



HAL
open science

Technologie et caractérisation de VCSELs à détection intégrée pour applications aux communications optiques et à l'instrumentation

Cédric Amat

► **To cite this version:**

Cédric Amat. Technologie et caractérisation de VCSELs à détection intégrée pour applications aux communications optiques et à l'instrumentation. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2007. Français. NNT : . tel-00157963

HAL Id: tel-00157963

<https://theses.hal.science/tel-00157963>

Submitted on 27 Jun 2007

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

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

Année 2007

Thèse

Présentée au Laboratoire d'analyse et d'Architecture des Systèmes du CNRS

en vue de l'obtention du grade de

Docteur de l'université Paul Sabatier de Toulouse

Spécialité : optoélectronique, technologie et composants de l'électronique

Par

Cédric AMAT

Technologie et caractérisation de VCSELs à détection intégrée pour applications aux communications optiques et à l'instrumentation

Soutenue le 22 juin 2007 devant la commission d'examen composée de

Jacquet Joël (rapporteur)	Professeur, LMOPS, Metz
Tournie Eric (rapporteur)	Professeur, IES, Montpellier
Tchelnokov Alexei	Ingénieur, Responsable laboratoire LPS, CEA-Leti, Grenoble
Plana Robert	Professeur, LAAS-CNRS, Toulouse
Hamelin Régis (invité)	Docteur, Intexys Photonics
Camps Thierry	Maître de conférence, LAAS-CNRS, Toulouse co-directeur de thèse
Almuneau Guilhem	Chargé de Recherche, LAAS-CNRS, Toulouse co-directeur de thèse

Remerciements

Je tiens à remercier les membres du Jury : Joël Jacquet, Eric Tournié, Alexei Tchelnokov, Robert Plana et Régis Hamelin, pour s'être déplacé et m'avoir fait l'honneur d'évaluer mon travail.

Ce travail de thèse a été réalisé au LAAS-CNRS, au sein du groupe photonique et financé par le FSE (Fond social Européen) obtenu par la délégation régionale.

Je tiens donc à remercier Malik GHALLAB et Raja CHATILA de m'avoir accueilli au sein de leur laboratoire ainsi qu'Armelle BARELLI pour avoir obtenu ce financement et l'avoir proposé au LAAS-CNRS.

Je remercie Chantal FONTAINE, responsable du groupe Photonique, pour m'avoir accueilli au sein du groupe et m'avoir permis de préparer cette thèse.

Je remercie Guilhem ALMUNEAU, et Thierry CAMPS, mes co-directeurs de thèse, pour m'avoir encadré et soutenu durant ces trois années passées. Je remercie également Véronique BARDINAL pour ses conseils et sa bonne humeur.

Je remercie l'ensemble du service TEAM (notamment Alexandre A., Pascal D., Laurent B., Laurent J., Hugues G., Monique B., David B., Pierre-François C., Franck C., David C., Véronique C., Emmanuelle D., Jean-Baptiste D., Guy L., Laurent M., Ludovic S., Bernard R., Sébastien P., Jean-Christophe M. et Norbert F.) pour toute leur aide, formation, conseil et enthousiasme dont ils ont fait preuve.

Je remercie Nicolas MAURAN et Sandrine ASSIE-SOULEILLE pour m'avoir aidé lors de ma première campagne de caractérisation électrique ; ainsi que Laurent BARY, Stéphanie CONSTANT et Pierre-Henri MERRER pour leur collaboration lors de la campagne de mesures hyperfréquences.

Je remercie Olivier DESPLATS pour son enthousiasme et sa sympathie. J'ai apprécié les moments passés ensembles aussi bien au bureau qu'en dehors du travail.

Je remercie Pascal GALLO et Souad MOUMDJI pour la collaboration de quelques mois que j'ai mené avec eux, mais aussi pour leur enthousiasme et les conversations que l'on a pu avoir entre deux manipes.

Je remercie le couple Moustafa CONDE et Eric HAVARD pour les pauses passées ensembles durant ces trois années.

Je remercie Remy BOSSUYT pour la sympathie dont il a fait preuve lors de son arrivé dans notre bureau.

Je remercie Corinne VERGNENEGRE pour sa sympathie et ses précieux conseils professionnels.

Je remercie YOUNG GU pour m'avoir accueilli au sein de son laboratoire en Corée du Sud. Cette expérience restera gravée dans ma mémoire.

Je remercie l'ancienne génération Damien RAMIS pour les bon moments passés, Charlotte BRINGER pour m'avoir initié aux technologies de salle blanche, ainsi que Benoît VIALLET pour son goût du vert.

Je remercie Patrice COLLIERE, Olivier UGO et Léonard GAVIN pour leur sympathie lors de leur stage.

Je remercie le service Sysadmin (notamment Julien L., Christophe B. et Marie-Dominique C.) pour leur aide.

Enfin, je tiens à remercier tous les autres personnes que j'ai côtoyé au laboratoire.

Sommaire

Introduction générale

Chapitre 1 : Introduction	p. 1
1 Composants à microcavités verticales	p. 1
1.1 Evolutions récentes du VCSEL	p. 1
1.2 Principes et atouts du composant VCSEL	p. 2
1.2.a Structure	p. 2
1.2.b Avantages	p. 3
1.2.c Applications	p. 4
2 Détection verticale dans les VCSELS	p. 5
2.1 Composant dual émetteur/détecteur en fonctionnement alternatif	p.5
2.2 Détection après réflexion	p. 6
2.3 Structure VCSEL avec une zone de détection interne	p. 7
3 Détection latérale dans les VCSELS	p. 9
3.1 Emission par la tranche	p. 9
3.2 Etat de l'art des travaux sur la détection latérale	p. 10
4 Conclusions	p. 12
Chapitre 2 : Détection latérale	p. 16
1 Détection latérale par la cavité	p. 16
2 Composant émetteur détecteur dual	p. 20
2.1 Courant parasite / photocourant	p.20
2.2 Distance VCSEL détecteur	p. 22
2.3 Détecteur à contact Schottky	p. 25
2.4 Isolation émetteur/détecteur par implantation ionique	p.27
2.4.a Incidence sur le guidage optique	p. 28
2.4.b Evaluation de la résistivité électrique	p. 28
2.4.c Optimisation de l'étape de recuit thermique	p. 30
3 Conclusion	p. 31
Chapitre 3 : Réalisation technologique	p. 34
1 Présentation du process retenu	p. 34
1.1 Jeu de masque	p. 34
1.2 Description du procédé de fabrication	p. 35
2 Structure épitaxiale	p. 37
3 Gravure	p. 38
4 Oxydation latérale	p. 46
5 Passivation	p. 48
5.1 Etude des contraintes de couches déposées par PECVD	p. 49
5.2 Etude de la continuité du métal sur le flanc des mesas	p. 51
6 Implantation ionique	p. 52
7 Conclusion	p. 52

Chapitre 4 : Caractérisation du composant optimisé (OSA131)	p. 56
1 Présentation du dispositif optimisé	p. 57
2 Caractéristiques électrique / optiques	p. 58
2.1 Caractéristiques statiques	p. 58
2.2 Fonctionnement de détecteur à contact Schottky	p. 60
2.3 Comportement en température	p. 63
2.4 Caractéristique Spectrale de l'émission	p. 65
3 Caractéristiques hyperfréquences et temporelles	p. 67
3.1 Mesure de la fréquence de coupure des composants	p. 67
3.2 Réponses Temporelles du VCSEL et du détecteur intégré	p. 74
3.2.a Réponse impulsionnelle	p. 74
3.2.b Mise en évidence des modes de fonctionnement du composant	p.78
4 Conclusions	p. 81
Conclusion générale	p. 86

Introduction générale

Aujourd'hui, les diodes lasers interviennent dans des secteurs très diversifiés. En particulier, les lasers à cavité verticale à émission verticale (de l'anglais "*Vertical Cavity Surface Emitting Lasers*", acronyme : VCSELs) émettant à 850nm sont des sources de choix pour les transmissions de données ou pour les interconnexions optiques sur courte distance. Si ces VCSELs sont principalement utilisés dans le domaine des télécommunications, ils sont aussi utilisés pour le stockage optique de données, la lecture des codes barres ou les systèmes d'affichage.

Simultanément, l'évolution rapide des micro- et nanotechnologies a favorisé la miniaturisation des objets, facilitant ainsi leur intégration dans des microsystèmes compacts et performants. Toutefois, cette intégration pourrait être accrue si ces composants étaient susceptibles d'apporter une diversité de fonctionnalités au sein des microsystèmes. Il s'agit ainsi de dériver et/ou de trouver une alternative à la fonction principale de l'émetteur VCSEL, par exemple lors de leur conception par une modification de la géométrie ou de la structure du composant. Ceci permettrait de constituer des briques élémentaires en terme de fonction optique, capable d'être intégrées dans des microsystèmes actifs complexes.

Notre approche s'inscrit dans cette perspective : il s'agit d'intégrer un photodétecteur au sein d'un VCSEL. Les fonctions d'émission et de détection peuvent ainsi être réalisées au sein d'un même composant actif, ce qui permet, par exemple, de contrôler en cours de fonctionnement la puissance émise par le VCSEL ou encore d'instrumentaliser un VCSEL comme source lumineuse sensible à un signal réinjecté (microscopie optique en champ proche – SNOM ou tout autre applications de télémétrie Laser).

Ce travail de thèse s'est déroulé dans le cadre du projet RNRT "OSA131", qui avait pour objectif le développement d'un micromodule hautement intégré d'émission fibrée d'un signal numérique modulé à 10Gb/s, sur une porteuse optique à 1310nm. La source laser retenue est un VCSEL à grande longueur d'onde et l'approche de packaging correspondant à une hybridation de ce dernier sur réseau d'interconnexion sur substrat silicium permettant notamment un couplage dans la fibre optique auto-aligné (auto-centrage par la technique 'Flip-Chip'). Ce module s'intégrera dans tous les standards de transceivers/transpondeurs (type XPAK ou XFP) en vue d'une application Datacom sur les réseaux locaux (moyennes distances) de 10km maximum sur fibre monomode. Notre contribution dans ce projet OSA 131, réside dans l'étude de la détection latérale permettant d'asservir la puissance moyenne

émission (monitoring). Ainsi nous proposons une approche simple et générique permettant d'intégrer VCSEL et photodiode de monitoring. Dans notre cas, la démonstration de ce concept à l'aide d'une structure VCSEL (GaAs/AlGaAs) standard émettant à 850nm souligne le caractère générique de cette solution pour l'application de monitoring.

Ce manuscrit est constitué de quatre chapitres qui vont s'articuler comme suit :

Le premier chapitre situe le contexte de ce travail réalisé sur la détection intégrée de l'émission d'un VCSEL. Tout d'abord, le fonctionnement du VCSEL en émission et en détection est présenté. Puis les différentes méthodes de détection utilisées pour réaliser un contrôle de la puissance optique émise (monitoring) sont décrites. Enfin, nous présentons un état de l'art des travaux réalisés sur la détection latérale qui servira de référentiel pour positionner nos travaux présentés dans les chapitres suivants.

Le second chapitre est consacré à l'étude de l'émission spontanée émise latéralement par les puits dans les VCSELS, et à la conception d'un composant intégrant un émetteur et un détecteur. Le terme "détection latérale" regroupe les études sur le guidage de cette émission latérale, son analyse spectrale et sa conversion en photocourant au niveau du détecteur. Le but est de trouver un moyen simple et efficace de détection du signal pour permettre de contrôler la puissance du VCSEL. Dans une première partie, nous présentons les mesures réalisées sur la part d'émission latérale d'un VCSEL standard après propagation du signal dans l'air. Ensuite, nous exposons l'apport du guidage optique latéral entre VCSEL en préservant la cavité lors de la gravure du mesa d'anode. Après avoir mis en évidence les avantages et inconvénients d'une détection via la cavité, le paragraphe suivant décrit les différentes optimisations qu'il conviendra d'apporter au composant final pour ne recueillir que le signal utile (photocourant). Enfin, nous montrerons comment, pour assurer la compatibilité du composant VCSEL émetteur-détecteur, nous avons inséré un nombre réduit d'étapes technologiques au procédé de fabrication classique.

Le troisième chapitre présente le procédé de fabrication qui a été retenu afin de réaliser le composant final. Ensuite, les parties les plus critiques, comme la gravure du mesa, la passivation ou l'oxydation thermique, qui ont fait l'objet d'une étude approfondie sont présentées.

Enfin, le quatrième et dernier chapitre présente les caractérisations des composants émetteur-détecteur intégrés que nous avons réalisés. Le premier paragraphe synthétise les caractérisations électriques et optiques, et montre notamment la comparaison entre les composants selon leur configuration (avec et sans isolation par implantation). L'évolution du comportement du système émetteur/détecteur avec la température est également présentée.

Enfin, les caractéristiques hyperfréquences (petit signal) et la réponse à une impulsion électrique des composants VCSELS à détecteur intégré seront présentées.

Nous dresserons enfin un bilan sur les résultats obtenus et conclurons sur les perspectives qu'ouvre ce travail.

Chapitre 1

Introduction

Ce chapitre constitue une introduction au travail réalisé sur la détection intégrée de l'émission d'un laser à cavité verticale émettant par la surface (VCSELs). Tout d'abord, le fonctionnement du VCSEL en émission et en détection est introduit. Ensuite les différentes méthodes de détection dédiées à l'usage de contrôle de puissance d'émission (monitoring) sont décrites. Enfin, nous présenterons un état de l'art des travaux réalisés sur la détection latérale qui servira de référentiel pour positionner nos travaux.

1 Composants à microcavités verticales

1.1 Evolutions récentes du VCSEL

Le concept du VCSEL (Vertical Surface Emitting Laser) a été proposé en 1979 par Soda, Iga, Kitahara et Suematsu [1]. Mais il a fallu attendre 1989 pour voir des dispositifs performants dont le courant de seuil était inférieur à 1mA. Les VCSELs ont rapidement remplacé les lasers émettant par la tranche dans les applications de communications par fibre optique à courte distance telles que les protocoles Gigabit Ethernet et les systèmes de stockage. Après être entrés sur le marché des imprimantes et souris optique, les lasers à émission par la surface sont désormais prévus pour les applications dans les systèmes d'écran plats et de projection (RPTV), ainsi que pour les échanges de données à haut débit (10Gbit/s).

Le contrôle (l'asservissement) de la puissance optique moyenne émise par la source laser (VCSEL) est l'une des fonctions essentielles dans les systèmes d'émission de données ou de télécommunications optiques. Ainsi, la solution la plus communément retenue pour la détection de puissance émise par un VCSEL consiste à dévier une partie du faisceau de sortie, à l'aide d'une réflexion optique ou d'un élément réfléchissant, vers un photodétecteur adjacent. Cependant, pour prendre en compte cette solution, il est nécessaire de prévoir lors de la mise en boîtier (packaging) un emplacement réservé à l'élément réfléchissant. De plus, le signal

émis étant en partie dérivé, le signal couplé dans la fibre s'en trouve atténué. Il existe donc un besoin dans le domaine de la détection, besoin qui nécessite la prise en compte d'une meilleure capacité d'intégration de la fonction détecteur avec le composant.

Mais l'utilisation de la détection dans les VCSELS ne se limite pas au domaine des télécommunications. En effet, si le contrôle de la réinjection optique dans les lasers ruban conventionnels, à émission par la tranche, a été largement étudié et exploité pour des mesures en champ lointain, les effets de la réinjection en détection champ proche sont moins bien connus. L'utilisation de lasers à cavité verticale émettant par la surface constitue une approche nouvelle visant l'intégration de systèmes de détection, utilisables par exemple en microscopie optique en champ proche (SNOM) [2].

Nos travaux de recherche, effectués lors de cette thèse, se sont efforcés de répondre à ces différentes attentes.

1.2 Principes et atouts du composant VCSEL

Parmi les lasers élaborés à partir de matériaux semi-conducteurs à base de **puits quantiques**, le VCSEL est un laser à cavité verticale dont l'émission laser est perpendiculaire à la surface de la puce.

1.2.a Structure

Dans les VCSELS, la cavité optique est formée entre deux miroirs distribués dopés N et P. Cette cavité inclut une région active comprenant au sein d'une couche intrinsèque, des puits quantiques.

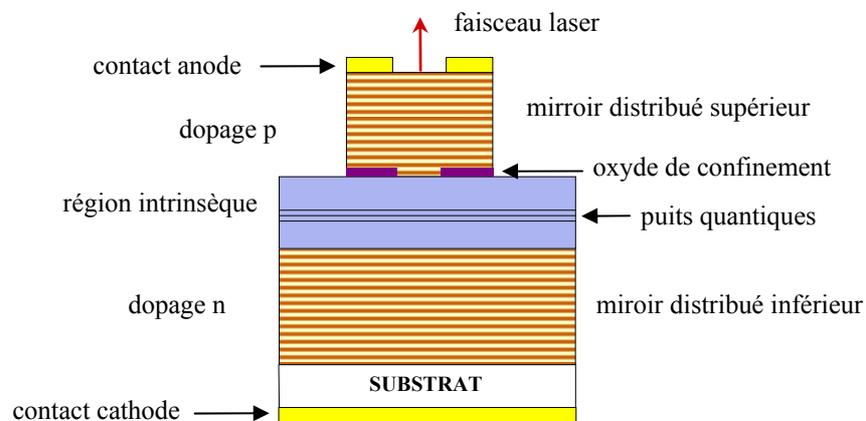


Figure I.1 : Schéma d'un VCSEL à diaphragme d'oxyde émettant par la face supérieure

Du fait de la forte réflectivité des miroirs inférieur et supérieur, les photons se propagent dans la direction verticale et la puissance optique est amplifiée au niveau des couches actives. Dans cette zone active, non intentionnellement dopée, on place un ou plusieurs puits quantiques au niveau du maximum du champ optique. Le gain est donc obtenu sur une très courte distance et la multiplication des photons nécessite un nombre conséquent de passages. Cette condition est satisfaite grâce à la réflectivité des miroirs très élevée (typiquement >99%). La haute réflectivité est obtenue par des **réflecteurs de Bragg distribués** (Distributed Bragg Reflectors ou DBRs) consistant en un empilement périodique de deux couches quart d'onde à fort contraste d'indice. Quand l'épaisseur optique de chaque couche est égale au quart de la longueur d'onde visée, les ondes réfléchies interfèrent de façon constructive, permettant d'atteindre des réflectivités requises de plus de 99%, ceci avec un nombre modéré de bicouches (>30 paires) constituant l'empilement. Enfin, pour injecter verticalement le courant électrique jusqu'à la zone active, ces miroirs sont généralement élaborés à partir de matériaux semi-conducteurs dopés.

1.2.b Avantages

Si l'on compare un VCSEL à une diode laser conventionnelle émettant par la tranche, on peut entrevoir plusieurs avantages inhérents à sa structure verticale. Dans une diode classique, compte tenu du faible gain par rapport au gain modal disponible et de la faible réflectivité des faces clivées de l'échantillon, le milieu actif doit être de grande dimension. Ceci a pour conséquence la propagation de plusieurs modes longitudinaux. De plus, le facteur de forme de la face de sortie provoque la génération d'un faisceau de sortie elliptique qui nécessite une optique de remise en forme adaptée dans le cas du couplage dans une fibre.

Dans le cas d'un VCSEL, la couche active est définie par la structure verticale, les DBRs de haute réflectivité permettent de réduire son épaisseur pour n'autoriser qu'un seul mode longitudinal, ce qui a également pour conséquence de conduire à des courants de seuil faibles (de l'ordre du milli Ampère). De plus l'émission surfacique est circulaire, faiblement divergente, et par conséquent constitue un avantage pour le couplage avec les fibres optiques. Enfin le traitement des faisceaux par la surface permet de délimiter facilement par des technologies collectives des barrettes et des matrices de diodes lasers que l'on peut tester sur plaque avant la découpe et le montage.

Outre l'intérêt pour leur application comme émetteurs matriciels pour le traitement de l'information, ces dispositifs sont des démonstrateurs d'une grande richesse. Ils contiennent en

effet tous les éléments critiques des structures de cette géométrie : résonateurs de haute finesse, zone de gain à puits quantiques, injection électrique complexe, technologie sophistiquée... Autant d'aspects qu'il est important de maîtriser pour développer une compétence sur ces composants, puis d'accéder à d'autres applications classiquement couvertes par les structures à microcavité verticale : modulateurs [3], générateurs d'impulsions ultracourtes [4]...

1.2.c Applications

Aujourd'hui les diodes lasers sont utilisées dans des secteurs très variés tels que la médecine, les communications ou les divertissements. L'application principale reste cependant les domaines des télécommunications optique et le stockage des données (lecture et écriture optique). La croissance des échanges, notamment de fichiers de données avec Internet, réclame un débit toujours plus élevé. Les fibres optiques posées au fond de l'océan sont les voies de communication les plus utilisées pour les communications à longue distance (liaison intercontinentale). Le marché des réseaux locaux, qui distribuent les données en fin de chaîne à l'utilisateur et dans lesquels interviennent typiquement les diodes laser VCSEL, s'est développé en milieu urbains aux Etats Unis sous le nom de Fiber To The Home (FTTH) et son expansion devrait s'intensifier en Europe dans les prochaines années.

Les performances en haute fréquence [5] et la forte capacité d'intégration des VCSELs en font aussi des sources de choix pour les transmissions de données ou pour les interconnexions optiques sur courte distance [6]. Des expériences de transmission de données sur plus de 20 km ont montré qu'un VCSEL peut opérer à 10Gbit/s sans introduire d'erreur en conservant un diagramme de l'œil satisfaisant [7]. Dans le cas des interconnexions parallèles, les faibles courants de seuil et un fort rendement quantique sont particulièrement recherchés puisque des dizaines de composants doivent être intégrés sur une même puce avec le minimum de dissipation de puissance. D'ailleurs, la dissipation réduite associée à une faible sensibilité en température, permet dans nombres d'applications de s'affranchir d'un système de refroidissement à base de modules Peltier. De plus, le coût du système est un critère important dans les réseaux de communications, où l'atténuation et la dispersion dans les fibres sont critiques (transmission maximum de 100 mètres à 850nm et 10 Kilomètres pour 1,3 μ m).

Les VCSELs sont aussi utilisés pour la réalisation de capteurs optiques : lecture optique (stockage optique) et dans les lecteurs de codes barres, les souris optiques et les modulateurs de lumière. Ils sont progressivement amenés à remplacer les DELs (Diode

ElectroLuminescent) dans les réseaux locaux car la vitesse de modulation de ces dernières est limitée à quelques centaines de Mbit/s. De plus, ils permettent de transmettre, dans des fibres multimodes à gradient d'indice, les données sur une plus longue distance et consomment moins de puissance électrique dans la gamme des températures d'utilisation. De nouvelles applications voient le jour telle que la spectroscopie d'absorption des gaz [8], l'impression laser [9] ou encore le stockage optique de données [10] [11].

2 Détection verticale dans les VCSELs

Le VCSEL est une source de choix dans les composants optiques actuels. Cependant, dans les applications requérant une haute densité d'interconnexions optiques, il est avantageux d'intégrer monolithiquement la source optique ainsi que le photodétecteur sur un même substrat. Ceci permet de rassembler toutes les connexions (optiques, optoélectroniques) dans un espace très réduit. Dans le même temps, l'assemblage du dispositif se trouve aussi simplifié en facilitant l'intégration des composants optoélectroniques avec le routage optique et la focalisation des faisceaux.

Les paragraphes suivants présentent les différentes solutions de détection qui ont été explorées lors de précédents travaux.

2.1 Composant dual émetteur/détecteur en fonctionnement alternatif

La solution la plus simple pour réaliser un composant se comportant alternativement en émetteur et en détecteur reste l'utilisation d'un VCSEL standard à simple cavité en alternant sa polarisation électrique. Cependant, sa géométrie doit être légèrement modifiée car la réflectivité très élevée du miroir supérieur induit une forte sélectivité spectrale de la détection du composant et une limitation de l'efficacité de détection. Pour réduire cette sélectivité (augmenter le spectre de détection), des solutions basées sur l'attaque de quelques périodes formant le réflecteur de Bragg supérieur (figure I.2) ont été proposées [12], [13].

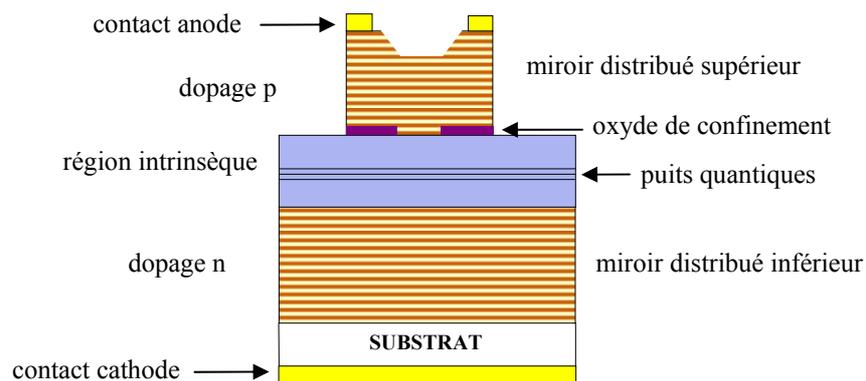


Figure I.2 : Schéma typique d'un VCSEL ajusté pour la photodétection.

L'attaque localisée et en surface des premières périodes entraîne en effet une réduction de la réflectivité du miroir supérieur et donc une augmentation de la gamme spectrale détectée en polarisation inverse. En polarisation directe, cela a pour conséquence d'augmenter le courant de seuil laser mais également la puissance émise. En effet, une quantité supérieure de lumière peut quitter la cavité. Il peut s'en suivre également d'une modification de conditions de propagation des modes transverses et donc du spectre d'émission en fonctionnement laser.

Enfin, Knold et al [13] ont étudié l'influence des paramètres extérieurs tel que la température agissant sur l'efficacité quantique à partir du photocourant généré et de la puissance absorbée par les puits quantiques (en supposant que le photocourant reste proportionnel à la puissance reçue). Ces travaux ont montré une diminution de 30% de l'efficacité quantique pour des températures inférieures à la température ambiante (10°C) et une diminution de 50% pour des températures dépassant les 50°C. Ce comportement est principalement lié au fait que le coefficient d'absorption augmente avec la température. En pratique, cela a pour effet de décaler les pics de résonance vers les courtes longueurs d'onde d'environ 0,05nm/°K. L'accord gain/cavité Fabry Péro est optimal pour la détection dans la gamme de température allant de 20 à 30°C.

2.2 Détection après réflexion

Une autre possibilité consiste à séparer dans le plan horizontal des composants émettant et recevant le signal, comme le propose la figure I.3, sur la base d'une structure épitaxiée commune.

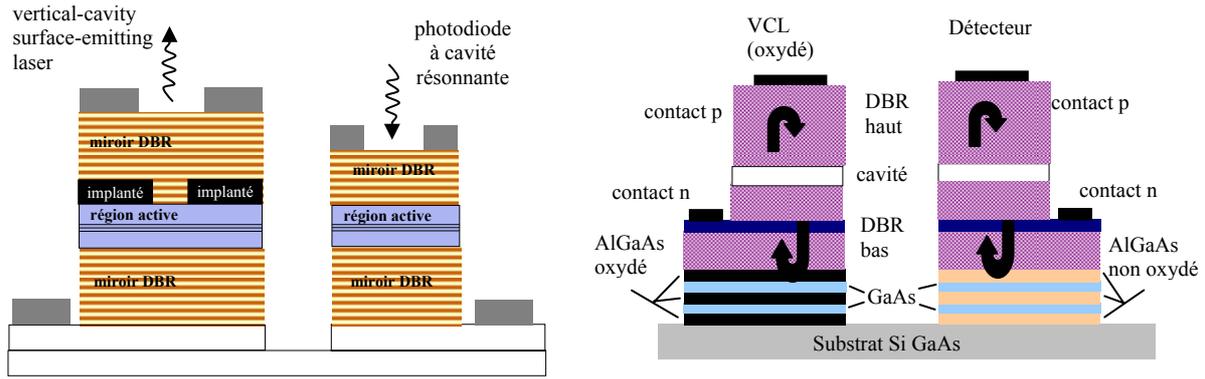


Figure I.3 : exemple d'intégration horizontale VCSEL/RCPD. On distingue a) à gauche une photodiode avec le DBR supérieur gravé [14] et b) à droite l'utilisation de l'oxydation sélective pour modifier le facteur de qualité du VCSEL par rapport au détecteur [15].

Dans les deux cas décrits, la séparation des composants émetteur et récepteur permet de traiter simultanément l'information. Cependant, l'autocentrage nécessaire à un lien bidirectionnel, n'est plus possible car les composants sont nécessairement dissociés.

Dans la première configuration où les faisceaux sont traités par la surface [14], la structure épitaxiale de départ est celle d'un VCSEL. Toutefois, l'optimum de sensibilité pour le détecteur résonnant placé à côté du laser correspond à une réflectivité du DBR supérieur inférieure à celle requise pour l'effet laser. La diminution de cette réflectivité est réalisée en gravant avec précision les périodes nécessaires du DBR supérieur. Les photodétecteurs ainsi fabriqués ont une efficacité de détection de 85% à la longueur d'onde de résonance. La description détaillée de la réalisation d'un capteur biomédical intégrant deux composants placés côte à côte est reportée dans la référence [16].

Une solution un peu différente avec émission par le substrat est proposée par Sjölund et al [15]. La structure verticale est celle d'un photodétecteur. Pour augmenter suffisamment la réflectivité du miroir de sortie du VCSEL, quelques périodes $\text{Al}_{0,98}\text{Ga}_{0,02}\text{As}/\text{GaAs}$, ajoutés en début de croissance, sont sélectivement oxydés au cours de process. Les épaisseurs de ces couches sont calculées de façon à s'accorder avec le reste de la structure verticale. Cette solution est compatible avec la technique de flip-chip et permet la formation de microlentilles à l'arrière du substrat, ce qui renforce encore l'intégration des dispositifs.

2.3 Structure VCSEL avec une zone de détection interne

Un photodétecteur peut être intégré au VCSEL, afin de détecter directement le signal émis par le haut. Cela permet d'avoir un dispositif plus compact et autocentré, tout en conservant l'intégration monolithique. Cependant cette solution n'est pas exploitable dans le

cas d'une épitaxie standard, car elle nécessite l'insertion de couches spécifiques supplémentaires [17].

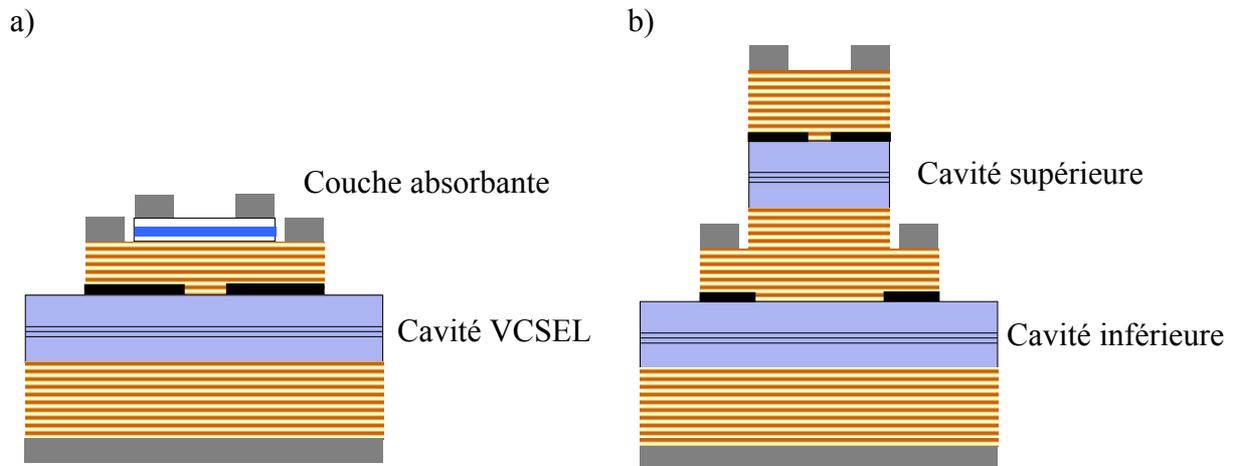


Figure I.4 : Schéma de l'intégration verticale d'un détecteur en a) une couche absorbante [18] (à gauche) et b) 2 cavités empilées [19] à droite.

La couche absorbante est insérée dans une couche du miroir de Bragg supérieur au sein d'une structure PN pour collecter le photocourant. Parmi les configurations possibles, les plus représentatives sont schématisées sur la figure 4 ci-dessus. En plaçant un matériau absorbant sur le trajet du faisceau laser (figure 4(a)), la mesure du photocourant généré dans le détecteur rend possible le contrôle et la commande de la puissance émise par le composant lors de son fonctionnement par un traitement électronique approprié. Une autre utilisation de cette couche absorbante consiste à moduler la puissance émise [20].

Une des premières réalisations publiées concerne l'ajout d'une couche épaisse de GaAs au-dessus de la structure VCSEL [21]. Le photocourant collecté détecte l'émission laser mais en prélevant une part non négligeable de la puissance de sortie du VCSEL. Ce problème est résolu par l'optimisation de la réponse du photodétecteur en plaçant les puits quantiques dans un plan correspondant au ventre du champ optique [19]. Dans ce cas, l'évolution du photocourant généré lors de l'injection croissante de porteurs dans le VCSEL suit de très près celle de la puissance relevée par un détecteur extérieur. Enfin, le dispositif est rendu insensible à la température [22] en décalant volontairement vers le rouge la longueur d'onde de détection des puits absorbants.

Un autre moyen pour parvenir à superposer l'émetteur et le détecteur est d'empiler deux cavités VCSELs (figure 4(b)) [20]. Chaque fonction (émission, détection) est alors localisée dans une cavité, mais la réalisation technologique de ces composants devient complexe. En effet, il ne doit pas y avoir de dérives lors de la croissance [23] sous peine de

désaccorder les cavités et dégrader le fonctionnement prévu de la structure. En outre, le processus de fabrication comporte davantage d'étapes que pour la formation d'un VCSEL classique : 2 mesas au minimum ainsi que 2 à 3 électrodes.

Une telle structure est adaptée pour réaliser les fonctions émission-détection de façon centrée. Les commandes électriques des composants étant séparées, la rapidité de fonctionnement s'en trouve accrue. Dans une étude récente [12], il a été démontré que la cavité polarisée en inverse est sensible à l'émission de l'autre cavité. Dans ce cas le photocourant suit exactement l'évolution de la puissance émise par la face supérieure à un facteur près (la différence du niveau de signal étant due à la géométrie du composant).

3 Détection latérale dans les VCSELs

Cette partie est dédiée à l'étude de l'émission émise latéralement par les puits dans les VCSELs. Dans un premier paragraphe, nous présentons des mesures réalisées sur un VCSEL standard afin de démontrer la corrélation qui peut être faite entre l'émission latérale et l'émission stimulée.

Le paragraphe suivant fait la synthèse bibliographique des travaux antérieurs sur la détection latérale.

3.1 Emission par la tranche

Comme nous l'avons vu dans la première partie de ce chapitre, l'émission de photons provoquée par les électrons passant d'un haut niveau d'énergie à un état d'énergie inférieur est l'émission spontanée. Cette émission est isotrope, et son évolution peut être corrélée à celle de l'émission stimulée. En effet, nous avons démontré [24] qu'en mesurant à la fois la puissance optique émise verticalement et latéralement (figure I.5), le seuil et l'extinction laser ont un impact sur l'émission latérale en se traduisant respectivement par une rupture de pente et un maximum (figure I.6).

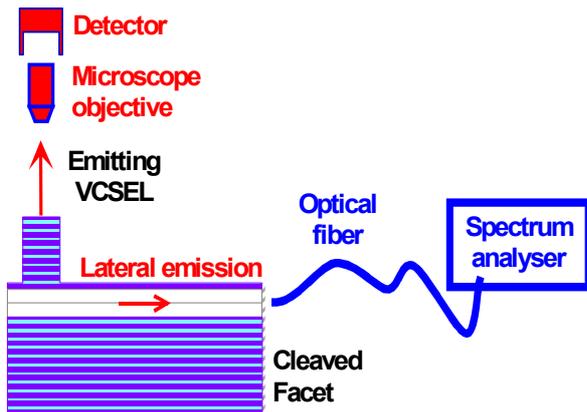


Fig : 5

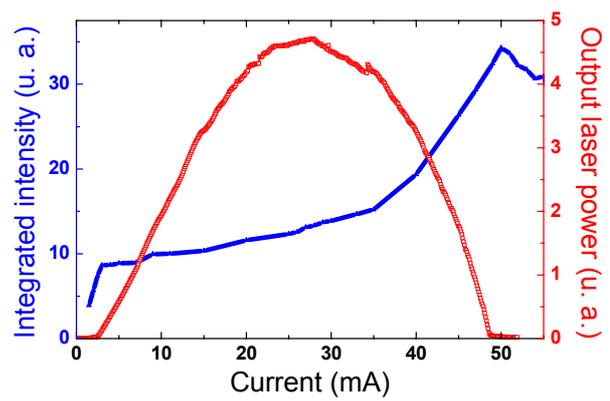


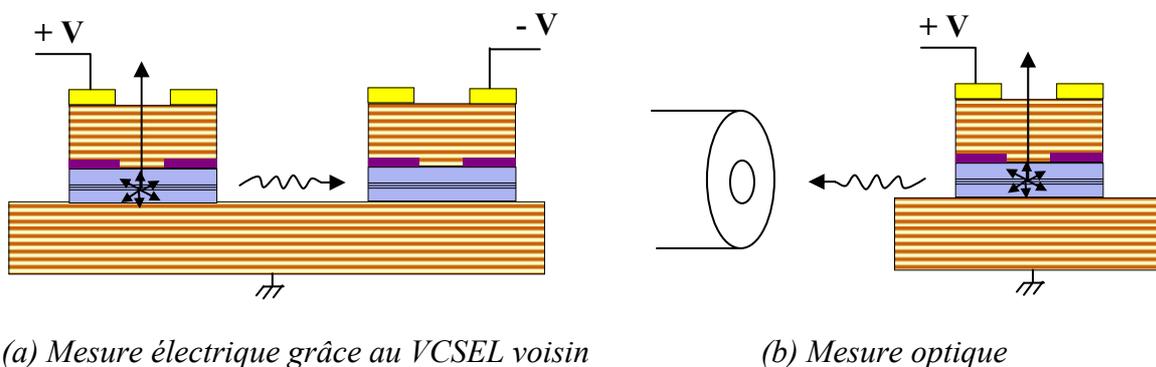
Fig : 6

Figure I.5 et I.6 : Schéma des mesures optiques (verticale et latérale), et comparaison de la puissance utile émise par la surface et celle perdue émise par la tranche.

La puissance émise latéralement est mesurée en intégrant le signal mesuré par l'analyseur de spectre (figure I.6). Sur cette courbe on distingue une rupture de la pente lors du seuil laser et lors de l'extinction laser. Entre ces points, on observe une croissance monotone. Nous verrons dans le chapitre suivant que cette croissance monotone peut être mise à profit pour une application de monitoring de la puissance émise. L'analyse des spectres de la lumière guidée dans la cavité vers la tranche sera plus amplement détaillée dans la première partie du chapitre 2.

3.2 Etat de l'art des travaux sur la détection latérale

La caractérisation de l'émission latérale a déjà été réalisée par quelques équipes de recherche, soit par voie optique [25] et [26], soit par voie électrique [27]. La figure I.6 décrit les deux configurations de détection correspondantes.



(a) Mesure électrique grâce au VCSEL voisin

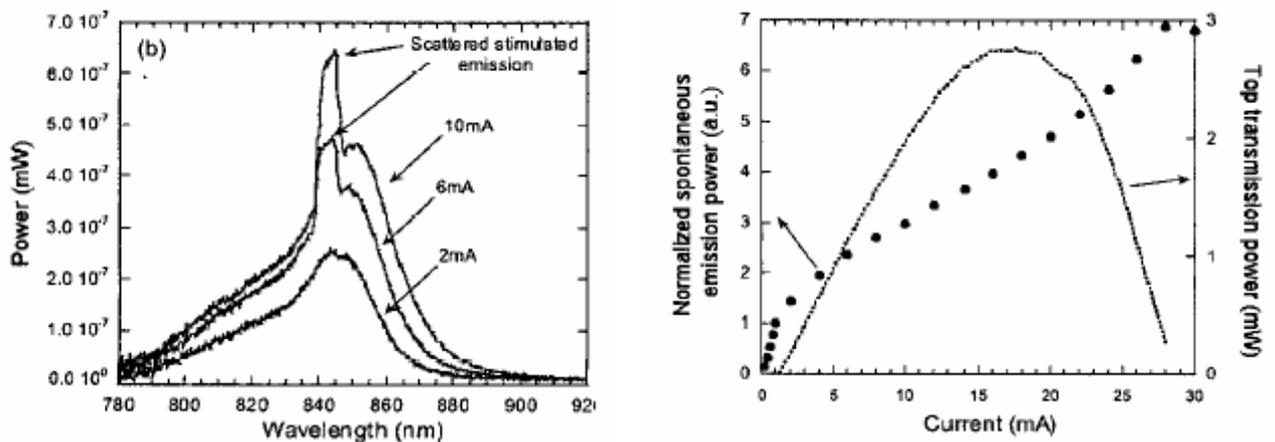
(b) Mesure optique

Figure 6 : Détection latérale de l'émission spontanée

L'expérience menée par Shin et al. [27] pour déterminer le coefficient de recombinaison non-radiatif d'un VCSEL met en jeu deux VCSELs adjacents. Le principe est

représenté sur la figure I.6(a) : on injecte des porteurs dans un premier VCSEL (en émission) tandis que le second est polarisé en inverse (en mode détection). Aux bornes de ce dernier apparaît un courant en relation avec l'injection croissante dans le premier VCSEL. Ce photocourant est proportionnel à l'émission qui se propage latéralement du mesa et s'élève à 120 nA au seuil laser.

La même équipe a ensuite mesuré cette émission latérale à l'aide d'une fibre optique [26] reliée à un analyseur de spectre. Les spectres relevés sont larges de plusieurs dizaines de nanomètres et décrivent l'évolution de l'émission spontanée sous injection croissante. Toutefois, ces mesures ne concernaient que le régime d'électroluminescence. Hsu *et al.* ont prolongé cette expérience [26] au delà du seuil laser et montrent qu'une partie de l'émission stimulée apparaît dans les spectres : un pic se dégage autour de la longueur d'onde de l'émission des puits (figure I.7(a)). Cet effet est attribué à la diffusion d'une partie appelée émission spontanée amplifiée correspondant aux zones pompées électriquement sous le diaphragme d'oxyde qui est ensuite guidée vers les bords du mesa du composant.



(a) Spectres mesurés au seuil laser et au-dessus (b) Intensité intégrée comparée à la puissance émise

Figure 7 : Mesures optiques de l'émission latérale par le mesa [26].

L'intégration de ces spectres (après suppression de la composante d'émission laser) est représentée sur la figure I.7(b) et est comparée avec l'évolution de la puissance émise avec le courant appliqué. Au-dessus du seuil laser, l'émission spontanée n'est pas saturée comme le prévoit la théorie et une explication de ce phénomène sera proposée en début du second chapitre.

La détection de l'émission spontanée a aussi été caractérisée électriquement par Choquette *et al.* [28] en intégrant une structure VCSEL annulaire réalisée autour d'un VCSEL émetteur (figure I.8(a)). Le VCSEL annulaire polarisé en inverse est utilisé comme détecteur.

La distance séparant le VCSEL et le détecteur est de trente micromètres et comme on peut le noter, le mesa s'arrête en dessous de la zone active, ce qui conduit à la propagation en espace libre de la lumière entre VCSEL émetteur et le détecteur.

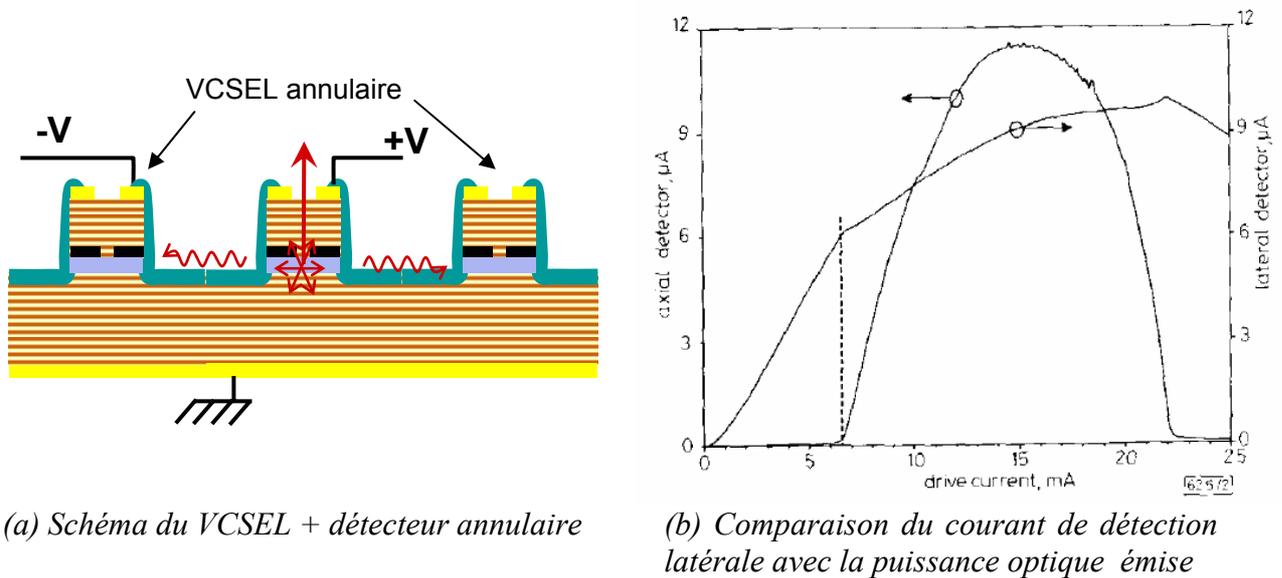


Figure I.8 : Détection latérale de l'émission spontanée par un détecteur annulaire [28]

Choquette *et al.* ont également observé un changement de la pente du photocourant correspondant au début de l'émission stimulée (seuil laser), et un maximum à l'extinction de l'émission spontanée liées aux effets thermiques. Malheureusement le niveau du signal détecté est trop faible, n'excédant pas la dizaine de microampère, pour être exploitable dans des applications de monitoring. La principale cause de la faible valeur du photocourant, est liée à la diffraction (interface cavité/air) du signal émis depuis le mesa du VCSEL et à la réflexion (interface air/cavité) sur le mesa du VCSEL annulaire détecteur. Nous verrons en fin du second chapitre comment ce niveau de signal peut être augmenté.

4 Conclusions

Dans ce premier chapitre, nous avons tout d'abord présenté les marchés sur lesquels les VCSELs ont réussi à s'imposer sur la diode laser traditionnelle, puis exposé les motivations des recherches actuelles. Nous avons fait le tour des différentes méthodes de détection de la puissance émise dédiées à des applications de monitoring, et rappelé les principaux résultats publiés traitant de la détection latérale de l'émission spontanée.

Dans un souci d'intégration du VCSEL en tant qu'élément de base dans des systèmes réalisant des fonctions plus complexes, nous allons voir comment optimiser la détection de

latérale de l'émission spontanée, sans changer la structure épitaxiale et en restant compatible avec les techniques standard de fabrication de VCSEL.

Enfin, après avoir passé en revue les différentes étapes de la fabrication du système VCSEL émetteur-détecteur intégré, nous présenterons les résultats obtenus sur un composant optimisé.

Bibliographie du Chapitre 1

-
- [1] H. SODA, K. IGA, C. KITAHARA and Y. SUEMATSU, "GaInAsP/InP surface emitting injection lasers", *Journal of Applied Physics*, vol 18, p. 2329-30, 1979.
- [2] C. GORECKI, V. BARDINAL, L. AVERSENG, F. VAN DIJK, P. DUBREUIL, C. FONTAINE, A. MUNOZ-YAGUE et S. KHALFALLAH, "Vers l'intégration d'un nouveau microscope SNOM basé sur la réinjection optique dans un VCSEL", *Nano et Micro Technologies*, vol. 1, no. 3-4, p. 271-86 2001.
- [3] S. F. LIRN, L. P. CHEN, G. S. LI, W. YUEN, K. Y. LAU, C. J. CHANG-HASNAIN, "Novel intracavity modulator integrated with a vertical-cavity surface-emitting laser", *Lasers and Electro-Optics, 1997. CLEO '97*, vol. 11, p. 194-5, 1997.
- [4] Y. C. LU, P. ZHOU, J. CHENG, "A directly modulated pulse-compressed and time-multiplexed optical source for high-speed multiple-access networks", *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol. 5, no. 8, p. 905-7, 1993.
- [5] U. FIELDER, G. REINER, P. SCHNITZER et K. J. EBELING, "Top surface-emitting vertical-cavity laser diodes for 10-Gb/s data transmission"; *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 8, no. 6, p. 646-8, 1996.
- [6] D. V. PLANT, M. B. VENDITTI, E. LAPRISE, J. FAUCHER, K. RAZAVI, M. CHATEAUNEUF, A. G. KIRK et J. S. AHEARN, "256-channel bidirectional optical interconnect using VCSELs and photodiodes on CMOS", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 19, no. 8, p. 1093-103, 2001.
- [7] G. STEINLE, F. MEDERER, M. KICHERER, R. MICHALZIK, G. KRISTEN, A. Y. EGOROV, H. RIECHERT, H. D. WOLF et K. J. EBELING, "Data transmission up to 10Gbit/s with 1.3 μ m wavelength InGaAsN VCSELs", *Electronics Letters*, vol. 37, no. 10, p. 632-4, 2001.
- [8] M. ORTSIEFER, R. SHAU, J. ROSSKOPF, M. FURFANGER, M.-C. AMANN, C. LAUER, M. MAUTE, G. BOHM, M. LACKNER et F. WINTER, "InP-based VCSELs in the 1.4 to 2 μ m wavelength range for optical communication and absorption spectroscopy", in *The 16th Annual Meeting of the IEEE*, vol. 2, p. 505-6, Lasers and Electro-Optics Society, 2003.
- [9] R. L. THORNTON, "Vertical cavity lasers for printing", in *Digest of the IEEE/LEOS Summer Topical Meeting*, vol. Vertical-Cavity Lasers, Technologies for a Global Information Infrastructure, WDM Components Technology, Advanced Semiconductor Lasers, p. 71-2, 1997.
- [10] S. SHINADA, F. KOYAMA, K. SUZUKI, K. GOTO, and K. IGA, "Near-field analysis of micro-aperture surface emitting laser for high density optical data storage," *Optical Review*, vol. 6, no. 6, p. 486-8, 1999.
- [11] J. M. SASIAN and M. MANSURIPUR, "Design approaches with a lenslet array and a single, high-numerical-aperture annular-field objective lens for optical data storage systems that incorporate large numbers of parallel read-write-erase channels", *Applied Optics*, vol. 38, no. 7, pp. 1163-8, 1999.
- [12] C. BRINGER, *Technologie et caractérisation des VCSELs à diaphragme d'oxyde. Application à la détection en cavité verticale*. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, 2005.
- [13] T. KNOLD, H. K. H. CHOY, J. L. PAN, R. KING, R. JAGER, G. LULLO, J. F. AHADIAN, R. J. RAM, C. G. FONSTAD et K. J. EBELING, "RCE photodetectors based on VCSEL structures", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 11, pp. 1289-91, 1999.
- [14] G. G. ORTIZ, C. P. HAINS, J. CHENG, H. Q. HOU et J. C. ZOLPER, "Monolithic integration of In_{0.2}Ga_{0.8}As vertical-cavity surface-emitting lasers with resonance-enhanced quantum well photodetectors", *Electronics Letters*, vol. 32, no.13, p. 1205-7, 1996.
- [15] O. SJOLUND, D. A. LOUDERBACK, E. R. HEGBLOM, J. KO et L. A. COLDREN, "Monolithic integration of substrate input/output resonant photodetectors and vertical-cavity lasers", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 35, no. 7, p. 1015-23, 1999.

-
- [16] E. THRUSH, O. LEVI, W. HA, G. CAREY, L. J. COOK, J. DEICH, S. J. SMITH, W. E. MOERNER et H. J. S. JR., "Integrated semiconductor vertical-cavity surface-emitting lasers and PIN photodetectors for biomedical fluorescence sensing", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 40, no. 5, p. 491-8, 2004.
- [17] J. A. LOTT, "Design of vertical cavity lasers with intracavity photodetectors", *Electronics Letters*, vol. 33, no. 11, p. 955-7, 1997.
- [18] S. F. LIM, G. S. LI, W. YUEN et C. J. CHANG-HASNAIN, "Intracavity resonant quantum-well photodetection of a vertical-cavity surface-emitting laser", *Electronics Letters*, vol. 33, no. 7, p.597-8, 1997.
- [19] J. F. CARLIN, R. P. STANLEY, P. PELLANDINI, U. OESTERLE et M. ILEGEMS, "The dual wavelength bi-vertical cavity surface-emitting laser", *Applied Physics Letters*, vol. 75, no. 7, p. 908-10, 1999.
- [20] S. F. LIM, J. A. HUDINGS, L. P. CHEN, G. S. LI, W. YUEN, K. Y. LAU et C. J. CHANG-HASNAIN, "Modulation of a vertical-cavity surface-emitting laser using an intracavity quantum-well absorber", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 10, no. 3, p. 319-21, 1998.
- [21] G. HASNAIN, K. TAI, Y. H. WANG, J. D. WYNN, K. D. CHOQUETTE, B. E. BEIR, N. K. DUTTA et A. Y. CHO, "Monolithic integration of photodetector with vertical cavity surface emitting laser", *Electronics Letters*, vol. 27, no. 18, p. 1630-2, 1991.
- [22] G. STEINLE, H. D. WOLF, M. POPP et K.-J. EBELING, "Vertical-cavity surface-emitting laser monolithically integrated with intracavity-monitor diode with temperature-insensitive responsivity", *Electronics Letters*, vol. 37, no. 1, p. 34-6, 2001.
- [23] L. CHUSSEAU, G. ALMUNEAU, L. A. COLDREN, A. HUNTINGTON et D. GAQUET, "Coupled-cavity vertical-emitting semiconductor laser for continuous-wave terahertz emission", *IEE Proceedings Optoelectronics*, vol. 149, no. 3, p. 88-92, 2002.
- [24] C.BRINGER, V.BARDINAL, E.DARAN, T.CAMPS, Y.BOUCHER, G.ALMUNEAU, O.GAUTHIER-LAFAYE, P.DUBREUIL, J.B.DOUCET et C.FONTAINE, "Detection of lateral spontaneous emission for VCSEL monitoring", *Proceeding of SPIE*, Vol. 5453, Micro-Optics, VCSELs, and Photonic Interconnects, p. 209-16, 2004.
- [25] J. H. SHIN, H. E. SHIN et Y. H. LEE, "Effect of carrier diffusion in oxidized vertical-cavity surface-emitting lasers determined from lateral spontaneous emission", *Applied Physics Letters*, vol. 70, no. 20, p 2652-4, 1997.
- [26] A. HSU et S. L. CHUANG, "Measurement of spontaneous emission spectrum in vertical-cavity surface-emitting lasers", in *Summaries of Papers Presented at the*, vol. 1, p. 469, Lasers and Electro-Optics, 2002
- [27] J. -H. SHIN et Y. H. LEE, "Determination of nonradiative recombination coefficients of vertical-cavity surface-emitting lasers from lateral spontaneous emission", *Applied Physics Letters*, vol. 67, no. 3, p. 314-6, 1995.
- [28] K. D. CHOQUETTE, N. TABATABAIE et R. E. LEIBENGUTH, "Detector-enclosed vertical-cavity surface emitting lasers", *Electronic Letters*, vol. 29, no. 5, p. 466-7, 1993.

Chapitre 2

Détection latérale

Ce chapitre est dédié à l'étude de l'émission spontanée émise latéralement dans les VCSELS et au design d'un composant intégrant un émetteur et un détecteur. Le terme "détection latérale" regroupe les méthodes que nous avons employées pour recueillir cette émission et la caractériser. Le but est de trouver un moyen simple et efficace de détection du signal pour permettre de contrôler la puissance optique émise par le VCSEL.

Dans une première partie, nous présentons les mesures réalisées sur la composante de l'émission latérale d'un VCSEL standard après propagation du signal dans l'air. Ensuite, nous exposons l'apport du guidage optique latéral entre VCSELS adjacents en préservant la cavité lors de la gravure du mesa.

Après avoir mis en évidence les avantages et inconvénients d'une telle détection, le paragraphe suivant décrira les différentes améliorations à apporter au composant final, afin de recueillir uniquement le signal utile.

Enfin, nous concluons sur la compatibilité du composant VCSEL émetteur-détecteur avec les technologies de fabrication standard. Nous montrerons comment nous avons adapté notre processus de fabrication pour l'insérer dans un procédé de fabrication classique.

1 Détection latérale par la cavité

Dans le chapitre 1, nous avons vu qu'une valeur de l'émission spontanée pouvait être associée à une valeur de l'émission stimulée. La mesure de l'émission spontanée d'un VCSEL permettra de connaître indirectement sa puissance émise. Ceci permettra de faire un contrôle de la puissance de sortie sans utiliser d'éléments réfléchissant extérieurs et évitera l'hybridation d'une photodiode Silicium habituellement employé à cet effet.

Comme nous l'avons vu dans le chapitre 1, une première expérience [1] a démontré la possibilité de détecter l'émission spontanée émise latéralement. Cependant le niveau de signal détecté est trop faible. De précédents travaux [2] ont proposé de conserver la cavité afin de

l'utiliser comme guide d'onde (figure II.1). Ainsi, l'atténuation du signal liée à l'interface mesa/air est supprimée.

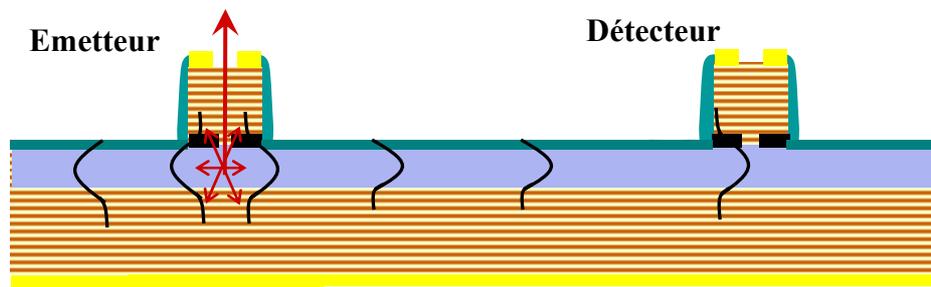
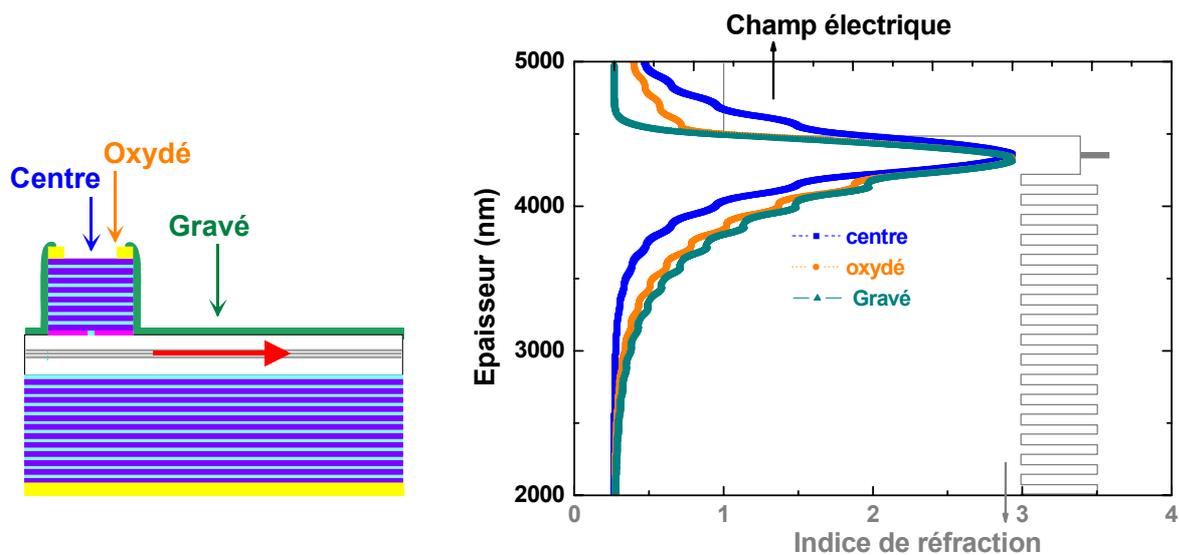


Figure II.1 : Principe du guidage par la cavité

Les profils du mode fondamental ont été calculés afin de savoir si les modes émis spontanément sont guidés. Ces calculs ne se rapportent pas aux modes d'émission transverses des VCSELs [3] mais au modes guidés se propageant dans le plan horizontal.

Ces calculs ont donné les résultats suivants (figure II.2) :



(a) Définition des différentes zones de calcul

(b) Profils de modes dans les trois zones

Figure II.2 : Modélisation du guidage optique

Les indices effectifs obtenus (3,297; 3,270; 3,266) sont très proches, ce qui laisse augurer d'un bon recouvrement des modes entre les différentes régions. Pour chaque section, seul le mode fondamental TE₀ se propage dans le guide et les profils correspondant sont tracés sur la figure II.2(b). L'émission des puits est donc guidée dans le plan de la cavité. De plus, ce calcul donne un couplage à 86% entre le centre du VCSEL et la zone gravée (1D) [2].

Enfin, la valeur de l'épaisseur du matériau restant après gravure au-dessus de la cavité

détermine les propriétés du guidage. Il a été calculé que s'il reste moins de 80 nm au-dessus des puits, alors la lumière ne sera plus guidée (figure II.3). De plus, on obtient un confinement optique de l'onde de 5,5% dans les seuls puits quantiques de la zone gravée, valeur à comparer avec les 60% de recouvrement dans la cavité entière. L'absorption du guide entre deux composants semble négligeable car le facteur de recouvrement est très faible entre les puits et le mode guidé. Les pertes par absorption ont été supposées faibles sur les distances considérées.

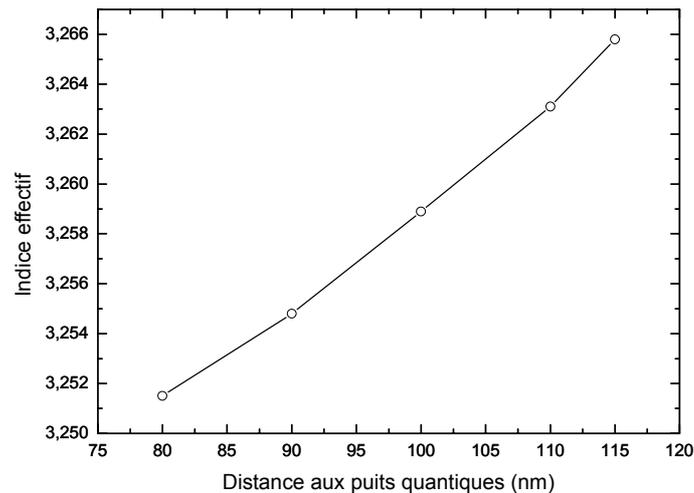


Figure II.3 : Influence de l'épaisseur de la cavité sur l'indice effectif du mode guidé

Ces calculs simples ont montré qu'une partie de l'émission spontanée des puits, émise latéralement, est guidée horizontalement le long de la cavité. Le paragraphe suivant retrace les études qui ont été menées pour recueillir ce signal guidé à l'aide d'une fibre optique.

La propagation de l'émission émise par les puits et guidée dans le plan de la cavité a été mesurée [2]. Il s'agissait de recueillir et d'analyser la lumière qui se propage horizontalement dans l'échantillon puis atteint la face clivée. L'émission par la tranche était captée par une fibre optique monomode lentillée (dénudé, diamètre 20 μ m) et transmise à un analyseur de spectre (figure II.4).

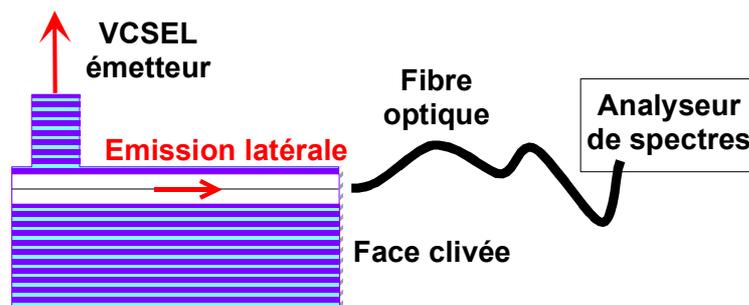


Figure II.4 : Schéma de principe de la mesure spectrale

Les spectres mesurés, tracés sur la figure II.5, sont très larges quelle que soit la valeur du courant. Il n'y a pas de pic étroit à la longueur d'onde de résonance du laser comme dans le cas des VCSELs gravés [4]. La lumière captée sur le côté provient donc uniquement de la zone active, il n'y a apparemment pas de composante liée à une diffusion du faisceau laser sur le diaphragme d'oxyde. Les modulations présentes sur certaines courbes s'expliquent par un effet de cavité horizontale lié au diaphragme d'oxyde ou à la délimitation latérale du mesa.

Enfin, lorsque le niveau d'injection est accru, il a été observé qu'il n'y a pas d'étalement du spectre du côté bleu alors que le pic s'étend de plus en plus loin vers le rouge.

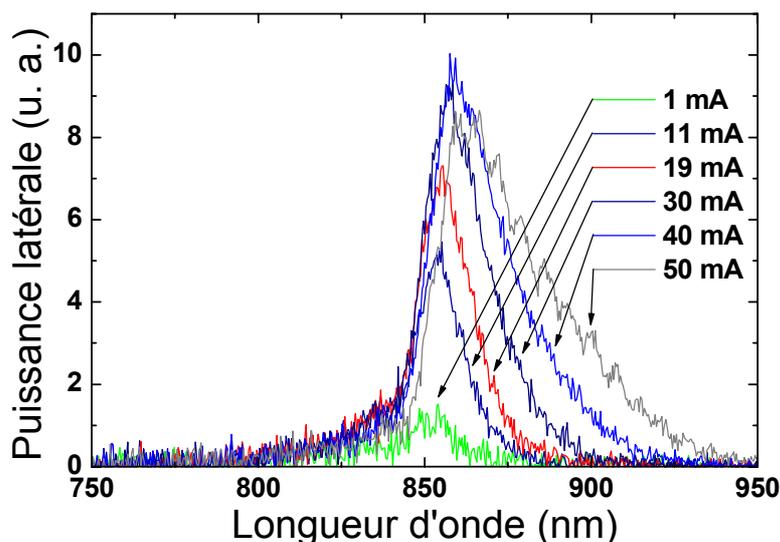


Figure II.5 : Spectres mesurés sur la face clivée sous injection croissante

La coupure du spectre vers les courtes longueurs d'ondes (840nm) vient des puits quantiques non pompés qui absorbent le signal [5] lorsque celui-ci se propage latéralement à travers la zone active (qui fait quelques centaines de micromètres après clivage). L'étalement du spectre vers les grandes longueurs d'onde est dû à un phénomène d'émission spontanée amplifiée. En effet, nous savons que les lignes de courant s'étaient sous l'oxyde. Une partie des porteurs est donc perdue et ne participe pas à la production de l'émission stimulée puisque l'effet laser n'intervient pas sous l'oxyde. L'émission spontanée qui en découle est donc amplifiée dans cette zone. De plus, le gain est décalé vers le rouge en raison des effets thermiques. Certains photons émis au centre du VCSEL peuvent être réabsorbés puis réémis avec une énergie plus faible par ces zones périphériques pompées. Ce qui provoque un étalement du spectre vers des longueurs d'onde plus grandes.

Le signal optique qui est guidé par la zone active n'est donc pas complètement absorbé par celle-ci. Un détecteur avait alors été intégré à l'émetteur lors de précédents travaux [2] afin

de mesurer l'émission spontanée du VCSEL. La cavité située entre le détecteur et l'émetteur était conservée afin de guider optiquement l'émission spontanée du VCSEL. Le paragraphe suivant présente les premières mesures de détection électrique réalisées à l'aide d'un VCSEL voisin mais en conservant la zone active entre le VCSEL émetteur et détecteur.

2 Composant émetteur détecteur dual

2.1 Courant parasite / photocourant

Lors des premières mesures effectuées de VCSEL à VCSEL en conservant la zone active [2], il a été observé que le courant détecté par le VCSEL détecteur était composé d'un photocourant (généré par l'émission spontanée du VCSEL émetteur) et d'un courant parasite. Le schéma électrique présenté figure 6 explique l'origine du courant parasite.

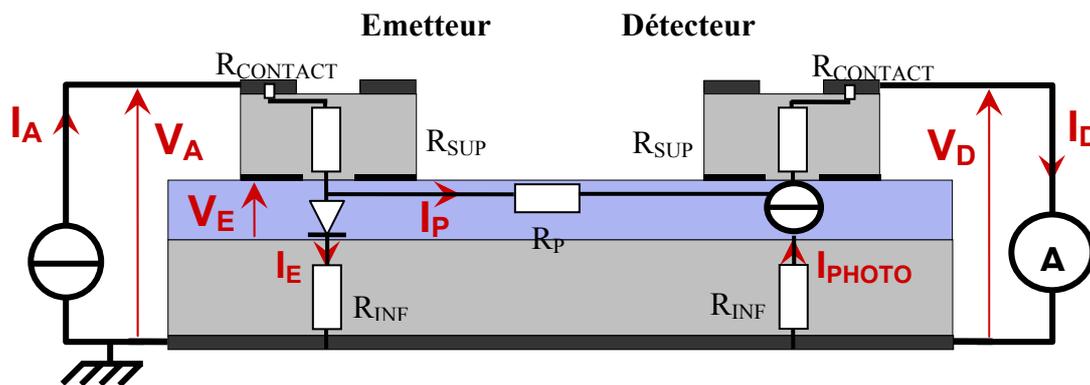


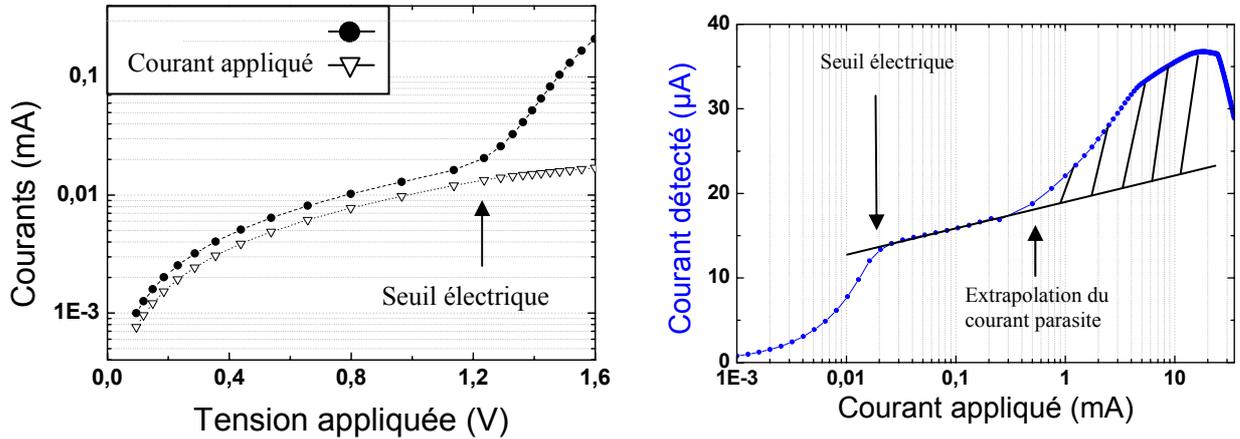
Figure II.6 : Schéma électrique simplifié. L'émetteur est à gauche, le détecteur à droite.

La figure 6 décrit succinctement le schéma électrique du système émetteur-détecteur. V_A , V_D et V_E sont les tensions présentes respectivement aux bornes de l'émetteur, du détecteur et de la cavité de l'émetteur. Le courant appliqué (I_A) se rapporte à l'émetteur, le courant (I_D) est collecté aux bornes du détecteur. Ces deux courants ne sont pas indépendants l'un de l'autre. En effet, comme on peut le voir sur le schéma, la zone active non-gravée ne permet pas d'isoler électriquement les deux composants de façon efficace, bien que cette couche ne soit pas intentionnellement dopée. Un courant parasite (I_P) circulant entre les deux mesas relie donc les deux courants. Cette fuite a été vérifiée en imposant la circulation d'un courant entre les anodes des VCSELs : la caractéristique $I(V)$ correspondante est linéaire et présente une résistance (R_P) d'une centaine de $k\Omega$. Finalement, on peut écrire les relations suivantes pour chaque composant (émetteur et détecteur) :

$$I_A = I_E + I_P \quad (1)$$

$$I_D = I_{PHOTO} + I_P \quad (2)$$

où I_E est le courant traversant réellement la diode VCSEL et I_{PHOTO} le photocourant généré par la propagation de l'émission spontanée. Les évolutions de ces deux courants en fonction de la tension aux bornes de l'émetteur (V_A) sont représentées sur la figure 7(a).



(a) Comparaison de $I_A(V_A)$ et de $I_D(V_A)$

(b) $I_D(I_A)$ en échelle semi-logarithmique et extrapolation du courant parasite I_P

Figure II.7 : Analyse du courant détecté.

Le fait que les courbes de courants appliquée et détectée soient quasiment confondues montre que la plus grande part du courant appliqué est dérivé vers le détecteur avant que la diode ne devienne passante ($I_A = I_P = I_D$). Par conséquent, dans cette zone où I_E est négligeable, aucune lumière n'est émise puisque les puits ne sont pas pompés. De plus, en traçant I_D en fonction I_A (figure II.7(b)), on voit apparaître deux régimes :

- pour $I_A < 20\mu A$, la diode ne conduit pas encore et le courant appliqué est dérivé entièrement par le détecteur soit $I_A = I_P$. La tension supportée par la zone active est alors sensiblement égale à celle appliquée à l'émetteur ($V_E \approx V_A$). On obtient alors la relation suivante :

$$I_D \approx I_P = \frac{V_E}{R_P} \quad (3)$$

- pour $I_A > 20\mu A$, la diode devient passante. Elle est alors rapidement régie par la relation [6] :

$$I_E = I_{Sat} \exp \frac{eV_E}{kT} \quad (4)$$

ce qui revient à :

$$V_E = \frac{kT}{e} \ln \frac{I_E}{I_{Sat}} \quad (5)$$

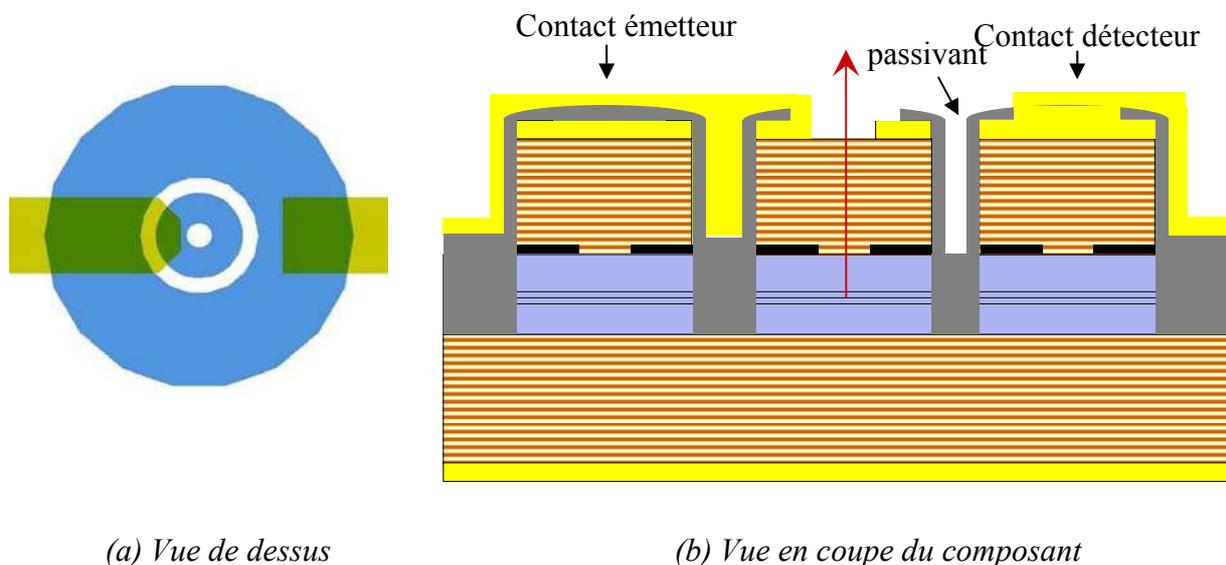
La tension aux bornes de la zone active évolue comme le logarithme du courant appliqué. Le courant parasite peut donc être extrapolé à partir de sa valeur au seuil électrique de la diode.

L'extrapolation de I_P correspond à la droite qui est aussi représentée sur la figure II.7(b). On obtient le photocourant réel en soustrayant à la courbe expérimentale, la composante parasite (zone hachurée sur la figure).

Si l'on conserve la zone active, le courant détecté est composé d'un photocourant et d'un courant parasite. Si l'on grave la zone active, nous avons vu qu'il n'y a pas de courant parasite mais que le photocourant est très faible. Les paragraphes suivants traitent des solutions envisageables pour chacune des deux propositions.

2.2 Distance VCSEL détecteur

Dans le cas d'une zone active gravée, la première solution consiste à utiliser un détecteur annulaire [2]. Cette solution permet de collecter le maximum d'émission spontanée. L'idée est donc d'ajouter une électrode annulaire de façon à capter le signal émis par les puits sur 360° (figure II.8).

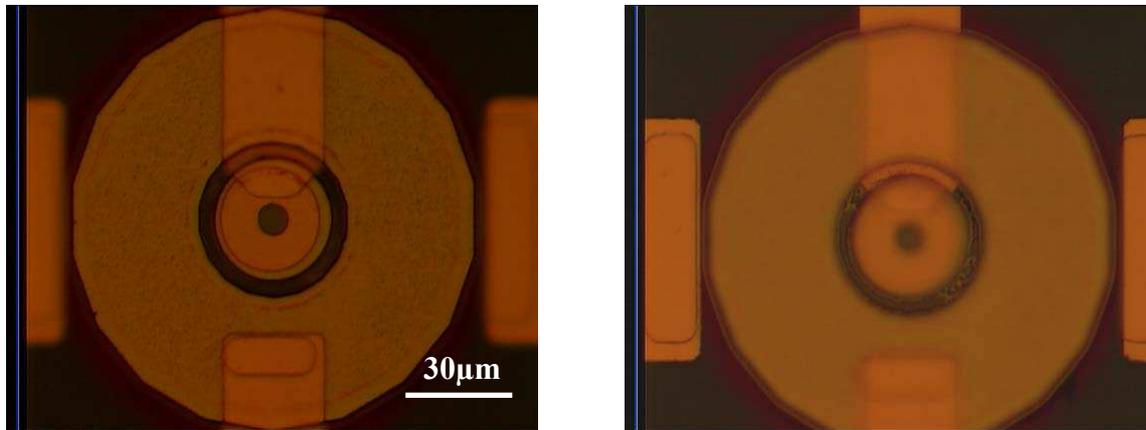


(a) Vue de dessus

(b) Vue en coupe du composant

Figure II.8 : Détecteur de type VCSEL.

D'un point de vue technologique, les composants qui ont été réalisés [2] sont présentés sur la figure II.9. La figure II.9(a) est une vue dessus en faisant la mise au point au microscope sur le haut du mesa du VCSEL. La figure II.9(b) est une vue de dessus en faisant la mise au point sur le fond de gravure entre le VCSEL et le détecteur.



(a) Mise au point sur le haut du mesa.

(b) Mise au point sur le fond de gravure.

Figure II.9 : Vue de dessus du composant.

Lorsque la mise au point est faite sur le fond de la gravure entre le VCSEL et l'émetteur, on constate que la tranchée a été mal gravée. En effet on peut voir que le point focal n'est pas le même entre le fond de gravure et le contour du détecteur. Ceci s'explique par le fait qu'une gravure plasma est plus lente dans les zones confinées. Si la profondeur de gravure n'est pas la même, cela signifie que le miroir supérieur est partiellement gravé et qu'un courant parasite pourra circuler entre l'émetteur et le détecteur.

Ne pouvant y remédier, par la suite de nos travaux, nous avons renoncé à réaliser ce type de dispositif.

Néanmoins nous calculons le niveau de signal transmis en fonction de l'écart situé entre l'émetteur et le détecteur. Nous espérons ainsi prouver qu'un haut niveau de signal est transmis à faible distance. Dans un second temps nous pourrons aussi voir quelle est la distance la plus faible possible à laquelle le phénomène de diffraction à l'interface semi-conducteur/air ne dégrade la propagation de l'onde.

Ces calculs sont réalisés en simulant la propagation des ondes électromagnétique par simulation FDTD (Finite Differences Time domain) (sous Microsoft Visual C++ pour le calcul, et transform3 pour visualiser les résultats).

Dans un premier temps nous simulons la propagation d'une onde à 850nm dans un guide gravé de 300nm de largeur (qui correspond à la largeur de la cavité (formée par les miroirs de Bragg) des VCSELs utilisés pour cette étude). La largeur de la gravure varie de 0 à 3.5µm.

La figure II.10 illustre le guide séparé par une tranchée de 1µm.

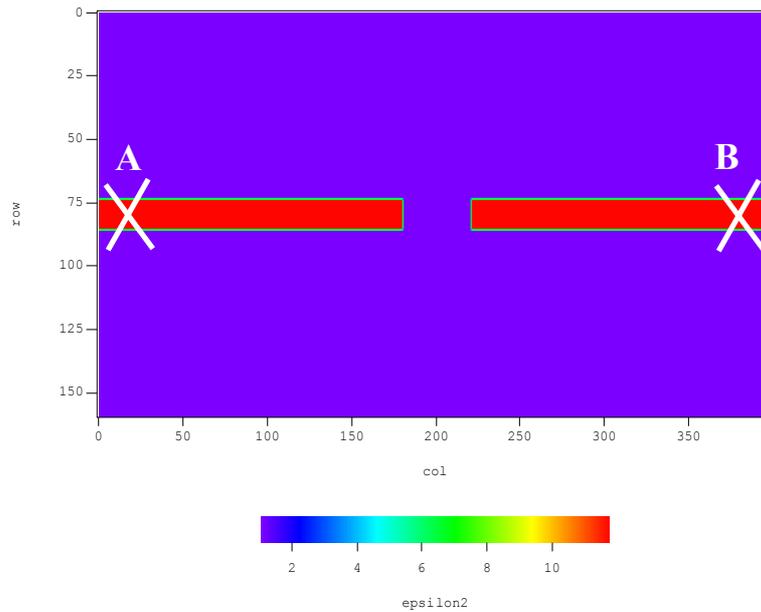


Figure II.10 : Guide séparé par une tranchée de $1\mu\text{m}$.

On considère que l'émetteur se situe au point A et le détecteur au point B. Le guide rouge (les 2 rectangles du milieu) représente la cavité entre les 2 VCSELs. On place une source isotrope au point qui simulera l'émission spontanée du VCSEL et nous observons l'intensité du spectre transmis au détecteur (point B).

Nous recommençons l'expérience en faisant varier la tranchée de la cavité de 0 à $3,5\mu\text{m}$. Les amplitudes calculées sont reportées sur la figure II.11.

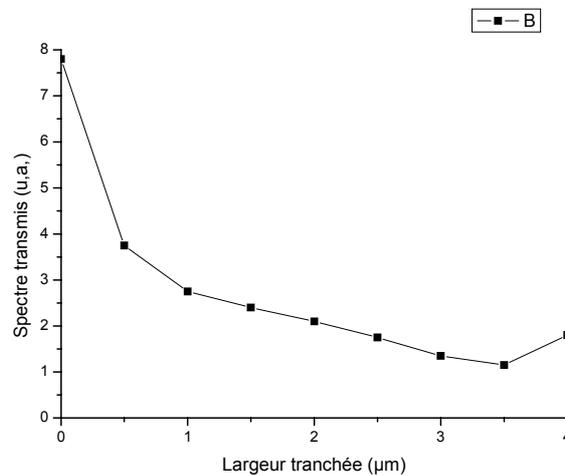


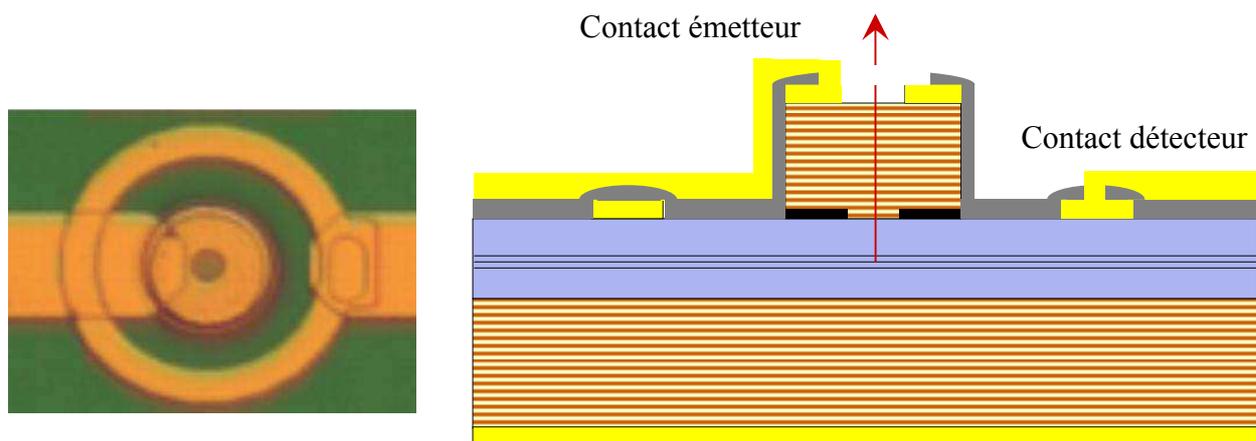
Figure II.11 : Amplitude du spectre transmis en fonction de la largeur de la tranchée.

Sur cette courbe, on constate que l'on perd la moitié du signal lorsque l'on se trouve à $0,5\mu\text{m}$ de distance. Or nous avons vu dans le paragraphe précédent qu'il y avait des problèmes de gravure pour ouvrir des tranchées de $5\mu\text{m}$. Nous n'allons pas chercher une distance optimale dans les gammes $5-10\mu\text{m}$ de tranchée car le signal est déjà réduit d'un facteur 10 pour une distance de $3\mu\text{m}$.

Malgré le fait qu'il n'y ait pas de courant parasite entre l'émetteur et le détecteur, l'idée de graver la cavité est abandonnée car cette solution n'a pu être optimisée et nécessiterait pour un contrôle submicronique une approche technologique lourde à développer et à mettre en oeuvre. Nous allons maintenant voir comment la deuxième solution, en conservant le guide, peut être optimisée. Le but sera de limiter le courant parasite et d'accroître le rapport signal utile / signal parasite.

2.3 Détecteur à contact Schottky.

Lors des travaux précédents cette thèse [2], il a été proposé un nouveau design de détecteur dans lequel le miroir de Bragg supérieur a été supprimé (figure 12). Dans celui-ci, l'électrode collectant le photocourant était déposée sur la cavité. Le métal employé étant le Ti/Au, le contact établi sur la cavité non-dopée est donc de type Schottky. Ce contact crée une barrière de potentiel importante s'opposant à la conduction parasite. Par conséquent, ce système diminue une partie du courant parasite, voire le rend négligeable dans le signal recueilli. Le détecteur est alors dit de type diode Schottky.



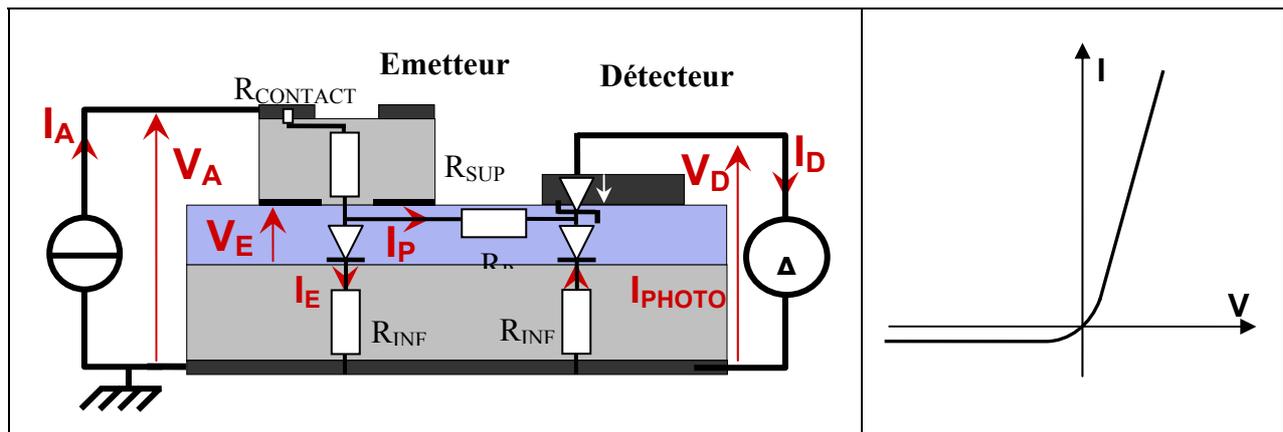
(a) Photo d'un composant

(b) Vue en coupe du système

Figure II.12 : Détecteur de type Schottky.

Le schéma électrique du composant et du contact Schottky est résumé sur la figure II.13(a) [7]. Les grandeurs mises en jeu sont les mêmes que dans le cas du détecteur de type VCSEL. V_{Schottky} est la tension qui est créée à l'interface du métal déposée sur la cavité par la diffusion des porteurs. La caractéristique électrique typique d'une diode Schottky est aussi reportée sur la figure II.13(b). Sur le schéma électrique apparaît la variation de I_P :

$$I_P = \frac{V_E - V_{\text{Schottky}}}{R_P} \quad (6)$$



(a) Schéma électrique du système de détection type diode Schottky

(b) $I(V)$ d'une diode Schottky**Figure II.13 :** Contact de type diode Schottky

Le courant parasite est fonction de la différence des tensions entre la cavité VCSEL et le contact Schottky. Comme dans le cas du détecteur VCSEL, le courant détecté I_D représente la somme du courant parasite et du photocourant. Les évolutions de V_E et de $V_{Schottky}$ en fonction du courant appliqué seront présentées dans le chapitre 4. L'accroissement de $V_{Schottky}$ est piloté par celui de I_D . De plus, la tension effective aux bornes de la cavité V_E va augmenter très légèrement. La différence $V_E - V_{Schottky}$ reste assez stable quand le courant d'injection augmente. En faisant l'hypothèse que le courant parasite est pratiquement constant, on voit que tout accroissement de l'injection va renforcer la part du photocourant au détriment du courant parasite dans le courant détecté. L'évolution du photocourant est alors simplement calquée sur celle de I_D , avec un décalage positif en courant appliqué au seuil.

Le tableau II.1 présente les premiers résultats qui avaient été obtenus à l'aide de ce détecteur. Le niveau de photocourant / courant parasite avait été étudié en fonction de la distance entre l'émetteur et le détecteur. Les mesures ont été réalisées pour des distances de 4, 8, et $12\mu\text{m}$.

Distance VCSEL-détecteur	$4\mu\text{m}$	$8\mu\text{m}$	$12\mu\text{m}$
V_A seuil électrique (V)	1,55	1,56	1,46
Signal brut max (μA)	1200	435	190
I_P seuil électrique (μA)	496	210	87
Signal utile max (μA)	704	225	103
Rapport utile/max	0,58	0,51	0,54

Tableau II.1 : Influence de la distance VCSEL-détecteur sur le courant détecté

A l'aide du détecteur Schottky, un rapport signal utile / signal de 0.58 a été atteint. Le

contact Schottky remplit pleinement son rôle, d'ailleurs une distance de $8\mu\text{m}$ avait été choisie car le niveau de signal mesuré est largement suffisant pour une application de monitoring.

En outre, nous verrons dans le chapitre 4 que ce contact permet d'avoir un signal détecté stable lors d'une montée en température.

Le signal détecté étant largement suffisant, il n'est plus nécessaire d'utiliser un contact annulaire. De plus, l'utilisation d'un détecteur "non annulaire" limitera les effets de capacités parasites lors d'une utilisation hyperfréquence du système.

De plus, le rapport photocourant / courant parasite peut encore être amélioré. Cette étude est présentée dans le paragraphe suivant.

2.4 Isolation émetteur/détecteur par implantation ionique

Par expérience, même si la couche active est non intentionnellement dopée, nous savons qu'un dopage résiduel est toujours présent. Ce dernier, est fortement sensible à la méthode de croissance épitaxiale (MBE ou MOCVD). Nous allons augmenter la résistivité de la partie de la cavité située entre l'émetteur et le détecteur afin d'optimiser le signal détecté en limitant la conduction parasite.

Deux solutions s'offrent à nous :

La première consiste à implanter des protons dans la partie de la cavité située entre l'émetteur et le détecteur. Malheureusement l'effet d'amorphisation de l'implantation de protons est annulé lors d'étapes thermiques supérieures à 300°C [8].

La deuxième consiste à implanter du Bore sur toute la profondeur de la cavité (250nm) (figure II.14).

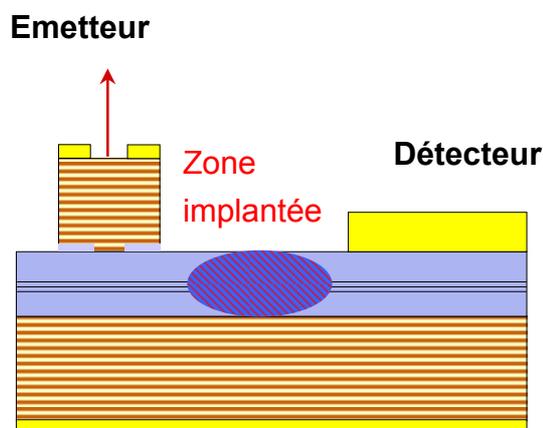


Figure II.14 : Schéma représentatif de la zone à implanté

2.4.a Incidence sur le guidage optique

Si l'implantation de Bore permet d'augmenter la résistivité d'une couche de GaAs, elle peut aussi dégrader le guidage optique [9]. En effet quand on bombarde un matériau à grand gap ($E_G > 1\text{eV}$), la couche bombardée voit sa résistivité croître, sa concentration en porteur décroître ainsi que sa constante diélectrique. Supposons que la concentration moyenne de la couche implantée soit N_1 et la concentration du matériau adjacent non implanté N_S , cette différence de concentration donne une variation de permittivité :

$$\Delta\varepsilon = \frac{(N_S - N_1)e^2}{m^* \omega^2} \quad (7)$$

où m^* est la masse effective de l'électron, ω est la fréquence optique et e la charge électronique.

La modification de l'indice de réfraction du GaAs par implantation ionique a d'ailleurs été étudiée dans des travaux précédents [10] [11]. Une fois dégradée, la cavité peut retrouver son indice de réfraction ainsi que sa résistivité initial (figure II.15) à l'aide d'un recuit thermique [9] [11]. Il faut tout de même ne pas monter trop haut en température, sous peine d'annuler les effets de l'implantation.

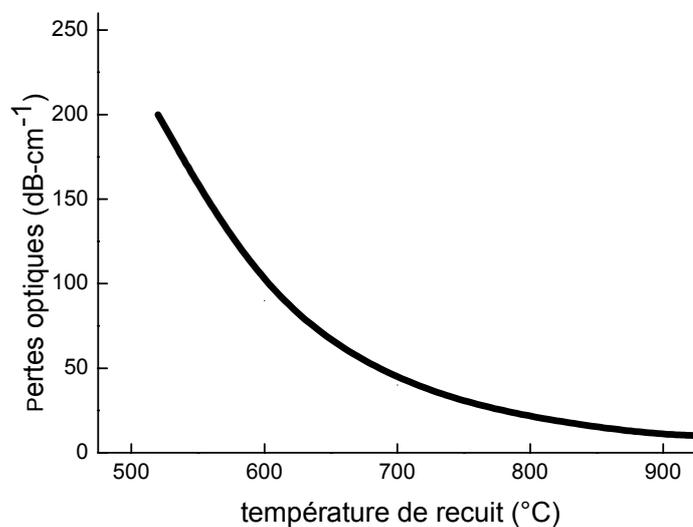


Figure II.15 : pertes optiques du GaAs implanté Bore en fonction de la température de recuit [9]

2.4.b Evaluation de la résistivité électrique

Avant d'implanter, il nous faut déterminer l'énergie (profondeur de pénétration des ions) et la dose (concentrations des ions).

Le calcul de l'énergie sera détaillé dans le chapitre 3, mais il est à noter qu'une triple implantation est nécessaire pour bien garantir cette étape d'implantation.

La dose d'implantation doit être calculée en tenant compte que le matériau implanté se comporte de la manière suivante (figure II.16) :

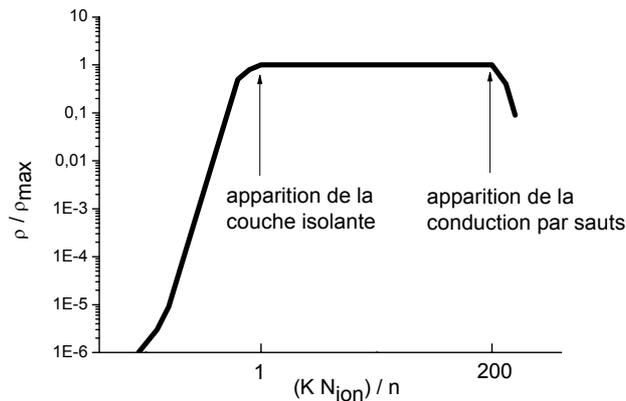


Figure II.16 : variation de la résistivité en fonction de $K.N_{ion}/n$ [9]

Lorsque le GaAs est implanté, sa résistivité augmente avec la dose d'implantation. Cependant, si la dose est trop grande, sa résistivité chute. Il faut donc veiller à ne pas implanter une trop forte dose.

Selon FAVENNEC [9], la résistivité maximale est atteinte pour une concentration en impuretés ionique située entre 1 et 200cm^{-3} :

$$1 \leq \frac{K.N_{ion}}{n} \leq 200 \quad \text{en ions/cm}^3 \quad (8)$$

où N_{ion} est la concentration en impuretés introduites par cm^3 , K l'efficacité de compensation ($K=140$ pour le Bore dans le GaAs) et enfin n la concentration en porteur du matériau non implanté.

La cavité de la couche épitaxiée qui sera utilisée pour le composant comportera un dopage résiduel $n = 10^{16} \text{cm}^{-3}$. D'après (9) on obtient donc :

$$7,14.10^{13} \leq N_{ion} \leq 1,4.10^{16} \quad (9)$$

En sachant que le produit du Niveau obtenu à l'aide du logiciel 'SRIM', par la Dose d'implantation (ions/cm^2) est égal à la Concentration en impuretés N_{ion} [12].

On obtient les conditions de dose suivantes :

Pour une implantation de Bore à 70keV :

$$1,4.10^9 \leq Dose \leq 2,8.10^{11} \quad (\text{ions/cm}^2) \quad (10)$$

Pour une implantation de Bore à 30kev :

$$0,89.10^9 \leq Dose \leq 1,75.10^{11} \text{ (ions/cm}^2\text{)} \quad (11)$$

Pour une implantation de BF₂ à 15keV :

$$0,24.10^9 \leq Dose \leq 4,67.10^{10} \text{ (ions/cm}^2\text{)} \quad (12)$$

Avec (10), (11) et (12), on choisi les doses suivantes :

- 1.10¹¹ ions/cm² de Bore à 70keV
- 7.10¹⁰ ions/cm² de Bore à 30keV
- 2.10¹⁰ ions/cm² de BF₂ à 15keV

Nous connaissons maintenant les doses et énergies de chaque implantation permettant d'obtenir la résistivité maximale sur la totalité de la largeur de la cavité.

2.4.c Optimisation de l'étape de recuit thermique

Nous avons vu précédemment qu'il fallait faire un recuit de la couche afin de préserver le guidage optique de la cavité en limitant l'absorption de la zone implantée.

Selon FAVENNEC [9], la température de recuit optimal est de 500°C pendant 1 minute. Mais il ne faut pas oublier que lors de la fabrication, l'échantillon subira un recuit à 420°C pendant 40 minutes lors de l'étape d'oxydation latérale (Alox).

Afin de vérifier que le recuit d'oxydation thermique n'annulera pas les effets de l'implantation, nous réalisons alors des tests de recuit sur les couches de GaAs implantées selon les paramètres calculés précédemment.

Trois échantillons test sont implantés et recuits sous différentes conditions :

- sans recuit ni implantation (référence)
- un implanté sans recuit
- un implanté puis recuit à 500°C pendant 1 minute puis recuit à 420°C pendant 40 minutes.

La caractéristique I-V est mesurée entre les deux pointes de test sur chaque échantillon. Les résultats sont reportés figure II.17 ci-dessous :

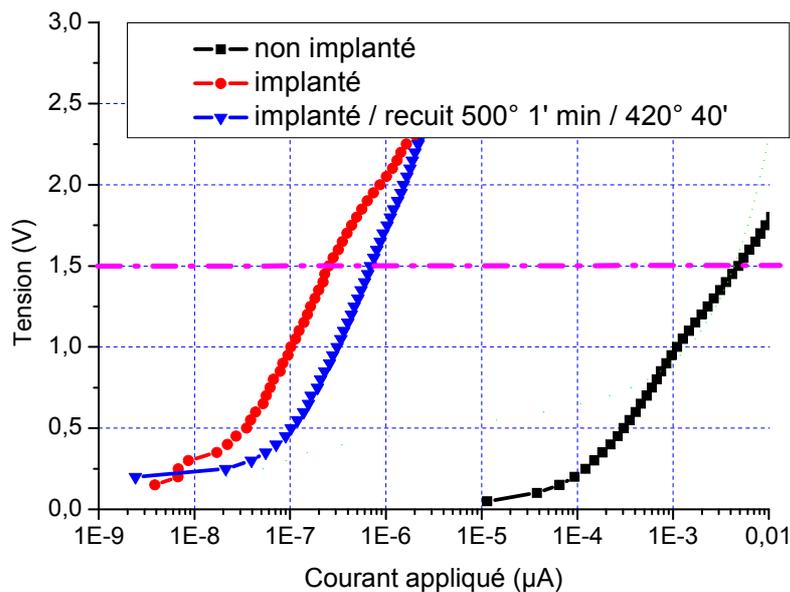


Figure II.17 : caractéristique I-V mesurée sur 4 échantillons test

Tout d'abord, on constate que les caractéristiques V(I) des échantillons implantés avec et sans recuit thermique sont très proches. Ceci permet de conclure que les recuits de "traitement thermique pour améliorer le guidage optique" et celui d'oxydation thermique à 420°C n'affectent pas la dégradation de la résistivité du matériau.

Ensuite, à la tension de fonctionnement d'un VCSEL classique (1,5V), on observe que le courant est diminué de 4 ordres de grandeur entre un échantillon non implanté et un échantillon implanté puis recuit. On peut donc considérer qu'avec un tel traitement local de la zone active, on réduira d'un facteur 10000 la valeur du courant de conduction parasite. Cette implantation sera donc retenue dans notre réalisation finale du détecteur latéral

Il reste néanmoins, à confirmer que le guidage optique ne sera pas trop dégradé par l'implantation. De plus, l'équipement à notre disposition lors de ces tests, ne permettait pas d'atteindre 600°C. Nous n'avons donc pas pu vérifier si nous pouvions monter plus haut en température sans dégrader l'effet de l'implantation. Nous verrons dans le chapitre 4 quel sera l'impact sur le courant détecté pour un échantillon implanté.

3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons montré que le concept de détection latérale a été validé puis modélisé. Le mode fondamental est guidé par la cavité et le signal lié à l'émission spontanée n'est pas absorbé et sa propagation se fait à travers le guide préservé.

Le design d'un premier composant émetteur/détecteur a été présenté. Nous avons mis en évidence que le courant de détection était composé d'un photocourant et d'un courant parasite lié au dopage résiduel de la cavité.

Nous avons proposé des solutions pour une détection en utilisant la cavité comme guide d'onde et pour une détection à travers une cavité gravé.

Nous avons vu que lorsque la cavité est gravée, le courant parasite est certes éliminé mais le signal optique est trop atténué pour être exploitable et cela qui nous a incité à abandonner cette approche.

Lorsque la cavité est utilisée comme guide d'onde, nous avons vu comment augmenter le signal détecté par une détection annulaire, comment le courant parasite pouvait être limité par l'ajout d'un contact Schottky permettant d'augmenter le rapport photocourant / courant parasite mais également en procédant à une implantation ionique sans trop dégrader la conduction électrique parasite dans la cavité.

Dans le chapitre suivant, nous présenterons les différentes briques technologiques de fabrication d'un VCSEL, en soulignant certains développements et optimisation du processus de fabrication de ces composants. Le dernier chapitre présentera les caractérisations électriques, optiques, hyperfréquences et l'étude en température qui été réalisé sur le détecteur et l'émetteur.

Bibliographie du Chapitre 2

-
- [1] K. D. CHOQUETTE, N. TABATABAIE et R. E. LEIBENGUTH, "Detector-enclosed vertical-cavity surface emitting lasers", *Electronic Letters*, vol. 29, no. 5, p. 466-7, 1993.
- [2] C. BRINGER, *Technologie et caractérisation des VCSELs à diaphragme d'oxyde. Application à la détection en cavité verticale*. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, 2005.
- [3] P. BIENSTMAN, R. BAETS, J. VUKUSIC, A. LARSSON, M. J. NOBLE, M. BRUNNER, K. GULDREN, P. DEBERNADI, L. FRATTA, G. P. BAVA, H. WENZEL, B. KLEIN, O. CONRADI, R. PREGLA, S. A. RIYOPOULOS, J. -F. P. SEURIN et S. L. CHUANG, "Comparison of optical VCSEL models on the simulation of oxide-confined devices", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 37, no. 12, p. 1618-31, 2001.
- [4] A. HSU et S. L. CHUANG, "Measurement of spontaneous emission spectrum in vertical-cavity surface-emitting lasers", in *Summaries of Papers Presented at the*, vol. 1, p. 469, Lasers and Electro-Optics, 2002.
- [5] V. BARDINAL, T. CAMPS, E. DARAN, C. AMAT, G. ALMUNEAU, C. BRINGER, M. SULEIMAN, C. FONTAINE, " Lateral waveguiding properties of VCSELs for integrated optical monitoring", *Optical and Quantum Electronics*, Vol.38, N°4-6, pp.523-534, Mars 2006.
- [6] H. MATHIEU, *Physique des semiconducteurs et des composants électroniques*. Enseignement de la PHYSIQUE, Paris, France : Masson, 1998.
- [7] T. CAMPS, C. BRINGER, V. BARDINAL, G. ALMUNEAU, C. CAMAT, E. DARAN, J. B. DOUCET, P. DUBREUIL et C. FONTAINE, "High sensitivity integrated lateral detection in VCSELs", *Electronics Letters*, vol. 41, no. 3, p. 129-31, 2005.
- [8] S AHMED, R GWILLIAM and B J SEALY, "Proton implantation for isolation of n-type GaAs layers at different substrate temperatures", *Semicondor Science Technolgy*, vol. 16, no. 5, p. L28-L31, (May 2001).
- [9] P. N. FAVENNEC, *L'implantation ionique*, Paris, France : Masson, 1993
- [10] E. GARMIRE, H. STOLL, A. YARIV et R. G. HUNSPERGER, "Optical waveguiding in proton implanted GaAs", *Applied Physics Letters*, vol. 21, p. 87-8, 1972.
- [11] K. T. CHAN, Y. W. HUI, D. J. Han, G. H. LI et C. J. HITZMAN, "Waveguide Materials by Oxygen Ion Implantation into GaAs", *Lasers and Electro-optics Society Annual Meeting*, IEEE conference proceeding, 1993.
- [12] SRIM - Lessons and Tutorials, <http://www.srim.org/SRIM/Tutorials/Tutorials.htm>

Chapitre 3

Réalisation technologique

Ce chapitre décrit le procédé de fabrication qui a été retenu afin de réaliser le composant final. Dans un premier temps, le procédé de fabrication complet sera décrit. Ensuite, les parties les plus critiques, comme la gravure du mesa, la passivation ou l'oxydation thermique, nécessitant une étude plus approfondie seront présentées.

1 Présentation du process retenu

1.1 Jeu de masque

Un jeu de masque spécifique a été conçu pour ce processus de fabrication de VCSEL à détecteur intégré. La cellule élémentaire de ce masque est représentée figure 1. Ce masque contient 3 types de composants, chacun ayant une variation de diamètre allant de 31 à 37 μm avec un pas de 2 μm de façon à couvrir une large gamme de diamètres de diaphragmes d'oxyde (figure III.1). Les composants de type 1 (figure III.2(a)) sont de simples VCSELs sans détecteur intégré. Ces composants présentent une métallisation compatible avec des tests sous pointes hyperfréquence coplanaires (masse-signal-masse) permettant des tests hyperfréquence. Les composants de type 2 (figure III.2(b)) sont des VCSELs avec détecteur intégré, présentant une métallisation masse-signal-détecteur ce qui revient à mettre le détecteur à la masse si ces composants sont testés sous pointes coplanaires. Enfin les composants de type 3 (figure III.2(c)) sont des VCSELs avec détecteur intégré qui présentent une métallisation masse-signal pour l'émetteur et le détecteur séparément (avec masse commune). Ces composants peuvent être testés en hyperfréquence à l'aide d'une paire de 2 pointes coplanaires (masse-signal) respectivement inversés. Entre chaque matrice de composants sont insérés des motifs de test de process et électriques : peigne de définition de lithographie, marches de mesure de hauteur de gravure ou d'épaisseur de métallisations, mires d'alignements, TLM, contact vertical, continuité des métallisations, etc...

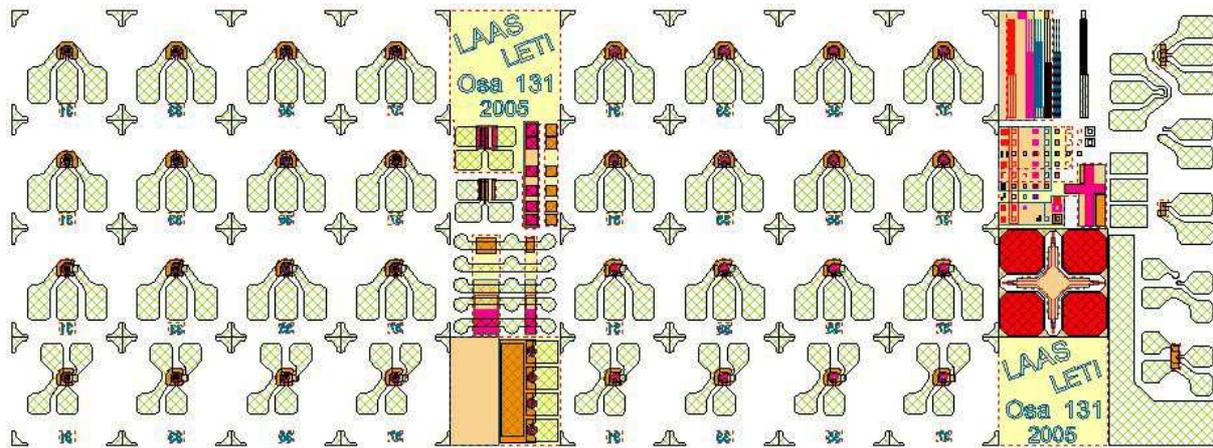
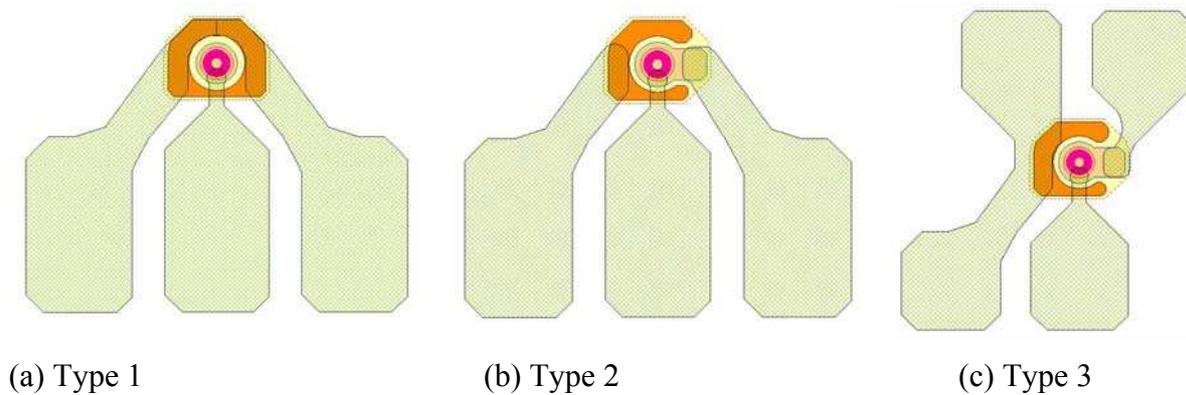


Figure III.1 : Cellule élémentaire du jeu de masque OSA131.



(a) Type 1

(b) Type 2

(c) Type 3

Figure III.2 : Types de composants présents sur le masque.

1.2 Description du procédé de fabrication

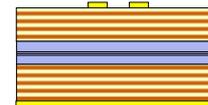
Alors que la structure optique est prédéfinie par l'épitaxie, le processus détermine l'injection électrique ainsi que les confinements électrique et optique. Il a été sans cesse amélioré depuis les précédentes fabrications de VCSELs [1], [2]. L'enchaînement des étapes est illustré sur la figure 3 : métallisation de la cathode face arrière, métallisation de l'anode, attaque du mesa, formation du guide latéral, formation du diaphragme d'oxyde, métallisation de la cathode face avant, implantation ionique, passivation et enfin métallisation finale permettant les contacts pour les caractérisations électriques.



(a) Wafer : Structure épitaxiale standard



(b) Métallisation Cathode (AuGe/Ni/Au)



(c) Métallisation anode (Ti/Au)

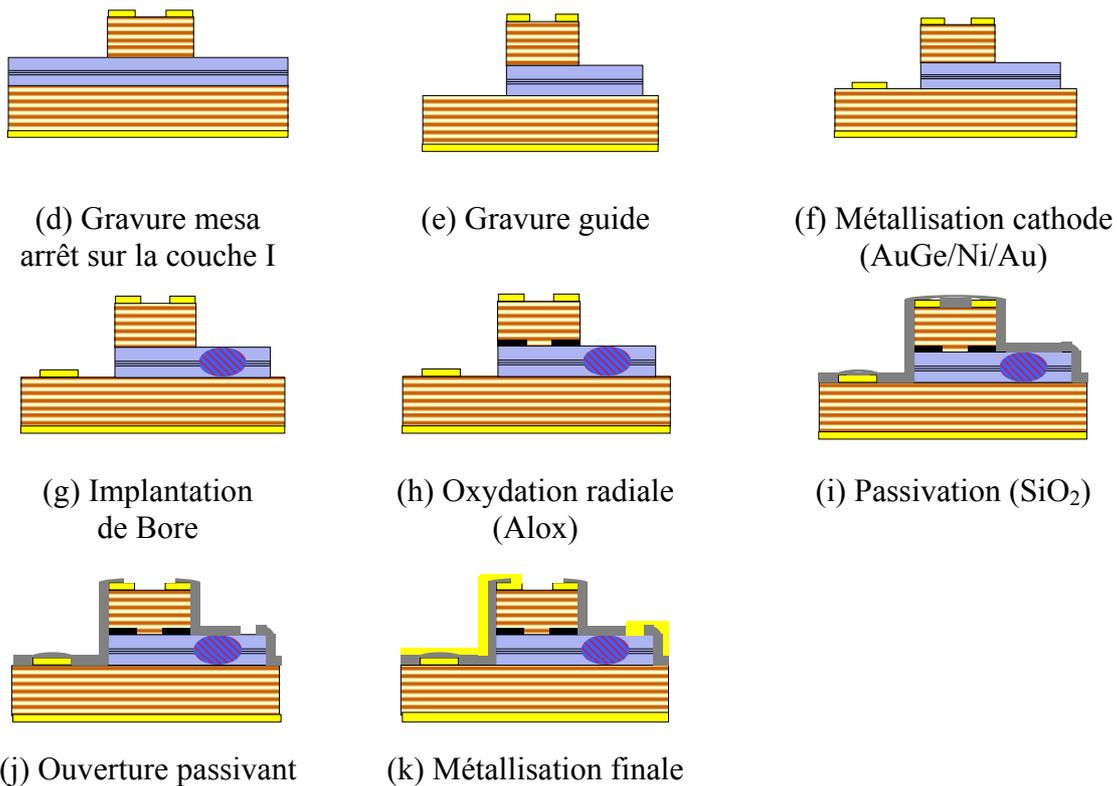


Figure III.3 : Description des étapes de fabrication du composant émetteur-détecteur dual.

Seule les étapes de métallisation n'ont pas fait l'objet d'étude spécifique durant cette thèse car cette "brique" technologique était déjà maîtrisée. En voici le principe :

Tout d'abord, il faut savoir qu'il n'existe pas de contact ohmique froid sur GaAs. Nous utilisons des contacts alliés ou non-alliés, selon le niveau de dopage du semiconducteur. Pour un contact non-allié, le semiconducteur est très fortement dopé (Type P $>10^{19} \text{ cm}^{-3}$), créant une barrière énergétique haute mais très étroite. Par conséquent, la conduction s'effectue par effet tunnel à travers cette dernière. Dans le cas d'un contact allié, le niveau de dopage de type N dans le GaAs est limité et donc est insuffisant (Type N $>10^{20} \text{ cm}^{-3}$) pour diminuer la largeur de barrière. La diffusion d'atome dopant présent dans la métallisation (AuGe) dans le semiconducteur compense et modifie le dopage en surface, limitant ainsi la largeur de la barrière de potentiel et rend possible cette conduction tunnel. La diffusion est activée par un recuit à 450°C pendant 1 minute sous ambiance neutre (N₂H₂ ou Ar).

Pour un dopage de type N des couches d'arséniure de gallium, les niveaux de dopage par Silicium n'excèdent pas $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Nous utilisons donc un contact allié AuGe/Ni/Au. Il est déposé face arrière avant toute étape technologique. Un autre dépôt a lieu sur la face avant, plus tard, lorsque le miroir inférieur est mis à nu.

Les couches d'arséniure de gallium de type P dopées Béryllium ou Carbone permettent d'atteindre des dopages plus élevés. Deux types de contact sont alors envisageables. Le

premier est un contact allié AuZn/Au suivi d'un recuit. Le deuxième (utilisé dans notre processus) est un contact non-allié Ti/Au. Le titane sert à la fois à empêcher la diffusion de l'or dans la couche sous-jacente et à améliorer l'accrochage du dépôt sur cette même couche. Le cas échéant, l'ajout de platine (Ti/Pt/Au) sert à améliorer la stabilité thermique du contact.

2 Structure épitaxiale

La couche épitaxiale utilisée pour le composant d'émission-détection intégrée est décrite figure III.4.

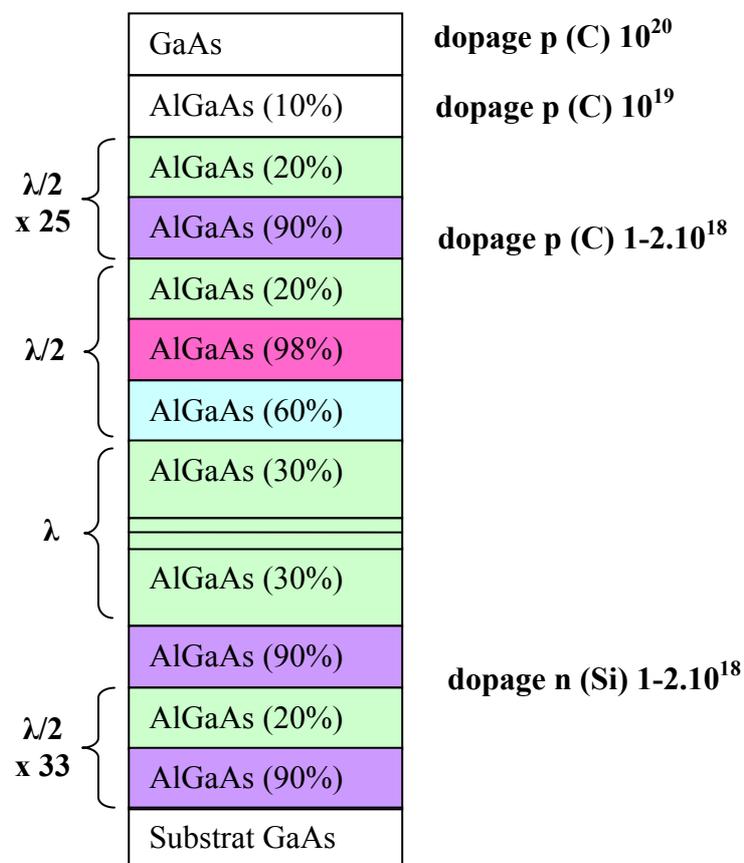


Figure III.4 : Description de la structure épitaxiale des composants émetteur-détecteur.

La couche a été réalisée par MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition) par la société Avalon Photonics. La cavité contient 3 puits quantiques émettant à 850nm tandis que les miroirs de Bragg sont composés d'alternance d'AlGaAs 20% et 90%.

La conduction par trous dans le miroir de type P est problématique car la discontinuité de la bande de valence est forte entre les alliages. Les nombreuses couches empilées représentent autant d'hétérojonctions difficiles à franchir pour les porteurs [3]. Chaque période se comporte comme deux diodes isotropes en série et tête-bêche, le sens AlGaAs 90% vers

AlGaAs 20% étant le plus favorable au passage du courant. La caractéristique électrique de la période est donc dissymétrique. Pour lisser ces pics dans la bande de valence, une solution consiste à remplacer les interfaces abruptes par des zones graduelles. Lors de l'épitaxie, le changement de matériau s'effectue, soit de façon continue quand on peut moduler rapidement les vitesses de croissance (comme ici), ou réaliser un alliage digital sous forme de super réseaux comme c'est le cas en MOCVD.

Le miroir de Bragg supérieur ne doit pas subir d'oxydation intrinsèque. Une solution consiste à réduire la vitesse d'oxydation des couches d'AlAs. Ces couches sont alors remplacées par des couches d'AlGaAs 90%. En effet les vitesses d'oxydation dépendent fortement de la concentration en aluminium [4]. La sélectivité entre 90 et 98% se traduit donc au cours de l'oxydation par des longueurs d'oxydation différentes (figure III.5).

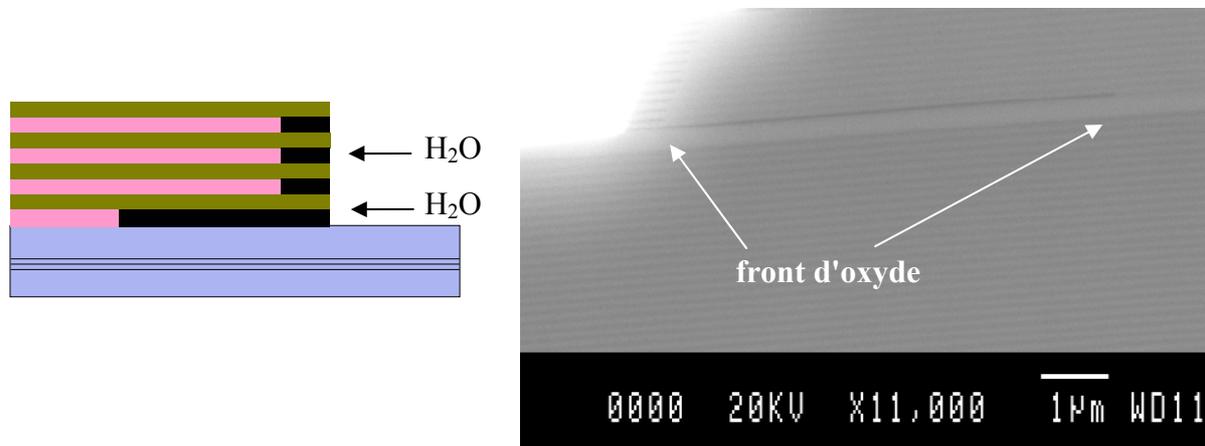


Figure III.5 : Blocage intrinsèque de l'oxydation thermique humide.

3 Gravure

Le mesa de 3-4 μm est réalisé par gravure sèche de type ICP-RIE (sur un bâti Omega 201 (Aviza Technology) (figure III.6). Il comprend 2 générateurs RF 600W ; l'un alimentant une bobine (single coil) pour créer un champs électromagnétique permettant la dissociation des molécules de gaz (RF source), l'autre étant relié au chuck (substrat), permettant de gérer la composante physique de la gravure (RF platen).

Le substrat est maintenu sur un chuck électrostatique, avec maintien en température assuré par un chiller (5°C – 60°C) et un flux d'hélium injecté sur la face arrière du wafer support 6".

Le pompage s'effectue via une pompe turbomoléculaire Boc Edwards H1000C (vide limite d'environ 1mTorr), permettant, pour un flux de gaz compris entre 10sccm et 90sccm, d'atteindre une pression en process entre 5mTorr et 30mTorr.

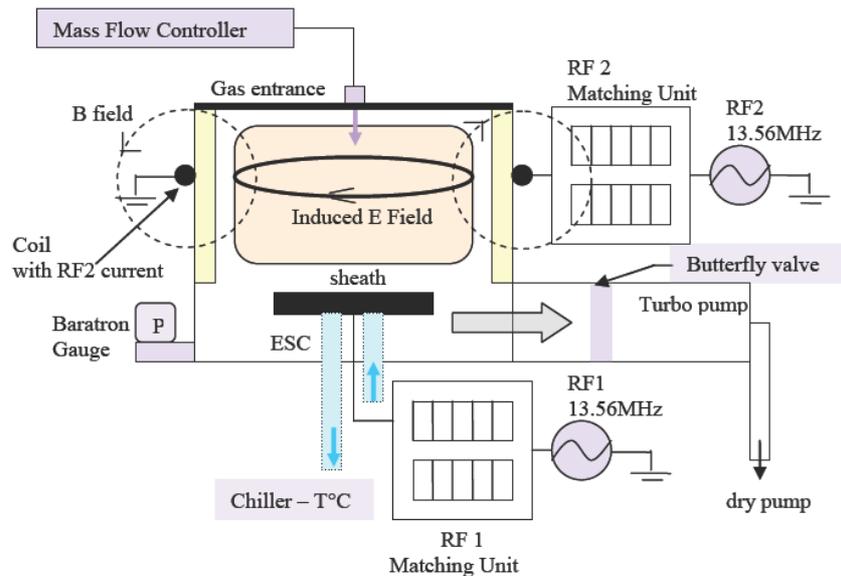


Figure III.6 : Schéma descriptif du bâti de gravure ICP-RIE.

La gravure du mesa se fait par gravure sèche. Cette gravure est réalisée par gravure ICP (Inductively Coupled Plasma) dans un bâti de gravure TRIKON.

Lors de la formation du mesa, différents paramètres de gravure nécessitent d'être optimisés. En effet pour la gravure d'un mesa de VCSEL, nous cherchons à obtenir des flancs à 80° et des fonds de gravure plats, ceci en un temps de gravure raisonnable (300nm/min). Après une étude poussée nous avons choisi d'utiliser un mélange de gaz chloré qui répond à nos attentes (figure III.7).

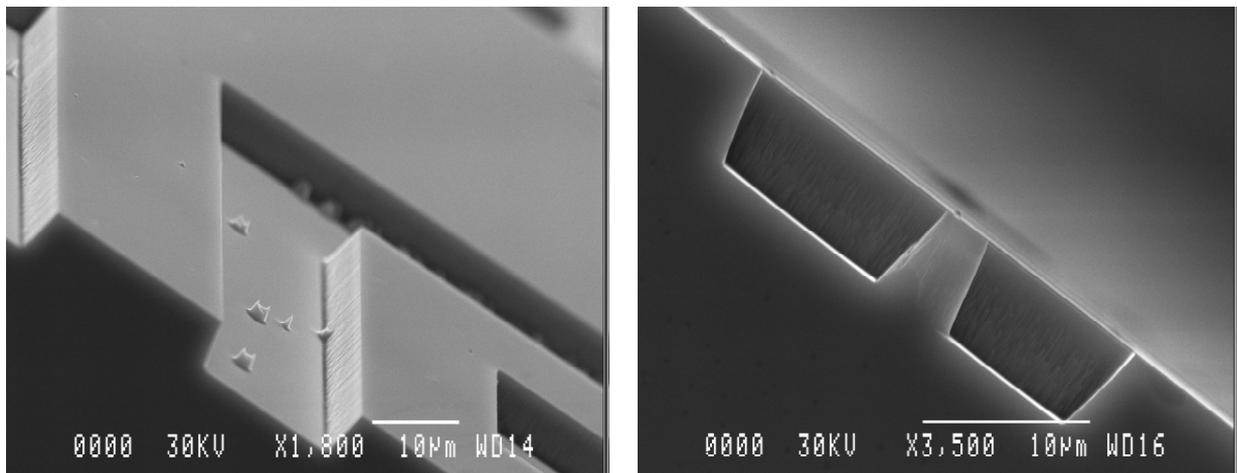


Figure III.7 : flancs de gravure d'un échantillon de GaAs gravé par ICP

Les paramètres de la gravure (composition et dilution des gaz, puissance) ont été optimisés en utilisant de la résine photosensible. Lors de test sur des métallisations (pour simuler un "run" de fabrication), nous avons constaté que les métallisations ne supportaient

pas la gravure ionique (sachant que la gravure d'un mesa dure 9 minutes). Nous avons donc décidé de tester différents types de métaux :

Masque Ti/Au :

Nous commençons par tester la métallisation standard Ti/Au 1000/5000Å. Voici la photo de la surface de l'échantillon après gravure :

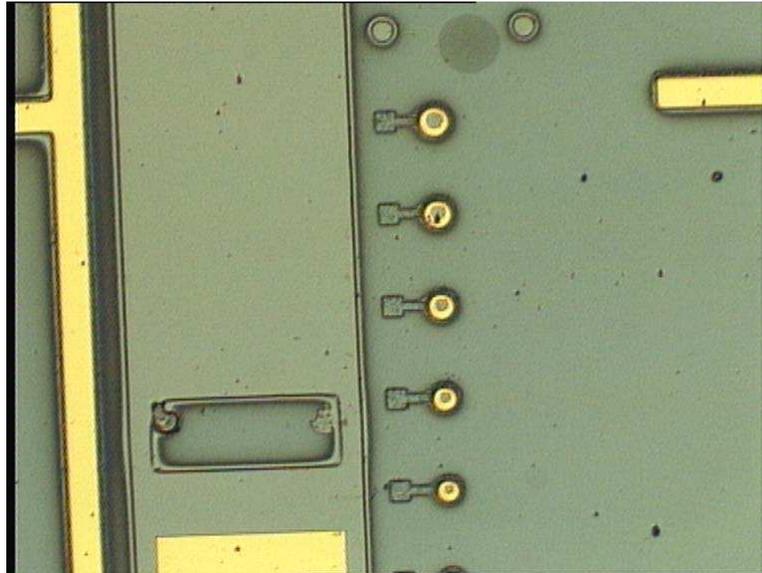


Figure III.8 : photo d'un masque Ti/Au/résine après gravure ICP.

Le masque de cet échantillon était en Ti/Au partiellement recouvert de résine AZ 4562. Les parties claires correspondent aux endroits où il reste de l'or. Ils correspondent aux endroits où il y avait de la résine.

Les zones délimitées en noir qui sont de la même couleur que le substrat correspondent à des zones métallisées et sans résine. Or, on peut noter qu'il n'y a plus de métal sur ces zones.

Là où il y avait la résine, le métal a tenu ; tandis que les parties métalliques non recouvertes de résine ont été attaquées. Cela signifie soit que le titane et l'or ont été gravés, soit que seul le titane est gravé et que l'or n'ayant plus de couches d'accroche ait été "lifté" (le lift est un procédé d'arrachage d'une couche en dissolvant la couche inférieure).

Masque Pt :

Nous vérifions si le platine résiste à la gravure afin de protéger nos métallisations. La gravure d'une métallisation Ti/Pt/Au permettrait de savoir si l'or est attaqué par la gravure.

Tout d'abord nous gravons un échantillon métallisé avec seulement du platine :

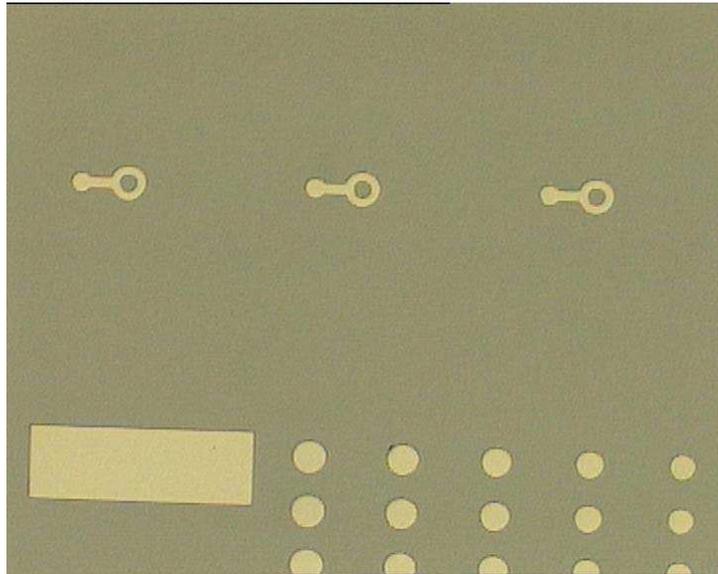


Figure III.9 : photo d'un masque Pt après gravure ICP.

Le platine résiste à la gravure. Ce type de masque peut être utilisé pour protéger le titane. Nous en saurons plus sur le comportement du contact Ti/Au en attaquant une métallisation Ti/Pt/Au.

Masque Ti/Pt/Au :

Nous utilisons un masque Ti/Pt/Au afin de savoir si le titane peut être protégé par le platine et si l'or résiste à la gravure ICP. Voici la photo de l'échantillon après gravure :

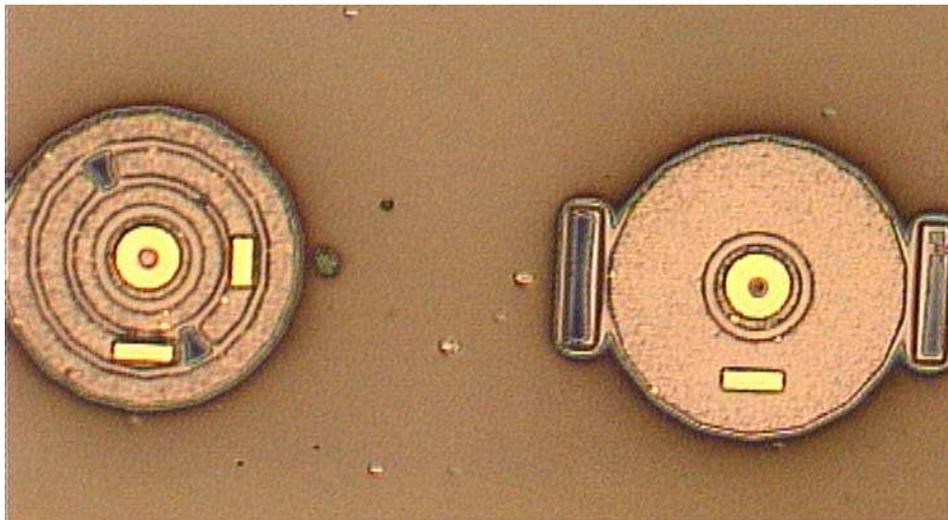


Figure III.10 : photo d'un masque de Ti/Pt/Au après gravure ICP.

Les zones claires correspondent à l'or qui était protégé par de la résine. Autour, on observe que le platine a protégé le titane, mais que l'or a été attaqué. Cela signifie que l'or ne peut résister à des temps de gravure trop longs (d'une dizaine de minutes).

Masque CrAu :

Nous choisissons alors un masque Cr/Au 500/4000A, le chrome sert de couche d'accroche et limite aussi la diffusion de l'or à travers les couches de nos échantillons. Ce test permettra de savoir si le Chrome peut supporter une gravure ICP. Voici la photo de la surface de notre échantillon après gravure :

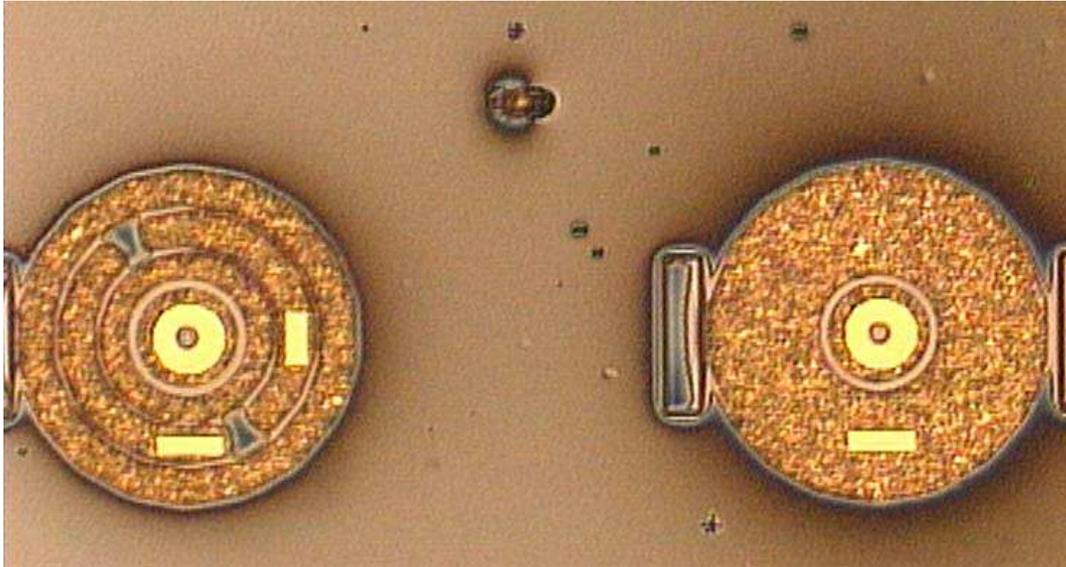


Figure III.11 : photo d'un masque Cr/Au après gravure ICP.

Les zones claires correspondent à l'or qui était protégé par de la résine. Les zones "texturées" (jaunes) correspondent à de l'or partiellement gravé. On observe que $0,2\mu\text{m}$ d'or ont été attaqués. Des photos MEB sont réalisées afin de mieux observer l'état de la métallisation. Voici les photos MEB (Microscopy Electron Beam / Microscopie électronique à balayage) de l'échantillon.

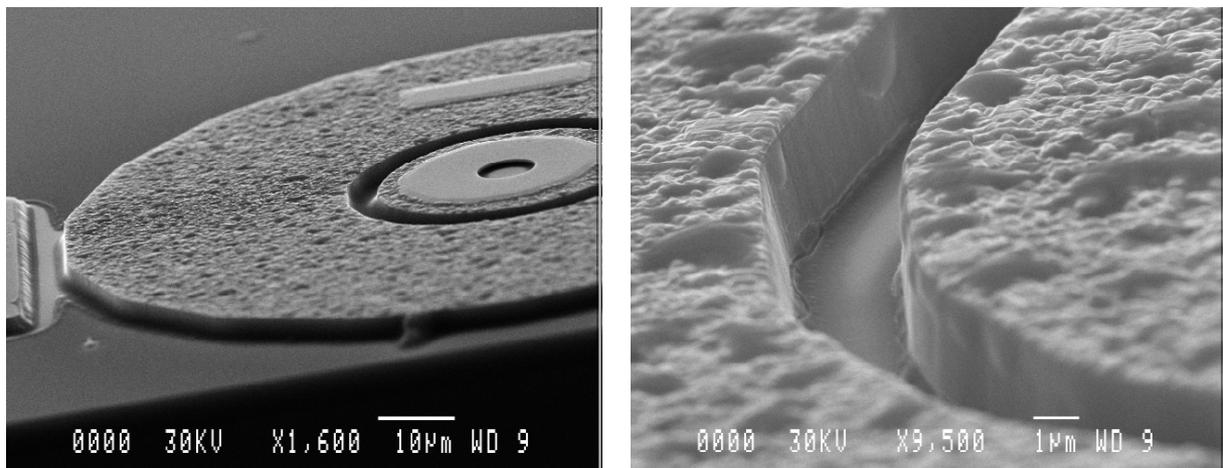


Figure III.12 : images MEB d'un mesa après gravure ICP protégé par un masque CrAu.

Sur les photos MEB, on voit bien que l'or a commencé à se décomposer. Puisque le chrome n'a pas été sous-gravé, il faut maintenant protéger l'or de l'attaque ICP. Une première solution consiste à rajouter une couche de métal sacrificielle.

Masque Cr/Au/Al :

Afin de protéger l'or, nous ajoutons 2000Å d'aluminium. Voici la photo de la surface après gravure :

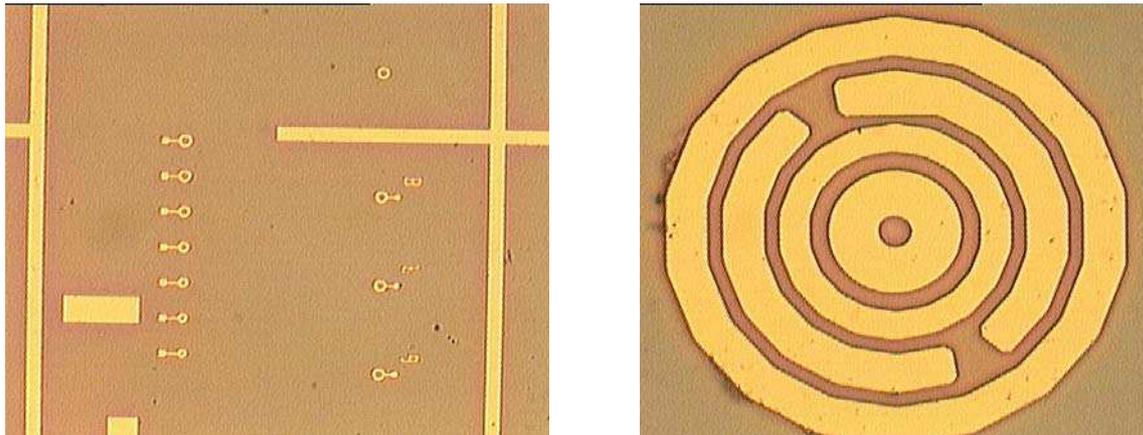


Figure III.13 : photo d'un masque Cr/Au/Al après gravure ICP.

A la vue de ces photos (les zones claires sont jaunes) nous supposons que l'aluminium s'est fait entièrement attaquer mais qu'il a suffi à protéger l'or. Sachant que la métallisation couvre 1% de la surface de nos échantillons eux même de 2cm² au maximum, et que les métallisations sont majoritairement recouvertes de résine, la part d'aluminium dispersée est négligeable. Voici les photos du même échantillon prises au MEB :

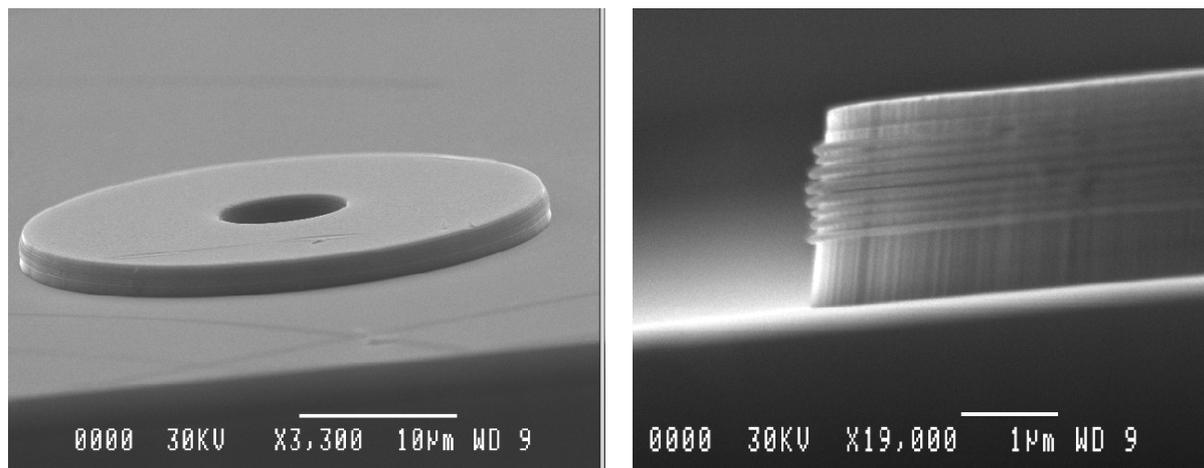


Figure III.14 : image MEB d'un MESA gravé par ICP-RIE

Le profil de gravure est satisfaisant : la surface est propre, il n'y a pas de micro masquage et la pente des flancs est satisfaisante pour une future métallisation allant jusqu'en haut des mesas. Cependant une telle épaisseur de métal rend le lift off beaucoup plus délicat.

La résine n'est pas non plus une solution de protection car celle-ci ne supporte pas des temps de gravure excédant quelques minutes (la gravure d'un mesa dure 9min).

Le contact Ti/Au étant électriquement le meilleur, nous décidons d'utiliser un masque de Fluorure de Strontium (SrF_2) afin de le protéger de la gravure ionique [5] [6].

En effet, le SrF_2 présente une grande résistance aux gravures par plasma et se dissout facilement dans une attaque faiblement acide ($\text{H}_2\text{O} : \text{HCl} ; 50 : 1$ en 10s). le SrF_2 est déposé par sputtering et est délimité par lift-off. La figure III.14 illustre une gravure masquée par du SrF_2 . On observe que les fronts de gravure sont propres et qu'il n'y a pas de micro masquage.

Collage du wafer :

Il est nécessaire de coller l'échantillon sur une wafer de GaAs de 2 pouces afin de s'affranchir des effets de bords qui engendrent une non uniformité de vitesse de gravure. En effet la surface est ainsi constante (c'est toujours la même quantité de matière qui est gravée) ce qui permet d'utiliser le même temps de gravure quelque soit la taille de l'échantillon.

Nous disposons de 2 types de colles afin de fixer nos échantillons :

- une graisse spéciale pour le vide fabriquée par Fomblin
- une cire en bâton (crystalbond 555) fabriquée par Wax

La graisse Fomblin est rapide d'utilisation, se dépose directement à l'arrière de l'échantillon à l'aide d'un coton tige et s'enlève en frottant à l'aide d'un papier imbibé d'éthanol ou de trichloréthylène. Le nettoyage d'une grande surface qui ne présente aucune aspérité se nettoie facilement. Par contre, si de cette graisse vient à se déposer sur une surface rugueuse (la face gravée par exemple), elle devient difficile à éliminer car elle se dépose dans les aspérités. Aucun solvant classique ne permet alors de nettoyer la surface contaminée.

La cire Wax est un peu plus contraignante d'utilisation, car il faut d'abord chauffer le wafer à 54°C afin de faire fondre la cire pour coller l'échantillon. Il faut aussi chauffer le wafer pour le décoller. Par contre, cette cire se dissout complètement dans de l'eau chaude à 60°C . En pratique, de l'éthanol suffit.

Lors d'un process technologique, nous préférons écarter la graisse Fomblin car des restes de graisse sur la face avant d'un échantillon perturbe les étapes technologiques suivantes. De plus, s'il reste de la graisse Fomblin avant l'étape d'oxydation thermique, celle-ci dégage des vapeurs de HF à 400°C .

Pendant la gravure plasma, le transfert thermique entre le wafer porteur et l'échantillon joue un rôle très important. Les deux colles que nous utilisons n'ont pas la même résistance thermique, ce qui se traduit par une uniformité de gravure différente.

Cette différence a été mesurée et reportée sur la figure III.15.

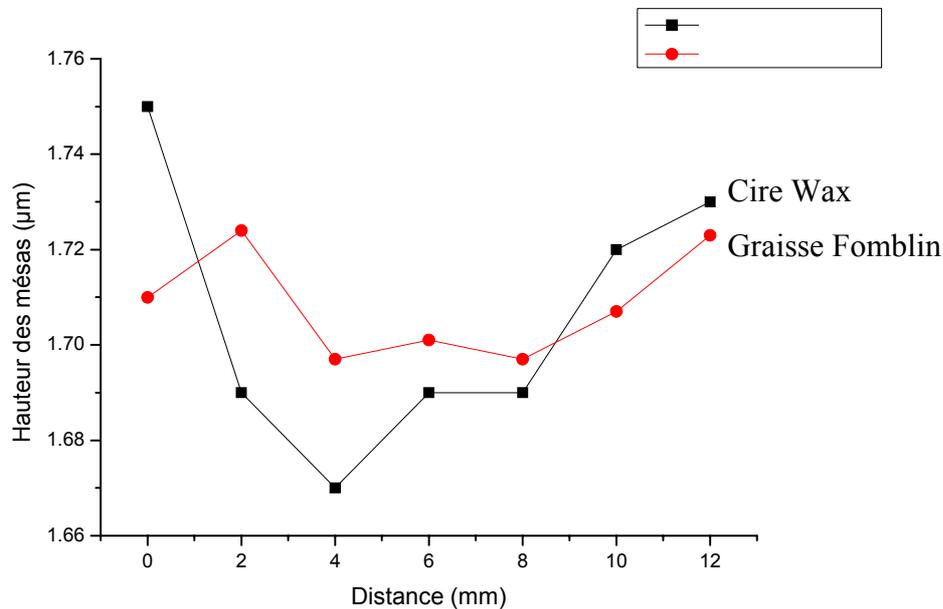


Figure III.15 : Comparaison de l'uniformité de gravure par ICP entre les collages Wax et Fomblin

Deux échantillons ont été gravés durant 5 minutes. L'un collé à la cire Wax, l'autre à la graisse Fomblin. Le centre des échantillons gravés est à la position "6mm". On constate que les profondeurs sont similaires entre collage Wax et Fomblin. Cependant l'écart entre centre et bord de plaque est légèrement plus marqué pour un collage Wax :

- Fomblin $\Delta h/h = \pm 1\%$
- Wax : $\Delta h/h = \pm 2.5\%$

En conclusion le choix du collage dépend de la nature du process. Pour un process nécessitant de nombreuses étapes technologiques, la cire Wax est moins risquée. Elle sera aussi utilisée lors de procédés nanotechnologiques ainsi que pour des étapes précédant une reprise d'épitaxie, ceci afin de préserver une surface propre.

La graisse Fomblin sera utilisée pour des étapes finales ou uniques, comme des tests de gravures ou pour des procédés technologiques à faible nombre d'étapes ; sachant que la métallisation de l'échantillon est à éviter après un collage Fomblin (en effet les résidus de graisse empêcheront l'accroche du métal).

4 Oxydation latérale

L'oxydation latérale permet de confiner l'injection électrique dans le VCSEL. Pour confiner l'injection, un diaphragme est créé en oxydant la couche d' $\text{Al}_{0,98}\text{GaAs}_{0,02}$, située entre le miroir de Bragg supérieur et la cavité.

Durant l'oxydation thermique, l'échantillon est positionné sur une nacelle mobile placée au centre d'un four tubulaire horizontal en quartz. Son diamètre intérieur est de 12cm et sa longueur de 100cm. Trois éléments chauffants, de type résistif, sont répartis à l'avant, au centre et à l'arrière du four.

Au commencement de cette thèse, un premier four (figure III.16) était utilisé. Cependant le débit injecté du gaz oxydant (mélange de vapeur d'eau et de N_2H_2) n'était pas précisément contrôlé. La vitesse d'oxydation pouvait alors varier d'un jour à l'autre, et nous étions obligé de faire un étalonnage sur une couche de test avant chaque oxydation.

Ce four a été conservé mais les dispositifs d'alimentation en gaz oxydant ont été modifiés et améliorés par Patrice COLLIERE lors d'un stage CNAM. Dans l'ancien système, il y avait, en amont, un flux d'azote hydrogéné, contrôlé par débitmètre massique, conduit dans un bulleur contenant de l'eau désionisée et chauffée à une température d'évaporation proche de 95°C . Au contact de l'eau, le gaz se mélange aux molécules d' H_2O en phase vapeur puis circule en direction de l'entrée du four pour être dilué par un flux d' N_2H_2 complémentaire. Le schéma du four est présenté sur la figure III.16.

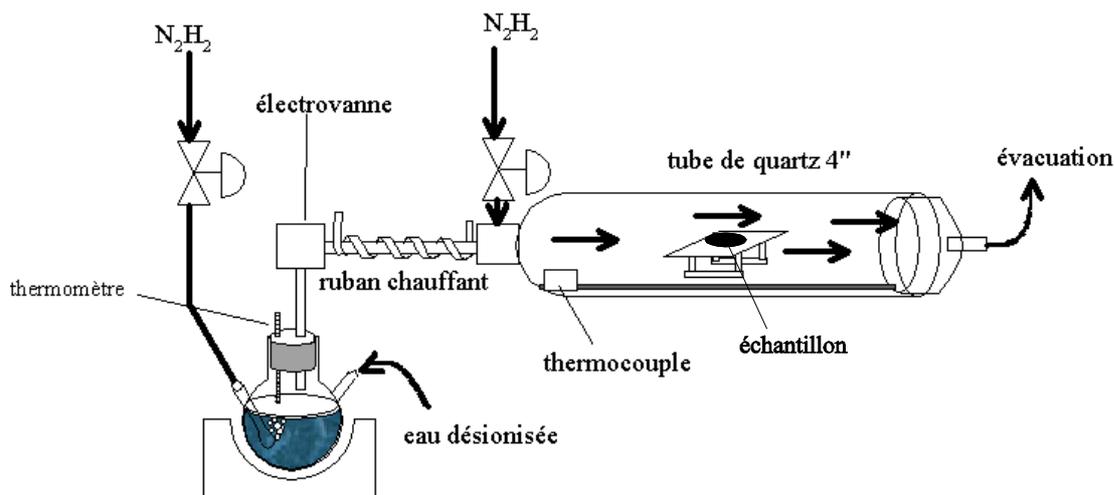


Figure III.16 : *Système d'oxydation de première génération.*

Comme ce système n'était pas assez stable dans le temps et nécessitait des étalonnages permanents, il a donc été remplacé par un système d'injection contrôlé par un PC. Le nouveau système est présenté sur la figure III.17.

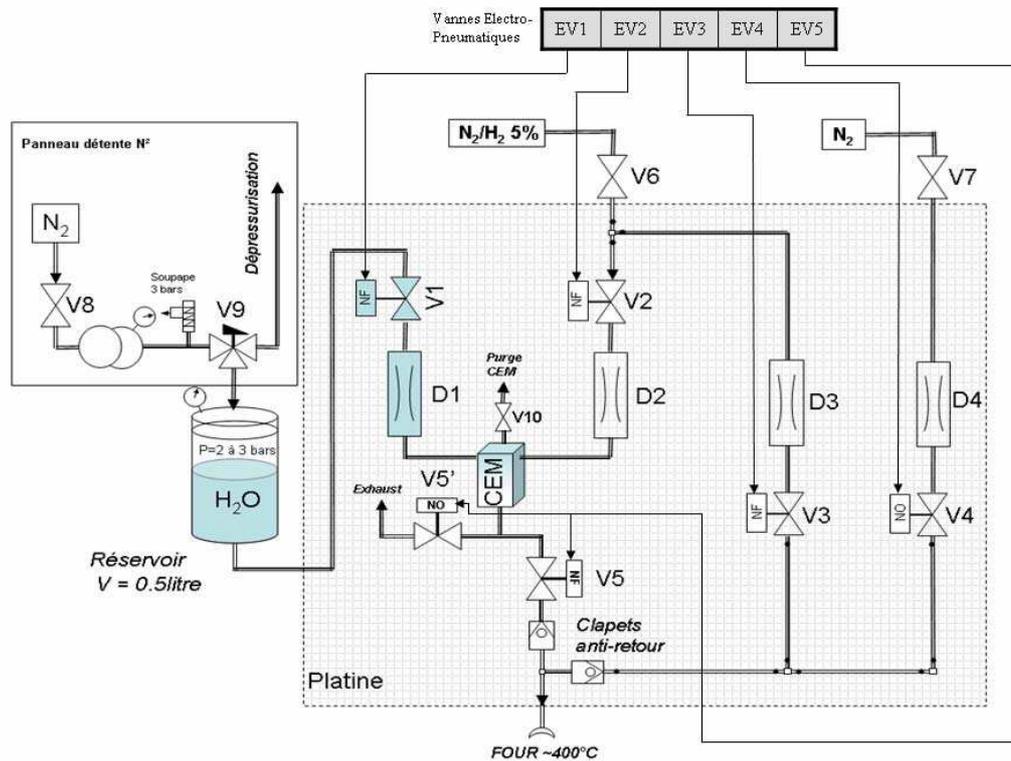


Figure III.17 : Nouveau système d'oxydation.

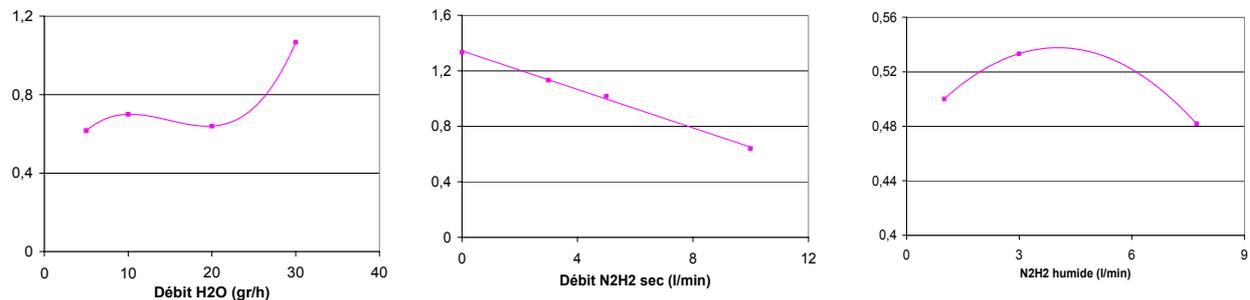
L'élément clé de ce nouveau système est le mélangeur CEM (Controlled Evaporation and Mixing) qui remplace le bulleur. Il s'agit d'un ensemble de trois éléments complémentaires permettant de fournir un flux stable et homogène tout au long de la phase d'oxydation [7]. Ainsi, des débitmètres contrôlent les flux liquides et gazeux injectés dans une cellule thermique CEM dont le double rôle est l'évaporation de l'eau et le mélange de la vapeur d'eau et du gaz source N_2H_2 .

Ainsi nous avons constaté que la vitesse d'oxydation est bien plus reproductible d'un jour à l'autre. Il n'est plus nécessaire d'étalonner la vitesse d'oxydation avant chaque process.

De plus, lors d'une oxydation, nous pouvons agir précisément sur de multiples paramètres, pour modifier les conditions d'oxydation :

- la durée d'oxydation
- la température du four
- la température du CEM
- le débit de N_2H_2 de dilution
- le débit de N_2H_2 dans le mélangeur CEM
- le débit de H_2O

Les températures du four et du CEM sont fixées à 420 et 95°C respectivement. L'influence de chaque gaz a été mesurée et reporté sur les figures III.18 a) b) et c).



(a) Influence du flux H_2O . (b) Influence du flux N_2H_2 sec. (c) Influence du flux N_2H_2 humide.

Figure III.18 : étude de la vitesse d'oxydation en $\mu\text{m}/\text{min}$ en fonction des paramètres du four

On constate que le débit du gaz de dilution (N_2H_2) diminue sensiblement la vitesse d'oxydation tandis que le débit de H_2O l'augmente. Le flux de N_2H_2 dans le CEM n'influence pas trop les vitesses d'oxydation, mais un certain flux doit être maintenu pour un fonctionnement normal du CEM.

Afin d'être le plus reproductible possible lors d'une oxydation, nous choisissons une valeur pour chaque paramètre telle qu'une variation sur celle-ci affecte le moins possible la vitesse d'oxydation. C'est ainsi que nous prendrons :

- 20g/h comme débit de H_2O
- 3 l/min comme débit de N_2H_2 dans le CEM
- 10l/min comme débit de N_2H_2 de dilution

Nous avons testé ces paramètres et la vitesse d'oxydation est constante d'un jour à l'autre. La vitesse de l'oxydation est de $0,67\mu\text{m}/\text{min}$, pour une couche de GaAlAs à 98% d'Aluminium d'épaisseur 25nm. Nos dispositifs faisant en moyenne une trentaine de micromètres, une étape d'oxydation thermique standard dure moins de 50min.

5 Passivation

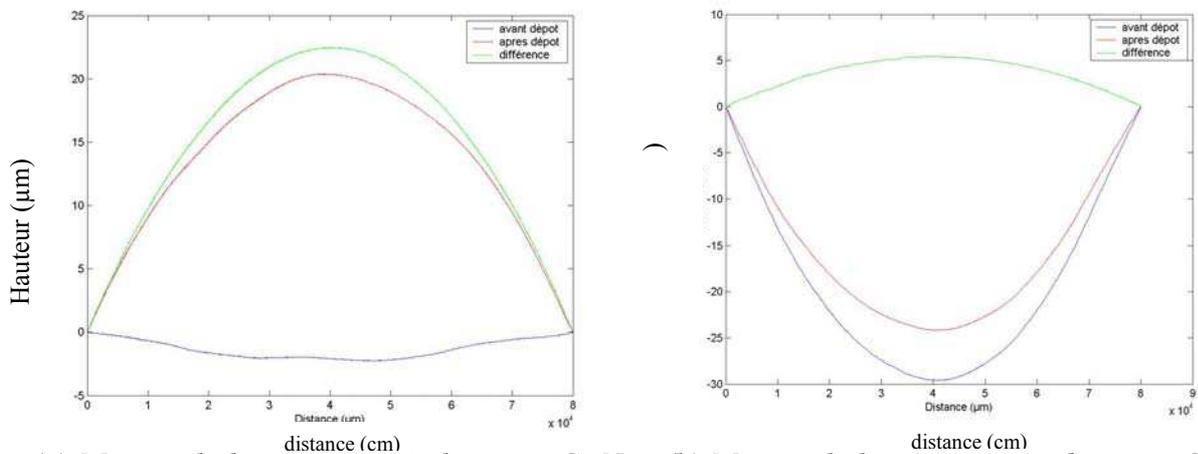
Lors de la passivation des dispositifs, il faut veiller à deux points importants. Le premier est la contrainte du passivant. Si celle-ci est trop élevée, le passivant peut se craqueler et se détacher, entraînant des conceptions parasites et un décrochage du métal se situe au dessus. Le deuxième point concerne l'enchaînement des étapes passivation-ouverture du passivant-métallisation. En effet ces trois étapes peuvent générer une discontinuité de la métallisation finale entre le bas et le haut d'un mesa. Ce sont ces deux points qui vont être traités dans cette partie.

5.1 Etude des contraintes de couches déposées par PECVD

Le dépôt de passivant se fait par PECVD (plasma enhanced chemical vapor deposition) à 200 ou 300°C. Les 2 types de dépôt sont le SiO_x et le Si_xN_y . Lors d'un run technologique, le passivant est déposé sur tout le wafer puis gravé. Seul le SiO_2 peut être retiré par gravure humide (Buffer HF), mais nous préférons la gravure sèche pour éviter des phénomènes de sous-gravure et aussi pour être plus reproductible.

Nous avons d'abord étudié la contrainte induite sur GaAs et Si par chaque type de dépôt. Nous avons travaillé sur 4 types de dépôts : SiO_2 à 200°, SiO_2 à 300°, Si_3N_4 à 200° et Si_3N_4 à 300°C. Ces mesures ont été réalisées à partir d'un profilomètre mécanique TENCOR.

La figure III.19 présente les premières mesures réalisées sur des plaquettes Silicium.



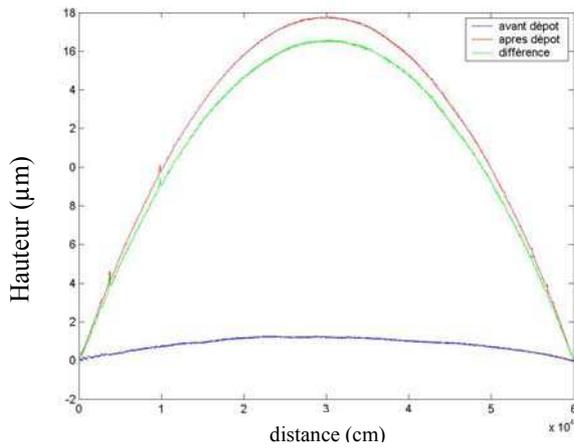
(a) Mesure de la contrainte induite par Si_xN_y déposé à 200°C.

(b) Mesure de la contrainte induite par SiO_x déposé à 200°C.

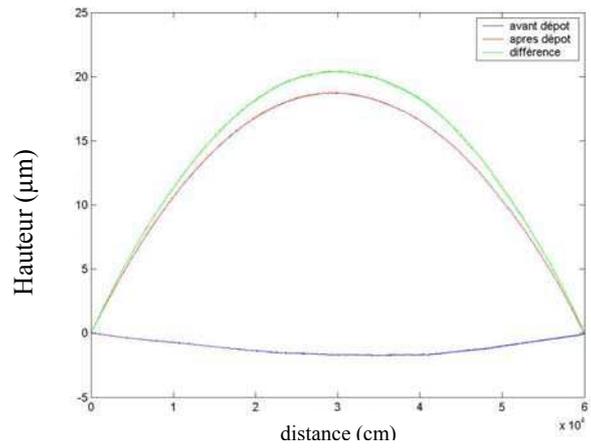
Figure III.19 : comparaison de la contrainte induite avant et après dépôt PECVD sur Silicium.

Nous constatons que le dépôt de SiO_x induit quatre fois moins de contraintes que le dépôt de Si_xN_y . Dans les deux cas le matériau travaille en compression.

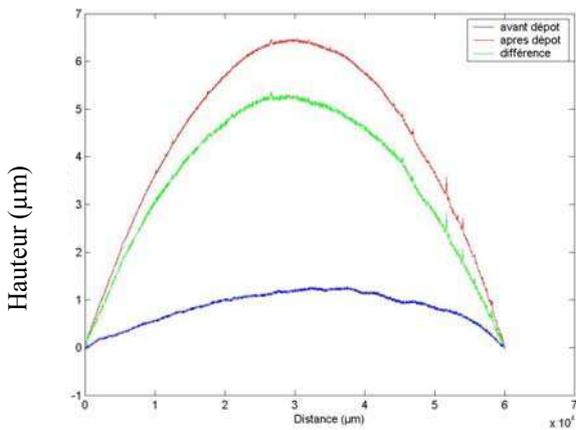
Ensuite la contrainte induite avant et après dépôt de SiO_2 - Si_3N_4 à 200-300° a été mesurée sur un substrat de GaAs. Ces résultats sont reportés sur la figure III.20.



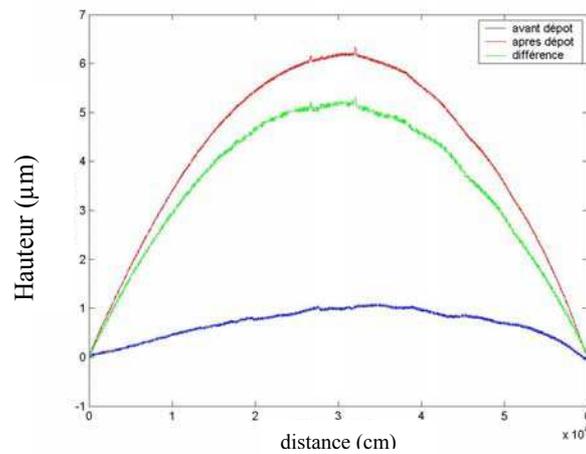
(a) Mesure de la contrainte induite par Si_3N_4 déposé à 200°C.



(b) Mesure de la contrainte induite par Si_3N_4 déposé à 300°C.



(c) Mesure de la contrainte induite par SiO_x déposé à 200°C.



(d) Mesure de la contrainte induite par SiO_x déposé à 300°C.

Figure III.20 : comparaison de la contrainte induite avant et après dépôt PECVD sur GaAs.

Les tableaux III.1 et III.2 résument les mesures de contraintes induites (en MPa) par chaque dépôt sur Silicium et sur GaAs.

Température / Passivant	SiO_2	Si_3N_4
200°	Axe x : -192.5 Axe y : -145	Axe x : -609 Axe y : -608
300°	Axe x : -189.5 Axe y : -178.2	Axe x : -731.9 Axe y : -748.8

Tableau III.1 : récapitulatif des contraintes induites par dépôt PECVD sur GaAs.

Température / Passivant	SiO_2	Si_3N_4
200°	Axe x : -112 Axe y : -104	Axe x : -464.1 Axe y : -464.3

Tableau III.2 : récapitulatif des contraintes induites par dépôt PECVD sur Silicium.

On constate que la contrainte est plus élevée sur GaAs que sur Silicium. Ensuite, le dépôt SiO_2 à 200°C est le moins contraint. Ceci ne doit cependant pas être le seul argument pris en compte pour le choix d'un passivant car celui-ci a une incidence sur la métallisation (nous supposons que l'ouverture du passivant peut empêcher dans certains cas la continuité du métal).

5.2 Etude de la continuité du métal sur le flanc des mesas

En effet, comme le montre la figure III.21, nous avons rencontré des problèmes de continuité de métal sur le flanc des mesas, ceci du fait de la hauteur de marche ($3\text{-}4\mu\text{m}$) malgré le profil à 80° obtenu par gravure ICP.

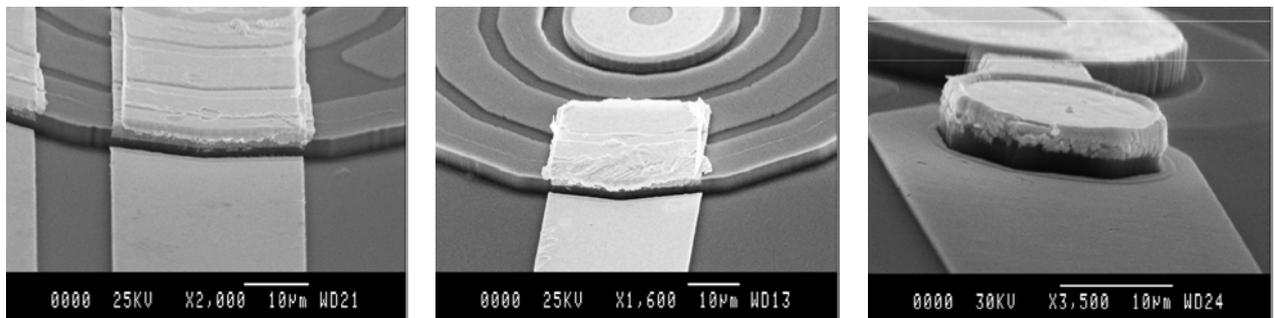
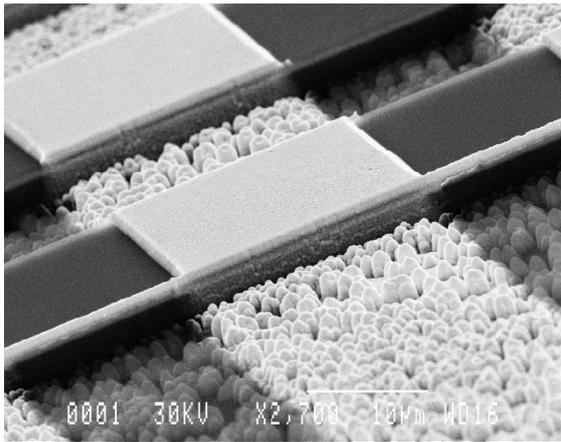
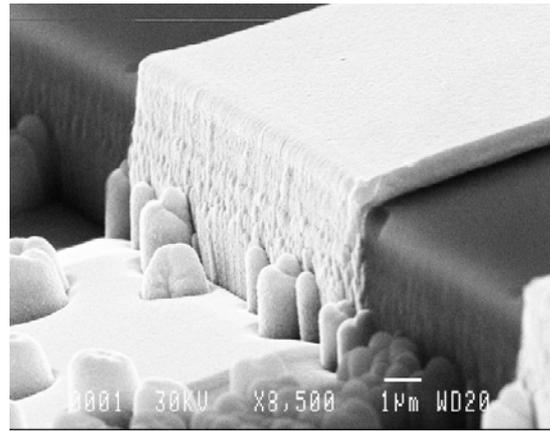


Figure III.21 : images MEB d'une métallisation Cr/Au reliant un mesa à la surface du wafer.

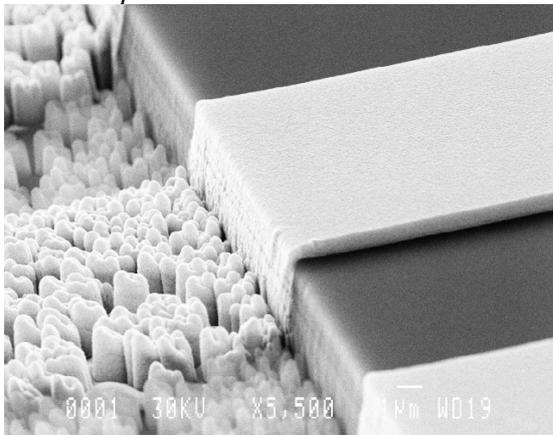
Nous supposons que ce problème est lié à l'enchaînement des étapes passivation / ouverture du passivant / métallisation. Pour être sûr de la continuité du métal, nous réalisons ces tests dans des conditions "critiques". Nous passivons puis métallisons un échantillon gravé en quadrillage à $6\mu\text{m}$ de profondeur. Nous prenons aussi en compte la vitesse de dépôt HF (Haute Fréquence) et BF (Basse Fréquence). Afin d'assurer la continuité, la métallisation est obtenue par un dépôt planétaire (l'échantillon est incliné et pivote sur lui-même dans la chambre de dépôt). La figure III.22 permet de comparer les dépôts de SiO_2 et de Si_3N_4 déposés à 200° en HF et BF.



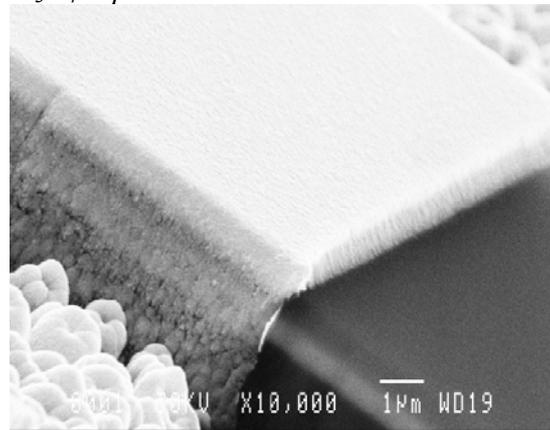
(a) Image MEB d'une métallisation sur du Si_3N_4 déposé à 200° en BF.



(b) Image MEB d'une métallisation sur du Si_3N_4 déposé à 200° en HF.



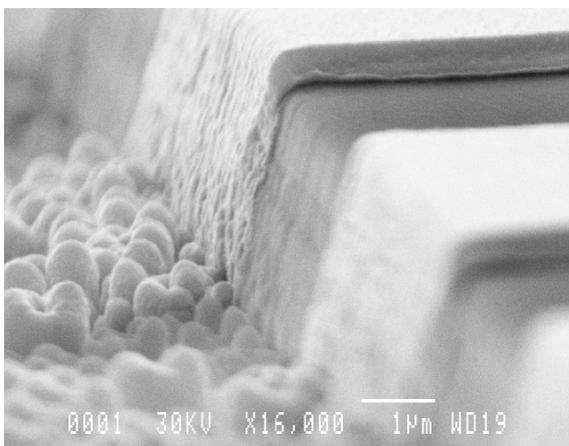
(c) Image MEB d'une métallisation sur du SiO_2 déposé à 200° en BF.



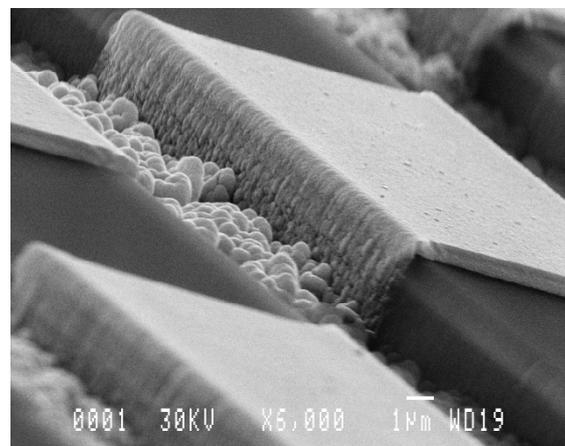
(d) Image MEB d'une métallisation sur du SiO_2 déposé à 200° en HF.

Figure III.22 : comparaison des continuités de métallisation pour des passations SiO_2 et Si_3N_4 déposés en HF et BF.

Nous vérifions aussi qu'un recuit à 420° ne détériore pas la continuité de la métallisation. Nous faisons donc subir un recuit aux échantillons passivés par du SiO_2 . Les résultats sont reportés sur la figure III.23.



(a) Image MEB d'une métallisation sur du SiO_2 déposé à 200°C en BF puis recuit à 420° .



(b) Image MEB d'une métallisation sur du SiO_2 déposé à 200°C en HF puis recuit à 420° .

Figure III.23 : Images MEB de métallisations sur passivant recuit à 420° .

Le recuit n'a apparemment pas d'influence sur la tenue de la passivation.

A la vue des images prises au MEB, Les angles des métallisations ont l'air plus épais pour un dépôt de Si_xN_y . Nous choisissons de passiver nos échantillons au Si_xN_y déposé à 200° en HF. Malgré la contrainte induite qui est plus forte que celle induite par le SiO_x , nous préférons privilégier la continuité de la métallisation. Ainsi, les composants fabriqués seront plus fiables.

6 Implantation ionique

Nous avons vu dans le chapitre 2 quelles étaient les conditions d'implantation que nous utilisions pour augmenter la résistivité de la cavité entre l'émetteur et le détecteur.

Le délimitation de la zone à implanter se fait par photolithographie, où la résine sert de masque d'implantation. En terme de réalisation technologique, cette étape ne présente aucun aspect critique. La difficulté provient du choix de la dose, de l'énergie d'implantation ainsi que la température du recuit atténuant les pertes optiques. En effet, une multi implantation permet de garantir que la totalité de couche active intrinsèque sera bien implantée Bore et donc bien moins conductrice. Le seul soucis peu venir de l'élimination de la résine après implantation, mais une longue exposition à un plasma d'oxygène y remédie.

7 Conclusions

Dans ce chapitre, les masques des composants ont d'abord été présentés. Trois différents type de composant pourront être testés électriquement en régime continu et aussi en hyperfréquence.

Ensuite le procédé complet de fabrication a été présenté. La fabrication de ces composants a nécessité le développement de divers procédés en salle blanche.

Tout d'abord, l'acquisition de bâti de gravure ICP a demandé le développement du procédé de gravure. Les paramètres de gravure (puissances, débit et dilution des gaz) ont été optimisés pour obtenir un fond de gravure plat et des flancs de mesa à 80° (ceci pour facilité la métallisation).

De plus, la métallisation ne sert plus de masque de gravure car celle-ci ne résiste pas à des gravures plasma d'une dizaine de minutes. Différents métaux ont été gravés afin de savoir si l'un d'entre eux présentait une meilleure tenue à la gravure. La solution retenue consiste à

protéger le métal à l'aide de fluorure de strontium. Ainsi, le métal est protégé et peut être libéré rapidement après gravure. Nous avons aussi trouvé d'autres applications au fluorure de strontium. Il est utilisé pour la protection du centre des mesas et sert de matériau d'arrêt lors de l'ouverture du passivant.

Enfin le choix d'une colle thermique entre le wafer de maintien et l'échantillon a été présenté. L'uniformité de la gravure a été étudiée selon l'utilisation d'une graisse ou d'une cire de collage. La mise en place et l'élimination de ces deux colles ont été présentées et nous avons conclu sur la procédure à adopter selon le procédé technologique visé.

Ensuite, l'étape d'oxydation thermique humide a été approfondie. Nous avons présenté l'ancien système d'oxydation et le nouveau, ainsi que les avantages qu'il proposait. L'oxydation a été calibrée afin d'obtenir le process le plus stable possible et nous avons vérifié sa stabilité dans le temps.

Par la suite, l'étape de passivation a été présentée. Une première étude a porté sur les contraintes induites par le type de passivant et les conditions de dépôt. Une seconde étude est venue compléter la première, en étudiant l'enchaînement des étapes de passivation, d'ouverture de passivant et de métallisation, afin d'obtenir une continuité du métal sur toute la hauteur des mesas. Les mesas des VCSEL font en moyenne entre trois et quatre microns, et la continuité du métal a été démontrée sur grande succession de marche de plus de six microns. Ceci nous garantit la fiabilité de cette "brique" technologique.

Enfin, nous avons testé sur des couches de test l'effet de l'implantation ionique et les caractéristiques électriques qui en découlent nous permettent de rester confiant quand à l'efficacité de l'isolation par implantation de Bore.

Le prochain et dernier chapitre présentera la caractérisation des composants réalisés. Nous présenterons les caractéristiques électriques et optiques réalisées sur les composants. Nous étudierons leur comportement en température et nous étudierons leurs caractéristiques hyperfréquences.

Bibliographie du Chapitre 3

-
- [1] L. AVERSENG, *Conception, réalisation et caractérisation de dispositif à microcavité verticale III-V pour la photodétection et l'émission-détection duale*. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, 2002.
- [2] C. BRINGER, *Technologie et caractérisation des VCSELs à diaphragme d'oxyde. Application à la détection en cavité verticale*. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, 2005.
- [3] F. V. DIJK, *Conception, élaboration sous contrôle optique en temps réel, fabrication et caractérisation de lasers à cavité verticale (VCSELs) pour l'émission à 840 nm*. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 1999.
- [4] O. BLUM, I. H. ASHBY et H. Q. HOU, "Barrier-layer-thickness control of selective wet oxidation of AlGaAs for embedded optical elements", *Applied Physics Letters*, vol. 70, no. 21, p. 2870-2, 1997.
- [5] A. SCHERER et H. G. CRAIGHEAD, "Barium fluoride and strontium fluoride negative electron beam resists", *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, vol. 5, no. 1, p. 374-8, 1987.
- [6] A. SCHERER, B. P. VAN DER GAAG, E. D. BEEBE, et P. S. D. LIN, "Fluoride etch masks for high-resolution pattern transfer", *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, vol. 8, no. 1, p. 28-32, 1990.
- [7] H. J. Boer, "Mass Flow Controlled Evaporation System", *Journal de Physique IV*, Colloque C5, supplément au Journal de Physique II, Volume 5, 961-6, 1995.

Chapitre 4

Caractérisations électriques du VCSEL à détecteur intégré optimisé

Ce chapitre présente les caractérisations des composants émetteur-détecteur intégrés que nous avons réalisés. Les mesures optiques, présentées lors du chapitre 2, validaient la possibilité d'un guidage de l'émission spontanée émise latéralement par le guide formé par la zone active (le cœur) et respectivement le miroir de Bragg inférieur et l'air (surface gravée) en guise de gaine. Le guide ainsi constitué permet, même s'il absorbe une part non négligeable de l'émission spontanée, d'acheminer depuis la zone active du VCSEL (sous le diaphragme d'oxyde) jusqu'à l'électrode métallique (Ti/Au) directement déposée sur la couche N.I.D, formant un détecteur de type schottky. Le premier paragraphe synthétise les caractérisations électriques et optiques, et montre notamment la comparaison entre les composants implantés et non implantés. L'évolution du comportement du système émetteur/détecteur avec la température est également présentée. Enfin, les caractéristiques hyperfréquence (petit signal) et la réponse à une impulsion électrique des composants VCSELS à détecteur intégré seront présentées.

1 Présentation du dispositif optimisé

La figure 1 présente le détail des trois types de composants présentés dans le chapitre 3, après fabrication en salle blanche.

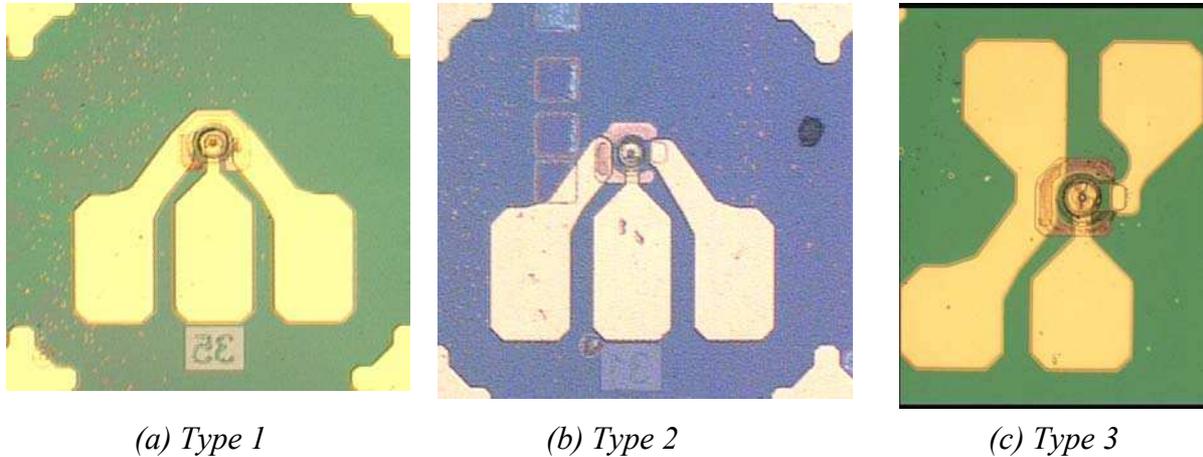


Figure IV.1 : Vue détaillée des trois types de composants.

Le composant type 1 correspond à un VCSEL standard (sans détecteur) qui nous servira de référence. En revanche, les composant type 2 et 3 correspondent à deux composants émetteur-détecteur optimisés identiques, mais avec deux configurations d'interconnexion distinctes.

Pour garantir l'obtention d'une faible ouverture du diaphragme d'oxyde ($\Phi \sim 4\mu\text{m}$), nous avons conçu sur nos masques pour chaque type de composant, quatre diamètres distincts (31, 33, 35 & 37 μm). Par la suite, lors des mesures électriques et optiques, nous limiterons les caractérisations aux seuls VCSELs présentant une émission monomode.

Un dessin en coupe du composant VCSEL-détecteur et le schéma électrique équivalent sont présentés sur la figure 2 (configuration identique des composants type 2 et 3).

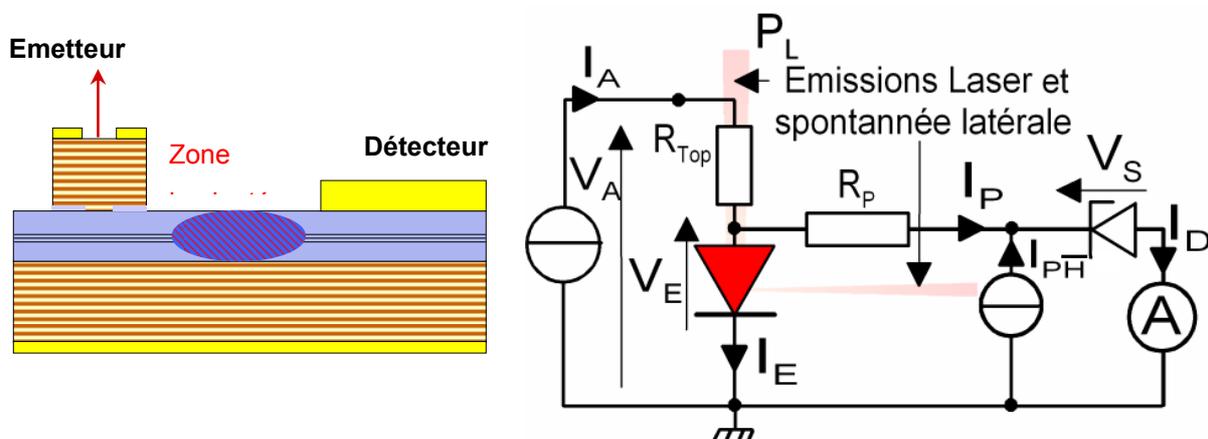


Figure IV.2 : Dessin en coupe et schéma électrique équivalent du composant émetteur-détecteur.

Où V_A , V_S et V_E sont les tensions présentes respectivement aux bornes de l'émetteur, du contact Schottky du détecteur et enfin de la cavité de l'émetteur. La résistance du réflecteur de Bragg supérieur est représentée par R_{Top} . Le courant appliqué (I_A), le courant (I_D) est collecté par le contact Schottky du détecteur. Un courant parasite (I_P) circulant entre la zone active du VCSEL et le contact Schottky du détecteur. En effet, la zone active (couche N.I.D) de la cavité présente une résistance (R_P) allant de quelques $k\Omega$ à plus de $100 k\Omega$ selon le mode d'épitaxie des couches (MOCVD ou MBE). Les mesures électriques porteront sur les évolutions conjointes de la tension globale V_A , du courant détecté latéralement I_D et enfin de la puissance de sortie du VCSEL (P_L) en fonction du courant appliqué en entrée I_A . Nous nous pencherons plus particulièrement sur l'évolution du courant détecté latéralement I_D en fonction de la puissance optique émise P_L et essayerons de l'optimiser pour pouvoir étudier ces deux grandeurs qui à priori ne sont pas simplement corrélées. En effet, ce courant détecté correspond à la somme de deux contributions, un courant de conduction parasite I_P et un photocourant I_{PH} . Notre travail visera à éliminer ce courant parasite, ou à défaut rendre prépondérant le photocourant.

Dans un premier temps, les allures de P_L et I_D en fonction du courant appliqué (I_A) seront mesurés afin d'observer et quantifier la détection intégrée.

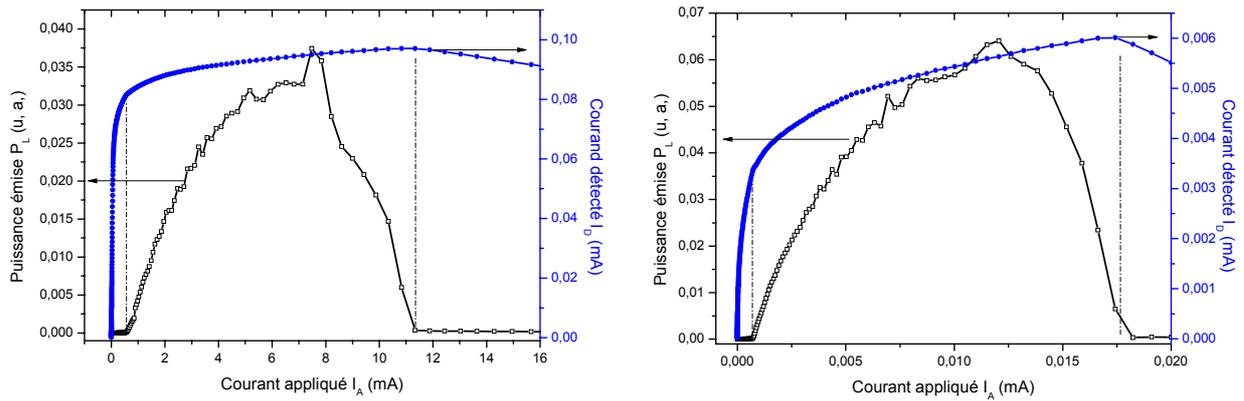
Ensuite, le spectre de l'émission laser du VCSEL sera mesuré et nous montrerons le comportement monomode de l'émission.

Enfin, nous observerons le comportement en hyperfréquence de ce système émetteur détecteur afin de vérifier que les aménagements technologiques nécessaire à l'ajout du détecteur au VCSEL standard, n'engendrent pas une baisse des performances en régimes HF (capacités parasites, chute de la fonction de transfert, etc...). Lors de ces mesures, le temps de réponse du détecteur sera également mesuré et permettra de conclure sur la viabilité de notre approche de détection intégrée pour réaliser la fonction de monitoring.

2 Caractéristiques électriques / optiques

2.1 Caractéristiques statiques

Dans un premier temps, les allures de P_L et I_D en fonction du courant appliqué (I_A), en régime de polarisation continue, sont mesurées afin d'observer et de quantifier la détection intégrée du système. Les résultats présentés sur la figure 3(a) et 3(b) correspondent respectivement aux composants non implanté et implanté Bore.



(a) Composant non implanté

(b) Composant implanté

Figure IV.3 : Caractéristiques $P_L(I_A)$ et $I_D(I_A)$ des composants avec et sans implantation de bore.

Comme lors des caractérisations optiques (chapitre 2), on observe bien un changement de pente (cassure : ligne verticale pointillée) lors du seuil et l'extinction laser. Entre ces deux points singuliers, l'allure du courant de détection est monotone croissante. On pourra dès lors, faire correspondre à un courant détecté, une seule puissance émise, et exploiter cela pour le contrôle de puissance émise du VCSEL (monitoring). En outre, on constate que la pente du courant détecté du composant implanté entre les deux points de fonctionnement du VCSEL est nettement plus forte dans le cas d'un composant implanté. Ceci démontre que le courant détecté, composé de photocourant et de courant parasite est plus sensible au photocourant. L'implantation a bien fonctionné. En revanche, on notera que le niveau du courant détecté est environ 10 à 20 fois plus faible.

Dans la valeur du courant détecté, il s'avère délicat d'extraire la contribution du courant parasite et celle du photocourant. Pour y parvenir, nous avons tracé les évolutions conjointes des courants I_A , I_D et de la puissance émise P_L en fonction de la tension appliquée.

Ces caractéristiques sont représentées sur la figure 4 et permettent de comparer l'effet bénéfique de l'implantation ionique sur la réduction du courant parasite latéral.

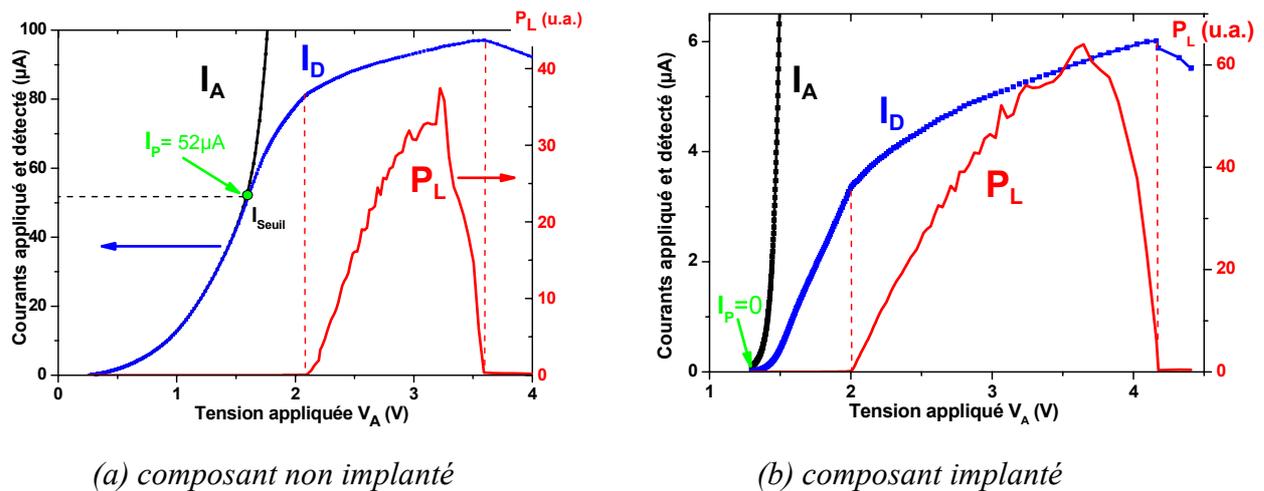


Figure IV.4 : Caractéristiques I_A , I_D et P_L en fonction de V_A .

Pour un échantillon non implanté (figure 4.a), le courant appliqué au VCSEL (I_A) et le courant de détection (I_D) sont confondus jusqu'à une tension appliquée de 1,6V. Cela signifie que la quasi totalité du courant appliqué est dérivé vers le photodétecteur (courant parasite).

Pour un échantillon identique, l'implantation bore (figure 4.b) induit une forte dégradation de la conduction dans la zone intrinsèque qui se traduit par une dissociation du courant appliqué et détecté à un courant nettement plus faible ($>0.05\mu\text{A}$). Dès lors, le courant détecté est quasiment la réplique du photocourant (sans courant parasite). En revanche, la valeur réduite de ce dernier (I_{PH}), traduit qu'outre l'élimination de la contribution liée à la conduction parasite (effet recherché), cette étape d'implantation induit aussi une forte absorption de l'émission spontanée et réduit de fait la valeur du photocourant dans un rapport dix. Pour minimiser cette absorption il aurait été souhaitable de procéder à un recuit d'environ 1 minute à au moins 600°C [1]. Nous n'avons pas procédé à ce recuit car il se traduit également par une augmentation de la conduction latérale que nous souhaitons absolument éviter.

Nous allons maintenant, nous attarder sur le fonctionnement intrinsèque du système émetteur-détecteur. Nous verrons que l'on peut distinguer plusieurs modes de fonctionnement.

2.2 Fonctionnement de détecteur à contact Schottky

En effet, si l'on trace à nouveau la caractéristique de la figure 3(a), mais cette fois en prenant des échelles logarithmiques pour le courant appliqué et la puissance émise, on peut clairement distinguer 4 zones de fonctionnement (figure 5).

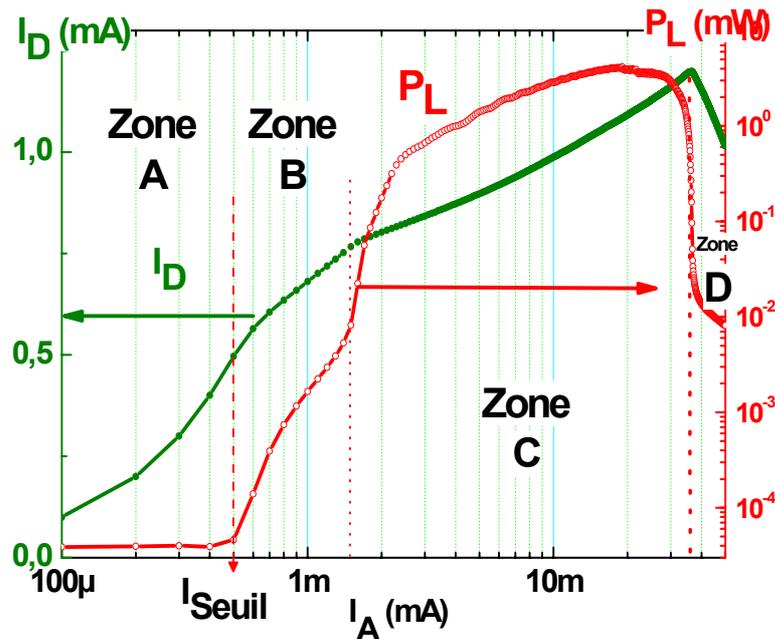


Figure IV.5 : Caractéristiques $P_L(I_A)$ et $I_D(I_A)$

Pour mieux illustrer et bien localiser chacune des zones de fonctionnement, on peut se rapporter à la figure 6 ci-dessous.

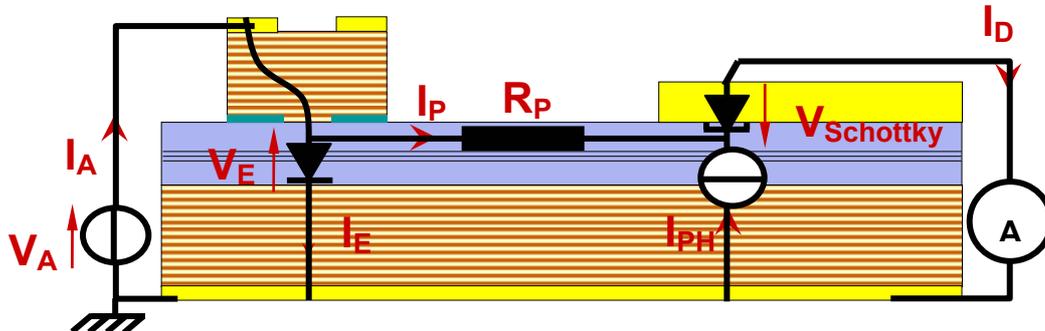


Figure 6 : Schéma électrique équivalent du système émetteur-détecteur.

- **Zone A** : pour I_A compris entre 0 et 0.6 mA :

La jonction PIN du VCSEL n'a pas atteint son seuil de conduction ($V_E > 1,3V$), le courant appliqué (I_A) est donc intégralement dérivé latéralement vers le détecteur et cette zone correspond à la seule conduction parasite latérale (dopage résiduel de la cavité qui dépend de la méthode d'épitaxie retenue : MBE ou MOCVD). On peut alors écrire que :

$$I_A = I_P = I_D = \frac{V_A}{R_P} \quad (1)$$

Où I_P est le courant parasite et R_P correspond à la résistance de la couche non

intentionnellement dopée de la zone active depuis l'émetteur jusqu'à l'électrode du détecteur.

- **Zone B** : pour I_A compris entre 0.6 et 1.5mA :

La jonction PIN du VCSEL commence à conduire (conduction verticale) et produit l'émission spontanée du VCSEL. Une partie du courant appliqué traverse à présent la jonction PIN du VCSEL, l'autre étant toujours dérivée vers le détecteur sous forme de courant parasite. Ce dernier est limité grâce à la barrière Schottky du détecteur. En effet, il peut s'écrire de la façon suivante :

$$I_D = I_P + I_{PH} \quad (2)$$

$$I_A = I_E + I_D \sim I_E \quad (3)$$

Avec I_{PH} correspondant au photocourant généré par l'émission spontanée et qui demeure, en régime d'électroluminescence, restreint. De même, la conduction verticale devient rapidement prépondérante et le courant traversant la zone active du VCSEL ' I_E ' est quasiment confondu avec le courant appliqué ' I_A '.

- **Zone C** : pour I_A compris entre 1.5 et 35mA :

Il y a simultanément émission spontanée et émission stimulée au sein du VCSEL. C'est précisément dans cette zone de fonctionnement que le contrôle de la puissance émise par le VCSEL sera exploité. Il est à noter que l'évolution monotone croissante du courant détecté permet de lui faire correspondre un seul niveau de la puissance d'émission du VCSEL.

- **Zone D** : pour I_A supérieur à 35mA :

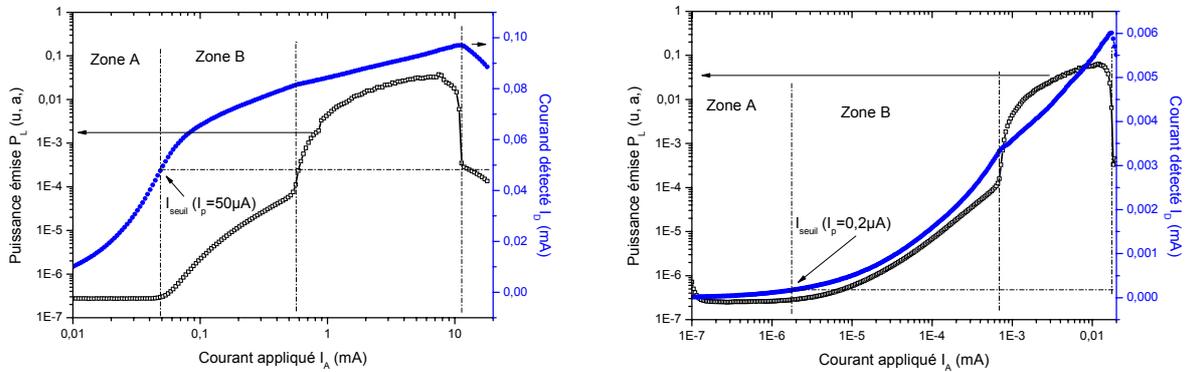
Les effets thermiques induisent l'extinction de l'émission stimulée et une réduction significative de l'émission spontanée. Cela se traduit également sur le détecteur, par une diminution du courant détecté.

On peut noter, que le point de fonctionnement correspondant au seuil de conduction de la diode intrinsèque du VCSEL est atteint pour $I_A = 0,6\text{mA}$ et $V_A = 1,3\text{V}$. Ce point est intéressant, car c'est le point de fonctionnement à partir duquel le courant parasite peut être identifié. En effet, le courant parasite envoyé dans le détecteur n'évolue quasiment plus car la différence de potentiel intrinsèque entre l'émetteur et le détecteur reste quasiment constante. Par la suite, si le courant appliqué augmente, l'augmentation de la tension appliquée se répercutera que sur la différence de potentiel supportée par le réflecteur de Bragg supérieur.

Ce point de fonctionnement peut donc être utilisé pour identifier et quantifier les

niveaux respectifs du courant parasite et celui du photocourant.

Par conséquent, nous allons déterminer la part de courant parasite et la part de photocourant au sein du courant détecté. Pour cela nous traçons les caractéristiques présentées sur la figure 3 en semi-logarithmique.



(a) composant non implanté

(b) composant implanté

Figure IV.7 : Caractéristiques $P_L(I_A)$ et $I_D(I_A)$

Sur ces courbes on note un courant parasite (au seuil) de $50\mu\text{A}$ avec un courant détecté maximum de $100\mu\text{A}$ pour un composant non implanté et un courant parasite de $0,2\mu\text{A}$ avec un courant maximum de $6\mu\text{A}$ pour un composant implanté. On a donc $I_{\text{photoMAX}} = 50\mu\text{A}$ donc $I_{\text{photo}}/I_{\text{parasite}} = 0.5$ pour un composant implanté et $I_{\text{photoMAX}} = 5,8\mu\text{A}$ donc $I_{\text{photo}}/I_{\text{parasite}} = 29$ pour un composant implanté. Hors le courant détecté est 17 fois plus faible pour un composant implanté.

En conclusion, lorsque la cavité séparant le détecteur et l'émetteur est implantée, le courant détecté est 58 fois plus sensible au photocourant mais il est 17 fois plus faible. Le choix d'implanter un composant doit se faire seulement si le niveau du courant détecté implanté est suffisant pour l'application visée.

2.3 Comportement en température

Nous présentons maintenant l'étude sur l'influence de la température sur les performances de la détection lors de l'échauffement du système. Cette étude, aurait été plus pertinente si elle avait été réalisée en utilisant un banc en régime pulsé, mais ne disposant pas de cet équipement sur le testeur sous pointe utilisé (Station Cascade Microtech comprenant un chuck chauffant et bien régulé en température), ces mesures ont été réalisées en régime

continu. D'où la nécessité lors de nos conclusions, d'ajouter à la température du porte échantillon (chuck) l'élévation en température due à l'auto-échauffement. Ce dernier pouvant aller de 40°C à plus de 60°C.

On sait que la barrière Schottky est sensible à la température et se traduit par une diminution de cette dernière ' V_S ' quand la température croît [2]. Ceci se traduirait alors par une augmentation du courant parasite si le potentiel V_E de la PIN du VCSEL ne diminuait pas. Ne pouvant pas prédire l'évolution de la tension intrinsèque ' V_E ' de la jonction PIN du VCSEL, on peut tout de même remarquer que le détecteur est placé à plus de 20 μm de la zone active du VCSEL et sera donc peu exposé aux effets de l'auto-échauffement.

Nous commençons tout d'abord par mesurer les caractéristiques $I_A(V_A)$, $I_D(V_A)$ et $P_L(V_A)$ pour différentes températures du porte échantillon : 20, 40, 60, 80 et 100°C (figure 8).

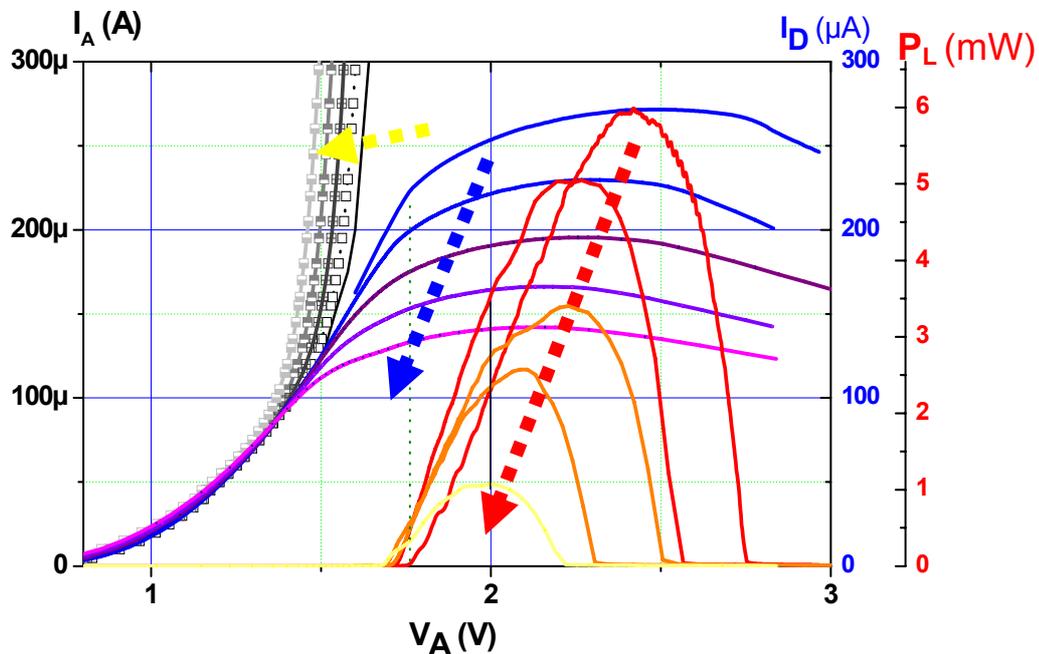


Figure IV.8 : Caractéristique $I_A(V_A)$, $I_D(V_A)$ et $P_L(V_A)$ pour $T= 20, 40, 60, 80$ et 100°C .

Ces mesures montrent clairement que lorsque la température croît, l'émission stimulée et spontanée diminuent, et par conséquent, le courant détecté décroît.

Pour mieux quantifier l'efficacité de notre approche, faisant appel à une barrière Schottky, nous devons extraire du courant détecté, la part de courant parasite (I_P) et celle du photocourant (I_{PH}). Pour cela, comme précédemment expliqué, nous soustrairons au courant détecté, la valeur du courant détecté correspondant au début de l'émission spontanée (I_P) et noté I_{Seuil} sur les figures 4 & 5. Bien sûr, ce seuil de conduction I_{Seuil} est plus réduit que le seuil de l'émission laser I_{TH} . Ce calcul fait l'hypothèse réaliste que la tension aux bornes de la zone active (jonction PIN intrinsèque) reste quasiment constante au-delà du seuil d'émission

spontanée. Après calcul, nous obtenons les courbes suivantes (figure 9) :

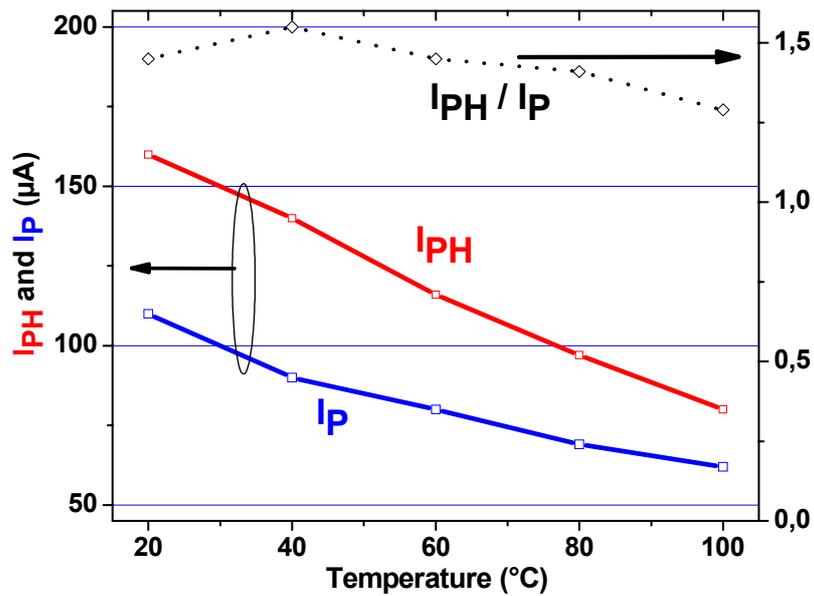


Figure IV.9 : Courbe $I_P(T^\circ)$, $I_{PH}(T^\circ)$ et $I_{PH}/I_P(T^\circ)$ extraites des mesures de la figure 7.

On constate que le rapport entre le photocourant et le courant parasite est quasi constant lorsque la température augmente. Ceci s'explique par le fait que lorsque la température augmente, le potentiel de la diode Schottky du détecteur mais également celui de la diode PIN du VCSEL diminuent conjointement. On peut en conclure, que ces deux mécanismes se compensent mutuellement en température et qu'il ne dégrade pas la sensibilité globale du détecteur (signal utile/signal parasite).

Les caractéristiques électriques maintenant achevées, nous permettent de conclure sur la viabilité et l'efficacité de notre approche de détection intégrée par contact Schottky. De plus les niveaux élevés des courants détectés ($I_D > 100 \mu A$) sont suffisants pour envisager sereinement son utilisation pour le contrôle de la puissance émise. Enfin, nous avons confirmé, à l'aide de mesures en température, que cette approche reste robuste et n'affecte pas la sensibilité de la détection.

2.4 Caractéristique spectrale de l'émission

Nous allons maintenant observer le spectre d'émission des VCSELs de diamètre $4 \mu m$ afin de vérifier si ceux-ci sont monomodes. L'intérêt d'un laser monomode est la divergence du faisceau, plus faible, qui améliore le couplage dans les fibres optiques, le point qui est le plus intéressant pour l'application visée. Aussi, une source monomode permet d'obtenir un

bruit RIN réduit, moins d'erreurs dans les transmissions et pas de dispersion dans les fibres optiques [3] [4] [5].

La mesure est effectuée en plaçant une fibre optique au-dessus d'un VCSEL et en la connectant à un analyseur de spectre. Les mesures de spectre sont effectuées sur les VCSELS de grand diamètre (4 μ m), implantés et non implantés.

La figure 10 présente les spectres d'un échantillon implanté pour des courants appliqués respectivement de 0.8 et 2mA.

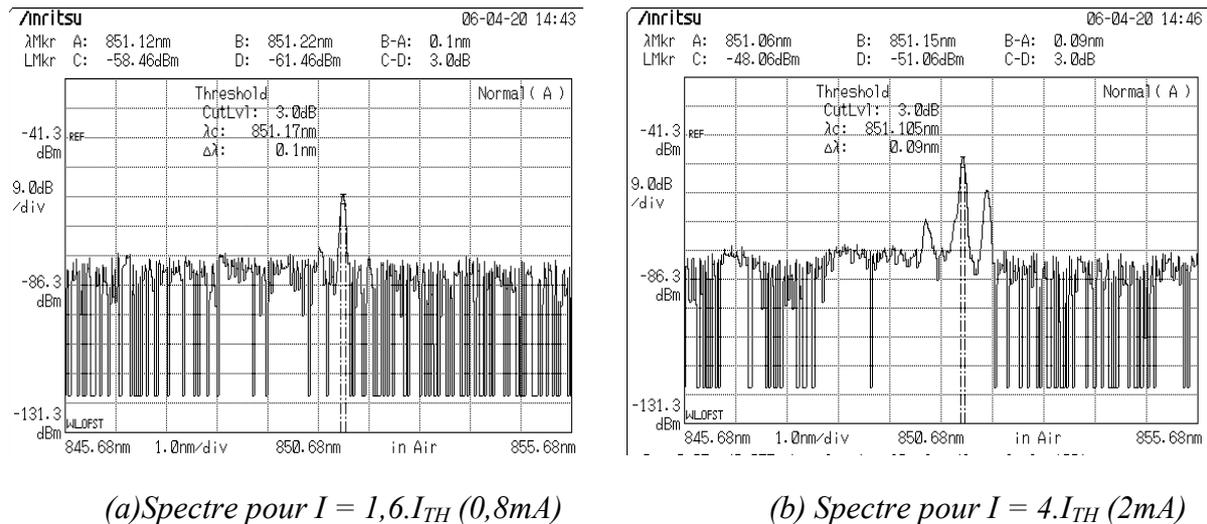


Figure IV.10 : Mesures de spectres d'un composant implanté.

Et ceux de VCSEL non implanté sont présentés sur la figure 11.

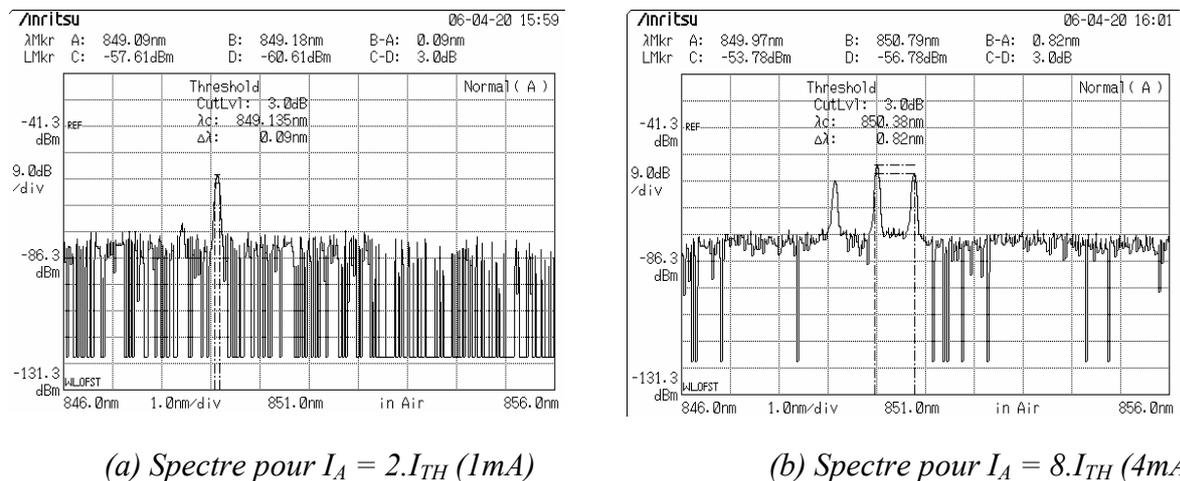


Figure IV.11 : Mesures de spectres d'un composant non implanté.

A première vue, que le VCSEL soit implantés ou pas, le rapport de suppression du mode secondaire SMSR (Side Mode Suppression Ratio) est de 20dB. Lorsque l'on s'éloigne du seuil, l'émission devient multimode. Le diaphragme d'oxyde étant de 4 μ m, nous supposons que l'apparition de pics secondaires est due aux effets thermiques. En effet, pour un

composant non implanté par exemple (figure 9), on peut noter que le pic principal se déplace de 1nm pour un courant appliqué 2 fois plus élevé (différence de 3mA), ce qui est dû à un échauffement de la cavité. Cette variation de 0.5nm/mA est mesurée sur les composants non implantés et implantés. Ceci diffère légèrement des données constructeur (0,3nm/mA) [6] mais la comparaison est difficile car ce déplacement est plus marqué lorsque les diaphragmes d'oxyde sont petits [7] (un fort confinement électrique donne une plus grande résistance et donc une plus grande température de fonctionnement).

3 Caractéristiques hyperfréquences et temporelles

3.1 Mesure de la fréquence de coupure des composants

Ce paragraphe présente les caractéristiques hyperfréquences mesurées sur les composants VCSEL à détecteur intégré développés dans le cadre du contrat OSA131. C'est la première fois que des mesures optiques en hyperfréquence vont être menées au laboratoire. Ces mesures permettront dans un premier temps de valider le banc de mesure que nous allons mettre en place, et, dans un second temps, de connaître les limites hyperfréquences des composants réalisés au laboratoire. Ces limites sont liées au matériau utilisé, à la conception et à la technologie du composant. Dans un premier temps, nous présentons les mesures des paramètres S_{11} (réflexion en entrée) qui informe sur l'adaptation d'impédance en entrée et S_{21} correspondant au gain optoélectronique (puissance émise/puissance appliquée $P_L/P_{\text{Appliquée}}$) des composants. Ces mesures permettront notamment de déterminer la bande passante de nos dispositifs et d'évaluer les performances en modulation analogique rapide. Dans le paragraphe suivant, nous présenterons l'étude de la réponse temporelle en émission et en détection.

La définition des paramètres S permet de caractériser un quadripôle en terme de transmission et de réflexion du signal hyperfréquence (figure 12) :

- S_{11} et S_{22} traduisent la réflexion du signal respectivement à l'entrée et à la sortie
- S_{21} et S_{12} traduisent la propagation du signal à travers le quadripôle respectivement de l'entrée vers la sortie et de la sortie vers l'entrée.

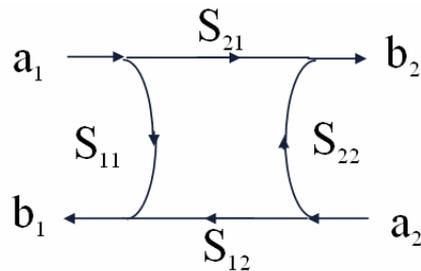


Figure IV.12 : Représentation des paramètres S d'un quadripôle.

Les paramètres S sont obtenus comme suit :

$$S_{11} = b_1 / a_1 \text{ pour } a_2 = 0 \quad (4)$$

$$S_{12} = b_1 / a_2 \text{ pour } a_1 = 0 \quad (5)$$

$$S_{21} = b_2 / a_1 \text{ pour } a_2 = 0 \quad (6)$$

$$S_{22} = b_2 / a_2 \text{ pour } a_1 = 0 \quad (7)$$

Les mesures hyperfréquences sont effectuées sur un banc avec des pointes coplanaires et support à fibre optique relié à une photodiode. Dans le cas de la mesure du paramètre S_{11} , seul un analyseur de spectre et une alimentation continue sont utilisés. Le schéma du montage est représenté sur la figure IV.13. Il faut noter que le détecteur est mis à la masse par le troisième doigt des pointes coplanaires (masse-signal-masse).

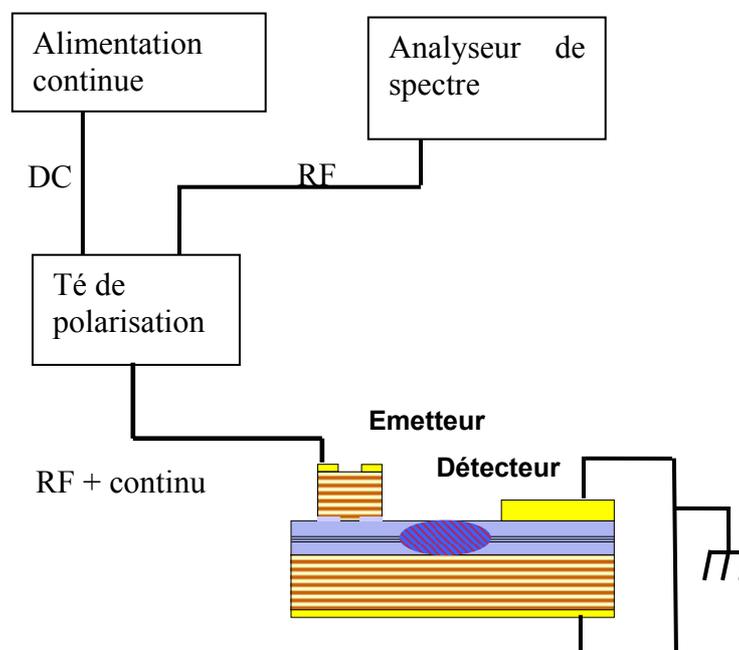


Figure IV.13 : Schéma du montage utilisé pour mesurer le paramètre S_{11} .

Les paramètres S_{11} sont mesurés sur des VCSEL implantés, non implantés, avec ou sans détecteur, pour un courant appliqué de 5mA. Les résultats sont présentés sur la figure

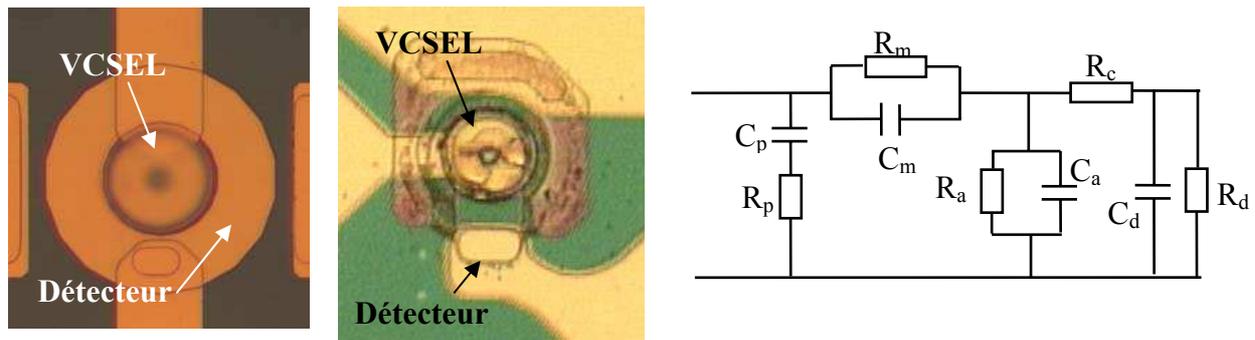


Figure IV.26 : Photo et schéma électrique équivalent d'un composant à détecteur intégré.

Si l'on se réfère au schéma électrique équivalent, un détecteur rapide doit avoir une charge C_d et une résistance R_d faibles. Dans le premier cas le détecteur annulaire présente une charge C_d plus importante à cause de sa taille. Néanmoins sa résistance R_c est faible car celui-ci est placé à seulement $4\mu\text{m}$ de l'émetteur. Dans le second cas, le détecteur simple présente une charge C_d plus petite mais une résistance R_c plus grande car celui-ci se situe à $13\mu\text{m}$ de l'émetteur. La valeur de cette résistance a d'ailleurs été accrue par l'implantation ionique. Cette différence en opposition de ces paramètres peut expliquer le temps de retard identique de ces deux détecteurs.

Le temps de réponse du détecteur est suffisamment lent pour réaliser une fonction de monitoring, celui-ci pouvant permettre de moyennner une modulation à 10Gbit/s autour d'un point de fonctionnement, mais il est suffisamment rapide pour permettre l'instrumentation d'un VCSEL, en microscopie optique par exemple, en détectant la réponse à la réinjection d'une impulsion lumineuse.

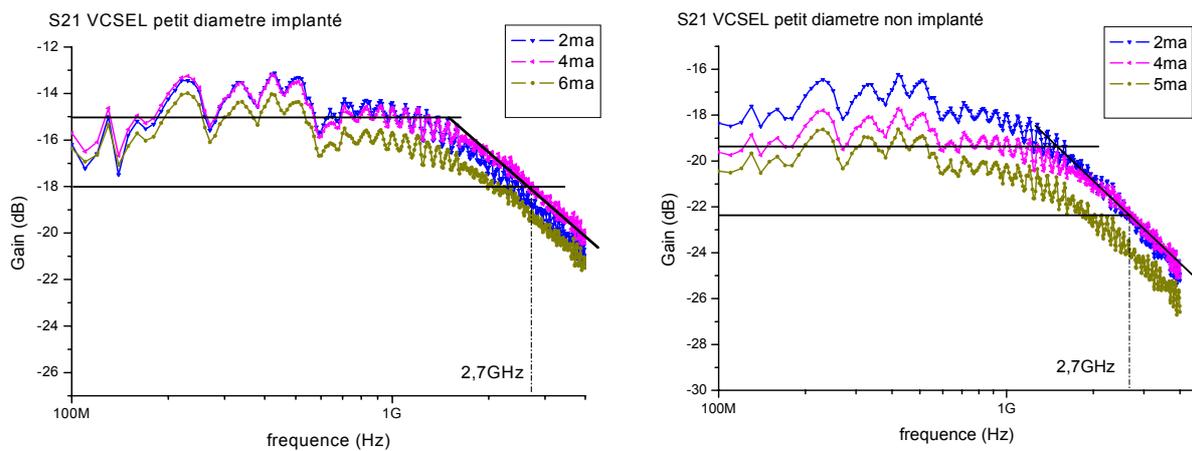
3.2.b Mise en évidence des modes de fonctionnement du composant

Nous utilisons maintenant le même montage présenté figure 20 mais monté sur un autre banc de mesure nous permettant de placer une fibre optique reliée à une photodiode au dessus du VCSEL. Les courbes que nous allons présenter sont les caractéristiques d'un composant à détecteur intégré implanté de grand diamètre ($4\mu\text{m}$). Nous allons utiliser ces caractérisations temporelles pour mettre en évidence les 4 types de fonctionnement (figure 5) du premier paragraphe de ce chapitre. En effet, en modifiant l'amplitude du pulse d'entrée, et en mesurant le courant détecté ainsi que l'émission laser, nous allons pouvoir laisser la PIN intrinsèque du VCSEL bloquée, passante, ou bien forcer l'auto échauffement. Pour resituer les zones de fonctionnement, la figure IV.27 présente la courbe $P(V)$ du VCSEL.

Figure IV.15 : Schéma du montage utilisé pour mesurer le paramètre S_{21} .

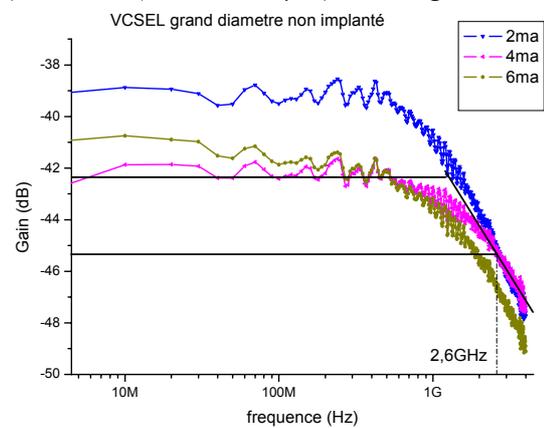
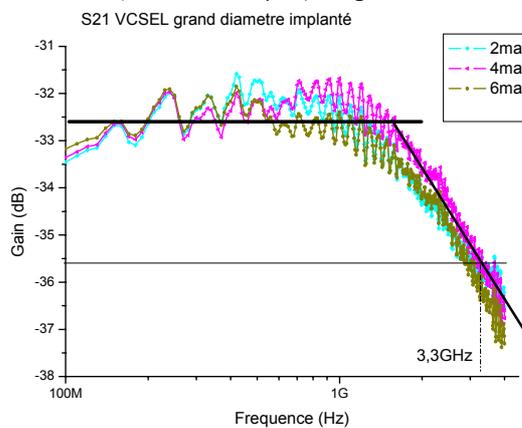
Ces mesures sont effectuées à différentes polarisations et sont présentées sur la figure IV.15 et IV.16.

Dans un premier temps nous comparons les mesures faites sur plusieurs composants n'ayant pas de détecteurs intégrés. La comparaison implanté/non implanté est donc inutile (car il n'y a pas de guide) mais elle est quand même notée sous les courbes (figure 16) car il s'agit d'une plaquette de composant différente (issue du même wafer). Nous allons comparer des VCSELs selon la taille de leur diaphragme d'oxyde.



(a) VCSEL (diamètre $2\mu\text{m}$) implanté.

(b) VCSEL (diamètre $2\mu\text{m}$) non implanté.



(c) VCSEL (diamètre $4\mu\text{m}$) implanté.

(d) VCSEL (diamètre $4\mu\text{m}$) non implanté.

Figure IV.16 : Paramètres S_{21} des composants émetteurs OSA131.

On constate que la fréquence de coupure est quasiment la même (2,7GHz pour une polarisation de 4mA) pour tous les composants sauf pour le VCSEL de diamètre $4\mu\text{m}$ implanté avec 3,3GHz de fréquence de coupure.

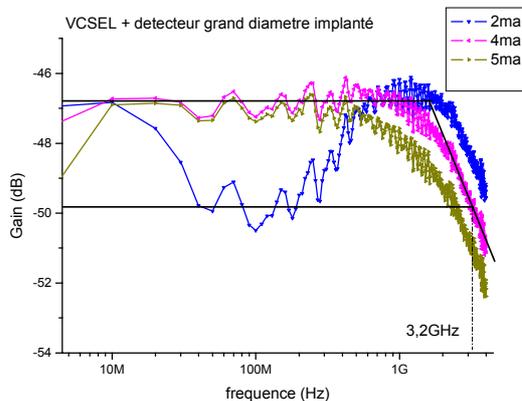
La fréquence de coupure (à 3dB du gain maximum) ne varie donc pas de façon significative avec la taille du diaphragme d'oxyde (2 ou $4\mu\text{m}$) selon nos mesures. En réalité,

Carlsson *et al.* [8] ont démontré une variation de la fréquence de coupure selon la taille du diaphragme d'oxyde cependant une variation de 2 μm n'est pas suffisante pour l'observer clairement (une variation est notable de 2 à 10 μm , voir tableau IV.1).

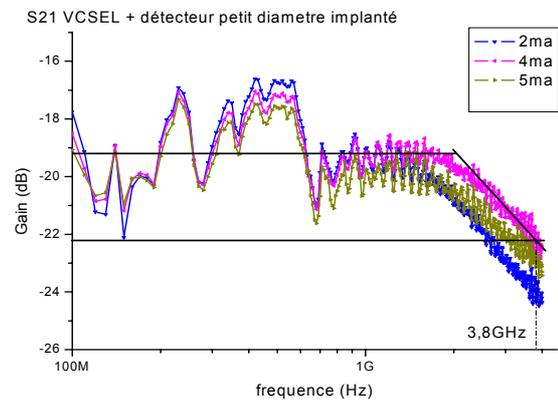
Taille du diaphragme d'oxyde (μm)	Fréquence de coupure (GHz)
2	6.3
4	6.0
6	8.3
8	8.5
10	9.1

Tableau IV.1 : Fréquence de coupure atteinte selon la taille du diaphragme d'oxyde.

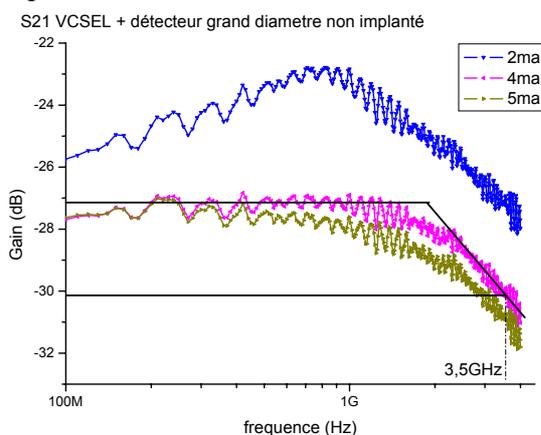
Voici maintenant les paramètres S_{21} des composants émetteurs avec détecteurs intégrés :



(a) VCSEL-détecteur (diamètre 4 μm) implanté.



(b) VCSEL-détecteur (diamètre 2 μm) implanté.



(c) VCSEL-détecteur (diamètre 4 μm) non implanté.

Figure IV.17 : Paramètres S_{21} des composants émetteur-détecteurs OSA131.

Les composants émetteurs à détection intégrée ont des performances semblables à ceux présentés précédemment. Le niveau du gain ne doit pas être pris en compte car celui-ci dépend fortement du couplage avec la fibre optique. Au niveau des fréquences, pour une polarisation de 4mA, la fréquence de coupure est cependant entre 3 et 4GHz sur tous nos composant VCSEL-détecteur.

Afin d'expliquer les différences de performances entre un composant émetteur et un composant émetteur à détection intégrée, voyons le schéma électrique équivalent d'un VCSEL (fig. 18) [8] [9] :

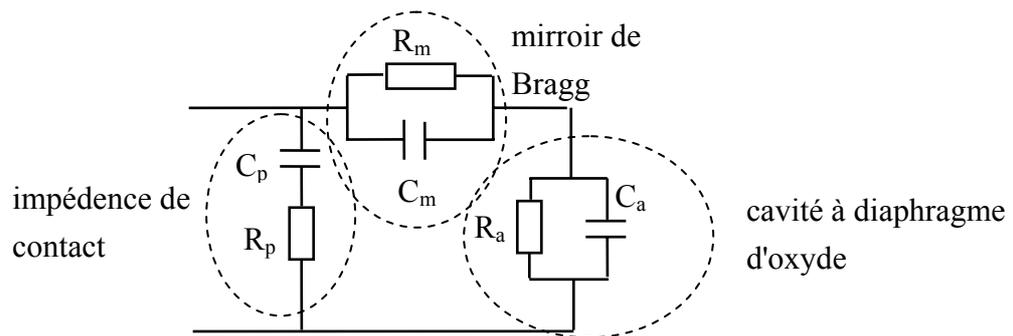


Figure IV.18 : Circuit équivalent des impédances d'un VCSEL.

Sur ce schéma, R_p représente les pertes dues aux résistances de contact, C_p la capacité parasite des contacts, R_m représente les pertes du miroir, avec C_m la charge associée aux interfaces du miroir, R_a la résistance de la région active et C_a la combinaison de la capacité de la région active et de la couche d'oxyde.

Voici maintenant le schéma électrique équivalent d'un composant émetteur détecteur :

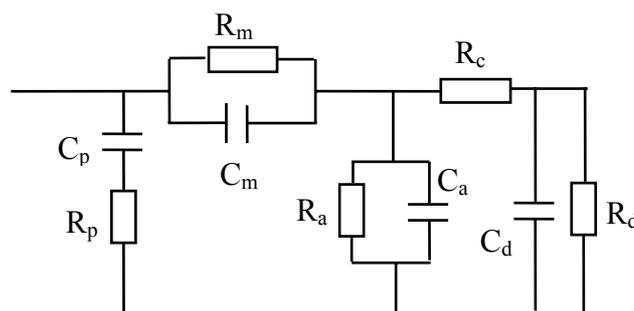


Figure IV.19 : Circuit équivalent des impédances d'un VCSEL.

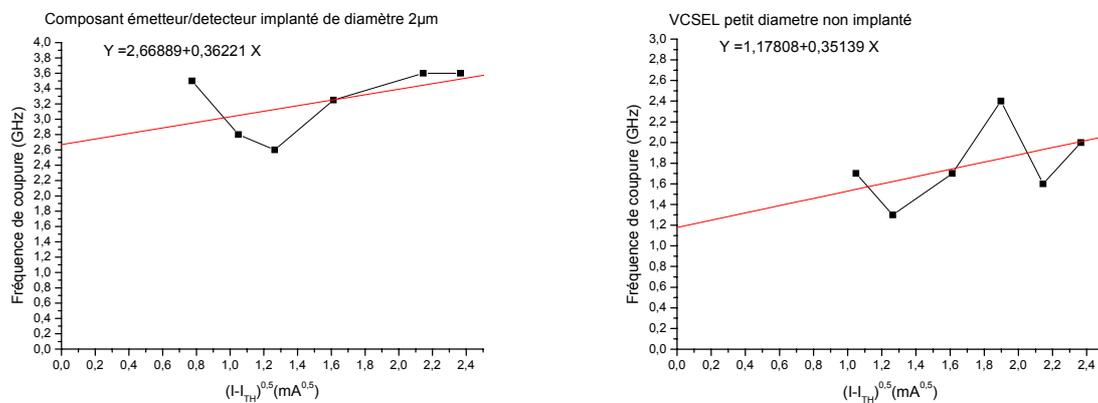
Sur la figure 19 on retrouve le schéma électrique équivalent du VCSEL (figure 18) auquel viennent s'ajouter les éléments équivalents du détecteur. Ces éléments sont les suivants : R_c représente les pertes de la cavité, C_d est la charge associée au détecteur et R_d représente les pertes associées au détecteur.

Si l'on considère le circuit équivalent d'un composant VCSEL et d'un composant VCSEL à détecteur, les résistances et capacités équivalentes des miroirs, celles des contacts ainsi que celles de la région active sont les mêmes. La modification du design du composant émetteur pour y intégrer un émetteur va seulement ajouter R_c , R_d et C_d . Cependant cette modification ne semble pas avoir un impact suffisant pour abaisser la fréquence de coupure. En effet la charge ajoutée devrait diminuer la fréquence de coupure, hors celle-ci n'est pas diminuée. Ceci démontre que l'intégration du détecteur ne nuit pas aux performances hyperfréquences du VCSEL.

Comme attendu, l'évolution fréquentielle du paramètre S_{21} est celle d'un filtre passe bas et on peut évaluer la fréquence de coupure entre 2,7 et 3GHz. En modulation numérique, on peut espérer atteindre des performances à 5Gbit/s en conservant un diagramme de l'œil satisfaisant.

Nous pouvons conclure que notre procédé de fabrication et le design de nos dispositifs, est donc compatible avec des applications hyperfréquences.

A partir des paramètres S_{21} , on peut définir le MCEF (Maximum Modulation Current Efficiency Factor, suggéré par Chen *et al.* [10] comme facteur de mérite), c'est à dire le facteur d'efficacité de modulation de courant maximum. Ce facteur permet de quantifier les performances hyperfréquences d'un composant. On l'obtient en traçant la fréquence de coupure en fonction de $\sqrt{I - I_{Th}}$, où I_{Th} correspond au courant de seuil. La pente de cette courbe correspond au MCEF et est tracé pour les différents composants sur les courbes de la figure 20.



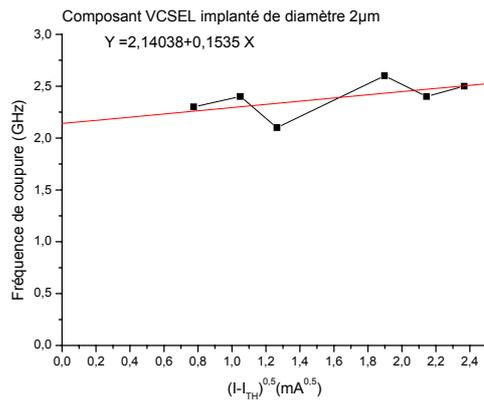


Figure IV.20 : Tracé de la fréquence de coupure en fonction de la racine de la soustraction du courant appliqué et du courant de seuil.

On obtient donc les valeurs de MCEF suivantes : 0,15 ; 0,35 ; 0,36GHz/mA^{0.5}. Les coefficients MCEF des composants présentant une autre configuration n'étaient pas cohérents.

A titre de comparaison, des VCSELs InGaAlAsP utilisés en transmission 10Gbit/s ont un MCEF de 5.8GHz/mA^{0.5}[11]. En 1997, Lehman *et al.* [12] ont présenté des composants avec un MCEF de 3GHz/mA^{0.5} tandis qu'en 1994, Scott *et al.* [13] ont présenté des VCSELs ayant un MCEF allant de 2 à 5 GHz/mA^{0.5} selon la taille de leur diaphragme d'oxyde. C'est d'ailleurs en diminuant sa taille que les composants ont un meilleur facteur d'efficacité de modulation. Ceci pourrait expliquer pourquoi les composants de 4µm de diaphragme d'oxyde présentaient un MCEF très faible par rapport à ceux de 2µm de diaphragme.

Même si, pour cette première génération de dispositif, notre objectif n'était pas d'atteindre les performances hyperfréquences de l'état de l'art, ils concrétisent au laboratoire la mise en place de ces nouveaux bancs de mesures optique en hyperfréquence.

3.2 Réponses Temporelles du VCSEL et du détecteur intégré

3.2.a Réponse impulsionnelle

Nous allons maintenant caractériser le temps de réponse du VCSEL et du détecteur intégré. En effet ce détecteur devra être capable de moyenner le signal détecté lorsqu'une modulation électrique est envoyée autour d'un point de fonctionnement du VCSEL. En outre, le temps de réponse du détecteur doit réagir suffisamment rapidement à une impulsion électrique si l'on souhaite utiliser un VCSEL comme instrument de mesure exploitant la réinjection optique (applications SNOM ou télémétrie). Toutes les caractérisations présentées concernent un composant implanté, de diamètre 4µm. Le temps de réponse est important car

ce détecteur sera utilisé pour faire le contrôle en puissance de l'émission laser. Un schéma explicatif du montage est représenté figure IV.21 :

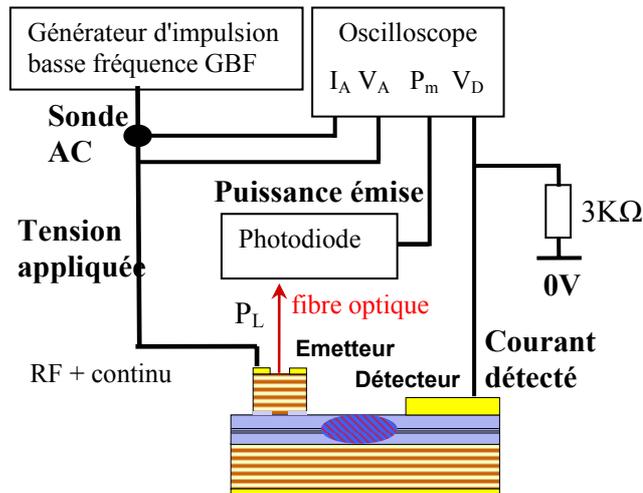


Figure IV.21 : Schéma du montage de mesure du temps de réponse du détecteur.

Nous envoyons une impulsion en tension sur un composant VCSEL à détecteur intégré implanté et nous observons la réponse du photodétecteur intégré. Dans un premier temps on observe la réponse du détecteur en envoyant une impulsion d'amplitude 2V lorsque le VCSEL est non polarisé (figure 22).

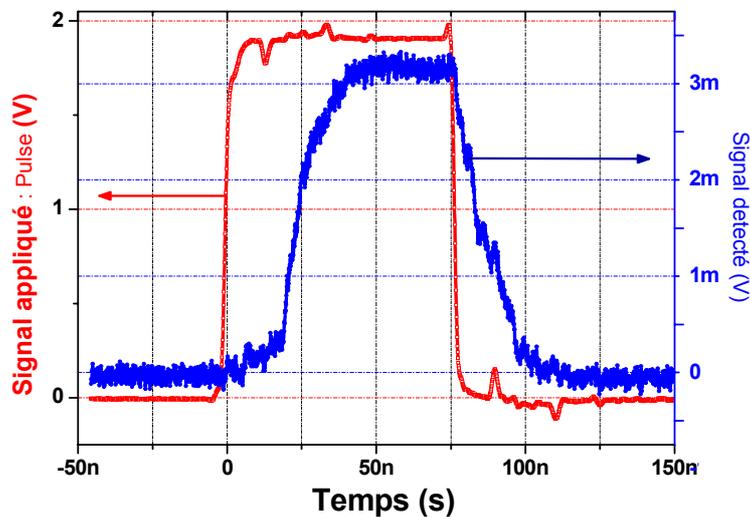


Figure IV.22 : Réponse du détecteur à un pulse envoyé sur le VCSEL associé.

Nous notons tout d'abord un temps de retard de 20 ns suivi d'un temps de montée de 30ns. Mais ce temps de réponse n'est pas représentatif du temps de réponse en fonctionnement normal : en effet la modulation d'un VCSEL se fait autour d'un point de fonctionnement. La réponse du VCSEL modulé est donc plus rapide car il n'y a pas besoin d'amorcer l'émission

stimulée.

Recommençons l'expérience, reportée sur la figure 23, en prenant toujours une impulsion de 2V d'amplitude mais cette fois en polarisant initialement un $V_{\text{OFFSET}} = 0,8\text{V}$ (limite maximale dans cette configuration du GBF).

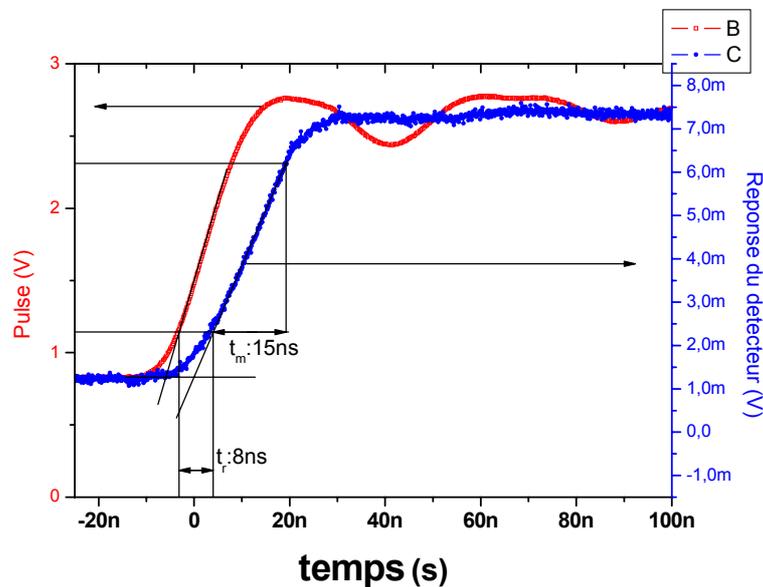


Figure IV.23 : Réponse du détecteur à un pulse (avec offset) envoyé sur le VCSEL.

Lorsque le VCSEL est polarisé, le temps de retard (t_r) du détecteur intégré est de 8ns, tandis que le temps de montée est maintenant de 15ns.

A travers le temps de retard du détecteur, nous observons à la fois le temps de réponse du détecteur mais aussi celui du VCSEL qui répond à une impulsion en tension. Dans ces conditions (mesure de la puissance émise indisponible lors de la caractérisation), il est difficile d'évaluer la part de chaque paramètre. Néanmoins, nous pouvons affirmer que le détecteur présente un temps de réponse ($<10\text{ns}$) satisfaisant pour l'utiliser en fonction de monitoring.

Lors de précédents travaux [14] le temps de réponse d'un composant à détecteur Schottky annulaire intégré (figure 24) à une impulsion en tension de 0 à 8V avait été mesuré.

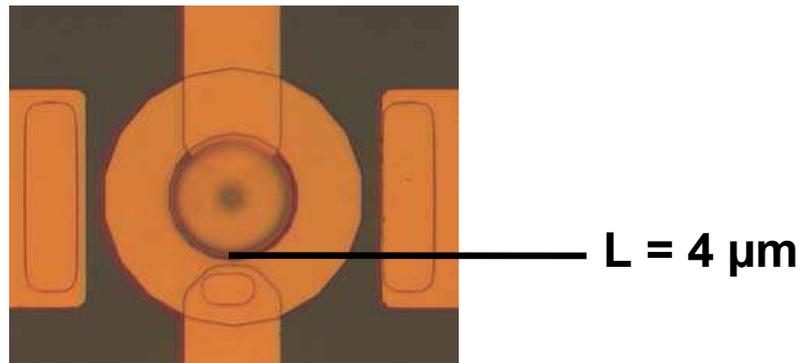


Figure IV.24 : Vue de dessus d'un composant à détecteur Schottky annulaire.

Voici la caractéristique obtenue :

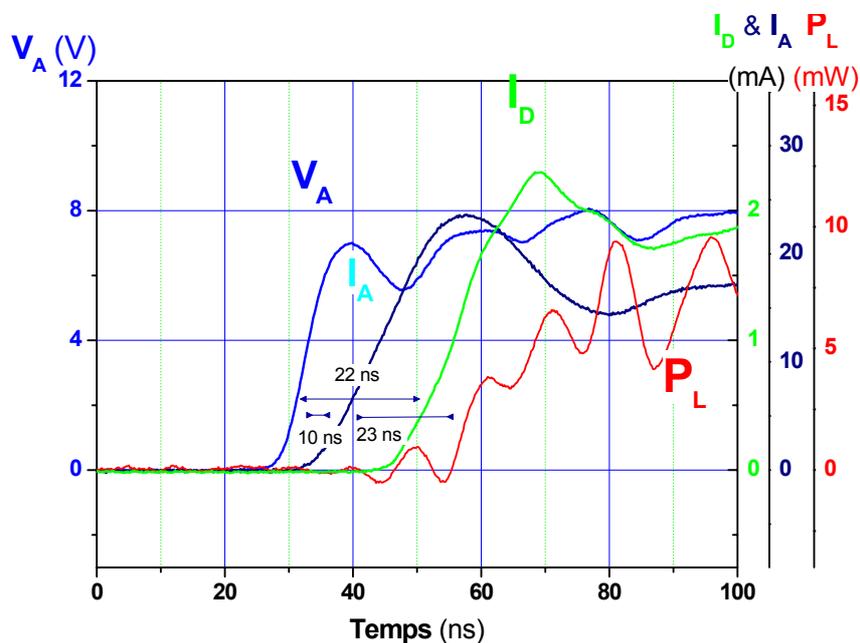


Figure IV.25 : Temps de réponse d'un composant à détecteur Schottky annulaire.

Sur la figure 25, on peut voir que le temps de réponse du signal détecté est de 23ns. Le composant entre en régime laser 13ns après le pulse en tension (il faut retrancher aux 33ns les 20ns de retard du détecteur silicium utilisé - documentation constructeur).

Dans les deux cas, le temps de réponse de la détection est d'une vingtaine de nanosecondes. Les deux détecteurs sont différents au niveau de la forme : annulaire pour l'un et simple pour l'autre, et de la distance émetteur-détecteur : $4\mu\text{m}$ dans le cas du détecteur annulaire, et $13\mu\text{m}$ dans le cas du détecteur simple.

La figure 26 reprend le design des détecteurs ainsi que le schéma électrique équivalent du composant.

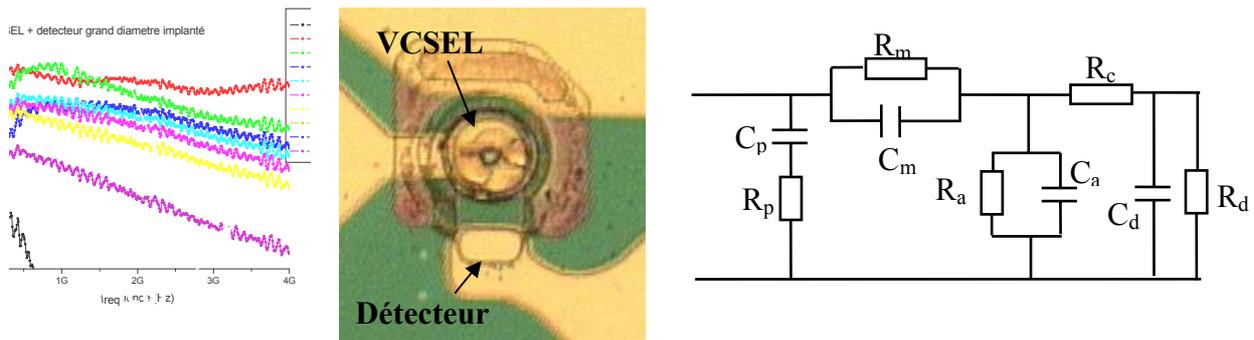


Figure IV.26 : Photo et schéma électrique équivalent d'un composant à détecteur intégré.

Si l'on se réfère au schéma électrique équivalent, un détecteur rapide doit avoir une charge C_d et une résistance R_d faibles. Dans le premier cas, le détecteur annulaire présente une charge C_d plus importante à cause de sa taille. Néanmoins sa résistance R_c est faible car celui-ci est placé à seulement $4\mu\text{m}$ de l'émetteur. Dans le second cas, le détecteur simple présente une charge C_d plus petite mais une résistance R_c plus grande car celui-ci se situe à $13\mu\text{m}$ de l'émetteur. La valeur de cette résistance a d'ailleurs été accrue par l'implantation ionique. Cette différence en opposition de ces paramètres peut expliquer le temps de retard identique de ces deux détecteurs.

Le temps de réponse du détecteur est suffisamment lent pour réaliser une fonction de monitoring, celui-ci pouvant permettre de moyennner une modulation à 10Gbit/s autour d'un point de fonctionnement, mais il est suffisamment rapide pour permettre l'instrumentation d'un VCSEL, en microscopie optique par exemple, en détectant la réponse à la réinjection d'une impulsion lumineuse.

3.2.b Mise en évidence des modes de fonctionnement du composant

Nous utilisons maintenant le même montage présenté figure 20 mais monté sur un autre banc de mesure nous permettant de placer une fibre optique reliée à une photodiode au dessus du VCSEL. Les courbes que nous allons présenter sont les caractéristiques d'un composant à détecteur intégré implanté de grand diamètre ($4\mu\text{m}$). Nous allons utiliser ces caractérisations temporelles pour mettre en évidence les 4 types de fonctionnement (figure 5) du premier paragraphe de ce chapitre. En effet, en modifiant l'amplitude du pulse d'entrée, et en mesurant le courant détecté ainsi que l'émission laser, nous allons pouvoir laisser la PIN intrinsèque du VCSEL bloquée, passante, ou bien forcer l'auto échauffement. Pour resituer les zones de fonctionnement, la figure IV.27 présente la courbe $P(V)$ du VCSEL.

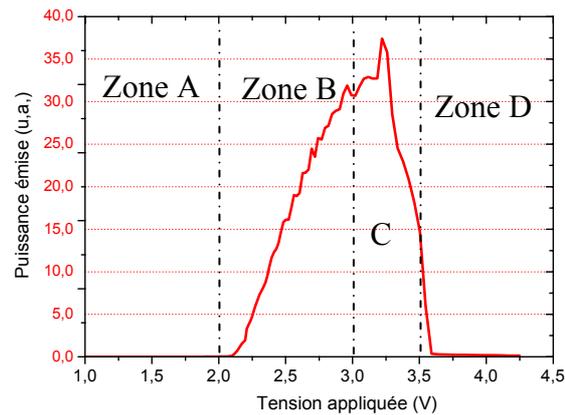


Figure IV.27 : Courbe $P(V)$ d'un composant VCSEL.

Dans un premier temps nous envoyons une impulsion de 1V (bleu – noir), insuffisant pour obtenir un émission stimulée ou même spontanée (figure IV.7).

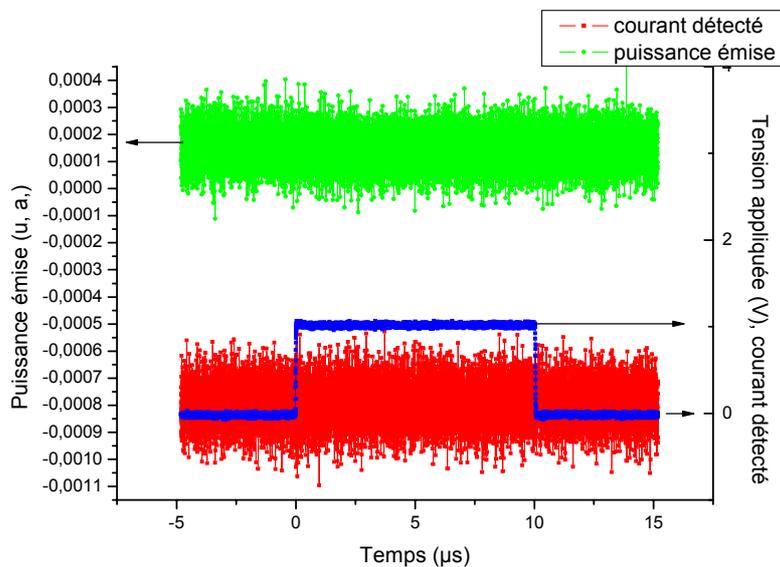


Figure IV.27 : Réponse du composant à un pulse de 1V.

Pour une impulsion de 1V, il n'y a pas d'émission stimulée (en vert – gris clair), il n'y a pas d'émission spontanée mais le courant de détection (en rouge – gris moyen) est nul car le courant parasite est limité. La jonction PIN du VCSEL n'a donc pas atteint son seuil de conduction ($V_E > 1,3V$).

Nous envoyons maintenant une impulsion de 2V (figure IV.28).

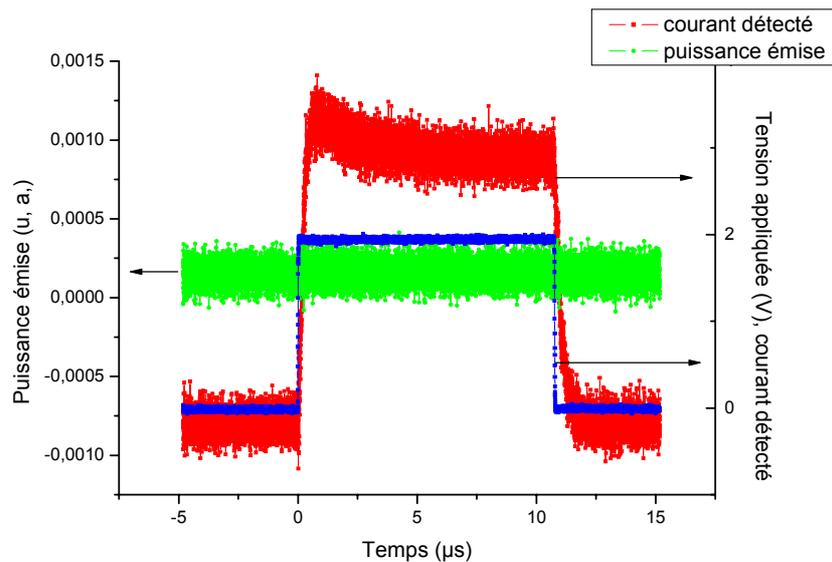


Figure IV.28 : Réponse du composant à un pulse de 2V.

Pour une impulsion de 2V, le seuil laser n'est pas atteint mais la jonction PIN du VCSEL commence à conduire (conduction verticale) et produit l'émission spontanée du VCSEL. Une partie du courant appliqué traverse à présent la jonction PIN du VCSEL, l'autre étant toujours dérivée vers le détecteur sous forme de courant parasite. Il n'y a donc pas d'émission stimulée mais que de l'émission spontanée (en vert), et le courant détecté (rouge) suit le pulse, et représente la somme du photocourant et du courant parasite.

Nous envoyons maintenant une impulsion de 3V (figure IV.29) :

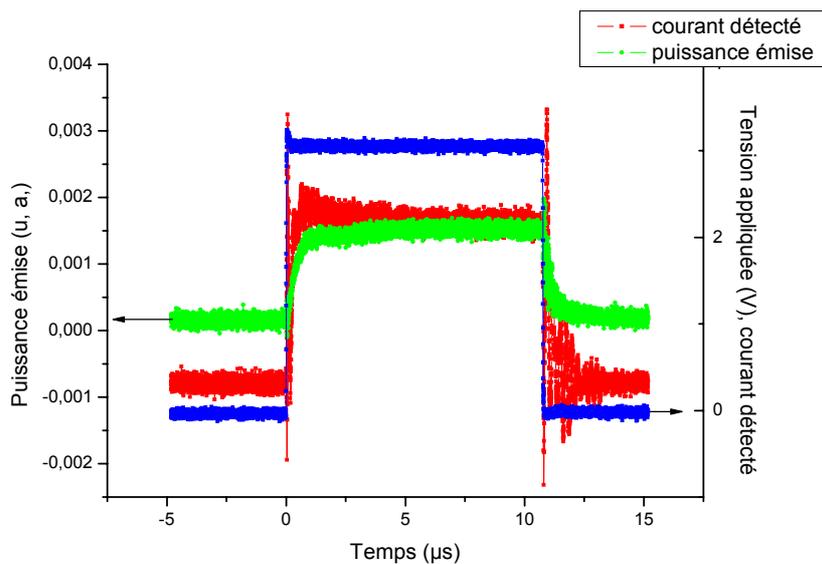


Figure IV.29 : Réponse du composant à un pulse de 3V.

Pour une impulsion de 3V, le composant est dans son fonctionnement standard au dessus du seuil, il y a à la fois émission spontanée et stimulée.

Enfin nous envoyons une impulsion de 3,5V (figure IV.30).

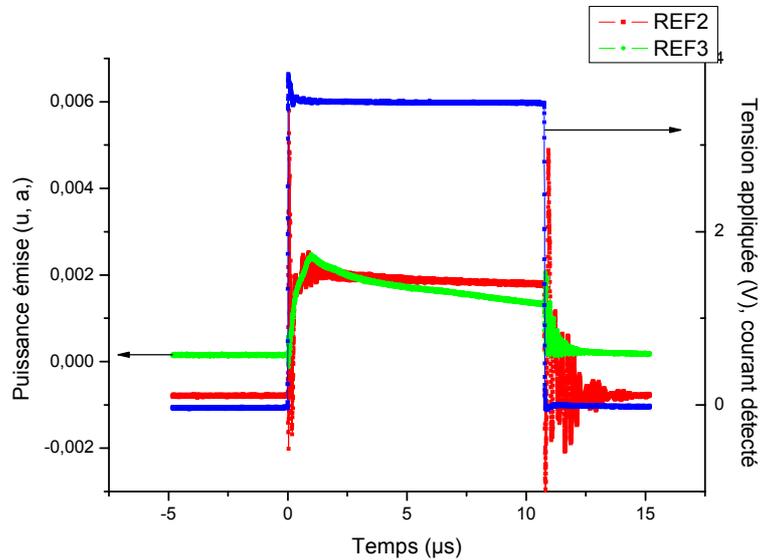


Figure IV.30 : Réponse du composant à une impulsion de 3,5V.

Pour une impulsion de 3,5V, on retrouve bien le phénomène d'auto échauffement. En effet, on peut voir que la courbe de la puissance lumineuse (en vert) diminue pendant l'état haut du pulse (d'une dizaine de microsecondes).

Ces mesures temporelles confirment ce que l'on avait constaté lors des caractérisations électriques du premier paragraphe. Les quatre modes de fonctionnement ont été clairement identifiés et le temps de réponse du détecteur est satisfaisant pour faire un contrôle de puissance en utilisation hyperfréquence. Le comportement hyperfréquence du composant est satisfaisant même si l'on est en deçà de l'état de l'art. Le but de ces travaux étant de démontrer la possibilité de faire du monitoring intégré, il est normal que le comportement hyperfréquence de notre système soit en deçà de ce que l'on peut trouver chez des industriels. Néanmoins, nous soulignons que nos composants ont une fréquence de coupure située entre 2 et 3 GHz avec un taux de réinjection en entrée satisfaisant jusqu'au gigahertz.

4 Conclusions

Dans ce dernier chapitre, nous avons présenté une caractérisation complète de nos

composants émetteurs/détecteurs, autant en régime statique qu'en modulation rapide

Grâce au rapprochement de ces différents types de mesures, nous avons pu interpréter le comportement de ces composants en évaluant les limites et les améliorations à amener dans les prochaines générations de composants.

Les caractéristiques statiques du composant ont d'abord été présentées. Nous avons mis en valeur le fait que le courant détecté présentait un profil correspondant à nos attentes : il y a une cassure de la pente de la courbe du courant détecté au seuil et à l'extinction du laser. Entre ces deux points, la courbe est monotone croissante ce qui est adapté pour une application de contrôle de la puissance de sortie du VCSEL. De plus, nous avons comparé les effets de l'implantation ionique en comparant les caractéristiques statiques de composants implantés et non implantés. Le comportement statique du composant a ensuite été détaillé en identifiant quatre types de régimes.

Ensuite, nous avons présenté une étude en température du composant émetteur/détecteur. Nous avons vu que la sensibilité du détecteur Schottky n'est pas altérée lorsque l'on augmente la température jusqu'à une centaine de degrés. En effet, le fait que le photocourant et le courant parasite diminuent en même temps engendre un effet de compensation.

Le spectre de l'émission de sortie du VCSEL a été caractérisé afin de savoir si les composants étaient monomodes. Malgré une taille de diaphragme d'oxyde adapté à un comportement monomode, nous n'avons pas pu l'obtenir sur une plage de courant importante. Ceci étant certainement dû aux effets thermiques inhérents au petit diamètre d'oxyde.

Enfin nous avons présenté les caractéristiques dynamiques des composants. Nous avons commencé par étudier les paramètres S en transmission et en réflexion du composant afin de savoir jusqu'à quelle fréquence ceux-ci pouvaient fonctionner. En terme de commande, le signal d'entrée peut être injecté avec seulement 50% de réflexion jusqu'à un gigahertz. En transmission, nous avons noté une fréquence de coupure entre deux et quatre gigahertz, ce qui semble satisfaisant par rapport à la littérature. Le facteur d'efficacité de modulation de courant maximum a lui aussi été calculé afin de quantifier les performances hyperfréquence des composants. Nous avons pu d'ailleurs remarquer que ceux-ci présentaient des facteurs variant du simple au triple, ce qui démontre la sensibilité des paramètres avec les procédés de fabrication. Ceci a été imputé au fait que la gravure plasma des mesas n'était pas uniforme, ceci malgré les précautions prises décrites dans le chapitre trois.

Des caractéristiques impulsionnelles ont été présentées. Le comportement des composants émetteur/détecteur a été étudié en envoyant des impulsions en courant d'une

centaine de nanosecondes. Cette étude a permis de caractériser le temps de réponse du détecteur à contact Schottky.

Bibliographie du Chapitre 4

-
- [1] P. N. FAVENNEC, *L'implantation ionique*, Paris, France : Masson, 1993.
- [2] S. KARATAS, S. ALTINDAL, "Temperature dependence of barrier heights of Au/n-type GaAs Schottky diodes", *Solid-State Electronics*, vol. 49, no. 6, p. 1052-4, 2005.
- [3] H. E. LI, K. IGA, *Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser Devices*, Springer : Berlin, 2003.
- [4] C. WILMSEN, H. TEMKIN, L. A. COLDREN, *Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers*, Cambridge University Press : Cambridge, 1999.
- [5] J. N. DAMASK, *Polarization Optics in Telecommunications*, Springer : New York, 2004.
- [6] AVALON, Standard 850 Singlemode VCSEL Chip, <http://www.avap.ch>.
- [7] A. LARSSON, C. CARLSSON, J. GUSTAVSSON, Å. HAGLUND, P. MODH et J. BENGTSSON, "Direct high-frequency modulation of VCSELs and applications in fibre optic RF and microwave links", *New Journal of Physics*, vol. 6, no. 176, 2004.
- [8] C. CARLSSON, H. MARTINSSON, R. SCHARTZ, J. HALONEN et A. LARSON, "Analog Modulation Properties of Oxide Confined VCSELs at Microwave Frequencies", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 20, no. 9, p. 1740-9, 2002.
- [9] Y. H. CHANG, FANG-I LAIL, C. Y. LUL, H. C. KUOL, H. C. YU, C. P. SUNG, H. P. YANG et S. C. WANG, "High-speed (>10 Gbps) 850 nm oxide-confined vertical cavity surface emitting lasers (VCSELs) with a planar process and reduced parasitic capacitance", *Semiconductor Science and Technology*, vol. 19, p. 74-7, 2004.
- [10] T.R. CHEN, B. ZHAO, L. ENG, Y.H. ZHUANG, J. O'BRIEN, et A. YARIV, "Very high modulation efficiency of ultra-low threshold current single quantum well InGaAs lasers", *Electronics Letters*, vol. 29, p. 1525-6, 1993.
- [11] W. HOFMAN, N. H. ZHU, M. ORTSIEFER, G. BOHM, J. ROSSKOPF, L. CHAO, S. ZHANG, M. MAUTE et M. -C AMANN, "10 Gbit/s data transmission using BCB passivated 1.55 μm InGaAlAsP BTJ VCSELs", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 18, no. 2, p. 424-6, 2006.
- [12] J. A. LEHMAN, R. A. MORGAN, D. CARLSON, M. HAGEROTT CRAWFORD et K. D. CHOQUETTE, "High-frequency modulation characteristics of red VCSELs", *Electronics Letters*, vol. 33, no. 4, p. 298-300, 1997.
- [13] J. W. SCOTT, B. J. THIBEAULT, C. J. MAHON et L. A. COLDREN, "High modulation efficiency of intracavity contacted vertical cavity lasers", *Applied Physics Letters*, vol. 65, no. 12, p. 1483-5, 1994.
- [14] T.CAMPS , V.BARDINAL , C.BRINGER , C.AMAT , E.DARAN , G.ALMUNEAU , J.B.DOUCET , L.JALABERT , P.DUBREUIL , C.FONTAINE, "Micro-module d'émission 1.31 μm à 10Gbit/s multi-standards", *Projet RMNT OSA 131*, p. 1-13, Juin 2005.

Conclusion générale

Au cours de ce travail de thèse, nous nous sommes employés à atteindre un double objectif : optimiser le procédé de fabrication des VCSELS à diaphragme d'oxyde enterré élaborés au laboratoire, et optimiser l'intégration de la photodétection dans les lasers ainsi réalisés, pour étendre leurs capacités et potentialités d'application.

Dans le premier chapitre, nous avons tout d'abord décrit les marchés sur lesquels les VCSELS ont réussi à s'imposer, puis nous avons exposé les motivations des travaux de recherche que nous avons accomplis dans le cadre du projet RNRT OSA 131. Nous avons présenté un état de l'art des différentes méthodes de détection de la puissance émise dédiées aux applications nécessitant un monitoring de la puissance émise, en rappelant les principaux résultats publiés sur la détection latérale de l'émission spontanée.

Dans le second chapitre, nous avons présenté le concept de détection latérale qui a été simulée puis validé par des expérimentations sur des couches de VCSEL standard. Le mode fondamental est guidé par la cavité malgré l'absorption du signal d'émission spontanée au cours de la propagation vers le détecteur. La conception d'un composant émetteur à détecteur intégré a été présentée. L'analyse du courant de détection montre qu'il est composé d'un photocourant et d'un courant parasite lié à la conduction électrique dans la couche non intentionnellement dopée (dopage résiduel lié à la méthode de croissance épitaxiale). Nous avons proposé des solutions pour obtenir une photodétection plus efficace (exempte de conduction parasite) avec une détection après une section de cavité localement gravée. Les simulations sur cette approche montrent que le courant parasite est bien éliminé, mais qu'en contrepartie, le signal optique transmis est trop atténué pour être exploitable. Cette évaluation nous a conduit à abandonner cette approche. Lorsque la cavité est utilisée comme guide d'onde, nous avons proposé plusieurs solutions pour augmenter le signal détecté par rapport au courant parasite par une détection annulaire, ou en limitant le courant parasite à l'aide d'un contact Schottky, ou encore en augmentant la résistivité de la cavité par isolation par implantation ionique de Bore tout en tentant de préserver le guidage optique latéral.

Dans le troisième chapitre, les masques de fabrication des composants ont d'abord été présentés grâce auxquels trois différents types de composants peuvent être testés électriquement en régime continu et en régime hyperfréquence. Ensuite le procédé complet de fabrication a été décrit. La fabrication de ces composants a nécessité l'optimisation de plusieurs procédés en salle blanche. Tout d'abord, l'acquisition d'un bâti de gravure ICP a

demandé un fort investissement pour le développement de nouveaux procédés de gravure. Les paramètres de gravure plasma (puissances, débit et dilution des gaz) ont été optimisés afin d'obtenir conjointement un fond de gravure plat et des flancs de mesa inclinés à 80° (dans le but de faciliter la continuité de la métallisation). De plus, la métallisation ne peut plus être utilisée comme masque de gravure ICP (elle ne résiste pas à ce type de gravure à plasma de haute densité), on perd la possibilité d'auto centrage de l'électrode d'anode avec le mesa et par conséquent avec le diaphragme d'oxyde enterré. Différents métaux ont été testés afin d'observer si l'un d'entre eux présentait une meilleure tenue à la gravure. Finalement, la solution retenue consiste à protéger le métal à l'aide d'un film de fluorure de strontium (SrF_2). Nous avons aussi trouvé d'autres applications au SrF_2 : il est également utilisé pour la protection du centre des mesas et sert de couche d'arrêt lors de la gravure ICP du passivant. Enfin, le choix d'un collage thermique adapté entre le wafer de maintien et l'échantillon lors de la gravure ICP a été présenté. L'uniformité de la gravure a été évaluée selon l'emploi d'une graisse ou d'une cire de collage, ainsi que son élimination après gravure. Nous avons conclu sur la procédure à adopter selon le procédé technologique visé. Ensuite, le système d'oxydation thermique humide radiale (AlOx) a été perfectionné en vue d'une meilleure stabilité de cette étape clef dans la fabrication des VCSELs. Durant ce travail de thèse, nous avons bénéficié de l'amélioration du système de mélange contrôlé, et démontré son impact bénéfique sur les performances et la reproductibilité des caractéristiques des composants réalisés. L'oxydation a été calibrée afin d'obtenir un procédé plus reproductible et une stabilité des vitesses d'oxydation dans le temps. Par la suite, l'étape de passivation a été présentée. Une première étude a porté sur la mesure des contraintes induites par le type de passivant et les conditions de dépôt. Une seconde étude l'a ensuite complétée, en étudiant l'enchaînement des étapes de passivation, d'ouverture de passivant et de métallisation, afin d'obtenir une continuité du métal sur toute la hauteur des mesas. Enfin, nous avons testé sur des composants, l'effet de l'isolation électrique par implantation localisée de Bore, dans le but d'éliminer le courant de fuite au sein de la cavité entre émetteur et détecteur.

Les caractéristiques électriques de couches de test N.I.D (implantée et non implantée) ont été présentées et comparées. Nous avons constaté que le courant parasite a été fortement réduit par l'implantation. Ces résultats préliminaires montrent que l'implantation devrait permettre de réduire la composante du courant parasite par rapport au photocourant. L'absorption liée à la dégradation des propriétés du matériau lors de l'implantation, induit des pertes optiques responsable d'une atténuation significative de l'émission latéralement guidée. Pour tenter d'y remédier, ou du moins d'en minimiser les effets, nous avons procédé à un

recuit thermique à haute température. Cependant, un tel recuit à près de 600°C à ce niveau du processus de fabrication s'avère plus que délicat à mettre en œuvre et nous avons donc opté pour une température de recuit plus modérée (500°C), sans garantie sur la réduction de l'absorption correspondante.

Dans le dernier chapitre, nous avons présenté une caractérisation complète de nos composants émetteur/détecteur, en régime statique et en modulation rapide. Grâce au rapprochement de ces deux types de mesures, nous avons pu interpréter le comportement de ces composants en évaluant les limites et améliorations à amener dans les prochaines générations de composants. Les caractéristiques statiques du composant mettent en valeur le fait que le courant détecté présentait un profil conforme à nos attentes : on distingue clairement les cassures de la pente de la courbe du courant détecté correspondant respectivement au seuil et à l'extinction du laser. Entre ces deux points, la courbe est monotone croissante et donc adaptée pour l'application de contrôle de la puissance de sortie du VCSEL. De plus, nous avons comparé les effets de l'implantation ionique en comparant les caractéristiques statiques de composants implantés et non implantés. Le comportement statique du composant a ensuite été détaillé en identifiant et décrivant les quatre régimes de fonctionnement. Nous avons également mené une étude en température du composant émetteur/détecteur. Nous avons vu que la sensibilité du détecteur Schottky n'est pas altérée lorsque l'on augmente la température de fonctionnement jusqu'à une centaine de degrés. En effet, le fait que le photocourant et le courant parasite diminuent conjointement engendre un effet de compensation. Le spectre de l'émission de sortie du VCSEL a été caractérisé afin d'étudier le fonctionnement en régime monomode transverse de ces composants. Malgré une taille de diaphragme d'oxyde adapté à un comportement monomode, nous n'avons pu l'obtenir sur une plage importante de courant. Ceci étant certainement dû aux effets thermiques inhérents au petit diamètre de la zone active.

Enfin nous avons présenté les caractéristiques dynamiques des composants. Ces mesures optoélectroniques en hyperfréquences ont été réalisées au LAAS, grâce à la contribution du groupe CISHT, qui a mis en place les bancs de mesure haute fréquence sur les composants VCSEL (projet LAAS Opto-Hyper). Nous avons commencé par étudier les paramètres S en transmission et en réflexion du composant afin d'extraire la fréquence maximale de fonctionnement de nos composants. En terme de commande, le signal d'entrée peut être injecté avec seulement 50% de réflexion jusqu'à 1 GHz. En transmission, nous avons noté une fréquence de coupure entre 2 et 4 GHz, ce qui semble satisfaisant par rapport à la littérature. Le facteur d'efficacité de modulation de courant maximum a lui aussi été calculé afin de

quantifier les performances hyperfréquence des composants. Nous avons pu d'ailleurs remarqué que ceux-ci présentaient des facteurs variant du simple au triple, ce qui démontre la sensibilité des paramètres avec les procédés de fabrication. Ceci a été attribué au fait que la gravure plasma des mesas n'était pas suffisamment uniforme, malgré les précautions prises décrites dans le chapitre III. Des caractéristiques impulsionsnelles ont été présentées : le comportement des composants émetteur/détecteur a été étudié en envoyant des impulsions en courant d'une centaine de nanosecondes. Cette étude a permis de caractériser le temps de réponse du détecteur à contact Schottky.

Ce travail de thèse a permis d'évaluer les performances optiques et électriques de l'approche que nous avons proposée ainsi que des choix technologiques associés.

Les perspectives qu'ouvrent ces travaux porteront sur l'amélioration des conditions d'implantation ionique; et surtout sur l'insertion de structures à cristaux photoniques pour un guidage de l'émission latérale.

Les caractéristiques des composants VCSEL à détecteur intégré démontrés dans cette thèse montrent que l'application au monitoring est dors et déjà réalisable, avec des niveaux de signal utile capable d'être traités. L'utilisation de ces composants en instrumentation est ainsi possible, en particulier à travers des méthodes de mesure par réinjection optique pour lesquelles les modifications du comportement du VCSEL seraient directement identifiables par le détecteur associé.

Dans ce contexte, les briques technologiques déjà développées au cours de cette thèse (gravure ICP, oxydation humide, dépôts diélectriques, etc.), mais aussi les technologies émergentes comme la structuration de surface, la reprise d'épitaxie et la maîtrise fine du confinement optoélectronique par oxydation localisée sont essentielles pour étendre les possibilités d'intégration des VCSEL et diversifier leurs applications, un objectif qui constitue l'une des thématiques principales du groupe Photonique aujourd'hui.

Technologie et caractérisation de VCSELs à détection intégrée pour applications aux communications optiques et à l'instrumentation

Ce travail de thèse porte sur la conception, la fabrication et la caractérisation d'un composant intégrant un laser à cavité verticale (VCSEL) et un détecteur. En détectant l'émission latérale, qui peut être corrélée à l'émission stimulée du VCSEL, il est possible d'asservir la puissance moyenne émise (monitoring).

Afin de réaliser ces composants, plusieurs étapes technologiques de fabrication d'un VCSEL ont nécessité un développement et une optimisation spécifiques. Ainsi nous présentons les travaux réalisés dans le domaine de la gravure sèche assistée par plasma, de la métallisation, de l'oxydation thermique, de la passivation et de l'implantation ionique. Ce travail a permis d'obtenir un processus de fabrication plus fiable.

Le principe de base a été mis en évidence à l'aide de deux composants adjacents, l'un émetteur, et l'autre détecteur. Il consiste à observer l'évolution du photocourant détecté latéralement et de constater que même s'il n'évolue pas comme la puissance émise, présente des points singuliers correspondant respectivement au seuil et à l'extinction de l'émission laser. De plus, cette évolution du courant détecté latéralement est monotone croissante, ce qui permet d'y faire correspondre une seule valeur de la puissance émise.

Par la suite, cette détection intégrée a été améliorée par l'ajout d'un détecteur à contact Schottky à proximité du VCSEL émetteur. Ceci se traduit par l'obtention d'un dispositif compact, sensible, et entièrement compatible avec le procédé de fabrication et les couches épitaxiales standard. Cette solution générique présente l'avantage d'être transposable à d'autres longueurs d'onde (1,3 et 1,55 μm par exemple).

La caractérisation électrique de ce composant en régime continu a été réalisée, et a permis de confirmer l'amélioration des performances en détection. Est également démontré la robustesse de cette solution à des températures de fonctionnement élevées, jusqu'à 100°C. En régime impulsif, les temps de réponse mesurés autour de quinze nanosecondes démontrent la compatibilité de ce système avec des modulations de l'ordre du gigabit par seconde. Dans ce cadre, nous avons également étudié les caractéristiques hyperfréquences du composant.

Outre les systèmes de transmissions rapides, on peut envisager d'exploiter cette détection intégrée pour l'instrumentation, cela pour des signaux relativement rapides (sub-microseconde), par exemple dans une configuration de réinjection optique.

Mots clefs : semiconducteurs III-V, laser à cavité verticale émettant par la surface, microsystème optique, émission spontanée, photodétection en cavité verticale, détection intégrée, gravure sèche assistée par plasma, oxydation thermique humique, métallisation, passivation, implantation ionique, comportement hyperfréquence.

Integrated detection VCSELs technology and characterization for optical communication and instrumentation

This thesis work deals with the design, fabrication and characterization of a component which integrate a Vertical Cavity Laser (VCSEL) and a detector. By detecting the lateral emission, which can be correlated to the VCSEL stimulated emission, output power monitoring can be achieved.

In order to fabricate these components, several VCSEL fabrication processes steps have required specific optimizations. Thus, we present works made in the domain of the plasma etching, metallization, thermal oxidation, passivation and ionic implantation. This work allowed us to obtain a more reliable fabrication process.

The basis principle was highlighted using two adjacent components, one transmitting, the other detecting. It consists in observing the evolution of the laterally detected photocurrent and to note that even if he does not evolve like the emitted power, it presents singular points corresponding respectively to the threshold and the extinction of the laser emission. Moreover, this evolution of the laterally detected current is monotonous increasing, which makes it possible to make there correspond only one value of the emitted power.

Thereafter, this integrated detection was improved by the addition of a detector with Schottky contact near the emitting VCSEL. This results in obtaining a compact, sensitive, and entirely compatible device with the fabrication process and standard epitaxial layers. This generic solution has the advantage of being directly transferable to other wavelengths (1,3 and 1,55 μm for example).

The electrical characterization of this component in continuous mode was carried out, and made it possible to confirm the improvement of the performances in detection. The robustness of this solution at raised operating temperatures is also shown, until 100°C. In pulsed mode, the time response measured around fifteen nanoseconds show the compatibility of this system with modulations about the gigabit per second. Within this framework, we also studied the ultra high frequencies characteristics of the component.

Except the fast systems of transmissions, we can plan to exploit this integrated detection for the instrumentation, this for relatively fast signals (sub-microsecond), in an optical configuration of re-injection for example.

Keywords: III-V semiconductors, vertical cavity surface-emitting laser, optical microsystem, spontaneous emission, vertical cavity photodetection, integrated detection, dry etching assisted by plasma, wet thermal oxidation, metallization, passivation, ionic implantation, ultra high frequency behavior.