005, Vol. 41, N°3, pp. 129-131, 2005.
- P19) "A highly sensitive microsystem based on nanomechanical biosensors for genomics applications ". L.M. Lechuga , J.Tamayo , M.Alvarez , L.G.Carrascosa , A.Yufer , R.Roldan , E.Peralias , A.Rueda , J.Plaza , K.Zinoviev , C.Dominguez , A.Zaballos , M.Moreno , C.Martinez , D.Wenn , N.Harris , C.Bringer , V.Bardinal , T.Camps , C.Vergnenegre , C.Fontaine , V.Diaz, A.Bernad. **Sensors and Actuators B**, Vol.118 , N°1-2, pp.2-10, Octobre 2006
- P20) "Lateral waveguiding properties of VCSELs for integrated optical monitoring " V.Bardinal, T.Camps, E.Daran , C.Amat , G.Almuneau , C.Bringer , M.Suleiman and C.Fontaine. **Optical and Quantum Electronics**, Vol.38, N°4-6, pp.523-534, Mars 2006.

- P21) « Fabrication and characterization of microlens arrays using a cantilever-based spotter » V.Bardinal, E.Daran, T.Leichlé, C.Vergnenègre, C.Levallois, T.Camps, V.Conedera, J.B.Doucet, F.Carcenac, H.Ottevaere, H.Thienpont **Optics Express** Vol. 15, Issue 11, pp. 6900-6907, may 2007
- P22) “ Free engineering of buried oxide patterns in GaAs/AlAs epitaxial structures" C. Amat, G. Almuneau, P. Gallo, L. Jalabert, S. Moumdji, P. Dubreuil, T. Camps, J.B. Doucet, E. Havard, V. Bardinal, C. Fontaine and A. Munoz-Yague, **Electron. Letters** 21st June 2007 Vol. 43 No. 13.
- P23) “Spontaneous emission and lateral photo-detection in “vertical” micro-cavities Y.G. Boucher, V. Bardinal, E. Daran, T. Camps, **Annales de Physique**, Vol.32, N°2-3, pp.111-113, 2007 (déc. 2007)
- P24) “Effect of thermal annealing on the electrical properties of Indium Tin Oxide (ITO) contact on Be-doped GaAs for optoelectronic applications » E Havard, T Camps, V Bardinal, L Salvagnac, C Armand, C Fontaine and S Pinaud . **Semicond. Sci. Technol.** 23 (035001). Janvier 2008
- P25) “Real-time in-situ monitoring of wet thermal oxidation for precise confinement in VCSELs”, G.Almuneau, R.Bossuyt, P. Collière, L. Bouscayrol, M.Condé, I. Suarez-Alvarez, V. Bardinal, C. Fontaine. **Semiconductor Science and Technology**, Vol.23, N°10, 5p., Octobre 2008

#### *Revues nationales*

- PN1) « Vers l'intégration d'un nouveau microscope SNOM basé sur la réinjection optique dans un VCSEL » C. Gorecki, V. Bardinal, L. Averseng, F. Van Dijk, P.Dubreuil, C. Fontaine, A. Munoz-Yague, S. Khalfallah, **RNMT Revue de Nano et MicroTechnologie Editions Hermes** Vol 1 n° 3-4 p 271-286, 2001

#### **ACTES DE COLLOQUES INTERNATIONAUX A COMITE DE LECTURE**

- A.1) «Subpicosecond response of GaAs Fabry-Pérot Microcavities» R. Buhleier, J.L. Iehl, J.H. Collet, V. Bardinal, C. Fontaine, R. Legros, M. Hübner and J. Kuhl Toulouse (29 avril - 3 mai 96), p. 321 **IEEE 9th Semiconducting and Insulating Materials Conference SIMC9**
- A.2) « High efficiency top-emitting microcavity light-emitting diodes » P. Royo, J. F. Carlin, J. Spicher, R. Stanley, R. Houdré, V. Bardinal, U. Oesterle and M. Ilegems **SPIE Conference on Light-Emitting Diodes : Research, Manufacturing and Applications III** , San Jose , California 27-29 Janvier 99, SPIE Vol. 3621 pp.151-159.
- A.3) « Dual-purpose single-cavity oxide-confined VCSEL photodetector “ Charlotte Bringer, Veronique Bardinal, Chantal Fontaine, Laurent Averseng, Thierry Camps, Pascal Dubreuil, Antonio Munoz-Yague **SPIE Photonics Fabrication Europe, Conference on VCSELs and Optical Interconnects**, Bruges (Belgique), 30 Octobre - 1er Novembre 2002, Proceedings SPIE Vol. 4942, p. 355-362, VCSELs and Optical Interconnects; Hugo Thienpont, Jan Danckaert; Eds.

- A.4) “Integrated optical coupling element for functional genomic analysis biosensor” C. Vergnenegre, C. Bringer, V. Bardinal, T. Camps, C. Fontaine, A. Munoz Yagüe **SPIE Conference on Optical Systems Design 2003**, Saint Etienne (France), 30 Septembre - 3 Octobre 2003, Proceedings of SPIE Optical Design and Engineering, Vol.5249, 2004, ISBN 0-8194-5133-9, pp.648-656
- A.5) “Detection of lateral spontaneous emission for VCSEL monitoring “ **Charlotte Bringer**, Véronique Bardinal, Emmanuelle Daran, Thierry Camps, Yann G. Boucher, Guilhem Almuneau, Olivier Gauthier-Lafaye, Pascal Dubreuil, Jean-Baptiste Doucet and Chantal Fontaine **SPIE Photonics Europe**, Strasbourg 26-30 April 2004, Proceedings SPIE Micro-optics, VCSELs and Photonic Interconnect Volume 5453 p.209-216, 2004
- A.6) “A Highly sensitive Microsystem Based on nanomechanical biosensors for genomics applications” L.M. Lechuga, J.Tamayo, M. Álvarez, L.G. Carrascosa, A. Yufera, R. Roldán, E. Peralías, A. Rueda, J.A. Plaza, K. Zinoviev and C Domínguez, A. Zaballos, M. Moreno and C. Martínez-A, D. Wenn, N. Harris, C. Bringer, V. Bardinal, T. Camps, C. Vergnenègre and C. Fontaine, V. Díaz and A. Bernad. **EUROSENSORS XIX BARCELONA. SPAIN 11<sup>th</sup>-14<sup>th</sup> September 2005** Vol.II, WB1p.
- A.7) “Integrated optical detection subsystem for functional genomic analysis biosensor” C. Vergnenegre, T. Camps, V. Bardinal, C. Bringer, C. Fontaine, A. Munoz Yagüe **SPIE Photonics North 05**, 12-14sept 2005, Toronto, Canada. Proc. of SPIE Volume 5969, pp.596912.1–596912.10 , sept. 2005.
- A.8) "Integrated photodetection in VCSELs" Bardinal, V.; Bringer, C.; Camps, A.; Daran, E.; Almuneau, G.; Amat, C.; Fontaine, C., *Transparent Optical Networks, 2005, Proceedings of 2005 7th International Conference* , vol.2, no., pp. 120-125 Vol. 2, 3-7 July 2005
- A.9) «Design and fabrication of polymer microlenses arrays for VCSELs using a cantilever-based microsystem". V.Bardinal , E.Daran , C.Vergnenegre , T.Leichle , Y.Segui , T.Camps , J.B.Pourciel , V.Conedera , L.Gavin-Djidina and M.Guirardel . **SPIE Photonics Europe**, Strasbourg 3-7 April 2006, Proc. of SPIE.Vol.6185, p.618510,2006.
- A.10) “VCSEL collimation using self-aligned integrated polymer microlenses” C.Levallois, V.Bardinal, T.Camps, T.Leichlé, E.Daran, J.B.Doucet C.Vergnenègre , **SPIE Photonics Europe 2008** (7-11 Avril 2008), Strasbourg, Proc. SPIE Vol. 6992, 69920W 2008.

## COMMUNICATIONS A DES CONGRES

### *Congrès internationaux*

- CI.1) « In situ control of epitaxial growth by Tunable Dynamic Optical Reflectometry » V. Bardinal, R. Legros and C. Fontaine. **EURO MBE** : Seminaire Européen sur l'Epitaxie par Jets Moléculaires, Grenade, Espagne (6 Avril 95)

- CI.2) «Contrôle in situ de la croissance de réflecteurs de Bragg GaAs/AlAs par Réflectométrie Dynamique Accordable» V. Bardinal, R. Legros and C. Fontaine **Opto 95**, 15ème Symposium Européen sur l'Optoélectronique, Paris (28-30 Mars 1995)
- CI.3) «Enhanced four wave mixing diffraction efficiency in bulk GaAs microcavities at room temperature» R. Buhleier, J.H. Collet, V. Bardinal, C. Fontaine, R. Legros, M. Hübner and J. Kuhl 4ème **FRISNO** «Symposium franco-israélien sur l'Optique Non Linéaire et Quantique » Les Arcs, Savoie, (21-26 Janvier 96) publié dans «Journal of Non Linear Optical Physics and Materials»
- CI.4) «Arrays of spatial light modulators grown by molecular beam epitaxy under high precision reflectometry control» V. Bardinal, R. Legros, C. Fontaine, R. Buhleier, J.L. Iehl and J. Collet **EOS Topical Meeting on «Free-Space Micro-Optical Systems»** Engelberg, Suisse (1-3 Avril 96)
- CI.5) «Reflectivity and Wave-Mixing Response of GaAs Fabry-Pérot Microcavities on a sub-picosecond timescale» R. Buhleier, J.L. Iehl, J.H. Collet, V. Bardinal, C. Fontaine, R. Legros, M. Hübner and J. Kuhl **Conférence Internationale sur les Applications de la Technologie Photonique ICAPT'96** Montréal, Canada (29 juillet-1er août 1996)
- CI.6) « Precise growth of vertical cavities using Tunable Dynamic Optical Reflectometry (TDOR) », F Van Dijk, V. Bardinal, C. Fontaine, E.Bedel-Pereira and A. Muñoz-Yague **Conférence Internationale sur l'épitaxie par jets moléculaires MBE-X** Cannes, 30 août - 4 septembre 1998
- CI.7) « MBE (111)B LT homoepitaxial GaAs : Role of growth and annealing temperatures and layer thickness on crystal quality » C.Guerret-Piécourt, M. Toufella, E. Bedel, P. Puech, G. Benassayag, V. Bardinal, C. Fontaine, A. Claverie and R. Carles **NIS'98" : 3rd International Workshop on Novel Index Surfaces**, LaCasona (Esp.) 6-9 Oct.98
- CI.8) "Single-mode Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers grown under accurate real-time optical control" F. Van Dijk, V. Bardinal, P. Dubreuil, L. Averseng, E. Bedel-Pereira, C. Fontaine and A. Muñoz-Yagüe. **CLEO'Europe 2000**, Nice, France, 10-15 septembre 2000, P.234.
- CI.9) « VCSELs and other vertical cavity devices », A. Munoz-Yagüe, V.Bardinal, C. Fontaine **2nd Reunion Espanola de Optoelectronica**, Barcelone (Espagne), 16-18 Juillet 2001
- CI.10) "New SNOM sensor using optical feedback in a VCSEL-based compound cavity" C.Gorecki V. Bardinal, L. Averseng, F. Van Dijk, P.Dubreuil, C. Fontaine et A. Muñoz-Yagüe, **Minatec 2001, 2èmes Rencontres Internationales des Micro et Nanotechnologies**, 2-6 avril 2001, Grenoble
- CI.11) "Study of the photodetection behaviour of oxide-confined vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSELs)", C. Bringer, V.Bardinal, L. Averseng, J. Polesel-Maris, T. Camps, P. Dubreuil, C. Fontaine, E. Bedel-Pereira, C. Vergnenegre **International**

**Conference on Superlattices Nano-structures and Nano-devices (ICSNN'2002),**  
Toulouse (France), 22-26 Juillet 2002

- CI.12) “Effects of selective wet etching on the the spectral properties of a vertical-cavity surface emitting laser /detector” C. Bringer, V. Bardinal, T. Camps, P. Dubreuil, C. Fontaine **CLEO’Europe 2003**, Munich, Allemagne, 23-27 juin 2003.
- CI.13) “Integrated lateral photodetection in vertical-cavity surface-emitting lasers using optical waveguiding”, C. Bringer, V. Bardinal, Y. G. Boucher , E. Daran, G. Almuneau, T. Camps, C. Amat, and C. Fontaine, **12th European Conference on Integrated Optics (ECIO’05)**, Grenoble, France, avril 2005, pp.490-493.
- CI.14) “Integrated lateral detection in VCSELs for optical system monitoring” C. Amat, T. Camps, V. Bardinal, C. Bringer, G. Almuneau, E. Daran and C. Fontaine, Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics **CLEO-PR’05**, Tokyo, Japon 11-15 juillet 2005.
- CI.15) « Self-aligned polymer microlenses fabrication for VCSEL beam shaping » C. Levallois, T. Leichle, V. Bardinal, T. Camps, J.B. Doucet, E. Daran, C. Vergnenegre. 2nd European Optical Society Topical Meeting Optical Microsystems **OμS’07**, 30sept-3october 2007, Capri, Italie.
- CI.16) “Self-centered polymer microlenses deposited on SU-8 patterned surfaces by means of a cantilever-based spotter” V. Bardinal, T. Camps, C. Levallois, T. Leichlé, B. Reig, J.B. Doucet , C. Vergnenègre and E. Daran. European Optical Society (**EOS**) **Annual Meeting 2008**, Paris Villepinte, 29 sept-2 oct. 2008.

**Congrès Nationaux**

- CN.1) « Détermination in situ des indices optiques de GaAs et AlAs à la température d’élaboration » V. Bardinal, R. Legros and C. Fontaine. **5èmes Journées Nationales sur la Microélectronique et l’Optoelectronique III-V**, Lyon (22-24 Juin 1994)
- CN.2) « Commutation tout-optique subnanoseconde dans les microcavités GaAs/GaAlAs » R. Buhleier, V. Bardinal, J.L. Iehl, J. Collet, C. Fontaine, R. Legros **Colloque Horizons de l’Optique, JNOG**, Ecole Polytechnique, Palaiseau, (Novembre 95)
- CN.3) « Diffraction photo-induite dans des microcavités Fabry-Pérot assistée par champ électrique » R. Buhleier, R. Grac, J.L. Iehl, M. Pugno, J.H. Collet, V. Bardinal, C. Fontaine, M. Hübner, J. Kuhl, B. Lambert, C. de Matos, H. L. Haridon, A. Le Corre 6ème Journée Nationale Microélectronique et Optoelectronique III-V, **JNMO 97**, Paris (29-31 Janvier 1997).
- CN.4) « Optimisation de la résistivité des miroirs dopés Béryllium pour application aux VCSELs » F. Van Dijk, V. Bardinal, L. Averseng, P. Dubreuil, C. Fontaine, E. Bedel-Pereira et A. Munoz-Yagüe 7èmes Journées Nationales Microélectronique et Optoelectronique, **JNMO 99** Egat 6-8 janvier 1999

- CN.5) « Diodes laser à cavité verticale : croissance uniforme sous contrôle optique et fabrication de composants à diaphragme d'oxyde » F. Van Dijk, V. Bardinal, P. Dubreuil, L. Averseng, E. Bedel-Pereira, C. Fontaine et A. Munoz-Yagüe. **JNOG'99**, 19<sup>èmes</sup> Journées Nationales d'Optique Guidée, Limoges, 7décembre 99, 141
- CN.6) « Conception et Réalisation de photodétecteurs à microcavité verticale » L. Averseng, V. Bardinal, P. Dubreuil, F. Van Dijk, T. Camps et A. Muñoz-Yagüe **JNOG'2000**, 20<sup>èmes</sup> Journées Nationales d'Optique Guidée, Toulouse, 21-22 novembre 2000, p.185
- CN.7) « Conception et Réalisation de microcavités verticales III-V pour la photodétection rapide à faible niveau » L. Averseng, V. Bardinal, P. Dubreuil, F. Van Dijk, T. Camps et A. Muñoz-Yagüe 8<sup>èmes</sup> Journées Nationales Microélectronique et Optoélectronique, **JNMO 2001**, Aussois, janvier 2001.
- CN.8) « Mise en évidence expérimentale de modes d'oxyde en photodétection dans un VCSEL à diaphragme d'oxyde enterré » V.Bardinal, L.Averseng, A. Munoz-Yagüe, J.Polesel-Maris, T.Camps, P.Dubreuil, C.Vergnenegre, M.Fraces, B.Duchenne **OPTIX 2001**, Marseille (France), 26-28 Novembre 2001
- CN.9) « Amélioration de la photodétection en cavité verticale par attaques chimiques sélectives de multicouches alternées (AlGaAs/AlAs) » C. Bringer, L. Averseng, J. Polesel-Maris, T.Camps, P. Dubreuil, V. Bardinal **OPTIX 2001**, Marseille (France), 26-28 Novembre 2001
- CN.10) Photodétection dans un VCSEL à diaphragme d'oxyde pour application duale C. Bringer, V. Bardinal, T. Camps, E.Daran, J.B. Doucet, C. Fontaine **COLOQ 8**, **Horizons 03**, 3-5 Septembre 2003 -INSA-Toulouse
- CN.11) « Étude de la photodétection dans un VCSEL à diaphragme d'oxyde pour application duale », C. Bringer, V. Bardinal, C. Fontaine, L. Averseng, T. Camps, P. Dubreuil, 9<sup>èmes</sup> Journées Nationales Microélectronique Optoélectronique (**JNMO'2002**), St Aygulf, France
- CN.12) « Détection latérale intégrée pour le contrôle de l'émission d'un VCSEL », C. Bringer, V. Bardinal, E. Daran, T. Camps, G. Almuneau, C. Amat, P. Dubreuil, J.-B. Doucet, C. Fontaine, 10<sup>èmes</sup> Journées Nationales Microélectronique Optoélectronique (**JNMO'2004**), La Grande Motte, France.
- CN.13) "VCSELS à double cavité pour la génération d'un battement THz" G. Almuneau, C. Bringer, V. Bardinal-Delagnes, C. Amat, T. Camps, J.b Doucet, P. Dubreuil, C. Fontaine, L.Chusseau, **SFP 9e Journées de la Matière Condensée**, Nancy, France, 30Août-3Sept. 2004, MC23P4
- CN.14) « Etude et amélioration de l'injection électrique dans les VCSELS de grand diamètre » E.Havard , T.Camps , V.Bardinal , M.Condé , C.Amat , G.Almuneau , L.Salvagnac , S.Pinaud, C.Fontaine. 11<sup>èmes</sup> Journées Nano-Micro Electronique et Optoélectronique (**JNMO**), Aussois (France), 4-7 Avril 2006,



- CN.15) « Détection latérale intégrée dans un VCSEL via un contact Schottky » C.Amat, T.Camps, V.Bardinal, E.Daran, J.C.Marrot, H.Granier, J.B.Doucet, G.Almuneau, C.Fontaine. 11èmes Journées Nano-Micro Electronique et Optoélectronique (**JNMO**), Aussois (France), 4-7 Avril 2006
- CN.16) « Amélioration de l'uniformité d'injection électrique dans les VCSELS de grande dimension » E.Havard, V.Bardinal, T.Camps, G.Almuneau, J.B.Doucet, L.Salvagnac, C.Fontaine Horizons de l'Optique 2007, Grenoble (France), 2-5 Juillet 2007, pp.153-154.
- CN.17) « Conception et réalisation de microlentilles en polymère auto-alignées pour la mise en forme du faisceau laser des VCSELS » C.Levallois , T.Leichlé , V.Bardinal , T.Camps , J.B.Doucet , E.Daran , C.Vergnenègre Horizons de l'Optique 2007, Grenoble (France), 2-5 Juillet 2007, pp.173-174
- CN.18) « Guidage transverse de l'émission spontanée et photo-détection latérale entre micro-cavités "verticales" Y.Boucher, V.Bardinal, E.Daran, T.Camps **COLOQ'10**, 10eme Colloque sur les Lasers et l'Optique Quantique, Grenoble (France), 2-5 Juillet 2007, pp.158-159
- CN.19) « Conception et fabrication de microlentilles en polymère intégrées pour la collimation de VCSEL » V. Bardinal, C. Levallois, C. Vergnenègre, T. Camps, T. Leichlé, E. Daran et J.B. Doucet. 12emes **JNMO**, 3-6 juin 2008, Oléron.
- CN.20) « Electrode ITO sur GaAs dopé Be pour applications optoélectroniques » E. Havard, V. Bardinal, T. Camps, L. Salvagnac, J.B. Doucet, S. Pinaud et C. Fontaine, Y. Kihn et A. Rocher. 12emes **JNMO**, 3-6 juin 2008, Oléron.
- CN.21) "Self-centered polymer microlenses deposited on SU-8 patterned surfaces by means of a cantilever-based spotter" V. Bardinal, T. Camps, C. Levallois, T. Leichlé, B. Reig, J.B. Doucet , C. Vergnenègre et E.Daran **JNTE 08**, Journées Nationales sur les Technologies Emergentes en Micro/Nanofabrication, Toulouse, 19-21 nov. 2008.

## BREVETS

**10 Aout 2006** : brevet sur l'oxydation des semi-conducteurs (N° FR2881876, WO2006082322) : « **Procédé d'oxydation planaire pour réaliser un isolant enterré localisé** ». G. Almuneau, A. Muñoz-Yagüe, T. Camps, C. Fontaine et V. Bardinal.

## SEMINAIRES INVITES

- I.1) « **Les VCSELS** » Séminaire invité GdR Matériaux et Fonctions de l'Optique Non Linéaire, St Martin Vésubie, 13-15 octobre 1999
- I.2) « **Contrôle en temps réel des épaisseurs en épitaxie par jets moléculaires / Application à la réalisation de microcavités verticales** » Séminaire invité, Optoplus Alcatel, Marcoussis 13 décembre 2001

- I.3) « **Fonctions optiques en microcavité verticale** » 8èmes Journées Nationales Microélectronique et Optoélectronique, JNMO 2001, Aussois
- I.4) « **Integrated photodetection in VCSELs** » Communication invitée, ICTON'05 International Conference on Transparent Optical Networks, Barcelone, 3-7 juillet 2005

#### WORKHOPS, ECOLES D'ETE

- W1) « Resistivity improvement of Beryllium doped Bragg Mirrors for Vertical Cavity Surface Emitting Lasers » F. Van Dijk, V. Bardinal, P. Dubreuil, C. Fontaine, L. Averseng, E. Bedel-Pereira and A. Munoz-Yagüe. **Euro MBE : Xth European Workshop on Molecular Beam Epitaxy**, Les Arcs (Savoie) 28 mars- 1<sup>er</sup> avril 1999
- W2) « Improved fabrication of high uniformity Vertical Cavity Surface Emitting Lasers » **F. Van Dijk, V. Bardinal, P. Dubreuil, L. Averseng, E. Bedel-Pereira, C. Fontaine and A. Munoz-Yagüe. HETECH'99**, 9<sup>ème</sup> Workshop Européen sur la Technologie des Hétérostructures, Villeeneuve d'Ascq, 26-28 septembre 1999
- W3) « Current work at LAAS-CNRS on microcavities and related materials » V. Bardinal, C. Fontaine, F. Van Dijk, E. Bedel-Pereira and A. Munoz-Yagüe **EOS Topical Meeting on Semiconductor Microcavity Light Emitters** Monte Verità, Suisse, 20-25 septembre 1998
- W4) « Current work at LAAS on microcavity devices on GaAs : VCSELs, photodectors, long wavelength material and structures » L. Averseng, V. Bardinal, F. Van Dijk, P. Dubreuil, E. Bedel-Pereira, C. Fontaine and A. Muñoz-Yagüe. S. Sanchez, C. De Matos, M. Pugnet **Summer School and European Topical Meeting on Semiconductor Microcavity Photonics**, Ascona, Suisse, 21-25 octobre 2000.
- W5) “Integrated lateral detection in VCSELs” C. Amat, T. Camps, V. Bardinal, C. Bringer, G. Almuneau, E. Daran and C. Fontaine **International Workshop on Physics & Applications of Semiconductor LASERS (PHASE 2005)**, Metz (France), 29-30 Mars 2005, p. 43.
- W6) “How to improve the electrical injection in broad-area VCSELs ?” E. Havard, T. Camps, V. Bardinal, M. Condé, L. Salvagnac, S. Pinaud, C. Amat, G. Almuneau, C. Fontaine **Spring school on Solitons in Optical Cavities**, Cargèse (France), 8-13 May 2006.
- W7) V. Bardinal, G. Almuneau, T. Camps, C. Fontaine, L. Nicu, M. Condé, O. Desplats, E. Havard, I. Suarez, C. Levallois, T. Leïchlé J.B. Doucet, L. Salvagnac, S. Pinaud, E. Daran, A. Arnoult, G. Lacoste, C. Vergnenègre, J.B. Pourciel “VCSELs for instrumentation: advanced processes for novel functionalities“ **FRANCO-US workshop on Nanophotonics**, OMNT, Paris (France) 8 July 2008.

### *Communications dans des journées thématiques ou GdR*

- 1) « Elaboration sous contrôle optique de microcavités Fabry-Pérot » V. Bardinal, R. Legros et C. Fontaine **Journées «Perspectives sur les Lasers et les Amplificateurs à Semiconducteurs»** LAAS-CNRS, Toulouse, (14 Decembre 95)
- 2) « Elaboration sous controle optique de microcavités verticales » V. Bardinal, R. Legros, C. Fontaine, R. Buhleier, J.L. Iehl, M. Pugnet, J.H. Collet **Journée GDR «Microcavités»**, 3 Octobre 1997, LAAS-CNRS, Toulouse
- 3) « Conception, technologie et caractérisation de VCSELS à 850 nm » F. Van Dijk, V. Bardinal, P. Dubreuil, L. Averseng, E. Bedel-Pereira, C. Fontaine et A. Munoz-Yagüe. **Réunion GdR « Microcavités et cristaux Photoniques »**, Marseille, 10-11 décembre 99
- 4) « Vers une miniaturisation de microscope optique SNOM basé sur la réinjection optique dans un VCSEL » V. Bardinal, L. Averseng, F. Van Dijk, P. Dubreuil, C. Fontaine, A. Muñoz-Yagüe et C. Gorecki, **Journées nationales de nano et microtechnologies**, CNRS, Paris, 6.7 décembre 2000, Paris
- 5) « Emission et détection en cavité verticale » V. Bardinal, C. Bringer, L. Averseng, T. Camps, P. Dubreuil, C. Fontaine, E. Bedel-Pereira, A. Munoz-Yagüe **Journées du GdR Microcavités et Cristaux Photoniques**, 6-7 décembre 2001, Montpellier
- 6) “Diodes VCSELS pour l’instrumentation et les communications optiques” affiche présentée aux Journées MOEMS du Club Micro et Nano Photonique du 15 septembre 2005, CNRS, Paris.
- 7) « Conception et réalisation de microlentilles en polymère auto-alignées pour la mise en forme du faisceau laser des VCSELS » C. Levallois, T. Leïchlé, V. Bardinal, T. Camps, J.B. Doucet, E. Daran, C. Vergnenègre, affiche présentée aux Journées Nationales du **GDR MNS Micro et NanoSystèmes**, 21-23 novembre 2007, LAAS, Toulouse.

### **AUTRES**

#### *Rapports de contrat*

« Simulation du comportement optique à la lecture d’un disque magnéto-optique » V. Bardinal, R. Legros, A. Munoz –Yague **Rapport de contrat ATG -Cygnet** (avril 1994)

« Micro-module d’émission 1.31um à 10Gbit/s multi-standards » T. Camps, V. Bardinal, C. Bringer, C. Amat, E. Daran, G. Almuneau, J.B. Doucet, L. Jalabert, P. Dubreuil, C. Fontaine **Projet RMNT OSA 131**, Juin 2005, 15p

An integrated opto-nanomechanical biosensor for functional genomic analysis » T. Camps, C. Vergnenègre, V. Bardinal, C. Bringer, C. Amat, D. Ramis, J.B. Doucet, X. Dollat, H. Granier, P. Dubreuil, D. Colin, P.F. Calmon, C. Fontaine **OPTONANOGEN Optonanogen. Project IST-200137239**, Décembre 2005, 29p

## *Mémoires, Rapports*

« Calcul de la réflectivité de structures multicouches /Vérification expérimentale »

V. Bardinal **Rapport de stage DEA** Physique des Solides UPS (1992)

« Conception, élaboration sous contrôle optique en temps réel et caractérisation de modulateurs à microcavité Fabry-Pérot »

**Mémoire de thèse** : Thèse de doctorat **INSAT** soutenue le 4 octobre 1995 au LAAS, mention très honorable avec les félicitations du jury

Jury : P. Chavel, J. Collet, J.M. Gérard, M. Ilegems, R. Legros, A. Martinez, J. Nagle et J.C. Pfister

« Réalisation de VCSELS par épitaxie par jets moléculaires . état de l'art/ Travaux menés au LAAS-CNRS »

V. Bardinal, **Rapport LAAS**, mars 2001

« Conception de masques paramétrables sous Cadence. Résolution des problèmes de compatibilité des formats. GDSII – Electromask »

L. Averseng, V. Bardinal et C. Solano

**Rapport d'activité LAAS (diffusion restreinte)** juin 2001

« A planar technology for fabrication of localized areas of buried aluminum-based oxide in GaAs/AlAs epitaxial structures » C.Amat , P.Gallo , S.Moumdji , G.Almuneau , T.Camps , L.Jalabert , P.Dubreuil , J.B.Doucet , E.Havard, V.Bardinal, C.Fontaine , A.Munoz-Yagüe.

**Rapport d'activité LAAS** N°06614, Septembre 2006.

## TITRES et EXPERIENCES

Née le 09/07/69

- 1992 **Ingénieur** Physicien Option Mesures-Matériaux I.N.S.A. (Institut National des Sciences Appliquées), Toulouse
- 1992 **Diplôme d'Etudes Approfondies** en Physique des Solides (AB) Université Paul Sabatier, Toulouse.  
**Stage D.E.A.** au LAAS-CNRS, Groupe Structures III-V : "Calcul de la réflectivité de structures multicouches / Vérification expérimentale" Ecriture d'un logiciel de modélisation de la réflectivité et de la transmission d'une structure multicouche à partir du formalisme des matrices caractéristiques d'Abelès.
- 1995 **Doctorat de Physique des Solides** de l'INSA de Toulouse (soutenue le 4 octobre 1995) LAAS-CNRS, Groupe Photonique, Toulouse (Responsable : Dr A. Muñoz-Yagüe) Mention Très Honorable et Félicitations du Jury.  
"Conception, élaboration sous contrôle optique et caractérisation de modulateurs à microcavité Fabry-Pérot". Directeur de thèse : René Legros.
- 1996-1997 **Séjour postdoctoral** à l'Institut de Micro-Optoélectronique (IMO) E.P.F.L. (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse) (Responsable : Prof. M. Illegems)  
Activité de recherche : Epitaxie par jets moléculaires de microcavités III-V, étude de l'injection électrique dans les réflecteurs de Bragg, optimisation de la croissance des multi-puits quantiques (In,Ga)As, élaboration de LEDs à microcavité, de cavités couplées et de guides d'onde pour les matériaux à bande interdite de photons (BIPs)
- Depuis 1997 **Chargée de recherche au LAAS-CNRS**, Groupe Photonique (Responsables successifs : A. Muñoz-Yaguë/C. Fontaine/F. Lozes) CR1 depuis 2000.  
Activité de recherche : Conception, réalisation et caractérisation de composants à microcavité verticale III-V pour l'émission et la détection. Etude des propriétés des VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Lasers)

## ACTIVITES D'ENSEIGNEMENT

- 1992 -1995 **Monitrice** de l'enseignement supérieur au département de Physique de l'INSA de Toulouse. Travaux Pratiques de physique 1ere année : optique géométrique, électricité, informatique. (3 x 96h équivalent TP)
- 1995-1996 **Vacataire** enseignement TD de physique au département de Physique et de premier cycle. Travaux Dirigés de Physique 1ere année : optique, électrostatique, mécanique, circuits électriques. (3x1h30 TD/semaine sur 6 mois : 72h)

1996-1997 **Enseignante** au département de Physique de l'EPFL (1<sup>er</sup> cycle) TP de physique (élèves ingénieurs 1<sup>er</sup> cycle Physique et 2<sup>eme</sup> année spécialité Génie civil) : interférométrie, spectroscopie, ondes sonores, magnétisme, électricité. (total : 200h)

## ACTIVITES D'ENCADREMENT

### Encadrement de post-doctorat

2006-2007 : Encadrement (100%) de **Christophe Levallois**  
Sujet : Réalisation de microlentilles en polymère intégrées sur VCSELs  
**Situation actuelle** : maitre de conférences à l'INSA de Rennes

### Encadrement de thèses de doctorat

2008- 2011 Co-encadrement (à 50% avec T. Camps) de **Benjamin Reig**, Doctorant UPS Toulouse « Micro-optique polymère pour l'intégration des VCSELs dans les microsystèmes ».

2004-2008 Co-Encadrement (à 50% avec T. Camps) d'**Eric Havard**, doctorant UPS Toulouse  
Sujet : « Etude de l'injection électrique dans les composants à cavité verticale »  
*Thèse soutenue le 21 mai 2008.*

2001-2005 Encadrement (100%) de **Charlotte Bringer** doctorante UPS Toulouse  
Sujet : « Technologie et caractérisation des VCSELs à diaphragme d'oxyde. Application à la détection en cavité verticale »  
Thèse soutenue le 10 février 2005  
**Situation actuelle** : Ingénieur qualité Astrium EADS Toulouse

1998-2002 Encadrement (100%) de **Laurent Averseng** – doctorant UPS  
Sujet : « Conception, réalisation et caractérisation de dispositifs à cavité verticale III-V pour la photodétection et l'émission-détection duale »  
Thèse soutenue le 16 juillet 2002  
**Situation actuelle** : Responsable technique Société E-Tera 81 ALBI

1997-1999 Co-Encadrement (50% avec C. Fontaine) de **Frédéric Van Dijk**, doctorant INSAT « Etude et la réalisation de VCSEL à diaphragme d'oxyde enterré ». Thèse soutenue le 02/12/99  
**Situation actuelle** : Ingénieur chez III-V LAB

### Encadrement de mémoire CNAM

1999 Encadrement de **Pascal Dubreuil** (50% avec A. Munoz-Yagüe) Assistant-ingénieur au LAAS service TEAM : supervision de son travail de mémoire d'ingénieur

CNAM sur la mise au point de l'oxydation thermique humide au laboratoire.  
Soutenu en décembre 2000

**Situation actuelle** : Ingénieur de recherche au LAAS

### **Encadrement de stages**

- 2008 Co-encadrement (50% avec T. Camps) de **Benjamin Reig**, Master MNS UPS. (février-août 2008) « Evaluation théorique et expérimentale de membranes suspendues en SU-8 ».
- 2007 Co-encadrement (50% avec G. Almuneau) de **Camille Echampard**, Master Phymatech Montpellier. Physique et Ingénierie des Matériaux Pour la Microélectronique et les Nanotechnologies Université Montpellier II (avril-septembre 2007) « Etude de la gravure de cristaux photoniques pour l'application aux VCSELs »
- 2006 Co-encadrement (50% avec C. Vergnenègre) de **Guillaume Anthime** – Stagiaire ingénieur ENSI CAEN dernière année (mars-août 06) Sujet : « Contrôle de la divergence de sources laser VCSEL »
- 2005 Encadrement (50% avec E. Daran) de **Léonard Gavin-Dijina** – stagiaire Master Pro Micro et Nano Technologie Nanostructures Orsay Paris XI (avril-sept 05) Sujet : « Développement de techniques de fabrication collective de microlentilles intégrées pour application aux VCSELs ». (Collaboration avec le LGET/ Y. Segui)
- Encadrement (50% avec C. Fontaine) de **Moustapha Condé** – stagiaire Master 2 Recherche CCMM (février-juin 05) Sujet : « Contrôle en température de la croissance des VCSELs »
- Encadrement (50% avec G. Almuneau) de **Maha Suleiman** – Stagiaire Master recherche MEMO (février juillet 05) Sujet : « Etude des propriétés optiques des VCSELs pour la détection latérale »
- 2004 Encadrement (50% avec T. Camps) d'**Eric Havard** – stagiaire DEA CCMM (février-juin 04) Sujet : « Etude de la conduction électrique 2D dans les VCSELs »
- Encadrement (80% avec T. Camps) d'**Olivier Ugo** – Stagiaire ingénieur ENSI CAEN dernière année (mars-août 04) Sujet : « Caractérisation en régime pulsé des VCSELs »
- 2003 Encadrement (50% avec T. Camps) de **Bertrand Roques** – stagiaire ENS-DEA Micro-Ondes et Transmission Optique (février-juin 03) Sujet : « Etude de la conduction électrique 1D dans les VCSELs »
- Encadrement (80% avec C. Vergnenegre) de **Erick Berdin** – Stagiaire BTS Optique Lycée Déodat de Séverac (mai-juillet 03) Sujet : « Etude et Fabrication d'un Banc de Réflectivité en lumière blanche »

- Suivi du projet multidisciplinaire de 4ème année ingénieur Physique INSA Toulouse de 3 élèves (**Bastien Orlando, Grégory Nicolas et Jean Bouilhou**) sur 6 mois sur la modélisation et la caractérisation des modes guidés dans un laser à cavité verticale.
- 2002 Encadrement (50% avec C. Vergnenègre) de **Nicolas Riviere** – stagiaire DEA Micro-Ondes et Transmission Optique (février-juin 02)  
Sujet : « Caractérisation optique et électrique de VCSELs »
- 2001 Encadrement de **Charlotte Bringer** 100% – Stagiaire DEA M.T.C.E. (février-juin 01) « Mise au point d'attaques sélectives AlGaAs »
- 1999 Encadrement de **Jérôme Polesel-Maris** 50%– stagiaire Maîtrise de physique (février-juin 01) « Méthode de mesure du champ lointain des VCSELs »  
Encadrement (100%) de **Valier Poydenot**, DEA microélectronique de l'INSAT-UPS sur le calcul des propriétés optoélectroniques des puits quantiques III-V orientés (111) et (100)
- 1998 Encadrement (100%) de **Laurent Averseng**, DEA Micro-Ondes et Transmissions Optiques de l'UPS . « Caractérisation de structures VCSEL par photo-réflexance »
- 1992-95 Encadrement d'un stagiaire **Informatique Industrielle 4ème année INSA** (Dominique Vial) et de deux stagiaires successifs d'IUT **Année Spéciale Informatique** (Cédric Falippou et Jean-François Lartigue) sur l'automatisation du banc de réflectométrie dynamique permettant le contrôle en temps réel de la croissance épitaxiale.

## ADMINISTRATION DE LA RECHERCHE

### Participation à des contrats de collaboration :

Projet CNRS Microsystems (1998-2001) : (LOPMD Besançon): microscope SNOM basé sur la réinjection optique dans un VCSEL (**Responsable LAAS**)

Collaboration CNES-ONERA DOPT (2000-2002): étude d'un composant dual VCSEL-photodétecteur (**Responsable LAAS**)

Collaboration METEO-France (2001) : réalisation d'un photodétecteur à cavité verticale pour un granulomètre embarqué (**Responsable LAAS**)

ACI Photonique (GELACOTE 2001-2003): Cavités couplées pour la génération d'ondes THz (CEM2 Montpellier, LAHC Chambéry) (**Responsable LAAS**)

ACI Photonique (Solitons de cavités 2002-2004): (LPN Marcoussis, ILNL Nice) : réalisation de composants VCSELs adaptés à la mise en évidence et au contrôle des solitons de cavité (**Responsable LAAS**)

ASP Microsystems optoélectromécaniques STIC (LOPMD Besançon) (2002-2003) t



microscope SNOM basé sur la réinjection optique dans un VCSEL. (**Responsable LAAS**)

Projet RNRT OSA 131 en cours (dèc. 2004-juin 2005) Réalisation d'un transceiver à 1.31µm à 10Gbit/s. Partenaires : IntexYs Photonics, LETI, Infineon. (**coordination scientifique LAAS**)

Projet européen IST STREP OPTONANOGEN (juillet 2002-juillet 2005)  
Integrated opto-nano-mechanical biosensor for fonctionnal genomic application.  
Réalisation d'un micro-capteur biomédical à sources VCSELS. Partenaires : CRL Southampton, CNM Madrid, CNM Séville, CNM Barcelone et Genetrix.

Projet européen IST STREP FUNFACS (avril 2005-novembre 2008)  
Fundamentals, Functionalities and Applications of Cavity Solitons. Etude de l'injection électrique dans les VCSELS pour la manipulation de solitons de cavité Partenaires : LPN Marcoussis, ILNL Nice, INFM Bari, INFM Como, USTRAT Glasgow, Ulm Photonics. (**coordination scientifique LAAS**)

LIA CNRS Corée du Sud Cristaux Photoniques et Nanophotonique (CPN) /  
Collaboration LAAS : KNU (Young Gu Ju) (Date de signature 12/06/2006)  
Partenaires : KAIST, KIST, Kyung Pook National University Daegu, LEOM INL

ANR JC EELOT « Contrôle des effets électro-optiques Transverses dans les composants à cavité verticale » (coordinateur G. Almuneau) 2006-2008

Projet LAAS MIOPY (Micro-Optique Intégrée à base de PolYmères) 2006-2009  
Budget : 95keuros (**Responsable projet**)

Projet région LAAS-CIRIMAT-Intexys FIAB SU8 (Tenue thermique en atmosphère humides des propriétés optiques et mécaniques de la SU-8) 2008-2011. Budget : 112keuros (**Responsable projet**)

## **JURY INTERNES : 4**

## **JURYS EXTERNES :**

- 2003** Jury de thèse d'**Angélique Rissons** : Caractérisation et modélisation optoélectronique de diodes laser à cavité verticale émettant par la surface (VCSEL) Thèse ENSAE soutenue le 14 octobre 2003  
Jury : J. Le Bihan, C. Rumelhard, V. Bardinal, D. Decoster, J.C. Mollier, M. Pez.
- 2007** Jury de l'épreuve d'évaluation des expériences et des acquis professionnels pour l'obtention du titre d'ingénieur diplômé par l'Etat de **Cédric Cassagnettes**, Teems Photonics. Département de Physique INSA de Toulouse, 8 septembre 2008

**Referee de revues scientifiques** (Applied Physics Letters, Optics and Lasers in Engineering...)

## **Commissions d'enseignement et de laboratoire**

- 2001-2002**    **Membre titulaire** de la Commission de Spécialistes Milieux Denses et Matériaux (28eme section) de l'INSA de Toulouse
- 2003-2005**    **Membre suppléant** de la Commission de Spécialistes Milieux Denses et Matériaux (28eme section) de l'INSA de Toulouse
- 2006- 2008**    **Membre titulaire** de la Commission de Spécialistes Milieux Denses et Matériaux (28eme section) de l'INSA de Toulouse

## **Autres Commissions :**

- Membre de la commission « Formation permanente » du LAAS (2001)
- Membre de la commission « Centre de documentation » du LAAS (depuis 2001)
- Membre de la commission « Renouveau de la direction (2006)

## **Actions de diffusion**

Correspondante (de 1997 à 2001) de **l'antenne ABG au LAAS** (Association Bernard Gregory) dont le but est de favoriser l'insertion professionnelle des doctorants (visite d'entreprises, diffusion d'offres)

Participation au **SITEF** de Toulouse (2000) : animation scientifique

Participation à **Physique 2005** (démonstrations scientifiques itinérantes en région)

Participation aux **Journées portes ouvertes / fête de la Science (2003-2008)** : préparation des expositions et animation scientifique.

## ***Articles dans des revues de vulgarisation***

- « Un robot à base de microplumes pour fabriquer des microlentilles en polymère »  
V. Bardinal et J.B. Pourciel **Revue « Photoniques »**, N°36, pp.44-45, Juillet 2008

