



HAL
open science

Vers l'intégration monolithique d'une micro-optique active en polymère sur VCELS

Benjamin Reig

► **To cite this version:**

Benjamin Reig. Vers l'intégration monolithique d'une micro-optique active en polymère sur VCELS. Electronique. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2011. Français. NNT : . tel-00709574

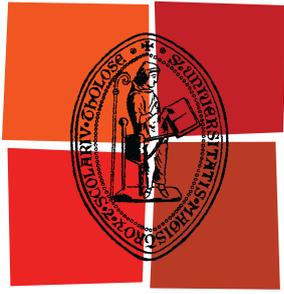
HAL Id: tel-00709574

<https://theses.hal.science/tel-00709574>

Submitted on 19 Jun 2012

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.



Université
de Toulouse

THÈSE

En vue de l'obtention du
DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Université Toulouse III Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier)

Discipline ou spécialité :

Optoélectronique, technologie et composants de l'électronique

Présentée et soutenue par :

Benjamin REIG

le : mardi 6 décembre 2011

Titre :

Vers l'intégration monolithique d'une micro-optique
polymère active sur VCSEL

Ecole doctorale :

Génie Electrique, Electronique et Télécommunications (GEET)

Unité de recherche :

LAAS-CNRS groupe Photonique / N2IS

Directeur(s) de Thèse :

Dr. Véronique Bardinal et Pr. Thierry Camps

Rapporteurs :

Dr. Christophe Gorecki

Dr. Arnaud Garnache

Membre(s) du jury :

Dr. Sophie Bouchoule

Dr. Christophe Levallois

Pr. Thierry Bosch

Pr. Jean-Guy Tartarin

Remerciements

Ces lignes vont me permettre de témoigner ma reconnaissance à toutes les personnes qui m'ont permis de mener à bien la thèse présentée dans ce manuscrit.

Ce travail de thèse a été effectué au LAAS-CNRS de 2008 à 2011, je tiens à exprimer ma gratitude à Raja Chatila, Jean-Louis Sanchez et Jean Arlat, directeurs successifs du laboratoire pour m'avoir accueilli dans cet établissement durant cette période.

Je remercie Christophe Gorecki et Arnaud Garnache d'avoir accepté, en tant que rapporteur, de juger mon travail. Je remercie également Jean-Guy Tartarin pour avoir bien voulu présider mon jury. Enfin, je remercie Sophie Bouchoule, Christophe Levallois et Thierry Bosch d'avoir également accepté de faire partie de mon jury de soutenance.

Je remercie tout particulièrement Véronique Bardinal et Thierry Camps qui m'ont permis de réaliser ces travaux grâce notamment à leur disponibilité, leur envie de trouver et leurs qualités humaines. Je considère avoir pu profiter d'un encadrement de qualité qui m'ont permis d'acquérir une rigueur professionnelle et scientifique mais également un enrichissement personnel à leur contact: pour tout cela MERCI.

Mes remerciements s'adressent également à Françoise Lozes pour m'avoir accueilli au sein du groupe Photonique ainsi qu'à tous les permanents du groupe pour leur convivialité dont ils ont su faire preuve durant cette période.

Je tiens également à remercier tout le service TEAM avec qui j'ai passé beaucoup de temps, notamment Jean-Baptiste Doucet pour son aide pour la fabrication de gouttes en polymère et Emmanuelle Daran pour son expertise en caractérisation. Un grand merci à David Bourrier, Laurent Mazenq, et Adrian Laborde pour leur aide en photolithographie et sur la SU-8. Merci également à nos métalleux, Sébastien Pinaud et Ludovic Salvagnac. Merci à Frank Carcenac pour nos discussions, scientifiques et amicales. Merci à tous ces gens qui malgré leurs plannings chargés prennent toujours le temps de répondre présents.

Je tiens à adresser mes remerciements à toutes les personnes qui m'ont aidé dans le cadre des différentes collaborations. Dans le cadre du projet région FIAB SU-8, je remercie : Maëlen Aufray, Claire Tendero et Alain Lamure du CIRIMAT, Djemel Lellouchi et Clovis Lataste de Novamems et Stéphane Mariojouis d'EADS Astrium. Je remercie également Olivier Soppera rencontré dans le cadre de l'ANR NirOptics.

Un grand merci à toutes les personnes croisées au laboratoire, en conférence ou encore en formation CIES qui m'ont aidé au cours de ces trois années. De manière non exhaustive : Nicolas Monnereau, Emilie Leynia de la Jarrige et Jérôme Lubin, compagnon d'écriture les week end et de détente lors des soirées ;) , Laurent Assouere pour les matchs de rugby et les 80000 DPS, Emmanuel Marcault, Jonathan Boucher, Florent Seichepine, Maëva Collet, Stéphane Pinon, Catalin Codreanu, Vincent Picot, Guillaume Taton, Aliko Tsopela, Julien Juyon, Amel Ali Slimane, Lamine Ourak, Pierre-Henri Merrer, Antoine Delmas pour les discussions au coin café, en salle blanche, devant un ordi ou encore lors des séances d'escalade. Je remercie également les autres thésards et stagiaires du groupe photonique: Julien, Kristel, Youness, Fares, Brice, ... et nos prédécesseurs que nous avons eu la chance de rencontrer: Docteurs Mouss', Kostas, Eric, Souad, Alexandre et Olivier.

J'ai également eu la chance de découvrir la recherche en Corée du Sud, pour cela merci au professeur Seung Lee, et à son équipe Seok Woo Lee, Lee Chang Hwa et Changho Gook.

Enfin, comme la vie ne se limite pas au laboratoire, je remercie mes amis Christophe, Yoann, Aurore, Guillaume, Julien, Cyril, Hugo, Pierre, Simon, Nicolas, Mylène et tous les autres qui m'ont sorti de mon bureau pour aller naviguer ou sortir.

Finalement, je remercie ma famille pour leur soutien indéfectible.

Sommaire :

Introduction générale..... 1

Chapitre I Contexte et objectifs de la thèse : du VCSEL au microsysteme optique..... 5

1. Propriétés et applications des VCSELS	5
1.1 Principe	5
1.2 Historique.....	6
1.3 VCSELS à cavité externe	7
1.4 Méthodes de confinement transverse	8
1.5 Configurations géométriques pour l'émission	9
1.6 Avantages des VCSELS	9
1.7 Applications des VCSELS.....	10
1.8 Intégration des VCSELS dans les capteurs optiques	11
1.9. Recherches actuelles et objectifs de la thèse	12
2. Mise en forme des faisceaux VCSELS : besoins et contraintes	13
2.1 Rappels sur les faisceaux gaussiens	13
2.2 Divergence des VCSELS.....	15
2.3 Besoins pour les communications optiques par fibre	16
2.4 Besoins pour les capteurs optiques.....	17
2.5 Contraintes sur la géométrie et la technologie de fabrication	17
3. Micro-optique passive	19
3.1 Assemblage hybride de lentilles passives au-dessus d'un VCSEL.....	19
3.2 Intégration dans la structure semi-conductrice du VCSEL	20
3.3 Méthodes d'intégration post-process de lentille en polymère sur VCSELS	22
4. Etat de l'art sur la micro-optique active sur VCSEL	23
4.1 MOEMS hybridé sur VCSEL	24
4.2 Technologies pour les VCSELS accordables.....	25
5. Conclusions et approche retenue	27

Chapitre II Conception d'une micro-optique active intégrée sur VCSEL 31

1. Choix du matériau	31
----------------------------	----

2.	Choix de l'actionnement.....	32
2.1	Commande piézo-électrique.....	33
2.2	Commande électromagnétique.....	34
2.3	Commande électrostatique.....	35
2.4	Commande électro-thermique.....	36
2.5	Commande pneumatique.....	37
2.6	Commande par électromouillage de lentilles liquides.....	39
2.7	Actionnement électro-optique à base de cristaux liquides.....	40
2.8	Conclusions sur l'actionnement.....	41
3.	Choix de la géométrie.....	42
4.	Conception optique.....	43
4.1	Lentille fixe pour la collimation.....	44
4.2	Lentille mobile.....	46
5.	Simulations thermo-mécaniques sous Comsol Multiphysics.....	48
5.1	Définition de la structure élémentaire.....	49
5.2	Rappels physiques liés à la thermique.....	50
5.3	Optimisation de la géométrie.....	51
5.4	Synthèse de la simulation thermo-mécanique.....	55
6.	Conclusions.....	55

Chapitre III Polymère SU-8 pour la micro-optique sur VCSELs 59

1.	Rappels sur les polymères.....	59
2.	Photopolymère SU-8.....	61
2.1	Présentation.....	61
2.2	Caractéristiques et avantages de la résine SU-8.....	62
2.3	Principe de mise en œuvre.....	63
3.	Etude de la fiabilité de la SU-8.....	65
3.1	Données disponibles.....	65
3.2	Projet FIAB SU-8.....	66
3.3	Plan d'expérience et équipement utilisé pour les vieillissements.....	66
3.4	Echantillons étudiés.....	67
3.5	Evolution des propriétés optiques.....	69
3.6	Evolution des propriétés d'adhérence.....	76
3.7	Bilan et conclusions.....	80

4.	Conclusions	83
Chapitre IV Réalisation technologique de microlentilles intégrées sur VCSELS		85
1.	Fabrication de VCSELS à 850nm	85
2.	Micro-optique passive sur VCSELS	88
2.1	Fabrication de piédestaux épais en SU-8 sur petites surfaces	88
2.2	Fabrication de microlentilles à l'aide de micro-plumes robotisées	89
2.3	Auto-centrage des lentilles	93
3.	Micro-optique active	102
3.1	Réalisation de la membrane suspendue en SU-8.....	102
3.2	Fabrication de l'électrode chauffante métallique	109
3.3	Dépôt de microlentilles sur membranes	115
3.4	Intégration de la microlentille active sur VCSEL	116
4.	Conclusions sur l'élaboration technologique d'une micro-optique passive et active intégrée sur VCSELS	117
Chapitre V Caractérisation des dispositifs réalisés		121
1.	Banc de caractérisation.....	121
2.	Caractérisations des VCSELS à lentilles statiques.....	122
2.1	Effet de la lentille sur les caractéristiques du VCSEL	123
2.2	Divergence du VCSEL.....	123
2.3	VCSELS à micro-pointes auto-alignées	125
3.	Caractérisation du MOEMS	128
3.1	Caractérisation électro-thermique : mesure de la résistivité thermique.....	128
3.2	Caractérisation électro-mécanique : mesure du déplacement de la membrane	131
3.3	Caractérisation optique du MOEMS en fonctionnement	134
4.	Conclusions	135
Conclusions et perspectives		139
Références Bibliographiques		145
Annexe A Modèles d'Owens-Wendt et de Good.....		157

Introduction générale

Depuis plus de quarante ans, les lasers à semi-conducteurs connaissent un très fort développement et sont désormais exploités dans de nombreux domaines allant des communications optiques (liaisons optiques pour réseaux locaux) à des applications plus grand public (souris d'ordinateur, scanner de codes-barres, pointeurs laser,...) ou très spécifiques tels que le biomédical ou l'instrumentation.

Dans ce contexte, les VCSELs (Vertical Cavity Surface Emitting Lasers) occupent une place de choix depuis leur invention en 1977 et ont suscité un engouement important et des recherches considérables. En effet, leurs qualités (compacité, faible consommation, bande passante étendue, bas coût, comportement monomode) en font une source de plus en plus privilégiée dans nombre d'applications, notamment grâce aux améliorations technologiques apportées au cours des années.

Toutefois, la problématique du contrôle de la forme du faisceau reste posée, car ce point est incontournable pour améliorer l'intégration de ces composants dans les systèmes. En effet, bien que les VCSELs possèdent naturellement un faisceau gaussien relativement peu divergent et circulaire, l'association avec une microlentille peut permettre la collimation du faisceau mais aussi le contrôle de son plan de focalisation et/ou de sa direction de propagation.

C'est dans ce contexte que se sont déroulés les travaux présentés dans ce mémoire : ils visent à proposer des solutions innovantes pour intégrer collectivement des microsystèmes optiques passifs et actifs sur VCSELs. En particulier, nous nous sommes fixés comme objectif ambitieux la conception et la réalisation d'un MOEMS (Micro Optical Electrical Mechanical System) pour associer des réseaux de microlentilles actives sur des matrices de VCSELs.

Ce manuscrit s'articule autour de cinq chapitres:

Le chapitre I décrit le contexte général et les objectifs de la thèse. Il débutera par une présentation du contexte applicatif, dans lequel les liaisons optiques occupent une part importante du marché, mais dans lequel commencent également à émerger des microsystèmes d'analyse à lecture optique faisant appel aux VCSELs comme sources laser compactes. Après un bref rappel sur le fonctionnement du VCSEL et sur ses avantages, nous identifierons les principaux verrous actuels pour l'intégration de ces sources dans les systèmes optiques compacts, bas coût et performants et les besoins en termes de correction du faisceau. Le contrôle du faisceau est certes un point important pour les liaisons optiques, mais nous verrons surtout qu'il devient crucial pour des systèmes à lecture optique. Pour répondre à ces défis, nous présenterons les solutions proposées dans la littérature pour l'association de micro-optiques sur VCSELs, en soulignant pour chacune les points forts et les limites, notamment en termes de simplicité de mise en œuvre et de compatibilité avec une intégration en post-processing sur matrices denses de VCSELs. Dans cet état de l'art, seront également considérés les VCSELs accordables qui mettent en jeu des MOEMS intégrés, de conception

Introduction générale

proches de celles que nous souhaitons développer pour le contrôle dynamique du faisceau. Sur la base de ces analyses, nous présenterons l'approche que nous avons choisie et qui s'appuiera sur des technologies polymères intégrées, réalisées à basse température, et donc compatibles avec une réalisation collective directement sur le wafer VCSEL.

Le second chapitre présentera plus explicitement notre approche et les conceptions que nous avons menées pour définir des micro-optiques passives et actives sur VCSELS. Ce chapitre débute par un exposé de nos motivations pour le choix de la filière polymère, que ce soit pour les lentilles statiques ou dynamiques. Pour ce qui concerne l'aspect actif, nous dressons ensuite un état de l'art des différents types d'actionnement d'éléments micro-optique proposés dans la littérature, ce qui nous permettra de justifier le choix de l'actionneur retenu. Puis, nous exposons les choix de géométrie que nous avons effectués pour la réalisation de nos systèmes optiques à base de polymères. En effet, nous proposons un système formé d'un piédestal et d'une lentille hémisphérique pour la collimation passive (Projet MIOPY), et une membrane suspendue comportant une microlentille similaire en surface et associée à un actionneur électro-thermo-mécanique pour le contrôle actif du faisceau. Nous présentons ensuite l'étude optique que nous avons conduite pour le dimensionnement des lentilles (position et géométrie), puis la simulation thermo-mécanique menée pour optimiser le dimensionnement du MOEMS et obtenir un déplacement vertical maximal du plan de la lentille. L'ensemble de ces études intègre les contraintes liées à l'encombrement possible (espacement entre VCSELS) et aux limites technologiques.

Le troisième chapitre décrira les propriétés du polymère retenu pour la fabrication du piédestal et de la membrane suspendue. Nous présenterons dans ce cadre l'étude de fiabilité que nous avons menée sur ce matériau dans la perspective d'une utilisation industrielle, dans le cadre du projet FIAB-SU-8. L'analyse du comportement de ce polymère soumis à un vieillissement en atmosphère humide et chaude sera exposée et discutée.

Le quatrième chapitre est consacré à la description des procédés de réalisation technologique développés pour mettre en œuvre les solutions identifiées après la phase de simulation. Le procédé des VCSELS émettant à 850nm fabriqués au LAAS est décrit. Puis, nous exposons les méthodes employées pour réaliser une micro-optique passive de collimation sur VCSELS. Ceci impose tout d'abord la réalisation uniforme de microstructures épaisses en SU-8 (piédestaux) sur des échantillons VCSELS de taille réduite et nous décrirons donc la solution que nous avons mise en place pour atteindre ce but. Nous détaillons ensuite la méthode originale que notre équipe a proposée pour la réalisation de microlentilles à l'aide de micro-plumes robotisées. La problématique de l'alignement optique et donc du centrage de la lentille vis-à-vis du VCSEL est ensuite soulevée. Nous passerons en revue les solutions que nous avons évaluées, telle que l'exploitation de forme cylindrique pour le piédestal ou encore l'inscription de cuvettes en surface de la SU-8. Nous détaillons également une approche originale que nous avons développée sur la photo-polymérisation NIR pour l'écriture autocentrée de l'élément micro-optique sur le VCSEL (projet NIR OPTICS). Concernant la partie MOEMS, nous présentons les différentes voies que nous avons testées pour fabriquer

Introduction générale

une membrane suspendue en polymère et présentons une étude sur les métaux susceptibles de convenir pour réaliser l'électrode chauffante. Le problème de la continuité du contact électrique entre le haut et le bas de l'actionneur polymère est également traité. Enfin, nous concluons sur le procédé complet de fabrication du MOEMS, son optimisation et son intégration sur plaque VCSEL.

Le cinquième et dernier chapitre est dédié aux caractérisations électriques et optiques des VCSELS à lentilles intégrées et des MOEMS que nous avons réalisés. Nous présenterons tout d'abord les résultats de collimation passive sur des systèmes VCSEL à microlentille sur piédestal et concluons sur la validité de notre conception optique (design des microlentilles : gap et géométrie) et sur la pertinence de notre technologie de fabrication. Puis, nous présenterons les caractérisations optiques des premières micro-pointes auto-alignées réalisées à l'aide du photopolymère NIR sur des VCSELS à 760nm. Viendront ensuite les caractérisations électrique, thermique et mécanique de la micro lentille active (MOEMS) réalisée à ce jour sur des substrats de test (verre et silicium oxydé). Nous exposerons les caractéristiques de l'électrode chauffante, ainsi que les performances que nous avons obtenues sur le déplacement du MOEMS en fonction de la puissance appliquée. Ces mesures seront analysées pour conclure sur la faisabilité et les potentialités de cette filière générique de MOEMS polymère.

Introduction générale

Chapitre I Contexte et objectifs de la thèse : du VCSEL au microsysteme optique

Ce premier chapitre décrit le contexte et les objectifs dans lesquels s'inscrivent nos travaux sur la micro-optique passive et active sur VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser). Nous commencerons par rappeler brièvement le fonctionnement d'un VCSEL, ses différentes configurations, ainsi que les avantages et applications de ce composant. Nous exposerons ensuite les principaux verrous actuels pour l'intégration de ces sources dans les systèmes optiques et en particulier les besoins en termes de contrôle passif ou actif des propriétés du faisceau pour les capteurs optiques. Nous passerons ensuite en revue les différentes solutions proposées dans la littérature pour répondre à ces besoins. Nous verrons que ces méthodes mettent en jeu des éléments micro-optiques hybridés sur le composant ou encore intégrés soit dans le composant soit sur sa surface. Ceci nous permettra d'exposer nos motivations pour le développement d'un nouveau type de microsysteme optique à base de polymères sur VCSELS.

1. Propriétés et applications des VCSELS

1.1 Principe

Le VCSEL est un laser à semiconducteur qui se distingue des diodes laser conventionnelles par sa construction verticale (figure 1.1). Un VCSEL est constitué d'une zone active, siège de l'émission, entourée de deux Réflecteurs de Bragg distribués (DBRs). La source d'excitation peut être soit une injection électrique via deux électrodes, amenant le courant électrique jusqu'à la zone de gain au travers des DBRs dopés p et n, soit un pompage optique qui va directement injecter des photons dans la zone active. Cette zone est une cavité résonnante non dopée (intrinsèque), composée de boîtes ou de puits quantiques, dans lesquels va avoir lieu la recombinaison entre les électrons et les trous provoquant l'émission spontanée de photons. En faisant des allers-retours dans la cavité, les photons ainsi générés vont être amplifiés par émission stimulée. Pour obtenir l'effet laser, les pertes de la cavité et des miroirs doivent être inférieures au gain optique. Dans un VCSEL, ce dernier est faible en raison de la faible épaisseur de la cavité (épaisseur optique égale en général à la longueur d'onde). Pour compenser celui-ci, des miroirs de très haute réflectivité sont donc nécessaires. Les DBRs sont constitués de plusieurs dizaines de périodes composées de couches d'indice alternés et d'épaisseur quart d'onde qui permettent d'atteindre plus de 99% de réflectivité. La réflectivité maximale en incidence normale du miroir pour un nombre N de périodes s'exprime en effet à la longueur d'onde du centrage du miroir par la relation suivante [Coldren, 1995]:

$$R_{max} = \left[\frac{1 - \frac{n_s(n_1)}{n_o(n_2)}^{2N}}{1 + \frac{n_s(n_1)}{n_o(n_2)}^{2N}} \right]^2 \quad [1.1]$$

où n_s , n_o , n_1 et n_2 sont respectivement les indices de réfraction du substrat, du milieu incident et des indices des couches de bas et haut indice.

Le faisceau laser est émis verticalement, en général à travers le miroir supérieur qui possède une réflectivité légèrement inférieure à celle du miroir inférieur et sur lequel est déposée une électrode annulaire.

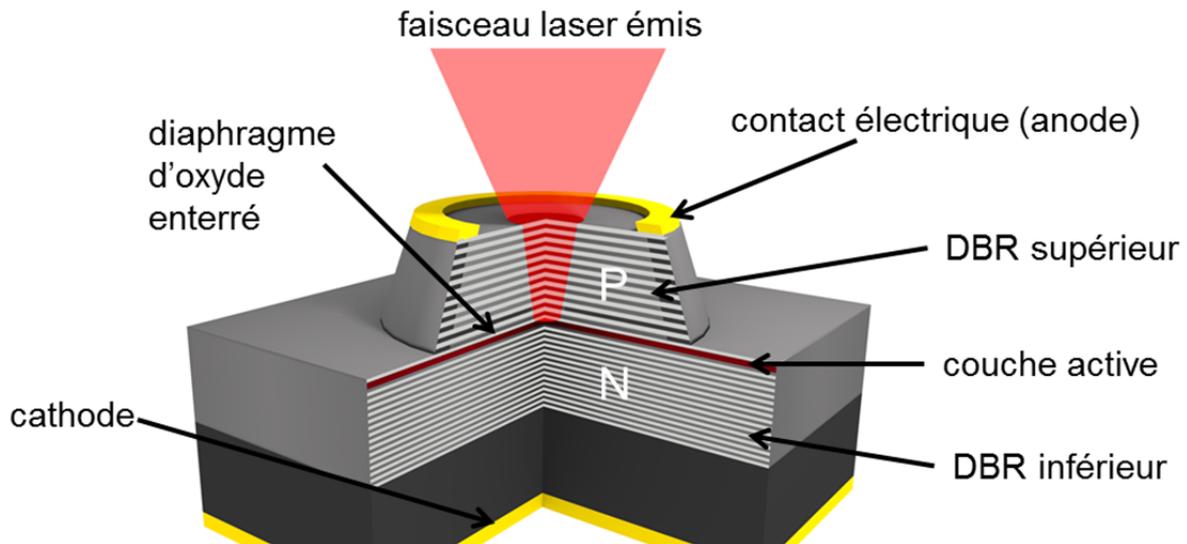


Figure 1.1 Vue en coupe d'un VCSEL monolithique standard à diaphragme d'oxyde enterré

1.2 Historique

Kenichi Iga a été le premier à proposer le concept d'émission surfacique avec une géométrie verticale (figure 1.2). Son équipe a développé deux ans plus tard le premier laser émettant par la surface fonctionnant à basse température ($T=77K$) et en régime pulsé [Soda, 1979]. Ce premier VCSEL a été réalisé sur substrat InP avec des puits quantiques en GaInAsP entourées de simples miroirs métalliques.



Figure 1.2 Concept du VCSEL proposé par K.Iga en 1977

Le premier laser émettant par la surface à base de GaAs/GaAlAs fonctionnant à température ambiante a été ensuite conçu en 1984 [Iga, 1984]. Cependant, il faudra attendre 1988 pour que le premier VCSEL à base GaAs avec des puits quantiques de GaInAs voit le jour, conduisant à des composants fonctionnant à température ambiante et en régime continu

[Koyama, 1988]. Cela a été rendu possible notamment grâce aux avancées technologiques dans les techniques de dépôts par épitaxies par jets moléculaires et grâce à l'utilisation de puits et de boîtes quantiques pour les zones de gain [Kroemer, 1982]. De nombreuses autres améliorations se sont ensuite succédées : les deux avancées majeures étant d'une part sur l'ingénierie de diagramme de bandes dans les réflecteurs de Bragg distribués et d'autre part l'insertion d'un diaphragme d'oxyde enterré, ce qui a permis de fiabiliser le composant pour autoriser un transfert industriel et une production de masse à bas prix. Actuellement, la technologie la plus mature est basée sur la filière GaAs/GaAlAs sur substrat GaAs pour l'émission dans le proche infra-rouge, entre 850 nm et 1 μ m. Ces alliages ternaires III-V présentent un très bon accord de maille, une différence d'indice optique élevée ($n_{\text{GaAs}}=3.495$, $n_{\text{AlAs}}=2.95$), ce qui a permis de limiter le nombre de couches dans les miroirs de Bragg et de gérer les problèmes de conduction électrique et thermique. D'autres familles de composés ternaires ou quaternaires III-V (à base de phosphures, d'antimoniures ou de nitrures, sur substrats d'InP, de GaSb ou de GaN...) ont été et sont toujours explorés pour atteindre des performances équivalentes dans le domaine des longueurs d'onde télécom, du visible, ou du moyen infrarouge. Enfin, les avancées technologiques liées au VCSEL ont également donné naissance à de nombreux autres dispositifs de géométries proches, dont les VCSELs multifonctionnel (modulation, détection, double émission) ou encore les VECSELs (pour Vertical-External Cavity Surface-Emitting Lasers) ou lasers à cavité externes.

1.3 VCSELs à cavité externe

Dans un VECSEL, il existe un espace libre entre la zone active et le miroir supérieur, de forme concave, afin d'étendre la longueur de la cavité résonante (figure 1.3).

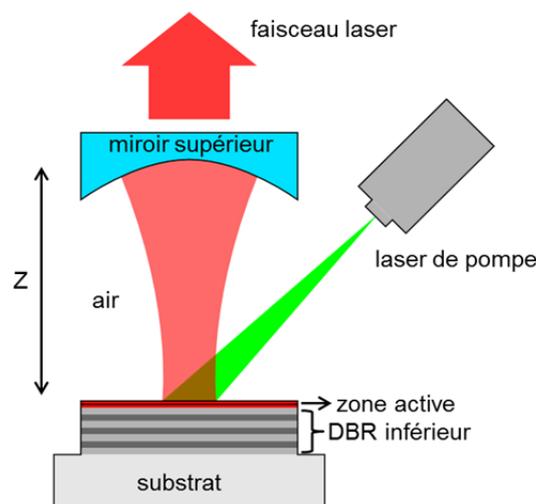


Figure 1.3 Schéma de principe d'un VECSEL

Cette configuration permet d'obtenir un fonctionnement monomode avec une cohérence spatiale et temporelle élevées, ainsi que l'émission de fortes puissances par rapport aux VCSELs standard. Le pompage optique du milieu à gain permet en effet un fonctionnement à plus haute puissance limitant les problèmes d'échauffement dus au pompage électrique généralement utilisé dans les VCSELs standards. En raison de leur cavité beaucoup plus longue, les VECSELs sont connus pour posséder une faible divergence, un

faisceau circulaire de très grande qualité, par limitation des effets de diffraction. De plus, la longueur d'onde de ce type de structure peut être ajustée par sa conception [Fan, 2006]. Ce type de structure est idéal pour la génération d'impulsions ultra-courtes [Tropper, 2004]. Les VCSELS permettent aussi d'exploiter des effets optiques tels que le doublage de fréquence [Hastie, 2006] pour atteindre une longueur d'onde différente de celle du pompage (passage de 675 à 338 nm).

Nous allons maintenant nous focaliser sur les composants monolithiques à injection électrique, sur lesquels notre équipe travaille depuis de nombreuses années, et décrire les différentes configurations possibles pour ces composants.

1.4 Méthodes de confinement transverse

La technique de confinement latéral du courant employée pour fabriquer les VCSELS à injection électrique est un point clef pour obtenir des sources laser performantes. Trois principales méthodes de confinement transverse ont été développées successivement (figure 1.4) :

- l'implantation ionique consiste à créer des défauts cristallins localisés pour réaliser une zone amorphe isolante confinant les lignes de courant dans la zone non implantée [Yang, 1992]. Néanmoins cette méthode ne confine pas les photons émis. De plus, la création de ces défauts provoque des pertes optiques.

- la gravure d'un mesa au niveau du miroir supérieur permet de localiser l'injection et d'obtenir un confinement optique par l'indice [Saito, 1996]. Cependant ce procédé entraîne des pertes électriques sur les flancs, des pertes optiques sous l'anneau métallique pour les tailles faibles de zone active, ainsi qu'une mauvaise dissipation thermique.

- la définition d'un diaphragme d'oxyde enterré par oxydation thermique humide d'une couche riche en Aluminium près de la cavité est la technique de confinement la plus efficace. En effet, elle permet un confinement à la fois optique et électrique pour des zones actives de taille réduite et par conséquent d'éliminer les modes laser d'ordre supérieur [Huffaker, 1994]. Les VCSELS à diaphragme d'oxyde sont donc les plus performants car ils permettent d'obtenir des courants de seuil faible (<mA) et des fonctionnements monomodes, cependant c'est la technique la plus complexe des trois à réaliser. Notre équipe travaille depuis de nombreuses années sur ce procédé, sur sa maîtrise [Almuneau, 2008] ainsi que sur son extension à d'autres filières [Laaroussi, 2011].

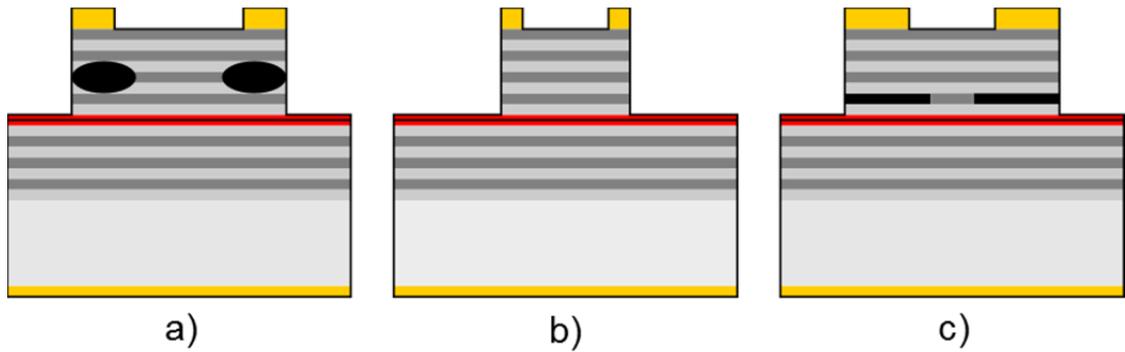


Figure 1.4 Schéma des structures de VCSELs communs avec différentes techniques de confinement, a) par implantation de protons, b) par gravure de méssa c) par diaphragme enterré d'oxyde d'aluminium (AlOx).

1.5 Configurations géométriques pour l'émission

Il existe deux configurations de VCSELs monolithiques: les « top-emitters » émettant à travers le miroir supérieur et les « bottom-emitters » dans lesquels la lumière traverse le miroir inférieur et le substrat (figure 1.5). Dans ce cas, il est bien sûr nécessaire d'utiliser un substrat transparent à la longueur d'onde du laser. L'électrode supérieure couvre alors toute la surface du miroir et est généralement en contact avec un dissipateur thermique, ce qui permet de limiter les phénomènes liés à l'auto-échauffement, souvent préjudiciables à l'émission laser sur de larges surfaces compte tenu du niveau de densité de puissance nécessaire pour les VCSELs (plusieurs kA/cm²). Cette approche permet donc l'émission de fortes puissances (plusieurs centaines de mW à plusieurs W).

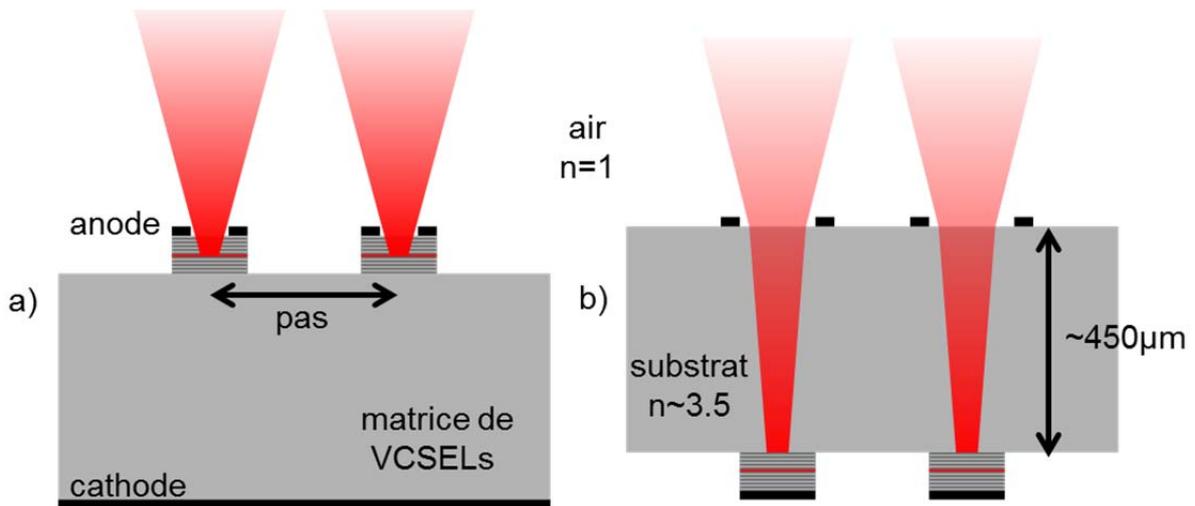


Figure 1.5 a) VCSELs top-emitting et b) VCSELs bottom-emitting

1.6 Avantages des VCSELs

La géométrie spécifique des VCSEL leur confère des propriétés particulières. Ainsi leur cavité courte permet d'obtenir par construction un seul mode longitudinal. Des techniques de confinement transverse (cf. paragraphe précédent) peuvent être de plus mises en

œuvre pour obtenir un faisceau monomode transverse, de forme gaussienne. Grâce à la forte réflectivité des miroirs et aux progrès des technologies d'oxydation enterrée, le VCSEL peut présenter des densités de seuil laser faibles ($\sim 1\text{kA}/\text{cm}^2$) et des rendements de puissance élevés (50%).

Par ailleurs, ces sources émettent des faisceaux circulaires, symétriques et de divergence relativement faible (figure 1.6). On peut donc plus facilement les corriger et/ou les coupler avec une fibre optique. L'émission par la surface permet en outre de tester les composants sur plaque et de réaliser facilement des matrices de composants émettant en parallèle. Enfin, la fréquence de coupure de ces composants peut dépasser 10 GHz, ce qui peut être mis à profit pour la modulation de signaux de communication optique ($>20\text{ Gbits/s}$).

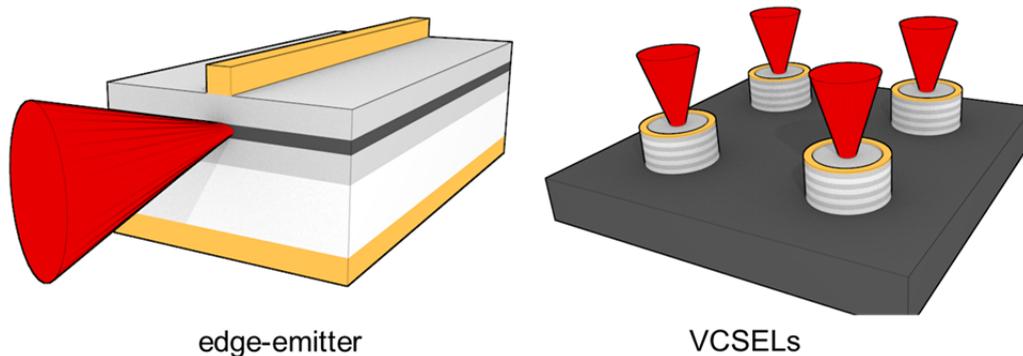


Figure 1.6 Comparaison VCSEL/ diode laser par la tranche

1.7 Applications des VCSELs

Les communications optiques occupent une place de plus en plus importante depuis l'arrivée d'internet dans la vie quotidienne, notamment avec le déploiement de la fibre optique, d'abord entre les centres téléphoniques et maintenant directement chez le particulier. Dans ce domaine, les premières utilisations commerciales des VCSELs commencent à la fin des années 90 pour remplacer les LED dans les systèmes de communications optiques (liaisons Ethernet). Les VCSELs sont aujourd'hui utilisés dans les réseaux à courte et moyenne distance (de quelques mètres à quelques dizaines de kilomètres) pour faire transiter les informations dans les fibres [Nakagawa, 2008], grâce à leur facilité de couplage et de modulation à haut débit (20 Gbit/s).

De plus, on retrouve les VCSELs dans des domaines d'applications très diversifiés [Iga, 2008] allant de l'instrumentation [Szeda, 2006] au stockage optique [Mitsuhashi, 1997] en passant par l'impression laser [Mukoyama 2008]. Les VCSELs sont également utilisés dans les lecteurs CD, DVD et maintenant Blu-Ray comme systèmes de lecture des données, car l'émission par la surface permet la réalisation d'un système de lecture de données simple à fabriquer, et donc une diminution des coûts de fabrication. Des applications émergentes dans le domaine des capteurs optiques sont également apparues ces dernières années.

1.8 Intégration des VCSELs dans les capteurs optiques

Actuellement, on constate une avancée notable de l'exploitation des VCSELs dans le domaine de la détection, de l'instrumentation et de la biologie. On peut voir sur la figure 1.7 et 1.8 des illustrations de ces applications. Les VCSELs commencent ainsi à être exploités dans les capteurs de déplacement, tels que ceux utilisés dans les souris optiques, ou encore dans les systèmes embarqués de mesure de distance (télémètres) [Perchoux, 2007]. Les possibilités de détection interne par effet de rétro-injection optique sont en effet des atouts supplémentaires pour le choix de sources VCSELs.

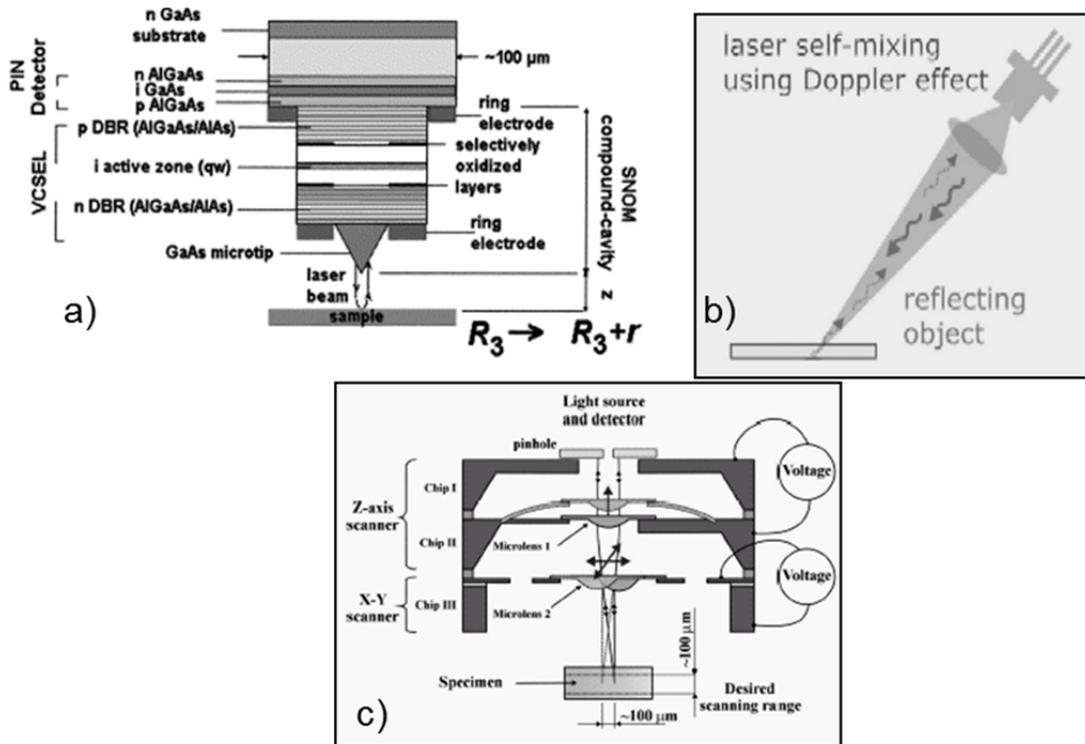


Figure 1.7 Exemple d'utilisation de VCSELs pour l'instrumentation, a) Microscope SNOM basé sur la réinjection optique dans un VCSEL [Bargiel, 2006], b) Capteur de déplacement basé sur la même idée [Perchoux, 2007] c) Microscope confocal miniature à base de sources VCSEL à détecteur intégré [Gorecki, 2007]

Des architectures de microscopes miniatures à base de source VCSELs ont été également proposées [Gorecki, 2007] ainsi que l'exploitation de VCSELs pour l'analyse d'espèces atomiques telles que les gaz présents dans l'atmosphère (absorption généralement comprise entre 0.7 et 3 μ m) [Bond, 007] ou encore des espèces chimiques dans des laboratoires sur puce (lab-on-chip). En effet, la facilité d'association des matrices de VCSELs avec des réseaux de microcanaux fluidiques leur confère des avantages supplémentaires pour l'analyse biologique. Ainsi, plusieurs équipes ont étudié l'analyse de liquides dans des canaux positionnés au-dessus [Thrush, 2004] ou à l'intérieur de la cavité, que ce soit à l'intérieur d'un VCSEL [Gourley, 2000 ; Debernardi, 2011], ou en gravant le DBR supérieur d'un VCSEL monolithique [Samakkulam, 2006]. Enfin, des démonstrations de pinces optiques matricielles à base de barrettes de VCSELs ont également été proposées, ouvrant de nouvelles perspectives pour ces sources dans le domaine de la biophotonique [Kroner, 2008].

Pour ces nouveaux champs d'applications, les VCSELS répondent parfaitement aux besoins en composants bas coût et faible consommation. En général la distance de travail est assez courte et la longueur d'onde n'est plus limitée à 1.3 ou 1.5 μm comme pour les télécommunications. Par conséquent, on peut utiliser les filières technologiques matures telles que les VCSELS GaAs pour fabriquer et concevoir des sources adaptées. Toutefois, les VCSELS seront d'autant plus intégrables dans ces systèmes que la forme de leur faisceau sera adaptée ou adaptable sans optique externe supplémentaire.

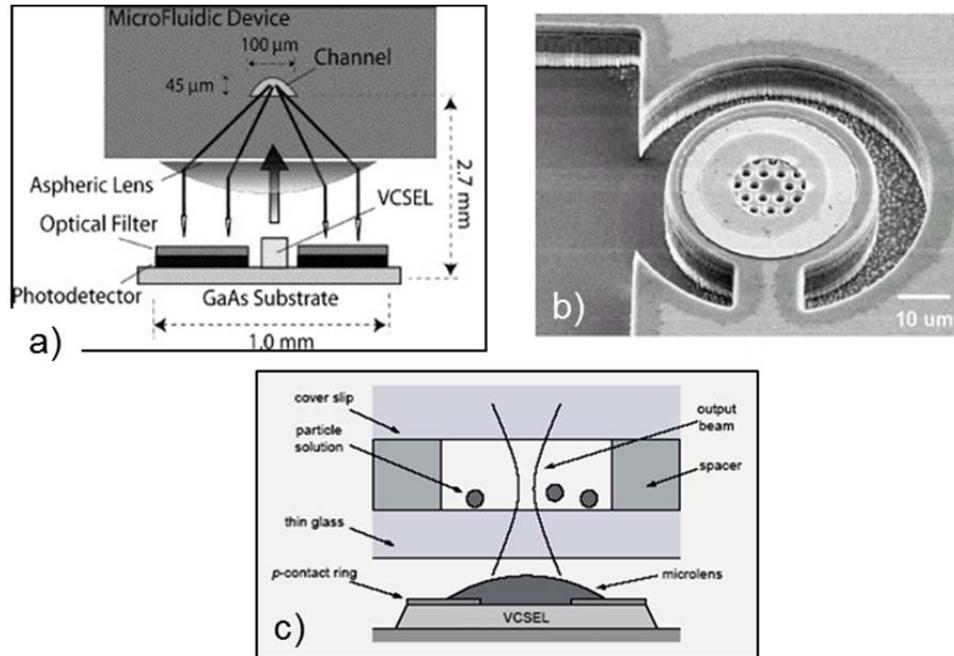


Figure 1.8 Exemple d'utilisation de VCSELS pour le biomédical : a) capteur de fluorescence [Thrush, 2005] b) VCSEL fluide [Kasten, 2008] c) Pinces optiques à base de VCSELS [Kroner, 2006]

1.9. Recherches actuelles et objectifs de la thèse

Les recherches actuelles sur les VCSELS portent toujours sur l'amélioration des performances, comme l'augmentation de la vitesse de modulation ou de la puissance émise en régime monomode, ainsi que sur le contrôle de la polarisation, notamment grâce à de nouveaux concepts de confinement nanophotonique [Choquette, 1994; Noda, 2001; Huang, 2008]. L'extension des longueurs d'onde d'émission, vers la gamme de l'UV ou du moyen infrarouge, grâce à de nouvelles filières de matériaux, constitue toujours un domaine très actif. L'accordabilité spectrale sur de larges gammes est également en plein essor pour le développement de ces sources pour les télécommunications (WDM) ou les capteurs (spectroscopie) [Gierl, 2011; Castany, 2011]. La recherche de nouvelles fonctions optiques dans les VCSELS pour l'amélioration de leur intégration photonique dans les systèmes est également très active au plan international.

C'est dans cette dernière thématique que s'inscrit l'activité de notre équipe. Après avoir étudié développé les possibilités de photodétection intégrée dans les VCSELS [Averseng, 2002; Bringer, 2005], nous avons abordé la conception de microcapteurs

biomédicaux à base de VCSELS (projet Européen Optonanogen) et mis en évidence la nécessité de la mise en forme du faisceau. Un nouvel axe de recherche transversal a donc été initié en 2006 sur la micro-optique polymère intégrée sur VCSELS et sur les microsystemes optiques associés (projet MIOPY), thématique à laquelle ont contribué successivement deux post-doctorants (C. Levallois et M. Condé). Actuellement, cette activité s'inscrit dans le cadre contractuel d'un projet région, FIAB-SU8, que nous détaillerons dans le chapitre III, et de l'ANR NIR OPTICS (post-doc D. Barat), dont nous parlerons dans le chapitre IV.

Ma thèse est la première à s'inscrire dans ce nouvel axe et vise la conception et la réalisation d'une micro-optique active en polymère intégrable monolithiquement sur des matrices de VCSELS.

Avant de détailler ces travaux, nous allons résumer les besoins en termes de mise en forme de faisceau pour les applications principales de ces composants.

2. Mise en forme des faisceaux VCSELS : besoins et contraintes

Nous commencerons par quelques définitions sur les faisceaux gaussiens avant de décrire les principaux besoins pour la mise en forme de tels faisceaux. Dans les calculs présentés dans ce manuscrit, nous nous sommes toujours placés dans l'approximation paraxiale (appelée aussi optique Gaussienne) sans tenir compte des aberrations optiques (sphériques, coma, astigmatisme, courbures de champ et distortion) [Zappe, 2010]. Néanmoins, nous avons vérifié avant cette étude que ces aberrations étaient très faibles pour nos microlentilles [Bardinal, 2007].

2.1 Rappels succints sur les faisceaux gaussiens

Si l'approximation de l'optique géométrique (faisceau de lumière rectiligne) est valable pour des éléments macroscopiques, elle n'est plus vérifiée dès que l'on se rapproche des tailles microscopiques. C'est en particulier vrai pour calculer la taille du waist d'un faisceau laser (figure 1.9). La lumière est une onde électromagnétique transverse décrite par les équations de Maxwell [Maxwell, 1865]. Cependant, plutôt que de considérer l'équation complète de propagation d'une onde électromagnétique, on se place dans le cas de l'approximation paraxiale qui est une solution particulière de cette équation. L'approximation paraxiale décrit une onde plane modulée par une enveloppe variant selon sa position (figure 1.8 a) et suppose une faible divergence du faisceau par rapport à son axe de propagation. Le demi-angle de divergence maximal généralement admis est de l'ordre de 20 degrés, ce qui est en accord avec la divergence des VCSELS standards. En outre, cette approximation est adaptée pour la description de rayonnements cohérents des faisceaux lasers. On parlera plus particulièrement de faisceau gaussien lorsque l'évolution du profil transversal d'amplitude en fonction de la propagation spatiale est proportionnelle à une fonction gaussienne (figure 1.8 b).

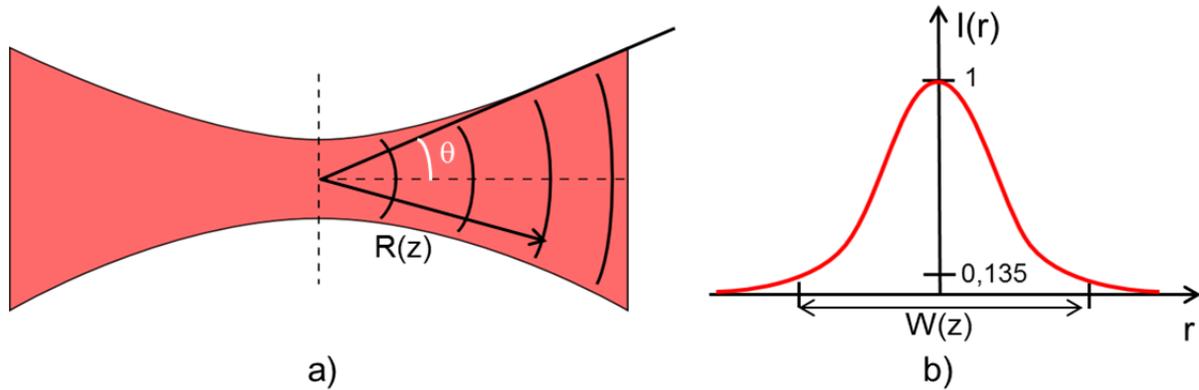


Figure 1.8 a) Fronts d'onde et b) profil transversal de l'intensité d'un faisceau gaussien

On peut décrire l'intensité lumineuse I d'un faisceau gaussien à r du centre du faisceau et à z de son origine par l'équation suivante :

$$I = I_0 \left[\frac{W_0}{W(z)} \right]^2 e^{-\left(\frac{2r^2}{W(z)^2} \right)} \quad [1.2]$$

où I_0 est l'intensité lumineuse maximale, W_0 la taille du waist et $W(z)$ la taille du faisceau.

Dans tout plan transverse, l'intensité est maximale sur l'axe du faisceau et se trouve divisée par le facteur $1/e^2 \sim 0.135$ à une distance $r=W(z)$ de celui-ci. Comme 86% de la puissance se trouve confinée dans un rayon de $W(z)$, ce dernier est considéré comme étant le rayon du faisceau également appelé largeur du faisceau. Ce rayon atteignant sa taille minimale en W_0 pour $z=0$ porte le nom de taille du faisceau ou « beam waist », et $\sqrt{2} W_0$ correspond à la dimension transverse du point lumineux le moins étendu (col du faisceau). Le rayon du faisceau croît avec z et vaut $2W_0$ en z_0 .

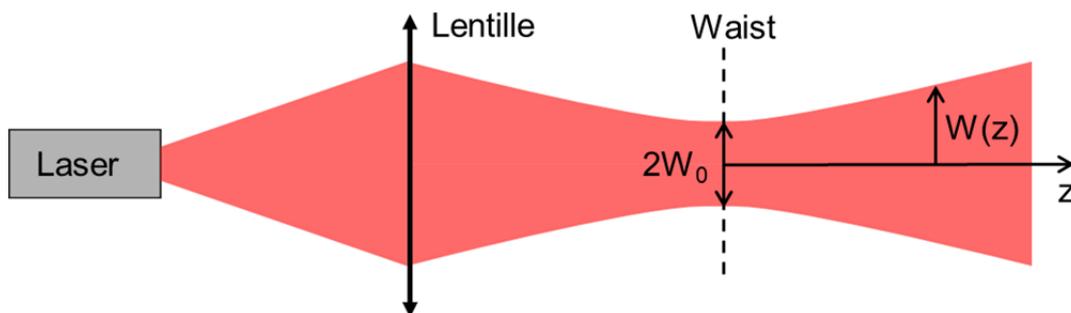


Figure 1.9 Mise en forme d'un faisceau gaussien

Nous nous intéresserons particulièrement à deux paramètres pour le contrôle de la divergence d'un faisceau laser, la taille du waist et sa divergence θ :

$$W(z)^2 = W_0^2 \left[1 + \left(\frac{z}{z_0} \right)^2 \right] \quad [1.3]$$

Pour $|z| \gg z_0$ on peut simplifier l'équation :

$$W(z) \sim \frac{W_0}{z_0} Z = \theta_0 Z \quad [1.4]$$

$$\text{avec} \quad \theta_0 = \frac{\lambda}{\pi W_0} \quad [1.5]$$

On peut déduire de ces équations qu'il est impossible d'obtenir un faisceau parfaitement collimaté dans un système fini, pas plus qu'un point focal parfait (taille de waist $W_0=0$). De plus, en optique gaussienne, « collimater un faisceau » est équivalent à « obtenir un faisceau de grand waist » pour obtenir un faisceau de moindre divergence.

Le faisceau ayant sa largeur minimale en $z=0$, il s'agit de la position où celui-ci est le mieux focalisé. La profondeur de champ (ou Depth of Focus DOF) est définie comme étant la distance sur laquelle la largeur W_0 se trouve multipliée par $\sqrt{2}$, il s'agit de $2z_0$:

$$2z_0 = \frac{2\pi W_0^2}{\lambda} \quad [1.6]$$

On constate que si la dimension du waist est petite, la profondeur de focalisation sera également faible. Il est également intéressant pour la suite de définir l'ouverture numérique NA qui dépend du diamètre de la lentille D et de sa focale f et de l'indice de réfraction n :

$$NA = n \sin\theta \sim n \frac{D}{2f} \quad [1.7]$$

Enfin, on peut calculer la limite de diffraction du faisceau par la lentille à partir de l'ouverture numérique :

$$r = \frac{1.22 \lambda}{NA} \quad [1.8]$$

2.2 Divergence des VCSELS

La divergence naturelle d'un VCSEL est de l'ordre de 10 à 25° en angle en $1/e^2$ suivant la technologie de fabrication utilisée (tableau 1.1). Si elle est plus faible que celle d'un laser émettant par la tranche, elle est souvent trop élevée pour permettre l'utilisation de ces composants sans optique de correction comme nous allons le voir dans les prochains paragraphes.

Tableau 1.1 Divergence (angle total en $1/e^2$) et courant de seuil typiquement constatés pour les différentes technologies pour un VCSEL monomode émettant à 850nm

Technologie	Taille zone active (μm)	Courant de seuil (mA)	Divergence en $1/e^2$ ($^\circ$)	Références
Implantation ionique	~6	2	10-20	[Oclaro]
Gravure du méso	5-6	2	13-21	[Lasermate]
Oxydation enterrée	2-4	0,2-1	10-25	[Ulm]

2.3 Besoins pour les communications optiques par fibre

Aujourd'hui encore, le marché majeur des composants VCSELs reste centré sur les interconnexions optiques à courte distance, la considération la plus importante concerne donc l'efficacité de couplage entre le VCSEL et la fibre optique. Cette efficacité est fortement dépendante de deux paramètres : le distance VCSEL-fibre et l'alignement latéral (figure 1.10 a). Par exemple, pour conserver un couplage supérieur à 85% dans une fibre multimode, la tolérance au positionnement latéral ne doit pas excéder $\pm 5 \mu\text{m}$ [Ishii, 2000 ; Kim, 2000 ; Nallani, 2006].

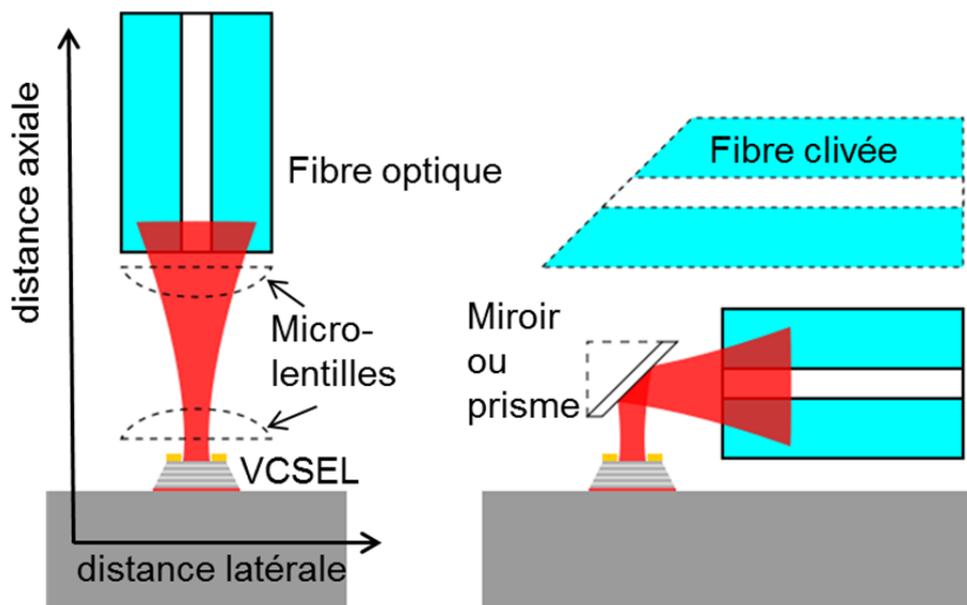


Figure 1.10 a) Paramètres critiques pour l'efficacité de couplage VCSEL-fibre avec possibilité d'utilisation d'une microlentille b) Vue schématique d'une liaison VCSEL-fibre horizontale.

L'efficacité de couplage diminue aussi avec la distance VCSEL-fibre. Ces dernières années, des efforts considérables ont été réalisés pour l'augmentation de ces tolérances avec des systèmes d'alignement passif comme l'utilisation de support en silicium gravé en V ou

l'utilisation de la technique flip-chip ou bonding avec des billes d'Indium (précision $<1 \mu\text{m}$). Néanmoins, l'insertion d'une microlentille sur le chemin optique entre le VCSEL et la fibre pour focaliser le faisceau permet d'améliorer grandement la tolérance de ce type d'alignement.

Par ailleurs, rediriger le faisceau du VCSEL dans le plan horizontal est très demandé pour réduire les volumes et les coûts des liaisons fibrées ou en espace libre, aussi bien pour faciliter la communication inter ou intra-puces (entre microprocesseurs par exemple) qu'entre les puces et les photo-détecteurs. Par conséquent, le couplage horizontal au moyen d'une déflexion du faisceau laser à 90° est souvent souhaité. Cela peut être effectué en utilisant un miroir incliné à 45° ou un micro-prisme à réflexion totale interne (Figure 1.10 b). Le couplage direct avec une fibre coupée à 45° est également possible. Ces éléments peuvent également être combinés avec une microlentille pour améliorer la collection de la lumière.

2.4 Besoins pour les capteurs optiques

En ce qui concerne les applications émergentes comme les capteurs, les besoins concernent plutôt le contrôle de la taille du waist, pour correspondre à la zone de détection à une distance qui peut aller de quelques centaines de microns [Thrush, 2004 ; Lechuga, 2006] à plusieurs centimètres [Perchoux, 2007]. Par conséquent, les besoins concernent autant une collimation du faisceau laser que le contrôle de la focalisation mais aussi de la direction du faisceau. Par exemple, sur un microsysteme dont le principe de détection est basé sur la réflexion du faisceau, la lumière du laser doit être focalisée au niveau du système à analyser puis sur une photodiode recevant le signal à examiner (taille typique 10 à $100 \mu\text{m}$). De même, les pinces optiques exigent une focalisation élevée à une position verticale donnée dans un canal microfluidique par exemple [Ozkan, 2003 ; Zhang, 2008]. Des contraintes plus spécifiques sont apparues dans le domaine de la microscopie optique en champ proche (NSOM Near-field Scanning Optical Microscopy) [Heisig, 2000 ; Heinis, 2003] ou du stockage optique à haute densité ou des lecteurs optiques [Goto, 2002]. Dans ces cas, le faisceau laser doit être fortement focalisé à très courtes distances (quelques microns), il faut donc associer les VCSELS à des micropointes. Enfin, de nouveaux besoins émergent en micro-optique active pour un ajustement du faisceau focalisé, par exemple lorsqu'on effectue un balayage d'un objet [Gorecki, 2007] ou simplement pour garantir un meilleur couplage avec une fibre optique [Nallani, 2006].

Avant de détailler l'approche que nous avons privilégiée dans le cadre de cette thèse pour viser la correction du faisceau et le contrôle dynamique du plan focal, nous allons dresser un état de l'art sur les technologies micro-optiques existantes pour la correction passive et active des faisceaux VCSELS. Cet état de l'art est extrait d'une réflexion commune de l'équipe sur le sujet [Bardinal, 2011].

2.5 Contraintes sur la géométrie et la technologie de fabrication

Généralement, la collimation ou la focalisation du faisceau gaussien du laser émis par un VCSEL est effectuée par une microlentille réfractive, plus rarement par une microlentille de Fresnel ou une lentille diffractive (figure 1.11). Les micropointes permettent quant à elles une focalisation à courte distance. Les éléments optiques diffractifs (DOE), fabriqués avec un

relief continu, binaire ou des structures multi-niveaux, présentent des avantages en terme de compacité, mais elles sont plus complexes à fabriquer car dépendantes de la longueur d'onde [Zappe, 2010]. La combinaison d'éléments diffractifs et réfractifs peut être également exploitée pour minimiser les aberrations optiques [Fu, 2001].

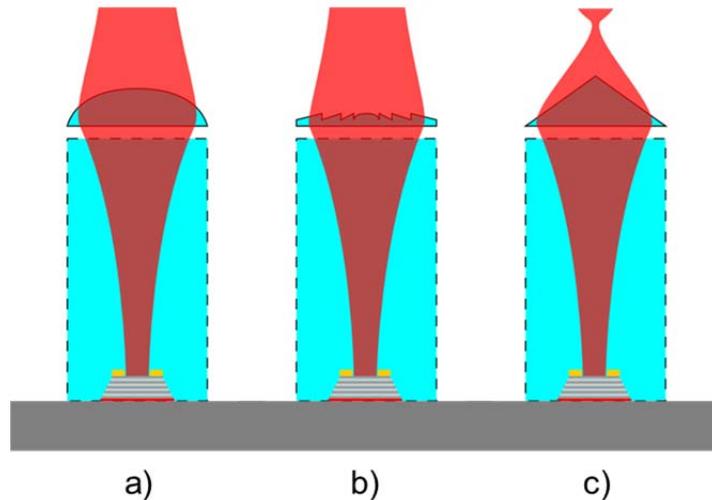


Figure 1.11 Principaux éléments micro-optiques développés pour la mise en forme du faisceau VCSEL: a) lentille réfractive, b) microlentille de Fresnel ou microlentille diffractive, c) micropointe. Ces objets peuvent être directement fabriqués sur la surface du laser ou sur une couche intermédiaire (piédestal en ligne hachurée).

Le choix des matériaux pour fabriquer ces lentilles dépendent de la longueur d'onde du laser et de l'indice de réfraction nécessaire. Les éléments optiques les plus utilisées sont en verre et sont généralement fabriqués par des procédés de gravure. Cependant, même s'il est très stable et très résistant (thermiquement et chimiquement), ce matériau est souvent difficile à mettre en forme et n'est pas transparent dans toutes les gammes spectrales. Les polymères constituent alors une alternative intéressante, car ils peuvent être mis en forme par diverses techniques de réplique (moulage [Ruther, 1997], embossage à chaud,...), de gravure directe (gravure laser [Gale, 1994 ; Naessens, 2003], gravure chimique,...) de fluage [Yang, 2004], de photo-polymérisation [Croutxé-Barghorn, 2000], ou encore par écriture laser directe [Guo, 2006]...

Quelles que soient les fonctions optiques visées (collimation, focalisation) et la technologie choisies, les dimensions de l'élément micro-optique à associer au VCSEL doivent s'adapter aux propriétés initiales du faisceau gaussien du composant mais aussi concorder avec la topologie des matrices de VCSELs, notamment avec le pas entre composants ou « pitch » (typiquement égal à 250 μm), ce qui limite le diamètre D des microlentilles à réaliser.

Toutefois, pour permettre un couplage optimal du faisceau dans la lentille et minimiser les aberrations optiques, on a intérêt à travailler avec des optiques de grandes ouvertures numériques, c'est-à-dire de diamètre grand par rapport à la focale ; pour une focale donnée, il ne faut donc pas trop réduire le diamètre. En outre, pour une mise en forme optimale, la taille du faisceau à corriger doit idéalement correspondre à la taille de la lentille, ce qui impose de ne pas la placer directement sur la surface. En outre, la tolérance aux erreurs sur le

positionnement latéral est d'autant plus grande que la taille de la lentille et la distance sont élevées. On a donc intérêt à éloigner au maximum le plan de la lentille de la surface du VCSEL (cf. chapitre II). Aussi, un piédestal transparent et épais ($>100\ \mu\text{m}$) doit être généralement inséré entre le VCSEL et la lentille pour permettre une mise en forme efficace du faisceau (ligne hachée dans la figure 11).

Rappelons d'autre part que la divergence à corriger est dépendante de la technologie utilisée pour le VCSEL (tableau 1.1) mais aussi de sa configuration d'émission (top ou bottom). Ainsi, l'indice du substrat ($n\sim 3.5$ pour du GaAs à 850 nm) étant supérieur à celui de l'air ($n=1$), le faisceau laser diverge moins dans le substrat (cas des bottom-emitters) que dans l'air. Pour un pas entre VCSEL de $250\ \mu\text{m}$ et une divergence de 15° dans l'air, les faisceaux vont s'entrecroiser à partir d'une hauteur d'environ $460\ \mu\text{m}$ au-dessus du VCSEL pour un top-emitter, et environ $790\ \mu\text{m}$ ($450\ \mu\text{m}$ dans le substrat et $340\ \mu\text{m}$ dans l'air) pour un VCSEL bottom-emitter standard en GaAs. Au-delà de ces valeurs, le cross-talk entre les faisceaux adjacents est trop élevé, ce qui va imposer une distance VCSEL-lentille maximale. Un compromis doit donc souvent être effectué entre l'épaisseur du piédestal et la divergence visée. Suivant la technique de fabrication utilisée, le piédestal et la lentille peuvent être réalisés avec un seul matériau ou avec des matériaux différents, en deux étapes.

Nous allons maintenant passer en revue les principales méthodes proposées dans la littérature pour l'intégration de microlentilles passives sur VCSELs. Nous distinguerons trois types d'approches selon le niveau d'insertion : en surface par assemblage hybride, dans la structure semi-conductrice du VCSEL, ou en surface par intégration directe. Nous décrirons ensuite les travaux sur le contrôle actif de la position du faisceau.

3. Micro-optique passive

3.1 Assemblage hybride de lentilles passives au-dessus d'un VCSEL

La méthode la plus ancienne et la plus répandue pour la correction de faisceau VCSEL consiste à placer des microlentilles directement au-dessus du composant à l'aide d'un assemblage hybride, notamment pour les liaisons en espace libre [Jahns, 1994]. Les lentilles commerciales sont souvent utilisées pour répondre à des besoins de réduction de la divergence comme notre équipe l'a déjà expérimenté par le passé [Lechuga, 2006], mais il est aussi possible de réaliser des matrices de lentilles avec des polymères sur mesure avant de les assembler [Keyworth, 1997] au-dessus des VCSELs. La figure 1.12 illustre ce type d'assemblage : on peut voir une barrette de lentilles réfractives (a), (c) et (d) montée au-dessus de VCSELs, mais aussi des lentilles diffractives (b) définies sur un substrat transparent qui lui-même est placé de façon hybride (flip-chip ou collage) sur une matrice de VCSELs.

Un des principaux avantages réside ici dans la possibilité d'associer une microlentille quelle que soit la technologie de fabrication des VCSELs, ceci est d'autant plus facile que les fabricants de lentilles commerciales proposent un assez large choix de géométries (différentes focales, isolées ou en matrices, ...). Cependant, une mise au point sur mesure s'avère très coûteuse. De plus, cette technique requiert généralement un volume important autour du composant (encombrement des cales), ce qui peut diminuer la capacité d'intégration de ces systèmes.

Par ailleurs, l'assemblage hybride exige un positionnement précis des microlentilles, ce qui est très difficile à assurer à l'échelle micrométrique, notamment dans le plan vertical, car il faut contrôler l'épaisseur de chaque élément (épaisseurs des supports, du substrat des lentilles et des colles). Dans notre cas (c et d), nous avons utilisé une machine de report FC150 et une cale en silicium pour ajuster la hauteur du plan de la lentille et assurer la collimation du faisceau laser. Cette hauteur optimale est calculée en fonction de l'angle d'émission du faisceau laser, de l'indice et de la focale de la lentille et toute erreur de positionnement influe fortement sur la valeur de la divergence finale (cf. chapitre 2). L'intégration directe de lentilles sur la surface des VCSELs ou dans le VCSEL constitue donc une méthode plus précise et plus collective.

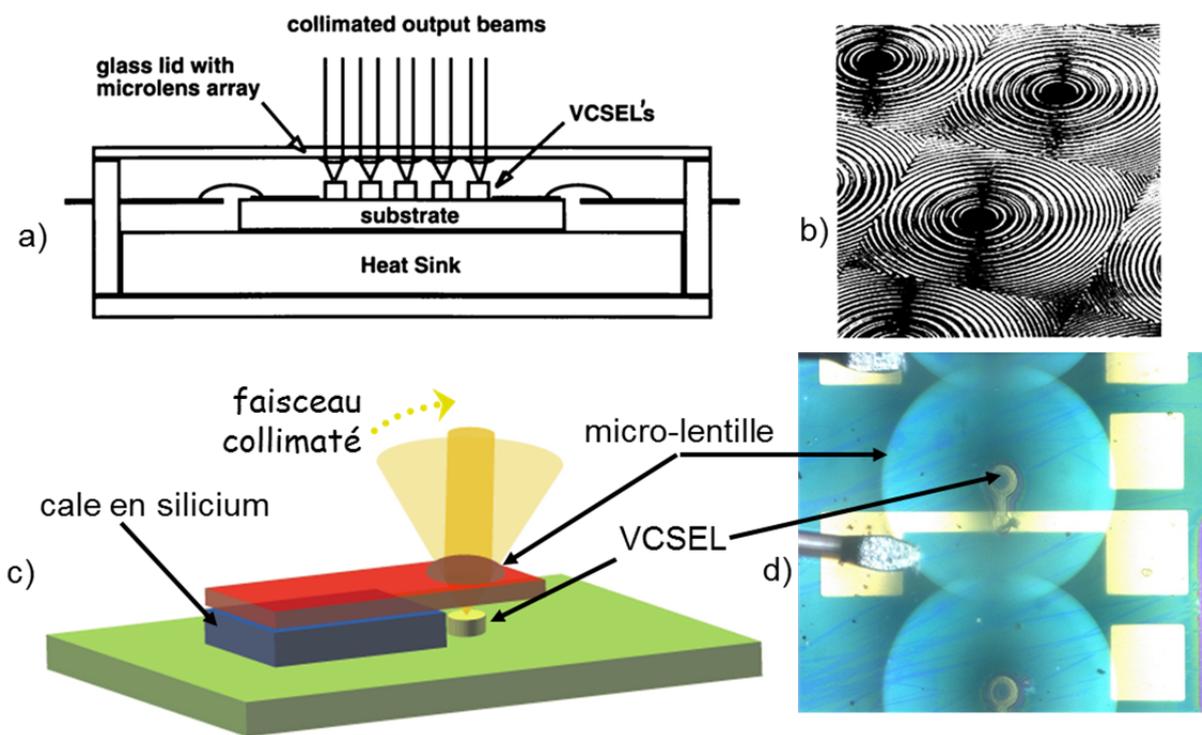


Figure 1.12 schéma de principe et photos de lentilles sur VCSELs a) [Keyworth, 1997], b) [Jahns, 1994], c) et d) nos travaux [Lechuga, 2006]

3.2 Intégration dans la structure semi-conductrice du VCSEL

Il est possible de réaliser une lentille monolithique dans le substrat ou dans le VCSEL pendant sa fabrication, en modifiant la structure épitaxiale ou simplement en gravant une partie du substrat lors du process.

3.2.1) Microlentille en oxyde intégrée dans le VCSEL

Une des approches possibles consiste à réaliser une lentille intégrée par oxydation de couches spécifiques riches en aluminium insérées dans le miroir de Bragg supérieur lors de la

définition du diaphragme enterré. En effet, en jouant sur le pourcentage d'aluminium dans chaque couche, l'oxydation latérale sera plus ou moins profonde, ce qui permet de former une lentille hémisphérique en oxyde. La figure 1.13 montre des lentilles réalisées sur ce principe par Chang et al, avec des rayons de courbures différents en fonction du temps d'oxydation employé [Chang, 2006 A]. Cette méthode conduit à des lentilles de bonnes qualité optique grâce à la grande différence d'indice de réfraction mise en jeu entre le bas indice de l'oxyde ($n_{\text{GaAlAs}}=1.6$) et le haut indice du GaAs ($n_{\text{GaAs}}=3.49$), ce qui permet de travailler avec des rayons de courbure plus grands et plus simples à contrôler. Cette équipe a aussi exploité ce procédé pour réaliser une lentille réfractive directement sur le VCSEL en gravant la couche oxydée supérieure [Chang, 2006 B]. Cette approche permet au faisceau laser de sortir directement dans l'air ($n=1$) sans passer par la couche d'AlAs oxydée. Cette technique permet un auto-alignement avec la zone d'émission, mais elle exige une maîtrise parfaite du pourcentage d'aluminium dans les couches additionnelles de la structure VCSEL, ainsi qu'un bon contrôle du procédé d'oxydation. De plus, l'ajustement de la divergence est limité (gamme de 8 à 13°) car le plan de la lentille est trop proche de la zone d'émission.

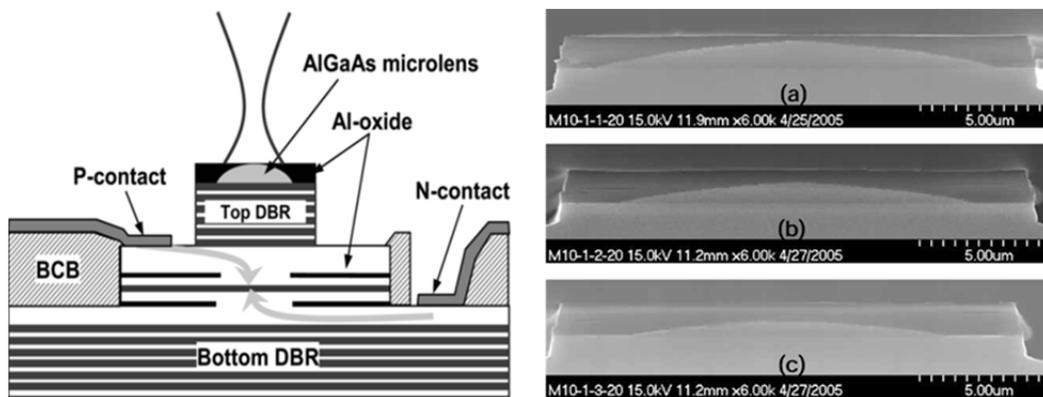


Figure 1.13 Principe et Image MEB d'une microlentille réfractive en oxyde obtenue par oxydation sélective de couches d'AlGaAs dans le miroir DBR supérieur [Chang, 2006 A]

3.2.2) Microlentille gravée en face arrière

Une autre solution consiste à graver une microlentille directement en gravant le substrat par usinage ionique [Rastani, 1991] ou par gravure ionique réactive [Strzelecka, 1998]. Fu et al ont quand à eux utilisé une gravure FIB (Focused Ion Beam) pour réaliser des lentilles réfractives et des lentilles de Fresnel [Fu, 2001] [Fu, 2002] (figure 1.14). Le procédé FIB permet d'ajuster la forme de la lentille en fonction du VCSEL considéré, mais il présente l'inconvénient de ne pas être collectif, contrairement à la fabrication des VCSELs. A l'inverse, la fabrication des lentilles par gravure sèche ou humide permet une réalisation matricielle. La distance entre la zone d'émission (VCSEL) et la lentille (face arrière) est suffisamment grande dans ce cas pour faire office de piédestal et permettre une collimation efficace du faisceau (divergence $< 1^\circ$). Cependant, cette approche ne peut s'appliquer qu'aux VCSELs de type « bottom-emitting » dont le substrat est transparent à la longueur d'onde d'émission.

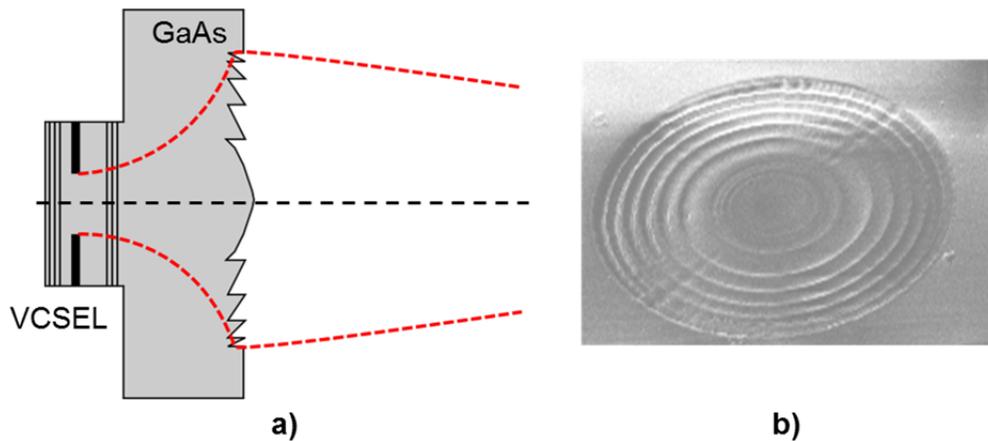


Figure 1.14 a) Schéma de principe de la gravure de microlentille en face arrière b) Vue MEB d'une lentille « hybride » (réfractive et diffractive) fabriquée par gravure FIB [Fu, 2001]

En conclusion, ces méthodes « internes » permettent de miniaturiser au maximum le système VCSEL-lentille sans ajouter un matériau nouveau, mais sont complexes et/ou sélectives pour la gamme spectrale du VCSEL. D'autres solutions seraient envisageables telles que la gravure en surface d'un réseau de diffraction à haut contraste d'indice (HCG), récemment proposée pour contrôler la phase et la répartition du faisceau [Fattal, 2010]. Cette méthode pourrait être mise en œuvre pour la focalisation avec une étape de gravure supplémentaire sur le miroir supérieur. Bien qu'elle mette en jeu des nanostructurations délicates et que cela n'ait pas encore été réalisé sur VCSELs, des réseaux sub-longueur d'onde similaire ont déjà été gravés sur des membranes semi-conductrices pour remplacer les DBRs supérieurs de VCSELs accordables par l'équipe de C. Chang-Hasnain [Huang, 2008].

Néanmoins, les technologies polymères en surface des VCSELs constituent à ce jour les voies les plus simples et les plus efficaces pour une réalisation collective et sur mesure à l'échelle du wafer.

3.3 Méthodes d'intégration post-process de lentille en polymère sur VCSELs

Au lieu de rajouter par assemblage hybride des lentilles commerciales au-dessus des VCSELs ou de modifier la technologie III-V du VCSEL, déjà assez complexe, il semble plus intéressant de créer des lentilles directement en surface de ces composants en fin de process. Ce type d'intégration est très souvent réalisé avec des technologies polymères en raison de leur faible coût, et du fait que l'on peut les mettre en forme facilement à basse température, sous forme de couches minces ou épaisses ou de microstructures tri-dimensionnelles.

Il existe de nombreuses méthodes de mise en forme collective des polymères. On peut citer le « thermal reflow » qui consiste à faire fluer un plot en polymère par chauffage jusqu'à obtenir une lentille réfractive [Yang, 2004, Hedsten, 2006], cependant cette solution restreint la lentille à être en surface du VCSEL. Les techniques les plus pertinentes sont la réplique par injection d'un polymère ou d'un sol gel dans un moule transparent, et la photolithographie UV de résines épaisses, car elles permettent de fabriquer des piédestaux de taille suffisante et

d'obtenir un alignement latéral précis ($1\ \mu\text{m}$) par rapport aux composants laser se trouvant $100\ \mu\text{m}$ au dessous.

La figure 1.15 illustre plusieurs systèmes composés de lentilles associées à des piédestaux à base de polymères. Des lentilles de Fresnel en Sol-Gel ont ainsi été fabriquées par moulage direct sur VCSELS, avec une définition du piédestal et de la lentille en une seule étape (figure 15 a). Cette méthode rapide et collective exige néanmoins une bonne précision de la hauteur de la résine lors du moulage. De plus, elle présente l'inconvénient de nécessiter la réalisation d'un moule spécifique et il est donc impossible d'ajuster la taille et la forme de la lentille en fonction du composant considéré et sa divergence.

Cox et al. (b) ont quand à eux utilisé une technique de dépôt localisé par jets d'encre de polymère liquide sur des piédestaux épais en polymère SU-8, eux-mêmes fabriqués par photolithographie classique sur VCSELS [Cox, 2005]. Les lentilles, une fois réticulées sous UV, permettent une focalisation sur mesure du faisceau laser. Ce procédé rapide est applicable sur de grandes surfaces en post process et permet non seulement de fixer précisément la position de la lentille dans la direction verticale et dans le plan, mais également la taille et la forme de la lentille en fonction du volume de liquide éjecté. C'est donc une approche de grand intérêt pour la micro-optique sur VCSEL. Nous verrons que notre équipe a opté pour une approche similaire en proposant une méthode alternative (nanospotter cf. chapitre IV) pour fabriquer des lentilles en polymère thermodurcissable sur des piédestaux en SU-8, et ainsi assurer une collimation efficace des VCSELS. Nous verrons que les propriétés optiques de ces matériaux polymères sont compatibles avec une utilisation jusqu'à $2\ \mu\text{m}$ (figure 3.6 du chapitre 3).

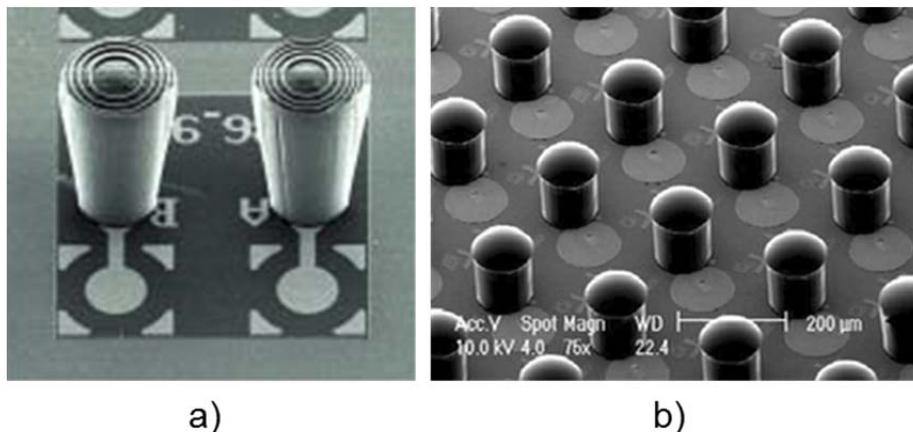


Figure 1.15 Lentilles polymères intégrées sur VCSELS (a) par réplique [Gale, 2005] (b) par jets d'encre sur piédestaux SU-8 [Cox, 2005]

4. Etat de l'art sur la micro-optique active sur VCSEL

La possibilité de contrôler dynamiquement la forme du faisceau et/ou sa position pendant le fonctionnement du VCSEL ouvrirait de nouvelles fonctionnalités pour ce composant III-V. De nouvelles applications seraient ainsi possibles telles que la réalisation de routeurs optiques reconfigurables compacts [Fan, 1997] ou encore de scanners verticaux

miniatures [Gorecki, 2007]. Cependant, cet objectif reste difficile à atteindre avec un microsysteme optique intégré sur puces.

4.1 MOEMS hybridé sur VCSEL

Les seules réalisations reportées dans la littérature pour le contrôle actif du faisceau VCSEL sont basées sur des MOEMS (Micro Optical Electrical Mechanical Systems) généralement à base de silicium associés à des « top-emitting » VCSELS par flip chip ou par collage. La figure 1.16 présente ainsi une plateforme XY en silicium intégrant une lentille réfractive contrôlée par un actionneur électro-thermique. Ce système a été assemblé sur VCSELS et a permis de former une matrice 4x4 pour un déplacement dynamique du faisceau dans le plan XY (déflexion) [Tuantranont, 2001].

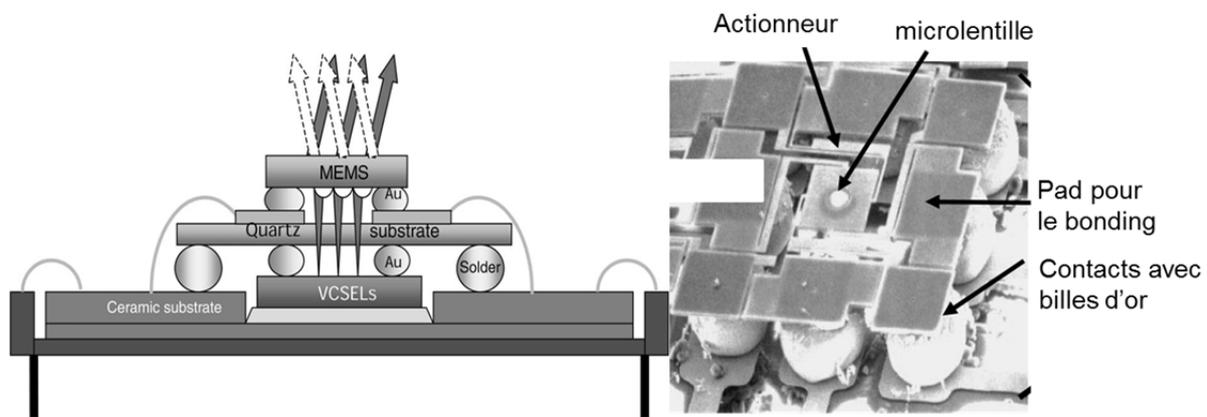


Figure 1.16 Principe et image MEB d'un assemblage hybride de microlentilles réfractives sur VCSELS [Tuantranont, 2001].

Ce système est relativement complexe à réaliser avec un assemblage sur plusieurs niveaux. Il présente néanmoins l'avantage d'être compatible avec le pas des VCSELS ($250\ \mu\text{m}$) mais les déplacements mis en jeu sont proportionnels à la taille du système et donc très faibles.

En exploitant le même principe d'actionnement, Ishikawa et al. ont réalisé un micro-miroir en silicium et l'ont assemblé sur un VCSEL pour l'alignement actif du faisceau laser avec une fibre, ce qui a conduit à une tolérance d'alignement fibre-VCSEL supérieure à $25\ \mu\text{m}$ [Ishikawa, 2003].

Plus récemment, Hedsten et al. ont fabriqué un MOEMS électrostatique en silicium présentant des déflexions latérales de $6\ \mu\text{m}$ avec une tension appliquée de $70\ \text{V}$ (fig. 1.17). Cette déformation permet d'obtenir des déplacements du faisceau supérieurs à $150\ \mu\text{m}$ dans le plan XY. L'assemblage de la lentille de Fresnel sur le système a été réalisé par une méthode collective, l'embossage. Cependant, ce système impose de découper un VCSEL pour le coller sur un substrat hôte, où sera aussi greffé le MOEMS. Ce système requiert donc un encombrement important ($3\ \text{mm}^2$) et n'est pas compatible avec une réalisation collective.

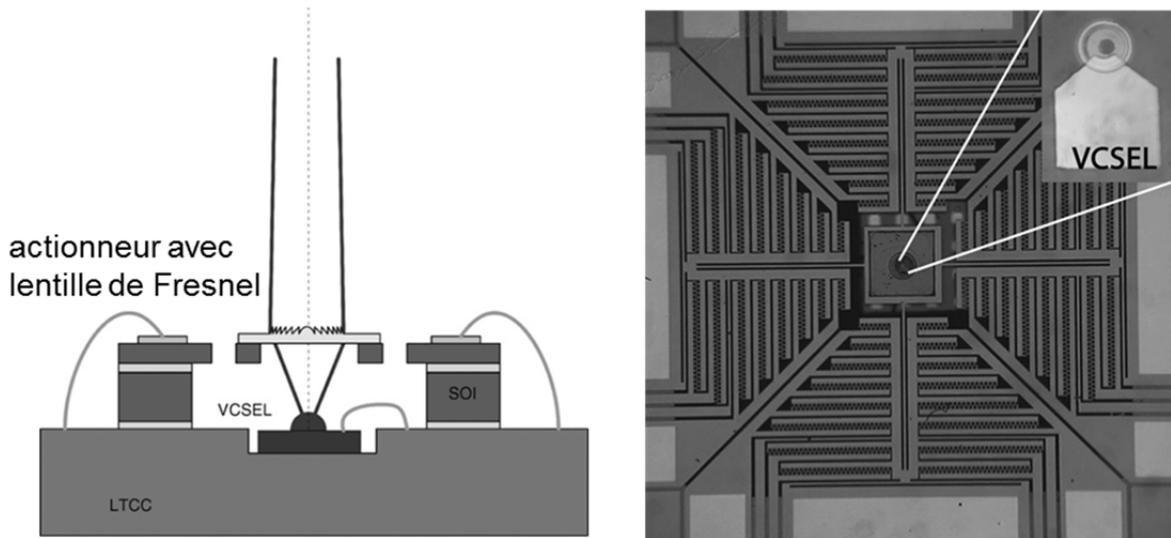


Figure 1.17 MOEMS incluant une lentille de Fresnel sur VCSEL [Hedsten, 2008].

Pour conclure sur ce point, les systèmes actifs hybrides reportés dans la littérature restent complexes à assembler et leur encombrement est en général peu compatible avec la densité des matrices de VCSELs. De plus, ils présentent les mêmes inconvénients pour l'alignement que les systèmes hybridés passifs. Réaliser un procédé collectif et post-process de fabrication de micro-optique active directement intégrée à l'échelle d'un wafer présenterait donc des avantages comme dans le cas des microlentilles passives (cf. 3) Il faut donc concevoir des systèmes actionnables de faible empreinte compatibles avec la topologie des VCSELs. Dans la littérature, on retrouve ce type de procédés collectifs dans la fabrication de VCSELs accordables.

4.2 Technologies pour les VCSELs accordables

Les travaux menés pour fabriquer des VCSELs accordables consistent pour la plupart à fabriquer un MEMS, généralement à base de semi-conducteurs ou de matériaux diélectriques, sur une structure demi-VCSEL (DBR inférieur et zone active). Lors du changement de position verticale de l'actionneur sur lequel est défini le miroir supérieur de la cavité, la longueur de celle-ci est modifiée, ce qui permet d'obtenir une modification de la longueur d'onde du laser. Notons qu'ici les déplacements obtenus sont plus faibles ($\sim 1 \mu\text{m}$) que ceux nécessaires pour modifier le plan focal ou la forme d'une microlentille en vue de la mise en forme d'un faisceau (quelques microns, cf. chapitre II). De plus, les gaps d'air dans le cas des VCSELs accordables sont faibles ($4\text{-}5 \mu\text{m}$).

De nombreuses équipes ont exploité ce type de MEMS avec des technologies semiconducteurs ou diélectriques, sous forme de micro-leviers [Chang-Hasnain, 2000 ; Nakahama, 2011] ou de membranes suspendues [Sagnes, 2003 ; Kögel, 2010 ; Gierl, 2011]. On retrouve le plus souvent un actionnement de type thermo-mécanique du fait de sa plus grande facilité d'intégration sur une microstructure active. Cependant, des systèmes électrostatiques plus rapides ont été également proposés [Wu, 1995], mais assez rarement car ils mettent en jeu des tensions de commande élevées, souvent incompatibles avec le fonctionnement des VCSELs.

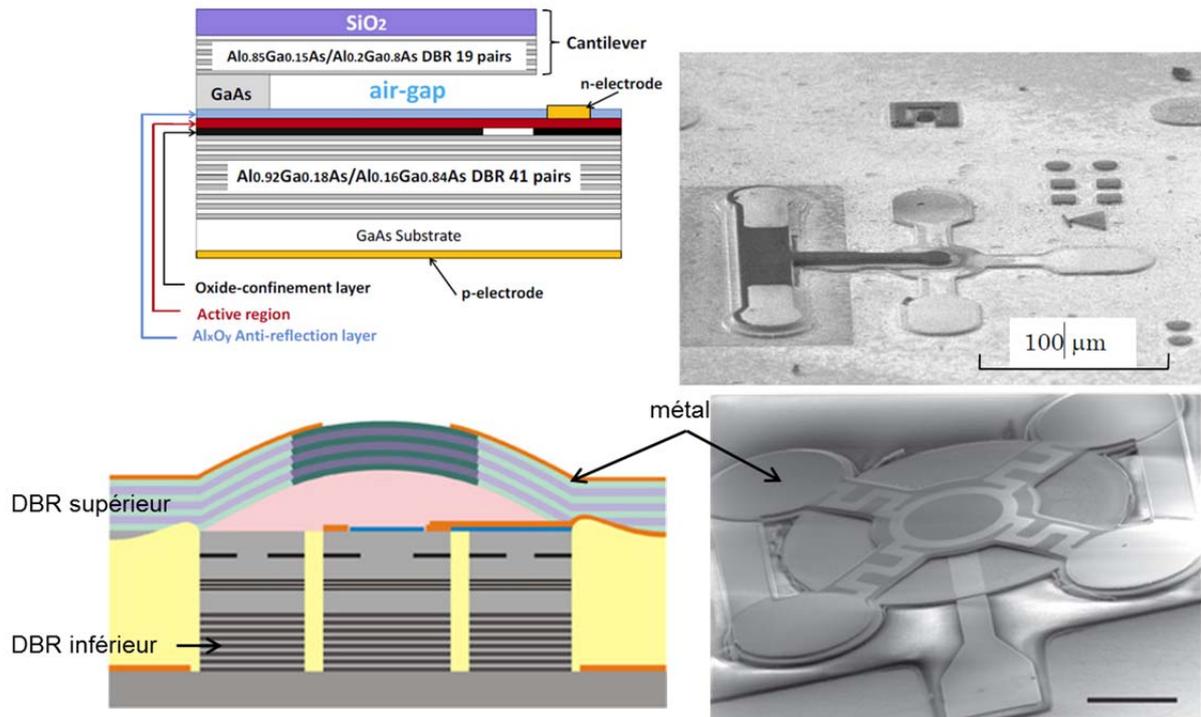


Figure 1.18 Principe et photo MEB d'un micro-levier [Nakahama, 2011] et d'une membrane [Kögel, 2011]

On peut voir sur la figure 1.18 des exemples d'actionneurs proposés, leviers (a et b) ou membranes (c et d) intégrant un DBR diélectrique faisant office de miroir supérieur du VCSEL. Pour créer le gap d'air, Nakahama et al. utilisent une gravure sélective de la couche en GaAs (a et b) permettant de libérer le microlevier, alors que Kögel et al. (KTH) emploient une couche sacrificielle en polymère permettant de créer un miroir supérieur concave, plus favorable à une émission monomode. Les serpentins en métal (d) servent d'électrodes chauffantes pour réaliser l'actionnement. Le système fabriqué par Kögel est compatible avec une matrice de VCSEL en post-process. Cependant, compte tenu des dimensions réduites ($290 \times 400 \mu\text{m}$) du système, il est difficile d'obtenir un grand déplacement de la membrane. Des accordabilités de 25 nm (à 850nm) ont toutefois été obtenues à une fréquence de modulation supérieure à 6 GHz. Gierl et al. (TUM) ont obtenu également des résultats remarquables avec un VCSEL largement accordable dans une gamme de 102 nm avec un dispositif similaire à $1.55 \mu\text{m}$ [Gierl, 2011].

D'autres voies ont été explorées pour fabriquer des VCSELs accordables. Elles sont basées sur la modification de l'épaisseur optique de la cavité par commande électro-optique à l'aide de cristaux liquides intracavité (FOTON-Rennes) [Castany, 2011]. Des accordabilités allant jusqu'à 30 nm ont ainsi pu être obtenues récemment sur des composants à pompage optique [Castany, 2011] et un fonctionnement en pompage électrique paraît possible sur des empreintes de $500 \times 500 \mu\text{m}$ (cuves). L'avantage de cette méthode alternative réside dans la rapidité du changement de longueur d'onde par rapport à un déplacement mécanique.

5. Conclusions et approche retenue

Dans ce chapitre, nous avons tout d'abord rappelé brièvement les principales propriétés des VCSELs, ainsi que leurs applications, actuelles et émergentes. Malgré les propriétés uniques des faisceaux de ce type de composant (faisceau gaussien circulaire), le recours à des éléments micro-optiques est souvent nécessaire pour la mise en forme du faisceau émis. Les besoins les plus courants concernent la focalisation du faisceau ainsi que sa collimation. En outre, de nouveaux champs d'applications orientés vers des microsystemes d'analyse demandent de pouvoir modifier dynamiquement la taille ou la position du faisceau corrigé.

Nous avons ensuite dressé un état de l'art sur les méthodes permettant de répondre à ces besoins par des approches micro-optiques passive et active sur VCSELs. Notons que l'ouverture numérique initiale et la topologie des VCSELs impose des contraintes qu'il faut concilier avec les géométries de microlentilles -en général réfractives- réalisables. Cela se traduit en pratique par la recherche d'un encombrement minimal et par l'insertion d'un gap important (de l'ordre d'une centaine de microns pour la collimation) entre la surface d'émission et le plan de l'élément micro-optique. Ce gap peut être obtenu avec un matériau transparent épais (piédestal en polymère) ou avec un gap d'air.

Il ressort que la majorité des solutions généralement proposées consiste en un assemblage hybride de micro-optiques passives ou actives, ce qui pose systématiquement le problème de l'alignement optique avec la source. Des solutions intégrées ont été également explorées : à l'intérieur du VCSEL ou en surface en post-process. Les premières imposent des modifications complexes de la fabrication du composant ou se limitent aux dispositifs de type bottom-emitters, alors que les secondes mettent en jeu des technologies polymères, plus simples et plus collectives. Parmi elles, la photolithographie UV d'une microstructure polymère épaisse, suivie du dépôt localisé de polymères liquides, semble la plus performante à ce jour.

En ce qui concerne le contrôle dynamique du faisceau VCSEL, il n'existe à ce jour que des réalisations relativement complexes, dédiées à la déflexion du faisceau. Elles sont basées sur des MOEMS silicium hybridés et ils possèdent généralement une empreinte importante rendant difficile des réalisations matricielles et collectives.

Nous avons aussi considéré les travaux actuels menés sur les VCSELs accordables, car même si cette application ne pose pas les mêmes contraintes en termes de déplacement vertical, elle nécessite généralement l'intégration d'un actionneur compact. Plusieurs approches ont été explorées ; elles font appel à la libération de membranes semi-conductrices ou plus récemment diélectriques. Parmi celles-ci, les plus performantes reposent sur un actionnement électro-thermomécanique d'une membrane diélectrique déposée sur un polymère sacrificiel pour l'obtention du miroir concave mobile.

Sur la base de ces enseignements, il ressort que les technologies polymères apportent la transparence et la flexibilité nécessaires à la mise en forme sur mesure du faisceau des VCSELs, ainsi que la compatibilité avec une réalisation post-processing sur un wafer VCSEL. De plus, certains de ces matériaux polymères sont déjà utilisés avec succès pour réaliser des MEMS dans d'autres domaines (RF, circuits microfluidiques). L'ensemble de ces

Chapitre I Contexte et objectifs de la thèse : du VCSEL au microsysteme optique

considérations nous ont donc amenés à concevoir un nouveau type de MOEMS à base de polymères pour la micro-optique intégrée sur VCSELS.

Chapitre II Conception d'une micro-optique active intégrée sur VCSEL

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté les solutions reportées dans la littérature pour assurer une mise en forme passive et active du faisceau laser des VCSELs à l'aide de dispositifs micro-optiques. Pour notre part, nous avons opté pour une approche collective : intégrer directement la micro-optique sur la source laser VCSEL en post-processing et exploiter les potentialités des matériaux polymères (compacité, réalisation collective et simplicité du packaging). Nous avons en effet vu que la pertinence de cette démarche a été déjà démontrée pour des microlentilles passives, en combinant la photolithographie d'une résine épaisse (piédestal en SU-8) et le dépôt localisé d'un polymère fluide (microlentille).

Au-delà de la correction passive, nous visons un objectif plus ambitieux : l'adaptation dynamique de la taille et de la position du waist du faisceau laser par l'intégration collective sur wafer VCSEL d'un MOEMS (Micro-Optical-Electrical-Mechanical System) fabriqué dans cette même filière polymère. C'est une approche qui se veut générique, valable quelle que soit la filière VCSEL considérée (GaAs, InP, ...), et innovante car à notre connaissance plusieurs MOEMS ont été proposés dans ce but mais, excepté le cas particulier des VCSELs accordables, ils sont toujours associés à des VCSELs par hybridation lors de délicates étapes d'assemblage.

Ce chapitre est consacré à la conception du dimensionnement du système optique et de la microlentille associée que nous souhaitons développer. Il débute par l'exposé de nos motivations pour le choix des matériaux polymères, puis dresse un état de l'art sur les actionnements possibles de microlentilles ou de micro-miroirs. Ceci nous permettra ensuite de préciser nos choix de conception pour le MOEMS complet, en tenant également compte des contraintes liées à une intégration collective sur un composant actif. Dès lors, nous présenterons les études optiques et électro-thermo-mécanique menées pour le dimensionnement du système.

1. Choix du matériau

Nous allons décrire ici les contraintes que nous nous sommes fixées pour réaliser un microsystème actif directement intégrable sur un VCSEL et les raisons pour laquelle nous avons choisi la filière polymère.

Il s'agit pour nous de concevoir un microsystème actif capable de modifier verticalement la position d'une microlentille placée sur le trajet du faisceau du laser, de manière à ajuster dynamiquement la position et la taille du waist. Ceci implique tout d'abord que le matériau mécanique utilisé soit bien évidemment transparent à la longueur d'onde des VCSELs (généralement 0.75 à 1.55 μm), et plus spécifiquement dans notre cas à 850 nm. Les polymères conviennent donc parfaitement. De plus, ces matériaux peuvent aussi être utilisés pour la réalisation de la microlentille elle-même.

Par ailleurs, la disposition matricielle des VCSELs avec un pas réduit (pitch de 150 à 500 μm) induit une très forte contrainte sur l'encombrement de notre micro-optique

adaptative. Il nous faut donc proposer un dispositif très compact, différent des dispositifs élémentaires généralement reportés dans la littérature et qui atteignent fréquemment plusieurs millimètres de côté.

De plus, notre système compact doit être facilement intégrable sur un wafer VCSEL et avec une précision d'alignement suffisante. La première condition implique évidemment que le processus d'élaboration soit compatible avec un post-processing. Ce choix a une incidence immédiate sur la compatibilité des technologies employées, car aucune étape thermique au-delà de 200°C (recuit ou dépôt de couche) n'est envisageable ; il faut également garantir la sélectivité des gravures aqueuses. En effet, l'utilisation de technologies à base de silicium ou de verre implique des étapes de gravures profondes à base d'attaques aqueuses (KOH, TMH, ...) ou sèches (DRIE) qui sont difficilement compatibles avec les étapes de réalisation de VCSEL sur substrat III-V.

La réalisation de MOEMS en technologie silicium nécessitera donc un report par hybridation après fabrication de celui-ci. Cette hybridation est toujours délicate, non seulement pour le positionnement dans le plan XY (alignement lentille / VCSEL) mais aussi et surtout suivant la dimension verticale (gap entre la surface d'émission du VCSEL et le plan de la lentille). Notre système compact impose un positionnement transverse précis (alignement optique VCSEL / lentille). Pour l'approche par hybridation, cela peut être effectué à l'aide d'un équipement de placement performant, mais cette étape reste délicate et surtout non collective. Par exemple, nous disposons au laboratoire d'un équipement Flip Chip (KarlSuss FC 150) de positionnement de puce précis ($\pm 3 \mu\text{m}$), pour obtenir un alignement latéral VCSEL-lentille suffisant.

A l'inverse, les polymères peuvent être mis en forme simplement et directement sur la plaque VCSEL en profitant de la précision d'alignement qu'offre la lithographie ($\pm 1 \mu\text{m}$). De plus, le respect de la planéité et la maîtrise du gap restent problématiques dans le cas de l'hybridation. Ces contraintes impliquent donc que la fabrication de cette micro-optique active puisse être intégrée simplement et directement (et non par hybridation) sur le wafer VCSEL. Les polymères sont donc là aussi les matériaux les plus indiqués, car la maîtrise du gap est possible grâce au contrôle de leur épaisseur lors de l'enduction sur la surface.

En outre, l'utilisation d'une technologie collective bas coût est toute indiquée pour accroître l'implémentation des VCSELs dans les applications grand public, cet aspect étant souvent un point bloquant pour le transfert industriel.

Enfin, parmi les polymères possibles, la SU-8 possède des propriétés de mise en forme spécifique pour la réalisation de MEMS (cf. chapitre III), c'est donc le matériau que nous avons choisi. De plus, au début de cette thèse, notre équipe avait déjà commencé à acquérir une expérience sur ce matériau pour la micro-optique passive (Post doc C. Levallois, projet MIOPIY).

2. Choix de l'actionnement

Plusieurs méthodes sont envisageables pour modifier dynamiquement la forme d'un faisceau à l'aide d'un microsystème optique. La plus simple à mettre en œuvre consiste à déplacer mécaniquement une lentille ou un miroir sur le trajet du faisceau (actionnement d'un

levier ou d'une membrane suspendue), ce qui conduit à une déflexion (déplacement latéral) ou à un changement de la taille et de la position du waist du faisceau (déplacement vertical). Il est également possible de modifier la forme de la lentille (cas des lentilles déformables ou des lentilles à bain d'huile) pour agir directement sur sa distance focale, ce qui est plus efficace, mais plus difficile à mettre en œuvre. On peut aussi exploiter le changement d'indice optique d'un matériau par l'application d'un champ électrique (systèmes à base de cristaux liquides).

Avant de décrire l'approche que nous avons décidé d'explorer, nous allons passer en revue ici les différents types d'actionnement possibles pour une application de mise en forme du faisceau laser pouvant être implémentés sur un VCSEL, en commençant par les commandes qui permettent un déplacement mécanique. Les critères pertinents pour le choix final seront : l'encombrement et la possibilité d'arrangement matriciel, la plage d'accordabilité et l'énergie de commande et enfin la complexité, la linéarité et la rapidité d'actionnement.

2.1 Commande piézo-électrique

Le principe de l'actionnement piézo-électrique est basé sur l'utilisation de matériaux se déformant sous l'application d'un champ électrique (fig.2.1 a). Le comportement électrique des dispositifs à base de matériaux piézo-électriques, tel que le quartz, correspond à celui d'un circuit résonnant à fort coefficient de qualité ($Q > 1000$), largement mis à profit pour la réalisation d'horloge précise et stable. Les industriels se sont rapidement tournés vers d'autres matériaux que les cristaux, et plus particulièrement vers le PZT (Titanio-Zirconate de Plomb). En effet, le PZT peut être synthétisé en couche mince, compatible avec le micro-usinage, et présente surtout un module de déformation très élevé sous l'application d'un champ électrique (typiquement quelques 70 nm/V [Hong, 2006]). Cette propriété électromécanique est employée dans des micromanipulateurs pour l'optique adaptative ou dans des capteurs comme les radars et sonars [Bernstein, 1997]. Ce type micro-actionneur est basé sur l'insertion d'une couche mince d'un matériau piézo-électrique entre deux électrodes, aux bornes desquelles on applique une tension continue, qui vient par constriction réduire de quelques fractions de % l'épaisseur de la couche et donc de l'empilement. Cela explique pourquoi ce type d'actionnement est peu utilisé dans les microsystèmes, car il faudrait une surface millimétrique de PZT pour produire un déplacement de l'ordre du micromètre. Néanmoins, la rapidité d'actionnement et le contrôle précis du déplacement sont exploités pour l'actionnement de micro-miroirs [Cheng, 2001].

Cheng et al. ont ainsi proposé un système basé sur l'utilisation de micro-leviers comportant un miroir et une couche piézoélectrique en ZnO (Oxyde de Zinc) pour l'écriture laser. Ces micro-miroirs permettent de déplacer rapidement le faisceau d'écriture et donc d'augmenter la vitesse d'impression et d'obtenir une meilleure qualité en éliminant les problèmes de synchronisation des faisceaux tout en réduisant les coûts de fabrication par rapport à une imprimante laser conventionnelle. Un autre design (figure 2.1 b), cette fois basé sur un miroir asymétrique, a été proposé par Filhol et al., qui ont conçu un micro-miroir qui se déplace lors de l'actionnement d'une bande piézo-électrique en PZT. Ce système permet un scan laser rapide et sans perte de résolution. De fortes angulations du miroir ($> 90^\circ$) sont ainsi obtenues pour quelques dizaines de volts appliquées avec des fréquences de résonance autour de 10 kHz. Enfin, Zhang et al. ont reporté une platine de translation X-Y fabriquée

avec une méthode simple et planaire [Zhang, 2003]. Ils obtiennent des déplacements de l'ordre de $20\ \mu\text{m}$ pour des tensions de commande de $150\ \text{V}$. Cependant, le système complet présente un encombrement de plusieurs millimètres carrés.

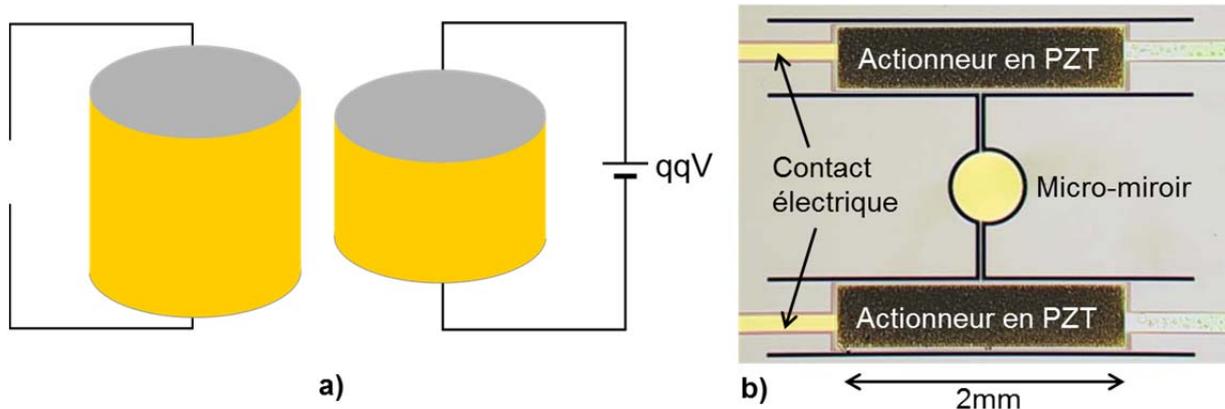


Figure 2.1 a) Déformation d'un matériau piézoélectrique sous l'effet d'un champ électrique
b) image d'un micro-miroir à déplacement piézoélectrique [Filhol, 2005]

Ce type d'actionnement est donc très intéressant pour des besoins de contrôle très précis d'un déplacement et/ou d'une durée d'actionnement courte ($T_{\text{action}} < 100\ \mu\text{s}$). Il nécessite néanmoins des tensions relativement élevées, difficilement compatibles avec un faible encombrement et un fonctionnement sur batterie (systèmes embarqués).

2.2 Commande électromagnétique

Les moteurs électriques sont les actionneurs électromagnétiques les plus connus. Leur principe est basé sur la création d'un champ magnétique induite par le passage d'un courant électrique dans un enroulement. En imposant un champ magnétique tournant autour d'un noyau magnétique mobile, on provoque sa rotation. Parmi les atouts de ce type de commande, on peut relever :

- la possibilité de modification de la polarité (inversion de la circulation du courant), ce qui permet de modifier l'orientation du champ magnétique et d'obtenir un actionnement par attraction ou par répulsion

- une bonne linéarité du déplacement même aux fortes amplitudes (plusieurs centaines de μms).

- la proportionnalité du déplacement avec le courant qui permet un actionnement performant même à faible courant. En effet, dans le cas des MEMS, la masse des parties mobiles est extrêmement réduite et ne nécessite donc que de faibles courants d'actionnement et généralement sous une tension réduite (compatible avec une batterie).

On retrouve essentiellement ce type d'actionneurs dans la réalisation de micro-miroirs, car ceux-ci n'ont pas besoin d'être transparents au passage du faisceau laser [Miller, 1997 ; Miyajima, 2003]. Miller et al. observent d'excellents résultats sur la fabrication d'un interrupteur optique, des déflexions importantes ($200\ \mu\text{m}$) sont obtenues pour des puissances appliquées autour de $40\ \text{mW}$. Cependant, la taille de l'ensemble est encore un facteur limitant

(1 cm²). Cet actionnement est très performant et prometteur mais reste encore peu développé dans les MOEMS, en raison notamment de l'encombrement qu'il nécessite. Si ce type d'actionnement est encore peu utilisé dans le domaine des MEMS, cela est essentiellement dû à la difficulté de réaliser et localiser des couches magnétiques performantes.

2.3 Commande électrostatique

S'il n'est vraiment pas performant pour de l'actionnement électromécanique classique (à l'échelle centimétrique), l'actionnement électrostatique s'avère bien adapté pour la réalisation de MEMS. Son principe repose sur la force de Coulomb correspondant à l'attraction électrostatique entre deux électrodes séparées par un diélectrique et présentant une différence de potentiel. Cet actionnement permet un contrôle précis avec des vitesses d'actionnement rapides et surtout une bonne reproductibilité. Ce procédé souffre de problèmes liés à l'évacuation des charges piégées dans le diélectrique, mais ne nécessite qu'une très faible puissance de commande. Néanmoins, ce type d'actionnement exige des tensions élevées atteignant rapidement la centaine de Volts si l'on souhaite un déplacement de quelque micromètre. De plus, il n'y a pas de linéarité entre la force produite et la puissance appliquée. Enfin, ce type d'actionnement, limité à un actionnement en attraction, présente toujours une limite de déflexion liée à l'écart entre les électrodes. En effet, il faut faire un compromis sur l'écart séparant les électrodes : les tensions demandées augmentent quand l'écart augmente et la déflexion maximale possible est dépendante de l'espace entre les électrodes.

Ce procédé est largement utilisé pour l'actionnement de matrices de micro-miroirs [Hah, 2004] mais aussi pour le déplacement de microlentilles réfractives [Bargiel, 2010] (beam-splitter). La figure 2.2 illustre un système actif avec microlentille réfractive avec une dimension de puce de 1 cm² réalisé par Laszczyk et al. Ce système permet des déplacements importants dans le plan X-Y (30-40µm) pour des tensions élevées de l'ordre de 100 V et des fréquences de l'ordre de la centaine d'Hertz (290-550 Hz).

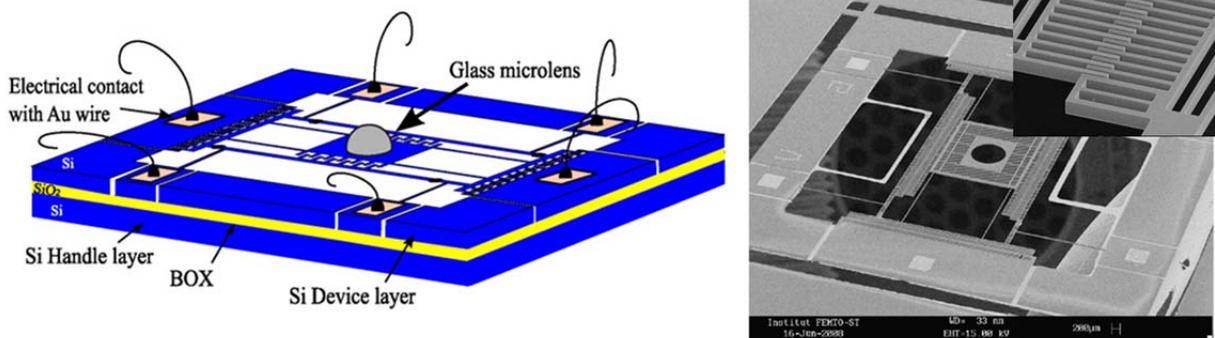


Figure 2.2 Microlentille actionnée par MEMS électrostatique [Laszczyk, 2010]

Comme nous l'avons déjà indiqué dans le chapitre I, Hedsten et al. ont fabriqué une microlentille diffractive active basée sur ce principe et l'ont hybridée par flip-chip sur un VCSEL avec un alignement optique correct entre la microlentille et le faisceau laser [Hedsten, 2008]. Un déplacement latéral de 6 µm au niveau de la microlentille a été obtenu. Cependant, la tension appliquée est de 70 V et le MOEMS présente une dimension centimétrique.

Pour conclure, l'actionnement électrostatique présente l'avantage d'être peu gourmand en énergie, rapide et potentiellement compact. Il reste toutefois bridé par l'amplitude des déplacements possibles et par la nécessité de tensions de commande relativement élevées.

2.4 Commande électro-thermique

Ce type d'actionnement est basé sur la dilatation d'un matériau induit par un échauffement par effet Joule. La majorité des actionneurs électrothermiques exploitent l'effet de dilatation différentielle, il peut être obtenu par un « effet bilame », qui consiste échauffer deux matériaux présentant des coefficients de dilatation thermique différents provoquant un déplacement. On peut aussi ne mettre en œuvre qu'un seul matériau et grâce à un dimensionnement approprié (design de deux bras de largeurs distinctes parcourues par le même courant) obtenir un auto-échauffement distinct dans les deux bras, induisant alors une dilatation différentielle.

Ce type d'actionnement est simple à réaliser, compact, et met en œuvre de faibles puissances. Toutefois, il présente l'inconvénient de chauffer le matériau et donc de provoquer des contraintes dans celui-ci. De plus, l'obtention d'un gradient en température significatif à l'aide d'une faible puissance appliquée impose la conception de zones actives (chaudes et mobiles) isolées du substrat. Pour cela, les parties mobiles doivent être désolidarisées du substrat (structures libérées) et leur design doit aussi intégrer des considérations mécaniques. La structure suspendue doit non seulement être déformable mais aussi suffisamment rigide pour ne pas se détruire au moindre effort dessus (dépôt de lentille par exemple). Elle doit aussi être capable de supporter ces déformations (dilatation, compression, ...).

La grande majorité des MEMS à actionnement électro-thermique repose sur l'empilement en alternance de couches de polysilicium fortement dopées in-situ et de couches LPCVD d'oxydes (couches sacrificielles). On peut ainsi en empilant deux à trois niveaux de polysilicium pour réaliser des systèmes micromécanique très complexes et performants [Sniegowski, 1997]. De plus, l'emploi de film conducteur épais en polysilicium (2 à 5 μm) pour la réalisation de structures mécaniques suspendues permet d'envisager des températures maximales d'actionnement supérieur à 600°C. Néanmoins, les déplacements possibles restent limités en raison du faible coefficient de dilatation thermique du polysilicium (2.4 ppm/°C).

La figure 2.3 montre un exemple d'actionneur thermo-mécanique équipé d'une microlentille en polymère permettant d'obtenir des déplacements de plus de 300 μm avec une commande de 10 V. Les fréquences de résonance sont autour de 1.1 kHz avec un encombrement inférieur au millimètre carré.

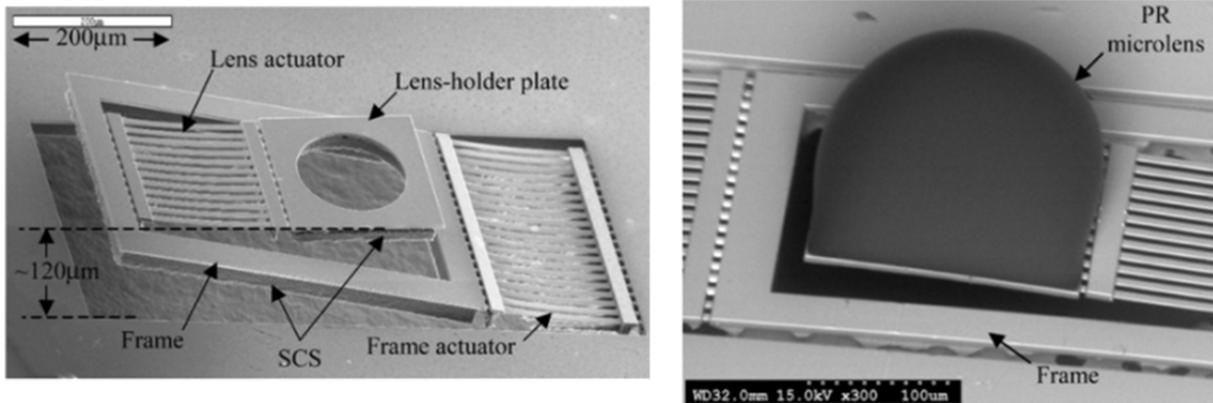


Figure 2.3 Principe de l'actionnement bilame et photo de la micro lentille reportée sur le MEMS [Jain, 2005]

On peut également citer les travaux de Wu et al. [Wu, 2008] menés sur un miroir amovible à fort déplacement vertical. Pour ce système de quelques millimètres carrés, des déplacements de plusieurs centaines de microns peuvent être obtenus avec quelques volts d'actuation, une fréquence de résonance d'environ 500 Hz et un temps de réponse de 25 ms. Ce groupe a également réalisé un MOEMS à lentille active [Wu, 2009] basée sur le même principe. Ils obtiennent des déplacements proches du millimètre (880 μm) pour un actionnement de quelques volts (3.75 V) mais nécessitant des puissances élevées (~ 495 mW) et une dimension encore importante (3x3 mm²).

Ce type d'actionnement présente donc des déplacements très importants sous de faibles voltages et un encombrement pouvant être facilement adapté, mais il souffre de sa forte consommation d'énergie. Cette dernière remarque se rapporte en particulier aux réalisations en polysilicium suspendu.

2.5 Commande pneumatique

Contrairement aux méthodes précédentes consistant à déplacer le plan d'une lentille ou d'un miroir, l'actionnement pneumatique permet de modifier la courbure d'une lentille définie par un volume de gaz ou de liquide. L'actionnement pneumatique est en général couplé à une commande électro-thermique ou électrostatique, situé hors de l'axe optique. Cette méthode, illustrée sur la figure 2.4, consiste à déformer des membranes thermiquement [Wang, 2006 ; Zhang, 2011] ou par voie électrostatique [Lee, 2007] pour déformer par pression une deuxième membrane, qui joue le rôle d'une lentille ou d'un miroir [Werber, 2006].

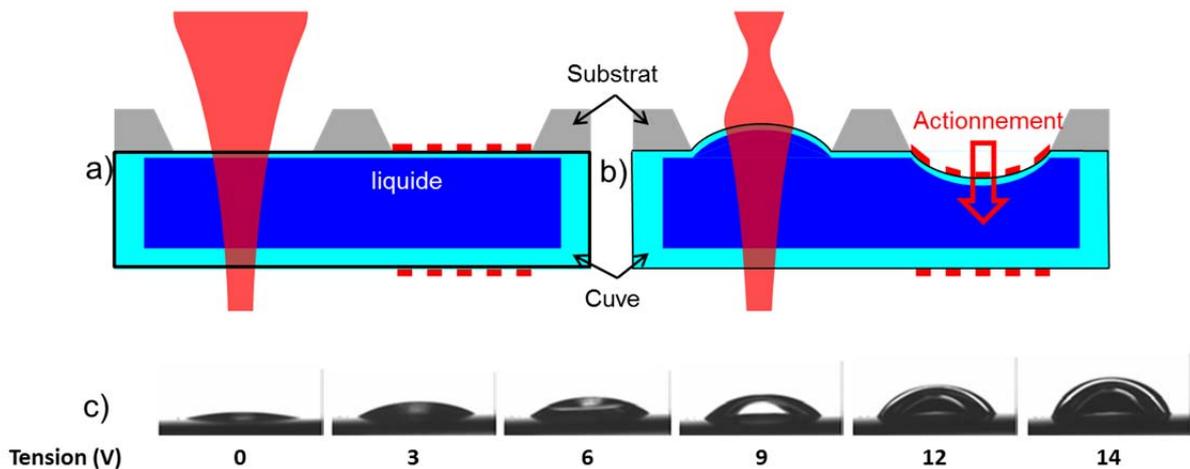


Figure 2.4 a) et b) Principe de la lentille active par actionnement pneumatique [Lee, 2007], c) image de la déformation d'une lentille en fonction de la tension [Wang, 2006]

Les membranes utilisées doivent présenter une force élastique faible et sont généralement réalisées en PDMS (PolyDiMéthylSiloxane). Là encore, cette méthode présente un inconvénient majeur en termes d'encombrement (plusieurs dizaines de mm² à quelques cm²), même si un système unique peut actionner simultanément plusieurs membranes (pour les approches matricielles).

Avec la même approche, Werber et al. ont démontré la fabrication d'un miroir inclinable par une commande électrothermique conduisant à des déplacements de plus de 60 μm et à des angles variant de 0 à 13° avec des puissances de commande 100 mW. Par ailleurs, Wang et al. ont réalisé des lentilles actionnables avec un liquide possédant une dilatation thermique plus importante. Par conséquent, la déformation obtenue pour une même température est plus importante. Dans ce cas, ils obtiennent des déformations importantes de la membrane (figure c) avec des tensions de commande allant jusqu'à 14 V. Ce système permet d'ajuster la distance focale du MOEMS dans une gamme de 3 à 15 mm. Plus récemment, Zhang et al. ont obtenu des résultats similaires avec un système utilisant de l'air plutôt qu'un liquide. Avec des tensions moindres (5 V), l'actionneur se déforme de 60 μm, ce qui permet d'ajuster la distance focale de 4 à 17 mm. Enfin, Lee et al. ont réalisé un actionnement d'une membrane en PDMS par actionnement électrostatique pour déformer la membrane et lui donner la forme d'une lentille réfractive. Des déformations de membrane de 50 μm pour une membrane de 3 mm de diamètre ont été ainsi obtenues avec un courant de 30 mA.

Pour conclure, ce type d'actionnement permet d'obtenir des déformations importantes avec des tensions relativement faibles. Cependant, les systèmes restent très encombrants (~cm²). De plus, cet actionnement doit être couplé à un autre type de commande et pose des problèmes de fiabilité en raison de la porosité du PDMS.

2.6 Commande par électromouillage de lentilles liquides

Cette approche consiste à modifier la géométrie de la lentille plutôt que sa position. Le principe des lentilles liquides est basé sur l'électromouillage. Il consiste à modifier l'angle de contact que forme une goutte de liquide avec la surface du substrat sur lequel elle a été déposée en fonction du potentiel électrique appliqué. La société Varioptics a ainsi conçu un système composé de deux liquides non miscibles encapsulés (eau et huile). Lorsqu'on applique une tension, la frontière entre ces deux liquides se déforme et présente une courbure que l'on peut ajuster pour créer une lentille réfractive à focale variable, comme l'illustre la figure 2.5. Les liquides sont placés dans une cuve conique dont les flans sont traités « hydrophobes » et sur lesquels sont disposées des électrodes. En l'absence de tension appliquée, l'eau « évite » les parois des électrodes et forme alors un arc de cercle, laissant l'huile occuper tout l'espace libre. Lorsqu'un champ électrique est appliqué, les parois deviennent moins hydrophobes, l'eau se colle aux parois, déformant la frontière eau/huile. Ce système permet de varier la focale dans une large plage de -10 cm (lentille divergente) à +33 mm (lentille convergente).

Krogman et al. ont présenté des résultats similaires, avec des lentilles déformables des focales allant de quelques millimètres (2.3 mm) à l'infini pour une tension maximale d'actionnement de 45 V [Krogman, 2006].

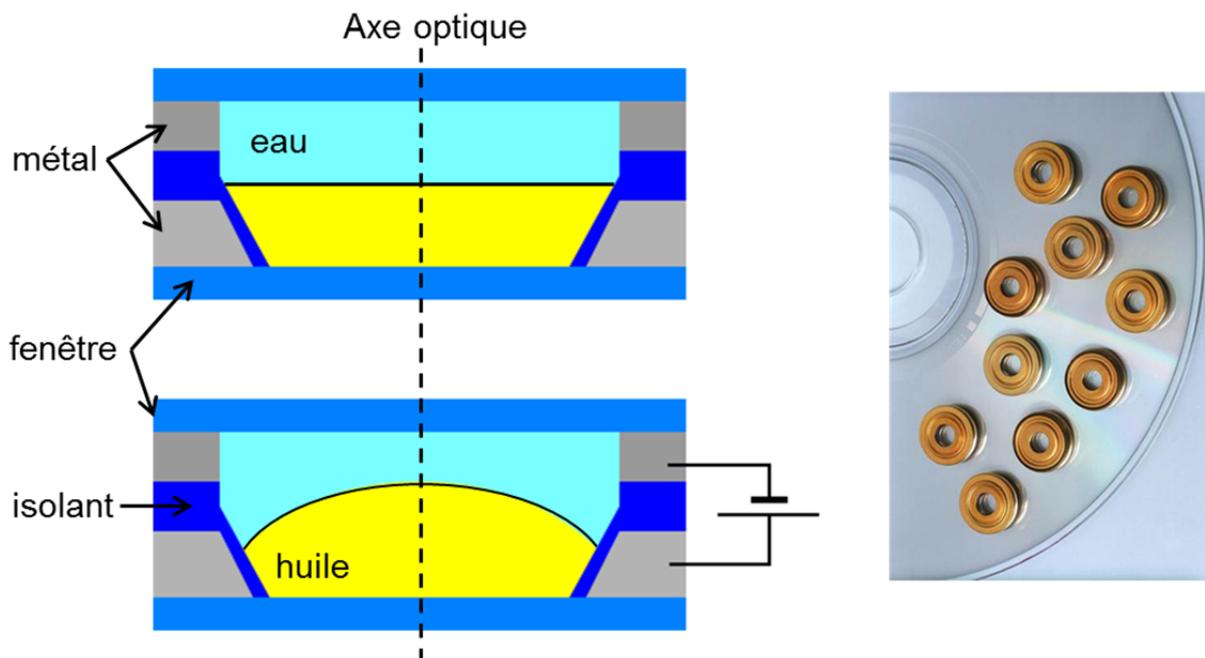


Figure 2.5 Schéma de principe de lentilles actionnée par électromouillage (avec et sans courant) et photo de lentilles montées [Varioptics]

Ce procédé permet d'obtenir une très grande variation de focales avec un temps de réponse de comparable à celui de l'œil (<10 ms). Le plus grand avantage réside dans la reproductibilité de cet actionnement qui est quasi-infini, mais là encore, ces systèmes sont de taille centimétrique et nécessitent une tension d'actionnement relativement élevée.

2.7 Actionnement électro-optique à base de cristaux liquides

Ce type de lentille est particulier car au lieu de modifier la position ou la géométrie de la lentille, ce sont les propriétés optiques du matériau qui la constitue qui sont modifiées. Pour cela, on exploite des cristaux liquides dont on peut changer l'indice de réfraction sous l'action d'un champ électrique. Les cristaux liquides sont des molécules qui peuvent présenter une phase fluide tout en conservant une organisation d'orientation (cristaux liquides nématiques) ou de position (smectiques). Lors de l'application d'un champ électrique, les cristaux nématiques tendent à s'aligner avec la direction du champ électrique externe, modifiant l'indice moyen du milieu. Comme le faisceau de lumière doit traverser la cuve contenant les cristaux liquides et les électrodes d'application de champ, ces dernières doivent être transparentes. Parmi les matériaux pour la réalisation d'électrodes transparentes, l'ITO (Indium Tin Oxide) est le plus utilisé, mais le ZnO (oxyde de Zinc) semble prometteur car il ne nécessite aucune étape de recuit d'amélioration post-dépôt.

Ye et al. [Ye, 2004] ont ainsi réalisé (figure 2.6) une lentille à cristaux liquides basée sur l'utilisation de tensions différentes pour créer un champ électrique non uniforme, créant ainsi une différence de phase permettant de contrôler la forme du faisceau. Un changement de focale d'une centaine de centimètres (de 10 à 120 cm) a été obtenu avec des tensions de contrôle allant jusqu'à 70 V. Là encore, ce système est de taille millimétrique.

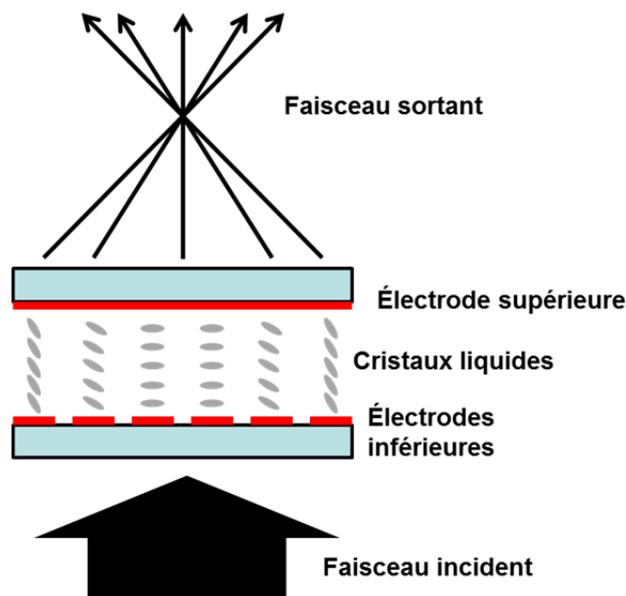


Figure 2.6 Principe de lentille active basé sur l'orientation des cristaux liquide pour contrôler la focale

Presnvakov et al. [Presnvakov, 2005] ont aussi créé des lentilles à cristaux liquides avec une commande contrôlée par l'amplitude et la fréquence de la tension appliquée pour le contrôle de l'alignement des cristaux. Ces lentilles millimétriques (1.5 mm de diamètre) permettent d'obtenir des variations de focales élevées (de 80 cm à l'infini) avec des tensions d'actionnement réduites (<10 V) et des fréquences de l'ordre du kiloHertz.

Ce type d'actionnement est très prometteur pour réaliser des lentilles actives même s'il convient mieux à ce jour à des macro-systèmes (millimétriques ou centimétriques). Il semble

toutefois possible de réaliser des microlentilles accordables avec des cristaux liquides nématiques placés dans des microcellules [Castany, 2010] Cette voie est actuellement explorée par Telecom Brest pour la micro-optique active, mais également pour la réalisation de VCSELS accordables en association avec l'équipe FOTON de l'INSA de Rennes.

2.8 Conclusions sur l'actionnement

Nous venons d'illustrer la grande diversité des actionnements reportés dans la littérature pour modifier dynamiquement un faisceau laser. Le tableau 2.1 récapitule les ordres de grandeurs de ces différents types d'actionnements.

Tableau 2.1 Comparaison des différents types d'actionnement possibles

	Actionnement piézo-électrique	Actionnement électrostatique	Actionnement thermo-électrique	Actionnement pneumatique	électromouillage	Cristaux liquides
Puissance nécessaire	<1mW	<<mW	<100mW	<100mW	<1mW	~1μW
Tension de commande	>100V	~100V	<10V	~10V	<50V	<10V
accordabilité	Faible	Moyen	Important	Important	important	Important
compacité	>mm ²	<mm ²	<mm ²	~cm ²	~cm ²	~mm ²
Vitesse d'actionnement	<ms	<ms	>10ms	>100ms	<10ms	moyen
Difficulté fabrication	moyenne	moyenne	simple	complexe	complexe	complexe
Arrangement matriciel	oui pour les micro-leviers	oui	oui	non	non	difficile

Dans ce tableau, nous mentionnons les grandeurs intéressantes par rapport au composant VCSEL. On parle ici d'accordabilité pour le changement de focales mais aussi de déplacement de l'objet obtenus par l'actuation. Pour l'aspect arrangement matriciel, nous nous intéressons à la possibilité de réaliser un actionneur ou un ensemble d'actionneurs couplés à une matrice de VCSELS ayant un pas standard (250-500 μm en télécom) ou proche de celui-ci (500 μm pour les applications d'instrumentation). Ce tableau permet d'avoir une vision globale pour nous permettre de faire le choix de l'actionnement présentant la solution la plus intéressante pour le système optique par rapport aux autres contraintes.

Notre microsystème actif doit présenter une faible énergie de commande pour que son fonctionnement soit compatible avec celui du VCSEL. En effet, dans la perspective de réaliser des applications portables, il faut pouvoir contrôler le positionnement vertical avec de faibles tensions ($V_{\text{actionnement}} < 5 \text{ V}$), et une puissance réduite pour l'autonomie.

Ceci nous a donc conduits à proposer un actionneur polymère à commande thermo-mécanique (dilatation thermique) compatible avec une tension réduite, contrairement aux actionnements électrostatiques. De plus, il peut être très compact à la différence des technologies pneumatiques et va permettre d'obtenir des déplacements élevés (>1 μm). Le choix de ce type d'actionnement exigera cependant que le polymère retenu présente une forte résistivité thermique ainsi qu'une bonne tenue en température ($T_{\text{max}} \sim 200^\circ\text{C}$), ce qui est le cas de la SU-8, dont nous détaillerons les propriétés particulières dans le chapitre III.

Dans un actionnement électrothermique, les volumes mis en jeu sont en général restreints et permettent d'assurer la possibilité d'un actionnement rapide lors du chauffage ($T_{\text{montée}} < 1 \text{ ms}$). En revanche, la faible surface et l'isolation thermique de la structure suspendue seront inmanquablement responsables d'un retour lent à température ambiante, d'où des durées d'évacuation de la chaleur et de retour à la position initiale lentes, pouvant excéder la seconde ($T_{\text{descente}} > 1 \text{ sec}$). La limitation de la vitesse d'actionnement est donc réelle, mais elle n'est pas rédhibitoire. La réactivité du système est réduite, mais permet de le rendre également moins sensible à des perturbations externes (convection forcée). Dans la conception de notre MOEMS avec ce type d'actionnement, nous espérons obtenir un temps de réponse autour de la seconde.

3. Choix de la géométrie

En se basant sur les critères d'encombrement, de déformation et d'arrangement matriciel, le système le plus simple à fabriquer est un levier déformable avec un point d'ancrage unique (cantilever). Même si nous retiendrons aussi ce type de structure dans nos réalisations, nous privilégierons des structures à multi-ancrage garantissant une meilleure robustesse et une planéité nécessaire à un bon contrôle du faisceau. En effet, ce dispositif de type 'micro-levier' devrait permettre d'obtenir des déplacements très importants mais on s'expose aussi à une déviation simultanée de l'axe optique (angle du levier figure 2.7). Cette déviation serait de plus couplée à une déformation du faisceau. Enfin, la courbure initiale présentée par un micro-levier est difficilement maîtrisable du fait des différentes étapes de fabrication nécessaire à la création d'un tel levier.

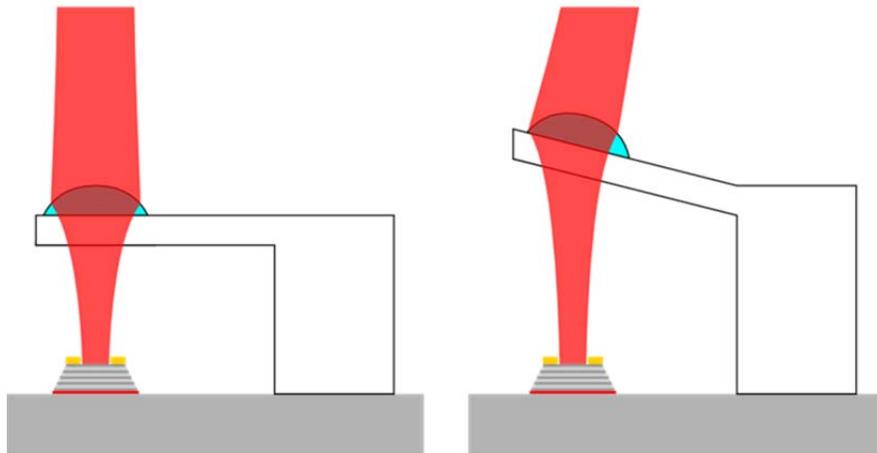


Figure 2.7 Déflexion du faisceau par un micro-levier

Nous nous intéressons donc à la création d'une membrane suspendue, présentant plusieurs points d'ancrage. En rajoutant une lentille sur cette membrane, le système pourrait dévier le faisceau laser en translatant la membrane dans le plan ([Tuantranont, 2001, Hedstein, 2008]), ou contrôler la position du plan de focalisation par un actionnement vertical [Jain, 2005]. Dans le cadre de cette thèse, nous nous limiterons à la focalisation active ou à l'optimisation dynamique de la collimation du faisceau émis par un VCSEL.

La figure 2.8 présente le principe générique du microsystème optique que nous souhaitons développer. Il correspond à une membrane polymère mobile, sur laquelle est greffée une microlentille, actionnée par une commande électro-thermo-mécanique. Lors de l'échauffement de la résistance chauffante, la membrane se dilate, et l'ancrage de chaque côté de la membrane impose un déplacement vertical à la membrane et donc à la lentille. Nous verrons dans le chapitre IV, qu'avec la technique de fabrication que nous avons retenue, nous pouvons choisir la valeur du gap initial dans une gamme allant de 20 μm et 200 μm pour respectivement des membranes de 5 à 20 μm .

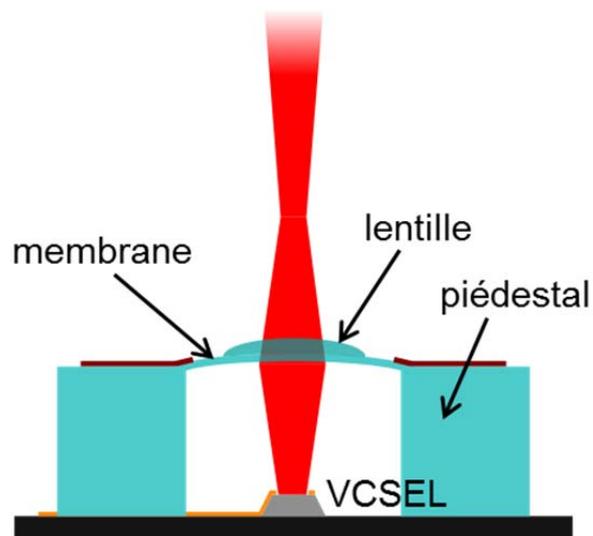


Figure 2.8 Schéma de principe du MOEMS proposé

Nous allons maintenant présenter le dimensionnement optique de ce MOEMS, qui s'appuiera sur le logiciel ZEMAX-EE qui permet de simuler la propagation des faisceaux gaussiens dans les systèmes optiques [Zemax]. Cette étude nous renseignera sur le contrôle de la divergence du faisceau et sur la tolérance au positionnement (dans le plan XY et le gap Z) entre le VCSEL et sa lentille. Notons qu'il existe d'autres méthodes de simulation, par exemple analytique comme le formalisme matriciel ABCD [Kogelnik, 1966] sur lequel nous débutons actuellement une collaboration avec Y.G. Boucher de l'ENIB. Il existe aussi des modèles plus sophistiqués qui tiennent compte des effets de diffraction [Chen, 1999] ou encore de l'ensemble complet résonateur VCSEL+lentille, ce qui permet d'évaluer les possibles effets de rétro-injection optique dans la cavité laser en présence de la lentille [Chung, 2010]. Notre équipe vient également d'entamer une collaboration avec P. Debernardi (IET, Torino) sur ce sujet.

4. Conception optique

Pour réaliser un premier dimensionnement de notre système, il faut estimer la gamme de déplacement nécessaire pour garantir le contrôle du faisceau désiré. Les contraintes sur le besoin de maîtriser le plan de focalisation dépendent beaucoup de l'application visée. Notre objectif est de pouvoir répondre à plusieurs attentes issues d'applications, allant de la focalisation dans une fibre pour les télécoms optiques [Ishikawa, 2003], jusqu'au microsystème d'analyse biologique ou médical [Birkbeck, 2003 ; Kasten, 2010].

Nous avons choisi de nous concentrer sur le contrôle du waist. La simulation concerne donc l'optimisation de la divergence du faisceau et de la position du waist (zone où le faisceau est le plus petit) en fonction des paramètres géométriques accessibles pour le système et des déplacements envisageables (quelques μms). Nous simulerons ici le déplacement du système membrane-lentille suspendue au-dessus de la source laser.

Dans un premier temps, nous nous intéresserons à une microlentille fixe, ce qui nous ramènera au cas d'une micro-optique passive, sur laquelle notre équipe avait déjà réalisé une première étude pour la collimation (divergence visée 1°) [Vergnenègre, 2005, Levallois 2008]. Nous allons donc en rappeler les principaux enseignements.

4.1 Lentille fixe pour la collimation

En optique gaussienne, on ne peut pas obtenir un faisceau parfaitement collimaté mais seulement un faisceau de moindre divergence, c'est ce qu'illustreront les différentes simulations que nous avons menées. Dans ces simulations, le VCSEL est défini comme une source gaussienne de waist w_0 de $1.3 \mu\text{m}$ correspondant à un angle de divergence de 14° , ce qui est une valeur typique mesurée pour les VCSELs monomodes que nous élaborons. La longueur d'onde d'émission est à 850 nm . Le piédestal traversé par le faisceau est en résine SU-8 (cf. chapitre III) et la lentille est en polymère d'indice de réfraction proche (cf. chapitre IV). Les notations utilisées sont données par la figure 2.9.

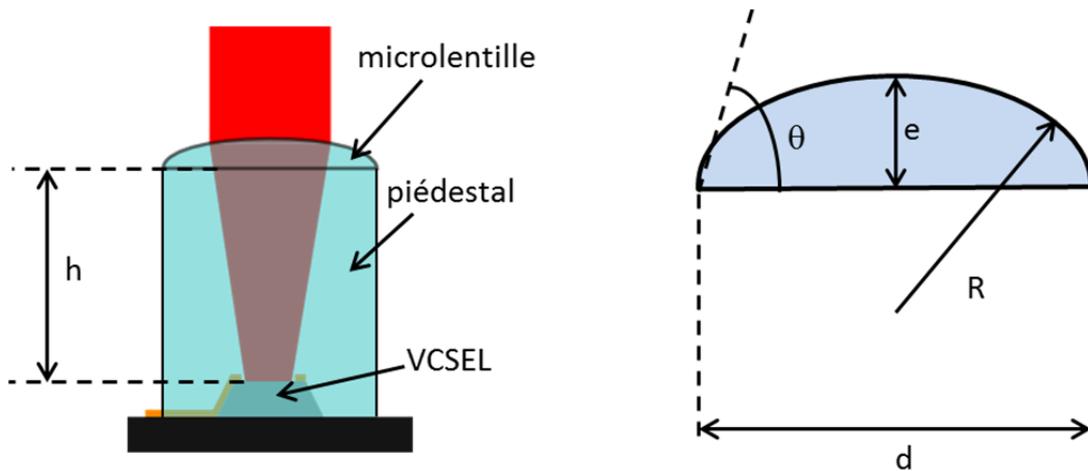


Figure 2.9 Paramètres retenues pour la conception optique d'une microlentille sur VCSEL

R est le rayon de courbure de la lentille, e son épaisseur d son diamètre. θ est l'angle de contact (ou angle polaire) de la lentille sur la surface de SU-8. Nous avons les relations suivantes entre ces différents paramètres :

$$R = \frac{1}{2e} \left(\frac{d^2}{4} + e^2 \right) \quad [2.1]$$

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{d}{2R} \right) \quad [2.2]$$

$$e = R(1 - \cos \theta) \quad [2.3]$$

De plus, si on considère une lentille mince, on peut exprimer la distance focale f' de la lentille en fonction de son rayon de courbure :

$$f' = \frac{R}{(n-1)} \quad [2.3]$$

L'étude de la divergence de source a été menée en fonction du diamètre de la lentille et de la hauteur du piédestal pour différents diamètres et pour un angle de contact accessible avec notre technologie de dépôt de microlentille (40°). Les résultats soulignent qu'une divergence de l'ordre de 1° peut être atteinte pour un large couple hauteur du piédestal/diamètre (Figure 2.10). Cependant, comme nous l'avons déjà évoqué dans le premier chapitre et comme le prévoit la théorie des faisceaux gaussiens, il est plus facile de réduire la divergence quand la distance source-lentille est élevée.

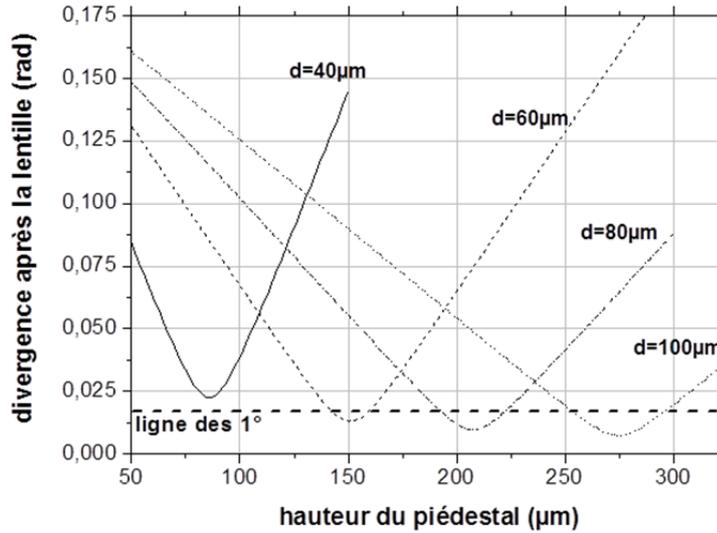


Figure 2.10 Divergence du VCSEL en fonction de la hauteur du piédestal en SU-8 pour un angle de contact de 40° pour la lentille

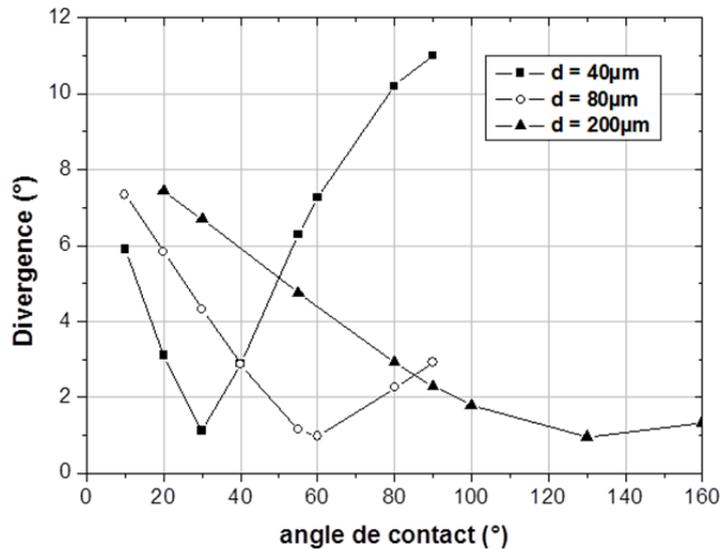


Figure 2.11 Divergence du VCSEL en fonction de l'angle de contact de la lentille pour un piédestal en SU-8 de 100 μm

De plus, le système est plus tolérant aux erreurs commises sur la hauteur de ce piédestal quand le diamètre augmente, ce qui implique aussi une augmentation de la hauteur

du piédestal. Or, la hauteur d'une structure en SU-8 peut difficilement dépasser 100 μm si l'on souhaite obtenir une uniformité suffisante de dépôt sur un wafer VCSEL (cf. chapitre IV). Ainsi, si l'on se limite à cette épaisseur de piédestal 100 μm , pour atteindre la divergence visée au degré près, il faut donc maîtriser avec une précision suffisante (5 μm) la hauteur du piédestal pour des lentilles de diamètre inférieur à 100 μm , ou alors utiliser des lentilles plus larges à angle de contact élevé (Figure 2.11).

4.2 Lentille mobile

Nous avons mené une étude similaire pour notre membrane suspendue mobile, ce qui nous a tout d'abord donné une estimation des dimensions nécessaires pour la lentille, la membrane et sa hauteur (gap d'air) nécessaires pour obtenir une divergence de l'ordre de 1° à l'état initial (pas de commande). Le faisceau se propage alors dans trois milieux (gap d'air, membrane et microlentille en polymère). Le résultat de la simulation est présenté sur la figure 2.12 et donne la divergence minimale que l'on peut obtenir pour des diamètres compris entre 40 et 120 μm , ainsi que les valeurs optimales de gaps d'air correspondantes. Ces résultats ont été obtenus pour une membrane suspendue en SU-8 d'épaisseur de 10 μm et pour un angle de contact de la lentille de 38° .

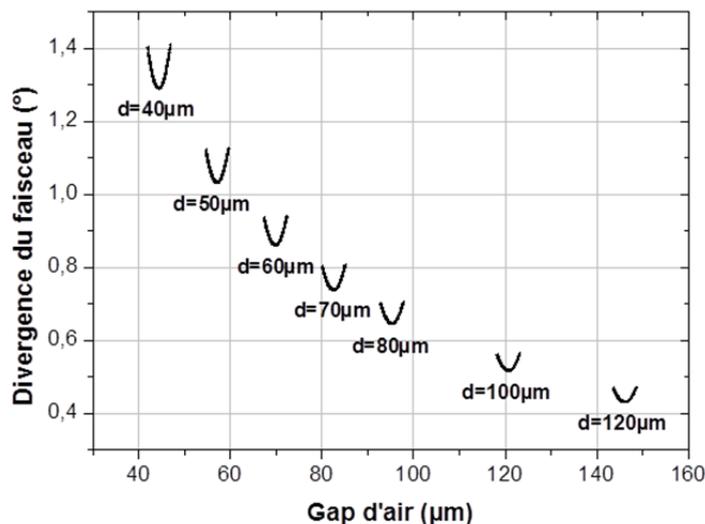


Figure 2.12 Divergence optimale du faisceau laser en fonction du diamètre de la lentille et du gap d'air

Comme précédemment, on obtient une valeur de divergence plus faible quand le diamètre de la lentille et la distance VCSEL-lentille augmentent. On note cependant qu'à distance équivalente, les valeurs de divergence obtenues sont meilleures que dans le cas des piédestaux solides en SU-8, car le faisceau s'est propagé dans l'air et il est plus étalé. On peut donc limiter la hauteur du gap à 100 μm pour garantir la divergence finale avec une meilleure tolérance sur la hauteur des ancrages en SU-8.

Nous avons ensuite fait varier le gap de $\pm 2,5 \mu\text{m}$ autour de la valeur optimale pour évaluer l'effet du déplacement sur le faisceau. La figure 2.13 présente l'évolution de la taille du waist (courbe bleue) et de sa position dans l'axe vertical (courbe noire) en fonction de la

variation du gap pour différents gaps initiaux et diamètres de lentille correspondants. On note tout d'abord que la taille du waist augmente bien avec la valeur du gap initial (respectivement de 10 à 35 μm quand on passe de 40 μm à 150 μm de gap), ce qui est cohérent avec une divergence plus faible pour les plus grands gaps.

Lorsque le plan de la lentille est translaté verticalement de 5 μm , on remarque que le plan focal (la position du waist) se déplace simultanément sur une grande distance. Ce déplacement du waist est d'autant plus important que le gap initial est large. Ainsi, on obtient un déplacement de waist d'un millimètre pour un gap de 70 μm et de plus de 3 mm pour un gap de 120 μm . Simultanément, la taille du waist est également modifiée de quelques microns. Ce type de MOEMS pourrait donc être utilisé pour corriger les erreurs éventuelles sur la hauteur du gap lors de la fabrication pour d'ajuster finement la divergence vers sa valeur minimale.

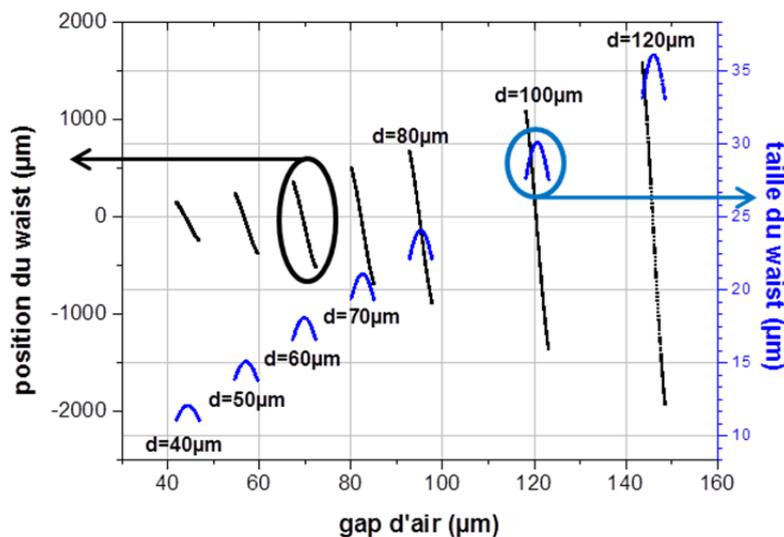


Figure 2.13 Position et taille du waist en fonction du gap d'air et du diamètre de la lentille

Cependant, pour les applications de manipulation de particules par voie optique à l'aide de VCSELs (pinces optiques) [Kroner, 2006] ou pour la détection de particules dans des canaux microfluidiques [Birkbeck, 2003], on cherche plutôt à focaliser le faisceau laser. Dans ce cas, on veut simultanément réduire la taille du waist (quelques microns) et contrôler verticalement son positionnement sur une plage allant de la dizaine à la centaine de microns. Or, dans la configuration précédente, la taille du waist diminue quand le couple gap d'air-diamètre de la lentille diminue lui aussi. Ceci impose de réduire le gap induisant une variation de la position du waist moindre.

Si l'on veut encore augmenter cette plage, il convient donc d'utiliser une lentille dont la distance focale est plus grande, que celle choisie jusqu'à présent, présentant un rayon de courbure plus élevé. Nous avons donc étudié la variation de la position du waist et de sa taille en fonction de la focale initiale de la lentille. Les résultats correspondant sont présentés sur la figure 2.14, et considère le seul cas d'un gap initial de 100 μm et d'un déplacement de 5 μm de la membrane.

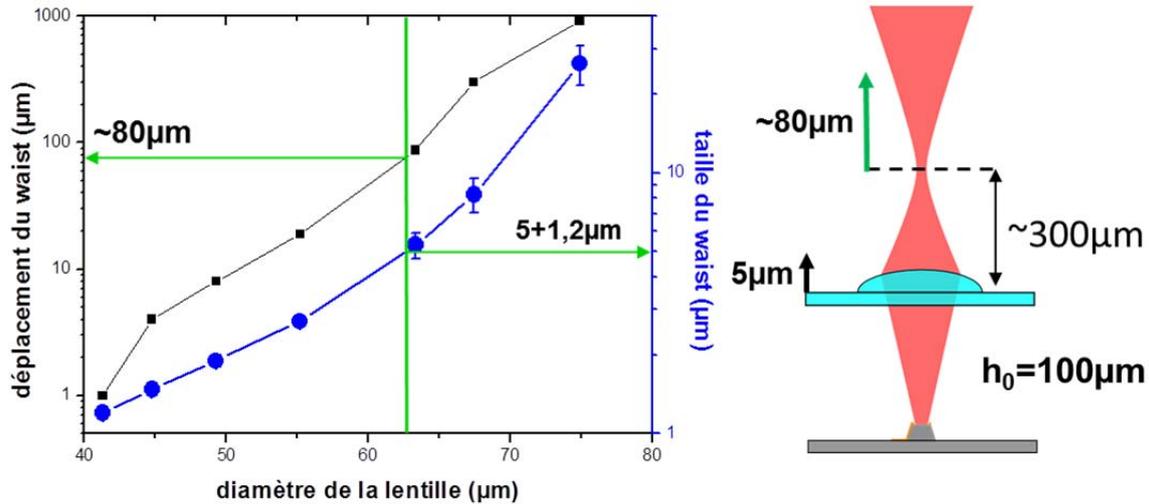


Figure 2.14 à gauche : Evolution de la position et de la taille du waist du faisceau en fonction du diamètre de la microlentille pour un déplacement vertical du plan de la lentille de $+5 \mu\text{m}$. à droite : schéma correspondant pour une lentille de $63 \mu\text{m}$ de diamètre illustrant la distance de travail ($300 \mu\text{m}$) et la plage d'accordabilité ($80 \mu\text{m}$)

Comme le montre la figure 2.14, accroître le diamètre de la lentille, et donc sa distance de travail, revient à augmenter la plage d'accordabilité du waist sous actionnement. Cependant, la taille du waist sera alors accrue. Ainsi, il faut procéder à un compromis entre la taille maximale du waist (compatibilité avec la taille des objets analysés), la distance de travail et le déplacement possible de la position du waist. Pour une lentille possédant un diamètre de $63 \mu\text{m}$ (distance focale de $85 \mu\text{m}$), on obtient ainsi une taille de waist réduite ($\sim 5 \mu\text{m}$) avec une faible déviation de celle-ci ($\sim 1 \mu\text{m}$), mais avec une distance de travail de $300 \mu\text{m}$ et une variation de la position du waist relativement élevée ($\sim 80 \mu\text{m}$). Si on utilise une lentille de $68 \mu\text{m}$ de diamètre ($90 \mu\text{m}$ de focale) et qu'on accepte une taille de waist plus grande ($8 \mu\text{m}$), on a alors une distance de travail de $600 \mu\text{m}$ et une accordabilité de $400 \mu\text{m}$. Ces valeurs sont compatibles avec l'utilisation de ces sources MOEMS pour l'analyse ou la manipulation optique dans des canaux microfluidiques.

Pour conclure, cette étude optique préliminaire nous a donné un premier dimensionnement pour la valeur du gap d'air et du diamètre de lentille associé pour la collimation ou la focalisation, avant l'étude du MEMS à proprement parler. Celle-ci va s'appuyer sur des simulations thermo-mécaniques aux éléments finis à l'aide du logiciel COMSOL. Cela nous permettra d'évaluer la loi reliant le déplacement vertical en fonction de la puissance d'actionnement appliquée. Nous optimiserons la structure retenue pour garantir sa compatibilité avec une application embarquée (faible voltage et puissance de commande, temps de réponse,...).

5. Simulations thermo-mécaniques sous Comsol Multiphysics

En tenant compte des résultats obtenus par la simulation optique, notamment pour la valeur initiale du gap d'air, nous nous intéressons maintenant à maximiser le déplacement de la membrane pour une modification dynamique de la position de la lentille. La conception

permettant d'optimiser la géométrie du MEMS a été réalisée avec le logiciel à élément finis multi-physique COMSOL (Femlab). L'application d'une puissance, dissipée par effet joule, crée un auto-échauffement localisé qui, par dilatation thermo-mécanique, induit le déplacement vertical de la membrane.

Le matériau 'mécanique' retenu pour la réalisation de cet actionneur (membrane et ancrage) est la résine négative photosensible SU-8 (voir chapitre III). Elle se prête bien à la réalisation de structure à haut facteur de forme ($F = \text{épaisseur} / \text{largeur de l'ancrage}$ entre 5 et 20). Sa viscosité permet le dépôt de couche allant d'une dizaine à plusieurs centaines de micromètre d'épaisseur, propice à la fabrication de gap important ($\text{gap} \sim 100 \mu\text{m}$). Comme la plupart des polymères, son expansion thermique est importante, environ 20 fois supérieure à celle du silicium, et sa faible conductivité thermique en font un matériau performant pour la réalisation d'actionneur thermo-mécanique. Les données utilisées dans COMSOL concernant ce matériau sont regroupées dans le tableau 2.2.

Tableau 2.2 Caractéristiques principales du polymère SU-8

Caractéristiques	Valeurs typiques	Références
Facteur de forme	5:1	MicroChem
Indice de réfraction à 850nm: n	1,56	mesures
Densité : ρ	1200 kg/m ³	Resins.com
Température de transition vitreuse: Tg	> 200°C	[Lee, 1995]
Facteur de Poisson	0.22	[Luo, 2003]
Module d'Young	2 Gpa	Microchem
Force de tension	73 Mpa	MicroChem
Conductivité thermique	0,2 W/mK	MicroChem
Coefficient de dilation thermique : CTE	52 ppm	MicroChem

5.1 Définition de la structure élémentaire

Cette étape de simulation permet d'extraire les tendances en fonction de la géométrie du système. Etant donné la complexité des simulations multi-physiques (électro-thermo-mécanique), nous nous limiterons à une définition bidimensionnelle d'une demi structure (symétrie de révolution : structures étudiées de forme circulaire). En effet, le temps de calcul pour une simulation en trois dimensions d'une telle structure est rédhibitoire car la taille des éléments est trop différentes (plus de 3 décades), le tout pour des résultats équivalents (dans notre cas). La figure 2.15 montre la géométrie de la structure simulée retenue ainsi que les paramètres analysés.

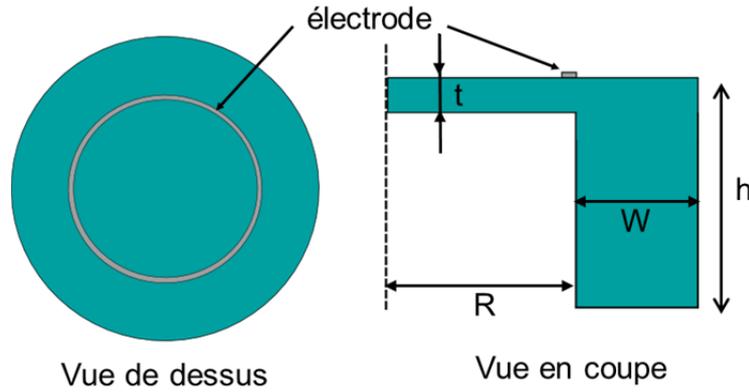


Figure 2.15 Définition de la structure simulée

Pour simplifier la simulation, nous avons commencé par dissocier les effets électro-thermiques, des effets thermo-mécaniques qui sont à priori découplés. Une première estimation électro-thermique (modèle linéaire) a montré qu'une puissance de 20 mW dissipée sur la surface de l'électrode, se traduit par une élévation en température d'une centaine de degré ($\Delta T=100^\circ\text{C}$) par rapport à la température du substrat maintenu à 20°C . La principale limitation dans cette étude électro-thermique est liée au manque, dans la littérature et donnée fabricant, d'informations sur l'évolution des propriétés thermiques et mécaniques avec la température pour le polymère retenu.

5.2 Rappels physiques liés à la thermique

L'actionnement électro-thermo-mécanique met en œuvre un chauffage par effet Joule. L'énergie électrique dissipée est transformée en énergie calorifique lors de sa dissipation (par conduction, convection ou rayonnement) crée un gradient en température et l'expansion thermique correspondante déforme la membrane. Une résistance chauffante métallique, de section S , longueur L et résistivité ρ est parcourue par un courant électrique I , génère une quantité de chaleur q_J (W) donnée par la relation suivante :

$$q_J = \frac{\rho L}{S} I^2 \quad [2.5]$$

Cette chaleur s'évacue suivant trois modes [Jacob, 1964]:

- par conduction : échange d'énergie entre deux corps en contact lié au gradient de température. Elle est régie par la loi de Fourier, en chaque point d'un corps, entre le flux thermique ' $q_{\text{conduction}}$ ' et le gradient de température :

$$\vec{q}_J = -\kappa \overrightarrow{\text{grad}T} \quad [2.6]$$

où k est la conductivité thermique de matériau considéré ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) et $\text{grad}T$ le gradient de température (K.m^{-1}). Dans le cas d'une conduction tridimensionnelle, cette densité de flux de chaleur par conduction s'exprime :

$$\overrightarrow{q_{\text{conduction}}} = -\kappa \left(\vec{u} \frac{\partial T}{\partial x} + \vec{v} \frac{\partial T}{\partial y} + \vec{w} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad [2.7]$$

- par convection : échange d'énergie entre le corps chaud et un fluide ou un gaz et dont le flux thermique de convection est donné par la loi de refroidissement de Newton :

$$q_{convection} = hA(T_s - T_f) \quad [2.8]$$

où h est le coefficient de convection ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$), A l'aire de la surface d'échange qui dissipe la chaleur, T_s la température à la surface du corps chauffant et T_f la température du milieu ambiant. Dans le cas de l'air, sans convection forcée, h est de l'ordre de la dizaine de $\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ et pour illustrer le cas d'une source thermique de 1mm^2 présentera une résistance thermique liée à la seule convection très élevée, d'environ $100\,000\text{K}/\text{W}$. Autrement dit, pour le cas particulier de nos réalisations MEMS, ce mode de conduction restera négligeable.

- par rayonnement : transfert d'énergie par les ondes électromagnétiques (infra-rouge) issue d'un corps. La puissance thermique rayonnée par un corps de surface A_i est dérivée de la loi de Stefan-Boltzmann :

$$q_{rayonnement} = \sigma \varepsilon A_i (T_s^4 - T_f^4) \quad [2.9]$$

où σ est la constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma=5.67\cdot 10^{-8}\text{W}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K}^{-4}$), ε l'émissivité de la surface chaude, la température à la surface de la source T_s , et T_f la température de la surface en regard de la source.

A partir de ces équations fondamentales, le logiciel d'analyse va résoudre les équations aux dérivées partielles correspondantes sous forme matricielle [Comsol]. Pour éviter de détériorer la résine SU-8 ($T_{\text{MAX}}(\text{SU-8})=200^\circ\text{C}$), nous limiterons lors de l'actionnement l'élévation en température à $\Delta T=100^\circ\text{C}$, ce qui légitime la non prise en compte des effets de rayonnement et simplifiera le calcul.

Pour être réellement pertinente, l'étude électro-thermique doit intégrer l'évolution des propriétés thermiques avec la température du polymère SU-8. Malgré nos efforts, nous n'avons pas obtenu d'informations sur ces lois de variation, tant dans la littérature que dans les données du fabricant. Rentrer une valeur moyenne de cette conductivité thermique et capacité calorifique (mise à profit pour l'analyse transitoire) extrapolées à 120°C rend peu probante ces simulations et la fiabilité des prévisions serait discutable. C'est pourquoi, nous nous n'avons pas poussé plus loin cette simulation, électro-thermique, pour nous focaliser davantage sur la simulation thermo-mécanique. Néanmoins l'estimation initiale ($P_{\text{dis}}=20\text{mW} \Rightarrow \Delta T=100^\circ\text{C}$), nous permet de concevoir un élément chauffant présentant une résistance de $450\ \Omega$ pour atteindre cette puissance de 20mW avec une tension d'actionnement réduite de 3V .

5.3 Optimisation de la géométrie

L'étude paramétrique des dimensions du système a été menée pour maximiser le déplacement vertical de la lentille pour un gradient de température de $\Delta T=100^\circ\text{C}$, correspondant à une température sur la membrane de 120°C . Les paramètres explorés sont respectivement 'W' la largeur du piédestal, 'R' le rayon de la membrane et 't' son épaisseur. Enfin, ont été aussi analysées l'influence de la taille et la position de l'électrode chauffante. Dans cette étude, le choix des dimensions tient à chaque fois compte des possibilités et des limites de la fabrication technologique.

La taille totale du système reste constante dans toute l'étude car elle doit rester compatible avec le pas entre VCSELs que nous avons choisi égal ici à $500\ \mu\text{m}$. La hauteur totale de la membrane sera fixée à $100\ \mu\text{m}$, adapté pour l'obtention d'une modification de la

position du faisceau d'une dizaine de micromètres compatible avec une réalisation technologique viable. L'épaisseur retenue pour l'électrode métallique est de 100 nm, ce qui correspond à une résistance de quelques centaines d'Ohms, compatible avec une commande à basse tension (<5 V). Cette électrode chauffante sera réalisée en Titane, qui adhère bien sur la SU-8 et dont la résistivité ($\rho_{Ti}=42 \mu\Omega.cm$) permet de dessin de l'élément chauffant compact (cf. chapitre IV).

5.3.1) Influence du rayon R de la membrane

Nous débutons par l'étude de l'influence du rayon de la membrane sur son déplacement vertical, en considérant un gradient de température de $100^\circ C$. On choisit comme premières conditions expérimentales une largeur W de l'ancrage (ou piédestal) de $100\mu m$, l'épaisseur de la membrane restant constante et égale à $10 \mu m$. Enfin, l'électrode chauffante est un ruban de $10\mu m$ de large et $100nm$ d'épaisseur, positionné sur le piédestal (position1 voir 4.3.4). Comme le montre la figure 2.16, on obtient une variation quasi-linéaire du déplacement vertical de la membrane, qu'on peut exprimer sous la forme :

$$Déflexion (R) = 0.0052R + 0.13$$

Pour la suite, il sera donc important de maximiser la taille de la membrane pour obtenir un déplacement important. Pour comparer l'impact des différents paramètres nous conserverons sur les différents graphiques une échelle allant de 0.5 à $2.5\mu m$.

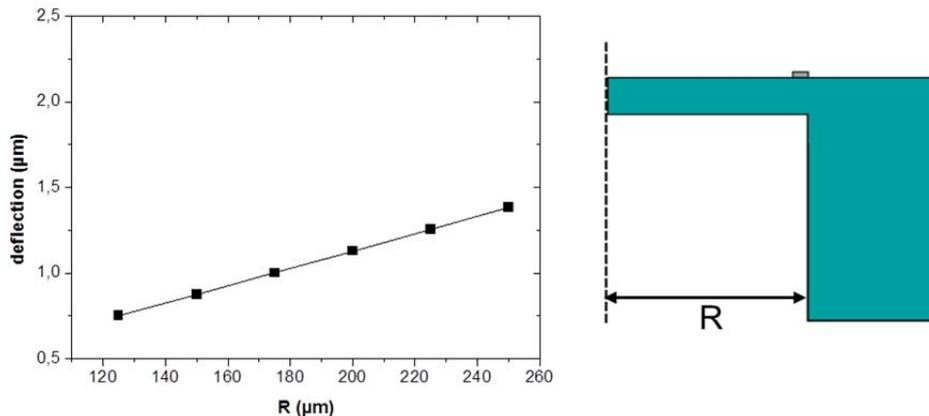


Figure 2.16 Déflexion de la membrane en fonction du rayon R

Pour rester compatible avec un pas maximal de $500 \mu m$ entre VCSEL, nous limiterons le diamètre de la membrane à $400 \mu m$. Dans le cas d'applications spécifiques de type instrumentation, concevoir des membranes plus larges restera pertinent pour obtenir un ajustement de gap plus conséquent. Cependant, accroître ce diamètre de membrane favorisera une déformation initiale non désirable.

5.3.2) Influence de la largeur W du piédestal

A présent nous nous intéressons à l'influence de la largeur du piédestal dans la gamme [$25 - 125 \mu m$] sur le déplacement vertical de la membrane, toujours pour un gradient de

100°C. Le rayon de la membrane est de $R=200\ \mu\text{m}$ pour une épaisseur $t=10\ \mu\text{m}$ et nous avons choisi la même dimension d'électrode que précédemment.

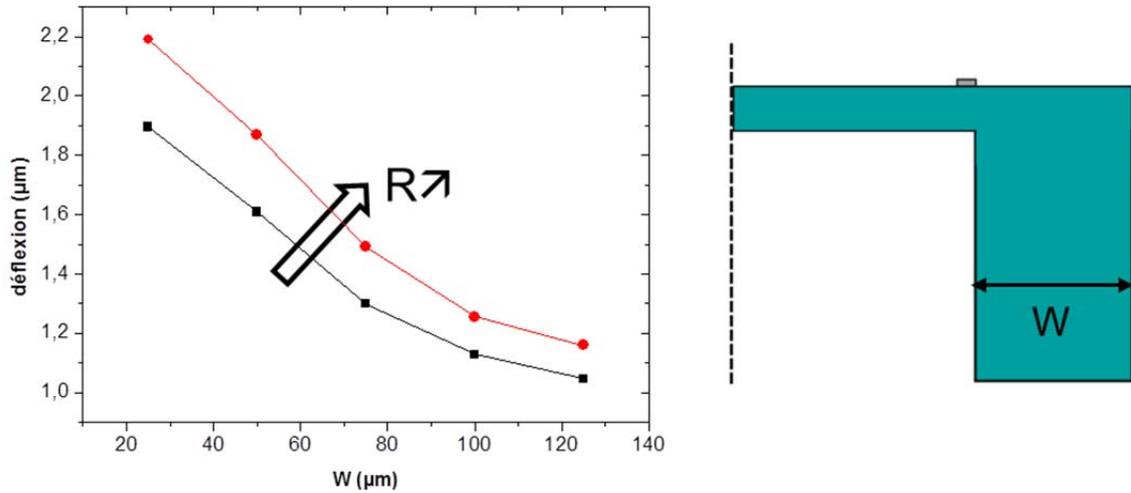


Figure 2.17 Déflexion de la membrane en fonction de la largeur W du piédestal

On remarque que le déplacement du gap est d'autant plus grand que la largeur W est réduite. Après une chute linéaire, ce déplacement semble tendre asymptotiquement vers une valeur plancher de $1\ \mu\text{m}$. Dans la suite de cette étude, on considèrera donc des piédestaux de $50\ \mu\text{m}$ de large, garantissant une bonne adhésion avec le substrat et une rigidité suffisante pour limiter la déformation latérale du piédestal. Bien sûr, elle doit être en accord avec le diamètre de la membrane pour obtenir un système compact.

5.3.3) Influence de l'épaisseur t de la membrane

On s'intéresse ici à l'influence de l'épaisseur de la membrane sur l'évolution du gap, toujours avec $W=50\ \mu\text{m}$, $R=200\ \mu\text{m}$ et la même électrode que précédemment.

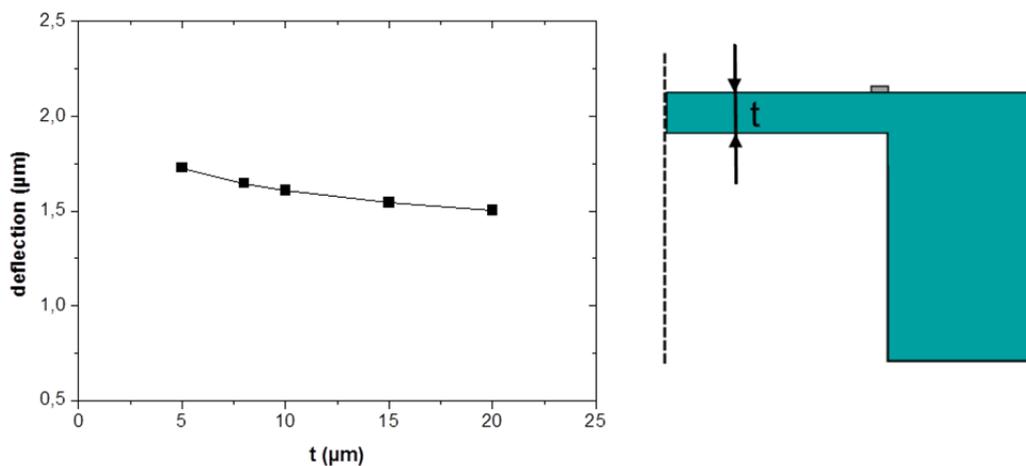


Figure 2.18 Influence de l'épaisseur t de la membrane

Comme attendu et observable sur la figure 2.18, augmenter l'épaisseur de la membrane réduit la déflexion obtenue, mais dans une faible proportion. Ainsi, réduire de

5 μm à 20 μm l'épaisseur de la membrane se traduit par une diminution relative de 14% du gap. Nous retiendrons donc pour la suite de l'optimisation une épaisseur $t=5 \mu\text{m}$, suffisante pour une réalisation reproductible et supporter les étapes du procédé de fabrication.

5.3.4) Influence de la largeur et la position de l'électrode

Maintenant, on étudie conjointement l'influence du positionnement relatif de l'électrode par rapport au bord de la membrane ainsi que la largeur de l'électrode chauffante sur l'actionnement de notre structure. Nous choisissons trois positions possibles pour l'électrode comme le montre la figure suivante.

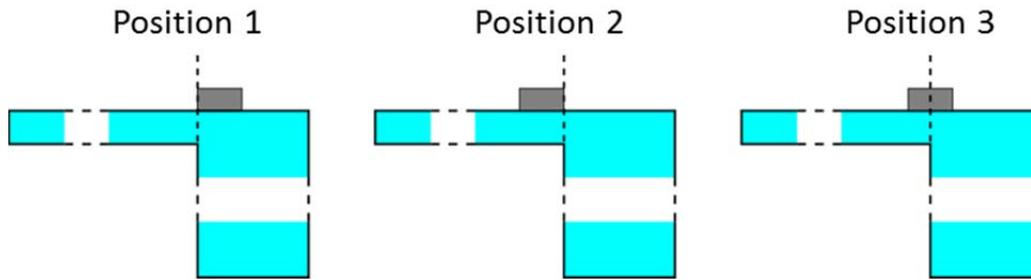


Figure 2.16 Positions latérales envisagées pour l'électrode

La position 1 se trouve entièrement sur le piédestal, la position 2 seulement sur la membrane, et la position 3 à cheval sur la membrane et sur le piédestal. On considère une structure en SU-8 avec une membrane de rayon $R=200 \mu\text{m}$, d'épaisseur $t=5 \mu\text{m}$ et un piédestal de $50 \mu\text{m}$, nous obtenons les résultats suivants pour les trois positionnements.

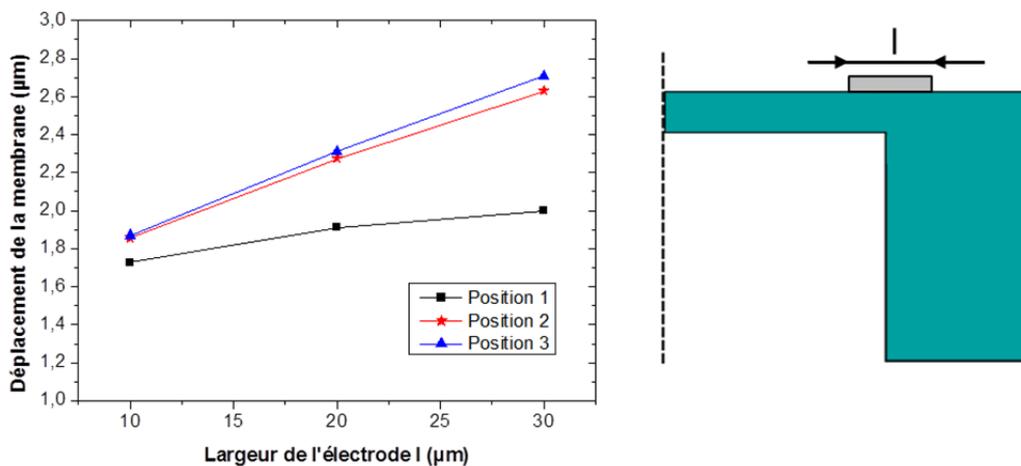


Figure 2.17 Influence de la position et la taille de l'électrode

On remarque que plus l'électrode est large, plus les déformations sont importantes, sauf dans le cas où l'on se positionne sur le bord (position 1), où cela n'a que peu d'effet. On obtient des résultats comparables pour les positions 2 et 3, mais pour la suite nous retiendrons la position 3, permettant un effet bilame et évitant d'évacuer toute la chaleur dans le piédestal. Une électrode large est donc souhaitée, mais cela sera à mettre en regard avec la valeur de la résistance de l'électrode (cf. chapitre IV).

5.4 Synthèse de la simulation thermo-mécanique

Cette étude nous a permis d'établir un dimensionnement du MOEMS correspondant à un compromis entre l'obtention d'un fort déplacement du gap et le dimensionnement imposé par l'arrangement matriciel (pitch maximal de 500 μm). En effet, augmenter le diamètre à 1 mm permettrait d'obtenir un déplacement vertical du gap d'environ 10 μm . A cela s'ajoutent des considérations de tenue mécanique. Nous avons également mis en évidence l'intérêt de réduire la largeur de l'ancrage, ainsi que la moindre influence de l'épaisseur de la membrane sur le déplacement obtenu. Nous avons aussi souligné l'intérêt de positionner l'électrode à la fois sur la membrane et sur le piédestal pour profiter d'un effet bilame (métal/SU-8) très efficace. Enfin, accroître la largeur de l'électrode permet d'accroître l'actionnement et reste compatible avec l'obtention d'une faible résistance pour un actionnement à basse tension.

La simulation thermo-mécanique de la structure finalement retenue est présentée sur la figure 2.18.

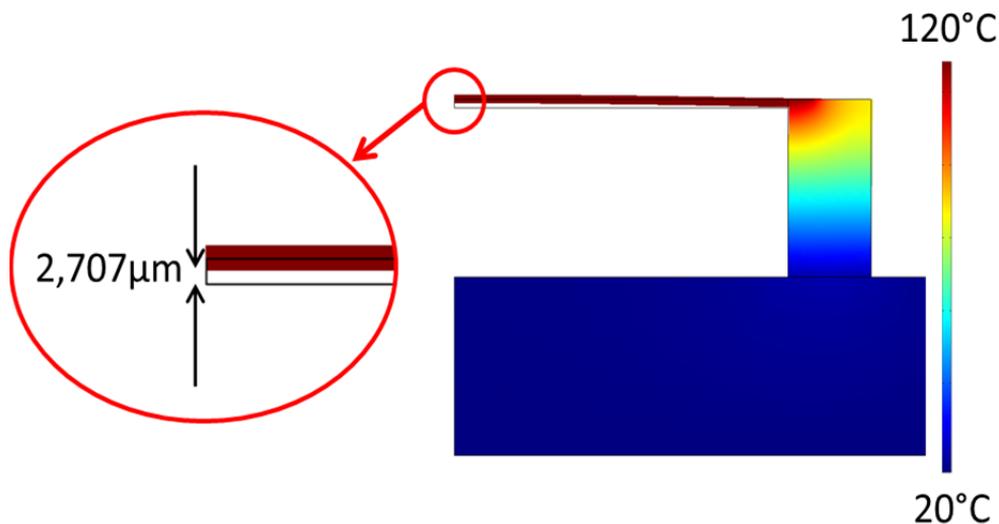


Figure 2.18 Déplacement et répartition de la chaleur simulés dans la membrane optimisée

Cette simulation considère une membrane de 200 μm de rayon d'épaisseur 5 μm , et un piédestal de 50 μm . L'électrode de 30 μm de large est placée en position 3. Le déplacement calculé est de 2.707 μm pour un gradient de température appliqué de 100°C. On note également que l'ensemble de la zone suspendue (membrane) est isotherme à 120°C et que la face supérieure du substrat de verre reste proche de 20°C, comme la face arrière dont la température est imposée lors de la simulation. Cela se traduira donc par un couplage négligeable entre la température d'actionnement de la membrane et la température du substrat susceptible d'intégrer le VCSEL.

6. Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons détaillé la conception du MOEMS à base de polymères que nous souhaitons intégrer sur un VCSEL. Au travers de la bibliographie, nous avons vu

que peu de systèmes sont réellement de taille micrométrique. Nous avons donc choisi le principe d'actionnement le plus prometteur en terme de compacité et de déplacement : l'actionnement électro-thermo-mécanique. En couplant ce type d'actionnement avec une membrane suspendue en polymère SU-8 avec lentille, présentant une forte dilatation thermique, on peut escompter un déplacement de quelques micromètres de la membrane.

Dès lors, nous avons réalisé une première évaluation, à l'aide de simulations optiques sous ZEMAX, des variations de taille et de positions du waist moyennant un déplacement du plan de la lentille de $5\ \mu\text{m}$. Nous avons dimensionné notre système du point de vue optique pour obtenir une divergence initiale réduite (collimation) ou pour réduire le waist du faisceau laser à quelques microns (focalisation). On exploite également les avantages des matériaux polymères du point de vue de la transparence et de la précision d'alignement par photolithographie.

Nous avons ensuite décrit l'étude thermo-mécanique que nous avons réalisée pour dimensionner notre MOEMS afin de maximiser le déplacement de la membrane. Nous avons obtenu un déplacement optimal de la microlentille de $2.7\ \mu\text{m}$ pour une élévation en température de 100°C . Un tel déplacement de la membrane conduit, d'après nos simulations optiques, à un déplacement de $47\ \mu\text{m}$ du waist pour un système en focalisation dont la focale de lentille est de $85\ \mu\text{m}$.

Nous allons aborder dans le prochain chapitre, l'étude des effets du vieillissement sur le matériau polymère SU-8 retenue, où seront analysés la dérive des propriétés optiques, mécanique (adhérence, contrainte,...).

Chapitre III Polymère SU-8 pour la micro-optique sur VCSELs

Dans ce chapitre, nous présenterons le polymère que nous avons mis en œuvre pour réaliser un MOEMS adapté à la correction du faisceau des sources VCSELs. Pour la fabrication du piédestal et de la membrane actionnable, nous avons exploité les caractéristiques mécaniques et optiques d'un photo-polymère UV commercial (SU-8), dont nous rappellerons ici les principales propriétés. Nous détaillerons ensuite l'étude spécifique de fiabilité que nous avons menée sur le comportement de ce polymère lorsqu'il est soumis à un vieillissement en atmosphère thermique humide. L'évolution des paramètres optiques, mécaniques et structuraux de ce matériau en fonction des contraintes appliquées sera exposée et discutée.

1. Rappels sur les polymères

Un matériau polymère est composé de macromolécules (molécules de masse moléculaire élevée). Les macromolécules sont issues de la polymérisation de monomères, de nature identique ou différente. Les polymères sont dits réticulés (thermodurcissables) quand au moins un des monomères est de fonctionnalité supérieure à deux : les thermodurcissables sont, après polymérisation, insolubles et infusibles.

La réaction chimique de polymérisation peut être amorcée par exemple par chauffage ou par insolation. Dans ce dernier cas, on parle de photopolymères, dont les plus connus sont les résines UV sensibles exploitées dans les technologies de fabrication microélectronique pour définir des motifs de tailles micrométriques par photolithographie, c'est-à-dire par exposition au rayonnement UV à travers un masque (figure 3.1). Si les zones exposées sont non solubles dans le bain révélateur, alors la résine est dite négative (figure 3.1a) et ce sera le cas de la résine SU-8, que nous comptons mettre en œuvre. Dans le cas contraire, les zones exposées deviennent solubles, la résine est dite alors positive, comme l'illustre la figure 3.1b.

Les polymères généralement utilisés pour l'optique sont transparents dans le visible et le proche infra-rouge. Parmi les plus usités, on peut citer le polyméthacrylate de méthyle ou PMMA, souvent plus connu sous sa forme commerciale sous le nom de Plexiglas ou encore le poly-diméthylsiloxane ou PDMS (famille des silicones). Nous nous intéresserons plus particulièrement ici aux poly-époxydes (issus de monomères époxydes) (figure 3.2).

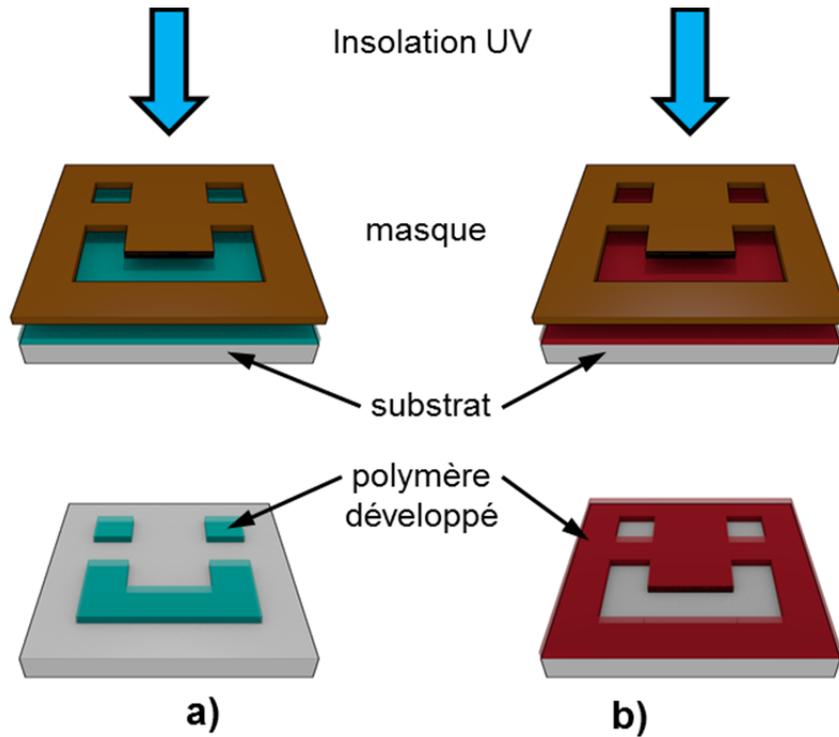


Figure 3.1 Principe de la photolithographie UV a) sur une résine négative b) sur une résine positive

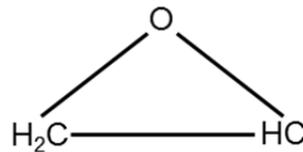


Figure 3.2 Groupe époxyde

Les poly-époxydes présentent des propriétés spécifiques telles qu'une excellente adhérence sur de multiples supports (verres, métaux, semi-conducteurs,...), une bonne résistance mécanique et chimique ainsi qu'une excellente isolation électrique. Depuis la fin des années 1960, de nombreuses évolutions ont eu lieu dans l'utilisation des poly-époxydes en électronique. Utilisés au départ en tant que substrats pour les circuits imprimés (FR4), puis comme polymères d'encapsulation pour protéger les circuits de l'environnement (verniss sacrificiels), ces polymères ont ensuite été optimisés pour répondre à des besoins plus ciblés pour la micro-fabrication par photo-polymérisation UV. Nous allons maintenant présenter les propriétés particulières de la résine UV époxyde SU-8, matériau choisi ici pour la réalisation des piédestaux et des membranes suspendues sur VCSELS.

2. Photopolymère SU-8

2.1 Présentation

La SU-8 est une résine photosensible négative de type époxyde qui tire son nom de sa molécule de base comportant 8 groupes époxyde, représentée sur la figure 3.3. La SU-8 possède une absorption suffisamment faible aux proches UV (365 et 405 nm) utilisés sur les aligneurs UV standard, pour permettre une réticulation optimale sur des grandes épaisseurs de résine pouvant aller de la dizaine de micromètres au millimètre.

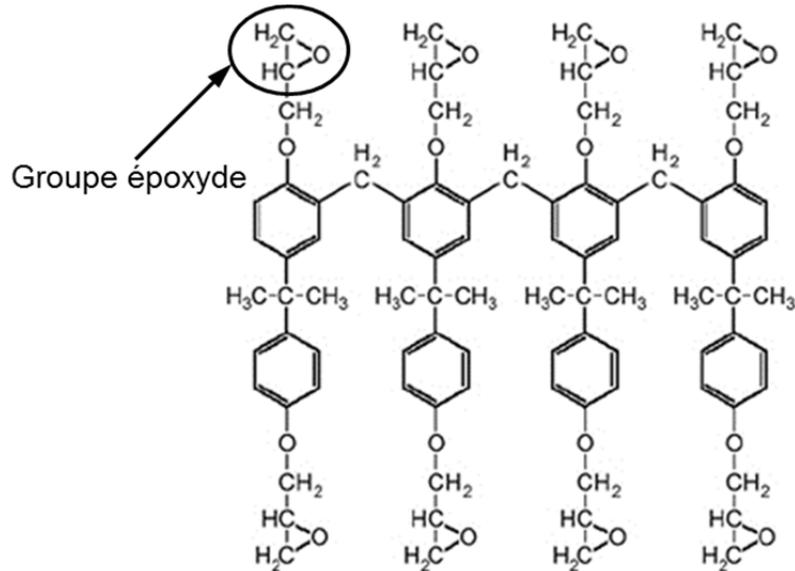


Figure 3.3 Molécule EPON SU-8 avec 8 groupes époxyde

Cette résine commerciale est également composée d'amorceurs photochimiques, de stabilisants, de solvants, ..., comme l'illustre la molécule de la figure 3.3. Cela présente l'avantage d'avoir un polymère adapté à une large gamme de besoins, mais sa formulation figée ne laisse aucune latitude sur les possibilités d'évolution. La figure 3.4 reprend le principe de polymérisation cationique qui permet la photoréticulation de la résine SU-8.

Sous l'effet de l'insolation UV, le photo-amorceur génère un acide de Lewis (étape 1) qui va créer une réaction de photolyse sur un cycle époxyde (étape 2). Ce dernier va ensuite s'ouvrir au contact d'un groupe O-H (étape 3), ce groupe peut provenir de trace d'eau présente dans la résine. Une fois ouvert, il perd un hydrogène qui va reformer un acide, ce qui induit une réaction en chaîne permettant de créer une chaîne polymère (étape 4). Ce phénomène peut continuer tant qu'il reste des groupes époxyde non ouverts, ceci constitue le principe de la réaction de réticulation de la résine SU-8 menant à une réticulation quasi complète de ce polymère thermodurcissable.

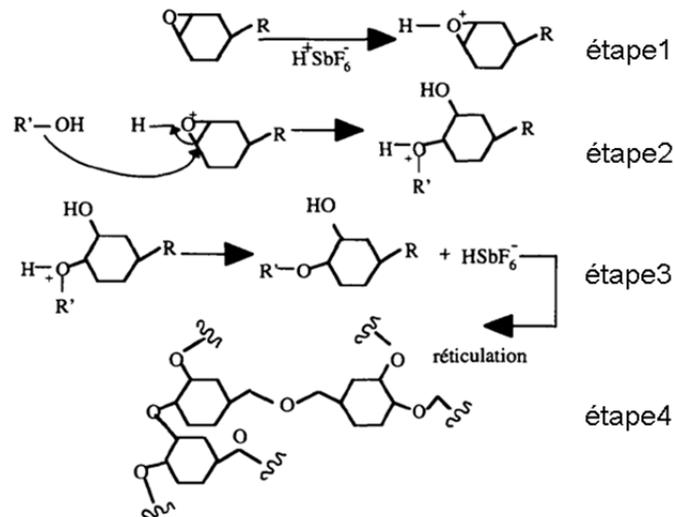


Figure 3.4 Principe de polymérisation de la SU-8

Créée sous le nom d'EPON SU-8 par IBM en 1989 [Gelorme, 1989], la SU-8 a été améliorée en 1995 par la même équipe [Lee, 1995] pour obtenir des couches épaisses (~200 μm) avec un facteur de forme F important de 1:10 (F=hauteur/largeur). Reprise et adaptée à partir de 1996 par M. Despont et H. Lorentz [Lorentz, 1997 ; Lorentz, 1998] dans le cadre de leurs travaux sur des applications microsystèmes, cette résine a été ensuite diffusée à grande échelle. Actuellement, la firme Microchem® la commercialise sous plusieurs viscosités autorisant des épaisseurs dans la gamme [~500 nm à ~2 mm]. Cette large gamme permet son utilisation dans de nombreux domaines allant de la micro-fluidique [Chuang, 2003; Ribeiro, 2005] à la micromécanique [Bertsch, 1999; Roch, 2003] en passant par la micro-optique [Hill, 2007; Nordströma, 2007] (figure 3.5).

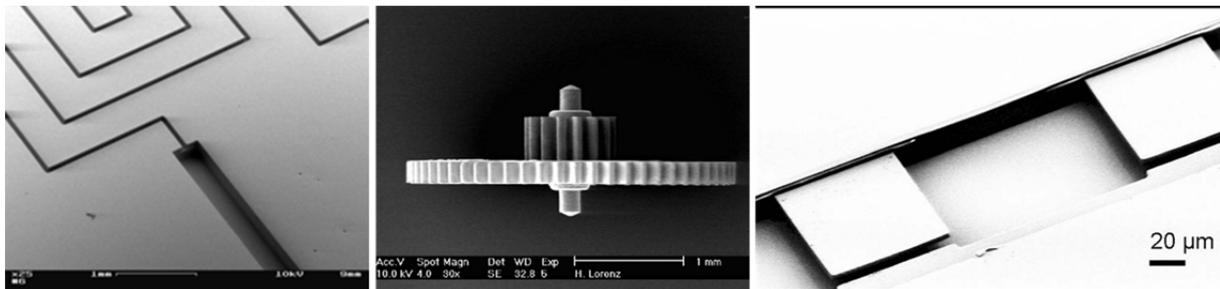


Figure 3.5 Exemples de réalisation en SU-8 pour la réalisation de a) canaux microfluidiques [Carlier, 2004], b) élément micromécanique [Lorentz, 1998] et c) guide optique [Nordström, 2007]

2.2 Caractéristiques et avantages de la résine SU-8

La SU-8 présente des atouts importants pour l'optique intégrée, car elle permet la réalisation de motifs micrométriques à facteur de forme important. Le tableau 2.2 présenté dans le chapitre II regroupe les principales propriétés de la SU-8 extraites de données du fabricant [microchem] ou issues d'études spécifiques [memscyclopedia]. Outre une bonne stabilité chimique et physique, sur lesquelles nous reviendrons, on notera un fort coefficient

de dilatation (52 ppm/K), 20 fois plus élevée que celle du silicium. De plus, on peut souligner sa biocompatibilité [Voskerician, 20003], ce qui constitue un avantage certain pour les applications biomédicales. On notera aussi l'absence de domaine plastique [Lorentz, 1997], un domaine élastique important et une bonne résistance aux radiations [Key, 2004].

Pour notre part, nous avons en premier lieu choisi ce photopolymère pour sa transparence dans le proche infrarouge ($T > 95\%$ jusqu'à $2\mu\text{m}$) proche de celle du polymère utilisé pour la lentille elle-même (cf. figure 3.6), le haut rapport de forme qu'elle permet et la simplicité de sa mise en forme. Son coefficient de dilatation élevé est également déterminant pour l'obtention de grands déplacements par actionnement électro-thermo-mécanique.

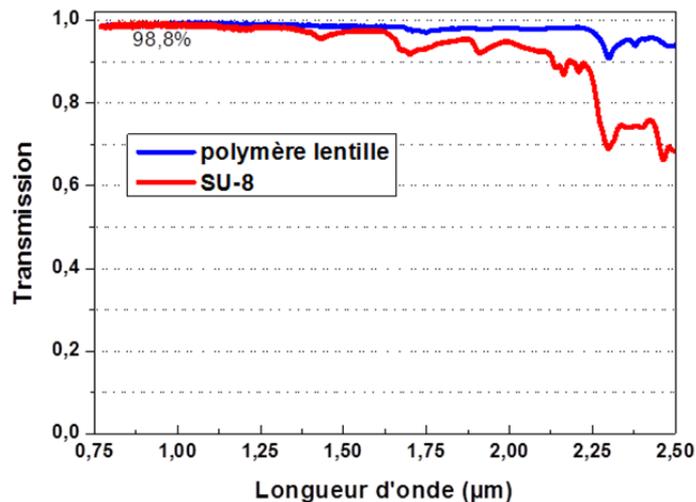


Figure 3.6 Spectres de transmission de la SU-8 et du polymère utilisé pour la microlentille

2.3 Principe de mise en œuvre

Microchem® décline la SU-8 en plusieurs séries et de nombreuses variantes correspondant à des viscosités différentes. Ceci ouvre donc la possibilité d'ajuster l'épaisseur de la couche de résine déposée. Actuellement, les résines sont vendues sous les dénominations SU-8 2000 et 3000. Pour cette dernière version, l'adhérence au substrat a été augmentée au détriment du rapport de forme, le procédé de structuration du photopolymère restant le même. Notons que bien que la plupart des données du tableau 3.1 aient été mesurées sur des versions de résines antérieures à celle employée dans notre étude, celles-ci restent valables même si la différence de solvant peut influencer légèrement la tenue sur le substrat, la verticalité des flancs et la gamme de rapports de forme accessibles.

Le cycle de photo-structuration de la SU-8 est représenté sur la figure 3.7. Il se distingue d'un procédé de mise en œuvre d'une résine positive par l'ajout d'un recuit, baptisé PEB (Post Exposure Bake) avant l'étape de révélation.

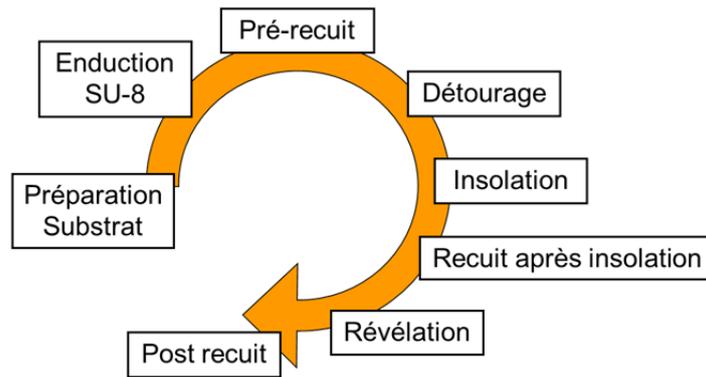


Figure 3.7 Cycle de mise en œuvre de la SU-8

La première étape consiste à nettoyer la surface du substrat et à la déshydrater afin de garantir l'adhérence du polymère. Il est possible de la renforcer en ajoutant un promoteur d'adhérence (AP-300), notamment dans le cas de dépôt sur une couche métallique. Ensuite vient l'étape d'enduction à la tournette ou « spin-coating » de la SU-8 dont les paramètres vont déterminer l'épaisseur de la résine (figure 3.8). En effet l'épaisseur dépend de la série de SU-8 (sa viscosité), de la vitesse de rotation et accélération au démarrage de la tournette. C'est une étape critique du procédé, notamment pour les fortes épaisseurs, car la reproductibilité du dépôt devient difficile à maîtriser au fur et à mesure que l'épaisseur augmente, en particulier sur les bords du substrat.

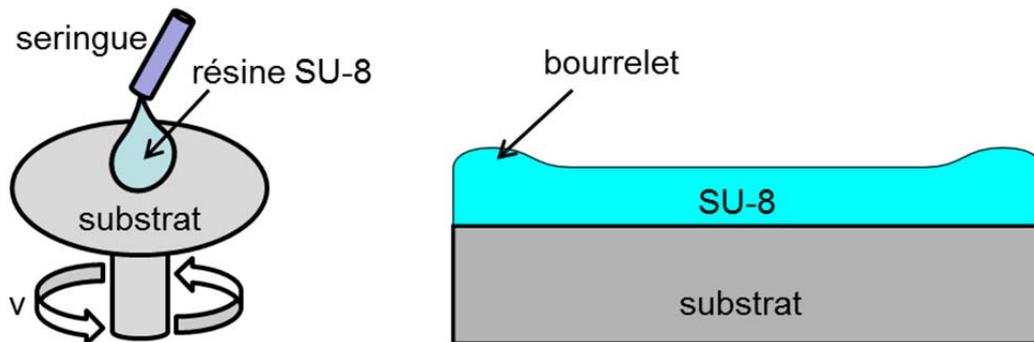


Figure 3.8 Dépôt par spin-coating et problèmes d'effets de bords après enduction de couches épaisses

Avec cette SU-8 relativement visqueuse pour obtenir une forte épaisseur, un détourage est souvent nécessaire car des « bourrelets » (sur-épaisseur) apparaissent sur le bord des wafers lors de l'enduction. Sans minimiser ce phénomène, obtenir un contact « intime » entre le masque et le wafer enduit de SU-8 devient délicat lors de la photolithographie. Cela diminue la qualité du transfert des motifs. Le pré-recuit est également une étape clé, car il détermine la vitesse à laquelle les solvants vont s'évacuer et ceci aura un fort impact sur les contraintes résultantes dans le polymère. Viennent enfin l'insolation et le recuit PEB (Post Exposure Bake). Ce dernier va terminer la réaction de photoréticulation, finir d'évaporer les solvants et ainsi achever la polymérisation du polymère insolé. L'étape de révélation permet enfin de dissoudre dans le PGMEA (Propylene Glycol Methyl Ether Acetate) la résine SU-8 non polymérisée donc les zones non exposées. La SU-8 insolée étant très stable, le temps de révélation n'est pas un facteur critique, il faut environ 15 minutes pour de la SU-8 de 100 μm

d'épaisseur et on doit s'assurer par contrôle visuel que le polymère non insolé est bien évacué. Toutefois, dans le cas de micro-canaux dans lesquels le révélateur a du mal à pénétrer, il peut être utile de prolonger l'immersion de l'échantillon dans le révélateur pendant plusieurs heures, sans risque de l'abimer. Ainsi on garantit l'évacuation de la résine non insolée dans ces zones difficiles d'accès. Le process doit être finalisé par un post-recuit, pour assurer la polymérisation complète de la SU-8.

3. Etude de la fiabilité de la SU-8

3.1 Données disponibles

Le polymère SU-8 est actuellement utilisé dans de nombreux domaines de recherche tels que la micro-fluidique, la micro-électronique, la micro-optique,... Plusieurs études ont été menées pour la caractériser sous conditions de stress (chaleur, humidité, chocs mécaniques,...) pour évaluer sa fiabilité avant d'envisager des applications industrielles. J. Hsieh et al. affirment que le polymère SU-8 ne flue plus une fois le process achevé (après polymérisation complète du polymère) quelle que soit l'humidité de l'environnement dans lequel elle se trouve [Hsieh, 2005]. Cependant, S. Mubassar Ali et al. montrent dans leur étude sur des micro-leviers, que la SU-8 absorbe de l'eau, ce qui induit un gonflement du polymère et cause des contraintes résiduelles dans le levier [Ali, 2008]. Ce phénomène, également observé par R. Feng and R. J. Farris [Feng, 2003] qui concluent que ces contraintes peuvent être minimisées par un séchage du polymère, suggérant un vieillissement physique, réversible. Jongwoo Park et D.S. Shin ont pour leur part mené une étude poussée sur la fiabilité de MEMS à base de silicium et « d'espaceurs » en SU-8 et en SU-8 2000 [Park, 2006]. Ils ont soumis leur actionneur à des contraintes mécaniques (chocs et vibrations), puis à des conditions de stockage en atmosphère chaude et humide ainsi qu'à des cyclages thermiques. Seul un stockage à 85°C et 85% RH (humidité relative) provoque une délamination variant en fonction de la version de la résine testée et de la durée du recuit (de quelques dizaines d'heures jusqu'à plus de 500 heures). Enfin, C. Salm et al. ont également mis en évidence l'importance d'éviter l'humidité (test 30°C et 95% RH) dans des micro-systèmes de détection de radiation où la SU-8 sert de piliers entre les puces CMOS et la grille en aluminium, en montrant que la SU-8 réagit à un environnement humide, ce qui se traduit par une diminution de l'adhérence de la couche de polymère [Salm, 2008].

Aucune étude sur la dernière version de la résine (SU-8 3050) n'a été publiée à notre connaissance. De plus, peu de travaux ont vérifié la fiabilité de la tenue de ce polymère après de très longues durées de stockage et aucun n'a été mené sur l'évolution des propriétés optiques avec le vieillissement. Or, le stockage des composants optoélectroniques est rarement effectué en atmosphère contrôlée. Lorsque nous avons initié nos travaux sur ces matériaux organiques, nous avons également décidé de vérifier leur stabilité pour répondre notamment à des préoccupations industrielles d'« end-users » potentiels (Intexys, EADS Astrium)

3.2 Projet FIAB SU-8

L'absence de données du fabricant sur l'évolution des caractéristiques optiques et mécaniques de la résine SU-8 3050, et d'études de fiabilité menées sur la série SU-8 3000, dont l'adhérence a été améliorée depuis la série 2000, nous avons donc entrepris une étude de l'évolution des caractéristiques du polymère (adhérence, transmission optique, état de surface, ...) susceptibles de changer au cours d'un vieillissement accéléré.

Cette étude a été réalisée dans le cadre du projet région FIAB SU-8 (Intexys, LAAS, CIRIMAT, EADS Astrium). La contrainte thermique en atmosphère humide suit la norme MIL-C-48497 qui prévoit des températures de test de 33, 50 et 85°C et des degrés d'humidité de 50, 65 et 95% pour des durées de 100, 500 et 1000 heures. Nous avons fabriqué des microstructures spécifiques sur des couches de SU-8 de 100µm déposées sur wafers de verre (Pyrex) et de silicium oxydé et les avons soumises à ces contraintes. Les propriétés structurales (dimensions, rugosité, mouillabilité), d'adhérence (essais de pelage, adhérence par cisaillement « shear-test » sur motifs dédiés) et des propriétés optiques (évolution de la transmission) ont été mesurées avant et après chaque traitement. Le but final est de dégager de ces nombreux tests une plage d'utilisation fiable de la SU-8 pour les applications de micro-optiques intégrées.

3.3 Plan d'expérience et équipement utilisé pour les vieillissements

Pour mener à bien cette étude de fiabilité, des vieillissements accélérés ont été effectués dans une enceinte climatique. Trois paramètres croisés ont été définis (température, hygrométrie et durée). Pour diminuer le temps nécessaire à la réalisation de la totalité des tests, un plan d'expérience dit plan de Taguchi a été élaboré [Taguchi, 1995], ce qui nous a permis de diminuer le nombre de tests à effectuer en balayant la gamme des paramètres choisis. Ce type de plan est très utilisé dans l'industrie, car il permet un gain de temps. De plus, il sert à déterminer les paramètres les plus influents et leur couplage éventuel. Pour une étude exhaustive avec 3 paramètres ayant chacun 3 valeurs, il aurait en effet fallu mener 27 tests en environnement contrôlé, alors qu'avec le plan présenté ci-dessous, le nombre de vieillissements a été réduit à 9. En effet, des vieillissements relativement longs (1000h ~ 42 jours) sont prévus et il convient de minimiser leur nombre. Comme on peut le voir dans le tableau 3.1, les conditions les plus drastiques sont donc : 85°C, 95% d'humidité et 500h, ce sont les vieillissements habituels demandés par les industriels (Intexys) pour s'assurer de la tenue de ce type de composants.

Les vieillissements ont été effectués à l'ENSIACET/CIRIMAT dans une enceinte climatique Vötsch VCL 0010, dans laquelle la température et le taux d'humidité ont pu être contrôlés en temps réel. Les échantillons (wafers avec des motifs SU-8 structurés) sont placés au centre de l'enceinte. On oriente les wafers de la même manière pour garantir la reproductibilité des tests. La phase transitoire de mise en température et en humidité est de durée négligeable devant les temps de vieillissement.

Tableau 3.1 Tableau de Taguchi permettant de définir le plan d'expérience

Expérience	Température (°C)	Hygrométrie (%)	Temps (Heures)
1	33	50	100
2	33	65	500
3	33	95	1000
4	50	50	500
5	50	65	1000
6	50	95	100
7	85	50	1000
8	85	65	100
9	85	95	500

3.4 Echantillons étudiés

Vingt échantillons ont été fabriqués : deux séries de dix échantillons (9 pour les vieillissements et 1 pour la référence) pour les deux types de substrat utilisés à savoir :

- des wafer en Pyrex 7740 (Corning) pour permettre de faire les mesures optiques dans le proche infrarouge (NIR),
- des wafers silicium passivés par oxydation thermique (SiO_2) pour obtenir un substrat semblable à un de nos wafers VCSEL (mesa III-V passivé SiO_2 par PECVD en dehors des zones d'émission)

Nous avons créé un masque spécifique permettant de fabriquer sur chaque échantillon par photolithographie des zones dédiées à chaque paramètre étudié à savoir :

- des mesures de rugosité et d'énergie de surface,
- des mesures de cisaillement mécanique,
- des mesures mécaniques de propagation de la rupture (ou pelage),
- des mesures optiques de transparence.

Ce masque comprend 2 bandes de 1 cm x 8 cm (bandes centrales de la plaquette) permettant de réaliser les tests de pelage ainsi que les mesures d'état de surface, 2 carrés de 1,6 cm de côté pour les caractérisations optiques et une zone comprenant des microstructures pour les tests de cisaillement (shear-test) avec des plots circulaires de 50, 80 et 100 μm et des plots rectangulaires de longueur de 500 μm et de largeurs variables : 50, 100 et 200 μm .

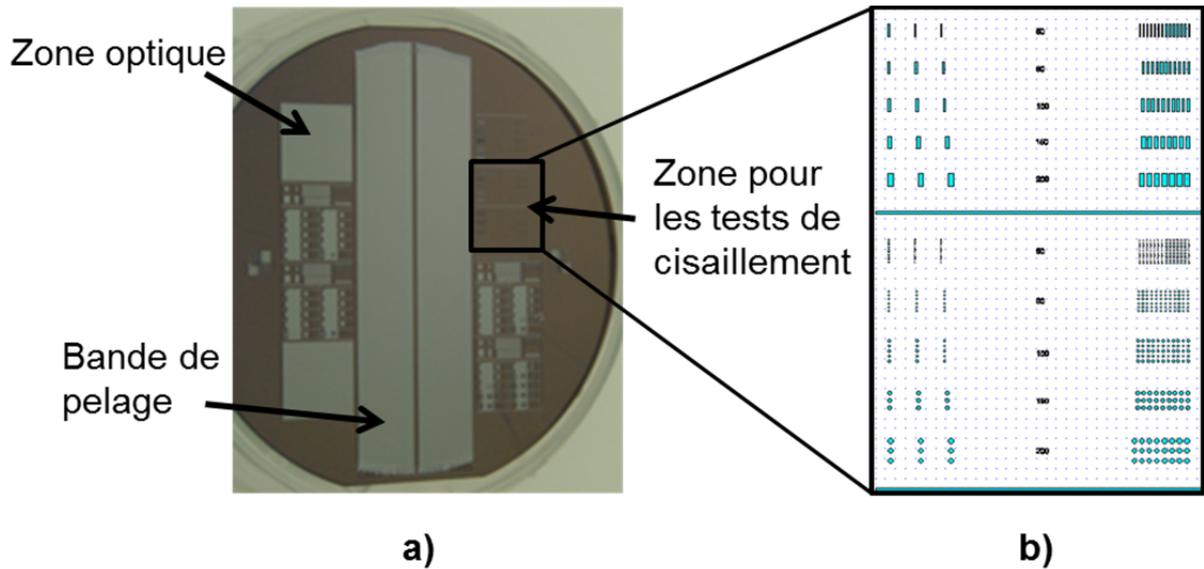


Figure 3.9 a) photo d'un échantillon de test réalisé, b) zone de tests de cisaillement avec des plots circulaires et rectangulaires

Pour réduire l'éventuelle dispersion sur la résine, l'ensemble des wafers de tests ont été fabriqués en une seule campagne d'enduction. Puis, le stockage des échantillons est effectué dans une boîte à azote pour éviter un vieillissement non contrôlé (ambiance sèche et contrôlée).

Après chaque vieillissement, l'ensemble des mesures est effectuée dans le même ordre : d'abord les mesures optiques sans contact, puis celles de surface (AFM) et enfin les mesures mécaniques destructrices (shear-test et pelage), car le wafer doit être découpé pour réaliser ces dernières. Cette découpe est réalisée par scie diamantée le long des bandes de pelage. Nous avons observé que de fines particules sont déposées autour de la découpe si on ne protège pas la SU-8 (figure 3.10 a). Pour éviter ces résidus, nous avons donc réalisé un spin-coating de résine de protection. Après découpe, cette résine est éliminée avec un développeur qui n'altère pas la SU-8 (figure 3.10 b). Nous allons maintenant décrire plus en détail les différentes caractérisations que nous avons effectuées sur les échantillons avant et après vieillissement.

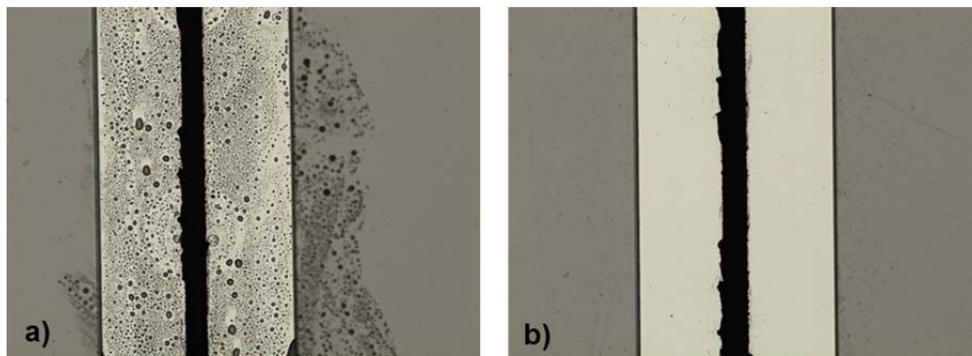


Figure 3.10 Chemin de découpe sans et avec protection

3.5 Evolution des propriétés optiques

3.5.1 Mesures de l'état de surface

Les microlentilles commerciales sont souvent obtenues par moulage et présentent typiquement des rugosités inférieures ou égales à ~ 5 nm, suffisantes pour limiter les aberrations optiques. Nous avons donc vérifié si les vieillissements influent sur l'apparition de défauts en surface susceptibles d'atténuer et/ou de déformer le faisceau. L'état de surface de la SU-8 a été caractérisé grâce à des mesures de l'énergie de surface, ainsi qu'avec des mesures de rugosité réalisées avec un microscope à force atomique (AFM).

a) Mesure de la rugosité

Principe de la mesure AFM :

La Microscopie à Force Atomique (AFM) [Binnig, 1986] permet de réaliser une cartographie de la surface grâce à un micro-styilet qui balaie la surface en mesurant la hauteur de la couche (Figure 3.11). Le principe se base sur les interactions entre la surface de l'échantillon et la pointe du microlevier. A une distance donnée, les forces de Van der Waals sont suffisamment fortes pour s'équilibrer avec les forces électrostatiques des atomes en surface, imposant un équilibre de la hauteur du microlevier. En mode "tapping" le levier vibre à sa fréquence de résonance (~ 250 kHz), avec une certaine amplitude. Quand la pointe interagit avec la surface, l'amplitude décroît et un changement de la fréquence d'oscillation a lieu. Celui-ci est mesuré au moyen d'un faisceau laser qui est réfléchi sur la micro-poutre pour être renvoyé sur un capteur.

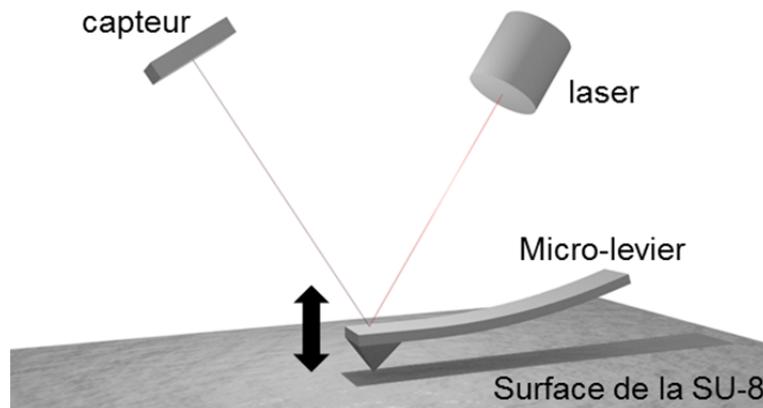


Figure 3.11 Principe de l'AFM

La mesure AFM permet de connaître la valeur maximale de la rugosité S_{\max} de la surface analysée, et la déviation standard de la rugosité S_q qui est la valeur moyenne des différentes hauteurs h_i par rapport à la hauteur moyenne h_a :

$$S_q = \sqrt{\frac{\sum (h_i - h_a)^2}{N}} \quad [3.1]$$

L'AFM est extrêmement précis (mesure de marches de l'ordre de l'Angström) mais exige beaucoup de temps pour cartographier de petites zones (10 minutes pour $5\mu\text{m}^2$ avec une résolution de 512×512 pts). Nous avons choisi de mesurer 2 zones différentes par échantillon

pour vérifier l'homogénéité de la mesure sur l'échantillon et de faire une moyenne de ces valeurs mesurées pour obtenir une valeur représentative de la surface.

Résultats obtenus :

Les mesures réalisées à l'AFM montrent une augmentation de la rugosité moyenne et maximale surtout pour les vieillissements les plus longs, les plus humides et les plus chauds (toutes les mesures se trouvent dans l'Annexe A).

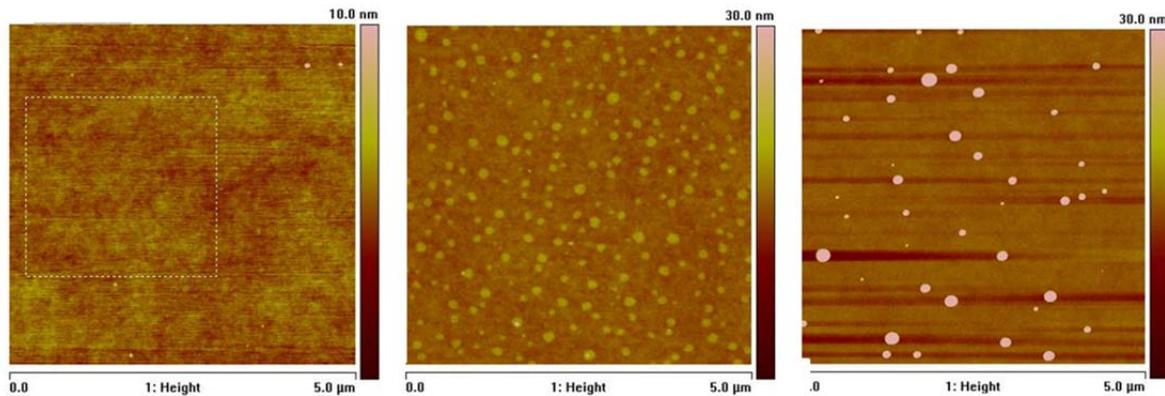


Figure 3.12 a) état de surface de la référence, b) d'une couche SU-8 sur substrat silicium pour le vieillissement 9, c) sur wafer en pyrex pour le vieillissement 9.

Des bulles font leur apparition en surface du matériau, il semblerait donc que les derniers solvants présents dans la résine soient évacués lors des vieillissements. Cependant, aucun pic d'évaporation n'apparaît lors de la mesure DSC (Differential Scanning Calorimetry) réalisée au CIRIMAT [Taton, 2009]. Cette technique permet de mettre en évidence les transitions des états des matériaux (transition vitreuse et transition de cristallisation pour les polymères, et transition de vaporisation pour les solvants) lors d'une rampe de température. Ce résultat prouve que le procédé de fabrication convient pour réticuler parfaitement le polymère. Cela veut dire que soit ces solvants sont en trop faible quantité pour être visibles au niveau de la mesure DSC, soit ce sont des « nano-bulles » d'air emprisonnées dans la résine trop visqueuse pour permettre leurs évacuation. On peut cependant affirmer que ce sont des bulles et non juste des poussières car il est possible de trouver ces dernières éclatées (figure 3.13).

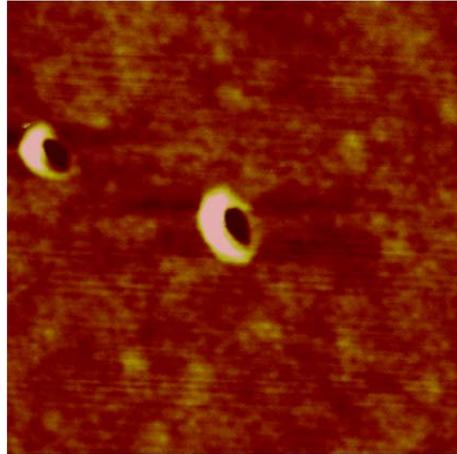


Figure 3.13 Bulles éclatées en surface (surface mesurée : $1 \mu\text{m}^2$)

Les résultats montrent également que la nature du substrat influe sur la répartition et la taille de ces bulles. On remarque que des bulles de taille plus importante apparaissent sur les surfaces de SU-8 des wafers en Pyrex. Cependant, le nombre de bulles est supérieur sur la SU-8 déposée sur substrats silicium. On peut imputer ces différences à la différence d'inertie thermique des deux substrats.

b) Mesure de l'énergie de surface

Principe :

Lorsqu'une goutte de liquide suffisamment petite (pour négliger la force de gravité) est déposée sur une surface solide plane, l'angle entre la tangente à la goutte au point de contact et la surface solide est appelé angle de contact θ (figure 3.14 b). La mesure de l'angle de contact, décrite tout d'abord par Young [Young1804], reste à ce jour la méthode la plus facile et la plus utilisée pour déterminer expérimentalement l'énergie d'interaction entre un liquide et un solide (figure 3.14 a). La mesure d'angle de contact rend compte de l'aptitude d'un liquide à s'étaler sur une surface par mouillabilité. Celle-ci est en partie liée aux propriétés chimiques des molécules présentes à la surface du substrat. On va donc pouvoir déterminer si le vieillissement va avoir une influence (changement de rugosité, dépôts d'une couche de molécule quelconque, ou vieillissement chimique et réaction des molécules de la SU-8 avec l'air et l'eau) sur l'état de surface grâce à cette information.

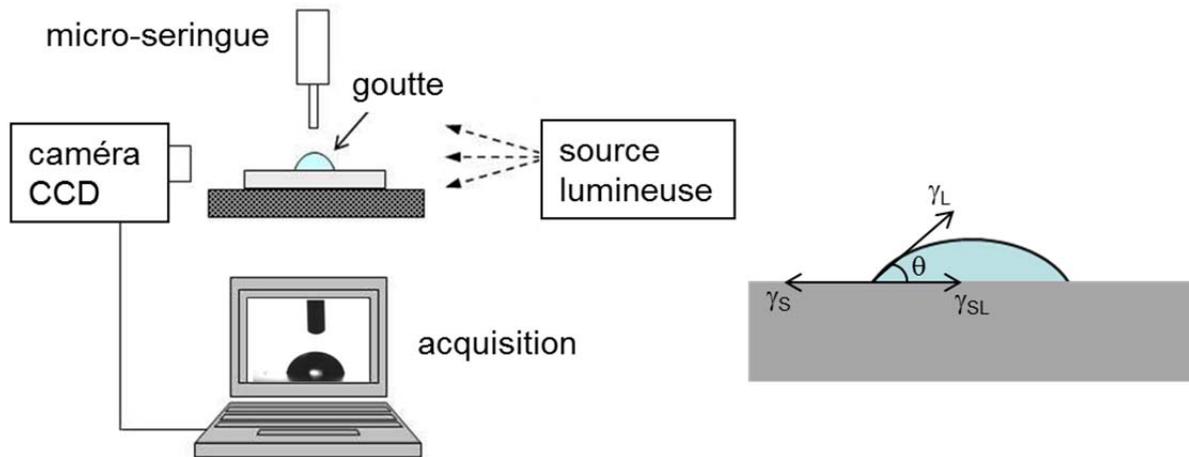


Figure 3.14 a) Schéma de principe de la mesure de l'angle de contact. b) Forces intervenant sur l'équilibre d'un liquide sur une surface.

Modèles employés :

La forme d'une goutte déposée sur la surface d'un solide est régie par trois paramètres (voir figure 3.14 b) : la tension interfaciale solide-liquide γ_{SL} , la tension interfaciale solide-vapeur γ_{SV} (γ_S) et la tension interfaciale liquide-vapeur γ_{LV} (γ_L). Ces trois grandeurs sont reliées par l'équation d'Young, qui décrit l'équilibre des tensions interfaciales au point de contact tripartite. L'équation de Young met en relation l'angle de contact d'un point triple, avec les tensions de surface des trois interfaces (γ_S solide-gaz, γ_{SL} solide-liquide, γ_L liquide-gaz).

$$\gamma_S = \gamma_{SL} + \gamma_L \cos \theta \quad [3.2]$$

Cependant l'énergie de surface de l'interface solide-liquide n'est en général pas connue, et ne permet pas de calculer l'énergie de surface γ_S . Des modèles d'interaction ont donc été développés afin de l'estimer et de rendre la description cohérente. Nous avons utilisé deux modèles différents : celui d'Owens-Wendt et celui de Good qui seront décrit dans l'annexe B.

La mesure de l'angle donne trois types d'information :

- le caractère hydrophobe (grand angle, faible énergie de surface) ou hydrophile (petit angle, grande énergie de surface) de la surface, en utilisant un liquide, par exemple de l'eau déionisée ;
- l'énergie libre de la surface, ainsi que les composantes polaires ou apolaires de cette énergie, en utilisant plusieurs liquides de référence ;
- la non homogénéité physique (rugosité) ou chimique de la surface en mesurant l'hystérésis entre l'angle à l'avancée et au retrait de la goutte.

Dans notre configuration expérimentale, nous utilisons 3 liquides, de l'eau, de l'éthylène glycol (liquide polaire) et de l' α -Bromonaphtalène (liquide apolaire). Nous avons donc pu accéder aux deux premières informations à savoir l'état de mouillabilité de la surface et l'énergie de la surface (ou tension de surface) qui caractérise l'interaction de la surface d'un liquide avec son environnement. Elle est exprimée indifféremment en mN/m, ou en mJ/m².

Ces mesures exigent de déposer des liquides sur les surfaces de SU-8, un nettoyage chimique (Isopropanol puis eau désionisée et séchage) est donc réalisé après les mesures pour éviter toute pollution. Ce nettoyage est le même que celui effectué après la révélation de la SU-8 lors de sa fabrication et ne présente donc pas de risque de modifier les propriétés du polymère.

Résultats obtenus :

L'énergie de surface ne semble que peu influencée par les vieillissements sauf dans le cas le plus sévère (vieillessement 9) où l'on remarque une augmentation assez importante de celle-ci. En corrélant ces résultats avec ceux de la rugosité, on peut supposer que les modifications viennent de la présence des bulles d'air.

3.5.2 Mesure de la diffusion

Principe de la mesure :

Nous avons effectué des mesures de diffusion optique pour vérifier si des pertes étaient présentes et/ou apparaissaient après certains vieillissements. Celles-ci sont souvent dues à la présence d'irrégularités (rugosités) de la surface observée mais elles peuvent aussi être présentes dans le volume. En couplant les résultats obtenus avec ceux de la mesure de rugosité de surface par AFM, il est donc possible de localiser les pertes. La mesure consiste à comparer l'étalement du faisceau de lumière blanche obtenu entre une référence (substrat en Pyrex) et les échantillons (figure 3.15).

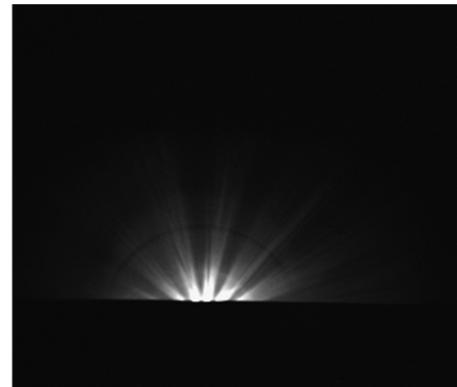
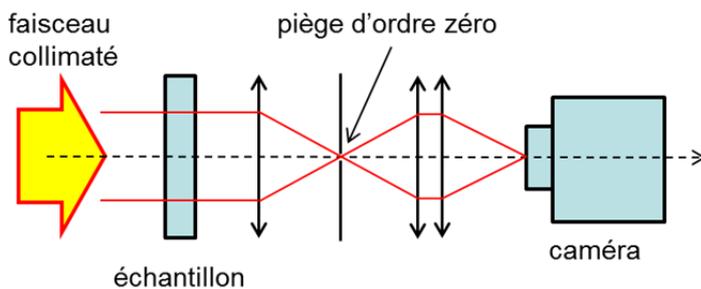


Figure 3.15 a) Principe du banc de mesure de diffusion utilisé b) étalement du faisceau obtenu au travers de l'échantillon de référence

Les observations sont faites en envoyant le faisceau collimaté sur l'échantillon et en supprimant l'ordre 0 (pic principal) de la transmission afin de voir l'étalement du faisceau. En effet, premier ordre est tellement énergétique que les autres ordres ne sont pas visibles sinon. Cependant, pour effectuer une mesure complète de la diffusion, il faudrait disposer d'une caméra pouvant capter la lumière diffusée sur tout l'angle solide (rotation de la caméra autour de l'échantillon), ce qui n'est pas le cas du banc disponible (banc développé par le laboratoire pour l'ophtalmique matricielle en collaboration avec Essilor).

Résultats obtenus :

Nous n'avons pas observé d'apparition significative de pertes par diffusion après vieillissement quel que soit le vieillissement effectué. Comme le montrent les résultats de la mesure de la rugosité, il n'y a pas d'effets périodiques susceptibles de causer une diffusion importante. Le banc de mesure utilisé n'est donc vraisemblablement pas assez précis pour mettre en évidence une diffusion résiduelle dans la SU-8.

3.5.3 Mesure de la transparence

Principe de la mesure :

Pour quantifier la transmission du polymère dans le visible et dans l'infrarouge, nous avons utilisé un spectromètre à transformée de Fourier (FTIR pour Fourier Transform InfraRed Spectrometry) acquis dans le cadre de ce projet. Ce modèle (Vertex 70) de chez Bruker Optics est équipé de 2 sources (Tungstène pour le domaine visible et « Global » pour l'infrarouge), de 2 séparatrices CaF₂ (Fluorure de Calcium) et KBr (Bromure de Potassium), et de plusieurs détecteurs (Silicium, DLA-TGS, InGaAs, etc...). Cet équipement permet de couvrir la gamme spectrale de 500 nm à 25 µm (350 à 20000 cm⁻¹) avec une résolution maximale de 0,16 cm⁻¹.

Le faisceau de lumière provenant de la source est envoyé dans l'interféromètre de Michelson (figure 3.16).

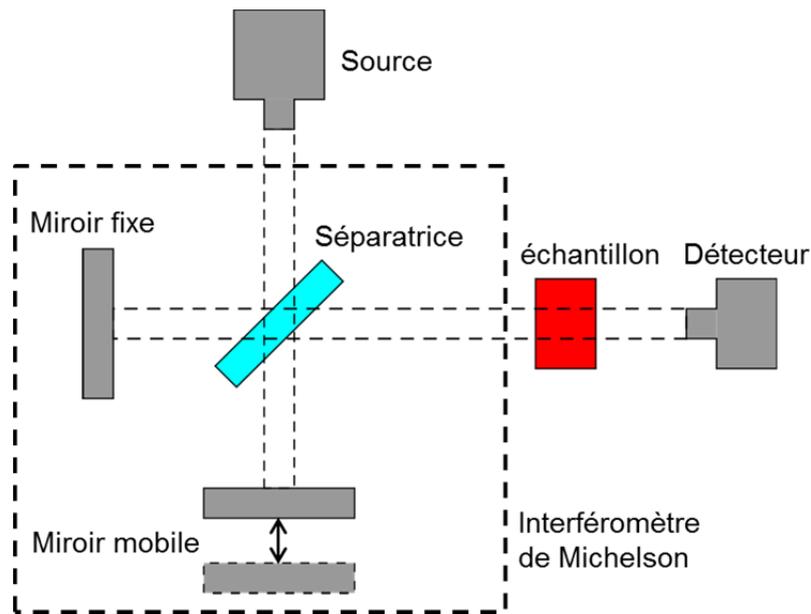


Figure 3.16 Principe de la mesure de transmission par spectrométrie FTIR

La séparatrice va diviser le faisceau en deux, les envoyant sur deux miroirs qui vont recombiner le faisceau permettant de créer des interférences. Ce faisceau traverse ensuite l'échantillon avant d'être récupéré par le détecteur.

Le signal du détecteur apparaît comme un spectre de lumière convertis par transformée de Fourier. Cela permet d'obtenir la transmission (ou la réflexion) sur toute une gamme de longueur d'onde en une seule acquisition. La mesure de transmission de l'échantillon est réalisée dans le visible et le NIR (proche infrarouge) et en utilisant une référence sur un wafer de verre (Transmission $T=I/I_0$). Le but est de vérifier la transparence d'une couche de 100 µm de SU-8 déposée sur pyrex avant et après vieillissement.

De plus, comme la gamme spectrale entre 1 – 25 μm (10000 cm^{-1} et 400 cm^{-1}) correspond au domaine d'énergie de vibration des molécules, la mesure de transmission dans le domaine NIR et MIR (moyen infrarouge) permet de détecter l'absorption d'un rayonnement infrarouge par le matériau par les vibrations caractéristiques des liaisons chimiques. En effet, lorsque l'énergie apportée par le faisceau lumineux est voisine de l'énergie de vibration de la molécule, cette dernière va absorber le rayonnement et on enregistrera une diminution de l'intensité transmise. Par conséquent à un matériau de composition chimique et de structure données, va correspondre un ensemble de bandes d'absorption caractéristiques permettant d'identifier le matériau. L'intensité de l'absorption à la longueur d'onde caractéristique est reliée à la concentration du groupe chimique responsable de l'absorption. En faisant les rapports d'aires entre une référence et les échantillons testés, il est possible de comparer la proportion d'un groupement chimique donné dans des échantillons ayant subi des traitements différents. Ceci est particulièrement intéressant pour observer la prise en eau des couches de SU-8 lors des vieillissements humides et pour vérifier l'effet d'un vieillissement chimique via l'apparition de nouvelles liaisons.

Résultats obtenus :

Les mesures effectuées dans le visible et le NIR (500 à 1100 nm) montrent qu'il n'y a pas d'évolution de la transparence de la couche de SU-8 quelque soit le vieillissement effectué. En effet les variations de mesures ($< 1\%$) sont inférieures à l'erreur de la mesure. On retrouve donc la même valeur que pour la référence non vieillie, à savoir $T > 98\%$ pour une longueur d'onde de 850 nm (exemple du vieillissement le plus drastique sur la figure 3.17 a).

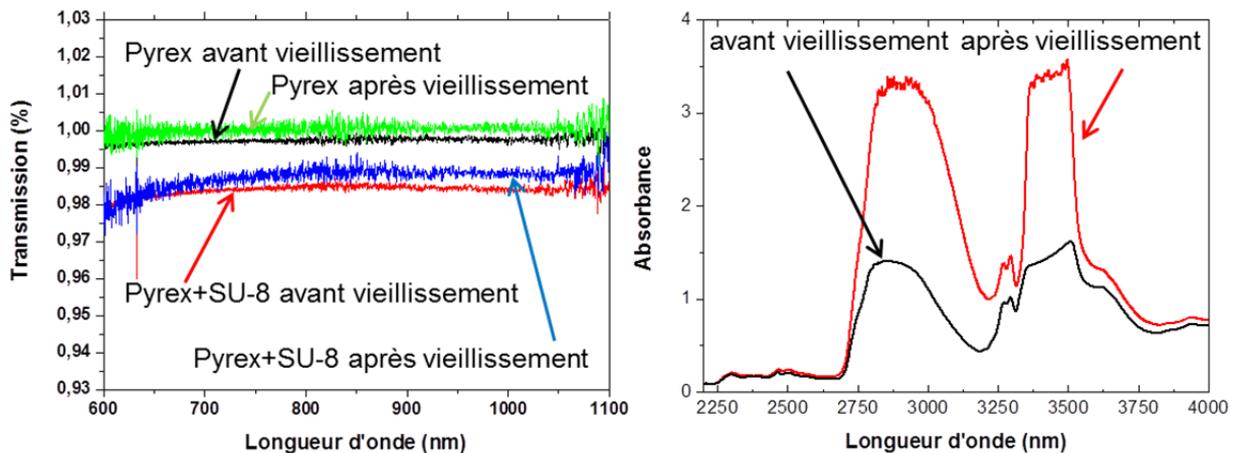


Figure 3.17 a) Spectres de transmission dans le NIR pour un échantillon avant et après le vieillissement 9. b) Spectres correspondant d'absorbance dans le MIR

Par contre, dans le domaine MIR, outre une diminution de la transparence de la SU-8 classique au-delà de $1,7\ \mu\text{m}$, on observe des variations au-delà de $2,3\ \mu\text{m}$ pour les vieillissements les plus sévères. En particulier, deux pics apparaissent dans le spectre d'absorbance à $2,89\ \mu\text{m}$ et de $3,42\ \mu\text{m}$ (figure 3.17 b). Ces pics correspondent aux bandes d'absorption de l'eau et des liaisons C-H. On peut en conclure que de l'eau soit absorbée dans le matériau lors des vieillissements en atmosphère humide quand le degré d'hygrométrie et la température augmentent.

Nous avons réalisé une analyse complémentaire avec un accessoire ATR (Attenuated Total Reflectance) du FTIR pour vérifier si l'absorption d'eau avait lieu près de la surface (100 nm à 1 µm en fonction de la longueur d'onde de mesure). L'ATR permet en effet de mesurer l'absorption dans le matériau analysé d'une onde évanescente obtenue par réflexion interne dans le cristal de germanium (figure 3.18).

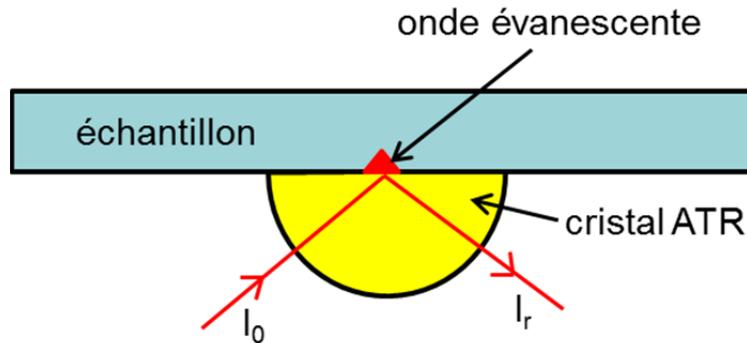


Figure 3.18 Principe de l'ATR

Nous n'avons pas observé de modification de l'absorbance en mode ATR, ce qui tendrait à prouver que cette absorption d'eau a lieu loin de la surface. Sachant que l'humidité est contrôlée dans la salle de mesure, l'absorption mesurée par transmission serait vraisemblablement due à une infiltration d'eau à l'interface entre la SU-8 et le substrat, ce qui pourra provoquer une altération des propriétés mécaniques ou/et d'adhérence.

3.6 Evolution des propriétés d'adhérence

Des essais d'adhérence ont été également menés afin d'observer la tenue à la rupture du polymère sur le substrat. Pour cela, nous avons utilisé deux appareils de mesure différents : un banc de cisaillement (ou shear-test) de la société Novamems pour mesurer l'initiation à la rupture et un banc de pelage du CIRIMAT pour caractériser la propagation de la rupture à l'interface wafer-SU-8.

3.6.1) Mesure de la force de cisaillement

Principe de la mesure :

Le shear-test est un outil de mesure de la force nécessaire pour arracher une microstructure d'un substrat. Cet appareil, présenté sur la figure 3.19, est composé d'un couteau qui vient pousser sur le côté la microstructure jusqu'à décollement ou rupture de celle-ci. Nos tests ont été réalisés avec une vitesse de déplacement du couteau de 200 µm/s, et un outil placé à une distance de 5 µm de la surface du substrat.

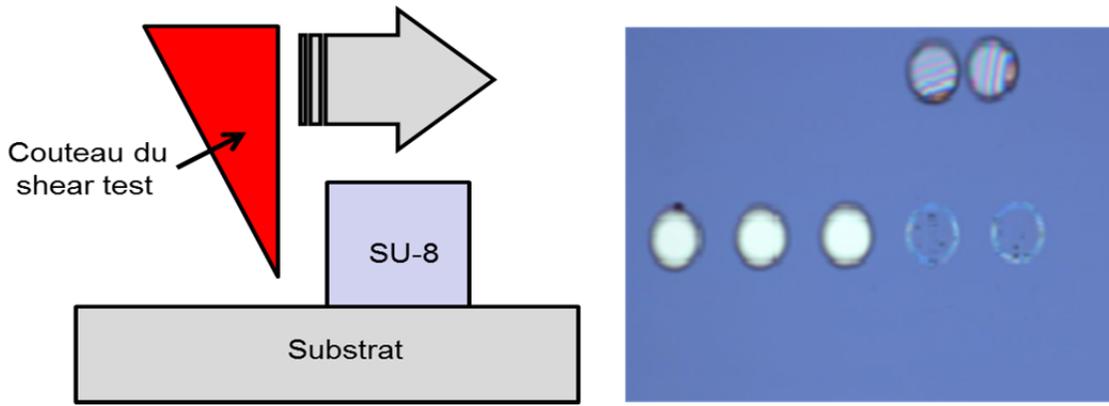


Figure 3.19 Principe du shear-test et image de microstructures circulaires ancrées et arrachées

On parle d'arrachement adhésif quand la structure se décolle du wafer et d'arrachement cohésif quand la rupture a lieu dans la structure (déchirement de celle-ci). Cet appareil permet de mesurer la force maximale à la rupture. De ces forces (en Newtons) et de la surface en contact avec le substrat, on peut extraire la contrainte de cisaillement (MPa).

Résultats obtenus :

Les images des shear-tests permettent de mettre en évidence la tenue des structures sur les bords de celles-ci. On remarque que la rupture se fait à l'interface wafer/SU-8 et non dans le matériau, ce qui renforce l'hypothèse d'une pénétration de l'eau à l'interface lors du vieillissement. En outre, la taille des motifs influe sur la contrainte nécessaire à l'arrachement et donc sur l'adhérence (Figure 3.20).

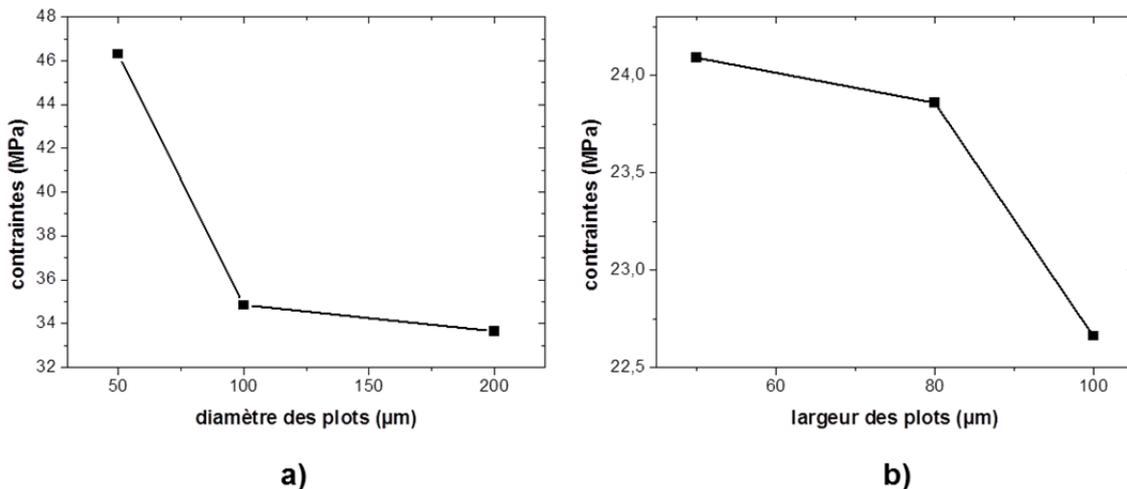


Figure 3.20 Variation des contraintes de cisaillement avec la taille des plots arrachés a) sur silicium oxydé b) sur Pyrex

En effet dans le cas de la SU-8, l'ancrage semble meilleur au point de contact triple (air-substrat-polymère ou périphérie) qu'à la surface en contact (substrat-polymère). Dans le cas des petites structures (~100µm), cas qui nous intéresse directement, le rapport entre la

surface totale en contact et le périmètre est plus faible, ce qui explique une contrainte plus importante et donc une meilleure adhérence. La tenue est donc corrélée au ménisque d'ancrage du pilier SU-8.

Par ailleurs, plus la température du vieillissement augmente, plus les contraintes s'accroissent et donc l'adhérence semble s'améliorer, bien qu'une dispersion importante soit constatée sur les mesures. C'est sur les vieillissements 7 (85°C, 50% RH et 1000h) et 9 (85°C, 95% RH et 500h) qu'on observe les plus fortes variations de contraintes de cisaillement par rapport à la référence et la plus forte amélioration de l'adhérence.

3.6.2 Mesure de propagation de la rupture

Principe de la mesure :

Nous avons utilisé un banc de pelage (INSTRON 3367) de l'ENSIACET CIRIMAT pour l'analyse de la force d'adhérence du film sur des bandes extraites du substrat avant et après vieillissement. Il s'agit d'un appareil de traction travaillant dans des gammes de forces compatibles avec celles explorées dans les collages considérés. Cet appareil est équipé d'un module de pelage permettant de maintenir un angle constant de 90°, utilisé pour les essais, entre la bande de pelage et l'échantillon. La vitesse de pelage est réglée à 10 mm/min.

Pour cela, le mors inférieur est remplacé par une glissière qui est reliée au mors supérieur par un système de câble et de poulie. Ainsi, lorsque l'on pèle l'échantillon, la remontée du mors supérieur impose la translation de la glissière et conserve l'angle choisi pour le pelage (figure 3.21).

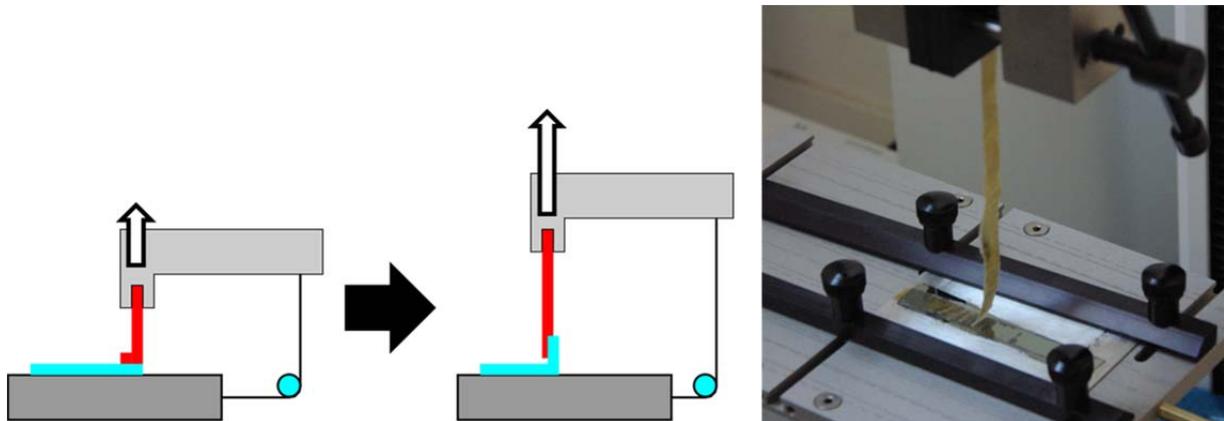


Figure 3.21 Principe et photo du banc de pelage

Comme les échantillons ne sont pas exploitables tels quels, un travail de préparation a été réalisé par le CIRIMAT [Taton, 2009] pour effectuer les tests. Tout d'abord, la bande constituée par le substrat et le film est collée sur une plaque d'aluminium avec de la colle néoprène pour pouvoir être fixée sur la glissière et éviter de casser le substrat lors de la traction. Ensuite, une bande de traction suffisamment longue pour être fixée dans le mors supérieur est collée sur le film en SU-8 au moyen d'une colle époxy (5 g de SR 8100 avec 1,1 g de durcisseur SD 8824). Après plusieurs essais, il apparaît que la surface du film SU-8 doit être préalablement dépolie pour améliorer le collage. Il faut par ailleurs initier une rupture

d'adhérence puisque l'on cherche ici à observer la propagation et non l'initiation du phénomène.

Résultats obtenus :

On remarque que les vieillissements n'influent pas sur la propagation à la rupture de la couche de SU-8, en effet l'adhérence initiale est trop importante pour qu'un décollement ait lieu. Par contre, le vieillissement augmente tellement les contraintes de cisaillement que la couche de pelage se décolle toute seule au centre jusqu'à casser entre les endroits adhérent (sur les bords) et ceux qui se décollent lorsque la surface est importante ($>1\text{cm}^2$). Dans notre cas, les ancrages que nous exploiterons présenteront des surfaces plus faibles.

3.6.3 Cyclages thermiques

Des tests complémentaires ont été réalisés pour étudier la tenue en température de la SU-8 sur les substrats pyrex et silicium en condition de cyclage thermique. Ces essais ont été réalisés au CNES par Novamems avec 2 cycles de température : de 20 à 120 °C et de -100 à 125 °C avec 10, 50 et 100 cycles. Ces caractérisations complémentaires permettent de qualifier la SU-8 pour le fonctionnement de notre MOEMS ainsi que pour des applications spatiales (EADS Astrium).

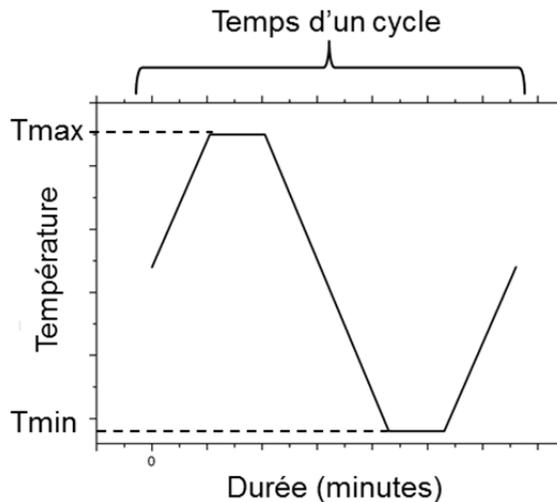


Figure 3.22 Spécifications des essais de cyclage thermique (protocole expérimental pour un cycle) Rampes définies pour le cyclage thermique : 10 minutes à T_{min}, montée en température à +10°C/minute, 10 minutes à T_{max} et descente en température à -10°C/minute.

a) Résultats pour la plage de températures de 20 à 120°C

La plage de température positive correspond aux valeurs qui seront utilisées pour actionner électrothermiquement le MOEMS. Cela nous permet donc de vérifier si ce cycle thermique aura une influence sur l'état de la SU-8. Nos mesures montrent que la seule grandeur qui change est à nouveau la contrainte d'arrachement du matériau, ce qui confirme les tendances précédentes sur les effets de la taille et sur l'effet bénéfique de la température. En effet, on remarque leur augmentation lors du cyclage. Ce résultat est plus prononcé pour

les substrats en silicium. Pour les wafers en verre, on observe une augmentation des contraintes de cisaillement au début des cyclages, puis une diminution de cette contrainte jusqu'à stabilisation autour de la valeur initiale. A nouveau, aucune modification de la transmission n'a été constatée. Ces résultats expérimentaux confortent donc notre choix de ce polymère pour réaliser un MOEMS à actionnement électrothermique.

b) Résultats pour la plage de température de -100 à 125°C

Dans ce cas plus sévère, nous obtenons une diminution significative des contraintes, le passage dans la zone négative produisant un effet très néfaste sur la tenue de l'époxyde SU-8. Les bandes de dimensions macroscopiques se décolent également. Ce phénomène est vraisemblablement dû à la différence des coefficients de dilatation du substrat (2,6 ppm/K pour le silicium oxydé et 3,2 ppm/K pour le pyrex) et de la SU-8 (52 ppm/K). Ceci est en accord avec les résultats de cyclage menés par le TONA-VUB sur des structures planarisantes à base de SU-8 pour un lien optique flexible [Bosman, 2010].

3.7 Bilan et conclusions

3.7.1 Etat initial

Le tableau 3.2 présente un récapitulatif des valeurs des caractéristiques initiales de la SU-8 avant les traitements. Les mesures avant vieillissement ont été réalisées sur des échantillons tests pour ce qui concerne les essais mécaniques (destructifs), et sur tous les échantillons pour les autres tests (non destructifs).

Tableau 3.2 Mesures effectuées sur les échantillons de références (non vieillis)

Tests	Unité	Substrat Silicium	Substrat Pyrex
Energie de Surface	mJ/m ²	31	32,7
Rugosité moyenne	nm	0,52	0,66
Rugosité maximale	nm	9,9	14,3
Diffusion	%	-	négligeable
Transmission (850nm)	%	-	98
Adhésion: plots circulaires	MPa	44,1	36
Adhésion: plots rectangulaires	MPa	36,7	31,3
Force de pelage	N	>6,8	>7

Ces valeurs sont des moyennes obtenues sur tous les wafers de référence. On remarque que la nature du substrat (pyrex ou silicium) influe sur les valeurs de l'énergie de surface et de rugosité initiales, ce provient notamment des recuits de fabrication en raison de la différence d'inertie thermique. En moyenne, la force d'arrachement nécessaire pour l'initiation à la rupture (shear-test) sur substrat silicium passivé SiO₂ est supérieure à celle sur pyrex. Dans le cas des VCSELs, on aura des propriétés thermiques et mécaniques proche du cas du silicium.

Les mesures mécaniques de shear-test sur les microstructures ont permis de vérifier que l'on a une rupture adhésive (collage du polymère sur le substrat) et non cohésive (arrachement dans le polymère). La forte adhérence du polymère sur le substrat est si élevée

que les mesures de pelage se sont heurtées à la rupture de la bande et n'a pas permis d'en extraire la force de propagation à la rupture.

3.7.2) Discussion de l'effet du vieillissement (exploitation du plan de Taguchi)

Dans cette partie nous allons déterminer les paramètres déterminants (température, humidité ou durée) qui interviennent dans l'évolution du polymère pour chaque test. Les mesures ne présentant pas de variations significatives (transmission dans le visible, diffusion, et pelage) ne sont donc pas traitées. Afin de définir la pertinence des variations, un écart type des mesures est calculé pour nous donner une barre d'erreur en fonction de chaque test.

a) Evolution de la rugosité :

La rugosité de la surface varie en fonction des vieillissements, en particulier on note l'apparition de bulles en surface de la SU-8. Nous avons tracé l'évolution de la rugosité S_q en fonction des points d'expérience (figure 3.23). Ces courbes de tendance montrent que le paramètre le plus important est la température. On observe en effet un maximum de la rugosité pour les valeurs médianes de température et d'humidité. Ces résultats laissent présager un vieillissement réversible avec l'humidité et à la chaleur. Par contre, la rugosité augmente de façon monotone avec la durée du vieillissement, qui semble quand à lui irréversible.

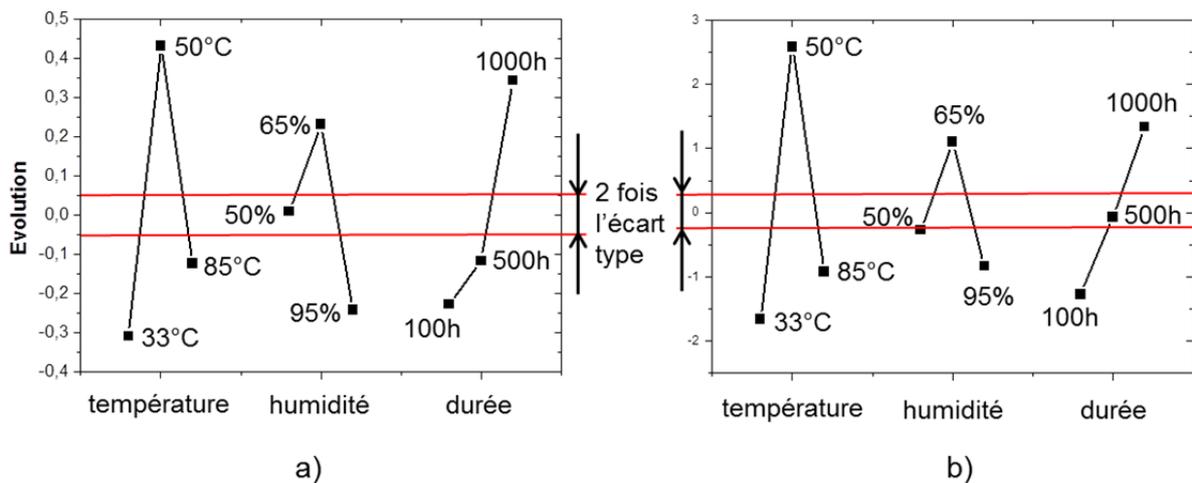


Figure 3.23 Evolution de la rugosité en fonction de chaque paramètre, a) sur Silicium oxydé, b) sur pyrex

b) Evolution de l'énergie de surface totale

Les courbes de variation ne permettent pas ici de désigner le paramètre prépondérant. De plus, on observe une augmentation monotone pour tous les paramètres, ce qui cohérent avec les résultats obtenus sur les vieillissements les plus sévères (vieillissement 9).

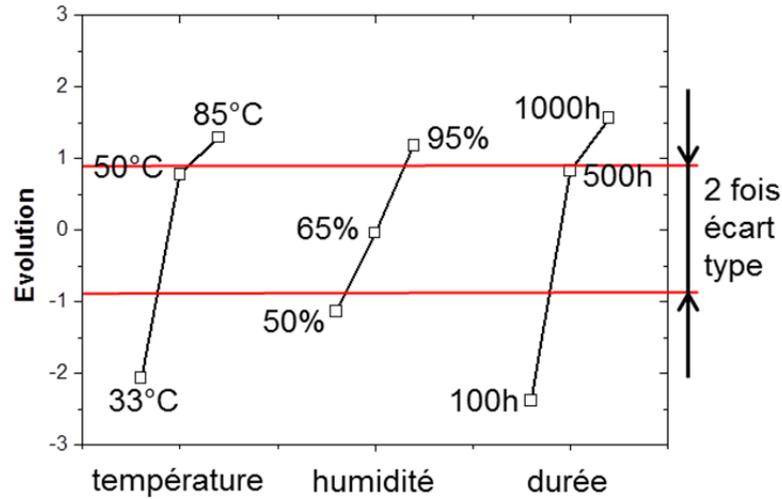


Figure 3.24 Evolution de l'énergie de surface en fonction de chaque paramètre sur silicium oxydé

c) Evolution de l'initiation à la rupture

Ce test étant réalisé à l'extérieur du laboratoire (Novamems), il n'a pas été possible d'effectuer les mesures systématiquement justes après chaque vieillissement. Il y a donc eu deux campagnes de mesures, qui nous ont donné des résultats différents et il nous est donc difficile à ce jour de conclure sur l'influence des différents facteurs de vieillissement du plan d'expérience complet. Néanmoins, il ressort pour les substrats silicium, qui se rapproche de nos applications sur VCSELs, que la température est là encore le paramètre le plus influent et que les courbes de tendance sont monotones croissantes pour la température et le temps.

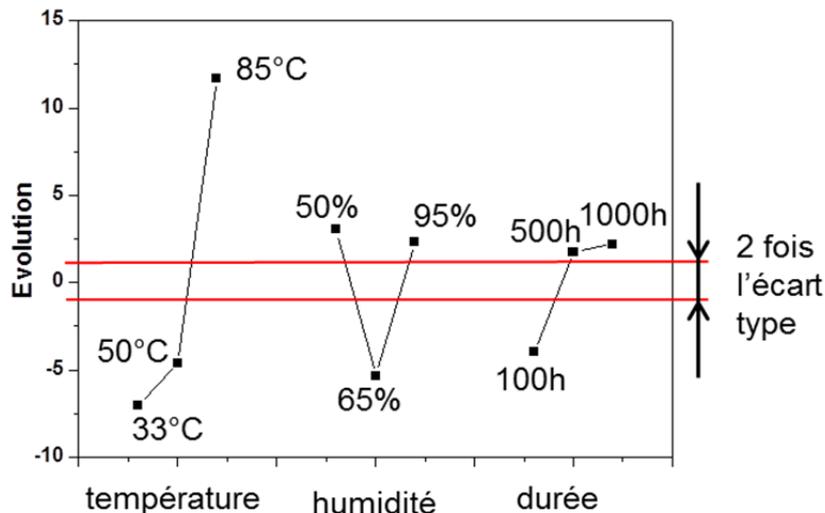


Figure 3.25 Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction de chaque paramètre sur silicium oxydé

d) Evolution de l'absorption par les molécules d'eau

Les mesures d'absorbance effectuées à 2.89 μm (longueur d'onde de vibration des liaisons O-H) nous ont permis de constater que le polymère absorbe de l'eau et ceci d'autant

plus que la température et l'humidité augmentent, avec une augmentation de l'absorbance de +1,6 entre la référence et le vieillissement 9. Ainsi, la température semble également jouer un rôle dans l'incorporation de l'eau dans le matériau.

4. Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons tout d'abord présenté les avantages du polymère SU-8 que nous avons choisi d'exploiter pour réaliser notre MOEMS. Nous avons ensuite testé les effets de vieillissements en atmosphère humide et chaude pour vérifier si ce polymère correspond à nos attentes en termes d'adhérence et de stabilité optique. Même si l'étude de fiabilité que nous avons menée (Plan de Taguchi) ne permet pas à ce jour de déterminer l'effet de chaque paramètre (température, humidité, et temps), des tendances assez nettes se dégagent. Elles montrent que les vieillissements chauds et humides provoquent des changements dans l'adhérence du polymère pouvant aller jusqu'au décollement des structures macroscopiques, dû à l'augmentation des contraintes. Cela est aussi observé dans le cas des cyclages thermiques lors des passages dans les températures négatives. Cette dégradation du polymère est en grande partie liée à la dilatation différentielle entre le substrat et le polymère. Une étude plus ciblée sur nos géométries permettrait de déterminer plus nettement l'influence des différents paramètres des vieillissements et leur couplage. Dans le même ordre d'idée, mener une étude de répétabilité permettrait de confirmer les tendances observées sur les variations des paramètres. Les propriétés de surface, quand à elles, semblent affectées en grande partie par un vieillissement physique réversible. Cependant, malgré ces changements mécaniques et de surface, les propriétés optiques dans le visible et le proche infrarouge ne sont pas altérées. On peut donc conclure que ce polymère est bien adapté à la réalisation d'éléments micro-optiques sur VCSELs, et ceci pour des conditions de stockage en humidité et chaleur importantes.

Chapitre IV Réalisation technologique de microlentilles intégrées sur VCSELs

Ce chapitre traitera des différentes techniques de fabrication mises en œuvre pour la réalisation d'une micro-optique polymère sur VCSEL. Nous présenterons d'abord le procédé de fabrication des VCSELs émettant à 850nm constituant nos composants de base. Ensuite, nous nous intéresserons à la méthodologie développée pour résoudre la problématique de la réalisation de couches épaisses de polymère sur des petits échantillons de semi-conducteurs III-V, ainsi que celle du centrage des lentilles vis-à-vis de la source. Nous présenterons alors les différentes approches testées pour la réalisation des microlentilles. Enfin, nous décrirons plus particulièrement la fabrication de MOEMS en SU-8 pour réaliser nos microlentilles actives à actionnement électro-thermo-mécanique. Cette étude s'appuiera sur le premier dimensionnement donné par les simulations thermo-mécanique et optique du chapitre II et sur les caractéristiques optiques et mécaniques de la résine SU-8 déjà soulignées dans le chapitre III. Nous détaillerons ici les différentes techniques que nous avons explorées pour la fabrication de structures suspendues en SU-8 (membrane et ancrage). La réalisation de l'électrode chauffante sur le haut de la membrane et le problème de la continuité des amenées de courant seront également présentés. Enfin, nous terminerons par la méthode que nous avons utilisée pour greffer une lentille sur cette membrane permettant la réalisation complète de notre MOEMS.

1. Fabrication de VCSELs à 850nm

Dans cette partie, nous décrivons brièvement le procédé de fabrication utilisé pour réaliser les VCSELs qui ont servi de démonstrateurs pour nos études. Il s'agit de VCSELs standard GaAs à diaphragme d'oxyde enterré, sur lesquels notre équipe a acquis une longue expérience. Deux process ont été successivement réalisés pour notre étude dans le cadre des post-docs de C. Levallois et de M. Condé.

La structure épitaxiale des VCSELs que nous avons employée est présentée sur la figure 4.1 a). Il s'agit de couches élaborées par MOCVD (pour Metal Organic Chemical Vapor Deposition) pour l'émission à 850nm. Elles comportent une couche de contact fortement dopée Carbone ($10^{19}/\text{cm}^3$) et de couches à composition graduelle insérées à chaque interface des périodes des miroirs de Bragg pour la minimisation de la résistivité. Elles se distinguent également par l'épaisseur (25nm) et le positionnement vertical de la couche de confinement en AlOx choisis pour éviter l'apparition de modes d'oxyde [Bardinal, 2002].

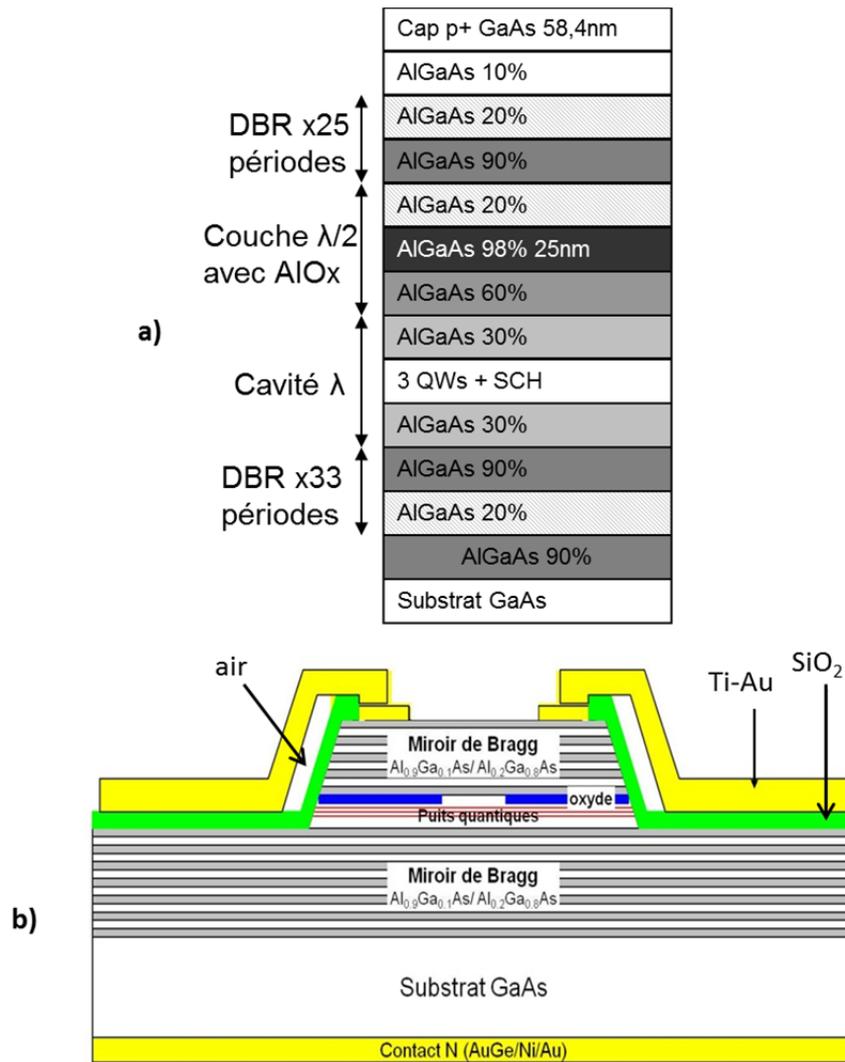


Figure 4.1 a) Description de la couche épitaxiale, b) Vue en coupe du VCSEL à diaphragme d'oxyde et à pont à air

La figure 4.1 b) présente la coupe du VCSEL à diaphragme d'oxyde réalisé avec une électrode à pont à air. La mise en œuvre de ponts à air a en effet permis à notre équipe de résoudre les problèmes de continuité de la métallisation finale liés au franchissement du mesa du VCSEL (hauteur~4 μ m) [Havard, 2008].

Les principales étapes du processus de fabrication sont les suivantes. Après l'épitaxie du VCSEL, on procède à la métallisation de la face arrière (AuGe (200nm) / Ni (50nm) / Au (250nm)) pour réaliser le contact N. Pour réaliser le contact d'anode P, un dépôt de métal (Ti (20nm) / Pt (50nm) / Au (300nm)) est ensuite réalisé et délimité par lift-off. S'ensuit un dépôt de SrF_2 pour le masquage de la gravure du mesa, délimité par lift-off. Le mesa est alors attaqué jusqu'à la zone I par gravure ionique réactive (ICP) sous contrôle optique. On procède ensuite à l'élimination du masque de SrF_2 . L'étape critique d'oxydation sélective humide (AlOx) est ensuite réalisée dans un four spécifique pour la formation du diaphragme d'oxyde enterré et la définition de la taille de la zone active. Une passivation de SiO_2 (500nm) est ensuite réalisée par dépôt PECVD, on procède alors à l'ouverture de ce passivant pour la prise

de contact. Enfin, le dépôt du métal final (Ti (50nm)/ Au(1 μ m)) et sa gravure chimique sont réalisés pour la fabrication du pont à air.

Dans le masque du premier process, quatre tailles de mesa (31, 33, 35 et 37 μ m) ont été prévues dans chaque ligne de VCSELs, comme le montre la figure 4.2, car la profondeur d'oxydation était contrôlée à 2 μ m près. Ainsi pour une oxydation visée de 15 μ m, on s'assure d'un comportement monomode sur au moins l'une des tailles de chaque ligne.

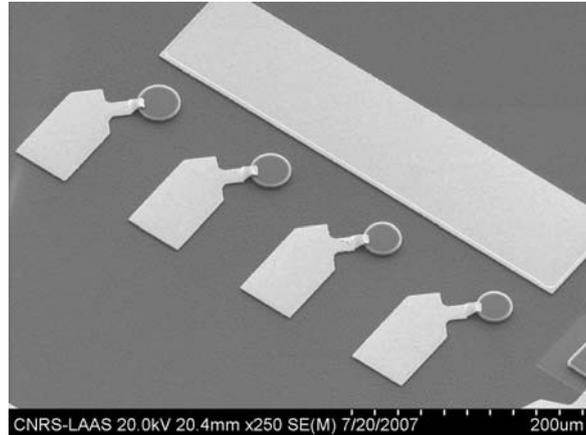


Figure 4.2 Image MEB illustrant les différentes tailles prévues pour les VCSELs

La principale évolution du procédé entre la première et la seconde génération de VCSELs a consisté à redimensionner l'électrode de contact pour améliorer le pont à air. En effet dans le premier process, celui-ci était trop étroit, ce qui a conduit à une rupture du contact sur une partie des composants. Sur la figure 4.3, on peut voir des lignes de 12 VCSELs réalisés lors du deuxième process. Sur cette génération, la dimension de l'électrode de contact et en particulier du pont à air a été augmentée pour être moins sensible à l'étape de gravure du métal final. D'autre part, une ligne de VCSELs correspond désormais à une seule taille de mesa, car le contrôle optique en temps réel de l'étape d'AlOx a pu être exploité [Almuneau, 2008]. Le comportement et les caractéristiques de ces matrices de VCSELs seront détaillés dans le chapitre 5. Nous nous intéressons maintenant à la partie fabrication de microlentilles passives sur VCSELs.

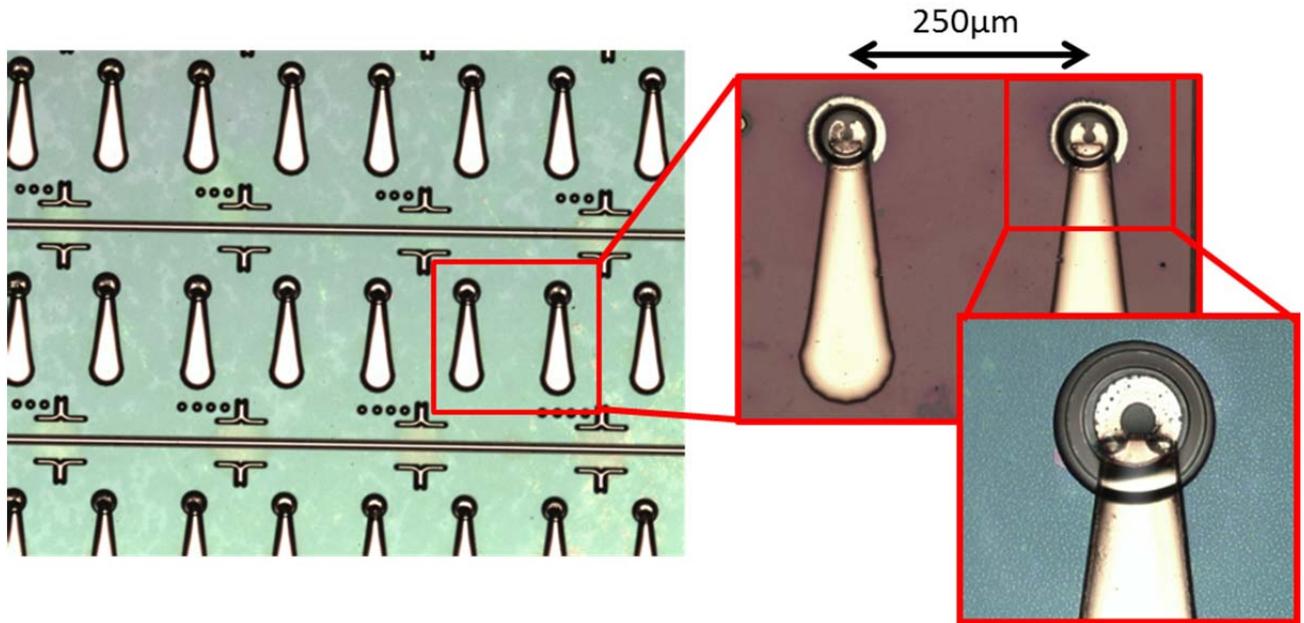


Figure 4.3 Images de la seconde génération de VCSEL à pont air optimisé (M. Condé)

2. Micro-optique passive sur VCSELs

Cette partie regroupe les travaux sur la technologie polymère que nous avons menés pour réaliser des microlentilles pour la collimation du faisceau laser. Les polymères utilisés, les différents moyens de dépôt des lentilles ainsi que les techniques de centrage seront successivement présentés.

2.1 Fabrication de piédestaux épais en SU-8 sur petites surfaces

Comme nous l'avons vu dans le chapitre II, un « gap » important est nécessaire entre la lentille et la surface du VCSEL pour réduire suffisamment la divergence à l'aide de lentilles plan convexes. Pour réaliser ce gap, nous utiliserons un piédestal en SU-8, soit sous forme de pilier, soit sous forme d'une bande pleine. Cependant, la SU-8 étant déposée par spin-coating (chapitre III), elle présente l'inconvénient de ne pas être uniforme sur les bords des wafers (jusqu'à ~1 cm du bord), et ceci d'autant plus que son épaisseur est élevée. Ceci devient problématique dans le cas de petits échantillons (wafer 2 pouces au mieux, mais plus généralement des quarts de pouce pour les lasers III-V).

Pour éviter ces effets de bords, une des solutions consiste à agrandir artificiellement le substrat VCSEL. En rajoutant des cales de mêmes épaisseurs, on agrandit le wafer permettant de s'affranchir des effets de bords sur l'échantillon qui nous intéresse. Cet assemblage permet de s'assurer d'obtenir un dépôt relativement homogène sur le substrat VCSEL. [Post-doc C. Levallois].

Avec un procédé classique (100 μm visé) sur un échantillon de 1.5 cm², il n'est pas possible de contrôler l'épaisseur sans utiliser cette méthode. Dans le cas où l'on utilise l'agrandissement artificiel du substrat, il est possible d'améliorer l'homogénéité pour obtenir une résolution autour de 20% (100 μm ±10 μm) sur 2 cm². Cette inhomogénéité, imputable à

la taille réduite de nos échantillons, est significativement réduite en processant un substrat complet de 2 pouces.

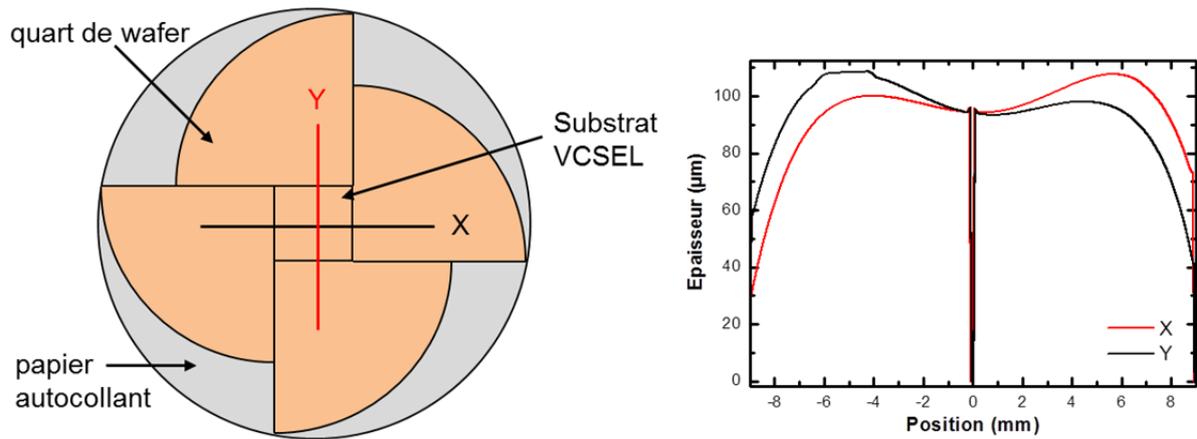


Figure 4.4 Principe d'agrandissement artificiel du substrat et uniformité obtenue sur le substrat VCSEL

Nous avons utilisé des polymères différents de la SU-8 pour réaliser les lentilles minces sur nos systèmes. En effet, plus la SU-8 est fluide, plus elle contient de solvant. Celui-ci va s'évaporer lors des étapes de recuit de la résine, ce qui ne permet pas de maîtriser la taille et la forme de la lentille. Nous avons donc utilisé des polymères ne contenant pas de solvant, des époxydes « maison » de faible viscosité permettant de créer des lentilles par une méthode originale de dépôt localisé par contact que nous allons maintenant décrire.

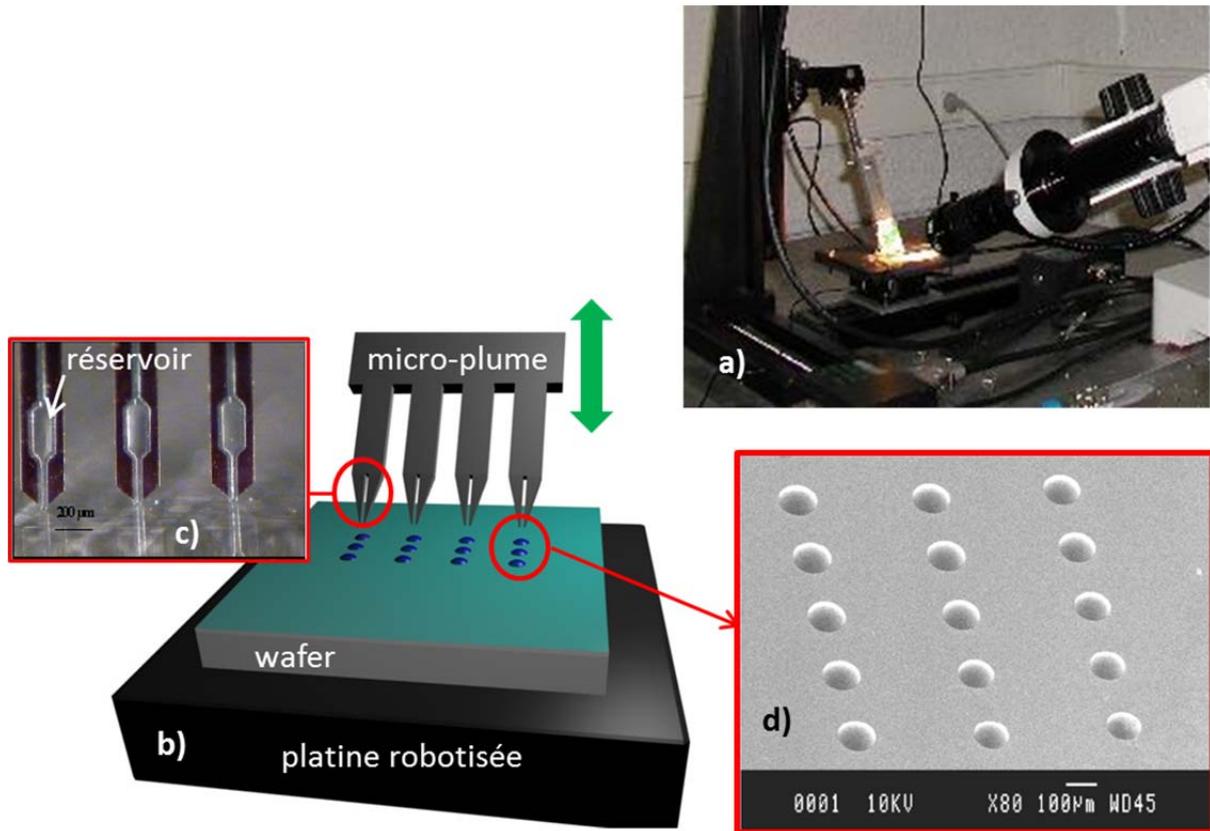
2.2 Fabrication de microlentilles à l'aide de micro-plumes robotisées

Il existe de nombreuses méthodes pour réaliser des lentilles réfractives en polymère. Notre approche repose sur le dépôt localisé de polymères fluides au moyen de micro-plumes robotisées compatibles à une application sur des composants III-V. Nous avons utilisé un robot de dépôt (« nanopotter ») initialement conçu par le groupe NBS (NanoBiosystèmes) du laboratoire pour déposer précisément et de façon matricielle de très faibles quantités (du pico au nanolitre) de liquides biologiques sur des lames de verre (figure 4.5.a). Nous avons détourné ce système pour fabriquer des microlentilles en polymère dans le cadre du projet LAAS MIOPIY (regroupant les groupes Photo, NBS, N2IS et le LAPLACE).

2.2.1 Principe du dépôt

Le principe de dépôt est basé sur les tensions superficielles de surface. Des micro-plumes en silicium (2mm de long, 210µm de large et 5µm d'épaisseur), fabriquées par gravure profonde (DRIE) d'un substrat de SOI, sont tout d'abord immergées dans une goutte macroscopique du liquide à déposer. Les plumes sont munies d'un canal micrométrique (5 µm), ce qui permet d'acheminer le liquide jusqu'à un réservoir (figure 4.5 c). Ces « micro-stylo-plumes » sont ensuite mis en contact avec la surface cible grâce à une platine micrométrique X-Y-Z motorisée (« nano-spotter ») et le dépôt a lieu par capillarité. Le volume effectivement déposé dépend du temps de mise en contact avec la surface, mais

également de la viscosité du liquide, de la nature du substrat et de celle de la plume (état de surface).



2.2.2 Résines de faible viscosité utilisées

Nous avons utilisé deux pré-polymères possédant une très faible viscosité (<9 cP à 20°C), présentant un indice optique proche de celui de la SU-8 et permettant un dépôt efficace et reproductible. Si la surface est suffisamment peu mouillable, ce qui est le cas de la SU-8 réticulée, ces polymères peuvent être déposés sous forme de gouttes, autrement dit des lentilles réfractives, que nous réticulons pour obtenir les lentilles finales.

En premier lieu, nous avons utilisé un polymère thermodurcissable mélange de deux monomères commerciaux, un avec une chaîne siloxane fonctionnalisé avec un groupe époxyde, le (bis(diméthylsiloxane)époxypropoxypropyl) aussi appelé DMSE, et une molécule de diamine (1.3bis(aminométhyl) cyclohexane) autrement nommé BAC. Cet époxysiloxane-amine est très peu visqueux et possède une très bonne qualité optique [Bardinal, 2007] (voir paragraphe suivant).

Nous avons récemment recherché une alternative à ce mélange car il doit être chauffé à 40°C lors du dépôt pour ne pas « démixer » (séparation des deux monomères), puis être porté à 120°C pour réaliser la polymérisation. C'est pour cela que nous avons décidé d'utiliser un nouveau polymère aussi fluide mais plus simple à mettre en œuvre, car basé cette fois-ci sur un polymère photodurcissable. Il s'agit de la même molécule époxy (DMSE) associée à un

amorceur cationique, le cyracure UVI-6974. Une simple insolation UV après dépôt suffit alors pour transformer une goutte de polymère en lentille solide.

2.2.3 Propriétés des lentilles déposées

Notre équipe a fabriqué avec cette méthode de dépôt des réseaux de microlentilles parfaitement hémisphériques sur surfaces SU-8 (figure 4.5 d) comme le montrent les images obtenues pour l'époxy-siloxane sur les figures 4.5 d et 4.6. La forme des lentilles a été confirmée par profilométrie optique sans contact. Les lentilles présentent un diamètre pouvant varier entre 20 et 140 μm en jouant sur le temps de contact de la plume sur la surface.

De plus, nous avons caractérisé la rugosité de la surface des microlentilles à l'aide d'un microscope à force atomique (AFM). La zone caractérisée couvre une surface de 500 nm x 500 nm au sommet de la lentille et la rugosité moyenne obtenue est de 2 nm. La rugosité initiale de la surface avant dépôt (SU-8) est, elle, de 0.3 nm. La rugosité des microlentilles obtenues par notre technique de dépôt est tout à fait similaire à celle obtenue sur des microlentilles réalisées par la technique par jets d'encre. En effet, les lentilles sont réalisées à partir de la formation d'une goutte et leur forme est régie principalement par la tension de surface du liquide, ce qui explique ces très faibles valeurs de rugosité.

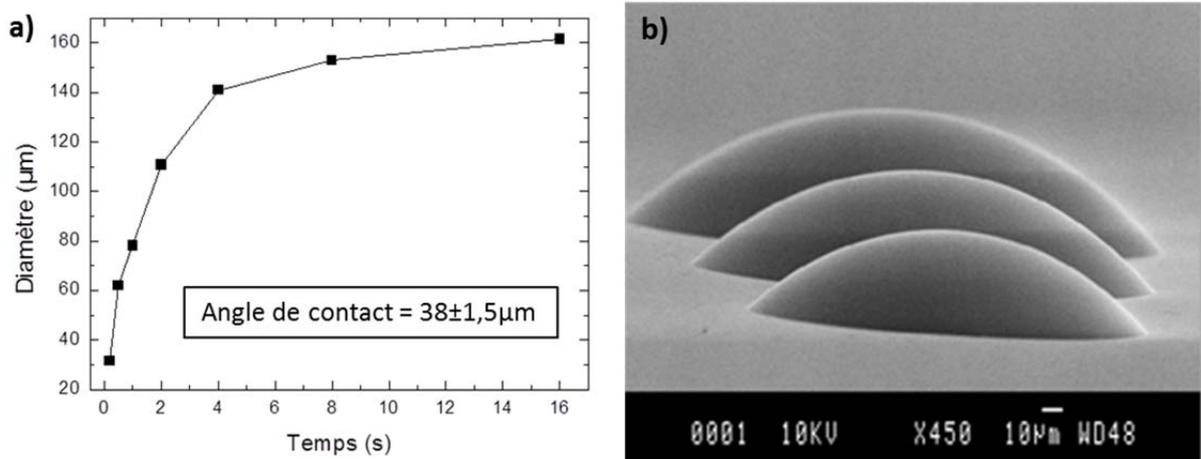


Figure 4.6 a) Images MEB de microlentilles en epoxy-siloxane obtenues pour différents temps de contact avec la surface b) Diamètre de la lentille en fonction du temps de contact sur une surface plane de SU-8

Les caractérisations des lentilles ont été menées à la fois au laboratoire et en partenariat avec H. Ottevaere et H. Thienpont du laboratoire TONA de l'Université Libre de Bruxelles (VUB), coordinateur du réseau d'excellence européen en micro-optique NEMO, avec lesquels nous avons établi une collaboration pendant le projet [Bardinal, 2007]. Pour mesurer la distance focale, nous avons utilisé un microscope à contrôle micrométrique du focus. On focalise d'abord sur la surface de la microlentille puis on déplace l'objectif jusqu'à obtenir l'image nette d'un objet à l'infini. La différence entre les deux positions donne la distance focale de la microlentille [Sayah, 2002]. Nous avons également utilisé un interféromètre de Mach Zehnder pour obtenir ces valeurs (figure 4.7). Nous avons obtenu des distances focales dans la gamme [60-200 μm] bien adaptées à la collimation des VCSELs en prenant des angles de contact de 38° conformément à nos simulations (chapitre II).

De plus, il ressort de cette étude que les lentilles présentent des ouvertures numériques élevées ($NA \sim 0.3$) et des aberrations optiques faibles ($RMS < \lambda/14$), ce qui les place au meilleur niveau international (figure 4.8). Cette nouvelle méthode constitue désormais une solution alternative bas coût à la technique de dépôt par jets d'encre pour la réalisation collective de microlentilles sur mesure. Elle est très intéressante pour réaliser rapidement du prototypage ; en contrepartie ce procédé est plus difficile à paralléliser.

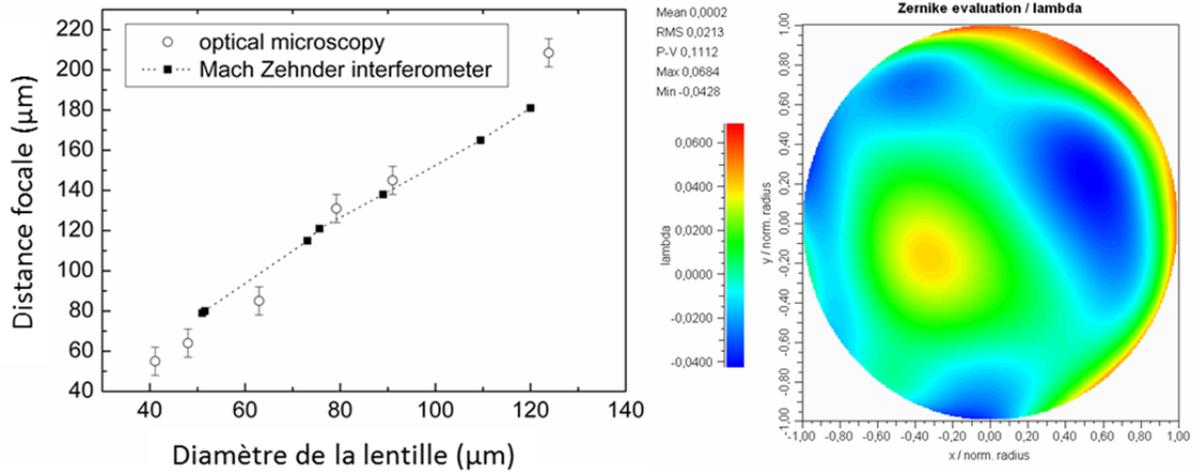


Figure 4. 7 à gauche : Evolution de la focale en fonction du diamètre mesurée par interférométrie de Mach Zehnder et par microscopie optique. A droite : diagramme de Zernike obtenu sur une lentille de 70μm de diamètre illustrant la faible déformation du front d'onde (mesures TONA-VUB)

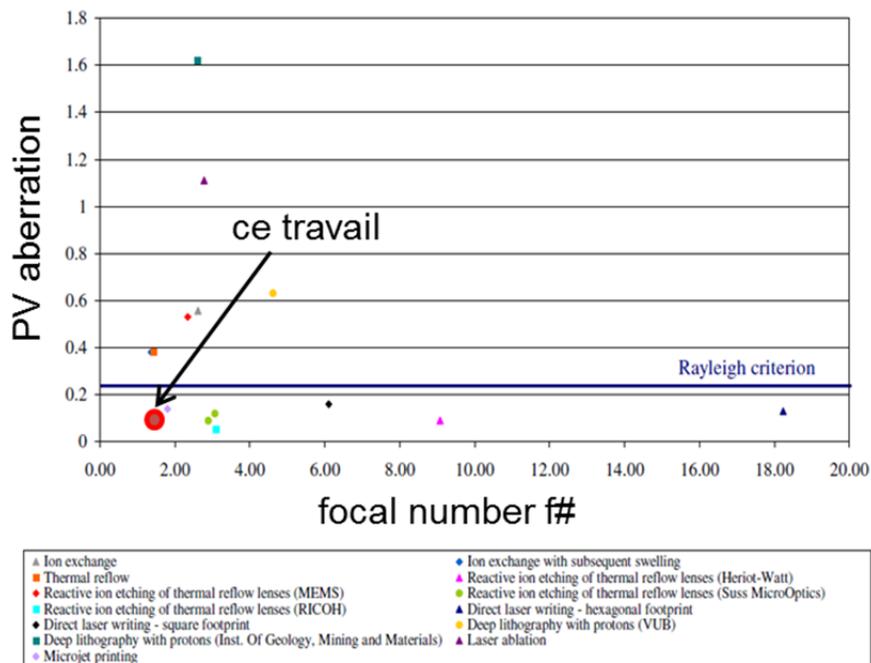


Figure 4.8 Positionnement des aberrations optiques mesurées sur les microlentilles déposées par microplumes par rapport à celles mesurées sur des lentilles fabriquées par d'autres techniques (comparaison TONA VUB [Ottevaere, 2006]).

2.3 Auto-centrage des lentilles

Le robot que nous utilisons, contrôlé par ordinateur, permet un déplacement très précis ($\sim 1\mu\text{m}$) suivant les 3 orientations de l'espace. Toutefois, la précision de positionnement dans le plan est limitée à $5\mu\text{m}$ notamment en raison du système de vision utilisé. Nous allons donc maintenant nous pencher sur les différentes approches que l'équipe a testées pour assurer leur alignement par rapport au VCSEL. En effet, la précision que demande un alignement optique (tolérance à $1\mu\text{m}$) impose la mise au point de techniques d'auto-centrage pour permettre une grande tolérance lors du dépôt de la goutte de polymère.

2.3.1 Dépôt localisé sur piédestaux cylindriques en SU-8

Les premiers essais que l'équipe a réalisés ont porté sur la fabrication de lentilles réfractives sur piédestaux transparents, similaires aux travaux reportés dans la littérature pour l'optique polymère passive par impression jets d'encre (cf. chapitre I). Ces piliers ont été fabriqués par simple photolithographie de SU-8 d'épaisseur $100\mu\text{m}$ (Post-doc C. Levallois).

Nous avons donc exploité des géométries cylindriques pour obtenir un auto-centrage des gouttes de polymère. En effet, en plaçant la plume au sommet du pilier, on obtient une auto-délimitation de la goutte de résine par les bords du pilier. Dès que le volume est suffisant pour remplir la surface du pilier, un équilibre des tensions de surface a lieu et le reste du polymère reste dans la micro-plume. Cette méthode permet donc un auto-centrage sur le pilier avec une précision du positionnement dans le plan de l'ordre du micron (figure 4.9) et un ajustement automatique de la géométrie de la lentille. L'angle de contact que nous avons observé est ici plus faible que dans le cas d'une surface plane (30° au lieu de 38°) en raison des effets de bords. Néanmoins, il ne change pas avec le diamètre contrairement au cas du jet d'encre, ce qui permet d'assurer une meilleure reproductibilité du dépôt. Pour un polymère et une surface donnés, la courbure de la lentille dépend en effet uniquement du diamètre du piédestal, défini par la photolithographie (précision $\sim 1\mu\text{m}$). Ceci a été vérifié pour une large gamme de diamètres ($30\text{-}140\mu\text{m}$) (figure 4.10)

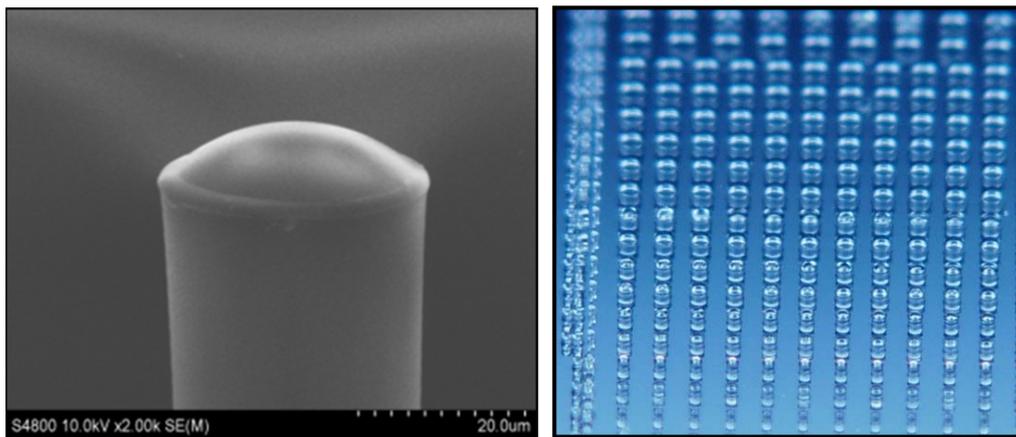


Figure 4.9 a) image MEB d'une microlentille sur piédestal, b) Image au microscope optique 3D Hirox de microlentilles en époxysiloxane auto-centrées sur piliers cylindriques de SU-8 de tailles comprises entre 30 et $140\mu\text{m}$ [Levallois, 2008]

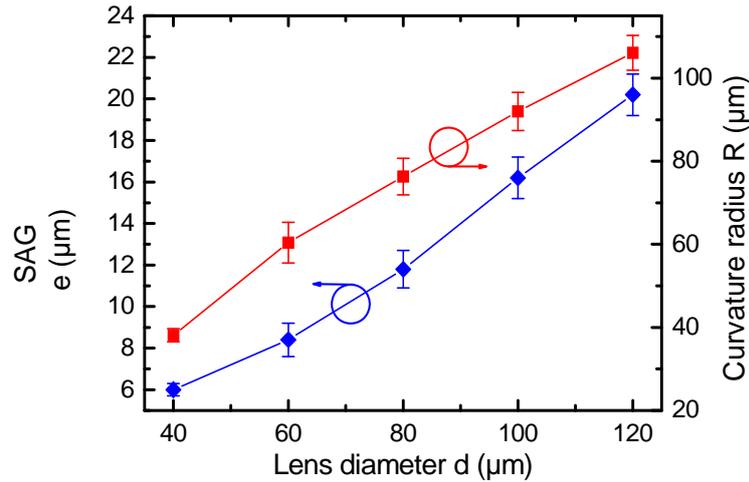


Figure 4.10 Rayon de courbure et hauteur (sag) des microlentilles déposées sur piédestaux cylindriques

2.3.2 Dépôt localisé et cuvettes aménagées dans la SU-8

Un autre moyen d'obtenir l'auto-centrage sans avoir à utiliser de forme cylindrique consiste à créer des « micro-cuvettes » en surface du piédestal SU-8, pour pouvoir localiser la goutte de résine qui formera la lentille. Nous y sommes parvenus en diminuant localement l'intensité de la lumière UV lors de la lithographie du piédestal épais au moyen de motifs micrométriques insérés sur le masque (Post-doc C. Levallois et Stage Master B.Reig). En une seule étape de photolithographie, on réalise donc une bande épaisse en SU-8 et une cuvette inscrite en surface (figure 4.11). Il suffit ensuite de déposer le liquide dans la cuvette avec la plume pour garantir l'auto-centrage de la lentille.

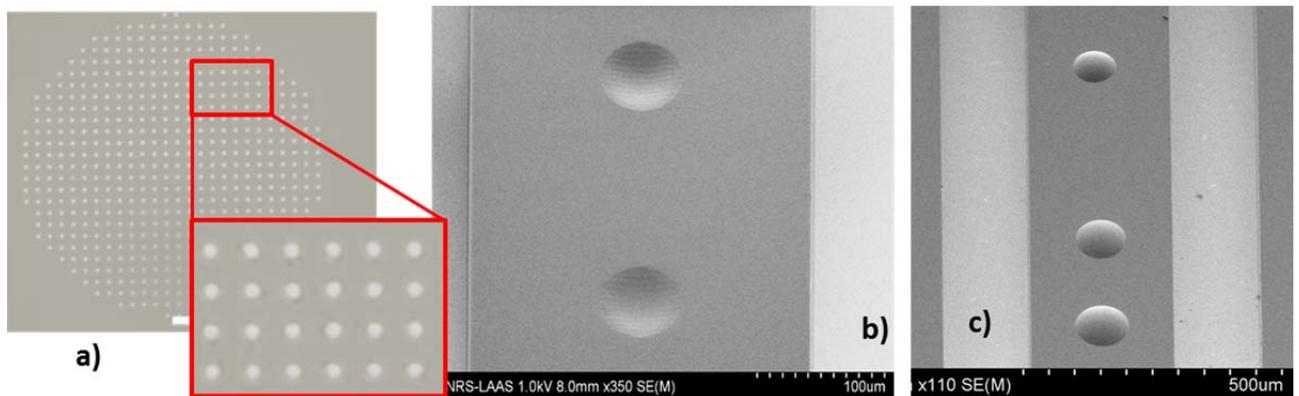


Figure 4.11 a) Motifs du masque, b) cuvettes c) lentille auto centrée

Pour une combinaison de motifs suffisamment petits et proches ($3 \mu\text{m}$, distants de $6 \mu\text{m}$) et placés dans des zones circulaires de la zone du piédestal, la résine négative n'est que partiellement insolée, ce qui conduit à une polymérisation de moindre hauteur. La forme en « cuvette » obtenue est due à un effet cumulatif de cette insolation partielle, ce qui équivaut à un masque à niveaux de gris. Nous avons montré que la profondeur de telles cuvettes peut atteindre $6 \mu\text{m}$ pour un diamètre de $100 \mu\text{m}$ et pour une épaisseur de SU-8 de $100 \mu\text{m}$. De

plus, nous avons montré qu'elles permettent un centrage efficace des microlentilles (figure 4.11 et 4.12). [Bardinal, 2008].

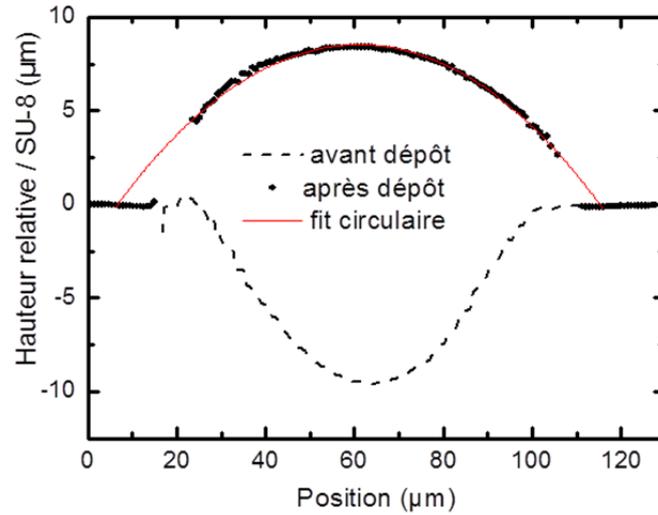


Figure 4.12 Mesure par profilométrie optique avant et après le dépôt d'époxy-siloxane dans la micro-cuvette en SU-8

2.3.3 Intégration sur VCSELs

Ces procédés ont été appliqués avec succès pour la collimation passive sur les VCSELs de la première génération décrits dans le paragraphe 1, avec un masque dédié comportant des piédestaux de diamètres de piédestaux compris entre 40 et 80 µm pour obtenir une divergence minimale quelque soit la hauteur effective du piédestal. En effet, sur la première génération de VCSELs, la hauteur effective du piédestal est de 110 µm au lieu de 100 µm et elle est uniforme sur la plaque. Nous verrons que cela peut se compenser en ajustant le diamètre du piédestal.

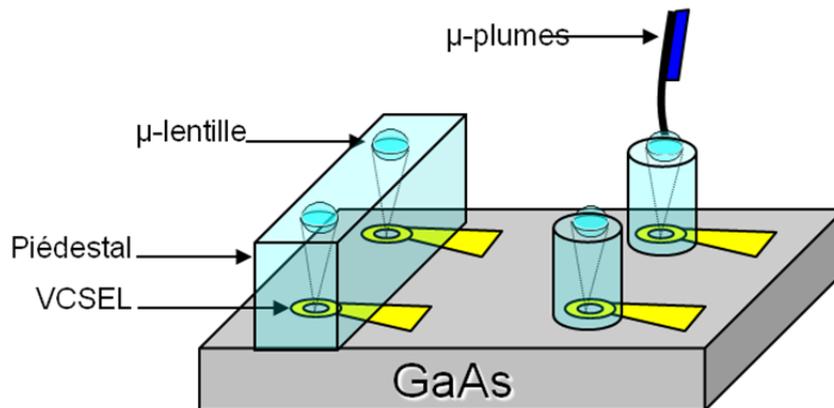


Figure 4.13 Principe de dépôt de lentille sur piédestaux en SU-8

Nous avons également prévu des bandes larges dans lesquelles sont inscrites des cuvettes. Les caractérisations électro-optiques de ces composants à lentilles intégrées seront présentées dans le chapitre V.

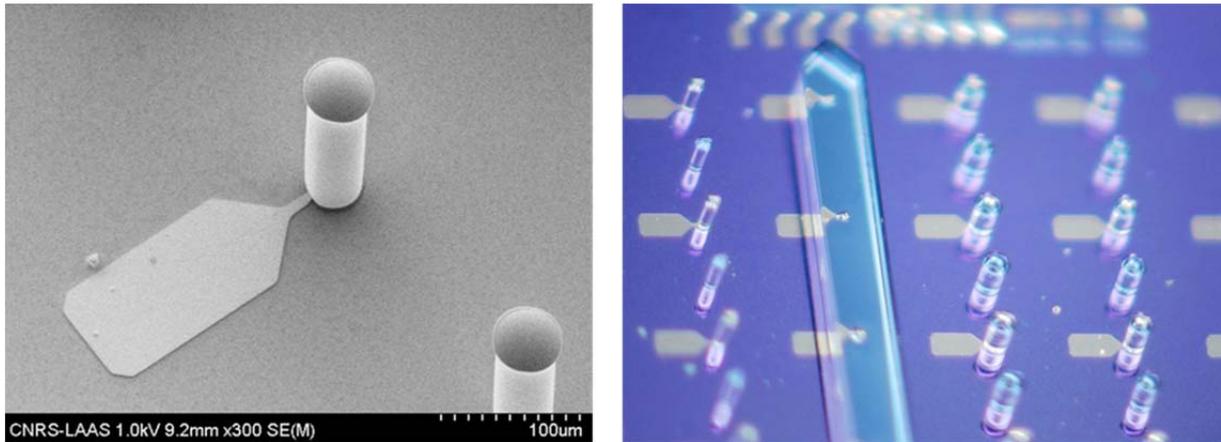


Figure 4.14 Images MEB et au microscope optique de microlentilles en époxysiloxane centrées sur piliers SU-8 déposés sur VCSELs [Levallois, 2008; Bardinal 2010]

2.3.4 Auto-assemblage par traitement de surface localisés

Plus récemment, nous avons évalué une méthode de traitement de surface localisé pour obtenir un auto-centrage des lentilles en jouant sur le contraste des énergies de surface sur une surface (zones mouillables/non mouillables) (étude menée avec J.B. Doucet du service TEAM). Par la suite, les zones mouillables par nos résines seront qualifiées de « polymérophiles » et les non mouillables de « polymérophobes ».

Ce traitement peut être effectué en phase gazeuse ou liquide, ou plasma. Dans notre cas, nous avons obtenu les plus forts contrastes avec un traitement chimique en phase liquide. Le principe est le suivant : on commence par protéger les zones de la surface SU-8 où se formeront les lentilles par simple photolithographie d'une résine standard. On utilise ensuite un précurseur carbofluoré, à savoir le (1H, 1H, 2H, 2H) perfluorooctyltrichlorosilane pour rendre le substrat moins mouillant dans toutes les zones non protégées par la résine. Il est en effet plus pertinent de réaliser un traitement « polymérophobe » sur l'ensemble du wafer excepté dans les zones où l'on veut créer des lentilles.

On peut procéder ensuite au dépôt de la microlentille par une méthode de dépôt localisé comme celle que nous avons mise au point. Notons que cette méthode permet non seulement un centrage par photolithographie des lentilles par rapport aux VCSELs mais également une réalisation plus collective si on utilise d'autres méthodes de dépôt.

2.3.5 Méthodes alternatives de dépôt

a) Trempage

Nous sommes donc allés plus loin en testant le trempage du substrat après traitement pour une réalisation collective simultanée. En plongeant le wafer traité dans un bain de résine, des gouttes de résine se forment dans les zones de plus grande mouillabilité et vont s'évacuer des zones traitées. Ces gouttes deviennent ensuite des lentilles par simple réticulation du photopolymère UV. On peut voir sur la figure 4.15 les premiers résultats de réalisation avec cette méthode de matrices de microlentilles auto-assemblées sur SiO₂. On peut noter la reproductibilité de la taille des gouttes (4.15 b), ainsi que la présence de petites

gouttes satellites indiquant la direction de l'extraction du substrat. Cette approche, encore en cours de développement, pourrait aussi être appliquée avec un spin-coating à basse vitesse.

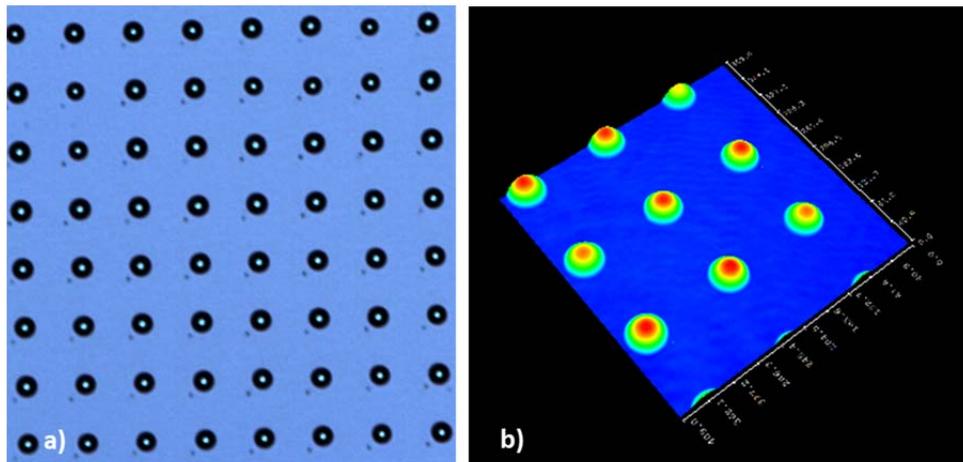


Figure 4.15 a) Images des lentilles auto-assemblées par traitement de surface localisé, b) image réalisées avec un microscope holographique DHM 1000 Lyncee Tec [Lyncee Tec]

b) Sérigraphie

Dans la perspective d'un transfert industriel, nous avons également évalué une autre méthode collective et bas coût de fabrication de lentilles. Nous avons testé un équipement de sérigraphie disponible au laboratoire. Comme l'illustre la figure 4.16 a) son principe consiste à déposer du polymère sur la surface d'un substrat préalablement aligné à l'aide d'une caméra avec un pochoir. En ajustant la pression et la vitesse d'une racle qui vient appuyer sur le pochoir, on transfère l'image inversée de celui-ci sur le substrat.

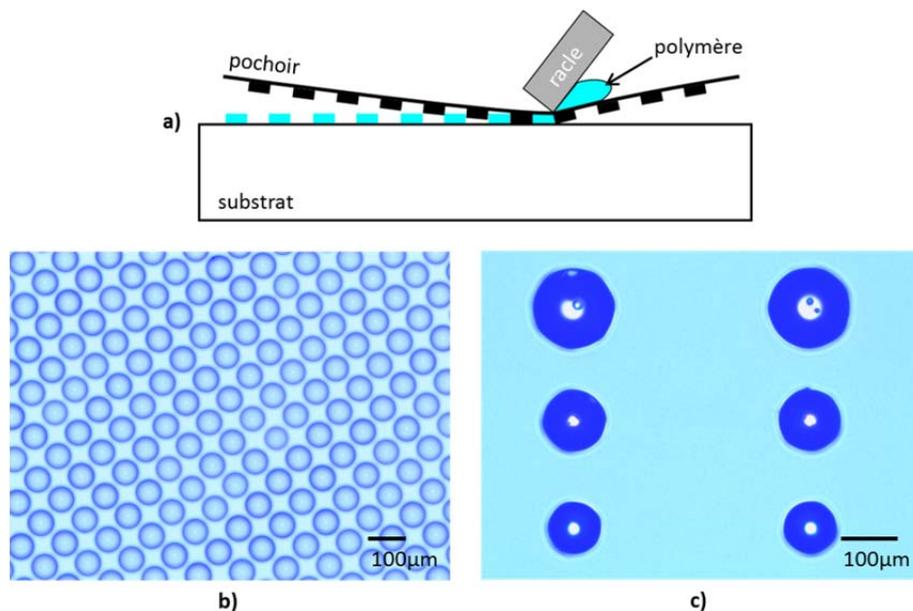


Figure 4.16 a) Principe de la sérigraphie. b) Lentilles fabriquées sur surface plane en SU-8, c) sur des piliers en SU-8.

Cette approche nous a permis de réaliser une matrice de microlentilles de 60 μ m de diamètres sur une large surface de SU-8 plane à l'aide d'un maillage standard de 50 μ m (figure 4.16 b). Il suffit donc de choisir le maillage adéquat du pochoir pour ajuster la taille des lentilles réalisées. Cette technique semble bien adaptée à la réalisation de matrices denses en raison de sa grande reproductibilité. Néanmoins, elle manque de souplesse pour le contrôle du pas d'espacement (pitch entre VCSELs) et de précision pour le positionnement sur la plaque de VCSELs. De plus, cette technique nécessite la mise en œuvre d'une grande quantité de résine. On peut tout de même mettre à profit cette méthode déposer les gouttes de résine sur le sommet de piliers comme le montre la figure 4.16 c) ou encore la combiner avec le traitement localisé décrit précédemment.

2.3.6 Auto-centrage par photo-polymérisation infra-rouge

Pour s'affranchir des contraintes d'alignement et des étapes nécessitant une photolithographie, nous explorons actuellement une nouvelle méthode de fabrication de microlentilles sur VCSEL, en partenariat avec l'IS2M de Mulhouse et du LNIO de Troyes dans le cadre de projet ANR NIR OPTICS, auquel j'ai participé. Le but est d'obtenir une lentille directement écrite par le faisceau laser lui-même et un auto-alignement parfait.

Ce procédé est développé et étudié à l'IS2M et au LNIO depuis plusieurs années pour des formulations sensibles dans la gamme de longueur d'onde du visible et pour des réalisations en sortie de fibre optique [Bachelot, 2001]. Le principe de microfabrication par autoguidage repose sur l'augmentation de l'indice de réfraction provoqué par la photo-polymérisation (de $n=1.48$ à $n=1.52$). Ce phénomène permet de contrer la divergence naturelle de la source lumineuse. Il est ainsi possible de générer des microlentilles polymère dont la longueur ainsi que le rayon de courbure peuvent être ajustés en jouant sur des paramètres photoniques et/ou physicochimiques. Les avantages de ce procédé sont les suivants :

- alignement parfait,
- flexibilité du procédé (ajustement de la forme),
- intégration parallèle sur des sources multiples (procédé collectif),
- applicable en post-processing

Pour transposer ce procédé aux VCSELs, il s'agit non seulement de mettre au point de nouvelles résines photosensibles dans la gamme du proche infra-rouge, mais également de les adapter à un cahier des charges exigeant. Il faut bien sûr que la résine absorbe suffisamment à la longueur d'onde d'émission du laser, ce qui a conduit à l'exploitation de nouveaux photoinitiateurs (cyanine). Cependant, si le polymère absorbe, cela aura un impact sur les performances du VCSEL après la fabrication de l'élément micro-optique intégré. C'est pourquoi la résine photoréticulable a été formulée pour devenir totalement transparente après insolation comme l'illustrent clairement les spectres successifs d'absorption présentés sur la figure 4.17 (IS2M).

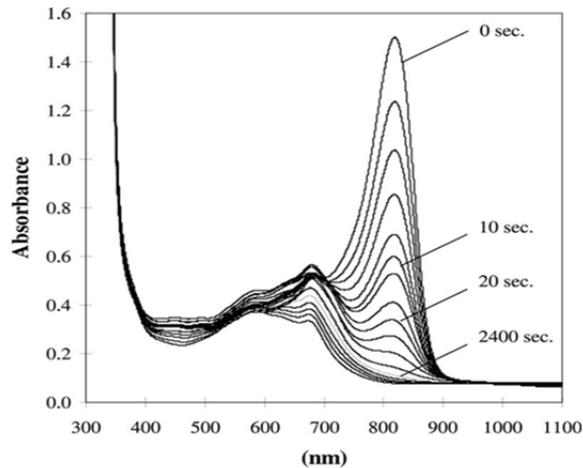
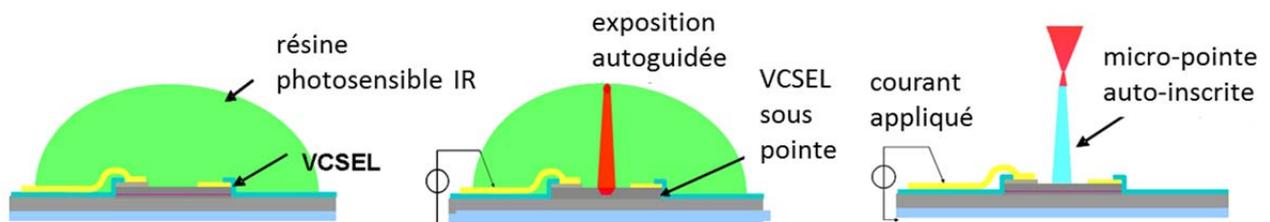


Figure 4.17 Décroissance de l'absorption du photopolymère NIR en fonction du temps d'insolation (IS2M)

Cette approche, d'abord démontrée par l'ISZM sur fibre à 760nm [Soppera, 2009], a été validée sur des VCSEL émettant à 760 nm (figure 4.18 a) [Bardinal, 2010]. Nous avons montré que la puissance émise par un VCSEL juste au-dessus de son seuil était suffisante pour amorcer la polymérisation. On peut voir sur la figure 4.18 le principe de fabrication que nous avons développé. Après le dépôt d'une goutte de photopolymère sur le VCSEL, le composant est alimenté sous pointes sur le banc de caractérisation vertical décrit dans le chapitre V (paragraphe 1). Le faisceau laser polymérise la résine tout en étant auto-guidé dans celle-ci. Après rinçage de la plaquette, on obtient un micro-objet solide parfaitement centré sur la zone d'émission du composant (figure 4.19).



4.18 Principe de formation de la micro-pointe

Les formulations mises au point pour la fabrication en sortie de fibre ont dû être adaptées pour être utilisées sur des plaquettes de composant. Plus récemment, les compositions ont été modifiées pour pouvoir réaliser un dépôt de résine par spin-coating et non plus simplement par dépôt localisé (Post-doc D. Barat).

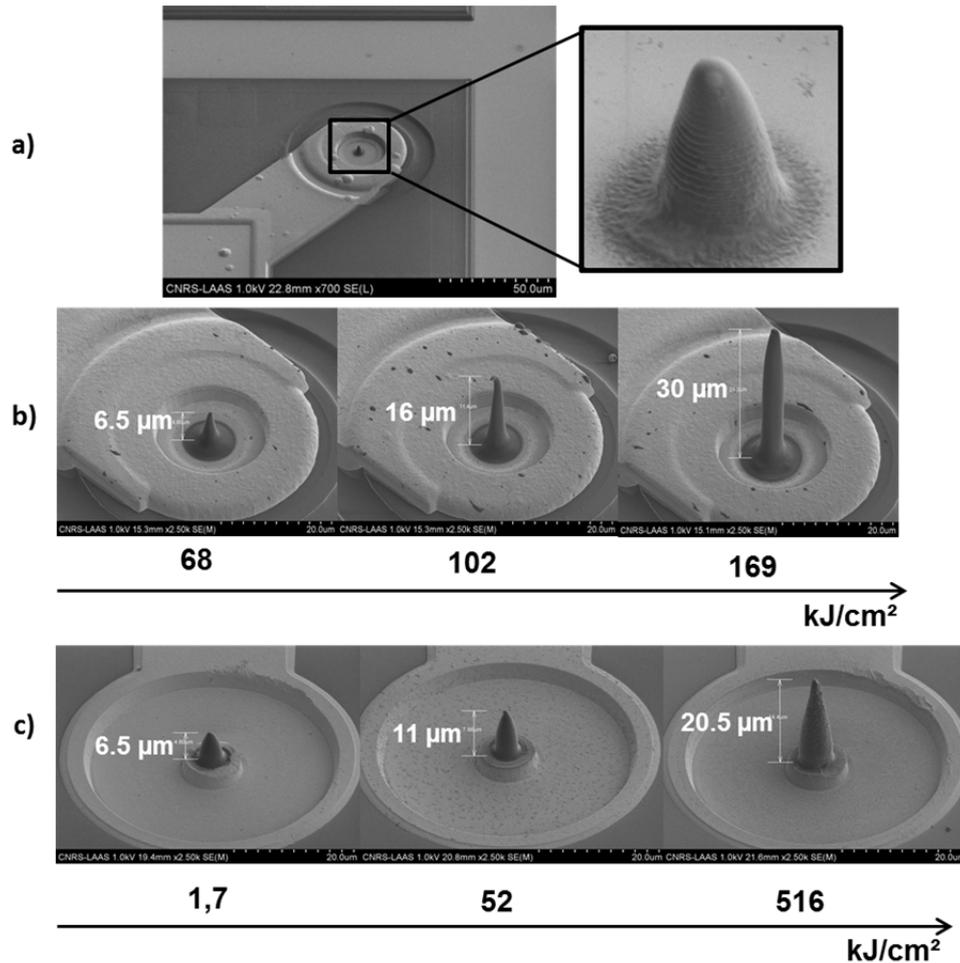


Figure 4.19 a) micropointe auto-écrite à 760nm sur VCSEL, influence de la dose sur la taille des pointes obtenues: b) VCSEL à diaphragme d'oxyde enterré ($\Phi=3 \mu\text{m}$) et c) VCSEL à mesa ($\Phi=5 \mu\text{m}$)

Cette méthode est maintenant reproductible et permet de former des micropointes auto-alignées sur VCSELs dont le rayon de courbure varie en fonction de l'intensité lumineuse et/ou du temps d'exposition. Suivant la technologie du VCSEL considérée (diaphragme d'oxyde enterré (AlOx) ou simple mesa), on obtient également des hauteurs et des courbures différentes (figure 4.19 b) et c) [Barat, 2011, article en préparation].

Pour le moment, en raison de leur forme, ces micro-pointes sont uniquement exploitables pour la focalisation du faisceau à très courte distance comme nous le présenterons dans le chapitre V. Les conditions d'irradiation pour obtenir des microlentilles avec des propriétés intéressantes pour la focalisation à plus grande distance sont encore en cours d'étude.

Cette méthode peut également constituer une voie originale de visualisation de la forme du mode principal et de l'apparition des modes supérieurs dans un VCSEL. Comme on peut le voir sur les images MEB de la figure 4.20, ce procédé permet en effet d'observer directement les modes spatiaux d'ordre supérieur qui apparaissent lors de l'augmentation du courant injecté dans le VCSEL même si le taux de suppression modal est élevé (SMSR>20 dB).

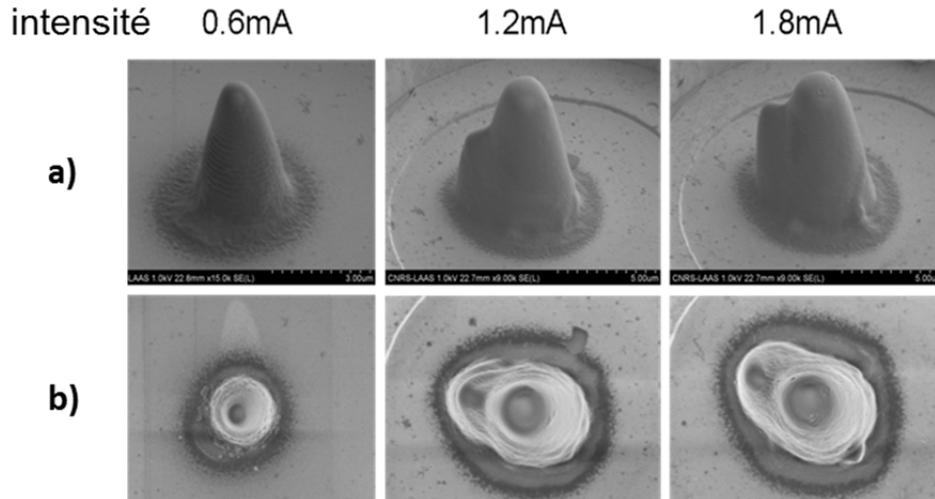


Figure 4.20 Evolution de la forme de la pointe en fonction de l'intensité injectée dans le VCSEL en haut : a) vue de côté b) vue de dessus

Pour conclure, cette méthode n'a pour le moment été appliquée qu'en surface des VCSELs pour la focalisation et n'a pas encore été exploitée pour l'auto-localisation de microlentilles au-dessus de piédestaux ou de membranes suspendues. Or, ceci conduirait à des formes plus pertinentes de lentilles, étant données les distances mises en jeu. En outre, l'extension de ce procédé à 850nm vient d'être récemment démontrée avec l'optimisation du photo-amorceur pour cette longueur d'onde (figure 4.21). Cette méthode constitue donc une voie très prometteuse dont nous allons poursuivre l'étude.

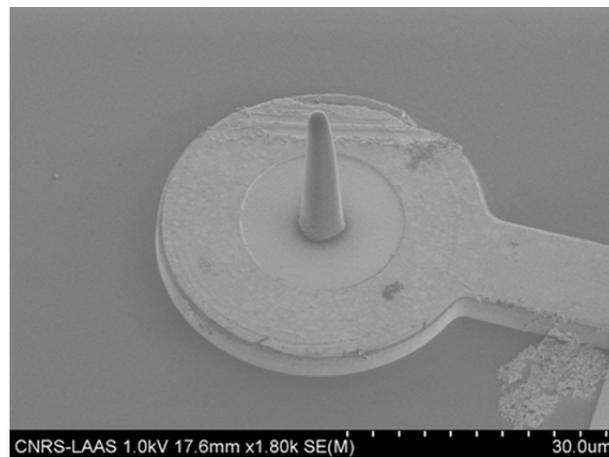


Figure 4.21 micro-pointe sur VCSEL émettant à 850nm

Nous venons de décrire les étapes nécessaires à la réalisation collective d'une microlentille passive sur VCSEL, à savoir la définition d'une microstructure épaisse en SU-8 pour fixer précisément le plan de la lentille puis le dépôt localisé de la lentille elle-même sur la surface de SU-8. Nous avons en particulier discuté des diverses possibilités de centrage de la lentille sur le piédestal : forme cylindrique ou cuvettes, auto-assemblage par traitement localisé de surface ou encore exploitation de photopolymères infra-rouge. L'ensemble de ces briques technologiques seront bien évidemment exploitables pour les MOEMS polymères que nous avons conçus et dont nous allons maintenant présenter la fabrication.

3. Micro-optique active

3.1 Réalisation de la membrane suspendue en SU-8

Comme nous l'avons vu dans le second chapitre, on distingue trois approches pour réaliser un contrôle actif du faisceau : soit on déplace la lentille (ou le miroir), soit on la modifie sa géométrie (déformation pour changer le rayon de courbure), soit on modifie les caractéristiques optiques par modification locale de l'indice de réfraction (cristaux liquides). Notre objectif sera de réaliser un MOEMS compact, compatible avec le pas entre VCSEL et leur fonctionnement en parallèle et réalisable en post-processing, la solution d'un actionneur thermo-mécanique a donc été retenue.

La plupart des membranes réalisées pour les MEMS sont en silicium (substrat SOI), mais certaines applications requièrent d'autres matériaux transparents tels que les semi-conducteurs III-V dans les systèmes optiques pour l'infrarouge [Leclercq, 1998] et le verre [Muller, 2003] pour le visible. Pour obtenir une membrane en silicium ou diélectrique (SiO_2 , SiN_x) on vient généralement graver depuis la face arrière du substrat par gravure humique (KOH ou TMH) ou sèche (DRIE avec le SF_6). On maîtrise la profondeur de gravure grâce à l'emploi d'une couche d'arrêt, en jouant sur la sélectivité d'attaque : typiquement l'emploi d'une couche de 1 à 2 μm de SiO_2 pour l'attaque aqueuse (KOH) ou pour la DRIE, correspond à une sélectivité de gravure d'environ 100. Cela permet de stopper 'proprement' la gravure du silicium, puis après élimination sélective au buffer HF de cette couche d'arrêt, on libère la membrane sans la graver.

Dans notre approche à base de polymères, il est inutile d'utiliser d'autres moyens de gravure que le bain de développement de la résine car il faut assurer une compatibilité pour un post-processing sur VCSEL. Dans cette partie, nous montrerons les trois techniques que nous avons testées pour obtenir facilement des membranes en résine SU-8 de notre MOEMS. Nous soulignerons les avantages et les limites de chacune de ces approches.

3.1.1 Fabrication par lamination

Cette première méthode consiste à déposer un film mince ($\sim 10 \mu\text{m}$) de résine SU-8 non insolée (prête à être microstructurée) sur une autre couche de SU-8 déjà structurée, comme l'illustre la figure 4.22 [Tuomikoski, 2005, Abgrall, 2006]. On assure l'adhérence du film sur la structure en appliquant une pression et un chauffage lors du laminage entre les deux surfaces. Le dépôt se fait avec une lamineuse, constitué de deux rouleaux chauffants, qui vont coller le film sur les structures par pression. Ce procédé déjà mature au laboratoire, est amplement exploité dans la réalisation de circuits microfluidiques. Il permet d'obtenir des canaux fermés (capotés) de toutes dimensions et la réalisation des structures multi-niveaux (3 niveaux de canalisations superposées). Cette méthode de capotage à l'aide du film SU-8 ressemble au 'collage', par soudure anodique, d'une lame de verre sur un substrat de silicium dans lequel des canaux sont déjà gravés. Néanmoins, il présente l'avantage de permettre la réalisation de structures suspendues complexes par une simple photolithographie du film de résine.

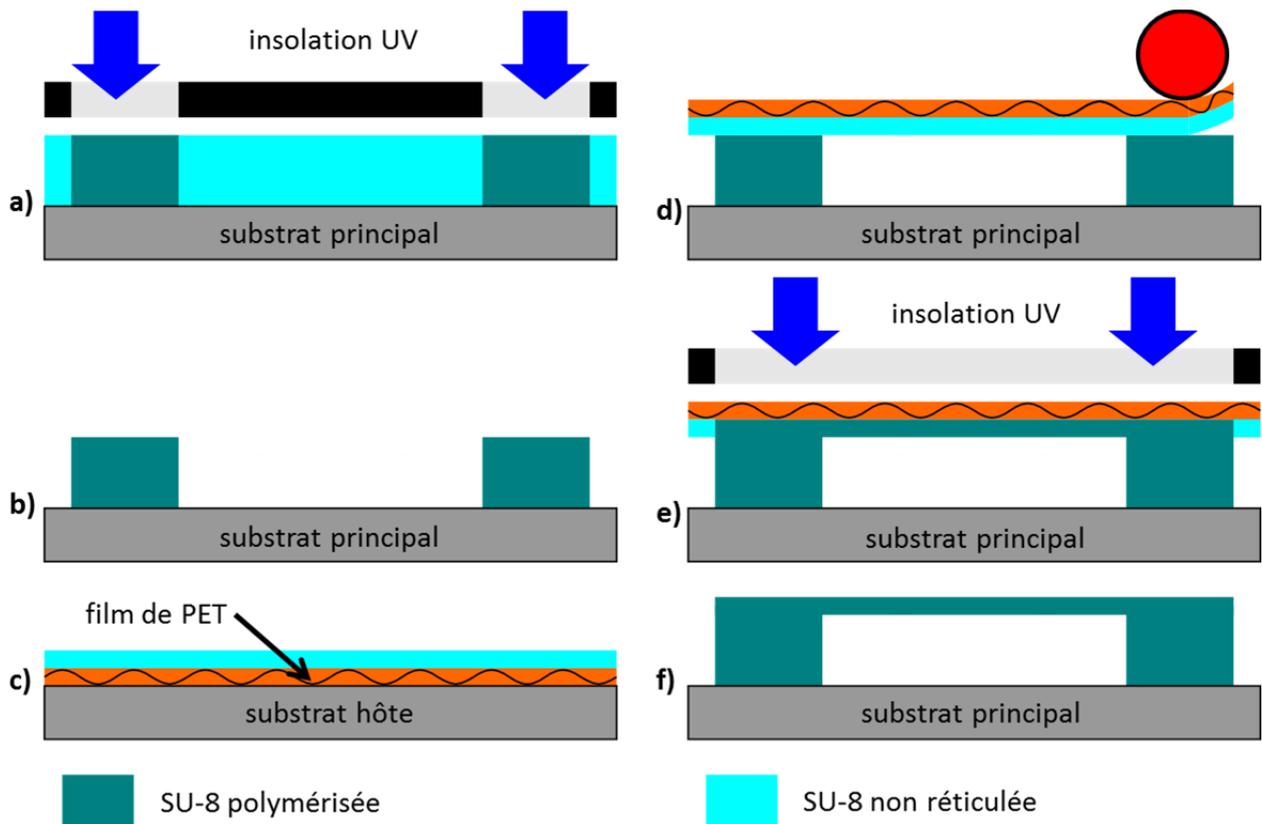


Figure 4.22 Principe de réalisation d'une membrane par laminage

Pour réaliser une membrane en SU-8 avec un procédé de laminage, on débute par l'élaboration des zones d'ancrage ou piédestaux par photolithographie classique d'une couche épaisse de résine SU-8 enduite sur le substrat (figure 4.22 a et b). L'épaisseur de ces piédestaux est ajustable dans une gamme allant de 5 à 500 μm en modifiant simplement les paramètres de l'enduction (vitesse, accélération et temps). Pour réaliser la membrane proprement dite, on colle tout d'abord un film de PET (polytéréphtalate d'éthylène) sur un wafer hôte en silicium. Une couche mince de SU-8 est ensuite enduite par spin-coating sur ce film (figure 4.22 c) et pré-recuite. Le film de SU-8/PET est ensuite décollé du wafer hôte, puis laminé sur le substrat comportant les piédestaux (figure 4.22 d). Le film est ensuite insolé (figure 4.22 e), puis révélé pour délimiter les membranes. Enfin, un recuit est nécessaire pour polymériser le film et lui conférer les propriétés mécaniques souhaitables (figure 4.22 f).

Cette technique permet d'obtenir séparément un contrôle précis des épaisseurs mises en jeu (membranes et piédestaux) du fait de leur fabrication séparée. En outre, elle présente la possibilité de former une cavité totalement fermée entre la membrane et le piédestal (figure 4.23 b), ce qui ne pourra être envisageable avec les autres méthodes présentées par la suite.

Cette approche est performante pour le contrôle du gap mais présente cependant des inconvénients. En effet, lors du report de la membrane par lamination, la qualité optique du film peut être légèrement dégradée (état de surface, planéité, ...). Cependant, ce procédé est utilisé dans l'industrie des verres optiques, il est donc tout à fait possible d'obtenir des membranes de bonne qualité optique avec un matériel dédié.

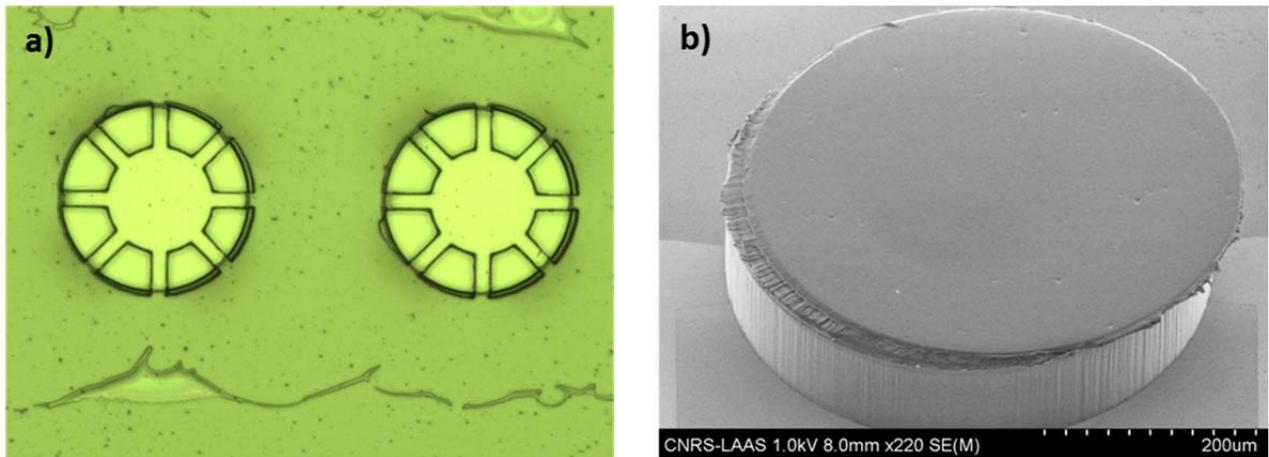


Figure 4.23 Images de membranes réalisées par lamination, a) vue par microscope optique, b) vue MEB

A cela s'ajoute la nécessité de disposer de larges zones de collage pour garantir une bonne adhérence entre la membrane et ses piédestaux. Comme on le voit sur l'image MEB de la figure 4.23 b), les membranes peuvent se déplacer entre l'insolation et la fin du recuit, cela arrive notamment quand les zones d'ancrage ne sont pas suffisamment larges par rapport aux zones suspendues (cas de nos structures). Cela impose donc d'élargir les piédestaux, forcément au détriment de l'intégration (encombrement). Comme le prédisent nos simulations thermo-mécaniques, nos structures doivent présenter des zones d'ancrage réduites par rapport aux dimensions de la membrane suspendue. Cette technique convient donc mieux à la réalisation de circuits microfluidiques dans lesquels les canaux (membranes) représentent un faible pourcentage de la surface totale collée.

3.1.2 Libération par insertion d'une couche sacrificielle

La seconde méthode, présentée sur la figure 4.24, consiste à libérer la membrane par attaque humide d'une couche sacrificielle. Ce principe est utilisé en microtechnologie pour réaliser des ponts métallique suspendus pour la réalisation de MEMS RF par exemple [Chao, 2011] ou bien pour fabriquer des MEMS de façon planaire puis les libérer en supprimant cette couche [Foulds, 2008]. Cette couche, éliminée en fin de process pour libérer la membrane, est usuellement organique (résine polymère, sol-gel, ...) pour les actionneurs en polymère et inorganique (SiO_2 , Ge, ...) pour les actionneurs en silicium. Cependant la plupart des couches sacrificielles sont limitées en épaisseur, ce qui réduit le gap d'air que l'on peut espérer obtenir à moins d'une dizaine de microns.

Nous avons souhaité néanmoins évaluer cette approche de fabrication de membrane SU-8 sur couche sacrificielle. Le problème du gap n'est pas rédhibitoire et pourrait être contourné en procédant, avant l'étape de libération, au dépôt d'une seconde couche épaisse de SU-8 (max~80 μm) sur la membrane et à la délimitation d'un piédestal cylindrique pour accueillir la seule micro-lentille.

La couche sacrificielle que nous avons retenue est la PMGI (PolydiMethylGlutarImide) dont l'épaisseur varie entre 1 à 4 micromètres [Microchem], et qui peut être doublé avec une seconde couche. La délimitation de cette couche se fait par gravure chimique des zones non protégées par une autre résine (AZ1522 ici).

La PMGI possède des flancs doux (angles allant de 30° à 70°) obtenus par fluage de cette résine lors d'un post-recuit. Cet angle, que l'on peut ajuster grâce à la température et au temps de cuisson, peut être mis à profit pour garantir la continuité de la couche métallique de la résistance chauffante qu'il conviendra de positionner sur la face arrière des zones suspendues. De plus, ces flancs doux garantissent un bon ancrage, notamment dans la zone d'encastrement (limite entre piédestal et membrane). En pratique, le bain révélateur de la PMGI utilisée lors de la libération est sans effet sur la résine SU-8 et permet de ne pas endommager la membrane lors de la gravure de la couche sacrificielle. Pour pouvoir libérer la membrane en SU-8, on doit ménager des ouvertures pour laisser pénétrer le révélateur de la PMGI.

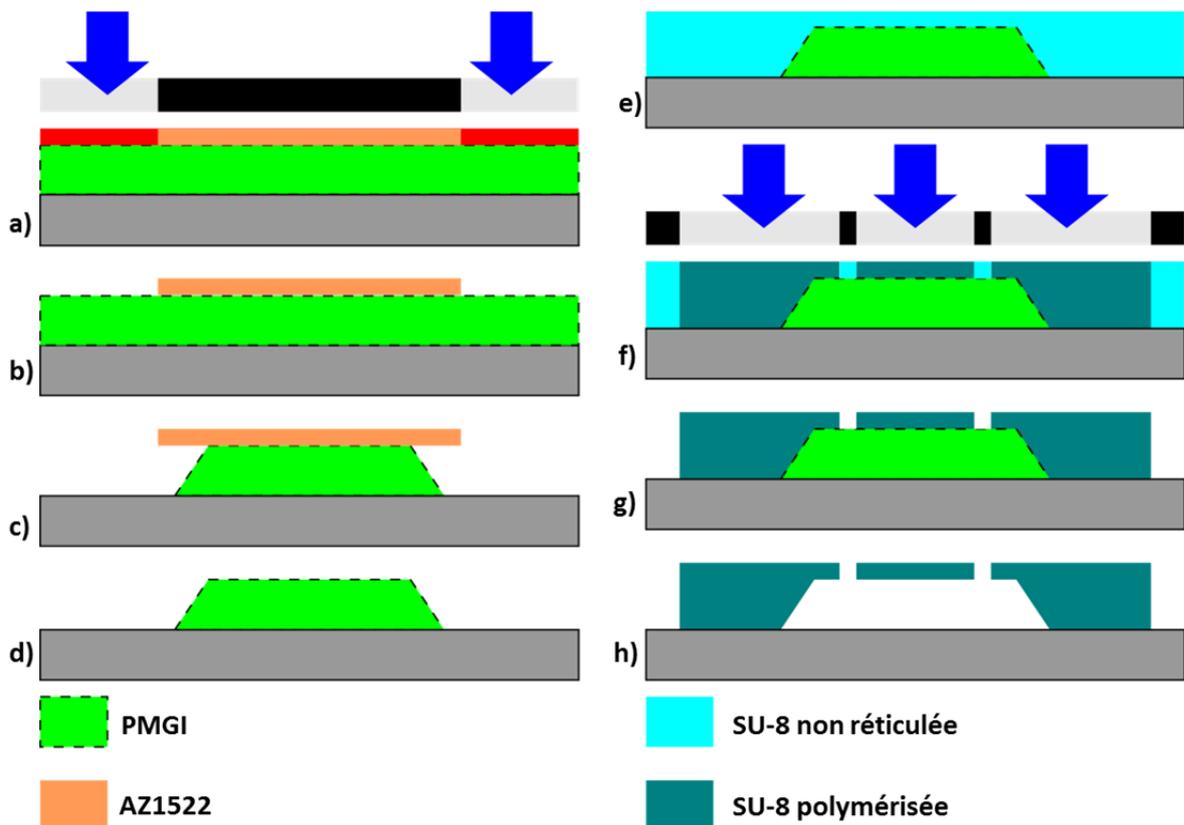


Figure 4.24 Principe de fabrication de membrane suspendue par gravure d'une couche sacrificielle

Un important travail d'optimisation a été mené pour minimiser les contraintes entre les matériaux polymères (PMGI/SU-8). En effet, la couche de PMGI est contrainte en tension et craquelle après le post-recuit si son épaisseur dépasse 4µm. De même, la couche de SU-8 a tendance à se fissurer dans les zones suspendues (sur la PMGI) (figure 4.25 a) si elle n'est pas assez épaisse (>15 µm) à cause des dilatations différentielles entre la SU-8 et la PMGI. Les dilatations thermiques entre les deux polymères font qu'ils sont tous deux sous contrainte, limitant la gamme d'épaisseur possible. Cela est encore plus vrai lors de l'utilisation d'une bicouche de PMGI (pour viser un gap proche de 10 µm). Cependant, en ajustant les temps de recuit et en rajoutant des rampes de température lors des recuits, il semble possible de réduire ces contraintes [Keller, 2008] et de réaliser des membranes suspendues sans défauts. Une

autre solution pour réduire les défauts dans la couche de PMGI consiste à la recuire à 200°C pour transformer cette couche plastique en couche vitreuse, pour éviter qu'elle absorbe les solvants contenus dans la SU-8 lors de son enduction.

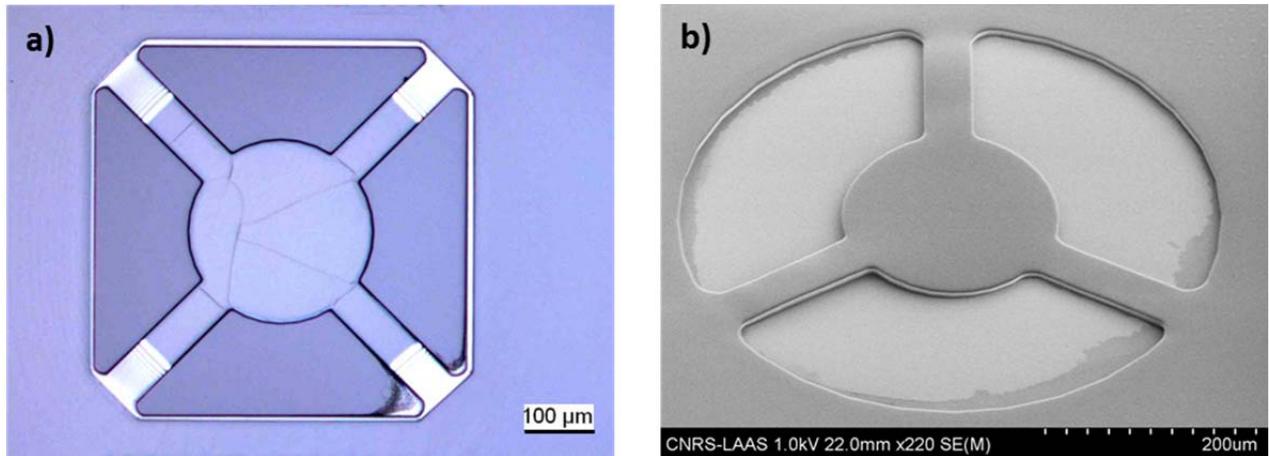


Figure 4.25 Membranes suspendues réalisées avec couche sacrificielle a) vue au microscope optique et b) au MEB

Un autre problème important concerne le collage de la membrane sur le substrat après libération. En effet, lors du séchage effectué après l'étape d'élimination de la couche sacrificielle, le liquide se résorbe et provoque le collage de la membrane si celle-ci est proche de la surface (phénomène dépendant de la rigidité de la membrane). Pour limiter ce collage, l'utilisation d'un sécheur super-critique est recommandée. Cet appareil permet, après la révélation de la PMGI, de remplacer le solvant de nettoyage par du CO₂ liquide qui sera transformé en gaz. Ce liquide possède une tension de surface extrêmement faible, ce qui permet de limiter le risque de collage de la membrane sur son substrat lors du séchage. Malgré toutes les précautions évoquées ci-dessus, l'obtention de structures suspendues de façon reproductible est restée trop délicate même si elle a ponctuellement réussi (figure 4.25) et nous a donc conduits à la recherche d'une nouvelle approche.

3.1.3 Fabrication par double insolation de la SU-8

Cette troisième et dernière technique consiste à exploiter la double insolation de la SU-8 [Yoon, 2005]. Cette approche a été là encore développée pour la fabrication de cavités et réservoirs micro-fluidiques et nous l'avons transposée à la réalisation de notre MOEMS (article en cours de préparation).

Elle consiste à réaliser membrane et piédestaux à partir d'une enduction unique de résine SU-8 sur le substrat (figure 4.26 a) et de deux insolations avec deux masques différents. Le film épais de SU-8 est insolé à deux longueurs d'ondes différentes (365 et 320 nm) pour définir successivement les piédestaux puis la membrane. La première insolation à 365 nm traverse et polymérise la résine sur toute l'épaisseur (Figure 4.26 b), alors que la seconde, à 320 nm, est très rapidement absorbée et ne polymérise que la surface de la SU-8. La lumière est en effet absorbée plus rapidement par la résine lorsque la longueur d'onde est plus courte, ce qui permet de réduire l'épaisseur insolée et la création de la membrane après révélation (figure 4.26 c). On termine la fabrication de la membrane par la révélation de la résine non

insolée (Figure 4.26 d) au travers d'ouvertures préalablement ménagées. Pour contrôler l'épaisseur de la membrane, on peut jouer sur la dose (temps x puissance) mais il est aussi possible de choisir une longueur d'onde différente. La lumière est d'autant plus absorbée par la résine que la longueur d'onde est courte, ce qui permet de réduire l'épaisseur insolée. Cette modification de la longueur d'onde d'insolation, même si en pratique elle n'est pas toujours simple à mettre en œuvre (insertion de filtres optiques dans l'aligneur UV), s'avère plus reproductible que de ne jouer que sur le temps d'exposition. Pour notre part, nous avons pu faire varier l'épaisseur de la membrane entre 5 et 20 μm . Nous avons vu dans le chapitre II que la valeur la plus favorable était 5 μm . Nous avons vérifié ici que cette valeur était suffisante pour assurer la tenue mécanique et la planéité et nous l'avons donc retenue.

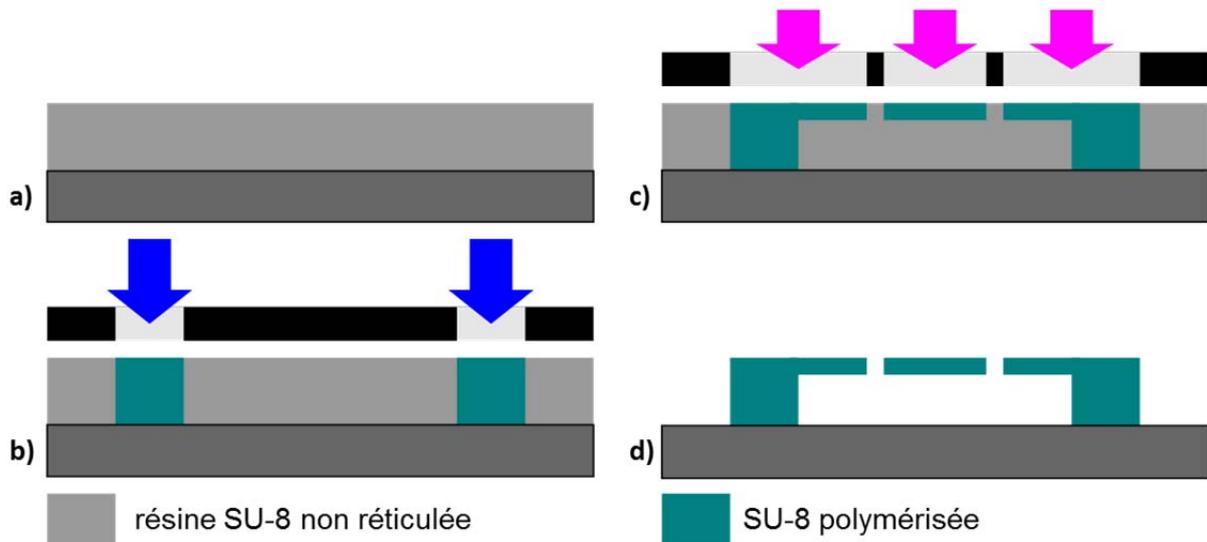


Figure 4.26 Principe de la fabrication de membrane par double insolation de la SU-8

L'alignement de la seconde insolation sur la première est très tolérant, mais doit en revanche être très précis vis-à-vis de la zone d'émission du VCSEL (alignement optique laser/lentille). En pratique il conviendra de bien s'aligner sur le méssa du VCSEL. Lors des tests de fabrication, la microlentille active a été réalisée sur un substrat de verre (sans VCSEL au-dessous), il est possible de faire apparaître les motifs des piédestaux avec suffisamment de contraste par un simple échauffement de la résine (10 secondes à 60°C).

Parmi les avantages de cette méthode de fabrication de membrane, on peut souligner la simplicité et surtout l'aspect monolithique du MOEMS réalisé. En effet, comme la membrane et le piédestal sont réalisés dans la même couche de SU-8, on élimine les problèmes d'adhérence et de contraintes. De plus, la zone d'encastrement sera plus robuste. Le contrôle de la hauteur du plan sur lequel sera déposée la lentille est assuré par la maîtrise de l'épaisseur de la SU-8 enduite par les paramètres du spin-coating.

Cependant, cette méthode exige elle aussi de ménager des ouvertures dans la zone suspendue pour évacuer la résine non polymérisée lors de la révélation. Ce dernier point constitue un réel verrou pour la réalisation de dispositifs microfluidiques. En effet, réaliser des canaux de faible section et de plusieurs millimètres devient rapidement impossible, et l'on touche aux limites de cette approche. Cependant dans le cas de nos membranes, cela n'est pas un obstacle et il est aisé de prévoir une membrane percée facilitant la libération, comme

l'illustrent les images MEB de la figure 4.27. Comme le montre la première image, il n'est pas nécessaire d'avoir des trous en surface de la membrane pour évacuer la résine : on peut prévoir des canaux d'évacuation de la résine dans les piédestaux. Il est aussi très aisé de réaliser des bras fins ($\sim 6 \mu\text{m}$) sans risque de rupture dans la zone d'encastrement, car les contraintes sont faibles du fait de la monocouche de résine SU-8.

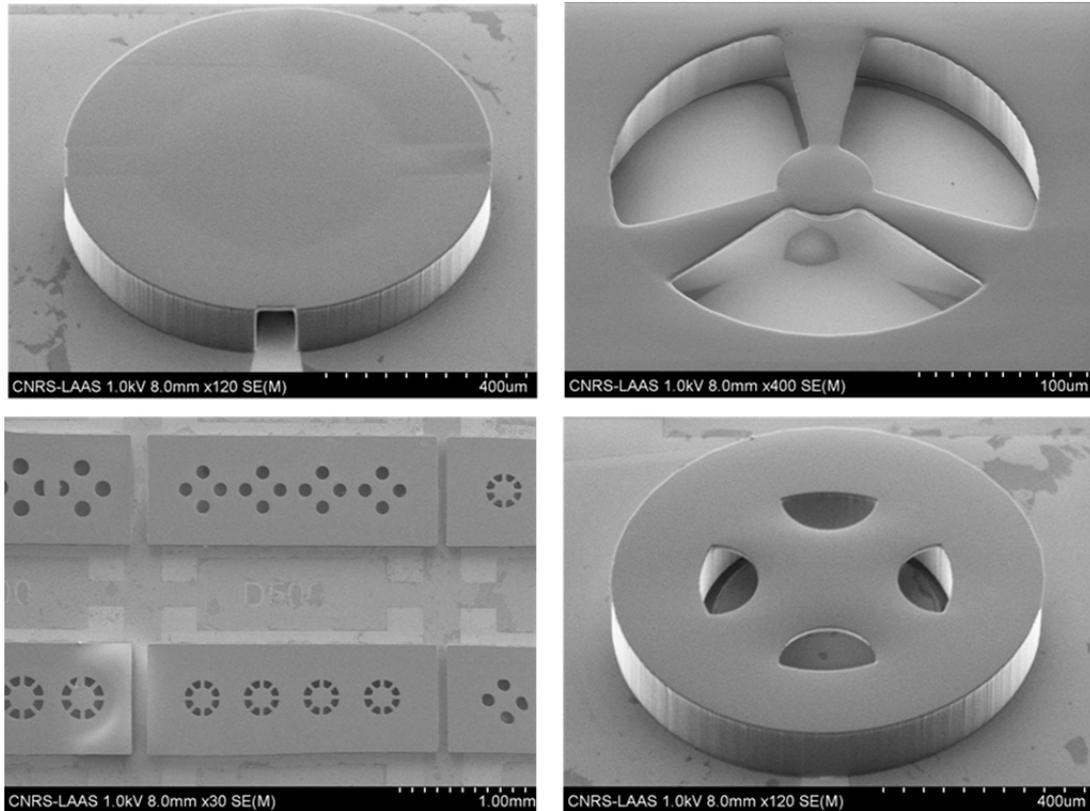


Figure 4.27 Images MEB de différents types de membranes réalisées par double insolation

3.1.4 Conclusion sur la fabrication de membrane

Comme on vient de le voir, fabriquer une membrane en polymère peut être réalisé à l'aide de différentes méthodes permettant d'obtenir de géométries et tailles variées.

L'utilisation de la méthode de lamination permet d'obtenir des cavités fermées, contrairement aux autres solutions proposées et donc moins sujettes à des déformations induites par un multi-ancrage (structure multi-bras). Cependant, la solution exploitant des bras est potentiellement plus performante pour atteindre plusieurs micromètres de déplacement vertical en raison d'une plus faible rigidité. De plus, comme nous l'avons montré, la lamination souffre de déplacements des zones suspendues lors du post-recuit de réticulation et nécessite un encombrement important pour assurer un bon collage.

L'approche par emploi d'une couche sacrificielle est a priori plus simple, compacte et performante. Cependant, elle limite les gaps d'air réalisables à $10 \mu\text{m}$. La principale limitation rencontrée lors de sa mise en œuvre est due à la dilatation différentielle entre les matériaux employés (PMGI / métal de la résistance chauffante / membrane SU-8) qui reste difficile à contrôler, se traduisant trop souvent par la détérioration des membranes.

Enfin, la troisième méthode explorée, la double insolation de la SU-8, permet d'obtenir des membranes fiables et reproductibles avec un grand gap d'air et en mettant en œuvre une seule enduction de résine. Les membranes sont peu contraintes et la zone d'accueil de la lentille ne présente pas de défauts de planéité.

Cependant, la verticalité des flancs de la SU-8 peut rendre difficile l'extraction des amenées de courant en bas du piédestal. A présent, considérons les deux dernières méthodes et présentons comment réaliser l'élément chauffant (électrode métallique résistive). Il est clair que l'approche « couche sacrificielle » simplifie les étapes de réalisation de l'élément chauffant. En revanche, l'important relief des structures obtenues par double insolation va compliquer considérablement la confection de l'élément chauffant disposé sur la membrane.

3.2 Fabrication de l'électrode chauffante métallique

Pour réaliser l'actionnement thermo-mécanique, nous avons choisi de fabriquer une électrode chauffante à l'aide d'une métallisation résistive. Pour cela, nous utilisons une couche de métal de faible section (épaisseur et largeur) et de résistivité moyenne ($\rho_M > 10 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) pour obtenir une résistance d'une centaine d'Ohms compatible avec un actionnement de quelques Volts. On a la relation suivante entre R et ρ_M :

$$R = \frac{\rho_M * L}{S} \quad [4.1]$$

où ρ_M est la résistivité du métal, S sa section et L la longueur du ruban métallique.

Pour une électrode circulaire avec deux bras servant de résistance chauffante, cette relation devient :

$$R = \frac{\rho_M * r * \pi}{W * e_M} \quad [4.2]$$

où r est le rayon ($r=300 \mu\text{m}$), e_M l'épaisseur (100 nm dans notre cas) et W la largeur ($W=30 \mu\text{m}$), ces valeurs étant données par la simulation (chapitre II). Le dimensionnement de l'électrode issue de la simulation est compatible avec un actionnement à basse tension ($U < 5 \text{ V}$). Avec quelques volts, on obtient une puissance dissipée d'une centaine de milliwatts, suffisante pour porter l'électrode à une température de 120°C .

Dans ces conditions, on obtient une résistance R variant entre 15 et 230 ohms et sa valeur, pour la géométrie retenue dépend de la résistivité du métal choisi.

3.2.1 Choix du métal

Les métaux sont peu résistifs comparé aux semi-conducteurs à température ambiante. Cependant, en jouant sur la section, épaisseur et largeur de l'électrode, on peut définir une zone résistive chauffante. En dehors de cette zone chauffante, les amenées de courant doivent rester peu résistives et pour cela leur largeur devra rester importante.

Nous avons testé plusieurs métaux pour répondre aux contraintes technologiques liées à la compatibilité technologique avec les matériaux sur le substrat VCSEL, lors du post

processing (plots de contacts et bonding, passivation, ...). Nous avons successivement testé le platine, le chrome, le nickel, l'alliage nickel-chrome, et le titane. Le choix du métal intègre la valeur de la résistivité mais également la sélectivité de la gravure aqueuse et l'adhérence sur la résine SU-8. Le tableau 4.1 ci-dessous résume la résistivité de différents métaux et la solution chimique utilisable pour les graver. La résistivité va de $\rho_M = 2,2 \mu\Omega.cm$ pour l'or, à plus de $110 \mu\Omega.cm$ pour l'alliage nickel-chrome.

Tableau 4.1 Valeurs des résistivités de différents métaux

Métal	Résistivité ($\Omega.m$)	Gravure chimique
Or (Au)	$22 \cdot 10^{-9}$	KI+I2
Aluminium (Al)	$26 \cdot 10^{-9}$	Attaque aluminium
Nickel (Ni)	$72 \cdot 10^{-9}$	Attaque Cr
Platine (Pt)	$94 \cdot 10^{-9}$	Eau régale
Chrome (Cr)	$127 \cdot 10^{-9}$	Attaque Chrome
Titane (Ti)	$390 \cdot 10^{-9}$	HF
Nickel-Chrome (NiCr)	$1120 \cdot 10^{-9}$	Attaque Cr

Il nous faut garantir l'attaque de façon précise et sélective de ce métal sur des motifs présentant un fort relief ($>100 \mu m$). La méthode pour délimiter ce métal dépend du relief considéré:

- dans l'approche par résine sacrificielle ou le relief est réduit ($<10 \mu m$) l'emploi d'une gravure chimique aqueuse (attaque sélective) permettra de bien délimiter le motif de l'électrode métallique
- dans l'approche par double insolation ou le relief peut dépasser $100 \mu m$, on privilégiera le lift-off du métal.

La taille des échantillons III-V intégrant les VCSELs est limitée (quelques cm^2), et la formation de bourrelets de résine sur les bords de l'échantillon conjuguée au piégeage de bulles près des flancs de SU-8 rend difficile la photogravure précise de motifs métalliques. L'inhomogénéité de l'épaisseur de la résine après enduction empêche l'obtention reproductible de flancs inversés de résine nécessaire au lift-off. Enfin, il est délicat de procéder au lift-off à l'intérieur de motifs annulaires (figure 4.28 a). L'enduction de résine par spray-coating, à la place du spin-coating classique, pourrait constituer une alternative avantageuse, mais nous ne disposons pas de cet équipement au laboratoire à ce jour.

L'aluminium et l'or servent de référence dans le tableau car ce sont les métaux les plus usités en microélectronique et permettent donc de réaliser les contacts électriques sur les puces. L'or présente aussi l'avantage de ne pas être oxydable.

Le platine est présent dans de nombreux microsystèmes car il est biocompatible et n'est pas sujet à la corrosion ou l'oxydation. On le retrouve aussi dans les systèmes thermiques car il possède une bonne linéarité dans sa variation de résistivité avec la température. En appliquant un courant, on crée un auto-échauffement et la seule mesure de la résistance permet de remonter simplement à la valeur de la température ainsi générée. Cependant pour garantir son adhérence, une couche d'accroche (tantale ou titane) est

nécessaire comme le montre la figure 4.28 b correspondant à un dépôt seul. L'ajout de cette fine couche métallique d'adhérence induit des contraintes supplémentaires sur les membranes pouvant conduire à leur destruction. Le seul procédé de délimitation du platine sur polymère utilisé est le lift-off car sa gravure fait appel à un bain d'eau régale ($1\text{HCl}+3\text{HNO}_3$) trop agressif pour notre polymère.

Le chrome, plus résistif que le platine, adhère bien sur les polymères mais il est souvent très contraint (figure 4.28 c) en raison de sa température élevée de sublimation. Pour l'exploiter, il convient de limiter son épaisseur à moins de 50 nm, et l'on se heurte de plus à son oxydation.

Le nickel est une alternative intéressante au chrome, car les contraintes résiduelles après dépôt sont plus faibles (figure 4.28 e), mais sa résistivité est deux fois plus faible. La gravure du nickel à base d'acide chlorhydrique est sélective par rapport à la passivation (SiO_2) et à la métallisation (TiAu) des plots. De plus, son coefficient de variation de résistivité est linéaire à basse température ($T < 400^\circ\text{C}$) et est environ quatre fois supérieur à celui du platine. Néanmoins, comme dans le cas du chrome, il s'oxyde facilement et cela peut induire une dérive temporelle rapide de la valeur de la résistance.

Nous avons également testé l'alliage nickel/chrome (0.8Ni/0.2Cr), très résistif et résistant à l'oxydation, mais il s'avère que cet alliage n'adhère pas sur la SU-8. L'ajout d'une couche d'accroche, si réduite soit-elle, vient fausser la conduction dans la couche de nickel-chrome et rend difficile la maîtrise de la valeur de la résistance. Pour ces raisons, nous avons écarté ce type de métallisation.

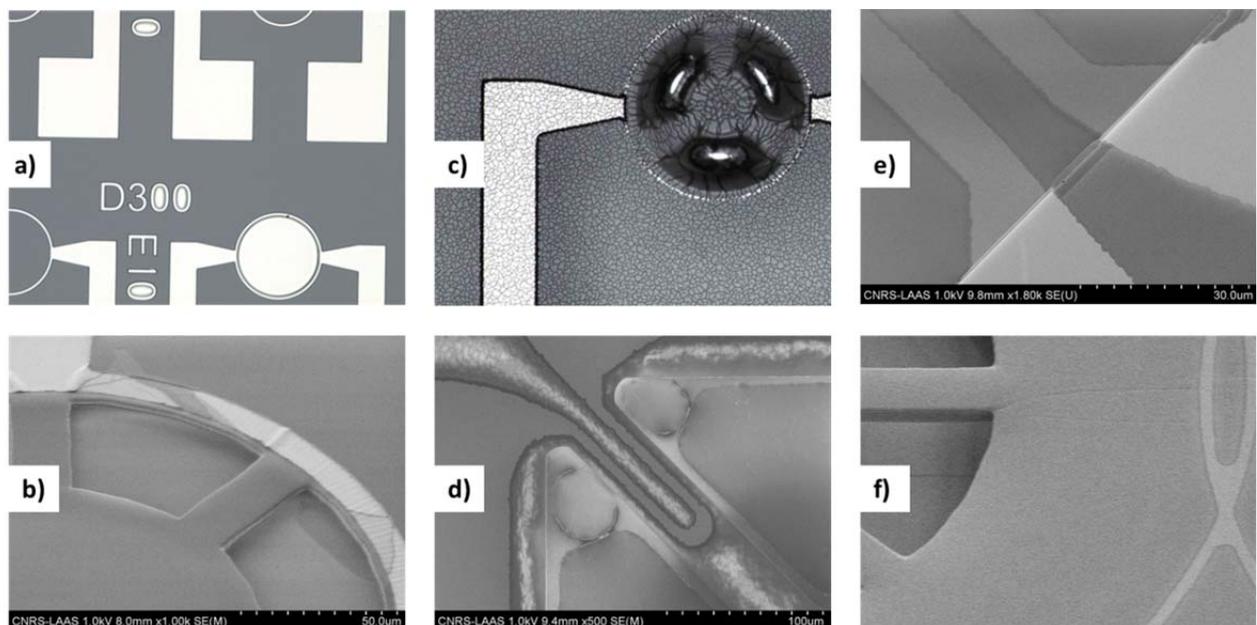


Figure 4.28 Images MEB illustrant les inconvénients des différents métaux déposés sur résine, a) et b) Tantale-Platine, c) Chrome, d) Chrome-Or, e) Nickel et f) Titane

Enfin, le titane, souvent utilisé comme couche d'accroche, permet d'obtenir une couche résistive qui adhère bien sur la SU-8. Cette métallisation, déposée par évaporation (canon à électron), est certes contrainte, mais bien moins que le chrome. Son oxydation n'est que superficielle et donc n'affectera pas, ou peu, la valeur de la résistance de l'élément

chauffant. En revanche sa gravure sera délicate car elle est réalisée à base d'acide fluorhydrique, qui peut aussi attaquer la passivation (oxyde de silicium). Néanmoins, cette gravure du Titane est extrêmement rapide (~ 15 nm/seconde dans du Buffer HF) en moins de 10 secondes, ce qui limite l'attaque des autres matériaux localisés au-dessous (2 nm/seconde pour le SiO_2) comme l'illustre la figure 4. 28 f).

Comme on peut le voir sur ces images MEB, chaque méthode de délimitation et chaque métal a des inconvénients. Le lift du Ta-Pt est difficile par endroits (figure 4. 28 a) et pose aussi des problèmes d'accroche (figure 4. 28 b). La couche de chrome seul a tendance à se craqueler à cause des contraintes (figure 4. 28 c), la gravure du chrome-or posent des problèmes de régularité sur les bords de gravure (figure 4. 28 d) comme pour la gravure du nickel (figure 4. 28 e).

C'est pourquoi nous avons opté pour le titane qui a donné les meilleures reproductibilités (valeur et résolution) et adhérence sur la SU-8 lors de la fabrication d'électrodes résistives.

3.2.2 Continuité électrique des amenées de courant jusqu'à l'actionneur électrothermique

Réaliser des électrodes métalliques sur une surface plane est aisé, la réaliser sur une membrane devient délicat, mais garantir la continuité de cette électrode entre la surface du wafer et le haut de la membrane (sur une couche de quelques dizaines de microns d'épaisseurs) est un plus grand défi encore. En effet, les motifs en SU-8 présentent classiquement des flancs verticaux et comme l'épaisseur du métal sur ces flancs est minime on ne peut par simple métallisation assurer la continuité électrique.

Dans ce paragraphe, on distinguera le cas d'électrodes réalisées sur les structures libérées (membranes) par attaque de la couche sacrificielle de celle obtenues par double insolation.

a) Réalisation sur membranes libérées par attaque d'une couche sacrificielle

Dans le cas où l'on fabrique la membrane sur une couche sacrificielle en PMGI, on met à profit les flancs inclinés de la PMGI pour garantir la continuité des amenées de courant. L'électrode est insérée entre la PMGI et la SU-8. Cette approche simple évite la diminution de l'épaisseur du métal au niveau des flancs verticaux (figure 4.29).

Comme le montre les images de la figure 4.30, la réalisation de l'électrode sur ou sous la membrane est faisable à l'aide d'une seule photogravure du métal. Cependant, ces réalisations demeurent délicates car la minimisation des contraintes entre matériaux reste problématique lors de la fabrication.

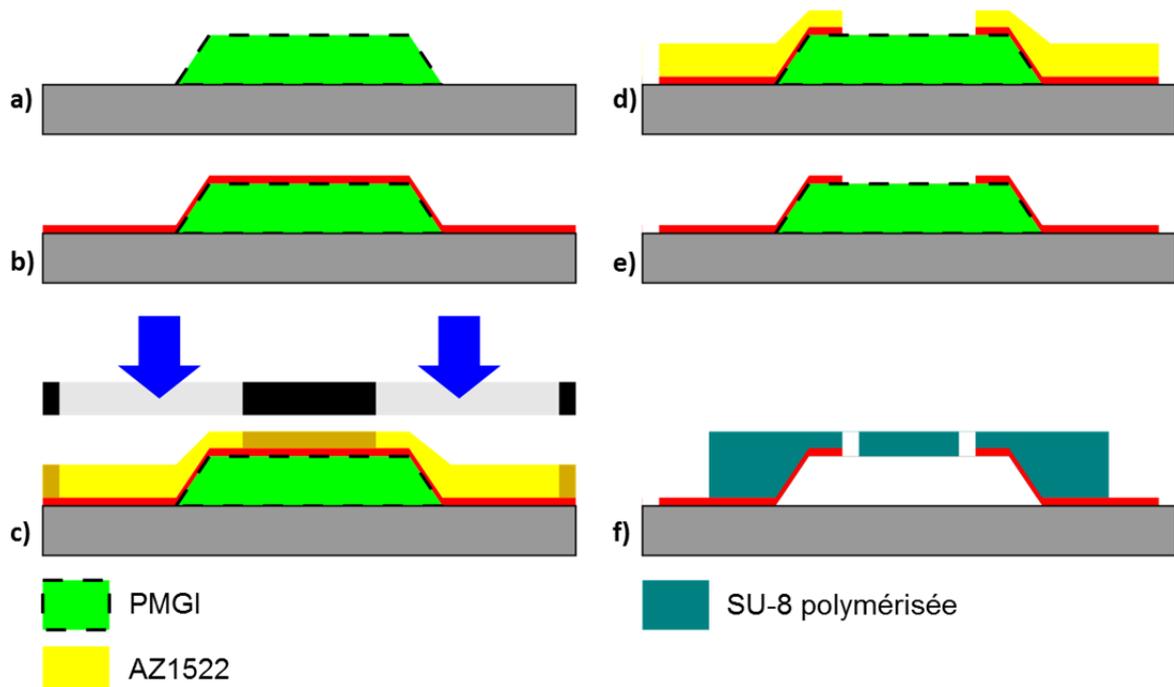


Figure 4.29 Procédés de fabrication d'électrode chauffante sous la SU-8

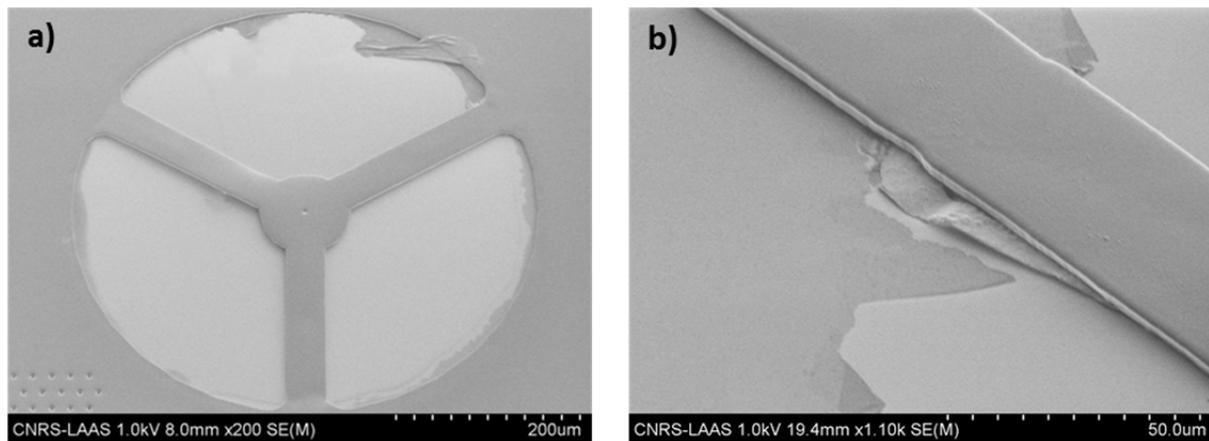


Figure 4.30 Images MEB d'une membrane avec couche sacrificielle réalisée a) avec une électrode sous la SU-8. b) détail du décollement de l'électrode

D'importants efforts ont été faits pour les limiter, en particulier en utilisant des rampes de température lors du recuit de la PMGI et de la SU-8. Nous avons aussi choisi un dépôt métallique résistif peu contraint (éviter le chrome et les métaux avec couches d'accroche). Pour accroître la tenue de la SU-8 sur le métal, le promoteur d'adhérence AP-300 est utilisé mais cette solution reste non satisfaisante, car lors de la révélation de la couche sacrificielle, l'électrode se décolle (figure 4.30 b). Cela nous a conduits à abandonner cette approche à priori simple et performante, mais définitivement trop délicate à mettre en œuvre.

b) Réalisation sur membranes fabriquées par double insolation

Dans le cas de la réalisation d'une membrane par double insolation (ou par lamination), garantir la continuité est plus complexe car l'épaisseur de la résine SU-8 est très

élevée. Pour y parvenir, nous avons fait appel à une technique d'électro-déposition localisée spécifiquement développée au laboratoire [Bourrier, 2011] et dont l'enchaînement des étapes technologiques est présenté sur la figure 4.31.

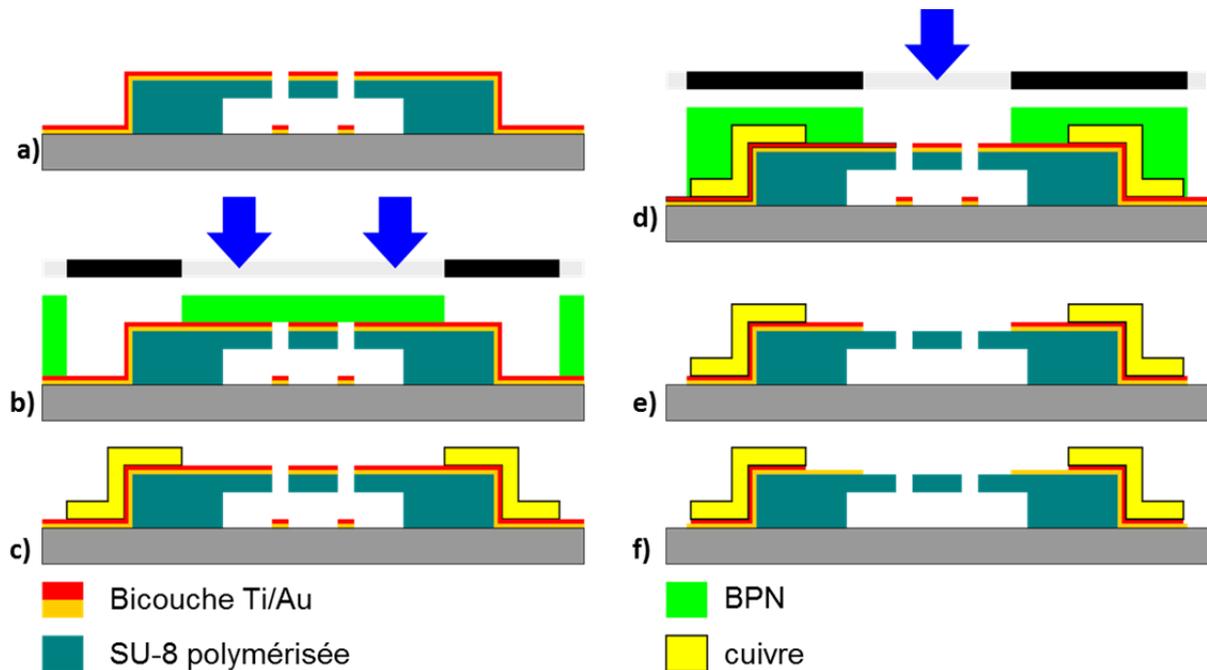


Figure 4.31 Procédé d'électro-déposition localisée assurant la continuité sur les flancs des piédestaux SU-8

La membrane créée par double insolation est en un premier temps métallisée avec du titane-or (100-400 nm) dans le bâti d'évaporation planétaire ce qui permet à la fois d'assurer une continuité minimale sur les flancs de la SU-8 et de former la couche de métal pour la réalisation de l'électrode chauffante (a). Cette bicouche, appelée « seed-layer », est ensuite recouverte d'un moule en résine BPN (résine négative de forte épaisseur) dans lequel des ouvertures sont, ménagées par photolithographie (b). L'électrodéposition d'une couche de cuivre épaisse (de 5 à 10 μm) a lieu dans ces ouvertures, localisées aux seules zones de franchissement des marches de SU-8 (c). Après élimination de la résine BPN (moules de la croissance électrolytique du Cu), on protège cette marche (couche de Cu) et l'élément chauffant avec à nouveau de la BPN (d) et l'on vient attaquer la « seed-layer » au $\text{KI}+\text{I}_2$ (attaque de l'or) pour éliminer cette métallisation dans les zones optiques (e). Enfin, on met à l'air l'électrode chauffante en titane dans les zones chauffantes suspendues en gravant localement l'or après élimination de la couche protectrice en résine (f).

L'image MEB de la figure 4.32 a) illustre la forte épaisseur du cuivre qui recouvre bien le flanc de la SU-8 et qui garantit la continuité électrique pour appliquer le courant et limite les pertes dans les amenées. On peut apprécier la bonne définition de l'électrode chauffante (figure 4.32 b) et la faisabilité de ces membranes actives. Leurs performances seront présentées dans le dernier chapitre consacré aux résultats de caractérisation.

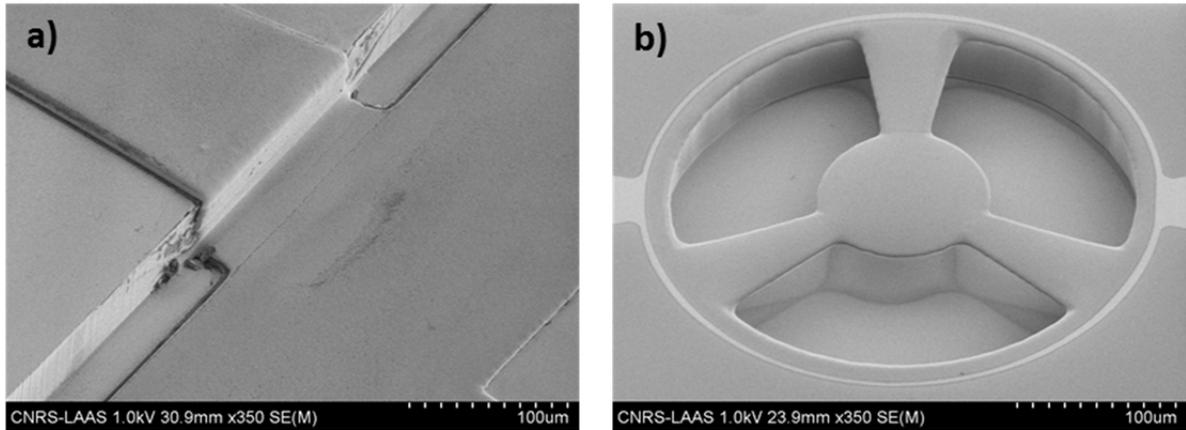
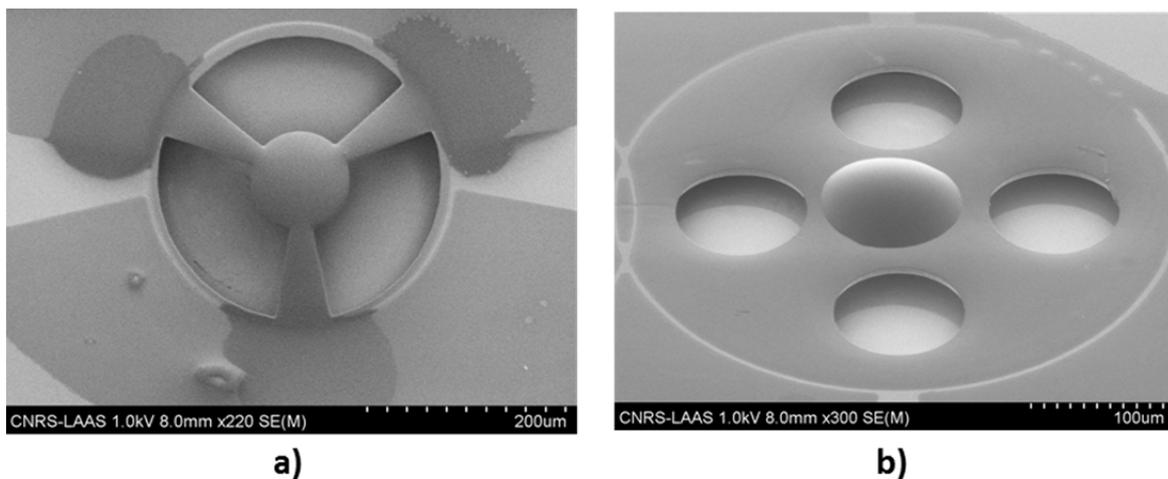


Figure 4.32 Images MEB a) de la continuité du métal sur flanc verticale de la SU-8 et b) de la membrane avec son électrode chauffante en Titane

3.3 Dépôt de microlentilles sur membranes

Suite à la gravure du métal, l'énergie de surface de la SU-8 a augmenté, ce qui se traduit par une mouillabilité accrue pour la résine. Même si les bords de la membrane peuvent s'apparenter à un pilier, les bras trop larges n'évitent pas l'étalement du polymère et empêchent la formation d'une lentille correcte dès que le volume déposé augmente trop (figure 4.33 a). Or, pour former la lentille sur la membrane, les techniques précédentes de dépôt localisé associées à un centrage sur piliers cylindriques (géométrie inadaptée) ou de cuvettes (couche SU-8 trop fine) ne sont pas exploitables. Comme on l'a vu dans les paragraphes 2.3 et 2.4, d'autres méthodes peuvent être envisagées.



Figures 4.33 Goutte de polymère déposée sur membrane SU-8 suspendue, a) surface non traitée, b) surface traitée

Ainsi, pour éviter cet étalement indésirable, nous avons réalisé un traitement « polymérophobe » de la surface pour obtenir un angle de contact plus important. Pour cela,

nous avons utilisé le traitement carbofluoré déjà exploité pour l'auto-assemblage localisé de lentilles (cf. 2.3.2). Ce traitement a permis de réduire la mouillabilité de la surface et d'obtenir des lentilles de taille et de courbure adaptées sur les membranes. On peut observer des exemples de réalisation sur substrats Silicium oxydé sur les photos MEB de la figure 4.33 et sur substrats de verre sur les profils obtenus par microscopie holographique de la figure 4.34.

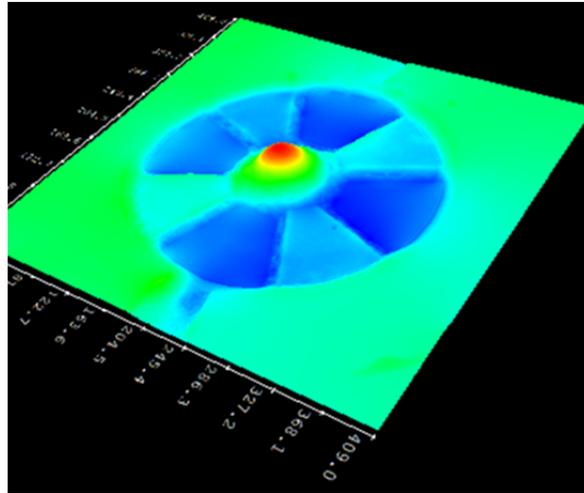


Figure 4.34 Mesure en 3 dimensions d'une microlentille sur membrane avec un microscope holographique DHM 1000 [Lyncee Tec]

3.4 Intégration de la microlentille active sur VCSEL

Nous avons démontré la faisabilité du MOEMS complet sur substrats de verre et de silicium oxydé en veillant à la compatibilité de l'ensemble des étapes pour une intégration en post-processing sur VCSEL. Les masques intégrant toutes les considérations liées à la réalisation sur VCSELs viennent d'être fabriqués et le procédé complet sera réalisé prochainement sur la plaque VCSEL de seconde génération présentée dans le paragraphe 1 du chapitre V. Dans ce masque, des membranes présentant un pitch de 250 et 500 μm ont été conçu sur le modèle de celles déjà réalisées. Le MOEMS complet a déjà été réalisé sur silicium oxydé et sur pyrex (figure 4.35).

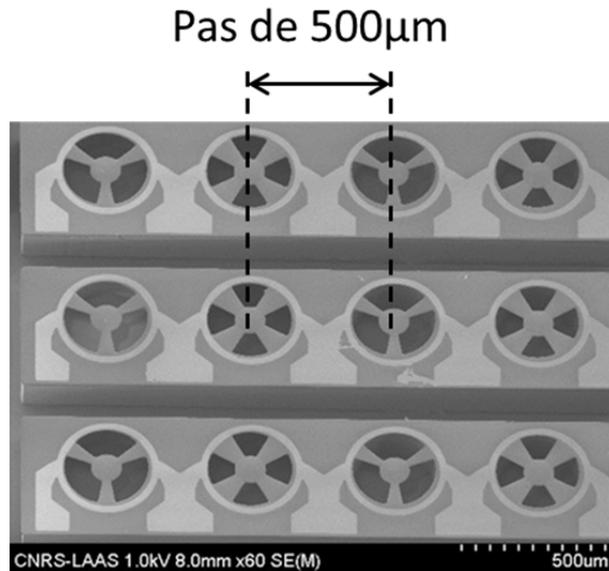


Figure 4.35 matrice de membranes actives avec deux géométries différentes (3 et 4 bras)
(espace entre deux MEMS : $500\mu\text{m}$)

4. Conclusions sur l'élaboration technologique d'une micro-optique passive et active intégrée sur VCSELs

Dans ce chapitre, nous avons présenté les méthodes testées pour la réalisation individuelle et collective de microlentilles. Pour procéder à un dépôt localisé d'une goutte de polymère, qui une fois réticulée deviendra une microlentille, nous avons utilisé le 'nanospotter' (micro-plumes). Nous avons montré comment en changeant le temps de contact, on peut ajuster le diamètre de la goutte déposée. Néanmoins, la faible précision du système de positionnement de ces gouttes nous a conduits à privilégier des approches d'auto-centrage à l'aide de piédestaux cylindriques ou encore de cuvettes définies à la surface de la SU-8.

Ces solutions, performantes pour de la micro-optique statique, ne sont pas directement transposables sur les dispositifs à membrane suspendue. Nous avons donc développé un traitement de surface localisé à l'aide d'une photogravure. Concernant la réalisation collective (matrice de lentille) nous avons testé avec succès la technique de trempage avec traitement de surface localisé et le dépôt localisé de polymère par sérigraphie. Ces deux techniques bien que prometteuses et pertinente pour un transfert industriel (production de masse), souffrent encore d'un manque de maturité pour l'obtention reproductible de lentille et mériteront de nouveaux développements. Pour aller encore plus loin, dans le cadre de l'ANR NIR OPTICS, nous exploitons actuellement une approche originale mettant en œuvre un polymère photosensible aux infra-rouges. Dans ce cas, c'est directement le faisceau émis par le VCSEL qui « sculpte » la micro optique. Nous comptons également approfondir cette voie prometteuse pour la suite.

Nous avons ensuite présenté les méthodes par lamination, couche sacrificielle et double insolation que nous avons envisagées pour la réalisation d'une membrane suspendue en SU-8 et retenu les deux dernières approches, plus compactes et reproductibles. En particulier, la double insolation, que nous sommes les premiers à exploiter pour réaliser une

lentille active, présente de nombreux avantages : grand gap d'air possible, une seule enduction de résine (structure 'monolithique'), membranes peu contraintes et sans défauts de planéité dans la zone d'accueil de la lentille. C'est donc la technique que nous privilégierons même si la verticalité des flancs de la SU-8 rend difficile l'extraction des amenées de courant en bas du piédestal.

Concernant la réalisation d'électrode chauffante sur le haut de la membrane, nous avons testé plusieurs métaux (Pt, Cr, Ni, Ni-Cr et Ti) devant répondre aux critères de résistivité, faible contrainte, adhérence sur la SU-8 et sélectivité d'attaque. A l'issue de tous ces tests, c'est le titane que nous avons retenu pour la réalisation de l'électrode résistive chauffante. Nous proposons également une solution au problème de continuité des amenées de courant. Pour garantir ce franchissement important de marche ($\sim 100 \mu\text{m}$), l'emploi d'un dépôt électrolytique de Cuivre ($15 \mu\text{m}$) localisé a été développé avec succès.

Par ailleurs, nous avons présenté les résultats de dépôt localisé d'une microlentille sur une membrane réalisée avec le procédé optimisé de fabrication du MOEMS. La surface de celle-ci a dû être traitée par un traitement de surface pour qu'une lentille puisse être déposée par micro-plume sans s'étaler. Enfin, la réalisation complète du MOEMS sur VCSEL est en cours et permettra prochainement de valider totalement l'ensemble de l'approche que nous avons proposée.

Les résultats de caractérisation de l'ensemble des réalisations que ce soit pour la collimation passive ainsi que les déplacements obtenus par le MOEMS seront présentés dans le chapitre suivant.

Chapitre V Caractérisation des dispositifs réalisés

Ce chapitre présente les différentes caractérisations électriques et optiques des composants VCSELs et des éléments optiques associées que nous avons conçus et réalisés. Nous commencerons par décrire brièvement les équipements que nous avons utilisés, puis nous présenterons les principaux résultats que nous avons obtenus sur les VCSELs à lentilles fixes pour la collimation et la focalisation. Nous exposerons ensuite les caractérisations électro-thermo-mécaniques menées sur les MOEMS réalisés sur substrats de verre.

1. Banc de caractérisation

La plateforme de caractérisation de notre laboratoire dispose de testeurs sous pointes KARLSUSS capables, après automatisation, de caractériser collectivement nos composants VCSELs. Les plaquettes VCSELs de 2 pouces sont ainsi caractérisées sur un banc de test électrique, auquel nous avons associé une fibre effilée à son extrémité reliée à une photodiode. Le positionnement de cette fibre est assuré par un porte-pointe pour collecter au mieux la puissance lumineuse émise et ainsi mesurer conjointement les caractéristiques $V(I)$ et $P(I)$ en continu. Ce moyen de caractérisation P-I-V est efficace et rapide (~ 30 s/composant) pour établir une cartographie systématique de l'ensemble des VCSELs présent sur le wafer (plusieurs centaines).

Pour mesurer les propriétés spécifiques du faisceau (spectre, divergence, profil spatial des modes, ...), nous utilisons un banc de caractérisation vertical spécifique développé par l'équipe. Ce banc VCSEL polyvalent permet de réaliser sous pointes les caractérisations suivantes :

- caractérisations P-I-V en régime continu et impulsionnel
- étude en température grâce à un asservissement Peltier.
- analyse du champ proche à l'aide d'une caméra IR.
- analyse spectrale en couplant la puissance émise dans une fibre optique pour l'acheminer jusqu'à un analyseur de spectre
- analyse localisée des propriétés de photodétection de composants à cavité verticale (VCSEL, photodétecteur) grâce à un faisceau d'un laser accordable Ti/Sa couplé à une fibre optique monomode
- analyse du champ lointain dans une direction à l'aide d'une photodiode mobile
- analyse bi-dimensionnelle du profil gaussien du faisceau émis à l'aide d'une caméra spécifique (Beam profiler de chez Photon Inc.).

Les deux dernières caractérisations permettent d'extraire la divergence des composants testés sous pointes (figure 5.1) et donc d'évaluer l'apport des micro-optiques intégrées que nous développons.

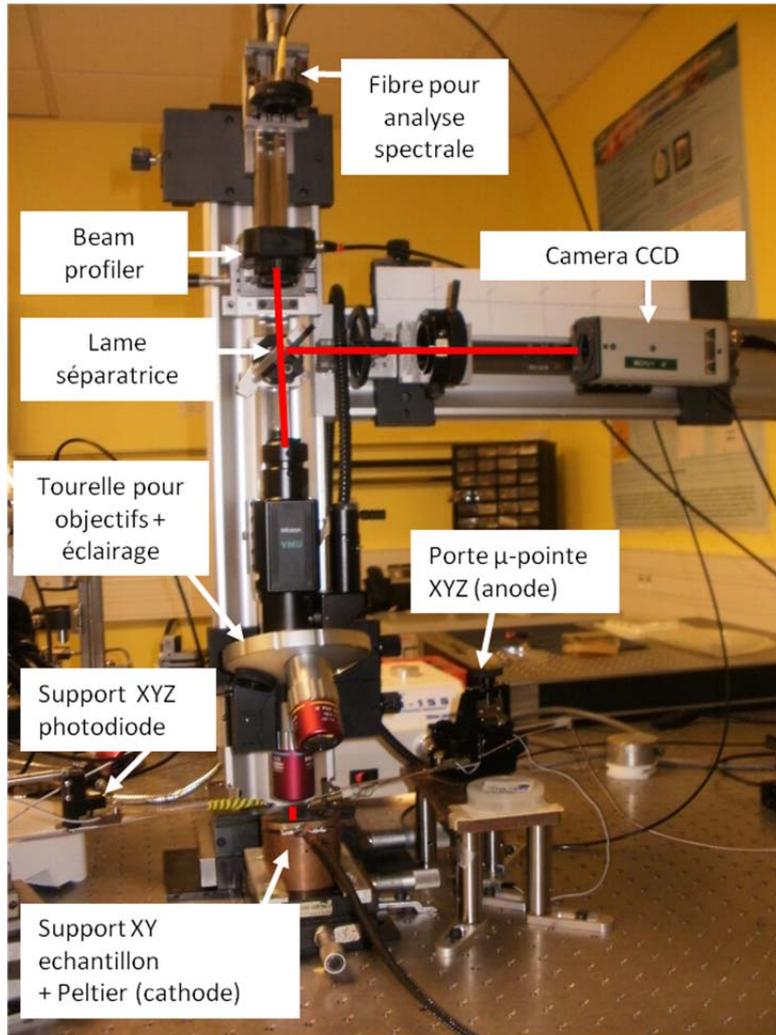


Figure 5.1 Photographie du banc vertical utilisé

Les caractérisations P-I-V sont effectuées grâce à une alimentation Profile Pro 8000 équipée de deux modules Laser LDC 8002 et d'un module de contrôle du Peltier associé (TEC 8080). Cet équipement dispose d'un port GPIB qui permet de contrôler à l'aide d'un PC via un programme sous LabWindows CVI. Cette alimentation en courant continu est bien adaptée aux VCSELs monomodes car elle présente un courant d'offset réduit ($<100 \mu\text{A}$). Notons que c'est aussi sur ce banc que sont fabriquées les micro-pointes auto-alignées sur VCSELs par photo-polymérisation infra-rouge.

2. Caractérisations des VCSELs à lentilles statiques

Nous avons vu dans le chapitre précédent que sur un pilier SU-8 cylindrique préalablement aligné sur le composant, il est possible d'obtenir un auto-centrage de la goutte de résine déposée avec notre « nano-spotter ». La caractérisation optique de ces microlentilles, présentées également dans le chapitre précédent, avait révélé leurs excellentes qualités optiques et nous mesurerons ici les performances globales de l'association VCSEL - microlentille. Nous présenterons aussi les résultats de la focalisation liés aux micro-pointes intégrées sur VCSELs et leurs effets sur le VCSEL.

2.1 Effet de la lentille sur les caractéristiques du VCSEL

Nous avons tout d'abord mesuré l'impact de la présence du piédestal en SU-8 et de la lentille sur les performances du VCSEL. Les résultats sont présentés sur la figure 5.2 pour un composant de $5.5 \mu\text{m}$ de diamètre d'oxyde enterré, monomode à faible niveau de courant injecté ($<5 \text{ mA}$). On constate que la caractéristique $V(I)$ n'est pas perturbée et qu'une très faible modification de la $P(I)$ apparaît, liée probablement du saut d'indice différent entre l'air et la SU-8. Nous avons également vérifié que le spectre du composant ne subit pas de modification significative.

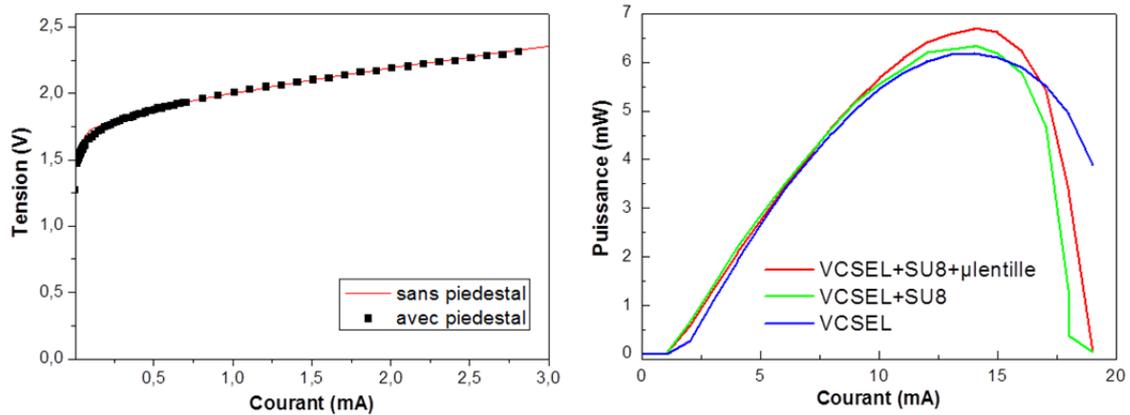


Figure 5.2 Caractéristiques a) $V(I)$ et b) $P(I)$ avec et sans piédestal en SU-8 + lentille

On peut donc conclure que cette micro-optique greffée en surface du VCSEL n'a pas d'incidence notable sur le fonctionnement du laser et sur la puissance maximale émise, ce qui confirme la transparence élevée des polymères mis en jeu.

Dans le cadre d'une collaboration initiée récemment avec Pierluigi Debernardi de l'IEET (Politechnico de Turin), nous avons évalué l'effet de la lentille sur le fonctionnement complet du résonateur VCSEL à l'aide de simulations vectorielles tri-dimensionnelles [Chung, 2010]. Nous avons obtenu des résultats en accord avec les mesures, avec un gain au seuil laser très faiblement modifié (410 cm^{-1} au lieu de 407 cm^{-1}) [Debernardi, 2011 A]. Cela confirme que les effets de réinjection optique sont minimes avec cette géométrie (piédestaux de $100 \mu\text{m}$ de hauteur). On peut en conclure qu'il n'y a pas de perturbation significative des courbes $V(I)$ et $P(I)$ liée à l'implémentation du pilier et/ou de la lentille. De plus, la résine est bien transparente au faisceau laser et ne se dégrade pas pendant le fonctionnement du composant.

2.2 Divergence du VCSEL

Les composants monomodes réalisés présentent une divergence initiale de 12° en demi-angle en $1/e^2$ (diamètre d'oxyde de $5,5 \mu\text{m}$). La divergence du faisceau VCSEL a été extraite de la mesure sous pointes du profil en champ lointain acquis avec une photodiode mobile. Pour ces composants, la hauteur effective du piédestal en SU-8 est de $110 \mu\text{m}$ au lieu des $100 \mu\text{m}$ visés. Nous avons donc recalculé sous ZEMAX la divergence attendue après le greffage de la lentille. Ces calculs ont été effectués en fonction de son diamètre et pour un

angle de contact 30° entre le polymère et la surface du piédestal. En effet, nos premières simulations supposaient un angle de contact de 40° (valeur mesurée sur surface plane). Or, l'angle réel de la lentille sur le piédestal cylindrique a été estimé à $30^\circ \pm 2^\circ$ (cf. chapitre IV paragraphe 2.3.1). D'après ces simulations, on s'attend à obtenir une divergence minimale pour des piédestaux de diamètre $40 \mu\text{m}$ (plutôt qu'à $50 \mu\text{m}$) et une augmentation monotone de celle-ci pour les diamètres plus élevés (figure 5.3).

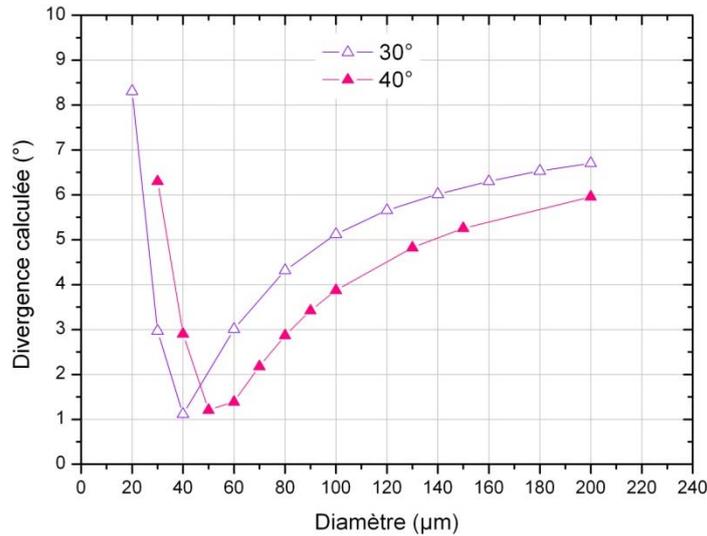


Figure 5.3 Simulation de la divergence attendue en fonction du diamètre pour des angles de contact de 30° et 40°

On obtient expérimentalement une divergence de 1.2° pour le diamètre de $40 \mu\text{m}$ (figure 5.4 a), soit une réduction d'un facteur dix par rapport à la divergence initiale, et on peut donc conclure que l'objectif de collimation du faisceau est atteint. En outre, nous avons pu mesurer l'évolution de la valeur de cette divergence pour des diamètres de piédestal prévus par le masque, c'est à dire entre 40 et $80 \mu\text{m}$ (figure 5.4 b) On obtient bien une augmentation monotone de la divergence en bon accord avec le modèle. Le comportement modélisé a été tracé sur cette courbe pour trois valeurs d'angle de contact espacées de 2° , ce qui nous permet d'estimer l'angle effectif à $\sim 29^\circ$.

Ces résultats montrent que notre technique conduit bien à une valeur constante de l'angle de contact de la lentille sur le piédestal quel que soit son diamètre. Dans ces conditions, pour un polymère fluide et une surface de SU-8 donnés, la forme de la lentille n'est donc déterminée que par le diamètre du piédestal. Avec cette méthode, la divergence est donc ajustable en jouant uniquement sur la taille du piédestal que l'on contrôle par la photolithographie [Bardinal, 2010 A].

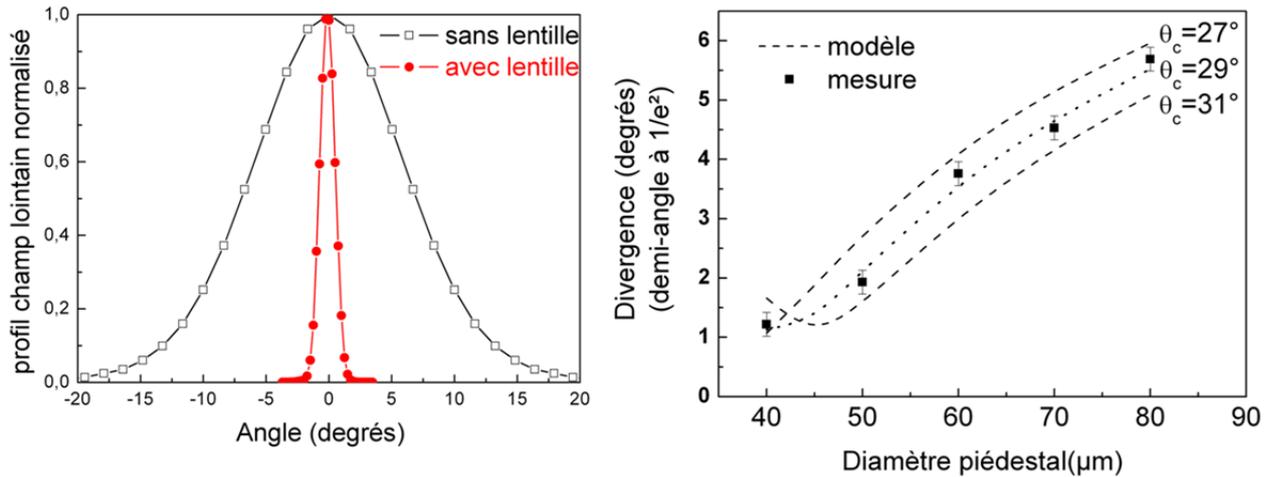


Figure 5.4 a) Profil du faisceau VCSEL sans et avec lentille intégrée, b) Divergence du faisceau en fonction du diamètre du piédestal

Pour conclure, ces résultats confirment non seulement la qualité de nos microlentilles et leur bon centrage, mais valident aussi notre conception optique et la pertinence et la reproductibilité de l'approche que nous avons retenue pour fabriquer des microlentilles sur mesure sur piédestal SU-8.

2.3 VCSELS à micro-pointes auto-alignées

Comme nous l'avons présenté lors du chapitre IV relatif à la technologie, notre équipe explore actuellement, dans le cadre du projet ANR NIR Optics, les potentialités d'un photopolymère infra-rouge développé par le laboratoire de photochimie de Mulhouse (IS2M). Nous avons d'ores et déjà obtenu des résultats avec un photopolymère sensible à 760 nm. En effet, nous pouvons réaliser des micro-pointes parfaitement auto-alignées sur des VCSELS avec un contrôle de la hauteur et du rayon de courbure en ajustant la dose d'exposition IR. Dans notre cas, comme la source lumineuse est le VCSEL lui-même, cette dose est à la fois fonction du courant constant appliqué au composant (au-dessus du seuil laser) et du temps d'exposition.

Comme on peut le voir l'image du faisceau émis, acquise dans le plan où il est le moins large avec la camera beam profiler (figure 5.5), les pointes obtenues avec ce procédé conduisent à une réduction significative de la taille du waist. Cette réduction a été observée pour tous les courants de fonctionnement du VCSEL et est en accord avec nos calculs réalisés sous ZEMAX [Bardinal 2010 B].

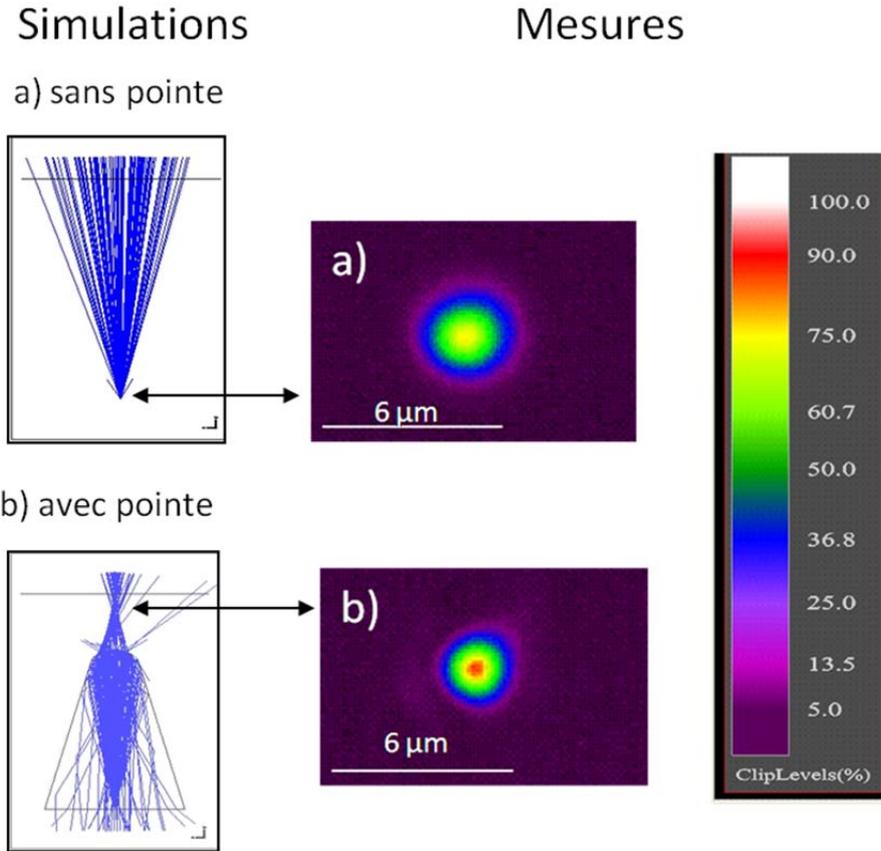


Figure 5.5 Simulations de l'effet de la pointe (Zemax) et mesure du profil spatial du faisceau émis par un VCSEL à 760 nm dans le plan où il est minimal sans (a) et avec (b) micro-pointe auto-écrite de hauteur 4.6 μm (courant appliqué 2 mA)

De plus, nous avons mesuré la taille du waist pour des distances croissantes à partir de la surface du VCSEL ou de la pointe. Ceci nous a conduits à estimer la distance focale à environ 1 μm (figure 5.6). Ces caractérisations préliminaires présentées ici ont été réalisées sur notre banc vertical avec des objectifs standard et une platine de déplacement micrométrique et ne permettent donc qu'une estimation de l'effet focalisateur de la pointe. Des mesures plus précises du diagramme d'émission dans le plan de Fourier avec un objectif de grande ouverture numérique (0.95) ont été réalisées depuis par nos partenaires du LNIO et confirment ces tendances. Elles montrent que la taille du spot obtenu est de l'ordre de 250 nm (limité par la diffraction) avec des focales de l'ordre de la longueur d'onde [Barat, 2011]. Ces VCSELs à pointes intégrées pourraient donc être exploités dans l'élaboration de systèmes miniatures d'analyse en champ proche.

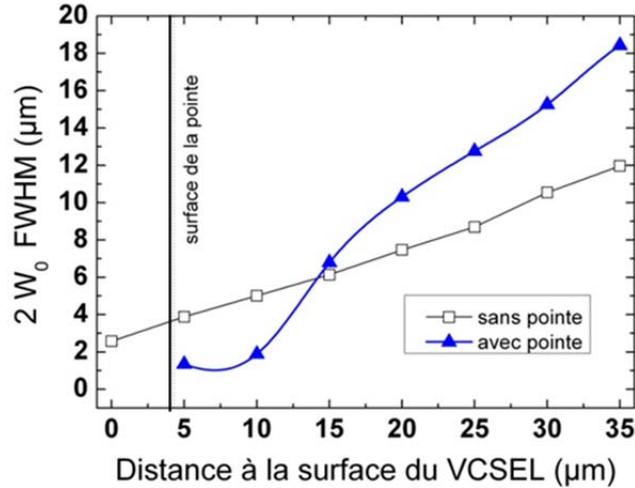


Figure 5.6 : Mesure de l'évolution de la taille du waist avec la distance à la surface pour un VCSEL avec et sans μ -pointe intégrée de $5 \mu\text{m}$

Par ailleurs, nous avons constaté une diminution de la puissance émise sur les courbes P-I-V (figure 5.7 a) en présence de la micro-pointe intégrée, mais là aussi, ceci est dû à nos conditions expérimentales inadaptées, qui ne nous permettent pas de capter tout le faisceau à la distance à laquelle est placée notre photodiode de mesure, en raison de la très courte distance de focalisation par la pointe. En revanche, nous mesurons un spectre d'émission quasiment inchangé, avec un comportement qui reste monomode (figure 5.7 b) et une augmentation modérée du seuil laser, ceci semble dû à des effets de réinjection optique plus importants que dans le cas précédent. Ce comportement, observé surtout dans le cas des VCSELs sans diaphragme d'oxyde enterré, est encore en cours d'étude chez nos partenaires du LNIO de Troyes et de l'IEET de Turin.

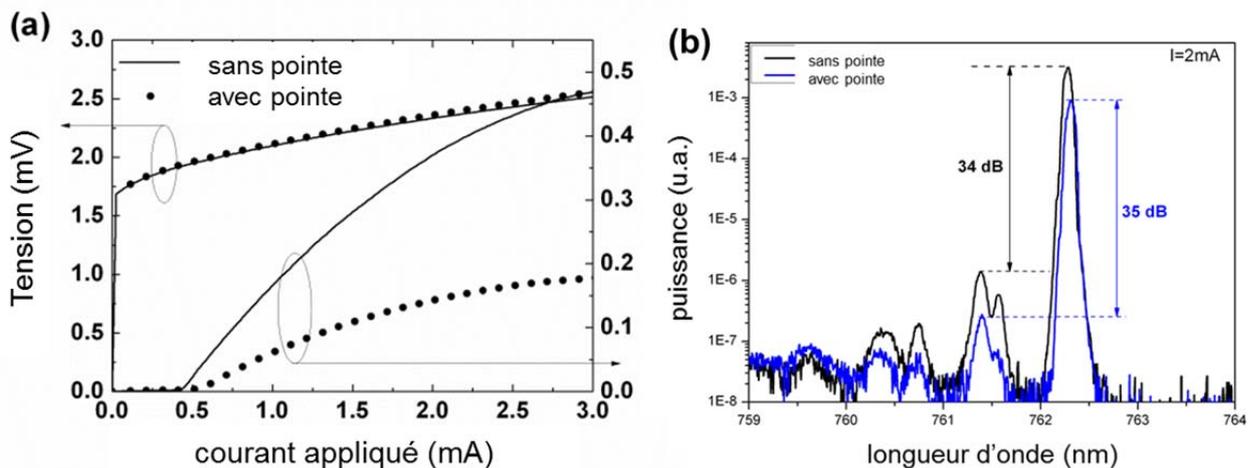


Figure 5.7 a) Courbes P-I-V avec et sans pointe d'un VCSEL monomode émettant à 760 nm
 b) Spectres d'émission avec et sans pointe pour un courant injecté de 2 mA

Pour le moment, les études sont effectuées sur des pointes greffées directement en surface des composants, ce qui n'est pas la configuration la plus favorable pour augmenter la distance de focalisation et le couplage de la lumière. Nous déterminons actuellement les paramètres photochimiques optimaux pour maîtriser la forme et le rayon de courbure de l'objet fabriqué (conditions chimiques, paramètres d'émission du VCSEL, conditions d'autoguidage de la lumière dans le polymère) pour améliorer ce couplage et augmenter la focale des micro-objets fabriqués avec cette méthode auto-alignée. De plus, nous pourrions prochainement tester le nouveau photopolymère mis au point pour 850 nm et son dépôt sur un piédestal ou une membrane en SU-8 pour obtenir une lentille auto-formée loin de la surface du composant, configuration plus favorable pour adapter sa forme.

3. Caractérisation du MOEMS

Nous allons maintenant présenter la caractérisation réalisée sur notre microsystème optique. Tout d'abord, la mesure de l'évolution de la valeur de la résistance en titane avec la température nous permettra d'établir une loi $R(T)$ que nous mettrons à profit lors des tests thermiques. Ensuite, nous présenterons la technique que nous avons utilisée pour mesurer le déplacement de la membrane sous actionnement électrothermique. Ces mesures permettront de conclure sur la faisabilité de notre filière générique de MOEMS polymère. Nous terminerons par la caractérisation des focales des microlentilles déposées sur membrane.

3.1 Caractérisation électro-thermique : mesure de la résistivité thermique

Avant d'utiliser l'actionneur thermique, il est important de caractériser la résistance chauffante seule, directement déposée sur de la SU-8 non structurée, pour en extraire ses caractéristiques propres. Pour cela, nous commencerons par la mesure de la dérive de la résistance en titane en fonction de la température. Enfin, nous aborderons la mesure du déplacement de la membrane en fonction de la puissance appliquée.

Lors de la mesure la variation de la résistance de notre électrode chauffante en fonction de la température, le courant appliqué est délibérément faible pour ne pas induire d'auto-échauffement. La température de la résistance chauffante est alors fixée par le porte substrat chauffant (chuck) de notre testeur sous pointe. La variation de la résistance est due à l'augmentation de la résistivité du métal avec la température, les paramètres géométriques restant quasiment inchangés. Cette dérive thermique de la résistivité est généralement non linéaire, mais peut l'être sur une gamme de fonctionnement donnée (20°C à 120°C), permettant ainsi de déterminer expérimentalement le coefficient thermique de la résistivité correspondant. Ce coefficient dépend du métal de l'électrode résistive (titane) et croît avec la température suivant la relation suivante :

$$R(T) = R(T_0)(1 + \alpha \cdot \Delta T) \quad [5.1]$$

où $R(T_0)$ est la résistance à la température du substrat maintenu à 20°C, α le coefficient thermique de la résistivité ($^{\circ}\text{C}^{-1}$) et enfin $\Delta T = T - T_0$ l'élévation en température.

La mesure de l'évolution de la résistance avec la température est représentée sur la figure 5.8 et l'on observe qu'elle est parfaitement linéaire dans notre gamme d'utilisation.

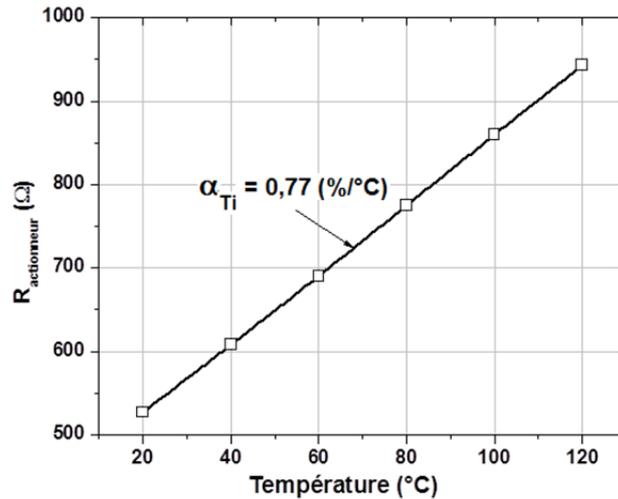


Figure 5.8 Variation de la résistance en fonction de la température

On extrait de cette courbe $R(T)$ la valeur du coefficient thermique de résistivité α ($^{\circ}\text{C}^{-1}$) dans la gamme allant de 20°C à 120°C . Elle est égale à $\alpha = 7,7 \cdot 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ pour notre couche de titane, alors que la valeur $\alpha = 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ est reportée dans la littérature [titanium]. Cet écart peut être imputé au dépôt par évaporation du titane sur le polymère et non sur silicium ou verre.

Compte tenu de la faible puissance d'actionnement envisagée (quelques dizaines de mW) et surtout de la très faible conductivité thermique de la SU-8 ($0,2 \text{ W/mK}$), la conduction de la chaleur correspondante n'induera qu'une élévation en température négligeable dans le substrat ($<1^{\circ}\text{C}$). Ainsi, il est possible d'affirmer que la résistance à température ambiante et celle du substrat sont égales ($R_0 = R(T_{\text{substrat}})$). Nous pouvons à présent déterminer la température $T_{\text{actionneur}}$ au niveau de l'élément chauffant dissipant une puissance électrique (auto-échauffement), ou mieux encore, l'élévation en température ΔT responsable de la dilatation thermique, donc du déplacement, à l'aide de la relation suivante :

$$\Delta T = \frac{R(T_{\text{actionneur}}) - R_0}{\alpha \cdot R_0} \quad [5.2]$$

De plus, la mesure de l'évolution de la valeur de la résistance chauffante avec la puissance appliquée (figure 5.9) nous renseigne sur le couplage électro-thermique.

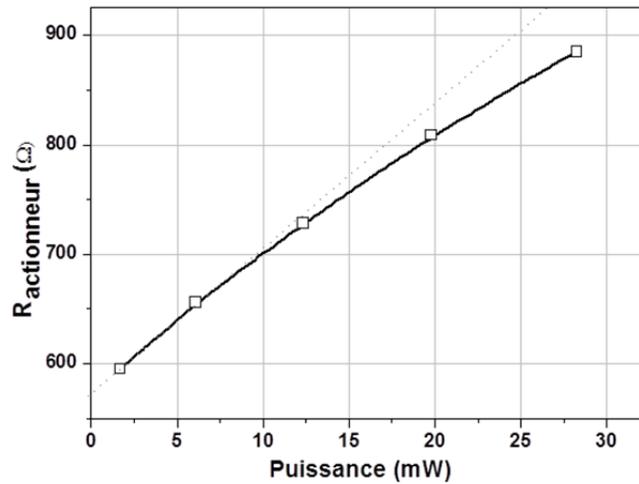


Figure 5.9 Variation de la résistance en fonction de la puissance appliquée

On peut déterminer à partir de ce graphe la valeur expérimentale de la résistance thermique R_{TH} à l'aide des relations suivantes :

$$R_{TH} = \frac{\Delta T}{\Delta P} = \frac{\Delta T}{\Delta R} * \frac{\Delta R}{\Delta P} = \frac{1}{\alpha R(T_{substrat})} * \frac{\Delta R}{\Delta P} \quad [5.3]$$

Le tracé de la variation de cette résistance thermique avec la température $R_{TH}(T)$ est présenté ci-dessous (figure 5.10).

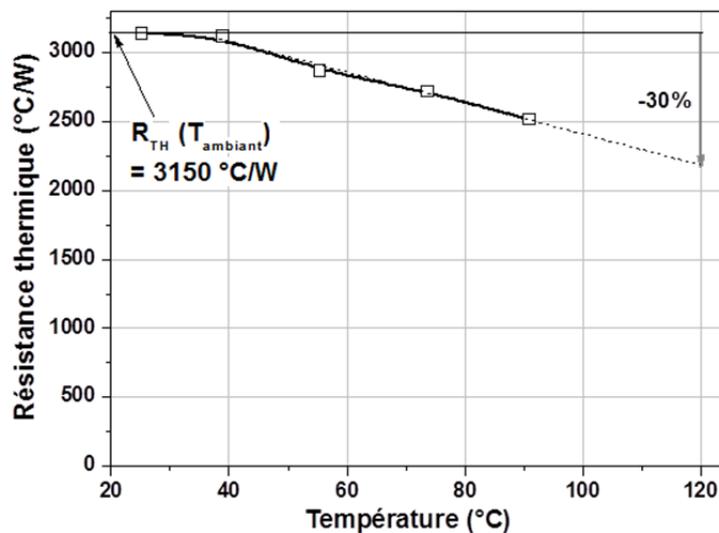


Figure 5.10 : Variation de la résistance thermique avec la température d'actionnement.

Comme nous l'avons précisé dans le chapitre II consacré à la modélisation, sans la connaissance de la loi de variation de la conductivité thermique avec la température, il est difficile d'évaluer la résistance thermique. Cette évolution, que nous avons mesurée ($R_{TH}(T_{actionnement})$), est en effet non linéaire comme nous l'avions supposé. Pour conclure sur cette caractérisation électro-thermique, nous avons tracé sur la figure 5.11 la température de l'électrode chauffante avec la puissance électrique appliquée à celle-ci.

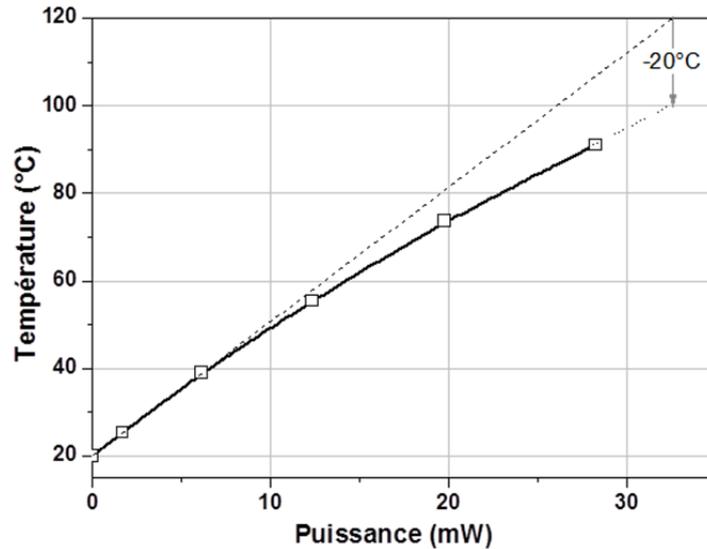


Figure 5.11 Evolution de la température avec la puissance électrique appliquée

Elle n'est pas linéaire, comme on s'y attendait d'après le tracé de la variation de la résistance thermique avec la température. Cela se traduit par une réduction de 20°C à 33 mW par rapport à ce que l'on aurait pu extrapoler à partir d'une mesure à basse température. Pour quantifier le rendement électro-thermique, on retiendra la valeur moyenne de la résistance thermique dans notre gamme d'actionnement, à savoir environ 2.7 °C/mW.

3.2 Caractérisation électro-mécanique : mesure du déplacement de la membrane

Pour quantifier le déplacement de la membrane sous l'action d'une puissance appliquée, nous avons utilisé un profilomètre optique utilisé au laboratoire pour la caractérisation de MEMS (microscope Focale de chez Nanotech). Cet appareil permet de mesurer par microscopie optique une image tri-dimensionnelle d'un micro-dispositif alimenté sous pointes. Le principe de cette mesure est basé sur l'interférométrie de Michelson. Cette technique optique est non destructive, puisqu'elle s'opère sans contact avec l'objet, est donc adaptée à l'étude d'objets de dimensions micrométriques comme les MEMS en silicium ou sur verre. La résolution verticale est de l'ordre du nanomètre et la résolution latérale est de l'ordre du micromètre.

Grâce à cet équipement, nous avons pu mesurer sous pointes la déflexion statique de la membrane en fonction de la puissance appliquée pour deux tailles de membranes (60 et 100 μm) et trois types d'ancrage de membranes (3, 4 et 8 bras)

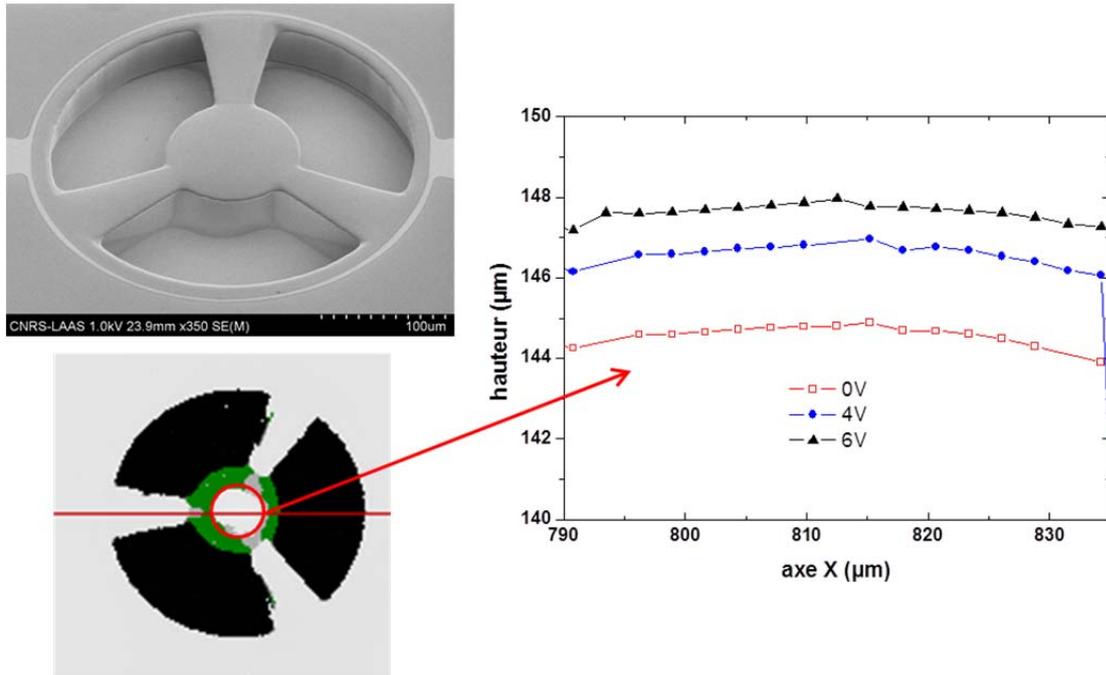


Figure 5.12 Profil mesuré au centre de la membrane pour 3 tensions appliquées

Un déplacement vertical croissant de la surface de la membrane est clairement observé lorsque la tension appliquée augmente (figure 5.12). De plus, la hauteur de la surface piédestal reste quant à elle constante, ce qui démontre que seule la partie suspendue du système est en mouvement comme prévu. En outre, une bonne planéité des membranes est observée pour l'ensemble des polarisations appliquées, ce qui prouve que la surface n'est pas déformée sous l'actionnement et que seuls les bras se déforment en s'allongeant. Des comportements similaires ont été observés pour différentes topologies.

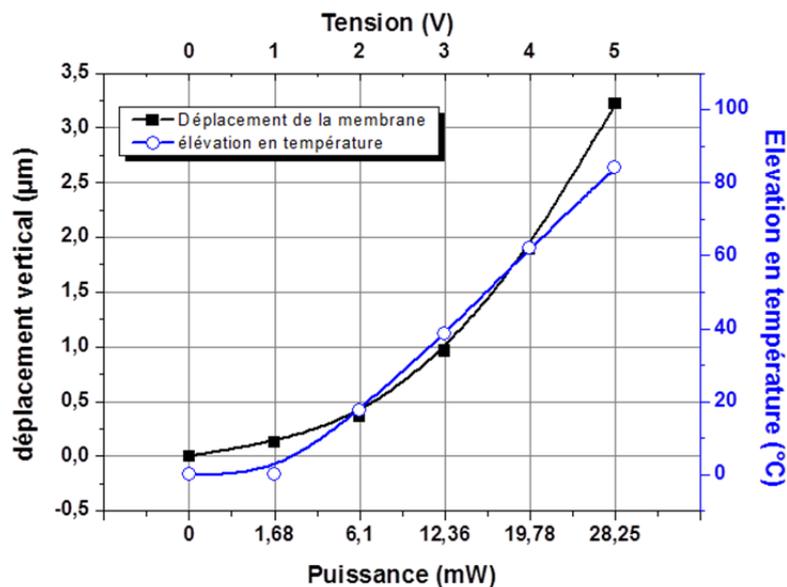


Figure 5.13 Courbes du déplacement en fonction de la puissance appliquée

L'évolution du déplacement vertical en fonction de la puissance mesurée est tracée sur la figure 5.13. Cette courbe montre que nous obtenons bien le déplacement escompté de plusieurs micromètres, soit environ $3 \mu\text{m}$ pour 28 mW de puissance de commande. En considérant la zone quasi-linéaire de déplacement comprise entre 1 et $3 \mu\text{m}$, on obtient un rendement mécano-électrique de 138 nm/mW . Pour un gradient de 100°C , on peut donc s'attendre à un débattement maximal supérieur à $4 \mu\text{m}$ [Reig, 2012 ; article en préparation]. Ceci valide donc notre dimensionnement préalable par la simulation.

Ces valeurs sont à comparer aux meilleurs résultats obtenus pour des VCSELs accordables (déplacement de $1 \mu\text{m}$ pour une accordabilité résultante de 102 nm et rendement de $\sim 20 \text{ nm/mW}$) [Gruendl, 2011]. Ainsi ce MOEMS polymère pourrait donc avantageusement être exploité pour des applications d'accordabilité.

Nous avons également tracé l'élévation en température correspondante. On note que le déplacement est plus rapide à haute température qu'à basse température. Ceci traduit la non-linéarité du coefficient de dilatation thermique de la SU-8, considéré constant dans nos simulations initiales. Pour réaliser une modélisation complète (électro-thermo-mécanique), il conviendra donc de mesurer directement et d'intégrer l'évolution non linéaire du coefficient de dilatation de la SU-8. Pour optimiser encore la modélisation du MOEMS, il faudra également intégrer dans la simulation le coefficient de variation de la résistivité de la couche de titane avec la température que nous avons mesuré, ainsi que la loi expérimentale de la variation de la conductivité thermique de la couche polymère SU-8 avec la température. Il faudrait de plus procéder à une déclaration tridimensionnelle de nos structures pour prendre en compte les ancrages au lieu d'une simple membrane à symétrie radiale.

Pour tenter d'identifier l'origine de la non linéarité du déplacement vertical de la membrane avec la puissance appliquée, nous avons établi la relation analytique liant déplacement vertical et allongement des bras à partir de l'hypothèse simplifiée illustrée sur la figure 5.14 considère la zone centrale où est déposée la lentille non déformable, et seul les bras s'allongent.

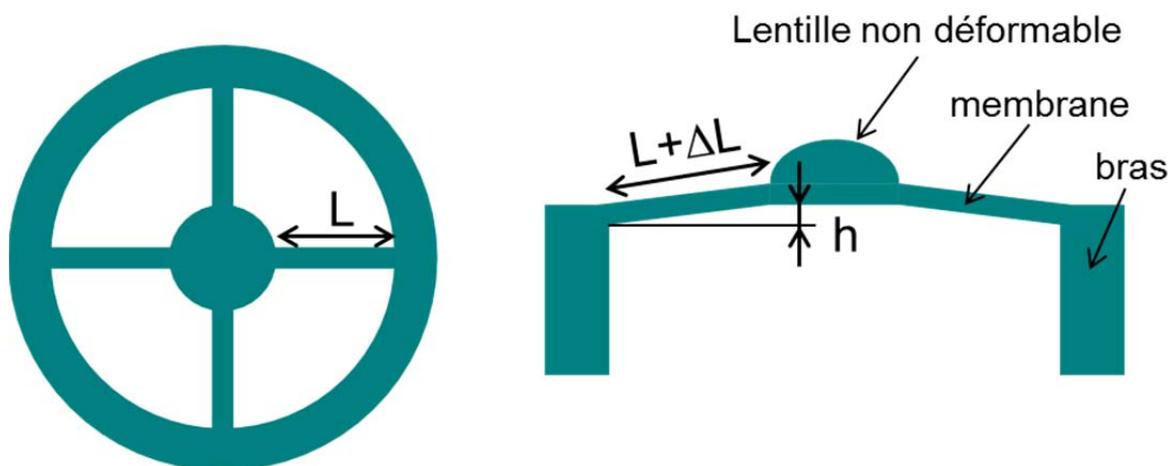


Figure 5.14 description sommaire et hypothèse lors du déplacement

L'expression 5.1 liant la dilatation des bras avec le déplacement vertical et l'évolution correspondante (équation 5.2), déduite de cette relation est reportée sur la figure 5.15 dans une

plage de dilatation allant de 0 à 50 nm, déduite du produit entre la gamme de température imposée et le coefficient de dilatation proposé par le fabricant (cf. tableau 2.2).

$$\Delta L = \delta_{SU-8} * \Delta T \quad [5.1]$$

$$h = \sqrt{(L + \Delta L)^2 - L^2} \quad [5.2]$$

Quand on observe cette évolution, qui croît rapidement puis sature rapidement, on constate qu'elle est contraire à la tendance déduite de la courbe 5.13. Nous pensons que cela traduit la non-linéarité de la dilatation du polymère avec la température et que la constante donnée par le fabricant correspond à la seule température ambiante.

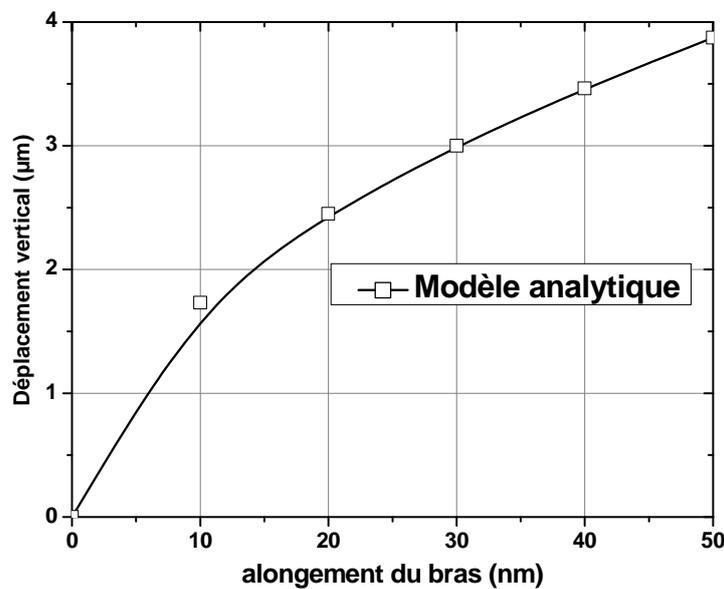


Figure 5.15 : Evolution du déplacement vertical avec l'allongement des bras

Concernant la vitesse d'actionnement, même si les mesures des propriétés transitoires sont encore en cours, nous mesurons des temps de montée d'environ 0.1 seconde et des temps de descente de l'ordre de la seconde. Ce phénomène est normal dans un actionneur thermique isolé thermiquement comme dans notre cas. Ce paramètre n'est pas nécessairement critique pour les applications visées et pourra être amélioré prochainement. De plus, un transitoire « long » permet de limiter les phénomènes d'instabilité.

3.3 Caractérisation optique du MOEMS en fonctionnement

Nous avons mesuré la focale des microlentilles déposées sur membrane (sur substrat de verre) en utilisant la méthode déjà utilisée lors de notre étude sur les lentilles passives (cf. 2.2.3 du chapitre IV) [Sayah, 2002]. On obtient des distances focales plus élevées que précédemment, car la surface des membranes a subi un traitement « polymérophobe », ce qui a conduit à une légère augmentation de l'angle de contact (~44° contre 38° sur une surface plane non traitée). Nous avons ainsi obtenu des focales comprises entre 70 et 120 µm pour des diamètres compris entre 60 et 100 µm.

Par ailleurs, nous avons récemment amélioré notre banc vertical sous pointes en l'équipant d'un déplacement piézoélectrique pour l'objectif, afin de pouvoir réaliser des mesures similaires sous pointes. Ainsi, en alimentant sous pointes le MOEMS, nous avons pu réaliser les premières mesures de la variation du plan de focalisation de la microlentille avec la tension appliquée sur le MOEMS (figure 5.16).

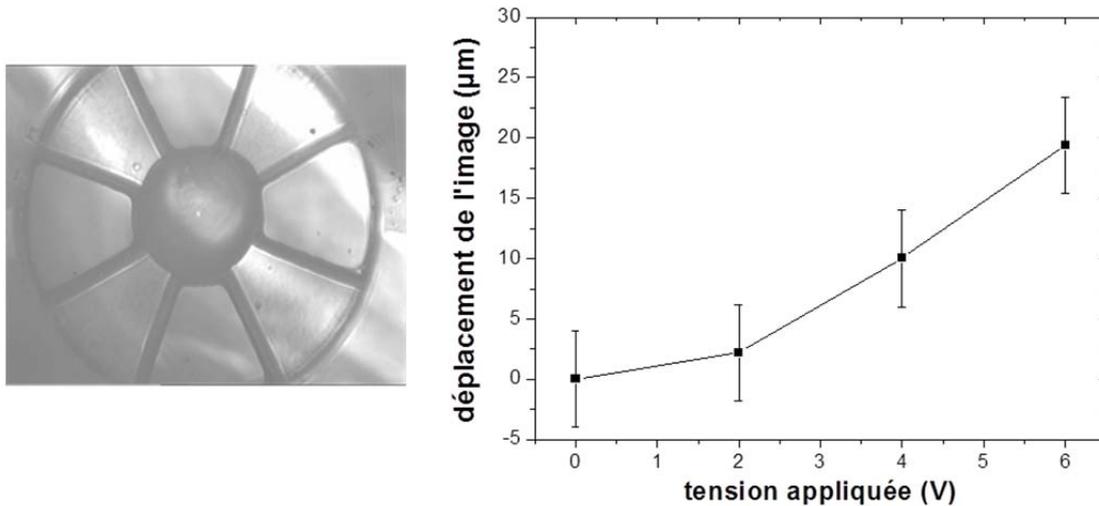


Figure 5.16: Mesure de la position d'une image vue à travers une microlentille de 100 µm de diamètre en fonction de la tension appliquée sur le MOEMS

On obtient une augmentation cohérente avec une élévation verticale de la membrane avec une allure similaire à celle du déplacement mécanique mesuré. Des mesures complémentaires sont en cours sur ces lentilles pour confronter ces résultats prometteurs avec les modélisations optiques. D'ores et déjà, ceci constitue la première démonstration du fonctionnement de notre microlentille active en polymère dans un objectif de contrôle de la position du waist.

4. Conclusions

Dans ce cinquième chapitre reportant les caractérisations et résultats expérimentaux, nous avons commencé par présenter les performances de nos VCSEL avec et sans micro-optique intégrée. Il en ressort clairement que la bonne transparence des polymères employés n'affecte pas le seuil et la puissance maximale émise. La mesure de la divergence minimisée (collimation visée) à 1.2° contre 12° sans lentille passive, vient valider notre simulation optique sous ZEMAX et renforcer la pertinence des prévisions pour les lentilles actives.

Nous avons ensuite caractérisé les micro-pointes auto-inscrites à la surface du VCSEL par son propre faisceau laser. Une distance focale d'environ 1 µm et une taille de waist réduite à 0,25 µm ont été mesurées sur ces dispositifs. Au début du projet NIR Optics, la résine était photosensible à des longueurs d'ondes inférieures à 800 nm. A présent nous disposons d'une autre formulation avec un nouveau photo-amorceur, et venons de réaliser les premières micro-pointes sur nos VCSEL émettant à 850 nm.

Puis nous avons abordé l'aspect MOEMS à proprement parler en commençant par la caractérisation de la dérive thermique de la résistivité du titane (métal retenu pour réaliser nos éléments chauffants). Le coefficient thermique de résistivité α présente une valeur expérimentale de $7.7.10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. A cela, la mesure de la variation de la résistance avec la puissance, nous a permis de remonter à la valeur expérimentale de la résistance thermique qui dans notre cas est d'environ $2.7^{\circ}\text{C}/\text{mW}$.

La caractérisation du déplacement mécanique de la membrane à l'aide du microscope Fogale nous a permis d'établir qu'une puissance de 32 mW (pour 5 V) permet d'atteindre un déplacement de 3 μm . De plus, des premières mesures effectuées en fonction de la tension appliquée sur la membrane nous ont permis de démontrer une modification significative de la position du waist (déplacement de 20 μm pour 6 V appliquées), ce qui démontre la pertinence de notre approche. Il conviendra par la suite de confronter ces premiers résultats à la modélisation et d'optimiser la géométrie des dispositifs suivant l'application visée.

Conclusions et perspectives

Ce mémoire a présenté la synthèse de nos travaux sur la micro-optique passive et active sur VCSEL. Nous avons tout d'abord exposé dans le premier chapitre le contexte et les objectifs de cette thèse, en soulignant en particulier les atouts, les applications des VCSELS, ainsi que les recherches actuelles sur ces composants. Bien évidemment, l'enjeu économique du marché des liaisons optiques, notamment pour la fibre domestique (FTTH), est très présent dans de nombreux travaux internationaux et dynamise les travaux sur les sources accordables à base de MOEMS. On note également le fort développement des systèmes d'analyse « portables » où la lecture optique est difficilement contournable (télémétrie, vélocimétrie, cytométrie, ...). Dans ces domaines, le coût et les performances optiques sont les deux paramètres critiques et les solutions pour y répondre sont souvent antagonistes : améliorer les performances d'un VCSEL accroît souvent sa complexité de fabrication et son coût de production. Pour tenter de relever ce défi, nous avons entrepris ces travaux de thèse en visant l'amélioration et le contrôle dynamique du faisceau d'un VCSEL par l'intégration en post processing d'une microlentille passive ou active. Les besoins les plus courants concernent la collimation du faisceau (instrumentation optique en espace guidé ou libre) ou sa focalisation (pincés optiques, capteurs basés sur la réinjection optique,...).

L'état de l'art sur le contrôle et la manipulation active du faisceau laser est très riche. Néanmoins les solutions proposées font souvent appel à une étape d'hybridation individuelle d'une micro-optique (technologie Silicium, SOI ou sur verre) avec un VCSEL lors du conditionnement. Cela ne va pas dans le sens d'une réalisation collective. Peu de ces solutions sont exploitables pour des réalisations matricielles car l'encombrement du microsystème associé est souvent important (plusieurs mm²), interdisant aussi les réalisations matricielles à pas réduit entre VCSELS (standard : 250 µm).

Certaines solutions sont intégrées à l'intérieur du VCSEL et imposent des modifications complexes de la fabrication du composant. D'autres approches d'intégration en surface, mettent en jeu des technologies polymères, plus simples et plus collectives. Parmi elles, la photolithographie UV d'une microstructure polymère épaisse, suivie du dépôt localisé de polymères liquides tel que le dépôt par jets d'encre, nous a semblé la plus performante notamment en termes de maîtrise du plan de la lentille et de son alignement optique. Enfin, nous avons dressé un état de l'art succinct sur les VCSELS accordables. En effet, ceux-ci dans certains cas mettent en jeu des MEMS pour obtenir un déplacement vertical d'un miroir de l'ordre de quelques centaines de nanomètres, avec la même problématique de l'alignement optique que pour la micro-optique active.

Après cet état des lieux, nous avons précisé notre objectif : il consiste à intégrer collectivement, par post-processing, des microlentilles passives et actives à base de des microstructures polymère, surmontées d'une microlentille et actionnables à terme.

Le second chapitre débute par une description succincte de la filière de matériau retenue, s'appuyant essentiellement sur la résine SU-8. On exploite ainsi la transparence de la SU-8 et la précision d'alignement obtenue par photolithographie lors de la définition des motifs. Avant de détailler les étapes successives de la conception de notre MOEMS intégré

Conclusions et perspectives

sur VCSEL, nous avons présenté un état de l'art sur les différents types d'actionnement pour la micro-optique. Nombre de travaux rapportés dans la bibliographie présentent des systèmes de taille millimétrique et nécessitent souvent d'importantes tensions de commande, allant de quelques dizaines à plusieurs centaines de volts. Nous leur avons donc préféré l'actionnement électro-thermo-mécanique, qui selon nous, conjugue une compacité suffisante, un déplacement important et de faibles tensions et puissances de commande (intérêt pour les applications portables). En couplant ce type d'actionnement, réalisé à l'aide d'une simple résistance chauffante, à une membrane suspendue en SU-8, présentant une forte dilatation thermique, on peut donc escompter un déplacement de la membrane de plusieurs micromètres. Dès lors, nous avons réalisé une première évaluation optique à l'aide de simulations sous ZEMAX. Nous avons successivement dimensionné une lentille passive pour obtenir une divergence initiale réduite (collimation) puis un système actif pour la correction de la collimation ou la focalisation dynamique. Nous avons en effet simulé la modification de la taille et la position du *waist* moyennant un déplacement du plan de la lentille dans une plage de 5 μm .

Concernant l'actionnement électro-thermo-mécanique, ne disposant pas de données fiables sur l'évolution de la conductivité thermique de la SU-8 avec la température, nous n'avons pas jugé pertinent de mener une étude électro-thermique sur nos structures. Néanmoins, cet aspect a été analysé expérimentalement et présenté dans le dernier chapitre. Nous avons préféré nous focaliser sur l'étude thermo-mécanique à l'aide du simulateur multiphysique COMSOL, qui a conduit au dimensionnement de notre MOEMS. Nous avons ainsi simulé un déplacement optimal de la membrane de 2.7 μm pour une élévation en température de 100°C. Un tel déplacement de la microlentille conduirait, d'après nos simulations optiques se basant sur une focale de microlentille de 85 μm , à un déplacement vertical de 47 μm du *waist* du faisceau laser.

Le troisième chapitre présente les propriétés de la SU-8 et aborde sa fiabilité dans la perspective à long terme d'un transfert industriel du MOEMS (projet FIAB-SU-8). Cette étude de fiabilité a consisté en une analyse des effets d'un vieillissement accéléré en atmosphère humide et chaude. Pour tenter de répondre au questionnement industriel quant à la tenue mécanique (adhérence, robustesse,...) et à la stabilité optique (évolution de la transparence, rugosité de surface,...), nous avons établi un plan de Taguchi avec pour paramètres d'entrée la température, l'humidité et la durée de vieillissement. Une analyse des tendances a été établie à partir de cette étude et montre que le vieillissement (chaud et humide) modifie l'adhérence des structures en SU-8, pouvant aller jusqu'au décollement pour les grandes tailles d'ancrage (>mm). Les *shear-tests* montrent que les arrachements se produisent à l'interface SU-8 / substrat et nous attribuons la réduction d'adhérence à une diffusion d'eau au niveau de cette interface. Cet effet est minimisé dans le cas de petites surfaces d'ancrage et nous en tiendrons donc compte à l'avenir lors de la conception de nos MOEMS. Enfin, l'adhésion est plus importante sur substrat silicium oxydé que sur verre. Or, cette configuration sur silicium est proche du cas des VCSELs (sur substrat GaAs passivé). Nous imputons cet écart d'adhérence aux transitoires thermiques différents lors des recuits thermique de la SU-8 liés à leurs propriétés thermiques respectives (conductivité thermique $K_{th}(\text{Si}) \gg K_{th}(\text{verre})$ et capacité calorifique $C_{th}(\text{Si}) \ll C_{th}(\text{verre})$).

Conclusions et perspectives

A ce vieillissement accéléré, s'est ajoutée une étude de cyclages thermiques. Un premier cyclage, balayant la gamme de 20°C à 120°C correspondant à la plage d'utilisation du MOEMS électrothermique, permet de conclure sur la non dégradation de l'adhérence après 100 cycles thermiques. En revanche, le second cyclage, réalisé dans la gamme -100°C à 125°C, correspondant à la plage de certification industrielle, induit sur les grandes structures une délamination lors des descentes vers les températures négatives. Une fois de plus, cet effet destructif n'est pas observé sur les petits ancrages (correspondant à nos réalisations).

De plus, malgré les changements constatés bien que minimes de la rugosité de surface, les propriétés optiques dans le visible et le proche infrarouge ne sont pas altérées. On peut donc conclure que le polymère SU-8 est bien adapté à la réalisation d'éléments micro-optiques sur VCSELs, même en conditions de stockage sévères.

Le quatrième chapitre aborde l'ensemble des réalisations technologiques que nous avons mises en œuvre et débute par une description des méthodes que notre équipe a développées pour la réalisation individuelle et collective de microlentilles. Pour déposer une goutte de résine, qui une fois réticulée deviendra une microlentille, nous avons adapté et utilisé un équipement robotisé muni de micro-plumes développé au laboratoire. Nous avons montré que l'on pouvait fabriquer des microlentilles polymère performantes avec cette technique originale de dépôt localisé. Augmenter le temps de contact permet d'ajuster le volume déposé et donc le diamètre de la microlentille. Pour s'affranchir de la précision insuffisante du système de positionnement des gouttes, nous avons aussi développé des approches d'auto-centrage à l'aide de piédestaux cylindriques ou encore de cuvettes inscrites à la surface d'un plot large de SU-8. Comme ces solutions ne sont pas transposables sur membranes suspendues, nous avons également proposé une technique de traitement de surface, localisé par photogravure. Concernant la réalisation collective (matrices de lentille), nous avons testé avec succès une technique de trempage associée à ce traitement de surface localisé, ainsi que le dépôt localisé de polymères par sérigraphie. Ces deux dernières techniques, pertinentes pour un transfert industriel (production de masse), souffrent encore d'un manque de maturité et méritent de nouveaux développements. Pour aller encore plus loin dans l'alignement optique, nous exploitons actuellement les propriétés de polymères photosensibles aux infra-rouges, grâce auxquels le faisceau émis par le VCSEL « sculpte » la micro-optique. Nous comptons poursuivre cette voie prometteuse, initiée dans le cadre du projet ANR NIR OPTICS.

Pour réaliser des membranes suspendues en SU-8, nous avons successivement testé la lamination, l'insertion d'une couche sacrificielle et enfin la double insolation. C'est cette dernière technique que nous avons retenue pour réaliser une lentille active, même si la verticalité des flancs de la SU-8 rend difficile l'extraction des amenées de courant en bas du piédestal. Elle présente de nombreux avantages : grand gap d'air possible, une seule enduction de résine (structure « monolithique »), membranes peu contraintes et absence de défauts de planéité. Nous avons obtenu des formes de membranes suspendues variées compatibles avec la compacité nécessaire et avec un gap d'air qui peut être compris dans une gamme de 5 à 150 μm .

Concernant la réalisation de l'électrode chauffante, nous avons choisi le titane pour répondre aux critères de résistivité, faible contrainte, sélectivité d'attaque et adhérence sur la

Conclusions et perspectives

SU-8. La mesure de la température (auto-échauffement de la résistance) sera déduite de la variation de la résistance. Nous avons aussi développé un dépôt électrolytique de cuivre localisé (15 μm) et assuré avec succès la continuité des amenées de courant lors du franchissement de la marche de SU-8 de 100 μm . Par ailleurs, pour localiser la microlentille au centre de la membrane, nous avons procédé à un traitement localisé de surface et ainsi évité l'étalement lors du dépôt de la goutte de résine par micro-plume.

Enfin, la réalisation complète du MOEMS sur VCSEL est en cours et nous permettra prochainement de valider la faisabilité technologique de notre approche polymère. D'ores et déjà, nous pouvons dire que l'ensemble des briques technologiques sont à présent développées et maîtrisées pour parvenir à la réalisation de notre MOEMS intégré sur VCSELS.

Le cinquième et dernier chapitre présente l'ensemble des caractérisations et résultats expérimentaux obtenus à ce jour. Il débute par une comparaison des performances des VCSEL monomodes à 850 nm avec et sans microlentille de collimation. Nous pouvons en conclure que l'ajout de la lentille affecte peu le seuil et la puissance maximale émise. De plus, la mesure de la divergence montre une réduction de cette dernière à 1.2° (contre 12° sans lentille), vient valider nos simulations optiques sous ZEMAX et conforte nos prévisions pour les microlentilles actives.

Nous avons ensuite caractérisé les micro-pointes auto-inscrites à la surface du VCSEL par son propre faisceau laser. On obtient ainsi une distance focale de l'ordre de 1 μm et une taille de *waist* extrêmement réduite (~250 nm). Initialement formulée pour une longueur d'onde d'insolation de 760 nm, la dernière formulation de la résine développée par nos collègues photo-chimistes de l'IS2M, fonctionne maintenant à 850 nm, et nous venons d'ailleurs de réaliser les premières micro-pointes sur VCSELS dans cette gamme spectrale.

La caractérisation du MOEMS a débuté par la mesure du coefficient de dérive thermique de la résistivité du titane et la valeur expérimentale est de $\alpha=7.7.10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. La mesure de la variation de la résistance avec la puissance permet de remonter à la valeur expérimentale de la résistance thermique qui dans notre cas est d'environ 2.7°C/mW. Comme annoncé dans le chapitre II, la conductivité thermique de la SU-8 est non linéaire et se traduit par une réduction de 30% de la résistance thermique à 120°C. La caractérisation sous pointes du déplacement mécanique de la membrane, par profilométrie optique, nous a donné un déplacement de 3 μm avec une puissance de 27 mW (pour 5 V appliqués), ce qui est conforme à nos attentes. Ces résultats sont à comparer à ceux obtenus récemment dans les MEMS-VCSELS accordables en longueur d'onde, à savoir un déplacement maximal de 1 μm du miroir diélectrique pour 70mW dissipés pour une accordabilité finale de 102nm [Gierl, 2011]. Ceci confirme donc l'intérêt du choix de la SU-8 pour réaliser un MEMS à actionnement électrothermique avec des températures d'actionnement réduites, ainsi que les potentialités de notre approche pour réaliser ce type de VCSEL accordable.

Enfin, une première mesure du fonctionnement optique en dynamique nous a permis de démontrer un déplacement significatif de l'image sous actionnement. Ces résultats préliminaires attestent le potentiel de ce nouveau type de microsysteme optique. Des mesures complémentaires sont en cours pour évaluer la puissance réellement appliquée lors de ces

Conclusions et perspectives

mesures et pour pouvoir les confronter à la simulation, ce qui nous permettra d'optimiser la géométrie de ces MOEMS.

Pour poursuivre ces travaux, nous alimenterons également nos simulations avec les résultats expérimentaux obtenus. En effet, à l'intégration de la variation de la conductivité thermique avec la température, il conviendra d'ajouter celle de la capacité calorifique de la couche de SU-8 pour mieux appréhender le couplage électro-thermique et notamment dans le domaine transitoire. Nous pourrons ainsi optimiser le débattement des structures (déplacement vertical), mais aussi modifier la géométrie retenue pour réduire à quelques ms le temps de réponse (enjeu important pour les VCSEL accordables). Pour boucler notre simulation électro-thermo-mécanique, nous devons également prendre en compte la variation de la dilatation thermique, elle aussi non linéaire. La conception optique du système sera également optimisée en tenant compte des résultats de déplacement du plan de focalisation effectivement obtenu avec le MOEMS complet.

Du point de vue des développements technologiques, il nous reste encore à valider l'enchaînement complet des étapes par la fabrication complète d'un VCSEL à lentille active, avec l'ensemble des briques désormais bien établies. A terme, l'exploitation des techniques d'auto-assemblage que nous avons commencées à défricher, traitement localisé ou photopolymérisation infra-rouge, sera déterminante pour la réalisation collective à l'échelle du wafer.

Une fois la faisabilité de notre approche démontrée expérimentalement, nous comptons exploiter les potentialités de ces systèmes pour l'instrumentation et l'analyse biologique dans le cadre de plusieurs partenariats nationaux et internationaux. De plus, une collaboration récente avec le groupe OSE nous a permis d'entrevoir les potentialités de ce type de VCSELs pour la conception de capteurs basés sur la réinjection optique (télémétrie et vélocimétrie embarquées). Nous pensons en effet que la micro-optique active intégrée peut amener une valeur ajoutée significative pour ce type d'application.

Ces travaux nous permettront également à plus long terme de développer avec des technologies bas coût et plus simples que les filières à base de semi-conducteurs des nouvelles géométries de « MEMS-VCSELs » pouvant à terme inclure des zones à cristaux photoniques ou à réseau sub-longueur d'onde, constituer des VCSELs accordables en cavité étendue (détection de gaz) dans la filière GaAs bien sûr, mais ceci sera transposable aussi sur d'autres types de substrats (InP, GaSb, GaN...) Cela s'inscrira dans un partenariat avec d'autres laboratoires nationaux et/ou internationaux.

Enfin, la structure générique de nos MOEMS permet d'envisager la réalisation de circuits microfluidiques polymères au-dessus des VCSELs pour l'analyse de liquides biologiques. On peut donc entrevoir de nombreuses applications en liens avec les microsystèmes d'analyse (μ TAS) à lecture optique et la réalisation matricielle de pinces optiques à distance de travail ajustable pour la manipulation et le tri de cellules biologiques.... Nous pourrons nous appuyer sur l'expertise du laboratoire dans la conception et la réalisation de circuits microfluidiques à multi-niveaux et sur les nano-biosystèmes. Ces travaux pourront s'inscrire notamment dans des projets à venir avec le pôle de compétitivité Cancer Bio Santé et le tout nouveau Pôle Eau de la région toulousaine.

Conclusions et perspectives

Références Bibliographiques

- [Abgrall, 2006] Patrick Abgrall, Christine Lattes, Véronique Conédéra, Xavier Dollat, Stéphane Colin and Anne Marie Gué, “A novel fabrication method of flexible and monolithic 3D microfluidic structures using lamination of SU-8 films”, *J. Micromech. Microeng.* 16 113, (2006)
- [Ali, 2008] S.M. Ali, S.C. Mantell, and E.K. Longmire, “Performance and Reliability of MEMS Coatings in Liquids”, *Conference IEEE SENSORS*, (2008)
- [Almuneau, 2008] G. Almuneau, R. Bossuyt, P. Collière, L. Bouscayrol, M. Condé, I. Suarez, V. Bardinal and C. Fontaine, "Real-time *in situ* monitoring of wet thermal oxidation for precise confinement in VCSELs”, *Semicond. Sci. Technol.* 23 105021, (2008)
- [Averseng, 2002] L. Averseng, “Conception et caractérisation de dispositifs à cavité verticale III-V pour la photodétection et l’émission-détection duale“ thèse, (2002)
- [Bachelot, 2001] R. Bachelot, C. Ecoffet, D. Deloëil, P. Royer, and D. Lougnot, "Integration of Micrometer-Sized Polymer Elements at the End of Optical Fibers by Free-Radical Photopolymerization," *Appl. Opt.* 40, 5860-5871 (2001).
- [Barat, 2011] D. Barat, B. Reig, T.Camps, E.Daran, JB. Doucet and V. Bardinal “NIR Photopolymers for VCSELs beam shaping”, *VCSEL Day 2011, LAAS, Toulouse (France), (12-13 mai 2011)*
- [Bardinal, 2002] V.Bardinal, L.Averseng, C.Bringer, J. Polesel-Maris, T.Camps, P.Dubreuil, C.Fontaine, E.Bedel-Pereira, C. Vergnenègre, A.Muñoz-Yagüe, “Experimental demonstration of photodetection oxide modes presence in a dual-purpose single-cavity oxide-apertured VCSEL“, *Applied Physics Letters*, Vol.81, N°10, pp.1771-1772, (Septembre 2002)
- [Bardinal, 2007] V. Bardinal, E. Daran, T. Leïchlé, C. Vergnenègre, C. Levallois, T. Camps, V. Conedera, J. B. Doucet, F. Carcenac, H. Ottevaere, and H. Thienpont, “Fabrication and characterization of microlens arrays using a cantilever-based spotter”, *Optics Express*, Vol. 15, Issue 11, pp. 6900-6907 (2007)
- [Bardinal, 2008] V. Bardinal, T. Camps, C. Levallois, T. Leïchlé, B. Reig, J.B. Doucet , C. Vergnenègre and E. Daran, “Self-centered polymer microlenses deposited on SU-8 patterned surfaces by means of a cantilever-based spotter”, *EOS meeting*, (2008)
- [Bardinal, 2010 A] V.Bardinal, B.Reig, T.Camps, C.Levallois, E.Daran, C. Vergnenègre, T. Leïchlé, G. Almuneau, and J.-B. Doucet “Spotted Custom Lenses to Tailor the Divergence of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers”, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol.22, N°21, pp.1592-1594, (Nov. 2010)
- [Bardinal, 2010 B] V. Bardinal, B. Reig, T. Camps, E. Daran, J. B. Doucet, C. Turck, J. P. Malval, D. J. Lougnot, and O. Soppera, “A microtip self-written on a vertical-cavity surface-emitting laser by photopolymerization”, *Applied Physics Letters* 96, 051114, (2010)
- [Bardinal, 2011] V. Bardinal, T. Camps, B. Reig, D. Barat, E. Daran and J.B. Doucet, “Collective micro-optics technologies for VCSEL photonic integration”, *Revue in Advances in Optical Technologies*, (2011)

Références Bibliographiques

- [Bargiel, 2006] S. Bargiel, D. Heinis, C. Gorecki, A. Górecka-Drzazga, J.A. Dziuban and M. Józwik, "A micromachined silicon-based probe for a scanning near-field optical microscope on-chip", *Meas. Sci. Technol.* 17 32, (2006)
- [Bargiel, 2010] S. Bargiel, C. Gorecki, T. Verdot, K. Laszczyk, J. Albero, L. El Fissic, "Electrostatically driven optical Z-axis scanner with thermally bonded glass microlens" *Proc. Eurosensors XXIV*, Linz, Austria, (September 5-8, 2010)
- [Bernstein, 1997] J.J. Bernstein, S.L. Finberg, K. Houston, L.C. Niles, H.D. Chen, L.E. Cross, K.K. Li, K. Udayakumar, "Micromachined high frequency ferroelectric sonar transducers," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, vol.44, no.5, pp.960-969, (Sep 1997)
- [Bertsch, 1999] A. Bertsch, H. Lorenz, P. Renaud, "3D microfabrication by combining microstereolithography and thick resist UV lithography" *Sensors and Actuators* 73, pp. 14–23, (1999)
- [Binnig, 1986] G. Binnig, C. F. Quate, Ch. Gerber, "Atomic Force Microscope" *Phys. Rev. Lett.* 56, 930–933 (1986)
- [Birkbeck, 2003] A.L. Birkbeck, R.A. Flynn, M. Ozkan, D. Song, M. Gross and S.C. Esener, "VCSEL Arrays as Micromanipulators in Chip-Based Biosystems", *Biomedical Microdevices Volume 5*, Number 1, 47-54, (2003)
- [Bond, 007] T.C. Bond, C.G. Cole, L.L. Goddard, E.M. Behymer, "Photonic MEMS for NIR in-situ Gas Detection and Identification," *Sensors*, 2007 IEEE , vol., no., pp.1368-1371, (28-31 Oct. 2007)
- [Bosman, 2010] E. Bosman, G. Van Steenberge, I. Milenkov, K. Panajotov, H. Thienpont, J. Bauwelinck, P. Van Daele, "Fully Flexible Optoelectronic Foil", *IEEE journal of Quantum Electronics*, vol.16, no.5, (sept./oct. 2010)
- [Bourrier, 2011] D. Bourrier, M. Dilhan, A. Ghannam, and H. Granier, "Comparisons of the new thick negative resist to Su8 resist", *Proc. SPIE 7972*, 79722F, (2011)
- [Bringer, 2005] C. Bringer "Technologie et caractérisation des VCSELs à diaphragme d'oxyde, application à la détection en cavité verticale" thèse, (2005)
- [Carlier, 2004] J. Carlier, S. Arscott, V Thomy, J.C. Fourier, F. Caron, J.C. Camart, C. Druon and P. Tabourier, "Integrated microfluidics based on multi-layered SU-8 for mass spectrometry analysis", *J. Micromech. Microeng.* 14 619, (2004)
- [Castany, 2010] O. Castany and L. Dupont : "Liquid crystal micro-cells: collective fabrication of individual micro-cells", *J. Micromech. Microeng.* 20 065019 (2010)
- [Castany, 2011] O. Castany, L. Dupont, A. Shuaib, J.P. Gauthier, C. Levallois, C. Paranthoen, "Tunable semiconductor vertical-cavity surface-emitting laser with an intracavity liquid crystal layer", *Applied Physics Letters*, Vo. 98, 161105 - 161105-3, (21 avril 2011)
- [Chang, 2006 A] K. S. Chang , Y. M. Song and Y. T. Lee "Microlens fabrication by selective oxidation of composition-graded digital alloy AlGaAs", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 18, p.121 , 2006
- [Chang, 2006 B] K. S. Chang, Y. M. Song and Y. T. Lee, "Self-Aligned Microlens-Integrated Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol.18, no.21, pp.2203-2205, (1 Nov. 2006)

Références Bibliographiques

- [Chang-Hasnain, 2000] C.J. Chang-Hasnain, "Tunable VCSEL", IEEE journal on selected topics in Quantum electronics, vol.6, no.6, (nov./dec. 2000)
- [Chao, 2011] T.-Y. Chao, M.C. Hsu, C.-D. Lin and Y.T. Cheng, "SU-8 serial MEMS switch for flexible RF Applications", J. Micromech. Microeng. 21 025010, (2011)
- [Chen, 1999] H.L. Chen; D. Francis, T.Nguyen, Yuem Wupen, Li Gabriel, C. Chang-Hasnain, "Collimating diode laser beams from a large-area VCSEL-array using microlens array" IEEE Photonics Technology Letters, vol. 11, issue 5, pp. 506-508, 1999
- [Cheng, 2001] H.M. Cheng, M. T. S. Ewe, G. T.C. Chiu and R. Bashir, "Modeling and control of piezoelectric cantilever beam micro-mirror and micro-laser arrays to reduce image banding in electrophotographic processes", J. Micromech. Microeng. 11, 487-498, (2001)
- [Choquette, 1994] K.D. Choquette, R.E. Leibenguth, "Control of vertical-cavity laser polarization with anisotropic transverse cavity geometries", *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol.6, no.1, pp.40-42, (Jan 1994)
- [Chuang, 2003] Y.-J. Chuang, F.-G. Tseng, J.-H. Cheng, W.-K. Lin, "A novel fabrication method of embedded micro-channels by using SU-8 thick-film photoresists", Sensors and Actuators A 103, 64.69, (2003)
- [Chung, 2010] I.-S. Chung, P. Debernardi, Y. T. Lee, and J. Mørk, "Transverse-mode-selectable microlens vertical cavity surface-emitting laser", *Optics Express*, Vol. 18, n°5, 4138-4147, (2010)
- [Coldren, 1995] L.A. Coldren and S.W. Corzime, "Diodes Lasers and Photonic Integrated Circuits", Wiley, New York, (1995)
- [Comsol] <http://www.comsol.com>
- [Cox, 2000] W. Royall Cox, Chi Guan, Donald J. Hayes, and David B. Wallace "Microjet Printing of Micro-Optical Interconnects" The International Journal of Microcircuits and Electronic Packaging, Volume 23, Number3, Third Quarter (2000)
- [Croutxé-Barghorn, 2000] C. Croutxé-Barghorn, O. Soppera, D.J. Lounnot, "Fabrication of microlenses by direct photo-induced crosslinking polymerization", *Applied Surface Science*, Volume 168, Issues 1-4, Pages 89-91, (15 December 2000)
- [Debernardi, 2011 A] P.Debernardi, B.Reig, V. Bardinal, T.Camps, E.Daran, J.B. Doucet, D.Barat, "Collimating VCSEL light by integrated microlenses: comparison of experiment and modeling" VCSEL Day 2011, LAAS, Toulouse,(12-13 mai 2011)
- [Debernardi, 2011 B] P.Debernardi, W. Schwarz, and R. Michalzik, "Optical modes of an optofluidic microparticle VCSEL sensor", Conference ESLW, Lausanne Switzerland, (2011)
- [Fan, 1997] L. Fan, M. C. Wu, H. C. Lee, and P. Grodzinski "Dynamic Beam Switching of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers with Integrated Optical Beam Routers" IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 9, No. 4, (April 1997)

Références Bibliographiques

- [Fan, 2006] L. Fan, M. Fallahi, J.T. Murray, R. Bedford, Y. Kaneda, A.R. Zakharian, J. Hader, J. V. Moloney, W. Stolz, and S. W. Koch, "Tunable high-power high-brightness linearly polarized vertical-external-cavity surface-emitting lasers", *Appl. Phys. Lett.* 88, 021105 (2006)
- [Fattal, 2010] D. Fattal, J. Li, Z. Peng, M. Fiorentino, and R.G. Beausoleil, "Flat dielectric grating reflectors with focusing abilities", *Nature Photonics* 4, 466 - 470 (2010)
- [Feng, 2003] R. Feng and R.J. Farris, "Influence of processing conditions on the thermal and mechanical properties of SU8 negative photoresist coatings", *J. Micromech. Microeng.* 13 80–88, (2003)
- [Filhol, 2005] F. Filhol, E. Defay, C. Divoux, C. Zinck, M.-T. Delaye, "Resonant micro-mirror excited by a thin-film piezoelectric actuator for fast optical beam scanning", *Sensors and Actuators A* 123–124, 483–489, (2005)
- [Foulds, 2008] I.G. Foulds, R.W. Johnstone and M. Parameswaran, "Polydimethylglutarimide (PMGI) as a sacrificial material for SU-8 surface-micromachining", *J. Micromech. Microeng.* 18 075011, (2008)
- [Fu, 2001] Y. Fu, "Integration of microdiffractive lens with continuous relief with vertical-cavity surface-emitting lasers using focused ion beam direct milling", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 13, Issue 5, pp 424-426, (2001)
- [Fu, 2002] Y. Fu and N.K. Bryan, "Semiconductor Microlenses Fabricated by One-Step Focused Ion Beam Direct Writing", *IEEE Transactions on semiconductor manufacturing*, Vol. 15, No. 2, (May 2002)
- [Gale, 1994] M. T. Gale, M. Rossi, J. Pedersen, H. Schuetz, "Fabrication of continuous-relief micro-optical elements by direct laser writing in photoresists", *Opt. Eng.* 33 (11), pp. 3556-3566, (1994)
- [Gale, 2005] M. T. Gale, C. Gimkiewicz, S. Obi, M. Schnieper, J. Söchtig, H. Thiele, S. Westenhöfer, "Replication technology for optical microsystems", *Optics and Lasers in Engineering*, Volume 43, Issues 3-5, Pages 373-386, (March-May 2005)
- [Gelorme, 1989] J.D.Gelorme, R.J.Cox and S.A.Gutierrez, "Photoresist composition and printed circuit boards and packages made therewith", U.S.PAvent 4882245,(1989)
- [Gierl, 2011] C. Gierl, T. Gruendl, P. Debernardi, K. Zogal, C. Grasse, H. Davani, G. Böhm, S. Jatta, F. Küppers, P. Meißner, and M. Amann, "Surface micromachined tunable 1.55 μm -VCSEL with 102 nm continuous single-mode tuning", *Opt. Express* 19, 17336-17343 (2011).
- [Gorecki, 2007] C.Gorecki, L. Nieradko, Bargiel S., J. Dziuban, D.Henis, J.A.Sylvestre, K.Alkowska, G.Soto-Romero, J.Thevenet, R.,Yahiaoui, "On-Chip Scanning Confocal Microscope with 3D MEMS Scanner and VCSEL Feedback Detection," *Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference, 2007. TRANSDUCERS 2007 International*, pp.2561-2564, (10-14 June 2007)
- [Goto, 2002] K. Goto, Y.-J. Kim, S. Mitsugi, K. Suzuki, K. Kurihara, T. Horibe, "Microoptical Two-Dimensional Devices for the Optical Memory Head of an Ultrahigh Data Transfer Rate and Density Sytem Using a Vertical Cavity Surface Emitting Laser (VCSEL) Array" *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. 41 4835–4840 (2002)

Références Bibliographiques

- [Gourley, 2000] P.L. Gourley and M.F. Gourley, "Biocavity lasers for biomedicine", Trends in biotechnology 18 (11), pp. 443-448, (2000)
- [Guo, 2006] R. Guo, S. Xiao, X. Zhai, J. Li, A. Xia, and W. Huang, "Micro lens fabrication by means of femtosecond two photon photopolymerization", Optics Express, Vol. 14, Issue 2, pp. 810-816, (2006)
- [Hah, 2004] D. Hah, S.T.-Y Huang, J.-C. Tsai; H. Toshiyoshi, M.C. Wu, "Low-voltage, large-scan angle MEMS analog micromirror arrays with hidden vertical comb-drive actuators," Journal of Microelectromechanical Systems, vol.13, no.2, pp. 279- 289, (April 2004)
- [Hastie, 2006] J.E. Hastie, L.G. Morton, A.J. Kemp, M.D. Dawson, A.B. Krysa, and J.S. Roberts "Tunable ultraviolet output from an intracavity frequency-doubled red vertical-external-cavity surface-emitting laser", Appl. Phys. Lett. **89**, 061114 (2006)
- [Havard, 2008] E. Havard, "Contribution à l'étude de l'injection électrique dans les VCSELs de grandes dimensions" thèse UPS, (2008)
- [Hedsten, 2006] K. Hedsten, D. Karlén, J. Bengtsson, P. Enoksson, "Refractive lenses in silicon micromachining by reflow of amorphous fluorocarbon polymer", Journal of Micromechanics and Microengineering, vol.16, no. 6, (2006)
- [Hedsten, 2008] K. Hedsten, J. Melin, J. Bengtsson, P. Modh, D. Karlén, B. Löfving, R. Nilsson, H. Rödjegard, K. Persson, P. Enoksson, F. Nikolajeff, and G. Andersson, "MEMS-based VCSEL beam steering using replicated polymer diffractive lens" Sensors and Actuators A 142, 336–345, (2008)
- [Heinis, 2003] D. Heinis, C. Gorecki, C. Bringer, V. Bardinal, T. Camps, J.-B. Doucet, P. Dubreuil and C. Fontaine "Miniaturized Scanning Near-Field Microscope Sensor Based on Optical Feedback inside a Single-Mode Oxide-Confined Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser" Jpn. J. Appl. Phys. Vol 42 (2003) pp. L1469-L1471, Part2, N°12A, (2003)
- [Heisig, 2000] S. Heisig, O. Rudow, E. Oesterschulze, "Scanning near-field optical microscopy in the near-infrared region using light emitting cantilever probes", Appl. Phys. Lett. 77, pp. 1071, (2000)
- [Hill, 2007] G.C. Hill, R. Melamud, F.E. Declercq, A.A. Davenport, I.H. Chan, P.G. Hartwell, B.L. Pruitt, "SU-8 MEMS Fabry-Perot pressure sensor", Sensors and Actuators A 138, pp. 52–62, (2007)
- [Hong, 2006] E. Hong, S. Trolier-McKinstry, R.L. Smith, S.V. Krishnaswamy, and C.B. Freidhoff, "Design of MEMS PZT Circular Diaphragm Actuators to Generate Large Deflections" Journal of electromechanical systems, vol. 15, no. 4, (august 2006)
- [Hsieh, 2005] J. Hsieh, C.-J. Weng, H.-L. Yin, H.-H. Lin, H.-Y. Chou, "Realization and characterization of SU-8 micro cylindrical lenses for in-plane micro optical systems", Microsystem Technologies 11, 429–437, (2005)
- [Huang, 2008] M. C. Y. Huang, Y. Zhou, and C. J. Chang-Hasnain, "Single mode high-contrast subwavelength grating vertical cavity surface emitting lasers" Appl. Phys. Lett. 92, 171108 (2008)

Références Bibliographiques

- [Huffaker, 1994] D. L. Huffaker, D. G. Deppe, K. Kumar, T. J. Rogers, "Native-oxide defined ring contact for low threshold vertical-cavity lasers", *Applied Physics Letters*, vol.65, no.1, pp.97-99, (Jul 1994)
- [Iga, 1984] Iga, K.; Ishikawa, S.; Ohkouchi, S.; Nishimura, T.; , "Room-temperature pulsed oscillation of GaAlAs/GaAs surface emitting injection laser", *Applied Physics Letters* , vol.45, no.4, pp.348-350, (Aug 1984)
- [Iga, 2008] K. Iga, "Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser: Its Conception and Evolution", *Japanese Journal of Applied Physics* Vol. 47, No. 1, pp. 1–10, (2008)
- [Ishii, 2000] Y. Ishii, S. Koike, Y. Arai and Y. Ando, "Hybrid integration of polymer microlens with VCSEL using drop-on-demand technique", *Proc. SPIE* 3952, 364 (2000)
- [Ishikawa, 2003] K. Ishikawa, J. Zhang, A. Tuantranont, V. M. Bright and Y.C. Lee "An integrated micro-optical system for VCSEL-to-fiber active alignment" *Sensors and actuators A* 103 109-115, (2003)
- [Jacob, 1964] M. Jacob, "Heat Tranfert Volume I.", (1964)
- [Jain, 2005] A. Jain; H. Xie, "An electrothermal microlens scanner with low-voltage large-vertical-displacement actuation," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol.17, no.9, pp.1971-1973, (Sept. 2005)
- [Jahns, 1994] J. Jahns, "Planar packaging of free-space optical interconnections," *Proceedings of the IEEE* , vol.82, no.11, pp.1623-1631, Nov 1994
- [Kasten, 2008] A.M. Kasten, J.D. Sulkin, P.O. Leisher, D.K. McElfresh, D. Vacar, K.D. Choquette, "Manufacturable Photonic Crystal Single-Mode and Fluidic Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers," *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of* , vol.14, no.4, pp.1123-1131, (July-aug. 2008)
- [Kasten, 2010] A. Kasten, J. Tice, J. Eichorst, B. Dorvel, P. Kenis, and K. Choquette, "Optofluidic Microchip with Integrated 780-nm VCSEL Arrays for Biomedical and Chemical Sensing," in *Conference on Lasers and Electro-Optics*, paper CTuY4, Optical Society of America, (2010)
- [Keller, 2008] S. Keller, G. Blagoi, M. Lillemose, D. Haefliger and A. Boisen, "Processing of thin SU-8 films", *J. Micromech. Microeng.* 18 125020, (2008)
- [Key, 2004] M.J. Key, V. Cindro, M. Lozano, "On the radiation tolerance of SU-8, a new material for gaseous microstructure radiation detector fabrication", *Radiation Physics and Chemistry*, Volume 71, Issue 5, Pages 1003-1007, (December 2004)
- [Keyworth 1997] B. Keyworth, D. Corazza, J. McMullin, and L. Mabbott, "Single-step fabrication of refractive microlens arrays," *Appl. Opt.* 36, 2198-2202 (1997).
- [Kim, 2000] G. Kim, H. Xuliang and R.T. Chen, "Crosstalk and interconnection distance considerations for board-to-board optical interconnects using 2-D VCSEL and microlens array ", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol.12, no.6, pp.743-745, (2000)
- [Kögel, 2010] B. Kögel, A. Abbaszadehbanaeiyan, P. Westbergh, A. Haglund, J. Gustavsson, J. Bengtsson, E. Haglund, H. Frederiksen, P. Debernardi, A. Larsson , "Integrated tunable VCSELs

Références Bibliographiques

with simple MEMS technology", Semiconductor Laser Conference (ISLC), 2010 22nd IEEE International , vol., no., pp.1-2, 26-30 Sept. 2010

[Kögel, 2011] B. Kögel, P. Westbergh, A. Haglund, J.S. Gustavsson, A. Larsson, "Integrated MEMS-tunable VCSELs with high modulation bandwidth," *Electronics Letters* , vol.47, no.13, pp.764-765, (June 23 2011)

[Kogelnik, 1966] H. Kogelnik, T. Li, "Laser beams and resonators," *Proceedings of the IEEE* , vol.54, no.10, pp. 1312- 1329, (Oct. 1966)

[Koyama, 1988] F. Koyama, S. Kinoshita, K. Iga , "Room Temperature CW Operation of GaAs Vertical Cavity Surface Emitting Laser", *Trans. IEICE E71 (11): 1089–1090 (1988)*

[Kroener, 1982] H. Kroemer, "Heterostructure bipolar transistors and integrated circuits" *Proceedings of the IEEE*, Vol.70, No.1 (1982)

[Krogman, 2006] F. Krogmann, W. Mönch and H. Zappe, "A MEMS-based variable micro-lens system" *Journal of Optics A: Pure Appl. Opt.* 8, S330–S336, (2006)

[Kroner, 2006] A. Kroner, I. Kardosh, F. Rinaldi and R. Michalzik, "Towards VCSEL-based integrated optical traps for biomedical applications", *Electronics Letters*, Vol. 42 No. 2, (19 Janvier 2006)

[Kroner, 2008] A. Kroner, F. Rinaldi, R. Rosch, R. Michalzik, "Optical particle manipulation by application-specific densely packed VCSEL arrays," *Electronics Letters*, vol.44, no.5, pp.353-354, (28 Feb. 2008)

[Laaroussi, 2011] Y. Laaroussi, G. Almuneau, D. Sanchez and L. Cerutti, "Efficient lateral confinement by an oxide aperture in a mid-infrared GaSb-based vertical light-emitting source", *J. Phys. D: Appl. Phys.* 44 142001, (2011)

[Laszczyk, 2010] K. Laszczyk, S. Bargiel, C. Gorecki, J. Krężel, P. Dziuban, M. Kujawińska, D. Callet, S. Frank, "A two directional electrostatic comb-drive X–Y micro-stage for MOEMS applications", *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 163, Issue 1, Pages 255-265, (September 2010)

[Lechuga, 2006] L.M. Lechuga, J. Tamayo, M. Álvarez, L.G. Carrascosa, A. Yufera, R. Roldán, E. Peralías, A. Rueda, J.A. Plaza, K. Zinoviev and C. Domínguez, A. Zaballos, M. Moreno and C. Martínez-A, D. Wenn, N. Harris, C. Bringer, V. Bardinal, T. Camps, C. Vergnenègre and C. Fontaine , V. Díaz and A. Bernad. "A Highly sensitive Microsystem Based on nanomechanical biosensors for genomics applications" *Sensors and Actuators B*, Vol.118 , N°1–2, pp.2–10, (2006)

[Lee, 2007] S.W. Lee and S.S. Lee, "Focal tunable liquid lens integrated with an electromagnetic actuator", *Applied Physics Letters* 90, 121129, (2007)

[Lee, 1995] K. Y. Lee, N. LaBianca, S.A. Rishton, S. Zolgharnain, J.D. Gelorme, J. Shaw, T.H.P. Chang, "Micromachining applications of a high resolution ultrathick photoresist," *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures* , vol.13, no.6, pp.3012-3016, (Nov 1995)

[Leclercq, 1998] J.L. Leclercq, R.P. Ribas, J.M. Karam, P. Viktorovitch, « III–V micromachined devices for microsystems », *Microelectronics Journal*, Volume 29, Issue 9, Pages 613-619, (September 1998)

Références Bibliographiques

- [Levallois, 2008] C. Levallois, V. Bardinal, T. Camps, T. Leïchlé, E. Daran, J.B. Doucet and C. Vergnenègre, "VCSEL collimation using self-aligned integrated polymer microlenses", Proc. SPIE, 6992 69920W (2008)
- [Lorentz, 1997] H. Lorenz, M. Despont, N. Fahrni, N. Labianca, P. Renaud, and P. Vettiger, "A low cost negative resist for MEMS", J. Micromechanical Microengineering 7, 121-124, (1997)
- [Lorentz, 1998] H. Lorenz, M. Despont, N. Fahrni, J. Brugger, P. Vettiger, P. Renaud, "High-aspect-ratio, ultrathick, negative-tone near-UV photoresist and its applications for MEMS", Sensors and Actuators A 64, 33-39, (1998)
- [Lyncee Tec] <http://www.lynceetec.com/>
- [Maxwell, 1865] J.C. Maxwell, "A dynamical theory of the electromagnetic field", Philosophical Transactions of the Royal Society of London 155: 459-512 (1865).
- [memscyclopedia] <http://memscyclopedia.org/su8.html>
- [microchem] http://www.microchem.com/Prod-SU8_KMPR.htm
- [Miller, 1997] R.A. Miller, Y.C. Tai, G. Xu, J. Bartha, and F. Lin, "An Electromagnetic MEMS 2 x 2 Fiber Optic Bypass Switch", 1997 International Conference on Solid State Sensors and Actuators, Chicago, vol.1, no., pp.89-92 vol.1, (16-19 Jun 1997)
- [Mitsubishi, 1997] Y. Mitsunashi, "Optical Storage: Science and Technology", Jpn. J. Appl. Phys. 37, pp.2079-2083 (1998)
- [Miyajima, 2003] H. Miyajima, N. Asaoka, T. Isokawa, M. Ogata, Y. Aoki, M. Imai, O. Fujimori, M. Katashiro, and K. Matsumoto, "A MEMS Electromagnetic Optical Scanner for a Commercial Confocal Laser Scanning Microscope" Journal of MicroElectroMechanical Systems, Vol. 12, No. 3, (June 2003)
- [Mukoyama 2008] N. Mukoyama, H. Otoma, J. Sakurai, N. Ueki, and H. Nakayama, "VCSEL array-based light exposure system for laser printing", Invited paper Proc. of SPIE, Vol. 6908 (2008)
- [Muller, 2003] J. Müller, "MEMS on silicon for integrated optic metrology and communication systems", Microsystem Technologies Volume 9, Number 5, 308-315, (2003)
- [Naessens, 2003] K. Naessens, Heidi Ottevaere, P. Van Daele, R. Baets, "Flexible fabrication of microlenses in polymer layers with excimer laser ablation", Applied Surface Science, Volumes 208-209, Pages 159-164, (15 March 2003)
- [Nakagawa, 2008] S. Nakagawa, D. Kuchta, C. Schow, R. John, L. Coldren, and Y. Chang, "1.5mW/Gbps Low Power Optical Interconnect Transmitter Exploiting High-Efficiency VCSEL and CMOS Driver," in Optical Fiber Communication Conference and Exposition and The National Fiber Optic Engineers Conference, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America), paper OThS3, (2008)
- [Nakahama, 2011] M. Nakahama, H. Sano, N. Nakata, A. Matsutani, and F. Koyama, "Giant Wavelength-Temperature Dependence of VCSEL with Thermally Actuated Cantilever Structure," in CLEO:2011 - Laser Applications to Photonic Applications, OSA Technical Digest (CD), paper CMI7, (2011)

Références Bibliographiques

- [Nallani, 2006] A.K. Nallani, Chen Ting, D.J. Hayes, C. Woo-Seong, L. Jeong-Bong, "A method for improved VCSEL packaging using MEMS and ink-jet technologies", *Journal of Lightwave Technology*, , vol.24, no.3, pp.1504-1512, (2006)
- [Noda, 2001] S. Noda, M. Yokoyama, M. Imada, A. Chutinan, and M. Mochizuki, "Polarization Mode Control of Two-Dimensional Photonic Crystal Laser by Unit Cell Structure Design", *Science*: 293 (5532), 1123-1125, (10 August 2001)
- [Nordström, 2007] M. Nordström, D. A. Zauner, M. Calleja, J. Hübner and A. Boisen, "Integrated optical readout for miniaturization of cantilever-based sensor system", *APPLIED PHYSICS LETTERS* 91, 103512, (2007)
- [Ottevaere, 2006] H Ottevaere, R Cox, H P Herzig, T Miyashita, K Naessens, M Taghizadeh, R Völkel, H J Woo and H Thienpont," Comparing glass and plastic refractive microlenses fabricated with different technologies", *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 8 S407, (2006)
- [Ozkan, 2003] M. Ozkan, M. Wang, C. Ozkan, R. Flynn, A. Birkbeck, and S. Esener, "Optical manipulation of objects and biological cells in microfluidic devices", *Biomedical Microdevices* 5:1, 61-67, (2003)
- [Park, 2006] J. Park, D.-S. Shin, " Application of epoxy-based photosensitive polymers for optical MEMS and subsequent reliability evaluation" *Materials Chemistry and Physics* 98, 309–315, (2006)
- [Perchoux 2007] J. Perchoux, T.Bosch, "Multimode VCSELs for Self-Mixing Velocity Measurements", *Sensors*, 2007 IEEE , vol., no., pp.419-422, 28-31 (2007)
- [Presnyakova, 2005] V.V. Presnyakova and T.V. Galstian, "Electrically tunable polymer stabilized liquid-crystal lens", *Journal of Applied Physics* 97, 103101 (2005)
- [Rastani, 1991] K. Rastani, M. Orenstein, E. Kapon, and A. C. Von Lehmen, "Integration of planar Fresnel microlenses with vertical-cavity surface-emitting laser arrays", *Opt. Lett.*, vol. 16, pp. 919-921, (1991)
- [Reig, 2011] B.Reig, V.Bardinal, D.Barat, T.Camps, E.Daran, and JB.Doucet, « Polymer MOEMS for active control of VCSEL beam » *CLEO Europe 2011*, Munich (Allemagne), (22-26 mai 2011)
- [Ribeiro, 2005] J.C. Ribeiro, G. Minas, P. Turmezei, R.F. Wolffenbuttel, J.H. Correia, "A SU-8 fluidic microsystem for biological fluids analysis", *Sensors and Actuators A* 123–124, 77–81, (2005)
- [Roch, 2003] I. Roch, Ph. Bidaud, D. Collard and L. Buchaillet, "Fabrication and characterization of an SU-8 gripper actuated by a shape memory alloy thin film", *J. Micromech. Microeng.* 13, 330–336, (2003)
- [Roche, 2006] A.A. Roche, M. Aufray, and J. Bouchet, "The Role of the Residual Stresses of the Epoxy-Aluminum Interphase on the Interfacial Fracture Toughness", *The Journal of Adhesion*, 82(9), pp.861-880, (2006)
- [Ruther, 1997] P Ruther, B Gerlach, J Göttert, M Ilie, J Mohr, A Müller and C Oßmann « Fabrication and characterization of microlenses realized by a modified LIGA process", *Pure Appl. Opt.* 6 643, (1997)

Références Bibliographiques

- [Sagnes, 2001] I. Sagnes, M. Strassner, S. Bouchoule, J.-L. Leclercq, P. Regreny, A. Bakouboula, F. Riemenschneider, P. Meissner, "InP-based wavelength tunable vertical cavity surface emitting laser structures", *Comptes Rendus Physique*, Volume 4, Issue 6, Pages 675-685, (July-August 2003)
- [Saito, 1996] H. Saito, K. Nishi, I. Ogura, S. Sugou, and Y. Sugimoto, "Room-temperature lasing operation of a quantum-dot vertical-cavity surface-emitting laser", *Appl. Phys. Lett.* **69**, 3140 (1996)
- [Salm, 2008] C. Salm, V.M. Blanco Carballo, J. Melai, J. Schmitz, "Reliability aspects of a radiation detector fabricated by post-processing a standard CMOS chip", *Microelectronics Reliability* **48**, 1139–1143, (2008)
- [Samakkulam, 2006] K. Samakkulam, J. Sulkin, A. Giannopoulos and K.D. Choquette, "Microfluidic photonic crystal vertical cavity emitting laser", *Electronics Letters* **42** (14), (2006)
- [Sayah, 2002] A. Sayah, V.K. Parashar, M.A.M. Gijs, "Micro-replication of optical lenses in glass using a novel sol gel technology," in *Proceedings of MEMS 2002, 15th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (Las Vegas)*, 516-519, (2002).
- [Sniegowski, 1997] J.J. Sniegowski, M.S. Rodgers, "Multi-layer enhancement to polysilicon surface-micromachining technology," *Electron Devices Meeting, 1997. IEDM '97. Technical Digest., International*, vol., no., pp.903-906, (7-10 Dec 1997)
- [Soda, 1979] H. Soda, K. Iga, C. Kitahara, Y. Suematsu, "GaInAsP/InP Surface Emitting Injection Lasers" *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.18 (1979)
- [Soppera, 2009] O. Soppera, C. Turck, and D.J. Loughnot, "Fabrication of micro-optical devices by self-guiding photopolymerization in the near IR", *OPTICS LETTERS*, Vol. 34, No. 4 / (February 15, 2009)
- [Strzelecka, 1998] E. Strzelecka, D. Louderback, B. Thibeault, G. Thompson, K. Bertilsson, and L. Coldren, "Parallel Free-Space Optical Interconnect Based on Arrays of Vertical-Cavity Lasers and Detectors with Monolithic Microlenses," *Appl. Opt.* **37**, 2811-2821, (1998)
- [Szweda 2006] Roy Szweda, "VCSEL applications diversify as technology matures", *III-Vs Review*, Volume 19, Issue 1, Pages 34-38, (February 2006)
- [Taguchi, 1995] G. Taguchi, "Quality engineering (Taguchi methods) for the development of electronic circuit technology", *IEEE Transactions on Reliability (IEEE Reliability Society)* **44** (2): 225–229, (June 1995)
- [Taton, 2009] G. Taton, "Tenue thermique en atmosphère humide des propriétés optiques et mécaniques de microstructures en résine époxyde SU-8 et polymères associés pour des applications spatiales", rapport de projet, CIRIMAT, 2009
- [Thrush, 2004] E. Thrush, O. Levi, W. Ha, G. Carey, L.J. Cook, J. Deich, S.J. Smith, W.E. Moerner, J.S., Jr. Harris, "Integrated semiconductor vertical-cavity surface-emitting lasers and PIN photodetectors for biomedical fluorescence sensing", *IEEE Journal of Quantum Electronics* **40** (5) pp. 491-498, (2004).
- [Thrush, 2005] E. Thrush, O. Levi, L. J. Cook, J. Deich, A. Kurtz, S.J. Smith, W.E. Moerner, J.S. Harris Jr., "Monolithically integrated semiconductor fluorescence sensor for microfluidic

Références Bibliographiques

applications, *Sensors and Actuators B: Chemical*, Volume 105, Issue 2, Pages 393-399, (28 March 2005)

[Titanium] <http://encyclopedia2.thefreedictionary.com/Titanium>

[Tropper, 2004] A.C. Tropper, H.D. Foreman, A. Garnache, K.G. Wilcox, S.H. Hoogland, "Vertical-external-cavity semiconductor lasers", *J. Phys. D: Appl. Phys.* **37**, R75-R85 (2004).

[Tuantranont, 2001] A. Tuantranont, V.M. Bright, J. Zhang, W. Zhang, J.A. Neff, and Y.C. Lee, "Optical beam steering using MEMS-controllable microlens array", *Sensors and Actuators A* **91**, 363-372, (2001)

[Tuomikoski, 2005] S. Tuomikoski, S. Franssila, "Free-standing SU-8 microfluidic chips by adhesive bonding and release etching", *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 120, Issue 2, Pages 408-415, (17 May 2005)

[Varioptics] <http://www.varioptic.com/en/topmenu/liquid-lens-technology.html>

[Vergnenègre, 2005] C.Vergnenegre, T. Camps, V. Bardinal, C. Bringer, C. Fontaine, A. Munoz Yague, "Integrated optical detection subsystem for functional genomic analysis biosensor", *Photonics North 2005*, Toronto (Canada), (12-14 Septembre 2005)

[Voskerician, 20003] G. Voskerician, M.S. Shive, R.S. Shawgo, H. von Recum, J.M. Anderson, M.J. Cima, R. Langer, "Biocompatibility and biofouling of MEMS drug delivery devices", *Biomaterials*, Volume 24, Issue 11, Pages 1959-1967, (May 2003)

[Wang, 2006] W. Wang and J. Fang, Design, "fabrication and testing of a micromachined integrated tunable microlens", *J. Micromech. Microeng.* **16**, 1221–1226, (2006)

[Werber, 2006] A. Werber and H. Zappe "Thermo-pneumatically actuated, membrane-based micro-mirror devices", *J. Micromech. Microeng.* **16**, 2524–2531, (2006)

[Wu, 1995] M.S. Wu, E.C. Vail, G.S. Li, W. Yuen, C.J. Chang-Hasnain, "Tunable micromachined vertical cavity surface emitting laser," *Electronics Letters* , vol.31, no.19, pp.1671-1672, (14 Sep 1995)

[Wu, 2008] L. Wu, H. Xie, "A large vertical displacement electrothermal bimorphb microactuator with very small lateral shift" *Sensors and Actuators A* **145–146**, 371–379, (2008)

[Wu, 2009] L. Wu, H. Xie, "A tunable microlens with 0.9 mm scan range and small lateral shift," *IEEE/LEOS International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics 2009*, vol., no., pp.69-70, 17-20, (Aug. 2009)

[Yang, 1992] Yang, Y.J.; Dziura, T.G.; Bardin, T.; Wang, S.C.and R.Fernandez, "Continuous wave single transverse mode vertical-cavity surface-emitting lasers fabricated by helium implantation and zinc diffusion", *Electronics Letters* , vol.28, no.3, pp.274-276, (30 Jan. 1992)

[Yang, 2004] H. Yang, C.-K. Chao, M.-K. Wei and C.-P. Lin, "High fill-factor microlens array mold insert fabrication using a thermal reflow process", *J. Micromech. Microeng.* **14** 1197, (2004)

[Ye, 2004] M.Ye, B. Wang, and S. Sato, "Liquid-crystal lens with a focal length that is variable in a wide range", *Applied Optics*, Vol. 43, No. 35, (2004)

Références Bibliographiques

- [Yoon, 2005] Y.-K. Yoon, J.-W. Park, and M.G. Allen, “Polymer-Core Conductor approaches”, RF MEMS Journal of Microelectromechanical systems, Vol. 14, no. 5, (october 2005)
- [Young, 1804] T. Young , “Experiments and calculations relative to physical optics”, Philos. Trans. R. Soc. London, 94, 1–16, (1804)
- [Zappe, 2010] H. Zappe, “Fundamentals of Micro-Optics”, Cambridge, (2010)
- [Zemax] <http://www.zemax.com>
- [Zhang, 2003] D. Zhang, C. Chang, T. Onob, M. Esashi, “A piezodriven XY-microstage for multiprobe nanorecording”, Sensors and Actuators A 108, 230–233, (2003)
- [Zhang, 2008] H. Zhang and K.K. Liu, “Optical tweezers for single cells”, Journal of the Royal Society, vol. 5 no. 24, 671-690, (July 2008)
- [Zhang, 2011] W. Zhang, Khaled Aljaseem, Hans Zappe, and Andreas Seifert “Completely integrated, thermo-pneumatically tunable microlens”, Optics Express 2347, Vol. 19, No. 3, (January 2011)

Annexe A Modèles d'Owens-Wendt et de Good

i) modèle d'Owens-Wendt :

Dans le modèle d'Owens et Wendt on considère que l'énergie de surface s'exprime sous la forme :

$$\gamma_S = \gamma_S^d + \gamma_S^{nd}$$

avec γ_S^d composante dispersive et γ_S^{nd} composante non-dispersive

L'équation reliant les composantes à l'angle de contact s'écrit alors :

$$\gamma_L (1 + \cos \theta) = 2\sqrt{\gamma_S^d} \sqrt{\gamma_L^d} + 2\sqrt{\gamma_S^p} \sqrt{\gamma_L^p}$$

Dans ce modèle on a besoin d'au moins deux liquides de références différents pour obtenir l'énergie de surface sachant que les composantes γ_L sont connus pour ces liquides et que pour un liquide apolaire, les composantes polaires sont nulles.

ii) modèle de Good

Dans le modèle de Good Van Oss l'énergie de surface s'écrit :

$$\gamma_S = \gamma_S^d + 2\sqrt{\gamma_S^+ \gamma_S^-}$$

avec γ_S^d composante dispersive (interaction dipole-dipole) et γ_S^+ et γ_S^- composantes polaires.

La relation entre les composantes de l'énergie de surface du solide, celles du liquide et l'angle de contact de la goutte s'écrit :

$$\gamma_L (1 + \cos \theta) = 2(\sqrt{\gamma_L^d \gamma_S^d} \sqrt{\gamma_S^+ \gamma_L^-} \sqrt{\gamma_S^- \gamma_L^+})$$

En déposant une goutte de 3 liquides différents dont les composantes dispersives et polaires sont connues, on peut obtenir l'énergie de surface du solide.

La méthode d'Owens-Wendt permet de n'utiliser que deux liquides au contraire de la méthode de Good, cependant, il est préférable d'utiliser 3 liquides pour obtenir une meilleure estimation de l'énergie de surface.

TITLE: Towards the monolithic integration of active polymer micro-optical elements on VCSELs

Abstract: This thesis deals with the study and the development of novel polymer MOEMS (Micro Optical Electrical Mechanical Systems) for Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers (VCSELs) passive and active beam shaping. To improve the photonic integration of these compact laser sources in optical communication and detection systems (sensors, biomedical analysis), we have designed and fabricated a polymer-based microsystem suitable for a monolithic integration on VCSELs. It includes a refractive microlens deposited onto a suspended membrane that is moved vertically to modify dynamically the microlens-source distance. MOEMS design has been optimized by means of numerical modeling of Gaussian laser beam propagation as well as of membrane thermo-mechanical actuation. Technological steps for collective fabrication on VCSELs arrays have been developed. In particular, several methods for microlens optimal alignment relatively to the laser source have been investigated. SU-8 reliability resist has been also studied. Finally, fabricated MOEMS have been characterized. A vertical displacement of $8\mu\text{m}$ has been achieved under 3V applied, in good agreement with modeling results. This corresponds to a shift of lens focal plane of $20\mu\text{m}$, thus demonstrating the interest of our approach.

Key words: optical MEMS, micro-optics, polymers, VCSEL diodes, photonic integration

AUTEUR : Benjamin REIG

TITRE : Vers l'intégration monolithique d'une micro-optique polymère active sur VCSELs

DIRECTEURS DE THESE : Véronique BARDINAL et Thierry CAMPS

LIEU ET SOUTENANCE : LAAS-CNRS, 6 décembre 2011

Résumé : Ces travaux de thèse portent sur la conception et la réalisation d'un nouveau type de MOEMS (Micro-Optical-Electrical-Mechanical System) pour le contrôle actif du faisceau laser émis par des matrices de VCSELs (Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers). Afin d'améliorer l'intégration de ces diodes lasers dans les systèmes de communication et de détection optiques (instrumentation, biomédical), nous avons en effet conçu et réalisé un microsystème à base de polymères compatible avec une intégration monolithique sur VCSELs. Il est composé d'une microlentille réfractive associée à une membrane suspendue, dont le déplacement vertical permet de modifier dynamiquement la distance microlentille-source. La géométrie du MOEMS a été optimisée à l'aide de simulations optiques pour la propagation du faisceau gaussien et thermo-mécaniques pour l'actionnement de la membrane. Nous avons développé l'ensemble des briques technologiques pour la fabrication collective de ce dispositif sur VCSELs. En particulier, plusieurs voies ont été évaluées pour assurer l'alignement optimal de la microlentille avec la source laser. L'étude du vieillissement de la résine SU-8 exploitée pour ces études a été également menée. Enfin, la caractérisation des microsystèmes réalisés a conduit à l'obtention de déplacements mécaniques de 8 μm pour 3V appliqués, correspondant à une modification de la position du plan de focalisation de la lentille de 20 μm , ce qui valide nos modélisations et démontre l'intérêt de l'approche proposée.

Mots-clés : MOEMS, micro-optique, polymères, diodes laser VCSELs, intégration photonique

DISCIPLINE : Micro et Nano Systèmes