



**HAL**  
open science

# Ingénierie des lasers à solide utilisant des nouveaux matériaux semiconducteurs

Stéphane Calvez

► **To cite this version:**

Stéphane Calvez. Ingénierie des lasers à solide utilisant des nouveaux matériaux semiconducteurs. Optique / photonique. Université Paul Sabatier de Toulouse, 2015. tel-04433214

**HAL Id: tel-04433214**

**<https://laas.hal.science/tel-04433214v1>**

Submitted on 1 Feb 2024

**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.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

## HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

Présentée devant

**l'Université Paul Sabatier de Toulouse**

par

**Stéphane CALVEZ**

**Le 8 Juin 2015**

## **Ingénierie des lasers à solide utilisant des nouveaux matériaux semiconducteurs**

**Directrice de thèse :**

Françoise Lozes-Dupuy

### **Jury**

Hervé Maillotte, Président

Alain Barthélémy, Rapporteur

Abderrahim Ramdane, Rapporteur

Eric Tournié, Rapporteur

Adnen Mlayah, Membre



# TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES.....	3
INTRODUCTION GENERALE .....	5
SUPPORT ET ORGANISATION DE L'ACTIVITE DE RECHERCHE .....	11
CHAPITRE 1 COMPOSANTS A CAVITE VERTICALE A BASE DE GAINNAS(SB)/GAAS .....	15
1.1. Contexte .....	15
1.2. Aspects matériaux.....	17
1.2.1. L'introduction du GaInNAs(Sb)/GaAs : un choix justifié .....	17
1.2.2. Le GaInNAs(Sb)/GaAs : une réalité contrastée .....	19
1.3. Lasers à cavité verticale émettant par la surface : les VCSEL.....	23
1.4. Amplificateurs optiques à semiconducteur à cavité verticale: les VCSEA.....	28
1.5. Lasers à cavité verticale étendue émettant par la surface : les VECSEL .....	30
1.6. Conclusions.....	34
CHAPITRE 2 LE DIAMANT POUR L'OPTIQUE DES LASERS .....	37
2.1. Contexte .....	37
2.2. Le diamant comme dissipateur thermique.....	40
2.2.1. Vers l'introduction de la dissipation thermique à fenêtre diamantée.....	40
2.2.2. La dissipation thermique de VECSEL à fenêtre diamantée : les résultats .....	42
2.2.3. La fenêtre diamantée intra-cavité : les artefacts et leurs solutions .....	46
2.3. Laser quasi-monolithiques utilisant des optiques passives en diamant .....	48
2.3.1. Introduction des VECSEL « microchip » à corps diamanté.....	48
2.3.2. Micro-optiques en diamant.....	49
2.3.3. Les VECSEL « microchip » à micro-optiques en diamant .....	51
2.3.4. Vers des VECSEL « microchip » avancés .....	54
2.4. Le diamant : un matériau actif.....	55
2.4.1. Le diamant comme cristal non-linéaire .....	55
2.4.2. Le diamant pour l'optique intégrée non-linéaire et quantique .....	57
2.5. Conclusions.....	62
CHAPITRE 3 LES LASERS A IMPULSIONS COURTES EXPLOITANT DE NOUVEAUX ABSORBANTS SATURABLES 63	
3.1. Contexte .....	63
3.2. Nouveaux absorbants saturables pour l'extension de la couverture spectrale des lasers ultra-rapides .....	67
3.2.1. Les SESAM en GaInNAs(Sb)/GaAs pour lasers impulsionnels proche infra-rouges.....	67
3.2.2. Les SESAM en GaInAsSb/GaSb pour les lasers ultra-rapides mi-infra-rouge.....	73
3.3. Fonctionnalisation des dispositifs.....	77
3.4. Conclusions.....	80
CONCLUSIONS ET PROSPECTIVE.....	81
4.1. Bilan des travaux menés à l'University of Strathclyde.....	81
4.2. Travaux en cours au LAAS .....	83
4.2.1. Introduction.....	83
4.2.2. Les composants à base de résonateurs à modes de galerie.....	85
4.2.3. Lasers à cavité étendue exploitant des réseaux sub-longueur d'onde .....	90
4.3. Prospective.....	92
BIBLIOGRAPHIE.....	99
LISTE DES ACRONYMES .....	121
BIBLIOGRAPHIE DE S. CALVEZ .....	123
CURRICULUM VITAE.....	139



# INTRODUCTION GENERALE

Ce manuscrit résume l'activité que j'ai pu mener au cours de mon parcours professionnel sur les systèmes lasers exploitant les matériaux semiconducteurs et leurs technologies. Ma carrière a débuté en 1998 par un doctorat au laboratoire GTL-CNRS Telecom de Metz. J'ai ensuite travaillé pendant 12 ans en tant que coopérant scientifique puis en tant que chercheur à l'University of Strathclyde de Glasgow avant de rejoindre le LAAS en 2012 où je suis actuellement chargé de recherche.

Plus précisément, ce document retrace et met en perspective les recherches que j'ai menées ou dirigées sur les composants à semiconducteurs pour l'ingénierie des lasers à solide depuis le 1<sup>er</sup> décembre 2000, date à laquelle j'ai rejoint l'équipe « III-V Semiconductors » de l'Institute of Photonics de l'University of Strathclyde à Glasgow (Grande-Bretagne) en tant que Coopérant Scientifique. Cette coopération s'est déroulée sur une période de 13 mois sous la direction du professeur Martin D. Dawson et en lien avec le CEA-LETI et, plus spécifiquement, le département DOPT-SLIR dirigé par Alain Million. Mes travaux portent alors sur les lasers à cavité verticale émettant par la surface (VCSEL) à base de GaInNAs/GaAs. Cette période correspond aussi à la rédaction de ma thèse BDI-CNRS dont le sujet était « l'étude de l'accordabilité en longueur d'onde et de la génération de trains d'impulsions multi-longueurs d'onde par voie électro-optique dans des lasers à fibres pour les télécommunications multiplexées en longueur d'onde ». Cette thèse avait été réalisée au laboratoire Georgia Tech Lorraine, alors rattaché à l'université de Franche-Comté. A l'issue de ma Coopération Scientifique et après la soutenance de ma thèse le 20 juin 2002, je suis devenu chercheur permanent, toujours dans l'équipe « III-V Semiconductors » de l'Institute of Photonics où, dans un premier temps, je poursuis et complète les programmes de recherche instigués par le professeur Martin D. Dawson sur les composants à cavité verticale avec matériau actif à base de nitrures (GaInNAs et GaN). Je prends la responsabilité des études portant sur les nitrures dilués (GaInNAs) qui perdureront jusqu'à mon départ pour le LAAS (1/2/2012) tandis que Martin Dawson se concentre sur l'étude des micro-DEL à base de GaN. A partir de 2005, je développe en parallèle des activités explorant l'utilisation du diamant dans les lasers à solide avant de m'intéresser, plus spécialement à partir de 2008 et en lien avec un projet EPSRC, aux absorbants saturables pour induire et contrôler l'émission d'impulsions femto-secondes par des lasers à milieu à gain diélectrique. Depuis le 1/2/2012, date à laquelle j'ai rejoint le LAAS en tant que chargé de recherche, l'activité que j'ai engagée continue de porter sur les nouvelles générations de systèmes optiques lasers en explorant la faisabilité de réaliser des systèmes d'optique non-linéaire intégrés monolithiquement sur puce. Techniquement, il s'agit de développer des nouveaux composants à semiconducteurs exploitant les résonateurs à modes de galerie ou des réseaux sub-longueur d'onde en technologie AlGaAs/AlOx pour promouvoir et exalter les processus non-linéaires de conversion de fréquences et réaliser des sources auto-converties.

Les défis relevés dans le cadre de mes travaux recherche ont suivi les grandes tendances du domaine. En particulier, au début des années 2000, les objectifs de mon activité étaient liés aux évolutions identifiées des systèmes de télécommunications optiques. Dans ce cadre, pour répondre à une demande accrue d'augmentation des capacités de transmission d'information et de données jusqu'à l'abonné, ces systèmes requéraient le développement de sources lasers qui, idéalement, fonctionneraient à des longueurs d'onde proches de 1,3  $\mu\text{m}$ , sans régulation en température, qui seraient fabriquées de façon peu onéreuse sur substrat GaAs. La conjonction de cette orientation avec l'arrivée à maturité de la technologie des lasers à cavité verticale émettant par la surface (VCSEL) pour des émetteurs fonctionnant aux longueurs d'onde allant de 850 à  $\sim 1000$  nm a sacralisé un effort intense de la communauté autour du développement de nouveaux alliages permettant l'extension de l'émission sur GaAs au-delà de la longueur d'onde de 1,2  $\mu\text{m}$  pour réaliser des VCSEL adaptés. Dans ce cadre, mes contributions ont porté l'analyse spectroscopique de structures à puits quantiques en GaInNAs(Sb) obtenues auprès de collaborateurs internationaux et l'étude de VCSEL délibérément conçus pour fonctionner sous pompage optique plutôt qu'avec une injection électrique. Les études matériaux ont révélé que les alliages à faible teneur en azote et incorporant une fraction d'antimoine étaient les plus favorables pour atteindre l'émission aux grandes longueurs d'onde, surtout au-delà de 1400 nm, tandis que les démonstrateurs lasers ont permis d'atteindre des performances à l'état de l'art avec des VCSEL émettant des puissances record à 1,3  $\mu\text{m}$ , ainsi que d'obtenir les premiers VCSEL émettant en bande C (à 1545 nm) sous excitation nanoseconde à température ambiante. Par ailleurs et de manière originale, j'ai participé à la diversification de l'utilisation du GaInNAsSb en étudiant une famille de composants combinant la géométrie verticale et ces alliages de semiconducteurs et dont la finalité entrainait dans le cadre des systèmes de télécommunications optiques. En particulier, j'ai initié un programme sur les amplificateurs optiques à semiconducteur à cavité verticale (VCSSOA) pour faciliter des opérations de filtrage actif, qui a permis d'obtenir des composants monolithiques dont les performances étaient similaires à ceux réalisés avec des solutions technologiquement plus complexes (à base de fusion de wafers InP sur GaAs). J'ai aussi conçu les structures et participé à l'évaluation de VECSEL, l'architecture de puissance des VCSEL exploitant une cavité étendue, pour démontrer la première source générant plus de 500 mW de puissance à une longueur d'onde plus grande que 1,2  $\mu\text{m}$ , ouvrant ainsi une nouvelle voie pour la réalisation lasers de pompe Raman. Enfin, j'ai aussi introduit l'utilisation de miroirs à absorbants saturables semiconducteurs (SESAM) exploitant le GaInNAs(Sb) pour réduire les pertes non saturables de ces composants et favoriser la génération efficace d'impulsions femto-secondes aux longueurs d'onde d'intérêt pour les télécommunications optiques.

L'évolution du contexte applicatif passant d'une domination du secteur des télécommunications à des applications plus diverses allant du divertissement (projection cinématographique) au secteur médical (ophtalmologie/dermatologie), a modifié le type de sources lasers à développer et les paramètres spécifiques d'optimisation promouvant notamment les sources compactes, fiables, presse-bouton dont l'émission est décalée soit dans le visible soit dans le mi-infrarouge. Ces nouvelles exigences m'ont amené à ré-orienter mes travaux tant sur les VECSEL que sur les SESAM. Au début des années 2000, en matière de VECSEL, le défi principal était de passer de travaux de preuve de concept à la démonstration expérimentale que ces sources pouvaient effectivement constituer une technologie de lasers à solide de rupture, fonctionnant en particulier aux

nouvelles longueurs d'onde d'intérêt. Le point limitant les performances de ces émetteurs était en fait la résistance thermique des structures de gain utilisées. L'avancée technologique majeure à laquelle j'ai contribué a été d'identifier et de valider le fait que l'insertion d'une fenêtre en diamant placée en contact direct intra-cavité sur la zone de gain à semiconducteur permettait non seulement de dissiper la chaleur de façon plus efficace mais ouvrait la voie vers la diversification en longueur d'onde de ces lasers vers les nouvelles gammes spectrales d'intérêt et, ce, avec des niveaux de brillance record surtout pour une technologie de lasers à semiconducteurs. Une retombée additionnelle fut que je mis au point une méthode de dessin des miroirs à gain de ces composants facilement transférable d'un système de matériaux à un autre, un élément clé pour la mise en place de cette diversification en longueur d'onde. Par ailleurs, la fenêtre en diamant étant insérée intra-cavité, j'ai breveté et, par la suite, évalué l'ajout de fonctions optiques spectrales ou modales à cet élément diamanté. Cette utilisation du diamant pour des fonctions optiques autres que pour des fenêtres transparentes (de presses à enclumes de diamant) et pour des prismes (pour le couplage vers des guides planaires) était alors essentiellement vierge. Pour mettre en place cette fonctionnalisation, je me suis appuyé sur des travaux de micro-structuration à l'aide des technologies conventionnelles de la micro-électronique (lithographie, gravure) effectués au sein de l'équipe qui ont notamment permis la réalisation de fenêtres avec des réseaux et/ou des tableaux micro-lentilles. Après la paramétrisation de ces micro-optiques pour les rendre compatibles avec une utilisation dans les VECSEL, j'ai pu exploiter ces éléments dans le cadre du développement de versions quasi-monolithiques dites « microchip » des VECSEL, ce dernier type de sources étant plus adapté à une utilisation généralisée du fait de sa meilleure compacité, robustesse et de sa fabrication simplifiée. Au niveau des travaux sur les SESAM, les développements entamés à partir de 2008 ont été consacrés, d'une part, à l'introduction pionnière de SESAM à base d'antimoine pour générer des impulsions femto-secondes à l'aide de lasers à milieu à gain cristallin dopés aux ions thulium ou holmium avec des performances faisant l'état de l'art dans la gamme de longueurs d'onde allant de 1,9 à 2,2  $\mu\text{m}$  et, d'autre part, à l'étude de SESAM pompés optiquement ou contactés électriquement pour faciliter le contrôle automatique de l'émission des lasers à impulsions courtes.

Parallèlement aux développements de lasers à solide mentionnés ci-dessus, la photonique, ou autrement dit le domaine de l'optique intégrée exploitant les méthodes et les outils de fabrication de la micro-électronique, a connu un essor sans précédent. Cette tendance, plus particulièrement soutenue par les applications pour les télécommunications optiques, a été marquée par le développement de composants (lasers, multiplexeurs,...) puis de systèmes (transpondeurs) de complexité croissante sur plateforme InP avant de voir émerger la photonique passive sur silicium et son hybridation récente à la filière InP pour l'intégration des sources lasers. Cet engouement pour l'intégration sur puce tout comme les développements intenses en optique fibrée incitent à évaluer la pertinence des approches intégrées ainsi que des composants micro- ou nano-structurés pour les développements de systèmes lasers avancés ou complexes. C'est dans cet esprit que j'ai mené les travaux mentionnés plus haut sur les VECSELs microchip à micro-lentilles en diamant mais aussi que j'ai abordé une étude de faisabilité de réalisation de guides d'onde sur diamant. Pour ces travaux, j'ai contribué à la conception des guides d'onde de larges dimensions, à l'évaluation numérique du potentiel de ces structures pour la conversion de fréquences non-linéaire par effet Raman, ainsi qu'aux développements du procédé technologique mis en place pour la réalisation pratique de principe de guides d'onde fabriqués, pour la première fois, sur

substrat mince ( $20\mu\text{m} \times (2 \times 2\text{mm}^2)$ ) de diamant cristallin. Cette approche d'optique intégrée à base de diamant cristallin a depuis été reprise avec succès pour la réalisation de sources de photons uniques fonctionnant à température ambiante ainsi que pour la génération de peignes de fréquences par mélange à quatre ondes dans des micro-résonateurs en anneau sous excitation par un laser externe. Les travaux auxquels je participe et que j'anime au LAAS depuis mon arrivée en 2012 s'inscrivent aussi dans cette thématique générale visant exploiter la photonique dans les systèmes lasers. Les travaux engagés s'orientent selon deux axes :

- un premier domaine que je dirige et qui vise à explorer la faisabilité d'intégrer sur une même puce de GaAs des sources lasers et une fonction conversion de fréquences non-linéaire et dont l'objectif ambitieux est la réalisation d'un peigne de fréquences induit par le déclenchement de l'oscillation paramétrique optique (OPO) dans des micro-résonateurs et
- une seconde activité où je contribue et qui porte sur le développement, l'utilisation et l'évaluation du potentiel d'intégration de réseaux sub-longueurs dans les lasers à semiconducteurs pour en faire des sources de haute pureté spectrale. Dernièrement la stabilisation mono-fréquence d'une diode laser en cavité externe à l'aide d'un nouveau type de réseau sub-longueur d'onde (réseau à mode guidé en cavité CRIGF) a été démontrée et les évaluations plus applicatives de cette source sont prévues. Une diversification et l'exploration d'autres fonctionnalités de ces réseaux comme la mise en phase de tableaux de lasers et la conversion non-linéaires forment une partie de ma prospective.

L'étude des peignes de fréquences sur puce s'appuie sur le principe de génération démontré en 2007 exploitant la conversion d'un signal intense d'une source laser monochromatique par cascades de mélanges à quatre ondes (équivalent à l'OPO avec non-linéarité d'ordre 3) dans un micro-résonateur (en  $\text{SiO}_2$ ) présentant un fort coefficient de qualité. En termes de source, depuis lors, les travaux ont porté sur le développement de micro-résonateurs à base d'anneaux couplés latéralement à leur guide d'accès réalisés en technologie CMOS ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), et sur la démonstration récente de l'utilisation d'une configuration de pompage intra-cavité dans un laser à fibre pour réduire la puissance d'excitation. Notre approche est conceptuellement similaire mais repose sur une filière technologique exclusivement à base de matériaux semiconducteurs. En effet, l'architecture envisagée exploite un résonateur en GaAs, car ce matériau présente un coefficient non-linéaire plus favorable (de deux ordres de grandeur), directement intégré avec sa diode laser de pompe. Dans ce cadre, mon premier résultat marquant est récent et porte sur la validation expérimentale de micro-résonateurs en forme de disque couplés verticalement à leur guide d'accès, composants conçus et fabriqués pour tirer profit de la technologie à base d' $\text{Al}(\text{In})\text{GaAs}/\text{GaAs}$  et d'oxyde d'aluminium ( $\text{AlOx}$ ) pour laquelle le LAAS est reconnu internationalement.

Vu que mon activité vient seulement de démarrer au LAAS, ma prospective scientifique s'inscrit dans la continuité de ces travaux avec une interaction forte avec Guilhem Almuneau vu nos intérêts communs pour l'utilisation de la technologie à base d' $\text{AlOx}$  pour l'intégration photonique et avec Olivier Gauthier-Lafaye et Antoine Montmayrant pour les aspects de lasers à réseaux sub-longueur d'onde. Mes travaux étant encore dans leur phase initiale, la mise en place de nouvelles collaborations avec des partenaires s'intéressant aux aspects technologiques, théoriques, ou applicatifs n'a pas encore eu lieu mais est anticipée avec l'évolution de ce projet.

L'ensemble de ces travaux ont été supportés par trois programmes conséquents (EPSRC VCSOA, EPSRC MUSIC et FP6 NATAL) et trois autres projets (Bourse de l'université de Strathclyde, un contrat de transfert industriel, et une R&T CNES sur peignes de fréquences) pour lesquels j'ai été investigateur principal et d'autres financements, supportant plus généralement l'équipe, où j'intervenais en tant que co-investigateur. Ces projets m'ont donné l'occasion d'encadrer seul quatre doctorants et trois post-doctorants sur des périodes moyennes de trois ans à l'University of Strathclyde et de co-diriger (50% avec Guilhem Almuneau) deux nouvelles thèses encore en cours au LAAS.

Comme indiqué ci-dessus, mes travaux s'inscrivent thématiquement dans le domaine de l'ingénierie des lasers exploitant des composants semiconducteurs. Après une description plus détaillée des contrats supports et une présentation des personnes encadrées, le manuscrit sera divisé en quatre sections décrivant respectivement :

1. les travaux sur les nitrures dilués (GaInNAsSb/GaAs),
2. l'activité basée sur l'utilisation du diamant dans les lasers à solide,
3. les études concernant les absorbants saturables, et finalement
4. le résumé des travaux entrepris au LAAS se terminant par ma prospective de recherche

Les annexes fournissent une liste d'informations complémentaires notamment mon CV, la liste des stagiaires, doctorant(e)s, des post-doctorants encadrés, les activités d'enseignement (20h de master sur les multi-couches et guides d'onde), de recherche et de diffusion scientifique y compris ma liste complète de publications (78 articles de revue et 96 conférences dont 10 invitées) ainsi que la liste des comités d'organisation de conférences auxquels j'ai participé.



# SUPPORT ET ORGANISATION DE L'ACTIVITE DE RECHERCHE

Cette section décrit brièvement les contrats et les activités d'encadrement qui ont soutenu et permis le développement de mes activités de recherche sur la période de 2000 à aujourd'hui.

En Fig. 1 est représentée sous forme de diagramme la liste des projets pour lesquels j'ai été investigateur principal ou co-investigateur. Une description succincte de ces programmes de recherche est donnée ci-dessous avec la mention des six doctorants (dont 2 en cours) et des trois post-doctorants que j'ai pu encadrer (voir Fig. 2).

Mon premier projet, financé dans le cadre des programmes EPSRC (ANR britannique) « Jeune Chercheur(e) » et suivi par la PME, Kamelian Ltd qui fabriquait des amplificateurs optiques à semiconducteurs à base d'InP, portait sur les VCSEA en GaInNAs(Sb) et, par extension, sur les VCSELs fonctionnant dans la gamme de 1280 à 1565 nm pour les applications de télécommunications par fibres optiques. Il fut l'occasion de recruter Nicolas Laurand, le premier doctorant que j'ai encadré (à 100%). Le post-doctorat de Handong Sun sur la spectroscopie fut aussi soutenu en partie par ce programme.

Le second programme que j'ai dirigé à l'Institute of Photonics fut le programme européen FP6 NATAL dont l'objet était le développement des VECSELs pour des applications de projecteurs cinématographiques à base de lasers et pour la spectroscopie (laser guide pour sodium, et l'ultra-violet). Les coordinateurs du projet étaient les professeurs Oleg G. Okhotnikov et Mircea Guina de Tampere University of Technology qui, techniquement, s'intéressaient respectivement à la caractérisation des VECSEL et la croissance par épitaxie par jets moléculaires. Les autres partenaires académiques étaient le groupe de Sheila Galt de Chalmers University of Technology en charge de la modélisation des structures, le groupe de Dieter Bimberg de la Technical University Berlin pour les VECSELs à base de boîtes quantiques, et le groupe III-Semiconducteur l'Institute of Photonics pour la caractérisation des VECSELs à cavité étendue et micro-cavité. Les partenaires industriels étaient OSRAM Semiconductor GmbH qui envisageait de commercialiser les VECSEL doublés en fréquence émettant

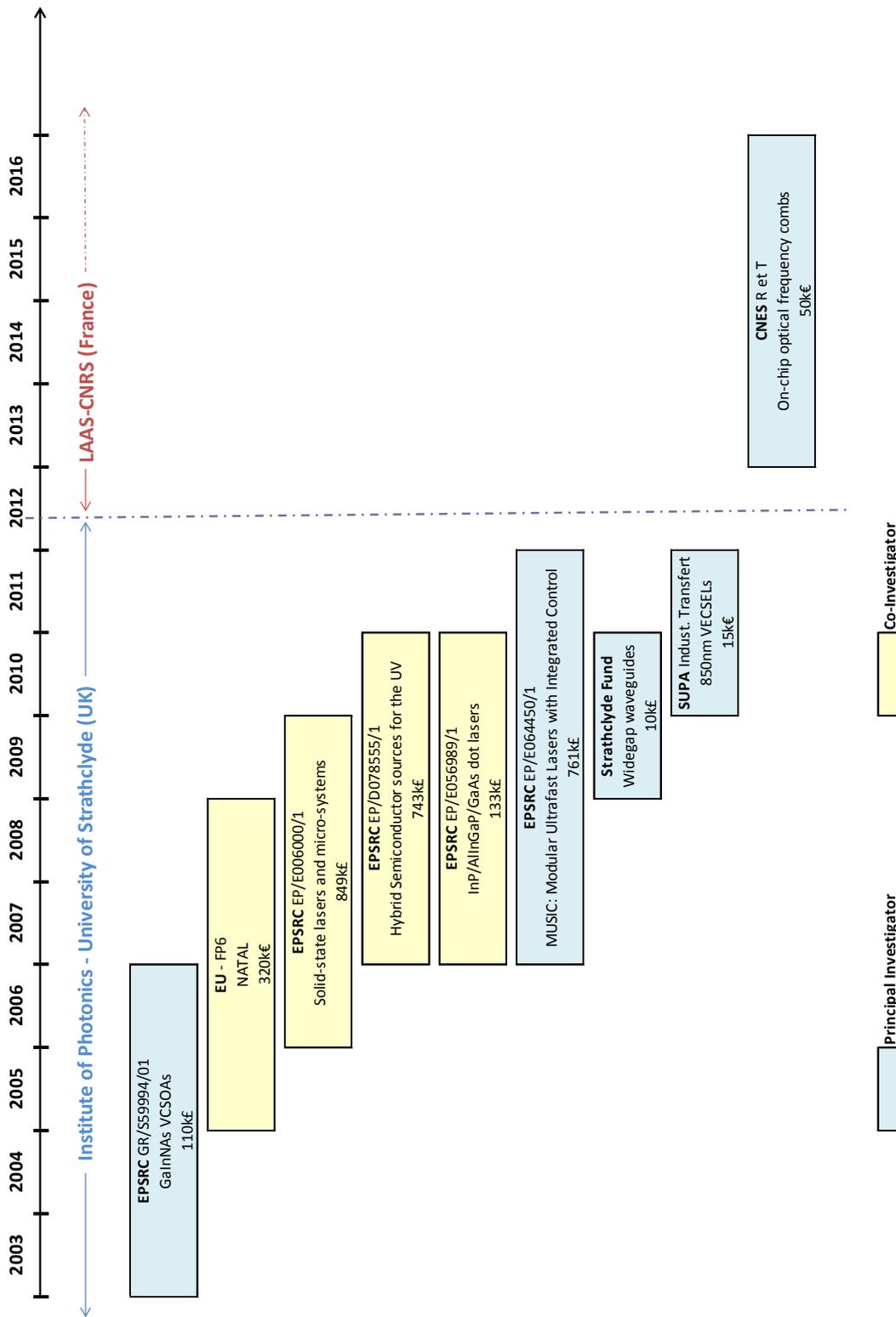


Fig. 1 : Liste des projets menés par S. Calvez sur la période 2003-2015.

dans le vert pour des projecteurs mobiles et Toptica AG qui s'intéressait au VECSEL pour les applications en spectroscopie. Ce programme me permit de recruter Stéphanie Giet comme doctorante pour travailler sur les questions de gestion thermique des VECSELS et leur stabilisation spectrale par réseaux, de financer Nicolas Laurand pour 18 mois pour travailler sur les VECSEL incluant des microlentilles en diamant. Il permit aussi de subvenir à une partie de la thèse de Sharon Louise Vetter sur les VECSELS en GaInNAs opérant aux longueurs d'onde proches de 1200 nm.

Enfin, mon troisième et dernier programme de recherche significatif fut le projet EPSRC « MUSIC : Modular Ultrafast Sources with Integrated Control » dont les objectifs étaient (i) de développer une suite de nouveaux lasers et d'amplificateurs femto-secondes et (ii) de rendre les lasers à impulsions ultra-rapides « mains-libres » c'est-à-dire de les asservir et les contrôler automatiquement. Le projet était coordonné par professeur Wilson Sibbett de l'University of St Andrews dont les recherches portaient sur les lasers impulsionsnels à solide. Il impliquait le groupe du professeur Ian White de Cambridge University pour des travaux sur les diodes lasers super-radiantes et mon groupe à l'Institute of Photonics pour les travaux sur les nouveaux SESAM et les méthodes de contrôle de lasers impulsionsnels. Ce programme compléta la thèse de Sharon Vetter et me permit de recruter Loyd McKnight en doctorat pour étudier des guides d'onde sur des semiconducteurs à grand gap, plus spécialement en diamant, en GaN et à base de tungstates. J'ai aussi pu encadrer le post-doctorant Vasili Savitski pour les études de contrôle de lasers à impulsions rapides par des SESAM pompés optiquement.

Parallèlement à ces trois programmes, les équipes « III-V semiconductors » et « Laser development » de l'Institute of Photonics bénéficiaient de portfolios de projets suffisants auprès d'EPSRC pour pouvoir postuler à des programmes de type « Plateforme » dont l'objectif est d'aider une équipe à maintenir son activité dans un domaine spécifique de recherche au travers d'un soutien financier dédié à l'emploi de post-doctorants et d'ingénieurs de recherche. Nous sommes parvenus à obtenir deux de ces bourses « plateforme » sur « les lasers à solides et micro-systèmes » visant à l'exploration des micro-optiques pour les lasers à solide et systèmes lasers à application bio-photonique et sur « les sources hybrides à semiconducteur pour l'ultraviolet » qui était dédié aux micro-DEL en AlGaIn et aux VECSEL convertis vers des fréquences harmoniques. La combinaison de ces deux programmes m'a permis de garder Nicolas Laurand en tant que post-doctorant pour 18 mois et d'employer Handong Sun pour la spectroscopie du GaInNAs pour 2 ans.

Les trois dernières bourses obtenues en Grande-Bretagne portaient respectivement sur :

- les lasers et SESAMs à base de boîtes quantiques d'AlInGaP sur GaAs fonctionnant entre 720 et 790 nm. Il impliquait l'University of Sheffield pour la croissance des structures, Cardiff University pour l'étude de lasers émettant par la tranche et l'Institute of Photonics pour les SESAM et les VECSEL.
- Une bourse de l'University of Strathclyde pour faciliter l'achat de consommables pour les travaux sur les guides d'onde en diamant
- Une bourse de transfert vers l'industrie et en particulier la PME Solus Ltd (aujourd'hui, partie intégrale de Msquared lasers Ltd) pour la conception de structures VECSEL fonctionnant à 850 nm à base d'AlInGaAs/GaAs.

Enfin, depuis mon arrivée au LAAS, j'ai obtenu le financement d'une R & T CNES sur les peignes de fréquences sur puce à base de micro-résonateurs à modes de galerie. Elle est adjointe d'une bourse de thèse co-financée par la DGA qui finance le doctorat de Clément Arlotti. L'Université Paul Sabatier m'a aussi soutenu au travers d'une allocation pour un doctorant, Gaël Lafleur, qui travaille sur les nouveaux composants exploitant les alliages AlGaAs/AlOx. Pour ces deux thèses, l'encadrement est partagé à 50% avec Guilhem Almuneau pour une exploration commune des potentialités offertes par les technologies AlOx en photonique.

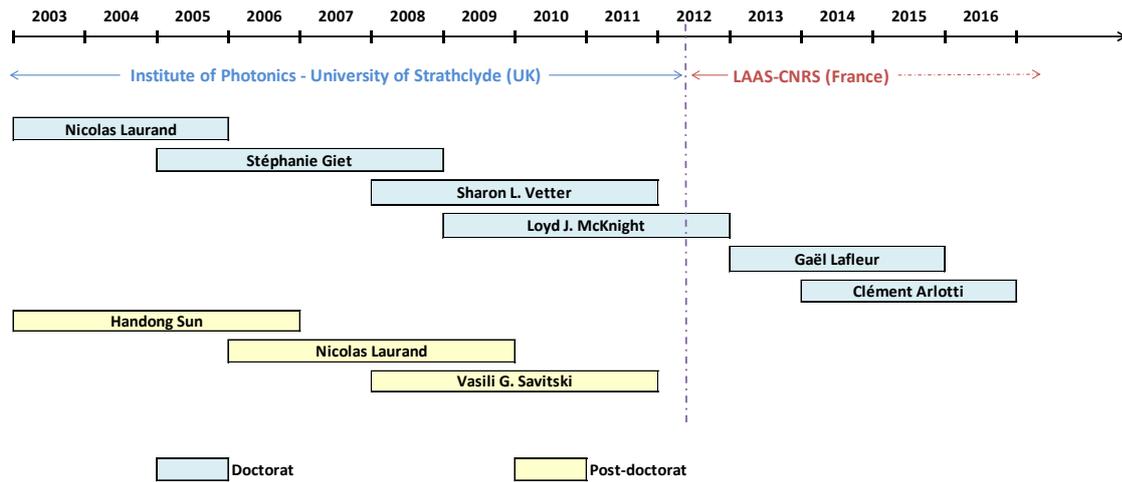


Fig. 2 : Doctorants et post-doctorants encadrés par S. Calvez sur la période 2003-2015.

# CHAPITRE 1

## COMPOSANTS A CAVITE VERTICALE A BASE DE GaInNAs(Sb)/GaAs

Dans ce chapitre figure un résumé des travaux que j'ai menés puis dirigés entre décembre 2000 et début 2012 sur la caractérisation spectroscopique des composés GaInNAs(Sb) sur GaAs et de leur utilisation pour la réalisation d'amplificateurs et de lasers à cavité verticale.

### **1.1. Contexte**

Cette activité fût, au moins dans sa phase initiale, réalisée dans le cadre de recherches devant conduire à l'amélioration des télécommunications par fibres optiques. En effet, à cette époque, juste avant la bulle internet, la montée en puissance des communications téléphoniques et du transfert de données (internet) se traduisait par une augmentation de du trafic aux Etats-Unis de 118% par an et un doublement du nombre d'hôtes tous les ans<sup>1</sup>. Une des orientations réalistes envisagées pour satisfaire cette demande se basait sur le déploiement de la fibre chez l'abonné (FTTH : Fibre To The Home) qui, à son tour, requérait une modification et une adaptation du matériel pour effectuer ces transmissions à moindre coût sur les distances les plus longues possibles, préférablement sans régénération (amplification) et en utilisant sur les réseaux de fibres optiques existants. Pratiquement, cela voulait dire développer des composants, et en particulier des émetteurs optiques, réalisables à bas-coûts, fonctionnant avec une consommation énergétique réduite (sans régulation en température ou non refroidi (uncooled)) et opérant dans la gamme spectrale présentant des faibles pertes de propagation et une faible dispersion chromatique, c'est-à-dire dans la bande dite "originelle" (bande O) centrée autour de la longueur d'onde 1,3  $\mu\text{m}$ .

Pour fabriquer ces sources optiques, une des solutions envisagées visait à adapter les lasers à contre réaction distribuée (DFB pour Distributed FeedBack) utilisés dans les systèmes de communications intercontinentales (avec une longueur d'onde d'émission

---

<sup>1</sup> <http://www.netvalley.com/intvalstat.html>

incluse dans la bande dite C pour “central” allant de 1530 à 1565nm). Techniquement, cette approche repose sur la filière InP et exploite des structures de lasers à ruban émettant par la tranche dont le gain est fourni par des puits quantiques réalisés à l’aide d’alliages d’InGaAsP, et dont la contre-réaction optique provient de réseaux définis par interférométrie, gravés et enterrés dans la couche supérieure de confinement du guide optique. La difficulté majeure associée au transfert de cette technologie vers les courtes longueurs d’onde est que les alliages d’InGaAsP ne permettent d’établir qu’un confinement électrique restreint des électrons, ce qui limite sévèrement la température maximale de fonctionnement et, par conséquent, rend cette approche peu compatible avec l’opération sans régulation de température requise par la FTTH. Pour surmonter cet obstacle, le développement de lasers exploitant toujours la filière InP mais utilisant une structure de gain à puits quantiques à base d’AlInGaAs a été mené en parallèle des travaux sur le GaInNAs décrits ci-après et avec pour résultat phare une amélioration significative des performances et la démonstration d’un fonctionnement sans régulation en température [1]. L’industrialisation de cette approche reste, même aujourd’hui, limitée car sa pérennisation demandait certainement trop d’investissements de la part des équipementiers pour les voir se détourner de leur technologie mature, maîtrisée et déjà fiabilisée à base d’InGaAsP/InP.

La solution alternative la plus prisée à ce moment-là était en fait l’extension de la technologie des lasers à cavité verticale émettant par la surface (VCSEL). Ces lasers, originellement proposés et démontrés par le groupe de K. Iga en 1979 [2], présentent, dans leur configuration standard, une zone active de quelques longueurs d’onde de long qui comprend des puits quantiques d’(In)GaAs/(Al)GaAs et qui est incluse entre deux miroirs multicouches, dits réflecteurs de Bragg distribués (Distributed Bragg Reflectors). L’extension latérale de la zone active est aussi limitée à des diamètres de quelques fois la longueur d’onde par un diaphragme électriquement isolant (à base d’oxyde d’aluminium ou de semiconducteurs amorphisés par implantation), ce qui permet d’induire une émission monomode orientée verticalement par rapport au wafer à partir d’une région de faible volume (par rapport à un DFB). De par leur construction, ces sources bénéficient donc d’une faible consommation électrique (puissance seuil de l’ordre du mW contre quelques dizaines pour les DFB), d’une émission avec un faisceau de sortie circulaire compatible avec un couplage simple et efficace aux fibres optiques, ainsi que d’une fabrication en wafer compatible avec la réalisation aisée de matrices d’émetteurs et avec des tests sous pointe tout au long du processus. L’ensemble de ces caractéristiques ont conduit à leur succès commercial pour des applications de stockage d’informations à partir de 1996 [3][4] avec des composants fonctionnant à la longueur d’onde de 850nm. Pour permettre le déploiement de la FTTH, l’ambition était donc de capitaliser sur cette technologie en continuant d’exploiter des substrats de GaAs moins coûteux (que ceux d’InP) mais en surmontant le défi associé à l’extension de l’émission vers les plus grandes longueurs d’onde (1,3  $\mu\text{m}$ ).

## 1.2. Aspects matériaux

### 1.2.1. L'introduction du GaInNAs(Sb)/GaAs : un choix justifié

Comme expliqué ci-dessus, un des axes de recherche majeurs des années 2000 portait sur l'identification et la démonstration d'une solution technique permettant de réaliser des VCSELs sur substrats GaAs capables de fournir une émission dans la bande de télécommunications O (de 1260 à 1360 nm) voire C (1530-1565 nm).

Au vu de l'état de l'art des VCSEL émettant à 850nm, les efforts devaient porter sur :

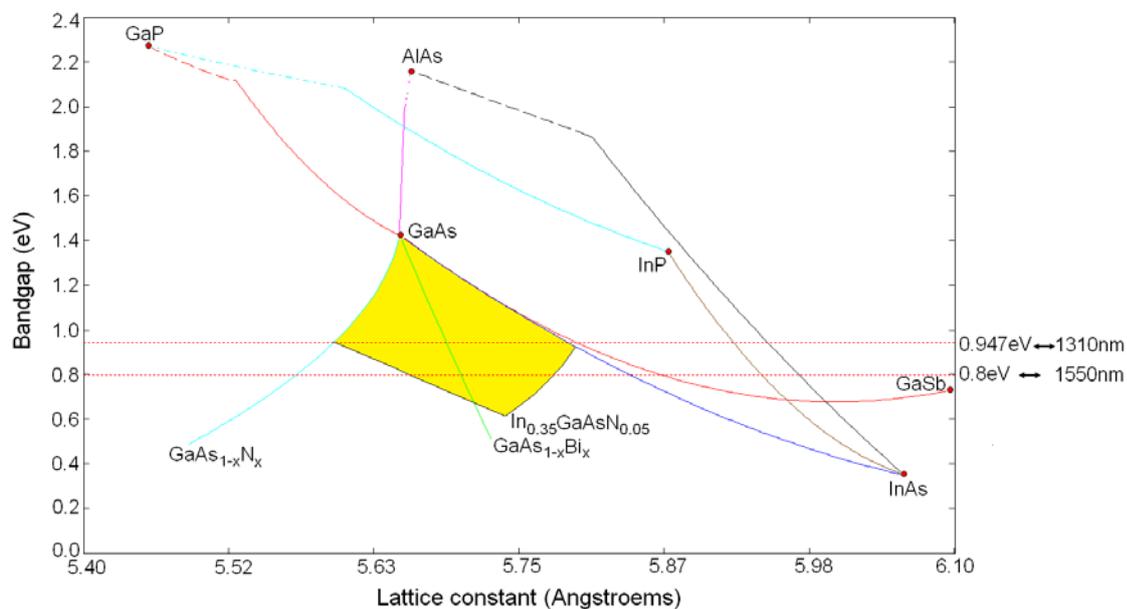
- un ajustement des épitaxies (épitaxie par jets moléculaires (EJM) ou par épitaxie en phase vapeur aux organométalliques (EPVOM)) pour permettre la croissance d'empilements multicouches d'AlGaAs avec des épaisseurs magnifiées par un facteur 1,5 (ou 1,8) en lien direct avec le changement de longueur d'onde d'émission, et ce toujours avec le même degré de contrôle (1% de variation d'épaisseur sur l'ensemble du wafer de 4 pouces),
- des travaux d'ingénierie de l'injection des porteurs dans la cavité pour limiter les pertes par recombinaisons non radiatives (surtout induites par absorption inter bandes de valence) dans les miroirs dopés P [5][6],
- et surtout sur une activité de recherche intense sur le développement de nouveaux matériaux offrant du gain à ces longueurs d'onde.

Ce dernier axe étant le plus critique, c'est celui qui a reçu le plus d'attention de la communauté. En se référant au diagramme représentant l'énergie de bande interdite en fonction du paramètre de maille des alliages à semiconducteurs III-V de la Fig. 3, il est relativement simple d'identifier les approches envisageables pour obtenir une émission de petite bande interdite sur GaAs. Pour les structures en matériau massif ou bidimensionnelles à base puits quantiques où le quasi-accord de maille ( $< \sim 2,5\%$  d'écart) doit être maintenu pour permettre une émission efficace et conserver un empilement plastiquement non relaxé, quatre options peuvent retenues :

1. les structures à puits quantiques d'InGaAs(P)/GaAs dont la longueur d'onde d'émission maximale limite est d'environ 1210 nm avec un alignement de type I et un décalage des bandes de conduction correspondant à 70% de différence des largeurs de bandes interdites. C'est une approche, qui a été poussée dans ses retranchements par le groupe de M. Hammar, de KTH [7][8], et qui a permis de démontrer un VCSEL émettant à 1280 nm exploitant un fort décalage spectral entre le maximum de gain et la longueur d'onde de résonance et qui, de ce fait, présentait une forte sensibilité à l'échauffement.
2. les structures à puits quantiques de GaAsSb/(In)GaAs limités par une transition à  $\sim 1280$ nm entre un alignement de type I et un alignement de type II [9][10], ce dernier étant considéré comme généralement défavorable pour une utilisation dans des émetteurs du fait du faible recouvrement des fonctions enveloppes des électrons et des trous associées. Malgré tout, quelques VCSEL à base de GaAsSb/GaAs ont été démontrés mais avec de piètres performances [11][12].
3. les structures à puits quantiques à base de GaInNAs(Sb) qui ont été au centre de mes travaux et font donc l'objet d'une plus ample description dans les sections à venir, et
4. les structures à puits quantiques de GaAsBi qui sont aussi des composés dont les éléments (binaires) sont fortement désaccordés (en maille et nature électronique) et dont les études ont débutées en 2003 [13] mais qui n'ont vu leur essor

qu'après 2010, suite aux avancées scientifiques et technologiques obtenues sur le GaInNAs(Sb). Vu les conditions de croissance optimales et vu que la réduction de la bande interdite provient essentiellement de la bande de valence [14], cette approche semble moins prometteuse pour la réalisation de laser mais pourrait être plus adaptée pour la fabrication d'autres composants notamment des photodiodes ou des cellules photovoltaïques.

La dernière alternative de matériau à gain présentant un faible gap sur GaAs qui a retenue l'attention de la communauté est l'utilisation de boîtes quantiques d'InGaAs. Ces îlots sont faits par croissance Stranski-Krastanow c'est-à-dire par dépôt de couches dont le niveau de contrainte (combinaison composition et d'épaisseur) est au-delà de la valeur critique et conduit donc à sa relaxation plastique sous forme d'agglomérats auto-arrangés. Par construction, ces îlots forment des zones de confinement électronique (et optique) tridimensionnel, facteur qui devait conduire à une amélioration drastique des performances laser notamment en terme de réduction de puissance de seuil, d'augmentation de la capacité de modulation directe et de stabilité en température. Si certains de ces avantages ont été validés [15], les contraintes technologiques font qu'il est nécessaire de placer ces boîtes quantiques sur des puits quantiques, formant ainsi des structures connues sous le nom de « dots in a well », notamment pour atteindre une émission vers 1,3  $\mu\text{m}$ , ce qui affecte le degré de confinement effectif et amoindrit les bénéfices anticipés. En particulier, pour les VCSEL, le faible gain modal par couche de boîtes quantiques (typiquement 3 fois inférieur à celui d'un puits quantique) a compliqué la réalisation de ces lasers.



**Fig. 3 : Diagramme d'énergie de bande interdite en fonction du paramètre de maille pour les matériaux III-V [16]-[18]; la région en jaune délimite la zone accessible avec des puits quantiques de GaInNAs.**

En apparence, l'utilisation de puits quantiques de GaInAsN(Sb) bénéficiait d'une physique établie et maîtrisée et soulevait moins d'inquiétudes de fiabilité long-terme, justifiant l'engouement des équipementiers (Infineon, Agilent, Cielo Communications, Alcatel, Samsung, ...) pour cette voie par rapport à l'approche basée sur les boîtes quantiques. C'est aussi sur cette base que mon superviseur de Coopération Scientifique

et futur collaborateur, Martin Dawson, s'est engagé sur le sujet en 1997. Dans le cadre du projet Européen Optivan, l'University of Strathclyde devait effectuer la caractérisation spectroscopique de structures à puits quantiques, tandis que IQE devait développer les organo-métalliques adaptés et établir les conditions de croissance appropriées, et que le CEA-LETI et Infineon Technologies devaient s'occuper respectivement de la croissance et académique et industrielle de puits quantiques et de VCSELs par EJM ainsi que de la caractérisation des composants.

Ce programme fut en fait élaboré suite à la publication fondatrice de M. Kondow et de son équipe du Hitachi Laboratory [19] qui introduisait le GaInNAs sur GaAs pour la réalisation de sources fonctionnant en bande O et présentant une faible dépendance thermique. Leur analyse s'appuie sur :

1. la constatation de la réduction rapide du gap avec l'incorporation d'azote faite à partir de leurs résultats de photoluminescence de puits de GaInNAs/GaAs épitaxiés par EJM. Cette observation reprend et étend les tendances notées lors d'études matériaux s'intéressant à l'ajout d'azote dans le GaP [20]-[22] et le GaAs [23].
2. l'argument que la réduction du gap ne provient que du changement de la bande de conduction et donc que les structures posséderont un meilleur confinement des électrons que les structures à base d'InGaAsP/InP et que, par conséquent, elles devraient être moins sensibles aux effets thermiques.
3. le fait que l'ajout d'azote s'accompagne d'une réduction du paramètre de maille qui doit donc permettre de fabriquer des structures non ( $x_{In} \sim 3x_N$ ) ou faiblement contraintes, et doit donc faciliter la réalisation de composants fiables.

Dans le cadre du projet Optivan, Michael Hetterich, le post-doctorant recruté par l'University of Strathclyde, mit en place le banc et conduisit les premières études spectroscopiques par photoluminescence et photoluminescence excitée résolue en polarisation de puits quantiques de GaInNAs/GaAs comprenant 1.5% d'azote et réalisés par EJM par Infineon. Ses résultats expérimentaux établirent la variation largement non-linéaire du gap avec l'incorporation d'azote (fort « bowing »), la large profondeur du confinement des électrons et la preuve d'une augmentation significative de la masse effective des électrons, observations en accord direct avec l'analyse précédente de M. Kondow.

### **1.2.2. Le GaInNAs(Sb)/GaAs : une réalité contrastée**

Les paragraphes précédents ont rappelé le contexte qui a conduit à l'étude des alliages de GaInNAs(Sb)/GaAs pour les applications de télécommunication tant au niveau international qu'à l'University of Strathclyde. Néanmoins, lorsque j'ai rejoint cet établissement, l'objectif qui m'était assigné dans le projet EPSRC « Photon » était de concevoir et démontrer des VCSEL à base de GaInNAs opérant à 1300 nm et non plus d'examiner les propriétés physiques de ces alliages. Par contre, dans le cadre de mon projet « jeune chercheur », au vu des enjeux matériaux induits par le désir d'obtenir des lasers et amplificateurs fonctionnant aux grandes longueurs d'onde (1550 nm), j'ai été amené à soutenir et reprendre les études spectroscopiques de ces matériaux.

Celles-ci ont constitué le cœur de l'activité menée par le post-doctorant Handong Sun et ont porté sur :

1. les effets des recuits sur la photoluminescence des puits en GaInNAs,
2. l'analyse d'une variété de structures quantiques pour atteindre l'émission en bande C,
3. l'étude de l'influence de la technique d'épitaxie (EJM et EPVOM) sur la qualité de l'émission, et
4. l'extension à d'autres nitrures dilués : InNAs/InP pour l'émission dans le mi infra-rouge **[SC27]**, aspect qui ne sera pas détaillé davantage dans ce manuscrit.

En fait, cette activité est la conséquence directe de la nature très particulière des alliages de GaInNAs(Sb). En effet, contrairement à l'idée reçue mentionnée plus haut, ces composés ne sont pas des quaternaires (quinaires) conventionnels dans la mesure où l'azote présente une disparité de taille et d'électronégativité importante par rapport aux autres éléments V (As, Sb). Cette différence de nature rend la croissance de ces alliages difficile et est à l'origine de leur physique toute particulière (ainsi que de celle des autres alliages très désaccordés (« highly mismatched ») comme les bismures).

L'azote, introduit en faible quantité, peut être considéré comme une impureté dont le niveau principal (mono atomique) d'énergie est proche de la bande de conduction de l'InGaAs et donne lieu à une interaction forte d'anti-croisement de bandes (modèle « Band Anti-Crossant ») [24] qui conduit au fort décalage spectral (bowing) observé et à l'aplatissement de la courbure de la bande de conduction, c'est-à-dire une large masse effective des électrons et une sensibilité réduite aux changements de température. Ce modèle offre un degré de précision suffisante pour la conception de régions actives de composants et est donc celui que nos collaborateurs de l'Université of Bristol et nous avons utilisé pour ce faire **[SC33][SC49][SC76]**. Des modèles plus sophistiqués ont néanmoins été établis notamment celui basé sur les calculs de liaisons fortes (« tight-binding model») qui prend en compte la distribution des atomes d'azote et permet d'expliquer les effets observés aux concentrations ultra-diluées et ceux induits par les agglomérats (paires, triplets) aux fortes concentrations [25][26].

En terme de croissance, les fortes différences d'énergie de liaison entre les binaires constituant ces alliages (GaAs, GaN, InN pour le GaInNAs) font que l'azote présente une solubilité et une miscibilité restreintes et que son incorporation a tendance à se faire sous forme d'agrégats ou de phases séparées **[SC21]**. Technologiquement, seules des couches présentant une faible teneur en azote sont donc réalisables, justifiant l'appellation « nitrures dilués » de ces alliages (en opposition aux InGaAs/GaN). Par ailleurs, pour obtenir des couches spatialement homogènes, la croissance doit être faite à faible température (typiquement à 420°C en EJM et à 470°C en EPVOM, soit au moins 100°C en dessous des températures standards utilisées pour les couches d'InGaAs ou d'AlGaAs). Ces conditions de croissance conduisent à des concentrations élevées de défauts et, par conséquent, à de courtes durées de vie radiative. Cet effet est bien illustré en Fig. 4, où l'on peut observer la dégradation rapide du niveau de photoluminescence et son élargissement spectral avec l'augmentation d'azote. Une solution pratique connue pour réduire la quantité de défauts consiste à recuire les échantillons soit in-situ (dans le bâti d'épitaxie) soit ex-situ (dans un four à recuit thermique rapide). Nous nous sommes donc intéressés aux effets des recuits ex-situ sur des échantillons encapsulés ou non. Comme illustré en Fig. 5 (a), pour les puits de GaInNAs/GaAs émettant nativement à 1352 nm, non encapsulés mais placés sous un wafer de GaAs et sous un flux d'azote,

les recuits à 700 °C conduisent à l'amélioration d'un ordre de grandeur du niveau de photoluminescence mais s'accompagnent d'un décalage spectral significatif (~25 meV) et non désiré de l'émission vers le bleu [SC4]. Cet effet doit être pris en compte dès la conception et conduit à utiliser des teneurs en azote plus élevées pour atteindre une longueur d'onde d'émission fixée après recuit. Par extension, l'influence du recuit sur des échantillons déjà recuits in-situ et encapsulés sous une couche de silice a été étudiée pour évaluer la faisabilité de réaliser côte à côte des sections passives et actives dans une même structure [SC10][SC11]. Les résultats (voir Fig. 5 (b)) montrent que si le dépôt est réalisé par pulvérisation (sputtering), l'émission peut être fortement décalée (140 meV) vers les grandes énergies alors qu'elle reste fixe si la couche de SiO<sub>2</sub> est déposée par évaporation (PECVD). L'origine du décalage spectral a été identifiée par analyse SIMS comme résultant de la diffusion du gallium et de l'indium vers l'extérieur du puits quantique et promue par l'apparition de défauts en surface induits par la pulvérisation. A l'aide de calculs de bande (utilisant le modèle BAC) et en tenant compte des effets de diffusion, nos collaborateurs de l'University of Bristol sont parvenus par la suite à reproduire les observations expérimentales pour des diffusions de l'indium et du gallium de l'ordre de 7 nm [SC33] et à évaluer la dégradation du pic de gain induit par ce type de recuit [SC49].

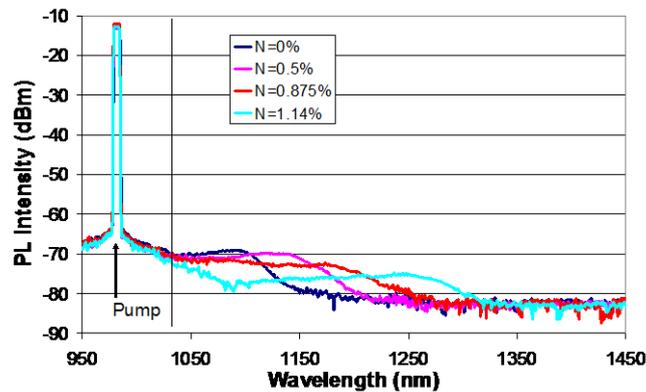


Fig. 4 : Evolution de la photoluminescence de puits de 6nm de  $Ga_{0.65}In_{0.35}N_xAs_{1-x}$  en fonction de la concentration en azote.

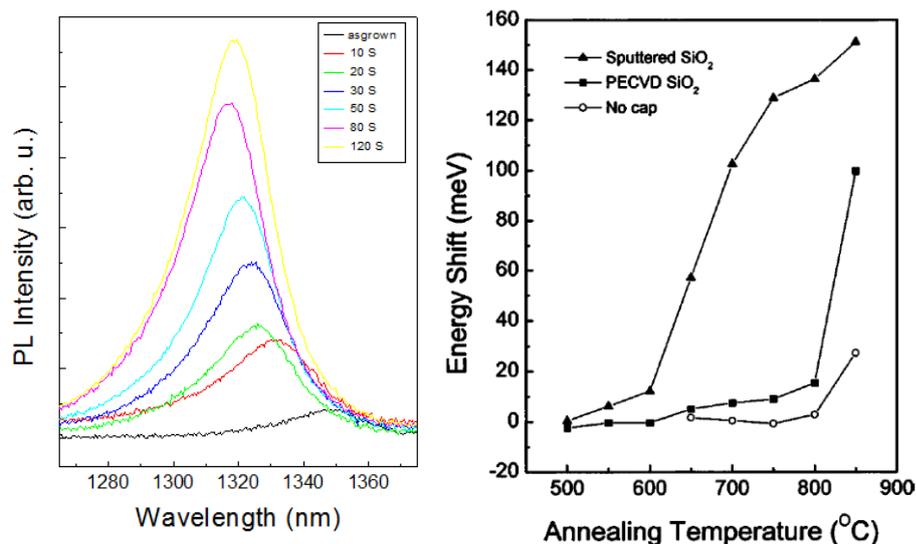


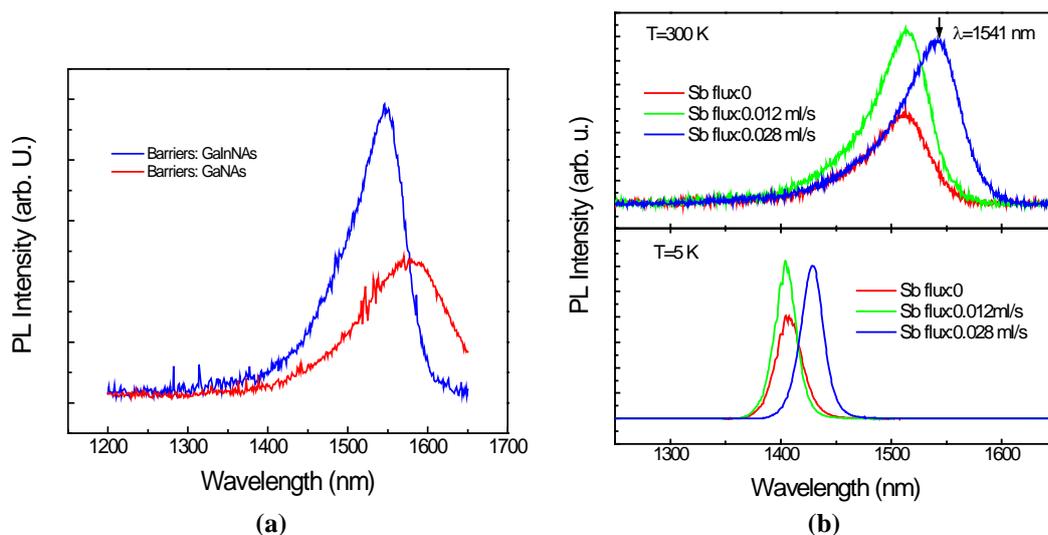
Fig. 5 : (a) Effets d'un recuit à 700°C sur un puits de 7nm de  $Ga_{0.65}In_{0.35}N_{0.019}As_{0.981}$  [SC4] (b) Effets d'un recuit sur des puits de GaInNAs encapsulés sous une couche de silice déposée par évaporation ou par pulvérisation [SC11].

Comme indiqué ci-dessus, l'incorporation d'azote étant difficile et les effets de recuits conduisant à un décalage de l'émission vers le bleu, il a fallu développer des stratégies pour contourner ces limitations et parvenir à obtenir une émission aux grandes longueurs d'onde, surtout pour atteindre la bande C.

La méthode la plus simple, présentée plus haut, exploite une faible température de croissance au prix d'une augmentation de la quantité de défauts [27][28]. La seconde approche, souvent combinée à la précédente, s'appuie sur une modification de la structure de bande des puits quantiques pour créer des structures dont la largeur effective est plus grande et donc atteindre des longueurs d'onde plus élevées. Ainsi, une variété de structures intégrant des barrières intermédiaires d'InGaAs [SC26], de GaInNAs non contraint [SC19] de GaAsN [SC19] ou de super-réseaux de GaAsN/GaInNAs [29] ont été proposées et validées avec succès (voir Fig. 6(a)).

L'utilisation de structures de type II en « W » à base de GaAsSb/GaInNAs a aussi été mise en œuvre pour la réalisation de lasers émettant par la tranche à 1550 nm au prix d'une efficacité réduite et d'une croissance complexe [30][31].

Pour notre part, avec le National Research Council Canada [32][SC32], comme Stanford University [33] et le Laboratoire de Photonique Nanostructures [34], nous avons préféré exploiter l'ajout d'antimoine pour obtenir des puits GaInNAsSb de type I. Dans ce cas, l'antimoine joue essentiellement un rôle de surfactant favorisant une plus grande incorporation de l'azote et permet ainsi d'émettre à 1550 nm, comme on peut le voir en Fig. 6(b).



**Fig. 6 : Photoluminescence de puits quantiques de (a) GaInNAs/Ga(In)NAs/GaAs [SC19] et (b) GaInNAsSb [SC32].**

Les équipementiers préférant éviter les temps d'indisponibilité liés à l'utilisation de l'ultravide en EJM et souhaitant bénéficier de vitesses de croissance plus élevées associées à l'EPVOM, nous avons comparé les matériaux issus des deux types de machines de croissance. Nous avons pu observer que les puits quantiques à barrières intermédiaires épitaxiés par EPVOM ne suivaient pas nécessairement les tendances établies pour des structures réalisées en EJM, phénomène que nous avons assigné à une incorporation différente de l'azote [SC26]. Par ailleurs, la croissance de GaInNAs par EPVOM s'est avérée moins compétitive que par EJM, d'abord parce que seul le 1-1-diméthylhydrazine, précurseur coûteux, permet d'introduire, sous forts flux, de l'azote dans les structures [35] et que celles-ci présentent aussi une longévité moindre [36][37]. De ce fait, nous avons préféré capitaliser sur nos collaborations avec les centres utilisant

l'EJM (Tampere University of Technology, National Research Council Canada, University of Sheffield) pour la réalisation de nos composants.

### **1.3. Lasers à cavité verticale émettant par la surface : les VCSEL**

Comme indiqué précédemment et suivant la tendance des développements technologiques pour les télécommunications, l'objet de ma Coopération Scientifique portait sur la réalisation de VCSEL exploitant le GaInNAs comme région active. Cependant, comme l'University of Strathclyde n'était pas encore doté d'une salle blanche suffisamment équipée (avant 2002) et au vu des compétences en laser à solide de l'équipe encadrante (M. Dawson, E. Bente, J. Girkin), nous nous sommes orientés vers l'étude de VCSEL pompés optiquement plutôt que de nous intéresser aux sources à injection électrique et d'entrer directement en compétition avec les laboratoires académiques et industriels établis dans ce domaine.

Ce choix pragmatique, qui peut paraître anodin, ouvre en fait des perspectives complémentaires :

- les croissances ne nécessitant pas de contrôler les dopages, les interactions avec les groupes d'épitaxie en sont facilitées et plus ouvertes,
- la conception des structures est différente et,
- l'orientation des travaux est aussi distincte, plus portée sur la caractérisation matériau, l'émission haute puissance (mW pour ces lasers à microcavité) et l'étude de l'accordabilité en longueur d'onde qu'une vision centrée sur la recherche de haute performance (en régime CW ou de modulation rapide).

Dans un premier temps, j'ai donc travaillé sur la conception de VCSEL pompés optiquement. L'injection n'étant plus électrique, les structures sont non dopées et présentent donc moins de pertes, moins d'échauffement thermique (dans les DBR) et peuvent utiliser des DBR à interfaces abruptes plus courts et plus efficaces. Par ailleurs, n'ayant plus de restrictions liées à l'injection de porteurs, la cavité du VCSEL peut être allongée pour favoriser l'émission monomode latérale [38] et augmenter l'absorption mono-passage du faisceau du laser de pompe (dans le cas d'un pompage dans les barrières c'est-à-dire lorsque l'énergie de la pompe est plus grande que le gap des barrières des puits quantiques utilisés). Par contre, la structure et, en particulier, les miroirs doivent être modifiés pour faciliter l'injection de la pompe (i.e. se comporter globalement comme un antireflet) mais aussi maximiser son absorption dans la microcavité et ainsi optimiser la conversion sans recourir à une absorption résonante pour limiter la sensibilité environnementale du composant. Ce type de dessins de structures a donné lieu à une publication [SC3] et a été largement réutilisé pour la conception de VECSEL [SC53][39][40]. Par ailleurs, une variante utilisant l'absorption résonante pour VECSEL fonctionnant en régime de synchronisation de modes a été l'objet de mon brevet [SC-P1].

Un certain nombre de structures suivant ces dessins ont été réalisées par le CEA-LETI dans le cadre de ma Coopération Scientifique mais la qualité des puits quantiques obtenue n'a pas permis d'atteindre l'action laser. Parallèlement, des échantillons ayant de longues cavités mais sans optimisation de l'absorption de la pompe ont été fabriqués

dans le cadre d'une collaboration informelle avec Markus Pessa de Tampere University of Technology. Avec une pompe uniquement absorbée dans les puits ( $\lambda_p=980$  nm), ces structures ont permis de démontrer l'émission CW en bande O, avec jusqu'à 4 mW de puissance de sortie monomode et une bonne tenue en température [SC96][SC16], performances à l'état de l'art comme l'atteste la Fig. 7.

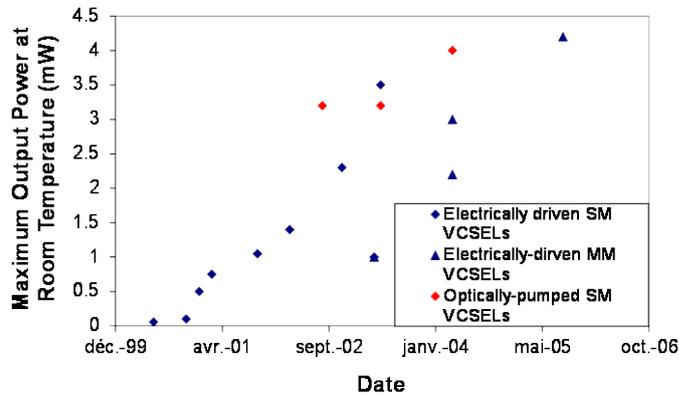


Fig. 7 : Résultats et positionnement des travaux sur les VCSELs en GaInNAs [SC48].

Etant parvenu à obtenir l'émission VCSEL en bande O, j'ai souhaité au cours de mon projet « jeune chercheur » relever le défi de réaliser un VCSEL sur substrat GaAs fonctionnant en bande C. Comme indiqué ci-dessus, nous avons étudié une variété de régions actives à base de GaInNAs(Sb) pour l'émission à 1550 nm. La voie la plus prometteuse, en collaboration avec J. Gupta du Canadian National Research Center, exploitait des puits GaInNAsSb. Nous avons donc dessiné une structure VCSEL et l'avons complété par un miroir supérieur en diélectrique. A la seconde tentative, comme illustré en Fig. 8, nous avons obtenu l'émission laser en régime pulsé en pompant la structure avec un laser Nd:YAG ( $\lambda_p=1064$  nm) fonctionnant en régime de mode déclenché [SC34]. Ce résultat a été publié six mois après la démonstration du groupe de Stanford d'un VCSEL à injection électrique utilisant le même matériau actif et opérant aussi en régime pulsé à 1534 nm [41]. Ce même groupe réussit à obtenir l'opération en régime continu jusqu'à 20 °C, trois ans plus tard [42].

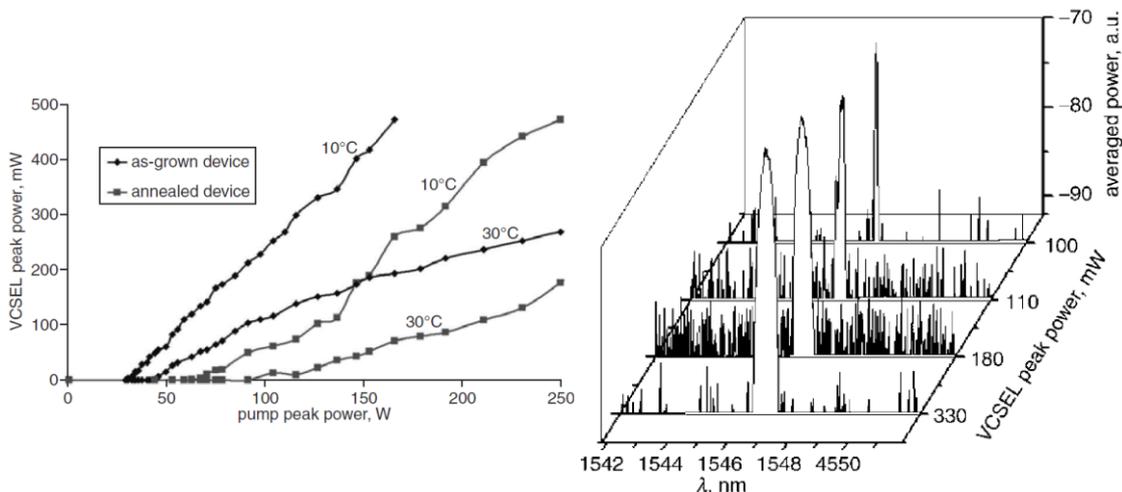


Fig. 8 : Caractéristiques d'émission en bande C d'un VCSEL en GaInNAsSb [SC34].

Comme l'indique la Fig. 7, si la viabilité des VCSEL en GaInNAs fonctionnant à 1,3  $\mu\text{m}$  a été établie, l'extension de l'utilisation des nitrures dilués pour la réalisation de VCSEL à 1,55  $\mu\text{m}$  n'a pas donné les résultats escomptés permettant d'envisager une réalisation sans matériau à gain à base d'InP. Industriellement, à la fin de 2003, Infineon avait obtenu des VCSEL en GaInNAs pour une émission en bande O avec un niveau de performances et de fiabilité suffisants pour pouvoir assurer leur industrialisation à grande échelle [43]. Leurs concurrents mirent un peu plus longtemps (jusqu'à fin 2008) avant d'atteindre le même niveau [44], mais même ces délais ne permirent pas au marché de se concrétiser.

Pour augmenter le degré de fonctionnalité des wafers VCSEL, dans le cadre du projet EPSRC « Photon », Roberto Macaluso, doctorant supervisé par Martin Dawson, et moi avons adapté la méthode de fabrication de matrices de microcavités dont la longueur d'onde varie spatialement [45] à une opération autour longueur d'onde de 1,3  $\mu\text{m}$ . L'objectif était de pouvoir implémenter un multiplexage grossier en longueur d'onde (Coarse WDM) pour des VCSEL pompés optiquement. Techniquement, les microcavités étaient définies par deux DBR en GaAs/AlOx et deux couches d'AlGaAs de composition différente placées à l'intérieur de la cavité qui servaient, après oxydation humide, à modifier la longueur effective de la cavité grâce à la formation d'une couche d'AlOx biseauté **[SC6][SC7]**. Cette méthode permit d'obtenir une accordabilité de la longueur de résonance de la cavité passive sur une grande plage (>100 nm) mais la réalisation pratique de VCSEL ne fut jamais tentée faute d'accès à des structures spécifiques. Cette approche se prêtait aussi au test de l'influence du décalage entre le pic de gain et la résonance de la cavité sur les performances du VCSEL. Cependant, j'ai préféré mener ce type d'étude à l'aide d'une configuration de VCSEL accordable.

En effet, à partir de 2005, j'ai conduit avec Nicolas Laurand, doctorant sous ma supervision, une étude de VCSEL accordables. Ces travaux étaient inspirés par les démonstrateurs de Nortel Networks qui s'apprêtait à commercialiser des VCSEL accordables autour de 1550nm pompés optiquement [46] en tant que laser de remplacement pour des sources défectueuses du réseau de communication.

Cette activité, couvrant la période 2005-2010, s'est déclinée en trois sous parties :

- la première visant à continuer de caractériser des propriétés des structures en GaInNAs fonctionnant autour de 1300 nm, et plus spécialement le gain et sa dépendance en température,
- une seconde action cherchant à améliorer les performances de ces sources, et enfin,
- les premières étapes d'un transfert vers les courtes longueurs d'onde pour ouvrir de nouvelles applications potentielles.

L'architecture de test retenue pour la réalisation de ces VCSEL accordables comprenait la structure épitaxiée d'un VECSEL (soit un DBR et une zone active) et une fibre dont la gaine extérieure était en polyimide et au bout de laquelle un miroir diélectrique avait été déposé (commerciallement) par évaporation (cf. Fig. 9(a)). L'accord en longueur d'onde provenait classiquement du changement de la distance entre ces deux éléments comme pour les autres VCSEL accordables à base de MEMS [47]. Cet arrangement est identique à celui de Micron Optics Inc [48] hormis que la zone de gain est en GaInNAs/GaAs plutôt qu'en InGaAsP/InP. Ainsi, nous avons pu démontrer une

accordabilité sur 23 nm avec une puissance émise maximale de 0,2 mW lorsque le composant était pompé à 980 nm et une émission accordable sur 17 nm avec 0,15 mW de sortie sous excitation à 808nm [SC110], résultats comparables à ceux reportés en [48]. Les paramètres extraits de ces données sont un coefficient de gain  $g_0=4200\text{cm}^{-1}$  et un facteur de compression avec la température de  $\sim 56^\circ\text{C}$  [SC-B1]. Nous avons, par la suite, tenté de faire une mesure de la raie d'absorption du méthane à  $\sim 1305,5$  nm pour qualifier la largeur de raie d'émission de cette source mais la stabilité du laser n'était pas suffisante.

Pour pallier à ce problème et améliorer les performances, nous avons réalisé un laser dont la cavité était équivalente à une cavité plan-concave et était donc intrinsèquement stable. Pour cela, plutôt que de réaliser un miroir courbe au bout de la fibre comme le fait le Laboratoire de Photonique et des Nanostructures [49], nous avons intégré une microlentille en époxy sur la région active [SC43] (cf. Fig. 9(b)). Comme il nous restait peu d'échantillons à base de GaInNAs disponibles, nous avons validé le principe à la longueur d'onde centrale de 1060 nm (avec un échantillon de VECSEL fourni par Samsung Advanced Institute of Technology). Nous avons ainsi pu fabriquer une source monomode accordable sur 13 nm et émettant jusqu'à 10 mW pour 60 mW de pompe (à 808 nm). Néanmoins, dans ce type de laser, la puissance maximale émise est souvent limitée par les dimensions (typiquement  $<10\ \mu\text{m}$ ) permettant l'émission monomode. Vue la configuration laser étudiée, changer la fibre d'entrée/sortie pour une fibre amplificatrice (lorsque disponible) et ainsi construire une architecture de MOPA (master oscillator power amplifier – cf. Fig. 9(c)) offre une manière d'optimiser l'utilisation de la puissance de pompe disponible et augmenter la puissance de sortie globale du système sans augmenter significativement sa complexité. N'ayant pas de laser à base de GaInNAs(Sb) opérationnel à 1550 nm, c'est une approche que nous avons démontré avec une structure VECSEL à base d'InGaAsP/InP fonctionnant à 1550 nm et réalisée au Laboratoire de Photonique et des Nanostructures. Sans optimisation réelle, pour une puissance de pompe de 120 mW à 980 nm, nous avons ainsi obtenu une émission accordable sur 10 nm avec une puissance maximale de sortie de 3,2 mW (incluant 3,8 dB d'amplification dans une fibre dopée erbium commerciale) [SC56].

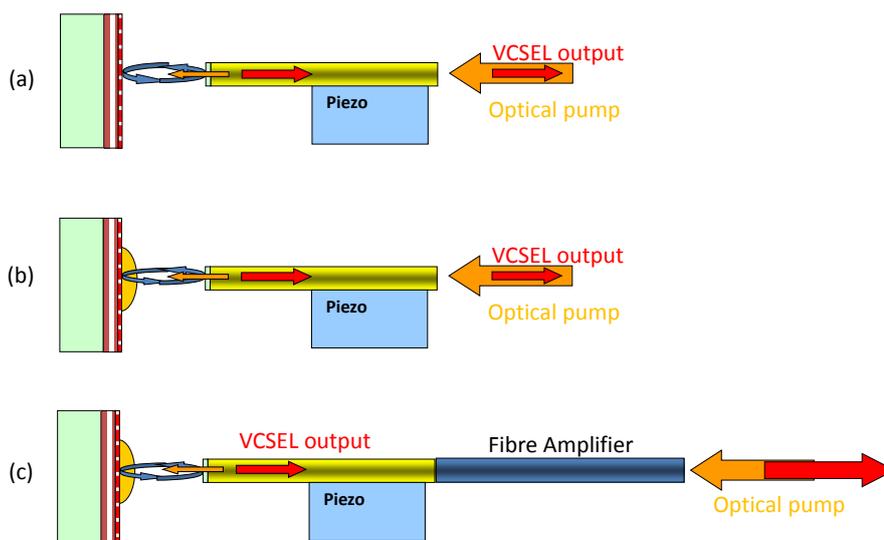
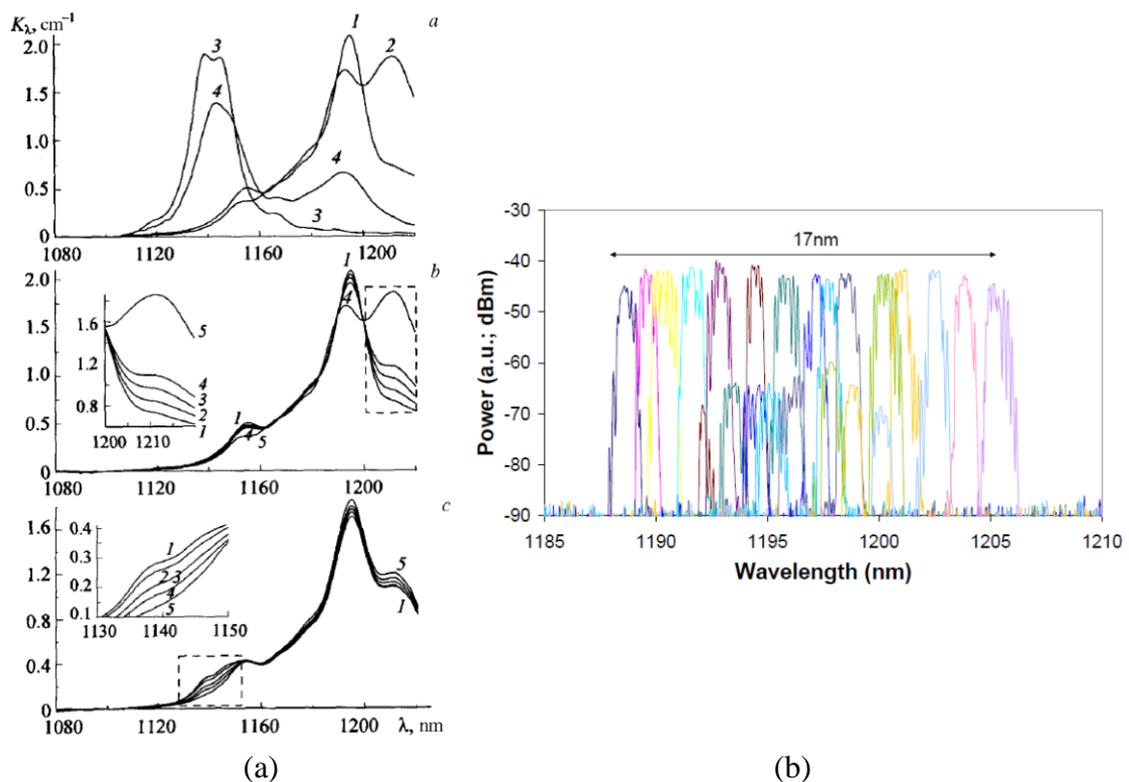


Fig. 9 : Configurations de VCSEL accordables étudiées : (a) plan-plan, (b) plan-concave (c) MOPA.

A la recherche d'applications dans d'autres domaines que celui des télécommunications, et dans le cadre de la thèse de Sharon Vetter, nous avons réalisé une étude sur les VCSEL accordables avec un composant fonctionnant autour de 1200nm qui devait servir de point de départ pour la mise au point de nouvelles sources pouvant être utilisées soit pour la détection d'indice d'octane des carburants soit pour la tomographie par cohérence optique (OCT). Ces travaux ont été menés principalement suite à une rencontre avec l'équipe R&D de Honeywell qui s'intéressait à développer un capteur d'indice d'octane pour permettre de contrôler et d'optimiser le fonctionnement des moteurs automobiles. Or d'après l'étude de V.G. Muradov et al de la Russian Academy of Sciences [50], les longueurs d'onde intéressantes pour discriminer entre les différentes essences et leurs mélanges à partir de leur composition relative en groupes  $\text{CH}_2$ ,  $\text{CH}_3$  et  $\text{CH}$  sont 1155, 1194 et 1210 nm. En reprenant la configuration plan-plan avec un pompage dans les barrières à 808 nm d'une structure à VCSEL à base de puits quantiques en GaInNAs, nous sommes parvenus à obtenir une émission de 1188 à 1205 nm, une gamme peu trop juste pour permettre l'identification par mesure d'absorption différentielle (entre 1194 et 1210 nm). Pour étendre la gamme spectrale, une seconde structure incorporant des puits quantiques d'épaisseur différente avait été conçue et réalisée mais les performances laser obtenues furent moindres du fait d'une croissance de moins bonne qualité.



**Fig. 10 :** Spectres (a) d'absorption de différentes essences et de leur mélange [50], (b) cumulés d'émission multimode (latéral) du VCSEL accordable étudié [SC145].

Ces travaux s'intégraient aussi dans le cadre du développement de sources pour la tomographie par cohérence optique suite au regain d'intérêt pour les émetteurs à base de lasers rapidement accordables en longueur d'onde sur une gamme étendue [51][52]. En effet, ces derniers permettent d'obtenir une brillance élevée et des taux de modulation compatibles avec l'acquisition d'images de bonne résolution à cadence vidéo. La difficulté principale de l'approche à base de VCSEL était d'obtenir une gamme de

balayage suffisamment large. Leur avantage potentiel résidait, par contre, dans leur cavité intrinsèquement courte qui permet des vitesses de balayage supérieures à celle accessibles par les autres lasers (émettant par la tranche). La première démonstration d'un VCSEL adapté à l'OCT fut présentée en 2012 par Praevium Research, Inc. [53]. Il s'agissait d'un VCSEL accordable par MEMS avec une structure active en InGaAsP/InP reportée sur un miroir large bande AlO<sub>x</sub>/GaAs et miroir supérieur suspendu en matériaux diélectriques. Sous pompage optique à 980 nm, le composant pouvait être accordé de 1211 nm à 1372 nm avec une cadence de balayage pouvant atteindre 1 MHz. Depuis, l'utilisation de ce composant pour l'OCT a été validée [54][55].

#### **1.4. Amplificateurs optiques à semiconducteur à cavité verticale: les VCSEA**

Les VCSEA sont, comme leur nom l'indique, un type d'amplificateur optique à semiconducteur dont la structure est proche de celle d'un VCSEL et qui se comporte comme un filtre actif, c'est à dire un filtre pour lequel le niveau de gain/perte ainsi que la bande passante peuvent être modifiés. La première démonstration de ce genre de composants a été effectuée en 1991 par le groupe de K. Iga, l'inventeur du VCSEL [56]. Au début des années 2000, un certain nombre de VCSEA avaient été réalisés pour des applications de télécommunications en espace libre ou fibrées aux longueurs d'onde de 850 nm [56][57], 1300 nm [58], et 1550 nm [59]. L'utilisation de ces composants en tant que préamplificateurs pour la détection de signaux modulés à 10 Gbit/s avait aussi été établie [60].

La similarité structurelle des VCSEA et VCSEL fait que l'étude des VCSEA n'apportait pas vraiment d'autres défis que ceux déjà identifiés pour la réalisation de VCSEL fonctionnant aux grandes longueurs d'onde. Par contre, les travaux réalisés offraient la possibilité d'étoffer la gamme de caractérisation des composants et matériaux utilisés. De plus, cette approche apparaissait comme une voie viable pour obtenir, aux grandes longueurs d'onde et sur GaAs, une amplification certes sélective mais indépendante à la polarisation et ce avec des matériaux à gain nécessairement en compression. L'utilisation d'empilement de boîtes quantiques d'épaisseur sous-mono-couche s'avérera être une autre méthode pour obtenir cette dernière fonctionnalité [61].

Après une courte étude théorique [SC84] et ayant reçu une structure VCSEL à base de GaInNAs de Tampere University of Technology, j'ai testé les performances en amplification de cette structure. Roberto Macaluso avait en parallèle réalisé, à partir du même wafer, une série d'échantillons permettant l'optimisation des performances. Techniquement, la réflectivité de ce miroir avait été amoindrie par gravure sèche paire par paire des couches du DBR supérieur et la réponse en amplification analysée. Ces résultats, à l'état de l'art (voir Fig. 11), avaient donné lieu à la publication d'une lettre [SC5], qui servit de référence pour mon projet « jeune chercheur » qui portait sur la mise au point de VCSEA en GaInNAs pour applications télécommunications en bande O et C et qui était suivi par la start-up Kamelian Ltd (dont le produit principal est des SOA à base d'InGaAsP/InP).

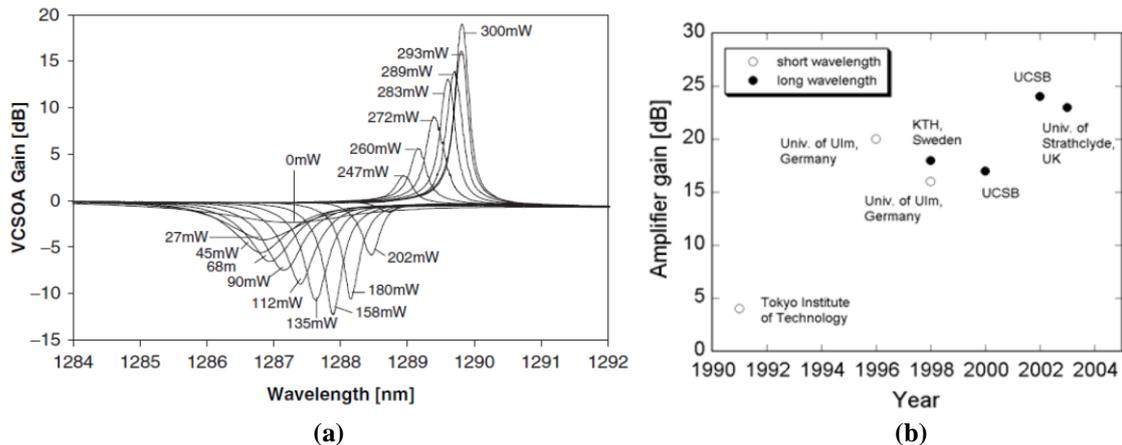


Fig. 11 : (a) du spectre de gain d'un VCISOA en GaInNAs [SC-B1] et (b) positionnement international de ces travaux [62].

Avec Roberto Macaluso et Anthony Clark, autre doctorant de Martin Dawson, travaillant sur les SOAs en GaInNAs, une étude plus complète des performances de cette première série d'échantillons et, en particulier, de la dépendance en température fut publiée [SC13]. Cherchant à optimiser les performances et permettre une évaluation système (i.e. quantification du gain mais aussi du bruit), une comparaison des résultats avec une structure comportant plus de puits quantiques fut réalisée [SC25]. L'ensemble de ces résultats ainsi que l'extension des travaux sur l'accordabilité aux VCISOA furent intégrés dans le chapitre de livre [SC-B1]. Ces résultats étaient pour l'essentiel équivalents à ceux du groupe de Joachim Piprek de l'USCB mais avec une région active monolithique en GaInNAs/GaAs plutôt qu'en InGaAsP/InP reportée par fusion de wafers [63][64]. Pour se rapprocher de l'évaluation système (télécom) de ces composants, nous avons aussi caractérisé la dynamique de gain de ce type d'amplificateurs par modulation croisée de gain résolue en temps [SC31]. Leur réponse à des signaux sinusoïdaux [SC38] fut aussi évaluée et rapportée en mettant l'accent plus particulièrement sur l'introduction de retards pouvant atteindre 100ps du fait des effets de ralentissement de lumière induits par la microcavité. Ces derniers résultats étaient du même ordre que ceux obtenus par le groupe de Connie Chang-Hasnain, University of California [65] et ont été récemment repris pour étendre la gamme spectrale de retards atteignables grâce à l'utilisation en cascade de VCSEL présentant des résonances décalées [66].

Sinon, depuis lors, les travaux sur les VCISOA sont restés peu nombreux mais la tendance [67] a surtout porté sur l'étude de l'anisotropie de gain résiduelle [68], la bi-stabilité [69][70] et son utilisation pour réaliser des portes logiques optiques [71][72]. Des VCISOA en GaInNAs à injection latérale électrique de porteurs chauds (Hellish) ont aussi été démontré récemment par l'University of Essex [73] pour réaliser de l'amplification sur des diamètres plus larges.

## **1.5. Lasers à cavité verticale étendue émettant par la surface : les VECSEL**

Les lasers à cavité verticale étendue émettant par la surface, les VECSEL, aussi connus sous l'appellation de lasers à disques semiconducteurs, sont des VCSEL dont le miroir supérieur est un miroir d'optique conventionnelle utilisé pour former une cavité laser étendue stable. En tant que tels, ce sont des lasers à solide dont le milieu à gain est non pas un milieu diélectrique mais un milieu à semiconducteur. De cette vision des VECSEL découle directement la motivation principale pour les étudier: la possibilité d'obtenir des émissions de forte puissance tout en maintenant une excellente qualité de faisceau émis (faible facteur de divergence  $M^2 \sim 1$  par rapport à un faisceau Gaussien).

La génération de faisceaux puissants et de bonne qualité est particulièrement adaptée pour la réalisation de lasers de pompe, d'autant plus lorsque cette forte brillance s'accompagne d'un faible niveau de bruit. Dans le domaine des télécommunications par fibres optiques (intercontinentales), les lasers de pompe les plus demandés sont les lasers émettant à la longueur d'onde de 980 ou de 1480 nm, qui servent d'excitation aux amplificateurs à fibres dopées erbium (EDFA), ces derniers permettant de régénérer périodiquement de manière tout optique des signaux transmis en bande C (centrale – 1530-1565 nm) ou L (longue – 1565-1625 nm). Coherent Inc, ayant identifié très tôt le potentiel de la technologie VECSEL, consacra la première partie de ses développements aux VECSEL émettant à 980 nm et valida leurs bénéfices pour pomper des EDFA en 2002 [74].

Les autres lasers de pompe d'intérêt pour le secteur des télécommunications sont les sources qui permettent d'établir une amplification par effet (de diffusion inélastique) Raman dans la fibre (aluminosilicate) standard. Typiquement, les longueurs d'onde les plus demandées sont dans ce cas sont 1240 nm pour obtenir de l'amplification en bande O et 1480 nm pour faciliter l'amplification en bande C. Si pour la gamme 1400-1480 nm, des diodes lasers à ruban en InGaAsP/InP avec 250 mW de puissance couplée dans une fibre étaient disponibles [75], la seule méthode pour obtenir un laser puissant à 1240 nm était d'utiliser un laser à fibre dopée ytterbium ( $\lambda \sim 1060$  nm), lui-même pompé à 980 nm et de cascader trois conversions Raman dans une fibre standard [76] ou une seule conversion Raman dans une fibre en verre phosphaté [77]. Le projet « preuve de concept » soutenu par l'agence régionale de développement économique de l'Ecosse, Scottish Enterprise, et mené par Martin Dawson était une étude de faisabilité d'un VECSEL à base de GaInNAs/GaAs comme laser de pompe Raman. Le post-doctorant recruté sur ce contrat était mon collègue John-Mark Hopkins qui rejoint l'University of Strathclyde six mois après mon arrivée. Il était en charge de la démonstration laser alors que je devais m'occuper de la conception des structures à semiconducteur vu les similarités avec les dessins avec les VCSEL. N'ayant pas d'épitaxie en interne mais seulement à travers des collaborations extérieures, l'objectif du projet a été pragmatiquement défini comme la démonstration d'une source à semiconducteur de puissance fonctionnant à 1300 nm. Ce choix de longueur d'onde ne correspondait pas à celles indiquées ci-dessus, et donc la source créée ne pourrait effectivement servir de pompe pour une amplification en bande C qu'après trois conversions Raman cascades. Néanmoins, cela permettait de bénéficier des études matériaux et étalonnages faits par ailleurs, un avantage majeur lorsqu'on travaille avec des nouveaux matériaux. Dans le cadre d'une collaboration informelle avec le groupe de Marcus Pessa de Tampere University of Technology, une structure à cavité courte comprenant 10 puits quantiques

fut épitaxiée et recuite dans différentes conditions (de température, durée). Sous 9 W de pompage à 808 nm, un des échantillons soigneusement monté pour faciliter la dissipation thermique à l'aide d'une plaquette en diamant (voir chapitre 2) permit d'obtenir l'émission d'un faisceau TEM<sub>00</sub> (monomode latéral) avec jusqu'à 600 mW de puissance de sortie (voir Fig. 12) [SC12]. Avec ce laser, nous avons établi le record de la plus grande longueur d'onde d'émission d'un VECSEL sur substrat GaAs. Le VECSEL en GaInNAs le plus proche en longueur d'onde fut réalisé par EPVOM par Marburg University et atteint 1270 nm avec de moins bonne performance ( $P_s < 0,15$  W) [78]. La démonstration de l'application d'amplification Raman dans une fibre standard viendra plus tard, pendant la thèse de Sharon Vetter, une fois que nous avons eu accès à des structures de gain fonctionnant à 1220 nm [SC156]. Ces résultats ont été repris et améliorés par la suite par Tampere University of Technology grâce à l'utilisation de sources plus puissantes et de fibres plus adaptées (possédant un gain Raman plus élevé favorisé par une concentration élevée en germanium) [79][80]. Pour gagner en compacité, des diodes lasers évasées utilisant des puits quantiques en GaInNAs ont aussi été démontrées avec de bonnes performances (1W ;  $M^2 \sim 1.4$ ) [81].

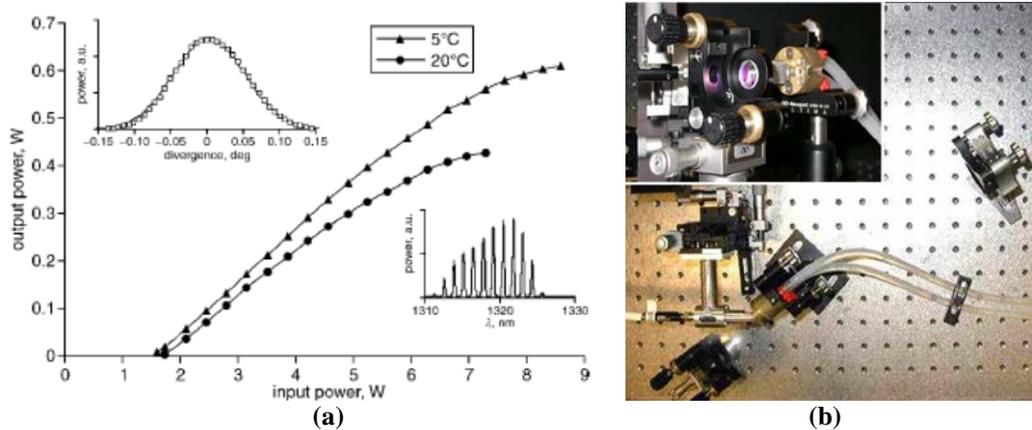
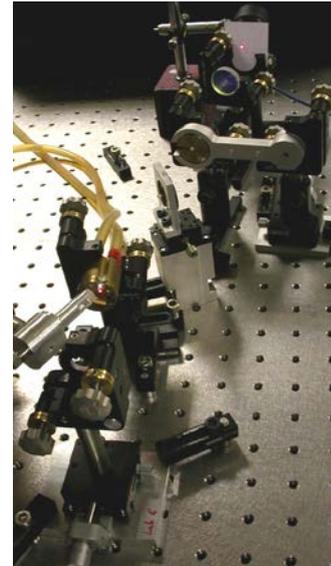


Fig. 12 : (a) Image et (b) performances du VECSEL en GaInNAs émettant à 1320 nm [SC12].

Cherchant à faire évoluer notre activité au-delà de recherches orientées vers les applications pour les télécommunications, nous avons cherché à identifier et explorer de nouveaux domaines d'utilisation potentiels pouvant bénéficier d'émetteurs de puissance basés sur le GaInNAs/GaAs. Plus spécifiquement, les études ont porté sur :

- des sources pour la projection cinématographique petit ou grand format
- des émetteurs générant de la lumière dans la gamme spectrale centrée autour du jaune (540-600 nm) qui était difficilement accessible jusqu'à lors, et
- des lasers de pompe pour des lasers émettant dans mi infra-rouge basées sur des ions thulium/holmium.

En effet, en parallèle des travaux sur les pompes Raman, notre activité s'est poursuivie dans le cadre du projet européen NATAL avec pour objectif spécifique de réaliser une source multi-watt rouge de forte brillance avec pour application principale une utilisation dans les projecteurs cinématographiques de prochaine génération pour lesquelles le gamut de couleurs devrait être maximisé. Nous avons validé l'approche en rapportant le doublage de fréquence du laser démontré ci-dessus à l'aide d'un cristal de LBO placé intra-cavité qui permet de générer ~5mW de puissance à 660 nm (voir Fig. 13 ci-joint). Nous avons ainsi pu identifier les difficultés associées qui seront expliquées au prochain chapitre et qui émanent de la gestion de la polarisation et, pour cette structure, du vieillissement de la puce de gain



**Fig. 13 : (a) Image d'un VECSEL en GaInNAs doublé en fréquence**

**[SC121].** L'adaptation en longueur d'onde et la montée en puissance ont été réalisées par le groupe de Mircea Guina, successeur de Markus Pessa à la tête de l'équipe d'épitaxie de Tampere University of Technology. A l'issue du programme, ils avaient ainsi pu démontrer l'émission (multi)-watt de lumière à 615 nm par doublage de fréquence d'un VECSEL en GaInNAs à l'aide d'un cristal de BBO [82][83].

De la même manière, la génération de lumière dans la gamme visible 540-600 nm était considérée comme un défi stratégique à relever au vu des retombées applicatives potentielles. Parmi celles-ci figurent l'utilisation de guides lasers ( $\lambda=589$  nm) pour la correction des turbulences atmosphériques en astronomie [84][85], de sources pour la dermatologie et, plus spécialement, pour le traitement des télangiectasies rouges [86] et angiomes [87] ou encore pour l'ophtalmologie pour traiter par photo-coagulation de l'oxyhémoglobine ( $\lambda=577$  nm) des rétinopathies diabétiques [88]. Des applications en cytométrie en flux [89] et en microscopie [90] peuvent aussi bénéficier de ces sources. Techniquement, les solutions à base de lasers à solide disponibles impliquaient soit le doublement de fréquence de lasers à cristaux dopés aux ions néodyme et fonctionnant sur des raies de faible émissivité [91][92], des lasers à cristaux de forsterite dopés chrome aussi doublés en fréquence [93], ou encore la somme de fréquence des deux raies de lasers Nd:YAG (1064 et 1314 nm pour émission à 589 nm) [94]. Les approches fibrées se basaient, quant à elles, sur des lasers ytterbium pompés à 980 nm, convertis par effet Raman et doublés en fréquence [95]. Au niveau des approches à base de lasers à semiconducteur, ce défi a donné lieu à deux grandes tendances, une voie qui visait à étendre les sources à base d'InGaN/GaN vers les grandes longueurs d'onde (émission dans le vert voire jaune) [96] et une autre voie, plus traditionnelle, basée sur le doublage de fréquence de sources émettant dans la bande 1080-1260 nm. Dans ce cadre et au cours de la thèse de Sharon Vetter, nous avons initié des travaux sur les VECSEL en GaInNAs opérant aux courtes longueurs d'onde (~1200 nm) **[SC51]** pour évaluer le potentiel de ces structures moins contraintes par rapport à celles réalisables sans azote [97]. Comme la plupart des applications envisagées exigent des sources de forte puissance (>10W), l'activité s'est à nouveau orientée vers les questions de gestion de la thermique (voir chapitre suivant) et vers le raffinement du matériau de la structure de gain. Ces travaux ont été au cœur des développements menés par les groupes d'épitaxie (M. Guina) et de développement laser (O.G. Okhotnikov) de Tampere University of

Technology de 2009 à 2014 et ont résulté, in-fine, en une source doublée en fréquence à base de GaInNAs émettant 7 W dans le jaune [98]-[101] et une source à puits quantiques InGaAs générant 20 W [102]. Globalement, les VECSEL offrent une solution simple et performante pour l'émission dans le jaune mais cette technologie devra rivaliser avec les autres lasers à solide apparus durant leur période de mise au point comme les lasers à cristaux à auto-conversion Raman et doublés en fréquence [103], les lasers à fibres dopées bismuth doublés en fréquence et pompés par laser à fibre ytterbium [104], et surtout les lasers à fibres dopées ytterbium exploitant un guidage à cristal photonique décalant l'émission jusqu'à 1180 nm [105] ou les lasers à fibres fluorées dopées au dysprosium pompés par des diodes InGaN/GaN et émettant directement à 575 nm [106].

La dernière application identifiée pour les VECSEL à base de GaInNAs fut pour une utilisation en tant que laser de pompe pour des lasers à cristaux ou à fibres dopé(e)s au thulium (et potentiellement co-dopé(e)s holmium) et émettant dans la bande spectrale de 1,9 à 2,1  $\mu\text{m}$ . Ces travaux faisaient suite aux rapports de l'University of Electro-Communications au Japon et de l'University of Sidney qui avaient démontré un pompage efficace de lasers à fibres dopées  $\text{Tm}^{3+}$  ( $\text{Ho}^{3+}$ ) à l'aide respectivement d'un laser à fibre dopée ytterbium décalé par conversion Raman à 1212 nm [107] et de diodes InGaAs/GaAs fonctionnant à 1150 nm [108]. Avec l'ingénierie possible du gain et les puissances atteignables, l'utilisation de VECSEL de forte brillance à  $\sim 1211$  nm et potentiellement plus efficaces que le laser à fibre décrit ci-dessus apparaissait comme une solution de pompage intéressante pour ce type de lasers [SC135][SC63]. Néanmoins, une comparaison directe entre le pompage à 1211 nm et un pompage conventionnel à 793 nm (par un laser Ti: saphir d'un laser à verre de tellurite dopé Tm et Ho (ainsi que d'un cristal de tungstate (KYW) dopé Tm) révéla que le pompage aux plus courtes longueurs d'onde était plus efficace du fait d'un mécanisme de relaxation croisée prédominant dans les verres/cristaux « fortement » dopés. Cette constatation et la disponibilité commerciale de diodes lasers à  $\sim 793$  nm mit fin à cette approche.

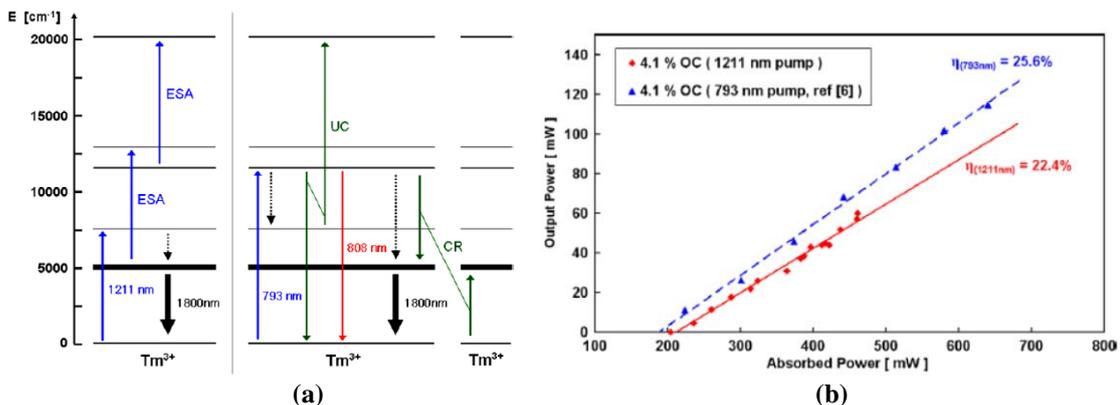


Fig. 14 : (a) Diagramme énergétique simplifié du pompage du  $\text{Tm}^{3+}$  à 793nm et à 1211nm (b) comparaison des performances laser obtenues avec chacune de ces deux excitations [SC63].

Comme le montre la Fig. 15, une analyse a posteriori des performances des VECSEL en GaInNAs pompés à 808 nm démontre que l'efficacité interne (limitée expérimentalement à 75% [SC-B2] quel que soit le VECSEL considéré) décroît linéairement avec la longueur d'onde d'émission du fait d'une augmentation de la quantité de défauts avec la concentration en azote et d'une augmentation du taux de recombinaisons Auger, lui-même aggravé par l'échauffement supplémentaire résultant

de la réduction d'efficacité quantique. Pour améliorer l'efficacité quantique et potentiellement l'efficacité laser globale, nous avons tenté avec le groupe de Mark Hopkinson de l'University of Sheffield un nouveau dessin de structure VECSEL devant fonctionner à 1220 nm sous pompage à 980 nm. La région active proposée employait des puits quantiques moins confinés en GaInNAs avec barrières en GaInNAs massif ( $E_g \sim 1.16$  eV). Malheureusement, les essais de croissance ne furent pas concluants à cause de difficultés de contrôle de la composition des barrières et de l'observation d'une efficacité de photoluminescence réduite.

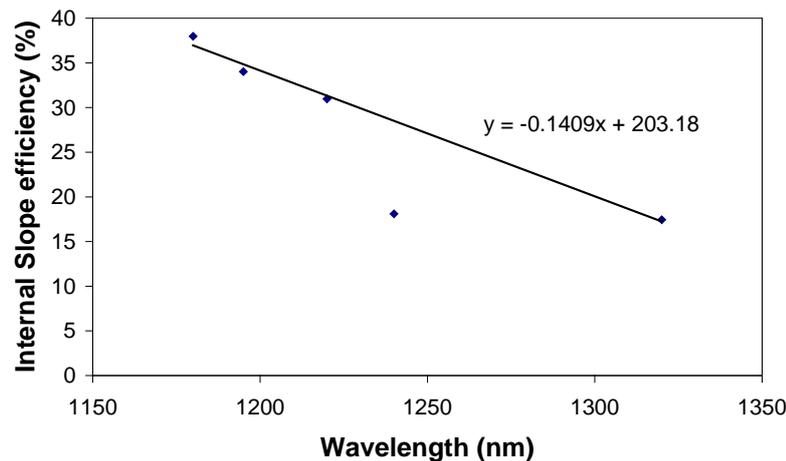


Fig. 15 : Evolution de l'efficacité interne de VECSEL en GaInNAs [SC156].

Quelle que soit l'application visée nécessitant une source fonctionnant dans la gamme de 1200 à 1250 nm, l'utilisation d'une structure exploitant des boîtes quantiques d'InGaAs avait le potentiel de pouvoir se substituer à tout autre structure semiconductrice comportant une zone de gain à base de puits en GaIn(N)As. Suivant ce principe, le premier démonstrateur de VECSEL à boîtes quantiques fut obtenu par les groupes de D. Bimberg de la Technical University Berlin et d'Oleg Okhotnikov de Tampere University of Technology, partenaires de NATAL [109]. L'émission multi-watt fut atteinte par les groupes de l'University of New Mexico et de l'University of Arizona [110]-[112] suivis par la collaboration entre Innolume et l'University of Dundee qui réalisèrent aussi des tests de doublement de fréquence vers le rouge/orange [113]. Les performances atteintes se sont avérées systématiquement en deçà de celles des systèmes à base de puits quantiques mentionnés auparavant.

## 1.6. Conclusions

Dans ce chapitre, j'ai positionné et résumé l'activité que j'ai menée sur les nitrures dilués et leur utilisation dans des composants actifs. En particulier, j'ai souligné comment l'évolution du contexte applicatif passant d'une domination du secteur des télécommunications à des applications plus diverses allant du divertissement (projection cinématographique) au secteur médical (ophtalmologie/dermatologie), a modifié le type de sources lasers à développer et les paramètres spécifiques d'optimisation. J'ai aussi montré que, malgré une croissance difficile, les alliages de GaInNAs/GaAs se sont avérés adaptés et performants pour la réalisation d'amplificateurs et de lasers de type

VCSEL et VECSEL sur la bande 1150 à 1350 nm, mais que l'extension de leur gamme d'utilisation au-delà de 1350 nm reste problématique et non compétitive face aux technologies s'appuyant sur des zones de gain à base d'InP. Enfin, je tenais à souligner que les études fondamentales sur le GaInNAs continuent de servir de références pour les travaux sur les autres alliages fortement désaccordés, notamment sur le Ga(In)AsBi et le GaInNP sur GaAs, dont les utilisations les plus prometteuses semblent être en tant que photo-détecteurs, plus spécialement, pour des cellules solaires à concentration de forte efficacité [114]-[119] ou des photodiodes à avalanche [120][121].

Les résultats marquants de cette activité sont :

- Une évaluation spectroscopique des matériaux GaInNAs(Sb) sur GaAs et l'identification des quinaires comme les meilleurs candidats pour l'émission à 1550 nm **[SC32]**
- Des démonstrateurs VCSEL en GaInNAs à 1,3 $\mu$ m avec une puissance sortie record **[SC16]** et le premier en bande C sous excitation pulsée **[SC34]**
- Une démonstration d'amplificateurs à cavité verticale monolithiques avec des performances à l'état de l'art **[SC25]**
- Une activité et des démonstrations pionnières de VECSEL à base GaInNAs **[SC12][SC51]** pour les applications de pompage pour amplificateur Raman et de sources pour la télévision laser.



# CHAPITRE 2

## LE DIAMANT POUR L'OPTIQUE DES LASERS

Dans ce chapitre, je vais décrire les travaux de recherche que j'ai menés et dirigés de 2000 à 2012 sur les lasers de puissance de type VECSEL dont une des caractéristiques importantes est l'utilisation du diamant.

### 2.1. Contexte

Les études sur les lasers sont très souvent classées en fonction de la nature du milieu à gain utilisé et réparties entre les travaux sur les lasers à semiconducteur (et par là, on sous-entend les diodes lasers) et ceux sur les lasers à solide exploitant un milieu à gain (isolant) diélectrique (dopé avec terres rares ou des ions métalliques), eux-mêmes sous-divisés entre les lasers à cristaux/verres et les lasers à fibres.

Comme expliqué dans le chapitre précédent, les VECSEL sont une forme hybride de lasers à solide ayant leur milieu à gain et un miroir intégré réalisés comme un empilement multicouche de semiconducteurs et une cavité externe constituée d'éléments d'optique classique (voir Fig. 16). Si les prémisses des VECSEL peuvent être retracées à 1966 [122], avec quelques suites dans les années 1980 et 1990 [123]-[125], ce n'est qu'à partir du moment où la communauté travaillant sur les VCSEL s'est lancé dans l'étude de cette configuration laser pour l'émission de forte puissance et de bonne qualité de faisceau [126]-[128], soit après 1996, que les VECSEL émergent réellement. Parallèlement, A. Giesen de Universität Stuttgart introduisait [129] une nouvelle géométrie de lasers à solide, les lasers à disque fin, qui exploitent

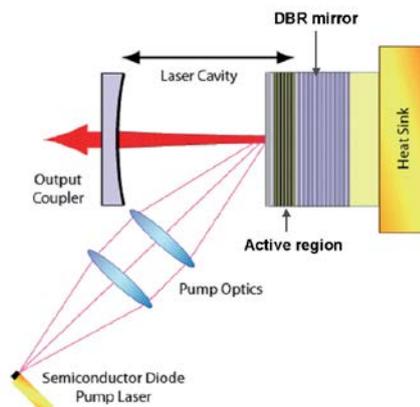
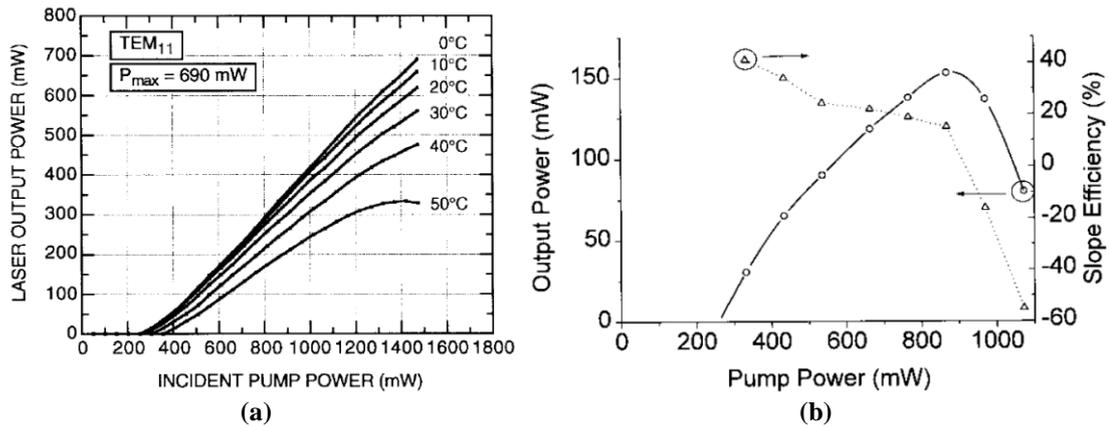


Fig. 16 : Schéma d'un VECSEL [SC53]

les lasers à disque fin, qui exploitent

des cristaux de plus faible épaisseur ( $\sim 300 \mu\text{m}$ ) pour lesquels l'évacuation unidimensionnelle de la chaleur ouvrait une voie alternative aux lasers à fibre pour une montée en puissance nominale infiniment extensible par mise à l'échelle du diamètre du mode (du signal et, par proxy, de pompe) [130]. La similarité de géométrie entre les VECSEL et les lasers à disque fin a fait que les VECSEL sont aussi appelés « Semiconductor Disk Lasers » (lasers à disque (fin) semiconducteur). Par rapport à leurs homologues à base de cristaux dopés, les VECSEL bénéficient d'une plus grande versatilité en longueur d'onde d'émission car celle-ci peut être modifiée par simple variation de la composition des alliages semiconducteurs utilisés (par ingénierie des bandes semiconductrices). De plus, ils possèdent aussi une absorption « planaire » (sur  $\sim 1,5 \mu\text{m}$ , épaisseur bien inférieure à la zone de Raleigh de pompage typique) et (quasi)-indépendante de la longueur d'onde lorsque l'énergie de la pompe est supérieure à la bande interdite (des barrières) du milieu à gain. Ceci permet de relaxer les contraintes de pompage tant au niveau des spécifications de la source de pompe (longueur d'onde centrale, largeur spectrale, et qualité de faisceau) que de l'architecture de pompage (vu que l'absorption totale est atteinte en un simple ou double passage). Tous ces avantages justifient leur attractivité et ont motivé les recherches auxquelles j'ai pris part.

Concrètement, l'activité sur les VECSEL à l'University of Strathclyde débuta au moment de l'émergence de ce domaine de recherche, sous la supervision de Martin Dawson, avec l'étude doctorale de Mark Holm menée de 1997 à 2000. A la fin de sa thèse, ce dernier avait réussi à faire fonctionner un VECSEL en AlGaAs sur GaAs émettant à  $\sim 850 \text{ nm}$  et pompé dans le rouge ( $670 \text{ nm}$ ) par des diodes lasers. Le laser, dont la température du miroir actif était maintenue à  $0^\circ\text{C}$  et sous  $0,9 \text{ W}$  de pompe, émettait jusqu'à  $150 \text{ mW}$  en régime continu [131] et  $43 \text{ mW}$  une fois stabilisé pour une opération mono-fréquence avec une largeur de raie de  $3 \text{ kHz}$  [132]. De plus, le doublage de fréquence à l'aide d'un cristal de  $\text{KNbO}_3$  placé à l'intérieur de cavité pour obtenir  $11,6 \text{ mW}$  d'émission bleue ( $430 \text{ nm}$ ) [133] ainsi que le fonctionnement en régime de synchronisation active de modes conduisant à la génération d'impulsions de  $\sim 110 \text{ ps}$  à un taux de répétition de  $336 \text{ MHz}$  [134] avaient été démontrés. Tous ces résultats établissaient l'état de l'art vu le peu d'études menées sur les VECSEL au cours de cette période. Les performances en régime continu étaient néanmoins en deçà de l'émission de plus de  $500 \text{ mW}$  à  $980 \text{ nm}$  obtenue avec une structure InGaAs/AlGaAs sur GaAs rapportée par M. Kuznetsov de Micracor, Inc (qui deviendra Novalux Inc avant d'être finalement intégré en 2008 dans Arasor) [128]. Les résultats de conversion non-linéaire [133] étaient, par contre, équivalents à ceux présentant la génération de lumière bleue ( $490 \text{ nm}$ ) dans une cavité très compacte ( $< 25 \text{ mm}$  de long) par doublage intra-cavité à l'aide d'un cristal plan-concave de  $\text{KNbO}_3$  et d'une structure InGaAs/AlGaAs [135].



**Fig. 17 : Etat de l'art des VECSEL en 2000. Performances en régime continu de VECSEL émettant à (a) 980 nm [128] et (b) 850nm [131].**

A partir de 2000, cette activité est devenue plus significative dans le groupe de Martin Dawson dans la mesure où Jennifer Hastie, alors doctorante (et future collaboratrice), John-Mark Hopkins, post-doctorant et moi-même travaillons conjointement sur le sujet respectivement sur la montée en puissance, les VECSEL en GaInNAs (voir chapitre précédent) et la conception des structures V(E)CSEL.

Le défi principal était de passer de travaux de la preuve de concept [126]-[128] et [131]-[135] à la validation expérimentale que les VECSEL pouvaient effectivement être une technologie de lasers à solide de rupture. L'objectif était donc de démontrer que cette approche pouvait permettre d'obtenir des émissions (multi-)watt avec des faisceaux de bonne qualité (idéalement TEM<sub>00</sub>) à une variété de longueurs d'onde pour justifier de leur intérêt par rapport à des diodes lasers à ruban de forte puissance (émettant typiquement 250 mW à 980 nm [136]).

Comme l'atteste la Fig. 17, la limitation principale des performances était liée à l'échauffement de la région active. Une optimisation de l'extraction de la chaleur produite était donc un impératif et c'est dans ce cadre que nous nous sommes intéressés au diamant qui se trouve être le matériau présentant le record de conductivité thermique ( $2000 \text{ K}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ ). Comme je vais l'expliquer dans la suite de ce chapitre, les recherches entreprises ont fait évoluer conjointement les travaux sur les lasers à solide et les utilisations du diamant. Ainsi, dans nos études, la fonction du diamant est passée de la dissipation de chaleur à de l'optique passive puis active pour les lasers avant d'être considéré comme un nouveau matériau pour l'optique (non-linéaire) intégrée. Cette progression a été menée en parallèle et indépendamment des recherches sur l'optique quantique à base de diamant jusqu'en 2008, moment où le diamant a été clairement identifié comme le meilleur candidat pour la photonique quantique à température ambiante [137] et où les synergies et complémentarités des travaux ont pu être plus simplement déterminées.

## **2.2. Le diamant comme dissipateur thermique**

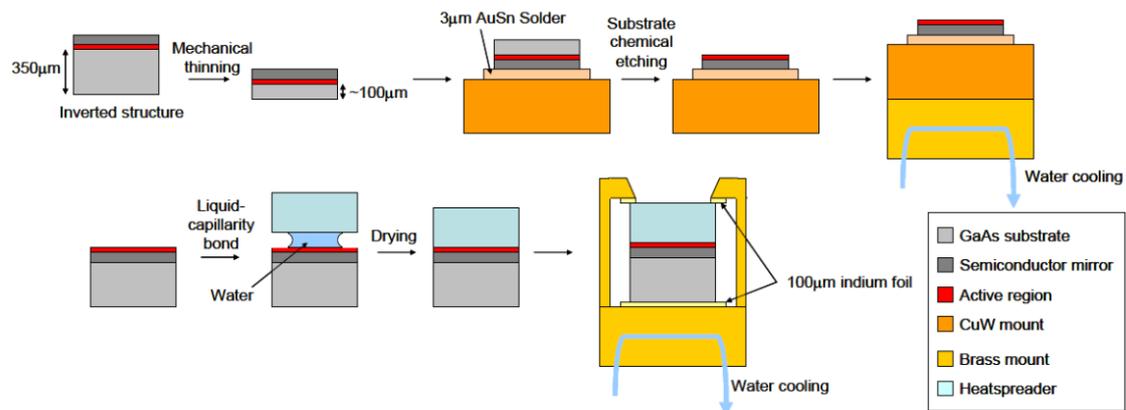
### **2.2.1. Vers l'introduction de la dissipation thermique à fenêtre diamantée**

Le problème de la gestion thermique mis en avant ci-dessus est en fait un problème générique dans les lasers à solide. En effet, la conversion de l'énergie de la pompe en rayonnement laser s'accompagne d'un échauffement correspondant, au minimum, au rapport d'énergie entre la pompe et le signal c'est-à-dire à l'efficacité quantique. L'augmentation de la température résultante conduit une augmentation des recombinaisons non radiatives qui, à leur tour, réduisent l'efficacité globale de conversion. De plus, comme la distribution de température n'est généralement pas homogène, des gradients de température existent, dont les conséquences principales sont (i) l'apparition de déformations et de contraintes mécaniques qui peuvent amener à destruction du matériau à gain par fracture/délamination et (ii) l'établissement d'une lentille thermique qui va distordre le front d'onde et, par conséquent, dégrader la qualité du faisceau émis voire induire des fluctuations incontrôlées de puissance. L'ensemble de ces inconvénients justifient l'importance toute particulière accordée à la gestion de la dissipation thermique dans les lasers. Elle s'est traduite par un engouement pour les géométries de lasers à fibre [138] et à disque fin [130] dont la puissance peut être extensible par changement d'échelle, l'introduction d'embouts de protection (end-caps) [139][140] pour homogénéiser le profil de température ou encore les développements de cristaux dont le profil de dopage (et donc d'absorption de la pompe) n'est plus constant mais multi-segmenté [141] ou gradué [142]-[144], là encore pour uniformiser la distribution de chaleur.

L'étude de la gestion thermique des VECSEL s'inscrivait parfaitement dans ce cadre et était d'autant plus significative que ces lasers présentent une sensibilité accrue à l'échauffement. En effet, l'absorption « planaire » de la pompe conduit à des densités volumiques de puissance absorbées typiques de l'ordre de  $500 \text{ MW/cm}^3$ , soit environ  $10^4$  fois supérieure à celle d'un laser à barreau de cristal dopé et 100 fois plus élevée celle d'un laser à disque fin. Par ailleurs, leur efficacité interne est souvent moins élevée (typiquement inférieure à 75% **[SC-B2]**) du fait de recombinaisons non radiatives de type Auger dont le taux dépend exponentiellement de la température. De plus, cet effet est exacerbé par le fait que la longueur d'onde d'émission est contrôlée par la résonance établie entre le miroir DBR à semiconducteurs et la surface supérieure de l'empilement semiconducteur (sauf dans le cas d'un design « anti-résonant ») et que sa variation avec la température est plus lente que celle du pic de gain ( $\sim 0,11$  contre  $0,35 \text{ nm/K}$  (pour des VECSEL sur GaAs)).

A la fin de l'année 2000, les performances obtenues pour des VECSEL fonctionnant à 980 nm par Micracor Inc [128] étaient meilleures que celles des émetteurs à 850nm de l'University of Strathclyde [131] parce qu'ils bénéficiaient d'une meilleure dissipation thermique tant au niveau de leur structure que de leur montage. Le premier désavantage thermique des lasers émettant à 850 nm est d'ordre structurel, donc intrinsèque, et, malheureusement, assez général. En fait, le miroir DBR adapté présente nécessairement une résistance thermique élevée vu que (i) les alliages (ternaires) utilisés possèdent une faible conductivité thermique et que (ii) l'épaisseur totale du DBR est élevée vu que le

nombre de couches requis pour atteindre la réflectivité nominale de 99,9% augmente significativement lorsque le contraste d'indice entre couches diminue. La seconde différence de gestion thermique observée était au niveau du montage. En effet, hormis un collage sur un support en cuivre, aucun traitement post-croissance n'avait été réalisé pour les composants émettant à 850 nm et l'évacuation de la chaleur se faisait donc au travers du substrat. Les lasers émettant à 980 nm avaient, quant à eux, des miroirs actifs épitaxiés en commençant par la zone de gain (c'est-à-dire en sens inverse) pour pouvoir être placés en contact direct avec une embase métallique et ainsi faciliter la dissipation thermique [128]. Ce montage de type « laser à disque fin » s'accompagne de l'élimination (par un polissage suivi d'une attaque chimique sélective) du substrat utilisé pour la croissance pour éviter les pertes associées (voir Fig. 18 haut). Cette étape requière néanmoins une bonne maîtrise technologique surtout pour limiter l'apparition de défauts (rugosité, craquelures, délamination, ...) lors de la réalisation de puces de grande surface. En 2002, W.J. Alford et al de Sandia National Laboratories [145] introduisirent et validèrent une nouvelle approche de gestion thermique pour les VECSEL permettant, avec une puce maintenue à 10 °C fonctionnant à 980 nm, d'émettre jusqu'à 1,5 W de puissance continue. L'approche, appelée par la suite technique du « dissipateur thermique » (« heatspreader » - voir Fig. 18 bas), exploite une fenêtre transparente de saphir fixée par capillarité liquide [146] du côté de la zone de gain pour mettre en place un refroidissement par la surface. En parallèle, W. Schmid de Osram Opto Semiconductors brevetait l'utilisation d'un dissipateur thermique à l'intérieur de la cavité d'un VECSEL [147]. Cette approche peut aussi être considérée comme une forme de « end cap » [139][140] qui, comme la structure épitaxiée demeure sur son substrat, présente l'avantage de ne requérir qu'un post-traitement minimal et relativement simple.



**Fig. 18 : Procédures de montages des miroirs actifs de VECSEL suivant la technique de type « laser à disque fin » (en haut) et « dissipateur thermique » (en bas) [SC126].**

Suite à cette publication, j'ai établi un modèle analytique simplifié (voir Appendice D de [148]) qui a permis de confirmer l'intérêt d'utiliser des fenêtres dont la conductivité thermique est la plus élevée possible pour améliorer l'évacuation de la chaleur. Sur cette base, avec Jennifer Hastie et John-Mark Hopkins, nous avons spécifié et nous nous sommes procuré des fenêtres en saphir ( $k=46 \text{ W K}^{-1}\text{m}^{-1}$ ), en carbure de silicium ( $k=490 \text{ W K}^{-1}\text{m}^{-1}$ ) et en diamant ( $k=2000 \text{ W K}^{-1}\text{m}^{-1}$ ) ayant estimé le facteur de réduction de la résistance thermique à respectivement 2,1, 12,2 et 46. Nous avons, en particulier, validé expérimentalement [SC8] l'amélioration de la dissipation par un facteur 1,25 et 16 en utilisant respectivement une fenêtre en saphir et en SiC (type 6H -

semi-isolant fourni par Cree, Inc) sur la structure VECSEL fonctionnant à 850 nm de la référence [131]. Dans ce dernier cas, la puissance générée pouvait ainsi être triplée [SC8] voire même décuplée [148]. Anticipant un échauffement important du fait de l'utilisation d'un matériau nouveau et de l'efficacité quantique de 62%, la première utilisation d'un dissipateur thermique en diamant naturel (de type IIa, fourni par Element Six BV) fut réservée au VECSEL en GaInNAs opérant à 1320 nm (voir paragraphe 1.5) [SC12]. Ces démonstrations furent suivies de près par le groupe de Chalmers University of Technology qui présenta l'utilisation de fenêtres en silicium ( $k=170 \text{ W K}^{-1}\text{m}^{-1}$ ) [149] et en diamant [150] pour améliorer les performances de VECSEL émettant à 1550nm et utilisant des structures entièrement à base d'InGaAsP sur InP.

Nous avons alors cherché à, non plus estimer, mais quantifier les bénéfices de la méthode du « dissipateur thermique » pour la gestion de la chaleur des VECSEL. Pour cela, nous avons modélisé, grâce à une analyse par éléments finis (avec Comsol Multiphysics – Femlab), la réponse thermique statique (soit l'excursion en température et la lentille thermique) de lasers émettant à 980 nm et à 2  $\mu\text{m}$  tant pour une évacuation de la chaleur par l'approche du « dissipateur thermique » que celle du « disque fin » [SC24]. Cette étude démontra la supériorité de l'approche du « dissipateur thermique » pour les faibles diamètres de pompe, c'est-à-dire dans le cas où l'évacuation de la chaleur se fait de façon tridimensionnelle, ainsi que pour des structures comportant des miroirs de résistance thermique élevée. Quelques mois plus tard, Lindberg et al de Chalmers University of Technology [150] publiaient aussi une analyse par éléments finis de la dissipation de chaleur dans les VECSEL en InGaAsP sur InP émettant à 1550 nm et parvenaient à des conclusions similaires.

### ***2.2.2. La dissipation thermique de VECSEL à fenêtre diamantée : les résultats***

Une voie générique pour développer des VECSEL de puissance sur une large gamme spectrale était donc clairement identifiée par les analyses thermiques mentionnées au paragraphe précédent et présentées de façon synthétique en Fig. 19 et en référence [SC47]. La méthode consistait à combiner des miroirs actifs de conception appropriée avec l'emploi d'un dissipateur thermique en diamant ( $\lambda \in [225 \text{ nm}, 2,7 \mu\text{m}]$ ) ou, à défaut, en SiC ( $\lambda \in [406 \text{ nm}, 5 \mu\text{m}]$ ). Cette approche combinée à des collaborations adhoc avec des groupes d'épitaxie (Tampere University of Technology, Samsung Advanced Institute of Technology, University of Sheffield, IAF Friburg) servit dès lors de fondement à tous nos démonstrateurs.

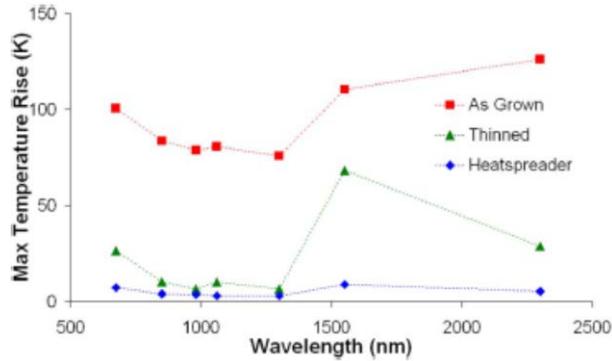


Fig. 19 : Elévation de température induite par 1W de puissance absorbée sur 200 $\mu$ m de diamètre. Le cas « thinned » correspond au « disque fin » et « heatspreader » au « dissipateur thermique ».

Cette approche nous apparût d'autant plus appropriée qu'en 2008, au cours de la thèse de Stéphanie Giet, et comme le montre la Fig. 20, nous validions expérimentalement l'avantage du montage de type « dissipateur thermique » pour des petits diamètres de pompe (~100  $\mu$ m) sur des lasers émettant à 1060 nm qui sont structurellement les plus favorables au montage de type « disque fin » [SC126].

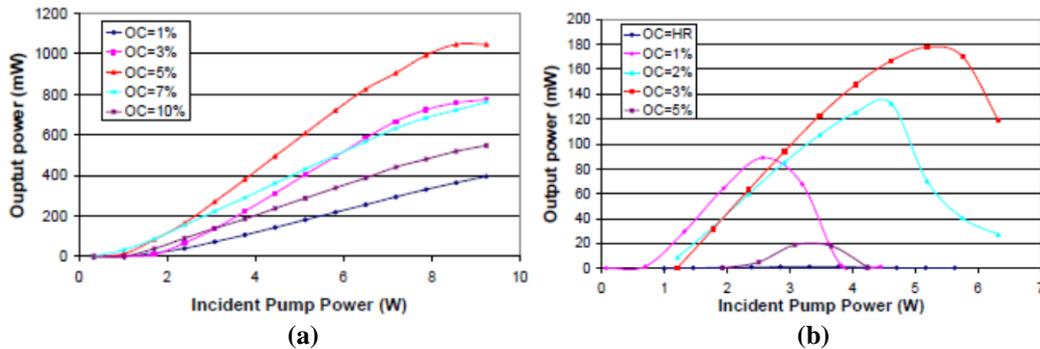


Fig. 20 : Comparaison des performances d'un VECSEL émettant à 1060 nm et monté (a) avec une fenêtre diamantée comme « dissipateur thermique », (b) selon la méthode du « disque fin » sur support en CuW [SC126].

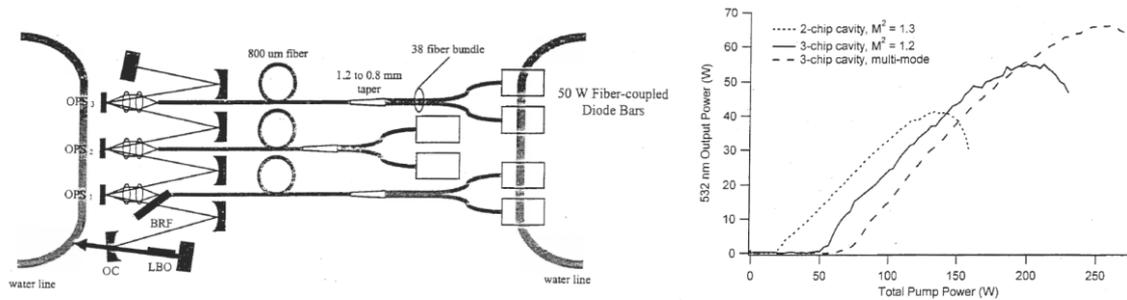
Cherchant à démontrer la versatilité de cette approche, nous nous sommes engagés à développer des sources fonctionnant à des longueurs d'onde présentant un intérêt applicatif important et couvrant la gamme la plus large possible. Ayant établi les codes de calculs de réflectivité d'empilement multi-couches, de conception de puits quantiques et de simulation de courbes de transfert de puissance selon le modèle simplifié de la référence [128], et comme le résume la Table 1, j'ai participé à la conception initiale de toutes les structures de miroirs actifs de VECSEL de l'University of Strathclyde couvrant la gamme d'émission allant de 670 à 2200 nm. Les performances lasers obtenues ne se sont pas toujours avérées en adéquation avec celles escomptées. Elles reflètent le fait que ces structures étaient souvent le résultat de premiers essais de croissance, et furent améliorées, sans modification du dessin, suite à quelques itérations permettant de mieux adapter les conditions de croissance (en particulier des puits quantiques) et d'améliorer les étalonnages (épaisseurs couches et décalage entre la luminescence de puits et de la résonance). L'exemple le plus flagrant est pour le VECSEL en GaInNAs fonctionnant à 1180 nm qui, lorsque nous le rapportons, est issu d'une première croissance de notre partenaire Tampere University

of Technology et présente une efficacité de 18,7% [SC51] et qui, une fois optimisée, permet d'atteindre une efficacité de 27% [100].

Longueur d'onde (nm)	Matériau de la section de gain	Matériau du DBR	Puissance maximale (W)	Efficacité (%)	Référence
670	Puits AlInGaP	AlGaAs	0,4	17,3	[SC23]
720-750	Boîtes InP	AlGaAs	0,052	5,2	[SC58]
1060	Puits InGaAs	AlGaAs	4	25	[SC37]
1180-1350	Puits GaInNAs	AlGaAs	1	23 à 10,7	[SC51] [SC12]
2200	Puits GaInAsSb	AlAsSb/ GaSb	0,08	2,6	[SC45]

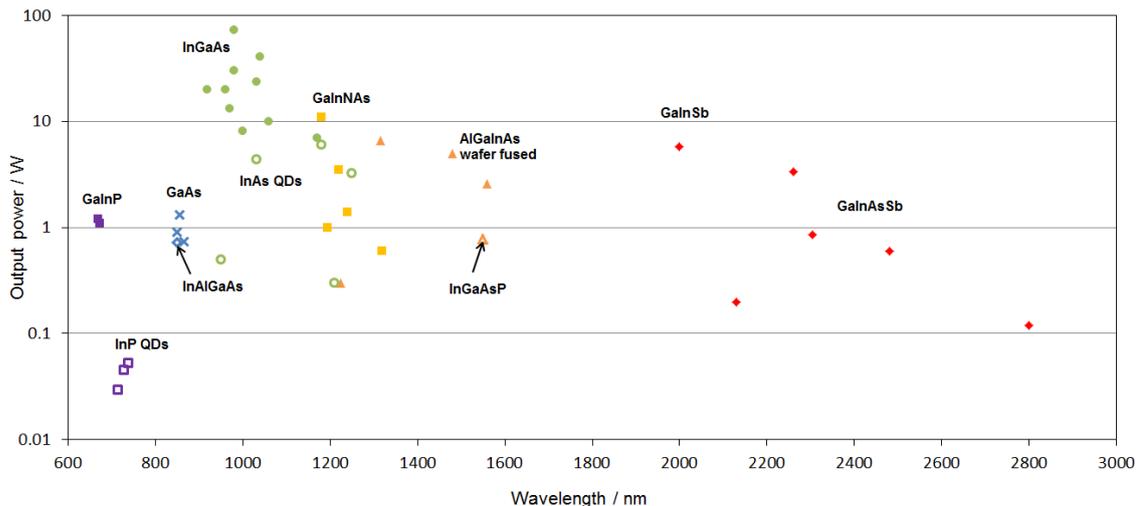
**Table 1: Structures VECSEL conçues par S. Calvez – les performances obtenues dépendent significativement de la qualité de la croissance de ces premiers essais.**

Ayant lancé cette action de diversification de longueur d'onde d'émission, il était intéressant de déterminer les limites de montée en puissance des VECSEL à fenêtre diamantée. Les calculs de résistance thermique par éléments finis montrent qu'à densité de puissance constante ce paramètre ne suit pas une évolution proportionnelle à la surface de pompage [SC24] et donc qu'il existe une limite maximale de puissance atteignable pour un miroir actif donné. Nous confirmons expérimentalement ce fait avec des VECSEL fonctionnant à 1060 nm avec une cavité standard [SC47] mais aussi avec leur variante quasi-monolithique [SC75]. Nous présentons aussi en référence [SC71] une analyse numérique qui montre qu'il est désirable, et parfois possible, d'adapter la structure du miroir actif pour minimiser la résistance thermique du composant et donc d'atteindre de plus hautes puissances pour un système incluant un seul miroir actif. En pratique, cette optimisation tend à sélectionner des miroirs actifs présentant des zones courtes d'absorption de la pompe en accord avec les résultats expérimentaux publiés par Osram Opto Semiconductors GmbH [151]. Par ailleurs, vu l'influence des effets thermiques, il semble intéressant de promouvoir un pompage présentant un maximum d'efficacité quantique, c'est-à-dire de choisir les barrières des puits quantiques ou la longueur d'onde de pompe pour exciter la structure directement dans les puits. Si ce type de configurations a été démontrée pratiquement [152]-[155], ce gain en efficacité quantique est obtenu au détriment d'une perte souvent plus élevée en efficacité d'absorption. A. Chernikov et al de l'University of Arizona montrent aussi qu'il est judicieux de limiter les points chauds et donc de privilégier des pompages homogènes c'est-à-dire, pratiquement, d'obtenir des distributions de la pompe super-gaussiennes [156]. Pour aller au-delà de cette limite en puissance, la meilleure stratégie consiste alors à recourir à des cavités comportant plusieurs miroirs actifs pour lesquelles l'augmentation de la puissance maximale est proportionnelle au nombre de miroirs actifs [157]-[159], mais, évidemment, au prix d'une perte en compacité (voir Fig. 21).



**Fig. 21 : Configuration périodiquement stable et performance d'un VECSEL à multiple miroirs actifs pour repousser la limitation en puissance des VECSEL standard.**

Le résultat de l'ensemble de ces travaux peut être extrait à l'aide une synthèse des meilleures performances obtenues par des VECSEL, résumé que nous réalisons en juillet 2011 [SC-B3]. Comme le montre la Fig. 22, si des VECSEL ont été développés pour couvrir la gamme allant de 650 à 2800 nm, l'extraction de chaleur est, à l'exception de quelques sources émettant à  $\sim 1 \mu\text{m}$ , réalisée grâce à une fenêtre diamantée, mettant clairement en évidence le bénéfice de cette approche. De plus, la gamme spectrale couverte peut être étendue pour inclure l'ultra-violet et le visible (de 335 à 700 nm) ainsi que le milieu infrarouge (3-5  $\mu\text{m}$ ) en effectuant une conversion non-linéaire intra-cavité, respectivement par doublage de fréquence ou grâce à une oscillation paramétrique optique [160][161].



**Fig. 22 : Etat de l'art des puissances maximales émises aux longueurs d'onde fondamentale avec des VECSEL fonctionnant en régime continu à la fin juillet 2011 [SC-B3]. Tous les VECSEL répertoriés sur ce graphique sauf ceux en InGaAs fonctionnant à  $\sim 1 \mu\text{m}$  utilisent une fenêtre diamantée pour dissiper la chaleur.**

La fenêtre diamantée étant l'élément clé permettant la fabrication des VECSEL de forte puissance à toute longueur d'onde, son adhésion à la puce semiconductrice par capillarité liquide apparaissait comme un potentiel point faible. Dans le cadre du projet européen NATAL et en partenariat avec OSRAM, des tests de cisaillements ont été réalisés sur des échantillons de petite taille ( $\sim 1 \text{ mm}^2$ ) fixés de cette manière. Ils ont révélé une tenue pouvant atteindre 6,8 N, soit des niveaux de tenue comparables à ceux obtenus avec des assemblages réalisés avec des colles époxy [162]. Le faible nombre d'échantillons testés n'a toutefois pas permis d'établir une statistique suffisante pour qualifier ce procédé d'attache d'autant que les conditions environnementales de tests (20°C, 30% humidité) n'y étaient pas non plus défavorables.

### **2.2.3. La fenêtre diamantée intra-cavité : les artefacts et leurs solutions**

L'utilisation d'une fenêtre diamantée en contact direct intra-cavité avec la zone de gain des VECSEL s'est avérée essentielle aux développements de ces sources avec des émissions (multi)-watt sur une large gamme de longueurs d'onde.

Néanmoins, l'utilisation d'une fenêtre intra-cavité n'est pas sans contrepartie. Tout d'abord, pour assurer un fonctionnement optimal du laser, il faut limiter les pertes introduites par cette fenêtre c'est-à-dire sélectionner la nature et la qualité du diamant la constituant. En fait, il existe quatre types de diamants naturels : les types Ia, Ib, IIa et IIb. Les diamants de type I ont comme impureté principale l'azote avec une concentration pouvant atteindre jusqu'à 1%. Dans cette catégorie, les diamants de type Ib présentent les plus faibles concentrations d'azote et une teinte jaune tandis que ceux de type Ia sont incolores du fait d'une désactivation résultant de l'agglomération des atomes d'azote. Les diamants de type II sont nominalement dépourvus d'impuretés d'azote. Pour le type IIb, l'impureté la plus présente est le bore qui leur confère une conductivité de type p et une teinte bleuâtre. Dans tous les cas, ces impuretés ne modifient la transparence que dans l'ultraviolet (<350 nm) et dans l'infrarouge lointain [163]. Néanmoins, nous avons préféré utiliser, dans un premier temps, des diamants de type IIa qui possèdent le niveau d'impuretés le plus faible.

Parallèlement à l'offre de diamants naturels, des diamants peuvent être élaborés par deux voies de synthèse [164]. La première approche, industrialisée à partir de 1955, est dite « haute pression, haute température » (HPHT) car on place une masse carbonée à 70–80 kbar et 1400–1600 °C pour être dans les conditions où la cristallisation est thermodynamiquement stable. Ces conditions correspondent aux conditions présumées de la création des diamants naturels et permettent de former des diamants de taille pouvant aller jusqu'à 8 mm de diamètre. La seconde méthode, disponible commercialement depuis le milieu des années 1980, est un dépôt en phase vapeur par procédé chimique (CVD) où le diamant est réalisé à partir d'un mélange de méthane ou d'éthane dans un excédent de H<sub>2</sub> à des températures excédant 2000 K, conditions où le diamant est en fait métastable et sa croissance n'est possible que grâce à la cinétique du dépôt. Dans ce cas, le substrat peut être une plaquette de diamant, pour réaliser un cristal de diamant par homo-épitaxie, où un autre substrat (Si, SiO<sub>2</sub> sur Si, saphir...) mais auquel cas, la croissance est poly-cristalline avec des tailles de grains de diamant qui peuvent être micrométriques ou nanométriques en fonction des conditions de croissance. Comme l'atteste la Fig. 23, ces diamants poly-cristallins ne sont pas adaptés à l'utilisation (intra-cavité) dans les lasers émettant dans le visible ou le proche infrarouge vu les pertes par diffusion induites par les grains de diamant (carbone à liaisons sp<sup>3</sup>) et les pertes résultant des liaisons pendantes présentes aux interfaces entre les grains qui sont de type graphite (sp<sup>2</sup>) et donc absorbantes [165]. Les diamants CVD homo-épitaxiés présentent l'avantage (par rapport aux diamants HPHT) de pouvoir contenir une quantité en impuretés d'azote incorporée mieux contrôlée ainsi qu'une biréfringence uniforme et réduite (jusqu'à 5 10<sup>-6</sup>). Les tailles accessibles d'échantillons restent toutefois de l'ordre du centimètre.

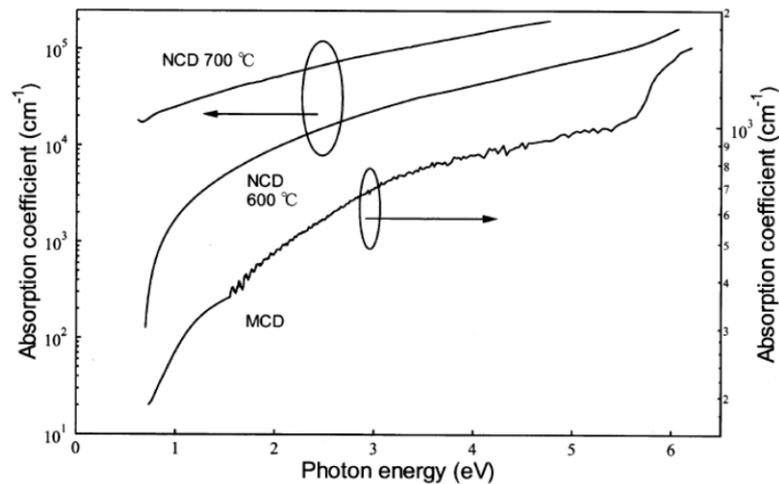


Fig. 23 : Coefficient d'absorption de diamants poly-cristallins [165].

En partenariat avec Element Six Ltd, nous avons pu tester les différents types de diamants (naturel, HPHT, CVD) en tant que fenêtres dissipatives pour nos VECSEL [SC41] et lasers à disque fin [166]. Nous n'avons pas observé de différences au niveau thermique entre ces différents échantillons (même si la conductivité thermique peut varier entre  $1400$  et  $2000 \text{ WK}^{-1}\text{m}^{-1}$  [164]) mais avons pu mettre en évidence des variations notables au niveau des pertes. En effet, de façon surprenante pour un matériau nominale isotrope et comme le montre la Fig. 24, les fenêtres de diamant présentent fréquemment une biréfringence non contrôlée et, parfois, spatialement variable. Il s'agit d'une biréfringence de contrainte résultant de dislocations (surtout pour les fenêtres créées par CVD [167]), de changement de paramètre de maille induit par une modification des conditions de cristallisation durant la formation du diamant, de la présence d'inclusions ou de fractures internes ou encore de déformations plastiques [168]. Quelle qu'en soit l'origine, en combinant cette biréfringence à des éléments sélectifs en polarisation (comme des filtres à lame biréfringente insérés à l'angle de Brewster dans la cavité ou des cristaux de conversion non-linéaire), des pertes significatives peuvent être introduites détériorant les performances tant pour l'émission à la fréquence fondamentale [SC41] que pour la conversion non-linéaire [SC47] [SC121]. Pour éviter ces artefacts, nous avons capitalisé sur les progrès en matière de contrôle de la croissance effectués par Element Six Ltd [169] pour opter, à partir de 2009, pour des fenêtres en diamant CVD de faible biréfringence. Dans ce cas, les pertes liées au diamant sont estimées comme étant inférieures à  $0.05\%$  par passage [SC41].

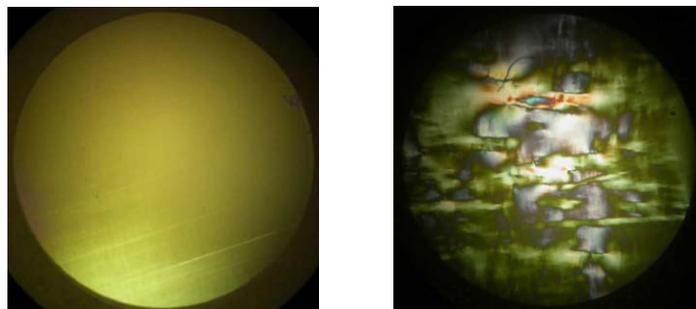


Fig. 24 : Vues microscopiques résolues en polarisation montrant la variabilité de biréfringence de fenêtres en diamant [SC41].

Par ailleurs, l'indice du diamant ( $n \sim 2,4$ ) étant différent de celui des matériaux semiconducteurs du miroir actif ( $n \sim 3,3$ ), la fenêtre à faces parallèles modifie le gain effectif [SC126] fourni par le miroir actif et introduit un étalon qui, à son tour, favorise un ensemble de longueurs d'onde. Si l'échantillon assemblé est utilisé tel quel, le spectre d'émission devient donc cannelé [SC8][SC12]. Toutefois, en ajustant l'épaisseur de la fenêtre et la longueur de la cavité, une opération mono-fréquence peut être obtenue à la longueur d'onde fixée par l'étalon [170][171]. A contrario, comme le montre la Fig. 25, l'utilisation d'une fenêtre biseautée dont la surface extérieure est traitée antireflet permet de revenir à une émission accordable continuement avec une faible modulation spectrale de puissance [SC47].

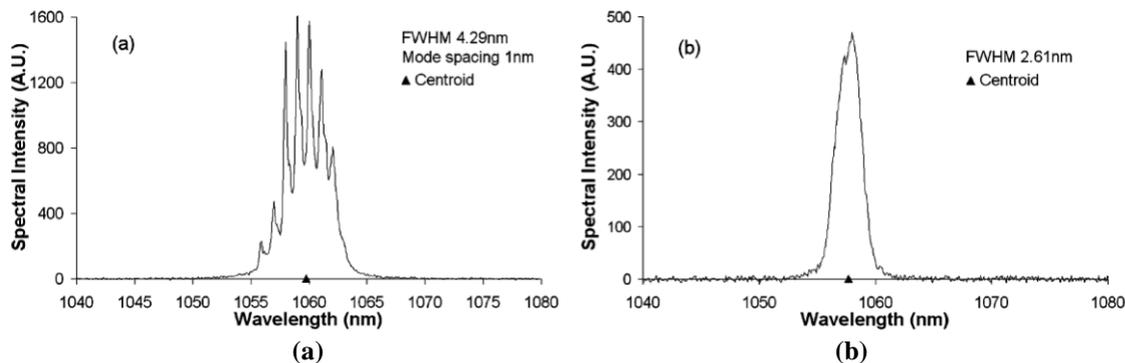


Fig. 25 : Spectres d'émission typiques d'un VECSEL avec fenêtre diamantée (a) à faces parallèles et (b) biseautée et traitée antireflet [SC47].

## 2.3. Laser quasi-monolithiques utilisant des optiques passives en diamant

### 2.3.1. Introduction des VECSEL « microchip » à corps diamanté

Dans les paragraphes précédents, j'ai démontré les bénéfices d'utiliser une fenêtre en diamant pour évacuer la chaleur des miroirs actifs des VECSEL. Toutefois, hormis pour les questions de filtrage spectral (accidentel) évoquées ci-dessus, les fenêtres n'assuraient pas de fonction optique particulière dans les résultats présentés jusqu'à présent.

Un des axes de développement que j'ai promu avait pour objectif d'utiliser ces fenêtres diamantées pour des fonctions multiples incluant la dissipation de chaleur. Cette combinaison de fonctions constitue l'essence de mon brevet [SC-P1].

Dans ce cadre, et au vu de l'adoption rapide et généralisée des pointeurs laser émettant dans le vert à partir de l'année 2000, nous avons orientés nos travaux vers l'étude d'une version quasi-monolithique de VECSEL, désignée sous le nom de VECSEL « microchip », en référence aux lasers « microchip » à cristaux dopés [172], mais qui peut être tout aussi bien considérée comme un VCSEL à cavité longue. Les premiers démonstrateurs ont donc exploité la surface extérieure de la fenêtre comme support pour le miroir (diélectrique) de sortie du laser et ainsi former une cavité plan-plan de longueur millimétrique (0,25 à 2 mm) entièrement solide [SC9][SC14].

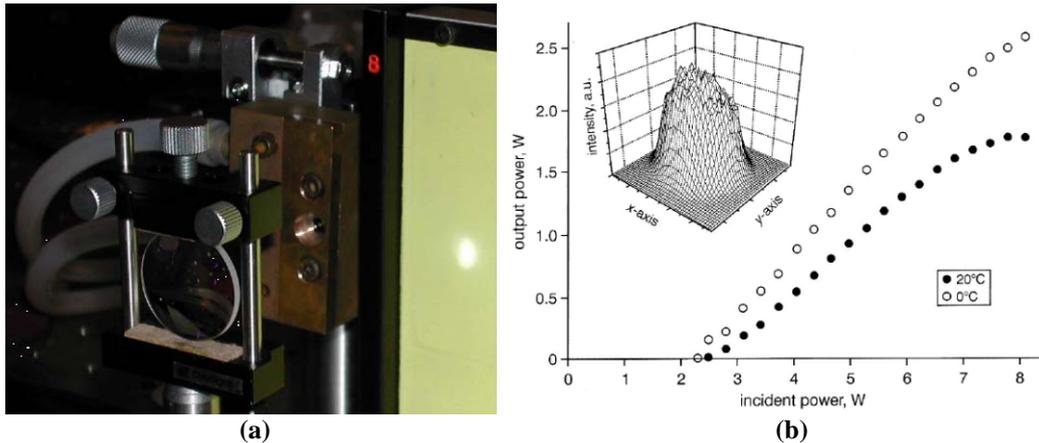


Fig. 26 : (a) Photographie et (b) performances d'un VECSEL microchip émettant à 980nm [SC9].

Technologiquement, les premiers tests ont mis en évidence des difficultés liées à l'adhésion et l'écaillage des dépôts diélectriques sur diamant [173]. Ces problèmes ont été résolus en rendant la surface du diamant, qui par nature est hydrophobe et lipophile, hydrophile par nettoyage au mélange piranha ( $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2$  1:4) suivi d'un plasma  $\text{O}_2$  pour promouvoir l'apparition de terminaisons OH (au lieu de H) en surface [174]. De plus, les dépôts par évaporation ont été réalisés chez des fournisseurs spécifiques (LaserOptik GmbH, SLS Optics Ltd, Helia Ltd) habitués à déposer sur ce matériau et/ou capables de réaliser des dépôts de qualité à faible température de substrat (dans la mesure où les lampes infrarouge de chauffage couramment utilisées s'avèrent, dans ce cas, beaucoup moins efficaces).

Scientifiquement, nous nous sommes intéressés à l'analyse par éléments finis de l'influence du matériau constituant le corps du VECSEL microchip sur leurs performances [SC35][SC44]. Nous avons démontré la supériorité du diamant liée au fait que l'élévation de température et la lentille thermique associée sont réduites et permettent donc l'émission  $\text{TEM}_{0,0}$  pour des longueurs de cavité (épaisseur de fenêtre) inférieures au millimètre et des tailles de faisceaux de l'ordre de  $100\ \mu\text{m}$ , commensurables avec les conditions expérimentales usuelles. Parallèlement, en pratique, l'émission monomode latérale a été obtenue avec des VECSEL microchip à corps en diamant mais avec une puissance de sortie limitée à 180 mW pour le laser émettant à 1300 nm avec une région active en GaInNAs/GaAs [SC48] et à 160 mW pour la source fonctionnant à 670nm avec une région active en AlInGaP/GaAs [SC28]. Les inconvénients majeurs de ces VECSEL microchip à cavité plan-plan sont la détérioration continue de la qualité de faisceau avec l'augmentation de puissance de pompe [SC35], une émission multi-fréquences (multimode longitudinale) et des variations de l'orientation de la polarisation de l'émission [SC111].

### 2.3.2. Micro-optiques en diamant

Pour parvenir à améliorer la qualité d'émission des VECSEL microchip, il est impératif de pouvoir créer des cavités plus complexes que les cavités plan-plan décrites jusqu'ici. Pour ce faire, la voie que nous avons choisi de poursuivre s'appuyait sur la réalisation de micro-optiques en diamant.

Cette approche s'avère assez complexe du fait que la dureté et la nature chimique inerte de ce matériau le rendent difficile à structurer. Néanmoins, une variété de techniques a pu être validée dont le fraisage à faisceau ionique [175]-[177], l'ablation laser [178][179], la graphitisation par implantation ionique suivie d'une gravure chimique sélective [180] et la gravure sèche de structures lithographiées, technique que nous avons utilisée et dont une description plus détaillée suit. Nos développements technologiques de micro-fabrication sur diamant se sont focalisés sur les procédés utilisant la gravure ionique réactive à plasma induit par haute fréquence (ICP-RIE). Ils ont été réalisés dans le cadre de recherches menées par Martin Dawson sur les tableaux de micro-DEL InGaN/GaN [181] (projet EPSRC GR/S85764/01 « A Thousand Micro-emitters Per Square Millimetre: New Light On Organic Materials & Structures » 2004-2008) et sur les transistors en diamant [182] (projet « Micromachined Diamond Device Initiative » avec Element Six Ltd financé par le ministère de l'industrie britannique, 2005-2008). En fait, historiquement, les travaux sur la gravure sèche du diamant ont débuté en 1989 [183]. Dans cette étude préliminaire, la gravure ionique réactive à est réalisé l'aide soit d'oxygène ( $O_2$ ) soit d'hydrogène ( $H_2$ ) et les atomes de carbone sont éliminés respectivement sous forme d'oxydes de carbone (CO ou  $CO_2$ ) ou de méthane ( $CH_4$ ) et avec des vitesses de gravure atteignant respectivement 35nm/min et 30nm/min (2,1  $\mu\text{m/h}$ ). H. Shiomi de Sumitomo Electronics Industries [184] puis Ando et al de Osaka University [185], s'inspirant de gravures du SiC, ajoutent du fluorure de carbone ( $CF_4$ ) à l'oxygène et observent une augmentation de la vitesse de gravure jusqu'à 9,5  $\mu\text{m/h}$  ainsi qu'une réduction de la rugosité de la surface gravée. R. Otterbach et al de l'University of Paderborn modifient un équipement de RIE conventionnel pour placer l'échantillon à graver entre deux wafers de silicium afin d'augmenter la densité d'ions réactifs et, par conséquent, augmenter d'un facteur 10 la vitesse de gravure à l'oxygène seul et ainsi atteindre 330 nm/min (19,8  $\mu\text{m/h}$ ) [186]. Finalement, en 2004, Hwang et al du National Institute of Advanced Industrial Science and Technology passent à la gravure ICP-RIE avec un mélange Ar :  $O_2$  et obtiennent des vitesses pouvant varier de 1 à 40  $\mu\text{m/h}$  en fonction du biais appliqué au substrat (0-200W) [187].

Suite à la démonstration d'intégration de microlentilles dans le substrat de saphir [181] de micro-DEL InGaN, mes collègues souhaitaient étendre leur capacité de micro-structuration à d'autres matériaux durs (SiC, GaN, ...) et ils réalisent donc en 2005 des microlentilles convexes en diamant [188]. Si l'approche est identique à celle de M. Karlsson et al de Uppsala University [189] et consiste classiquement à faire fluer des disques photolithographiés de résine et transférer les dômes résultant dans le substrat par gravure sèche [190], ils présentent aussi en détail les conditions de gravure du diamant dans une ICP-RIE à l'aide d'un mélange Ar :  $O_2$ . Par ailleurs, la caractérisation des distances focales des microlentilles est y effectuée par mesure de réflexion et de transmission en microscopie confocale, selon une technique qu'ils ont introduite en référence [191]. Entre 2005 et 2010, ils démontrent ensuite la réalisation de variantes notamment des microlentilles concaves via un moulage [192], des microlentilles cylindriques ou en micro-anneau par fluage de rectangles ou d'anneaux au lieu de disques de résine [193], de microlentilles biconvexes par traitement des deux surfaces du substrat [194] ou encore d'un réseau de diffraction [194]. Travaillant sur des gravures de faible épaisseur pour définir des grilles de transistors dans des couches de diamant delta-dopées au bore [195], ils mettent au point une nouvelle recette de gravure qui utilise un mélange Ar :  $Cl_2$  qui grave plus lentement le diamant en évacuant le carbone sous forme de gaz CCl et améliore aussi la rugosité de l'interface gravée et la

mettent en avant les résultats associés par la réalisation de microlentilles [196] (cf. Fig. 27).

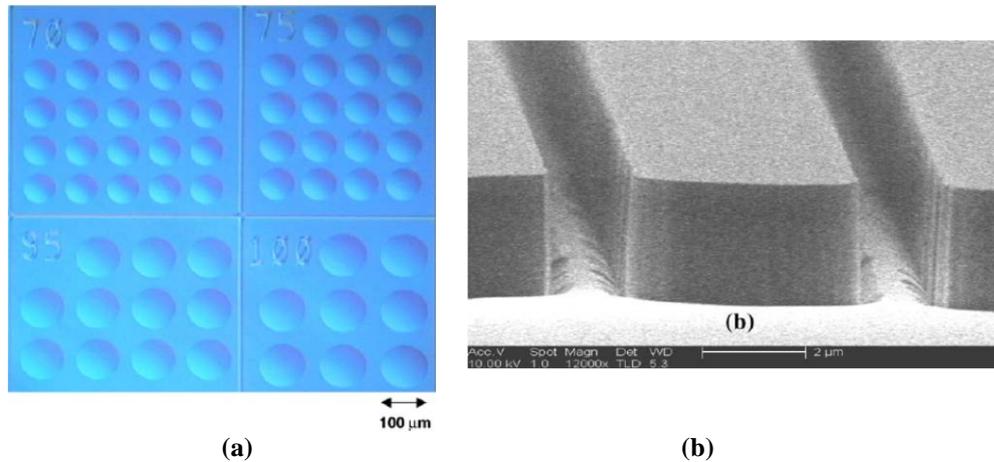


Fig. 27 : Images de (a) microlentilles [196] et (b) d'un réseau [194] gravés dans du diamant.

### 2.3.3. Les VECSEL « microchip » à micro-optiques en diamant

Comme indiqué précédemment, pour assurer un meilleur contrôle de la qualité du faisceau émis sur une plus grande gamme de puissance, il convient d'établir une cavité laser pour laquelle la taille du mode est moins sensible à la lentille thermique. Pour parvenir à ce résultat, nous avons, dans un premier temps, choisi de réaliser des VECSEL microchip à cavité plan-concave en intégrant une microlentille à la fenêtre en diamant (voir Fig. 28).

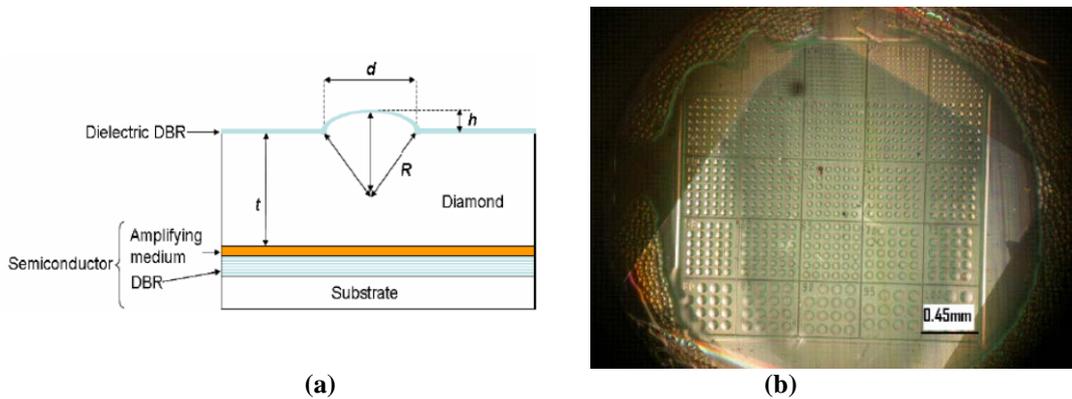


Fig. 28 : (a) Schéma et (b) tableau de VECSEL microchip microlentillés [SC42].

Dès 2007, avec Nicolas Laurand, alors post-doctorant, nous nous appuyons sur les développements internes de microlentilles pour étudier les VECSEL microchip microlentillés [SC42]. Ces travaux font suite à quelques démonstrations de VCSEL à miroirs courbes [197][198] et de VECSEL microchip microlentillés à injection électrique [199][200]. Dans notre étude [SC42], nous mettons en évidence deux régimes de fonctionnement où l'émission obtenue peut être  $TEM_{00}$  et qui correspondent (i) au cas où la taille du mode de pompe est identique à celle du signal, elle-même définie par le rayon de courbure et la distance du micro-miroir et (ii) à une situation où le diamètre de la microlentille sert de filtre spatial. Cherchant augmenter la puissance

émise par ces sources, nous attachons, dans un premier temps, à augmenter la taille du mode fondamental et donc à agrandir la distance focale de la microlentille [SC54]. Pour ce faire, nous agrandissons le diamètre des microlentilles (jusqu'à 300  $\mu\text{m}$ ) et choisissons des conditions de gravure de moindre sélectivité par rapport au masque ( $V_{\text{gravure,diamant}}/V_{\text{gravure,masque}}$ ) [201]. Nous parvenons ainsi à générer jusqu'à 180mW à 1060 nm avec un faisceau monomode latéral de 42  $\mu\text{m}$  de diamètre et jusqu'à 1W lorsque la pompe est  $\sim 1,5$  fois plus large que le mode du signal. Avec ce démonstrateur, nous nous approchons néanmoins des limites de cette approche qui sont essentiellement liées au mode de fabrication de la microlentille. En effet, si la tension de surface permet la formation du dôme pour les petites tailles de microlentilles, quand le diamètre devient trop important, on assiste à l'aplatissement du centre du dôme voire à son effondrement [202].

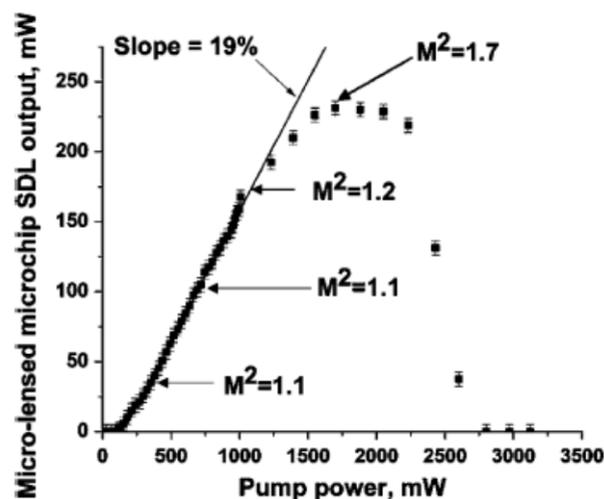
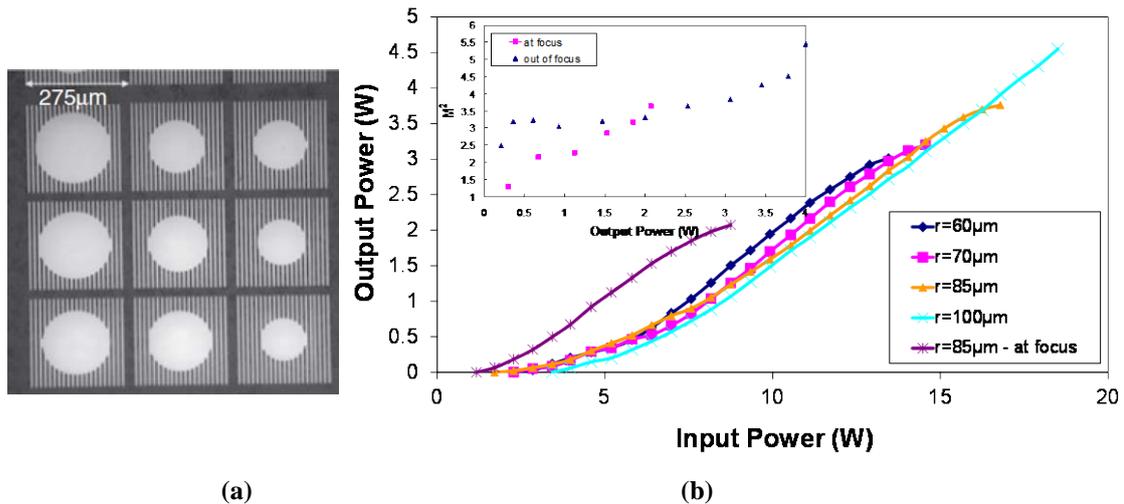


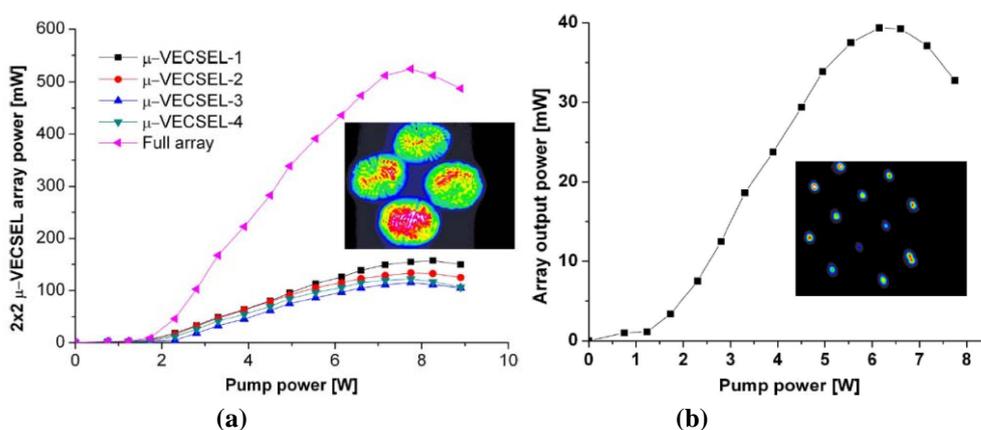
Fig. 29 : (a) Performances d'un VECSEL microchip à microlentille de grande longueur focale ( $f=9\text{mm}$ ) [SC54].

Pour s'affranchir de ces contraintes technologiques, nous avons étudié des VECSEL microchip à filtrage spatial implémenté sous la forme d'un VECSEL microchip cavité plan-plan dont le miroir de sortie est de taille finie [SC75]. Techniquement, nous avons choisi une méthode qui s'apparente à l'ouverture intra-cavité dans un laser à solide conventionnel. Pour cela, nous avons créé des ouvertures en définissant des zones à fortes pertes (de forte rugosité) sur la surface (extérieure) du diamant avant de déposer le miroir diélectrique de sortie. L'ouverture se retrouve ainsi au maximum du champ intra-cavité et réalise une sélection de fort contraste (de réflectivité) contrairement à la technique déployée dans les VCSEL [203][204] où la (faible) modulation de réflectivité est induite par gravure d'une ou de plusieurs couches externes du miroir. Dans la gamme de tailles d'ouverture étudiée, les lasers s'avèrent multimodes mais la présence de l'ouverture permet de réduire la détérioration de la qualité d'émission [SC75]. La structuration sous forme de réseau des zones rugueuses permet aussi d'introduire une biréfringence artificielle qui induit une orientation privilégiée de la polarisation des modes d'ordre élevés qui interagissent le plus avec le réseau [SC75].



**Fig. 30 :** (a) Fenêtre diamant incorporant un tableau d'ouvertures à réseau externe rugueux (opaque) (b) Performances des VECSEL microchip incluant ces ouvertures (d'après [SC75]).

Jusqu'ici les travaux présentés sur l'augmentation de puissance portaient sur l'opération de VECSEL microchip individuels mais nous nous sommes aussi intéressés à l'utilisation de VECSEL microchip en matrices (bidimensionnelles). Les premiers résultats démontrés exploitaient l'invariance spatiale de la structure d'un VECSEL microchip à cavité plan-plan et utilisait une mise en forme statique (division à l'aide d'une optique diffractive) voire dynamique (grâce à un modulateur de lumière spatial SLM) du faisceau de pompe pour créer une matrice de VECSEL microchip [SC28]. Nous avons aussi étudié une configuration plus conventionnelle basée sur l'excitation à l'aide d'un faisceau unique (de grand diamètre) de matrices de VECSEL microchip microlentillés [SC50]. Nous avons ainsi pu démontrer la combinaison incohérente de quatre lasers multimodes générant jusqu'à 550 mW de puissance ou 12 micro-lasers monomodes émettant au total 40 mW mais avec une faible densité d'émetteurs (voir Fig. 31). Ces derniers travaux s'intégraient plus largement dans l'activité portant sur la combinaison cohérente ou incohérente de lasers en fort essor depuis 2005 [205]. En particulier, ils faisaient suite aux résultats de Novalux qui développait de matrices incohérentes de VECSEL compacts pompés électriquement pour une utilisation comme source laser pour des projecteurs cinématographiques [206][207] et ont été menés en parallèle des développements, notamment de Princeton Optronics, de matrices de VCSEL pour utilisation comme source de pompage [208].



**Fig. 31 :** Combinaison incohérente de VECSEL microchip microlentillés (a) multimodes et (b) monomodes [SC50].

### 2.3.4. Vers des VECSEL « microchip » avancés

Dans les paragraphes précédents, nous avons vu comment les micro-optiques en diamant pouvaient améliorer les performances des VECSEL microchip. Dans ce paragraphe, je présente des études complémentaires auxquelles j'ai contribué visant à améliorer la qualité ou versatilité des VECSEL microchip.

Tout d'abord, pour améliorer la pureté spectrale, dans le cadre de la thèse de Stéphanie Giet, nous nous sommes intéressés à des techniques de sélection spectrale compatibles avec l'intégration (quasi)-monolithique dans des VECSEL microchip. Ces travaux ont coïncidé avec l'émergence de réseaux permettant d'obtenir de forte réflectivité soit sous la forme de réseau de Bragg volumique (VBG) [209] soit de filtres résonants à mode guidé (GMRF) [210][211]. Les premiers réseaux mentionnés sont en fait des miroirs de type DBR inscrits dans des verres photosensibles qui présentent la particularité d'avoir un faible contraste d'indice ( $\sim 3 \cdot 10^{-4}$ ) et donc une faible largeur spectrale de réflexion [212]. Les seconds sont constitués d'un réseau sub-longueur d'onde gravé sur un empilement de couches minces [213]. Dans ce cas, la sélection spectrale résulte du couplage résonant du faisceau incident vers le mode guidé supporté par l'empilement. Nous avons pu démontrer la viabilité d'utiliser tant les VBG achetés chez Ondax Inc **[SC40]** que les GMRF obtenus en collaboration avec le groupe d'Olivier Parriaux de l'Université de Saint Etienne **[SC46]** pour sélectionner la longueur d'onde d'émission dans des VECSEL à cavité conventionnelle. Toutefois, dans les deux cas, les réflectivités effectives se sont révélées partiellement compromises du fait de la taille restreinte et de l'ouverture angulaire des faisceaux mis en jeu [214][215]. L'utilisation de ces réseaux en report sur des VECSEL microchip requièrera d'évaluer de leur impact sur le faisceau de pompe et nécessitera certainement de les adapter pour une opération optimale notamment du fait des plus petites tailles de faisceaux mises en jeu. Globalement, cette activité s'intègre pleinement dans le champ d'études de la stabilisation de lasers (de toute forme) à l'aide de ces structures à réseaux [216]-[218], domaine de recherche très actif auquel une partie de mes perspectives de recherche se rattachent comme on le verra dans la section prospective de ce manuscrit.

Par ailleurs, comme l'émission directe dans le visible (spécialement dans la gamme de longueurs d'onde de 450 – 640 nm) de lasers à semiconducteurs s'avère difficile et que de tels lasers compacts sont très demandés notamment pour des applications de biophotonique et de projecteurs portables, nous avons entamé une étude visant à évaluer la faisabilité de réaliser des VECSEL microchip incorporant une conversion de fréquence non-linéaire intra-cavité. Durant la thèse de Sharon Vetter, nous avons franchi une étape clé en parvenant à assembler le miroir actif à semiconducteur avec la fenêtre diamant (pour la dissipation thermique) et un cristal non-linéaire grâce à deux collages par capillarité liquide successifs **[SC156]** (voir Fig. 32 (a)). Cet assemblage, une fois introduit dans une cavité externe grâce à l'ajout d'un miroir (d'optique classique), permet de générer un signal de seconde harmonique (par rapport à la longueur d'onde d'émission de la zone de gain). Cependant, les performances obtenues (cf. Fig. 32 (b)) n'étaient guère attractives du fait d'un décalage spectral entre la longueur d'onde d'émission du miroir de gain et la longueur d'onde optimale de conversion non-linéaire du cristal employé. La démonstration complète et l'optimisation de VECSEL microchip à conversion non-linéaire intra-cavité restent à ce jour des défis à relever. Contrairement

aux lasers microchip doublés dont le gain est un cristal dopé, l'intégration de la stabilisation en polarisation et d'un filtrage spectral y joueront un rôle significatif, justifiant en partie l'intérêt pour l'utilisation de structures de type GMRF dans les VECSEL. Ces considérations amènent aussi à se demander si la fenêtre en diamant ne pourrait pas être utilisée comme élément de conversion non-linéaire et, de ce fait, jouer un rôle actif plutôt que passif dans la cavité.

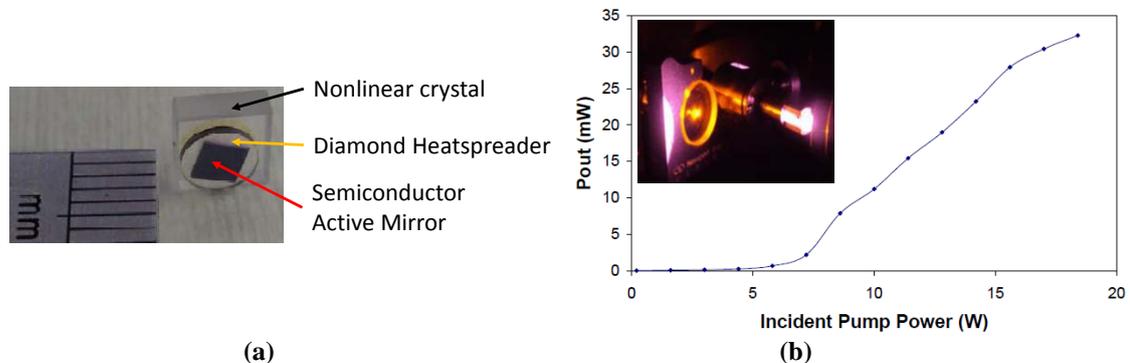


Fig. 32 : (a) Photographie et (b) performances de l'assemblage gain-convertisseur non-linéaire qui constituerait le cœur d'un VECSEL microchip à conversion de fréquence intra-cavité [SC156].

## 2.4. Le diamant : un matériau actif

Les sections précédentes ont décrit la manière dont nous avons utilisé le diamant dans le domaine de l'ingénierie des lasers à solide, tout d'abord en tant que matériau transparent permettant une dissipation thermique efficace et facilitant la réalisation de VECSEL sur une gamme spectrale étendue, puis en tant qu'élément d'optique passive constituant le cœur des VECSEL microchip. Dans cette section, nous nous intéressons au diamant comme matériau actif tant comme milieu à gain pour des convertisseurs non-linéaires que comme matériau pour l'optique quantique intégrée. La première de ces activités s'inscrit dans la continuité de la diversification des fonctions jouées par la fenêtre de dissipation thermique de VECSEL comme mentionné dans mon brevet [SC-P1] tandis que la seconde est à mettre en relation avec les procédés de micro-fabrication mis au point et décrits au paragraphe 2.3.2.

### 2.4.1. Le diamant comme cristal non-linéaire

Tout comme le silicium, le diamant est un matériau cubique à faces centrées qui appartient au groupe  $O_h^7$  (aussi noté Fm3d). Du fait des symétries cristallines associées, les coefficients de polarisabilité optique du second ordre sont nuls. Les non-linéarités les plus accessibles sont donc liées aux processus du troisième ordre, et, plus spécialement, à la diffusion Raman stimulée ou à l'effet Kerr (auto-modulation de phase et mélanges à quatre ondes).

L'effet non-linéaire d'ordre trois le plus couramment utilisé en ingénierie des lasers exploite la diffusion inélastique Raman stimulée du matériau comme processus fournissant le gain du système. Du fait des puissances requises pour atteindre la puissance seuil, les lasers Raman ont longtemps été l'apanage des systèmes impulsionsnels de forte puissance crête. L'avènement de la fibre optique présentant de faibles pertes de propagation a permis de maintenir des densités de puissance de pompe

élevées sur de grandes distances, facilitant l'obtention d'un gain Raman mono-passage élevé et la génération en régime continu, y compris avec pompage direct par diodes lasers. Alternativement, en 1998, J.K. Brasseur et al, de Montana State University, rapportent l'utilisation d'une cavité de très haute finesse doublement résonante (soit résonante tant à la longueur d'onde de pompe que du signal) pour atteindre l'émission laser Raman avec un gaz de H<sub>2</sub> et des puissances de pompe de l'ordre de quelques milliwatts [219], commensurable avec le pompage par diode laser [220]. Si les travaux sur les lasers Raman à base de cristaux débutent au milieu des années 1970 [221], la communauté ne s'intéresse que tardivement à la génération sous pompage continu, qui, de ce fait, n'est obtenue qu'en 2004 [222]. Techniquement, cette démonstration est réalisée avec une cavité mono-résonante pompée par un laser argon et à l'aide d'un cristal de nitrate de baryum (Ba(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>), matériau connu comme les tungstates, le vanadate d'yttrium (YVO<sub>4</sub>) et le diamant naturel pour leur fort gain Raman [223]. Cette étude est suivie en 2005 du rapport du premier système pompé par diodes lasers qui emploie un cristal de tungstate de potassium dopé néodyme réalisant une auto-conversion Raman (c'est-à-dire fournissant le gain pour la pompe (1067 nm) et engendrant la conversion Raman vers 1181 nm), avec une cavité doublement résonante [224].

En 2006, A.A. Kaminskii de la Russian Academy of Sciences réaffirme l'intérêt d'utiliser le diamant, et en particulier le diamant de synthèse produit par CVD, comme élément de gain Raman après une étude spectroscopique qui confirme la suprématie de son coefficient de gain (établi comme supérieur à 11 cm/GW à la longueur d'onde de 1064 nm) [225]. En 2008 et 2009, R.P. Mildren et al de Macquarie University démontrent des lasers Raman pompés par un laser fonctionnant en mode déclenché avec des impulsions dont l'énergie peut atteindre 0,4 mJ à la longueur d'onde de 532 nm et qui utilisent respectivement un diamant naturel (de type IIa) [226] et un diamant CVD [227]. En 2010, à l'University of Strathclyde, mes collègues du groupe « lasers à solide », sous la direction d'Alan Kemp, introduisent un cristal de diamant CVD dans la cavité d'un laser Nd:YVO<sub>4</sub> déclenché et obtiennent une efficacité relative de conversion de 4% limitée par les pertes (1% par passage) dans le diamant [228]. Ils établissent ensuite la première démonstration expérimentale d'un laser Raman fonctionnant en régime continu après avoir introduit un facteur de mérite qui combine les effets de gain et de lentille thermique du cristal Raman, et qui identifie ce matériau comme le meilleur milieu pour ce type de conversion [229]. Ils améliorent ensuite ce résultat en choisissant un cristal plus long, coupé et orienté plus favorablement et présentant moins de pertes, le tout pour maximiser le gain net Raman. La puissance de signal Raman généré atteint ainsi 1,6 W avec une pente de conversion de 18% (par rapport à la puissance absorbée des diodes de pompe du laser dopé Nd) [230]. Pour pouvoir accorder la longueur d'onde d'émission Raman, ils remplacent le laser de pompe précédent (Nd:YVO<sub>4</sub>) par un VECSEL accordable fonctionnant aussi à ~1060 nm et obtiennent ainsi jusqu'à 1,3 W de signal Raman centré à 1229 nm et accordable sur une gamme de 27 nm [231]. Parallèlement, Sabella et al de Macquarie University démontrent l'opération laser Raman à base de diamant, sous pompage externe en régime déclenché, avec des efficacités de conversion record, atteignant 84% pour le transfert d'énergie de 1064 nm à 1240 nm [232] et 71% pour le transfert cascadié de 1064 nm vers la gamme de sécurité oculaire (1485 nm) où ces systèmes peuvent servir comme source LIDAR [233]. Depuis 2011, les travaux se sont orientés vers le développement de sources de hautes puissances tant en régime impulsionnel [234][235] que continu [236]-[239]. Quelques études ont aussi porté sur la conversion Raman d'impulsions ultra-courtes qu'elles

soient picosecondes [240][241] ou femto-secondes [242]. Enfin, quelques caractérisations supplémentaires de spectroscopie du gain Raman et des pertes des diamants synthétiques ont aussi été présentées [236][237][243].

#### **2.4.2. Le diamant pour l'optique intégrée non-linéaire et quantique**

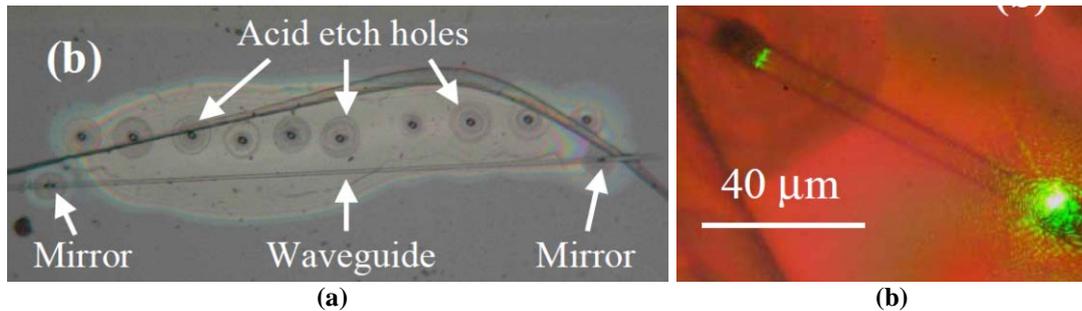
L'optique intégrée sur diamant est un domaine de recherche qui a émergé à partir de 2008, une fois que la communauté scientifique travaillant sur l'optique quantique a établi que les impuretés luminescentes du diamant et, en particulier, le centre coloré azote-lacune (centre NV), conservent des temps de cohérence de spin électronique longs même à température ambiante. Cette propriété ouvre la voie vers la réalisation de sources de photons uniques plus pratiques que celles basées sur les boîtes quantiques (à semiconducteur) [137]. Néanmoins, pour rendre cette source attrayante pour la cryptographie quantique ou les tests d'informatique quantique, un centre luminescent isolé doit être placé au sein d'une microcavité de fort facteur de qualité afin de pouvoir, grâce à l'effet Purcell, augmenter le taux de génération de photons uniques. Si cette cavité est réalisée en optique intégrée, il devient opportun de considérer la réalisation de l'ensemble des fonctionnalités nécessaires à l'optique quantique (surtout des portes logiques) sur cette même plateforme, une activité menée et promue notamment par J. O'Brien de l'University of Bristol [244].

Indépendamment et en concertation avec mon collègue Alan Kemp, j'ai initié en 2010 une activité sur les guides d'onde en diamant pour continuer de capitaliser sur les développements de micro-fabrication décrits au paragraphe 2.3.2 et avec pour objectif d'explorer le potentiel des convertisseurs Raman intégrés fonctionnant en régime continu ou excités par des impulsions ultra-courtes.

Comme indiqué auparavant, les techniques de gravure du diamant étant établies, les difficultés principales rencontrées pour fabriquer des guides d'onde étaient liées la réalisation du guide planaire initial et à la petite taille ( $<5 \times 5 \text{ mm}^2$ ) des substrats.

Historiquement, la première solution pour réaliser le guide planaire, rapportée par P. Olivero en 2005 [245], consiste à utiliser une membrane de diamant suspendue dans l'air. La technique, inspirée d'un procédé de lift-off de membranes de dimensions micrométriques de substrats de diamant [246], implique successivement une implantation protonique de forte dose qui induit une graphitisation du diamant, un recuit à  $1100 \text{ }^\circ\text{C}$  pour obtenir une interface nette entre le diamant et le graphite, la définition de trous de libération à l'aide d'un faisceau d'ions (gallium) focalisés (FIB) et, finalement, l'élimination du graphite par gravure électrochimique à l'acide borique dilué. La formation d'une structure latérale de guide de type ridge de  $2 \mu\text{m}$  de large et la réalisation de facettes à  $45^\circ$  au FIB permettent d'obtenir un guidage multimode d'un faisceau vert sur  $\sim 65 \mu\text{m}$ . En 2008, le même groupe modifie cette approche en remplaçant la structuration latérale du guide par FIB par la définition d'une structure de type « rib » par photolithographie et gravure ICP-RIE à base d'oxygène [180]. Fig. 33 illustre le résultat de ce procédé ainsi que la propagation multimode d'un faisceau vert mais toujours sur de faibles distances. Entre 2010 et 2012, P. Olivero et al de l'INFN de Turin montrent que l'implantation de protons introduit une densité de lacunes entre l'interface air/diamant et la distance d'arrêt des ions implantés et que l'indice de

réfraction et le coefficient d'absorption augmentent linéairement avec la concentration de lacunes générées (la dose) [247]-[249]. Ils suggèrent donc que des guides d'onde faiblement confinés ( $\Delta n_{\max} \sim 0,1$  avec  $n=2,42$ ) pourraient être fabriqués de cette manière (sans structuration latérale) [248]. On peut aussi en déduire que les guides fabriqués à partir de structures planaires définies par implantation vont présenter une absorption matérielle supérieure à celle du matériau non implanté. En 2011, I. Bayn et al de Technion fabriquent des cavités à cristaux photoniques sur membranes définies par implantation et transférées sur des supports en silicium évidés mais ils ne parviennent pas à observer la signature spectrale des cavités réalisées [250].



**Fig. 33 : (a) Photographie et (b) démonstration de guidage multimode des premiers guides d'onde de type rib réalisés sur diamant [180].**

En 2007, Wang et al [251][252] de l'University of California utilisent une approche alternative exploitant des films de diamant sur isolant, c'est-à-dire des films de diamant poly-cristallin à grains nanométriques (NCD) déposés sur substrat de silicium recouvert d'un micromètre de silice. Ils structurent ensuite ces films DOI par lithographie électronique et gravure sèche pour former des structures à cristaux photoniques de type L7 ou des micro-disques de 10 à 15 μm de diamètre qu'ils libèrent du substrat par gravure chimique sélective de la couche de silice. Si cette dernière étape n'est pas nécessaire pour l'obtention d'un guide plan, elle réduit les pertes encourues dans les composants considérés. Les facteurs de qualité mesurés à ~638 nm atteignent 600 et 100 respectivement, suggérant que les rugosités et l'absorption matérielle y sont élevées. Des résultats similaires sont obtenus en 2011 par Universität des Saarlandes mais avec un film de DOI utilisant une couche d'iridium/zircone stabilisée avec yttria au lieu de silice [253]. En 2012, X. Checoury et al de l'Institut Electronique de Fondamental améliorent cette approche en lissant la surface des films DOI grâce à un dépôt de silice sous forme de HSQ (Hydrogen SilsesQuioxane) et une gravure Ar/O<sub>2</sub> calibrée pour graver aussi vite la silice que le diamant. Ils parviennent ainsi à fabriquer des cavités à cristaux photoniques présentant des facteurs de qualité de 2800 à 1550 nm et des guides d'accès de type ridge avec un niveau de pertes de propagation de 70 cm<sup>-1</sup> [254].

En 2010, sous mon impulsion, nous achetons des wafers de DOI à grains micrométriques chez sp<sup>3</sup> Diamond Technologies, Inc car les pertes matérielles doivent être moins élevées (voir Fig. 23). Nos premiers essais de gravure sèche par ICP-RIE Ar/O<sub>2</sub> de guides d'onde sont, par contre, comme l'atteste la Fig. 34, non concluants dans la mesure où la gravure semble se faire de façon privilégiée le long des grains de diamant, et produit des interfaces très rugueuses [255]. Nous abandonnons donc cette approche mais elle sera reprise avec plus de succès en 2013 par P. Rath et al du Karlsruhe Institute of Technology [256], qui, avec des échantillons de taille de grains intermédiaire (de l'ordre 100 nm), réalisent des structures en anneaux avec guide d'accès latéraux ayant des facteurs de qualité de 11000 à la longueur d'onde 1550 nm et

des guides présentant des pertes de propagation de 5dB/mm, soit 5 fois mieux que celles rapportés en [254].

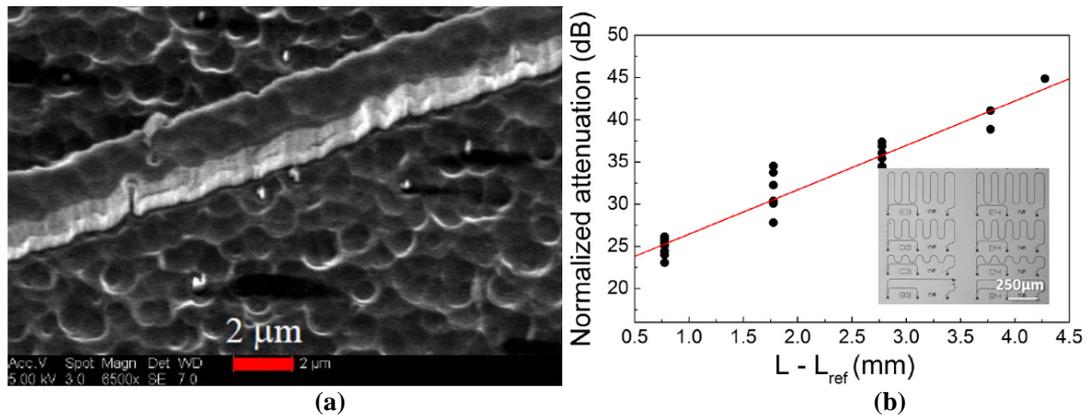


Fig. 34 : (a) Image MEB de tests de gravure de DOI à grains micrométrique menés à l'University of Strathclyde [255] et (b) image et caractérisation des pertes de guides sur DOI à grains de ~100nm (d'après [256]).

En 2011, nous introduisons une autre approche qui s'appuie sur des substrats de diamants CVD de  $2 \times 2 \text{ mm}^2$  polis 6 faces et amincis commercialement (par Delaware Diamond Knives (DDK), Inc) jusqu'à une épaisseur de  $20 \mu\text{m}$  (pour maintenir une rigidité mécanique suffisante) que nous montons (à la colle Norland Optical Adhesive 81) sur un support (wafer de silicium recouvert d'une couche de silice). Après un dépôt de silice sur la face à micro-structurer, qui servira de masque dur pour la gravure du diamant, la résine photosensible est déposée par impression jets d'encre multi-passages pour éviter les effets de bords conventionnellement observés lors des dépôts standard à la tournette. Les motifs sont ensuite définis par photolithographie avant d'être transférés dans le diamant en deux étapes par gravure sèche ICP-RIE (avec un mélange Ar/CHF<sub>3</sub> pour la gravure de la silice et Ar/O<sub>2</sub> pour le diamant). En gravant sur  $7 \mu\text{m}$ , des guides de type rib de  $2 \text{ mm}$  de long sont ainsi réalisés (voir Fig. 35). L'injection d'un signal rouge (633 nm) par la tranche permet de valider la propagation guidée mais la qualité des facettes s'avèrent insuffisante pour pouvoir évaluer les pertes (par analyse Fabry-Pérot). En parallèle, dans le cadre de la thèse de Loyd McKnight, nous avons développé un modèle entièrement analytique permettant d'optimiser la géométrie des guides « rib » pour obtenir le meilleur taux de conversion Raman en régime continu [SC68]. Les résultats montrent qu'il existe un compromis entre le confinement maximal et les pertes dues à la rugosité des flancs gravés et que les paramètres optimaux pour minimiser la puissance seuil sont des guides de  $3,5 \times 3,5 \mu\text{m}^2$  avec une profondeur de gravure  $\sim 2,3 \mu\text{m}$  pour une puissance seuil de 23 mW si la longueur d'onde de la pompe est de 532 nm et de 125 mW si pour un laser de pompe infrarouge émettant à 1064 nm. Le modèle montre aussi qu'il est avantageux de les élargir (jusqu'à  $5 \times 5 \mu\text{m}^2$  avec une profondeur de gravure  $\sim 3 \mu\text{m}$ ) pour obtenir la conversion maximale à une puissance de pompe donnée (20W orienté selon l'axe TE). Nous n'aurons pas l'occasion de réaliser de nouveaux guides en diamants et donc de tester ce modèle expérimentalement.

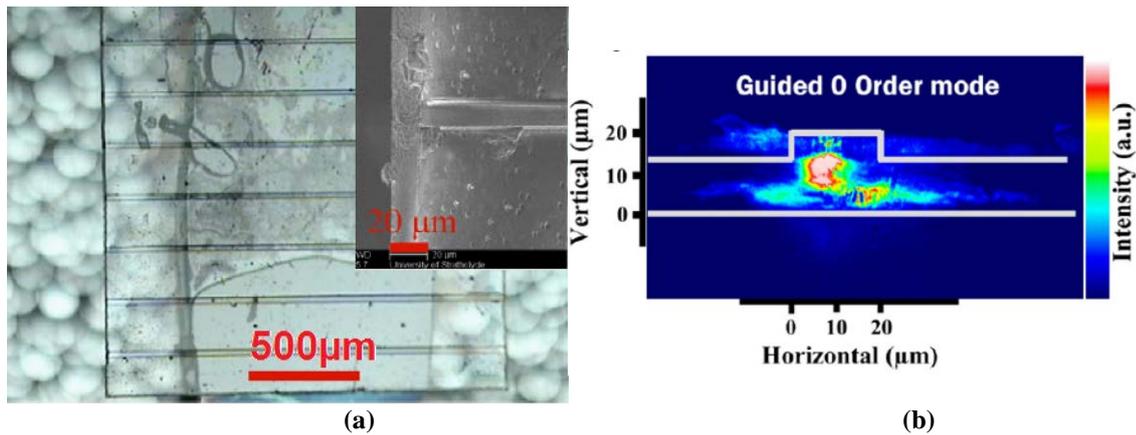


Fig. 35 : (a) Photographie et image MEB d'une des facettes d'un guide rib en diamant que nous avons fabriqué à l'University of Strathclyde et (b) profil du mode excité par un laser He-Ne (633 nm) [180].

A partir de 2011, A. Faraon et al du California Institute of Technology publient la réalisation de d'anneaux (de 4,5 μm de diamètre et 500 nm de largeur) couplés à des guides d'accès de type ridge au bout desquels sont gravés des réseaux de couplage [257][258]. Comme nous, ils utilisent du diamant CVD homo-épitaxié mais les échantillons initiaux, préparés par Element Six, sont des substrats de diamant de 50 μm d'épaisseur, reportés sur des substrats de silicium recouverts de 2 μm de silice, qui sont ensuite polis (mécaniquement) jusqu'à une épaisseur de 5 μm. Ils amincissent ensuite les échantillons entiers jusqu'à obtenir des membranes de 300 nm d'épaisseur par gravure sèche avec un mélange Ar/O<sub>2</sub>. Après lithographie électronique et transfert dans la membrane par gravure sèche, ils mesurent des coefficients de qualité pouvant atteindre 5500 à 638 nm avec un taux d'extinction de 90% [258]. De plus, ces structures permettent d'augmenter le taux d'émission spontanée des centres azote-lacune d'un facteur 12 (cf. Fig. 36) [258]. B.J.M. Haussmann et al, de Harvard University (USA, MA), suivent la même approche technologique et fabriquent des anneaux de 40 μm de diamètre présentant, seuls, des facteurs de qualité de  $12 \cdot 10^3$  à la longueur d'onde de 670 nm et, une fois couplés à des guides d'accès, des facteurs de qualité de 2500 [259]. L'excitation d'un centre azote lacune en bordure de l'anneau permet aussi d'obtenir un taux de corrélation en intensité du second ordre inférieure à 0,5, c'est-à-dire de démontrer une émission non classique de cette source.

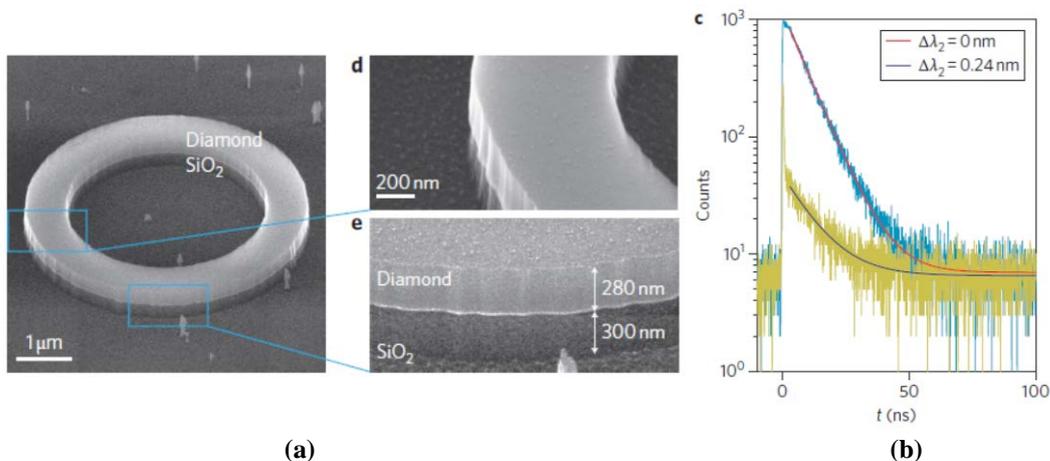
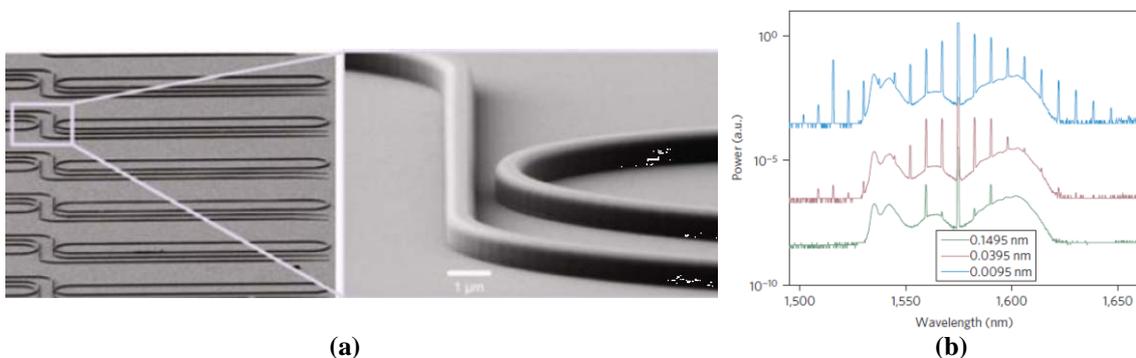


Fig. 36 : (a) Image MEB de résonateurs en anneaux fabriqués au California Institute of Technology et (b) modification de la durée d'émission du centre azote-lacune par la résonance de l'anneau [257].

A partir de 2012, ce même groupe modifie l'orientation de ses travaux vers l'optique non-linéaire sur diamant. Les développements de résonateurs en anneaux se poursuivent notamment avec la réalisation d'anneaux de  $105\ \mu\text{m}$  de diamètre couplés latéralement à des guides d'accès, le tout enterré par PECVD sous une couche de silice [260]. Des adaptateurs de modes en PMMA sont aussi intégrés aux bouts des guides dont les facettes sont clivées puis polies, l'ensemble facilitant un couplage à faibles pertes par la tranche à l'aide de fibres lentillées. Les facteurs de qualité mesurés atteignent alors  $2,5 \cdot 10^5$  à la longueur d'onde de  $1560\ \text{nm}$  et des dégénérescences de résonances entre les modes se propageant dans le sens horaire et antihoraire induites par des défauts localisés en périphérie de l'anneau sont observées. Finalement, en 2014, ils éliminent ce dernier artefact après avoir supprimé les sauts d'écriture survenant lors de la lithographie électronique. Ils parviennent ainsi à fabriquer des résonateurs de  $40\ \mu\text{m}$  de diamètre couplés à des guides d'accès présentant des facteurs de qualité de  $1,1 \cdot 10^6$  à longueur d'onde de  $1560\ \text{nm}$ . Lorsque le dispositif est excité avec un laser de faible largeur de raie, de puissance supérieure à  $\sim 20\ \text{mW}$  et dont la longueur d'onde est légèrement décalée vers le bleu par rapport à une des résonances de l'anneau, un mélange à quatre ondes dégénéré transfère une partie de l'énergie de pompe vers les résonances voisines et, en fonction de la puissance injectée, d'autres mélanges à quatre ondes en cascade sont stimulés pour créer un peigne de fréquences possédant, pour  $80\ \text{mW}$  de signal injecté, jusqu'à 20 raies séparées de  $\sim 925\ \text{GHz}$  [261] (cf. Fig. 37). Ces performances leur permettent d'extraire l'indice de réfraction Kerr,  $n_2$ , de  $8,2 \cdot 10^{-20}\ \text{m}^2\text{W}^{-1}$ . Cette valeur est proche de celle du nitrure de silicium qui est technologiquement moins contraignant. De ce fait, la conversion Kerr à base de diamant apparaît moins intéressante, à moins de vouloir l'exploiter simultanément avec l'effet Raman comme suggéré par N. Vermeulen et al de la Vrije Universiteit Brussel [262].



**Fig. 37 : (a) Image MEB de résonateurs en anneaux fabriqués à Harvard University et (b) spectres du peigne de fréquence obtenus pour 80mW de pompe injectés et différents décalages entre la longueur d'onde de pompe et la résonance [261].**

## **2.5. Conclusions**

Dans ce chapitre, j'ai décrit comment j'ai participé à faire progresser l'utilisation du diamant de la dissipation thermique, à des fonctions d'optique passive pour finir à des utilisations en tant source de gain pour l'optique non-linéaire ou la photonique quantique et comment cette évolution a influencé et s'est nourrie des développements menés sur lasers à solides, plus particulièrement sur les VECSEL en cavité standard ou monolithiques et sur les convertisseurs Raman et Kerr. Ce chapitre a aussi été l'occasion de mentionner des travaux sur les sources exploitant des réseaux sub-longueurs d'onde et sur les peignes de fréquences à base de résonateurs en anneaux, émetteurs qui seront au centre de ma prospective.

Les travaux les plus marquants dans ce domaine ont été :

- L'identification de la technique du « dissipateur thermique » comme la plus appropriée pour la diversification en longueur d'onde des VECSELS **[SC24]** et sa validation expérimentale **[SC8][SC53]**
- La mise en place de méthodes de structuration du diamant et de leur utilisation pour fabriquer des VECSEL microchip micro-lentillés **[SC42]**
- Le choix d'une filière à base de diamant cristallin pour la photonique sur diamant avec la démonstration préliminaire d'un guide d'onde **[SC67]**.

# CHAPITRE 3

## LES LASERS A IMPULSIONS COURTES EXPLOITANT DE NOUVEAUX ABSORBANTS SATURABLES

Ce chapitre est consacré aux travaux que j'ai menés et supervisés entre 2002 et 2012 portant sur une nouvelle génération de miroirs à semiconducteur à absorption saturable (SESAM) dont l'introduction avait pour but de permettre l'émission d'impulsions courtes sur une gamme spectrale étendue ou d'augmenter le degré de contrôle de ces lasers impulsionnels.

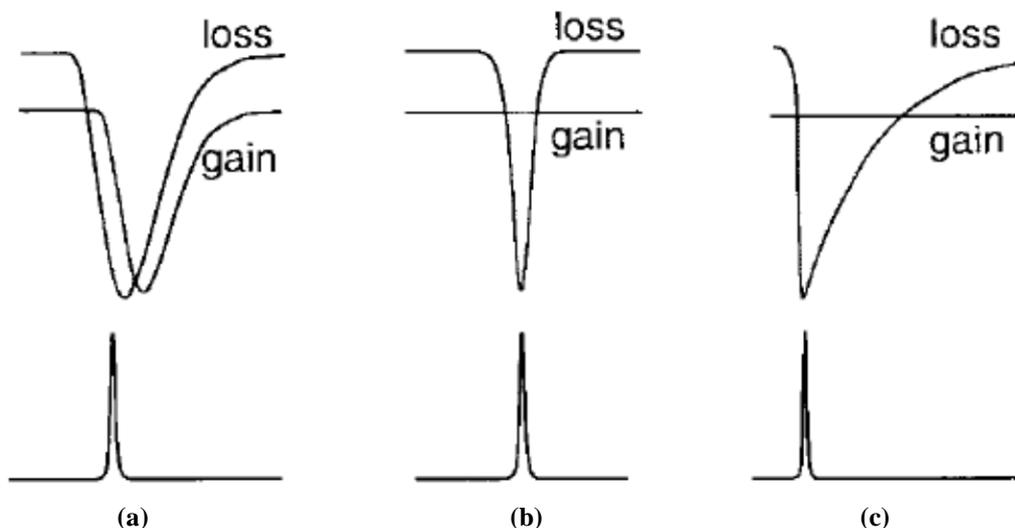
### **3.1. Contexte**

Les lasers permettant la génération d'impulsions ultra-courtes (femto-secondes) sont constitués d'un milieu à gain spectralement large permettant l'amplification d'un nombre élevé de modes longitudinaux de la cavité, d'un dispositif de compensation de dispersion (à prisme(s) [263], à miroirs chirpés [264], à interféromètre de Gires-Tournois [265]) assurant que l'écart fréquentiel entre ces modes est constant et d'un élément conduisant à leur mise en cohérence ou synchronisation. Ce dernier élément peut être actif sous la forme d'un modulateur, ou passif, déclenché par les variations de puissance intra-cavité. Pratiquement, ces lasers impulsionnels ont effectivement émergés à partir avec la découverte, en 1991, de la synchronisation passive par effet (d'auto-focalisation) Kerr (KLM pour Kerr Lens Modelocking) dans un laser Ti:saphir par le groupe de W. Sibbett de l'University of St Andrews [266]. La difficulté majeure associée à ce type de synchronisation était d'initier l'opération en mode impulsionnel de façon auto-induite. Pour résoudre ce problème, plusieurs méthodes ont donc été proposées et démontrées, notamment un déclenchement en faisant vibrer un des miroirs de la cavité [267], l'ajout d'un absorbant saturable à semiconducteur dans une cavité couplée externe [268], ou encore l'utilisation de cavités marginalement stables spécifiquement conçues pour maximiser l'impact de la auto-modulation de phase non-linéaire [269]. De 1994 à 1996, la poursuite des travaux sur l'utilisation des absorbants saturables à semiconducteurs conduit à la génération d'impulsions avec des absorbants à

puits quantiques placés directement intra-cavité (c'est-à-dire sans élévation de puissance ni filtrage résonants) et à établir, en plus du mode d'assistance au régime KLM, trois régimes propres de fonctionnement à base de cavités stables (illustrés en Fig. 38) qui sont :

- la synchronisation de modes à absorbant saturable rapide où l'impulsion est entièrement contrôlée par la dynamique de l'absorbant saturable,
- la synchronisation de modes à absorbant saturable lent où ce dernier déclenche l'impulsion et où la dynamique du gain contrôle la forme de la décroissance de l'impulsion et, enfin,
- la synchronisation de modes où l'absorption saturable induit la génération de solitons [270].

Ce dernier régime de fonctionnement est plus intéressant car il permet d'obtenir les impulsions les plus courtes, après le mode d'assistance KLM.



**Fig. 38 : Différents régimes de synchronisation de modes induits par des absorbants saturables : (a) à absorbant saturable lent, (b) à absorbant saturable rapide et (c) à effet soliton [270].**

Physiquement, les absorbants saturables à semiconducteurs sont souvent intégrés au dessus ou dans la première couche d'un miroir DBR et forment donc des miroirs à absorbant saturable semiconducteur (SESAM). Leur conception vise à introduire :

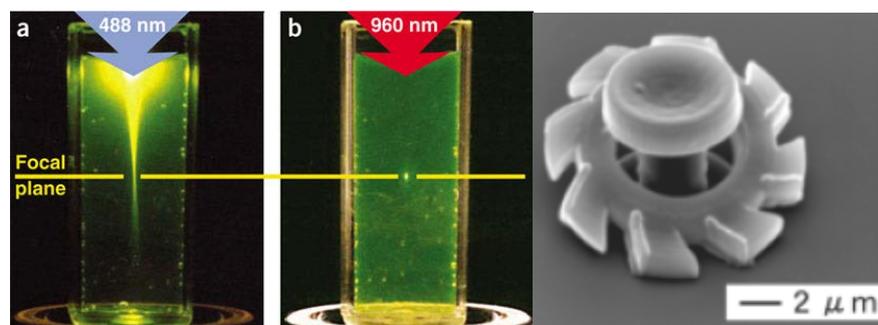
- une absorption saturable spectralement large avec une profondeur de modulation adéquate pour introduire un verrouillage suffisant entre les modes longitudinaux
- des pertes non saturables faibles pour garantir une émission efficace et stable
- une fluence seuil de saturation adaptée pour pouvoir atteindre la saturation avec la densité de puissance intra-cavité disponible mais pas trop faible pour éviter le fonctionnement instable avec des fluctuations basses fréquences de type mode déclenché (Q-Switched Mode-Locking - QSML)
- un temps de recouvrement (au niveau d'absorption complète) court pour, au moins, garantir le fonctionnement en régime d'absorbant saturable rapide.

Deux approches apparaissent néanmoins au niveau de leur implémentation pratique. La première, proposée et exploitée par le groupe d'Ursula Keller du Swiss Federal Institute of Technology (ETH), repose sur l'utilisation de puits quantiques dont l'énergie de bande interdite est plus faible que la longueur d'onde centrale d'émission laser visée et

dont la croissance est faite à basse température pour assurer un temps de recouvrement rapide [270]. Cette stratégie possède l'avantage de présenter une faible variation spectrale d'absorption, obtenue au détriment d'une concentration de défauts et donc de pertes non saturables élevées. La seconde approche, introduite par ATT Bell laboratories et reprise par notre groupe et par l'University of Southampton (A. Tropper) notamment, exploite des puits quantiques dont l'énergie bande interdite est légèrement décalée vers bleu par rapport à la longueur d'onde de fonctionnement du laser [271][272]. L'épitaxie de ces structures est réalisée à des températures standard favorisant les faibles pertes non saturables. Le recouvrement rapide de ce type d'absorbants saturables provient du décalage spectral non-linéaire induit par effet Starck en bord de bande interdite.

Ces aspects fondamentaux sur les sources impulsionnelles ultra-courtes ayant été établis au milieu des années 1990, les recherches dans le domaine de l'optique ultra-rapide s'orientent alors vers deux grandes tendances. La première classe d'études est dédiée à la poursuite des développements de lasers impulsionnels pico et femto-secondes plus performants et de leurs outils de caractérisation associés tandis que la seconde catégorie de travaux est orientée vers l'exploration des applications pouvant exploiter au mieux ces impulsions ultra-courtes.

Au niveau applicatif, on retiendra que le verrouillage en phase des différents modes longitudinaux établit un peigne de fréquences permettant, s'il est assez large (plus d'une octave - soit une gamme de fréquences allant de  $f_{\min}$  à  $2f_{\min}$ ) et asservi (par battement  $f-2f$ ), le référencement des fréquences RF sur les fréquences optiques ( $\sim$ THz) et de réaliser ainsi une métrologie temps-fréquence avec des précisions records ( $6 \cdot 10^{-14}$  in 2002). Ce résultat clé a donné lieu à l'attribution en 2005 du prix Nobel de Physique aux inventeurs de la méthode, les professeurs J.L. Hall et T.W. Hänsch [273][274]. Les autres applications démontrées s'appuient sur le fait que l'interaction entre des impulsions ultra-courtes ( $\sim$ 100 fs) et des matériaux (même transparents) peut induire, sans contact, une émission ou des modifications de ces matériaux en surface ou en profondeur sur de faibles volumes ( $\sim$ 30  $\mu\text{m}^3$  si le matériau réagit linéairement et moins de 0,5  $\mu\text{m}^3$  en régime nonlinéaire). L'exploitation des effets de modification structurelle a notamment conduit à l'usinage laser « sans échauffement » de métaux [275], à la lithographie nanométrique tridimensionnelle [276], et à la réalisation dans des substrats de verres de pièces micro-fluidiques pour la biologie sur puce [277]. Les excitations multi-photoniques ont facilité l'observation à haute résolution de cellules grâce à la microscopie nonlinéaire [278]-[280] tandis que la génération de hautes harmoniques ouvre la voie vers la spectroscopie atomique ultime [281][282].



(b)  
**Fig. 39 : Illustration de l'excitation multi-photons induite par les lasers à impulsions femtosecondes [283] et exemple de microturbine faite par lithographie 3D femtoseconde [276].**

L'ensemble de ces domaines d'utilisation s'est en fait nourri de l'amélioration des sources d'impulsions ultra-rapides qui a été obtenue en parallèle. Les gains en performance et en flexibilité de fonctionnement ont été identifiés dès le début comme des objectifs stratégiques de recherche par la communauté travaillant sur l'ingénierie de cette classe de lasers. En particulier, les axes spécifiques de développement visaient la mise au point de sources stables et capables de générer des impulsions de plus en plus courtes, de puissance crête de plus en plus élevée mais aussi fonctionnant à des longueurs d'onde centrale d'émission plus variées.

La démonstration de lasers Ti:saphir émettant des impulsions de durée de quelques cycles optiques sont réalisées à partir de 1997 [284][285] grâce au contrôle de la dispersion (au troisième ordre) par des miroirs chirpés, suivie en 2001 de l'émission sur une octave directement en sortie de l'oscillateur [286]. Si ce dernier niveau de performance n'a jamais été égalé par d'autres systèmes (milieux à gain), la recherche de sources d'impulsions ultra-courtes, potentiellement spectralement élargies par des fibres microstructurées, a constitué un défi technologique majeur depuis lors dont les résultats marquants sont résumés en référence [287].

En matière de génération d'impulsions à haute puissance crête, deux approches ont été déployées, l'une orientée vers la montée en puissance des oscillateurs et l'autre s'intéressant à des systèmes employant une chaîne amplificatrice. Dans le premier cas, la montée en puissance des lasers nécessite la capacité de fonctionner en régime continu à haute puissance et favorisent les lasers à disque fins avec des contraintes supplémentaires sur les niveaux de saturation de gain et les seuils d'endommagement [288][289]. Pour ce qui est des systèmes à amplification, ils se déclinent soit sous la forme de système à cavité régénératrice [290][291] où l'impulsion produite est introduite dans une cavité pour une amplification multi-passage avant d'être extraite, soit sous la forme d'un système à amplification à impulsions chirpées (CPA) [292][293] où l'impulsion est temporellement dilatée pour permettre son amplification mono-passage avec un spectre et une puissance crête réduits avant d'être re-compressée en sortie. Cette dernière implémentation est particulièrement bien adaptée pour les systèmes fibrés [294] mais aussi pour l'amplification à l'aide de cristaux en configuration « Innoslab » [295].

Pour ce qui est de la diversification en longueurs d'onde, il s'agissait d'obtenir des sources ultra-rapides autres que les lasers Ti:saphir ( $\lambda \sim 800$  nm), Cr:LiCAF ou Cr:LiSAF ( $\lambda \sim 850$  nm) et les lasers à base de cristaux dopés Nd ou Yb fonctionnant la bande spectrale allant de 1030 à 1080 nm [270][272]. Là encore, deux approches ont été étudiées. La première, qui a été rapidement commercialisée (par Coherent, Spectra Physics), est basée sur l'utilisation de la conversion par doublage de fréquence ou par amplification paramétrique optique à impulsions chirpées (OPCPA) [296]-[299]. La seconde voie, dans laquelle s'inscrivent les développements que j'ai pu mener en interne ou en collaboration avec le groupe de W. Sibbett de l'University of St Andrews, vise à développer des sources capables de générer les impulsions courtes directement aux longueurs d'onde d'intérêt et s'appuie sur le développement de nouveaux cristaux et de SESAMs adaptés.

## **3.2. Nouveaux absorbants saturables pour l'extension de la couverture spectrale des lasers ultra-rapides**

Comme indiqué ci-dessus, dans un premier temps, j'ai contribué au domaine des lasers à impulsions ultra-courtes, au travers de la conception et de la validation expérimentale de SESAM exploitant des nouveaux matériaux et permettant l'émission d'impulsions pico- voire femtosecondes à des longueurs d'onde dans les gammes allant successivement de 1240 à 1600 nm (proche infra-rouge), de 1900 à 2200 nm (mi-infrarouge). J'ai aussi mené avec un post-doctorant V. Savitski deux rapports sans suite sur l'utilisation de SESAM à puits quantiques d'AlInGaP pour opérer un laser Pr :YLF ( $\lambda=639,5$  nm) en régime de mode déclenché [SC154] et sur l'emploi d'un SESAM à boîtes quantiques d'InP/AlInGaP ( $\lambda=752$  nm) pour générer des impulsions de 518 fs dans un laser Ti:saphir [SC61]. L'ensemble de ces travaux a été essentiellement motivé par une combinaison de développements de matériaux à semiconducteurs et d'ingénierie de lasers à impulsions courtes plutôt que par des applications spécifiques.

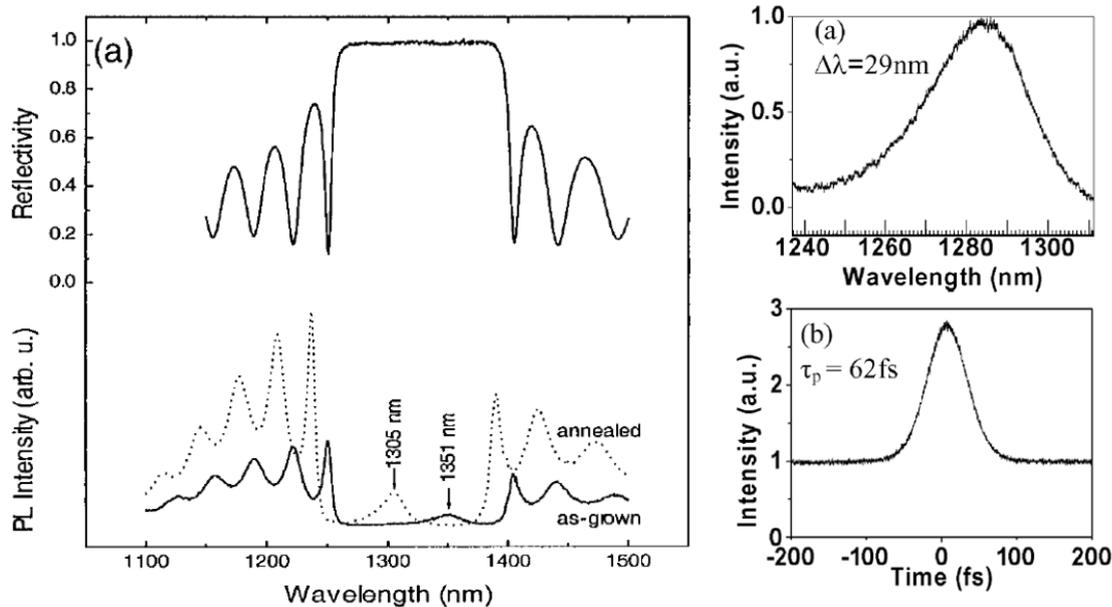
### **3.2.1. Les SESAM en GaInNAs(Sb)/GaAs pour lasers impulsions proche infra-rouges**

Les études présentées ci-dessous ont été menées de 2002 à 2008 et sont à mettre en relation directe avec les travaux sur les composants à cavité verticale à base de GaInNAs(Sb)/GaAs décrits au chapitre 1. En particulier les développements matériaux qui ont permis l'extension de l'émission vers la longueur d'onde maximale de 1600 nm, ont aussi servi à réaliser des absorbants saturables dont l'énergie de bande interdite est dans la gamme de 0,775 à 1 eV (1240-1600 nm).

La mise en œuvre des travaux sur les SESAM à base de GaInNAs(Sb)/GaAs est, par contre, entièrement justifiée par les limitations inhérentes aux SESAM utilisés pour la synchronisation de modes des lasers à solides fonctionnant dans cette gamme spectrale. En effet, pour les lasers fonctionnant à  $\sim 1300$ nm, les SESAM employés pouvaient présenter des pertes non saturables élevées du fait que les absorbants étaient réalisés par épitaxie métamorphique [300]-[302] ou (quasi)-relaxée [303][304] sur des miroirs AlGaAs sur substrat GaAs. Pour les lasers émettant à 1550nm, les SESAM possédaient soit les mêmes artefacts que ceux mentionnés ci-dessus [305]-[309], soit une fragilité ou une complexité de fabrication associée au report des absorbants saturables sur des miroirs hybrides métal/diélectrique [310], ou encore une bande de réflexion restreinte ( $< \sim 100$  contre 170 nm pour des DBR sur GaAs) lorsqu'ils étaient constitués d'absorbants saturables à base d'InGaAsP sur des miroirs DBR aussi en InGaAsP et réalisés sur substrats d'InP [311][312].

Cette identification nous permet en 2002 d'instiguer les travaux sur les SESAM exploitant les composés GaInNAs(Sb)/GaAs [SC4]. En effet, nous présentons des lasers Nd:YLF and Nd :YALO fonctionnant en régime de synchronisation de modes induit par un SESAM épitaxié à Tampere University of Technology qui comprend un puits quantique de GaInNAs(Sb)/GaAs inséré au milieu de sa couche supérieure d'un DBR AlAs/GaAs. Les pertes non saturables sont estimées être inférieures à 0,1%, soit un ordre de grandeur inférieures à celles rapportées en références [301][303]. On démontre aussi que le recuit thermique permet d'ajuster l'énergie de transition de

l'absorbant saturable pour l'émission d'impulsions picosecondes (~24ps) avec deux lasers dont les longueurs d'onde centrales d'émission diffèrent de 28 nm. Cette étude sera complétée par des mesures de temps de vie de luminescence réalisées par le groupe de T. Boggess de l'University of Iowa [SC15] indiquant une augmentation de la durée de vie de ~100 ps (et, par proxi, du temps de recouvrement) à ~300 ps après recuit. Le groupe d'Ursula Keller reprend à son compte ces résultats en 2004 en démontrant l'opération à modes synchronisés continue à 1314nm d'un laser Nd:YLF à l'aide d'un SESAM à base de GaInNAs [313], omettant que le régime de pompage quasi-CW utilisé dans [SC4] est plus susceptible d'induire des instabilités de type mode déclenché. Ils font par contre deux études détaillées des caractéristiques de SESAM à base de GaInNAs, démontrant une augmentation linéaire en bord de bande du produit de la profondeur de modulation par la fluence de saturation [314] et que ce facteur augmente aussi avec le recuit du fait de l'augmentation induite de la densité d'états [315]. Ils poursuivent aussi les travaux sur les lasers obtenant, en 2005, la génération d'impulsions pico-secondes à un taux de répétition de 10 GHz avec un laser Nd:YVO<sub>4</sub> [316] et à 6 GHz avec un VECSEL en GaInNAs [317]. Parallèlement, en collaboration avec le groupe de W. Sibbett de l'University of St Andrews, nous validons la possibilité d'émettre des impulsions femtosecondes avec un taux de répétition de 200 MHz en insérant un absorbant saturable en GaInNAs dans un laser Cr<sup>4+</sup>:MgSiO<sub>2</sub> (Cr:forsterite) [SC30] (voir Fig. 40). Nous augmentons ensuite la cadence de répétition jusqu'à 650 MHz, limitée par la taille de la cavité, avec un SESAM en GaInNAs incluant aussi une compensation de dispersion sous la forme d'un interféromètre de Gires-Tournois [SC155].



**Fig. 40 : Caractéristiques statiques de SESAM en GaInNAs [SC4] et des impulsions femtosecondes induites par insertion dans un laser Cr:forsterite [SC30].**

En comparant ces résultats aux performances obtenues tant en synchronisation de modes KLM [318]-[328] qu'avec des systèmes exploitant des SESAM [300][302][304] [329]-[331] ou des miroirs à absorbants saturables à base de carbone (nanotubes de carbone, graphène - CBSAM) [332][333], on peut observer en Fig. 41 et Fig. 42, que les puissances crêtes et durées d'impulsions que nous avons obtenues sont dans la moyenne des performances atteintes avec des systèmes exploitant des SESAM mais que leurs énergies sont élevées pour les taux de répétition considérés.

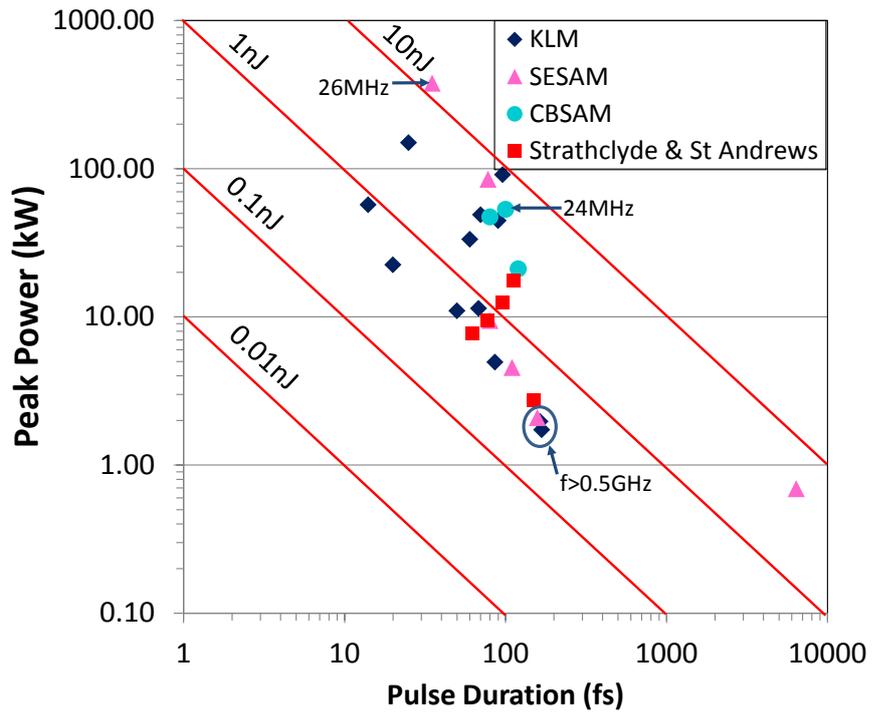


Fig. 41 : Etat de l'art fin 2014 des performances des lasers  $\text{Cr}^{4+}$ :forsterite fonctionnant en régime de modes synchronisés : durées et puissances crêtes des impulsions.

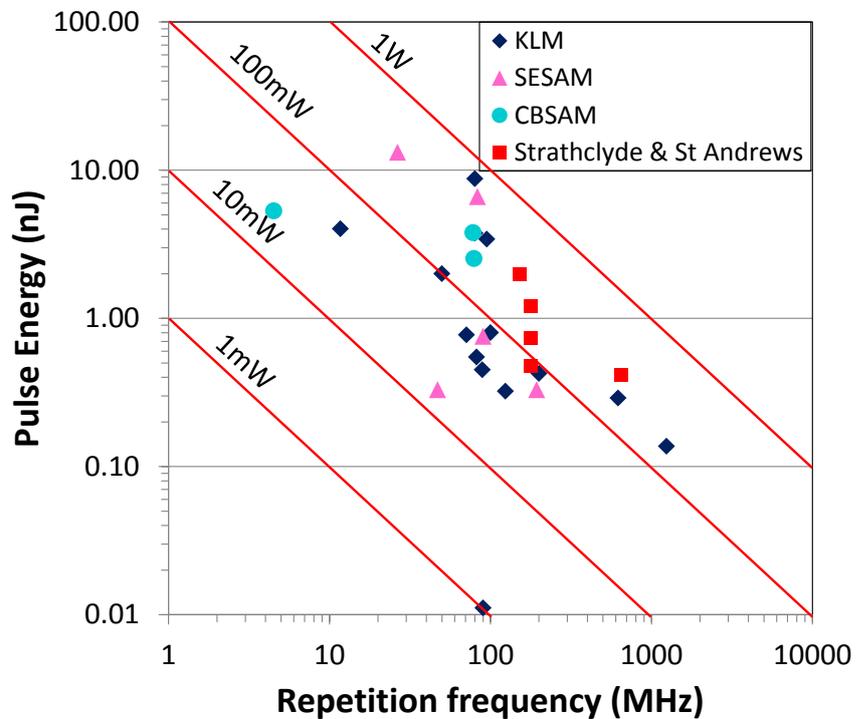


Fig. 42 : Etat de l'art fin 2014 des performances des lasers  $\text{Cr}^{4+}$ :forsterite fonctionnant en régime de modes synchronisés : énergies et taux de répétition des impulsions.

L'utilisation de SESAM à base de GaInNAs aux grandes longueurs d'onde ( $\sim 1550$  nm) est initiée en 2003 par Tampere University of Technology qui démontre la génération avec un laser à fibre dopée erbium d'impulsions de 1-2 ps à 7 MHz avec 0,8 mW de puissance moyenne (soit une énergie de 0,1 nJ) [334][335]. L'étude de la dynamique de ces SESAM montre que les temps de vie de photoluminescence peuvent être modifiés de  $\sim 40$  ps, pour des structures en sortie de bati d'épitaxie, à  $\sim 300$  ps après recuit ou à  $\sim 4$  ps après implantation avec des ions nickel [336], résultats similaires à ceux que nous avons établis à  $1,3 \mu\text{m}$  [SC15]. En 2005, le groupe d'U. Keller, cherchant à produire des impulsions plus énergétiques, introduit un SESAM en GaInNAs dans un laser à verre dopé Er:Yb et parvient à obtenir des impulsions de 5 ps à MHz avec une puissance moyenne de 61 mW (soit une énergie de 1,1 nJ) [337]. Le groupe d'A. Larsson de Chalmers University exploite, quant à lui, la dynamique rapide d'un SESAM en GaInNAs en combinaison avec un VECSEL à gain InGaAsP pour générer des impulsions de 3,2 ps à 2,97 GHz [338]. En 2006, le groupe de J.-C Harmand et de J.-L. Oudar du Laboratoire de Photonique et Nanostructures (LPN) démontrent que l'adjonction de quelques couches de GaAsN à forte concentration d'azote placées à proximité immédiate ( $< 4$  nm) d'un puits quantique de GaInNAsSb/GaAs permet de réduire le temps de recouvrement de  $\sim 35$  ps à 12 ps sans affecter la réponse spectrale de l'absorbant [339]. En 2008, profitant de notre collaboration avec University of St Andrews nous rapportons le premier laser ( $\text{Cr}^{4+}$ :YAG) à impulsions femtosecondes (132 fs, 159,3 MHz, 150mW) utilisant un SESAM en GaInNAs épitaxié par J. Gupta du National Research Center Canada [SC48]. La longueur centrale d'onde d'émission est alors de 1490 nm. Pour atteindre la bande C des télécommunications, nous évaluons aussi les SESAM du LPN mentionnés ci-dessus qui permettent d'obtenir l'émission continue de modes synchronisés avec des impulsions de 230 fs à 164 MHz avec 280mW de puissance moyenne (voir Fig. 43) [SC52], limitées par une longueur d'onde centrale du DBR du SESAM un peu trop élevée. Les résultats sont néanmoins compétitifs lorsque mis en perspective vis-à-vis des autres lasers Cr:YAG fonctionnant en régime femtoseconde (voir Fig. 44 et Fig. 45) [305]-[308],[310],[340],[341]-[355]. Le LPN utilisera des SESAM de ce type avec compensation de dispersion intégrée dans des VECSELs à gain InAlGaAs/InP pour générer des impulsions de 902 fs à 2 GHz avec 10 mW de puissance moyenne [356].

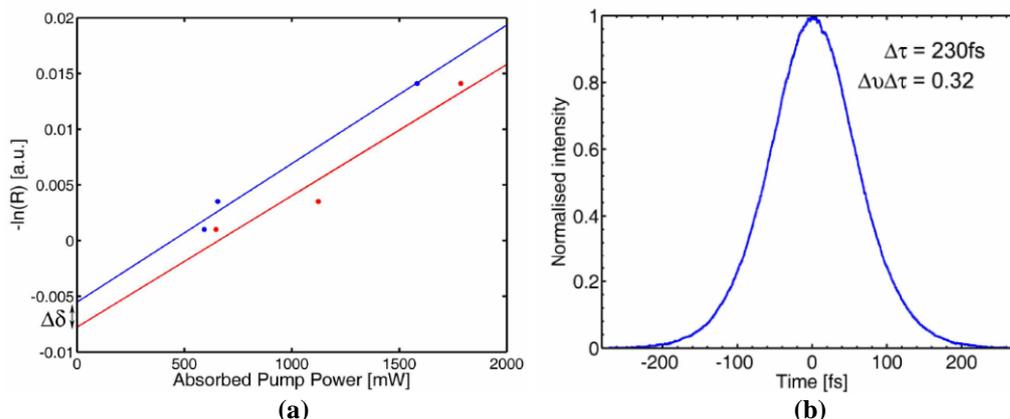


Fig. 43 : (a) Evaluation des pertes (0,2%) d'un SESAM en GaInNAsSb opérant à 1530nm et (b) autocorrélation des impulsions générées avec ce SESAM inséré dans un laser  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG [SC52].

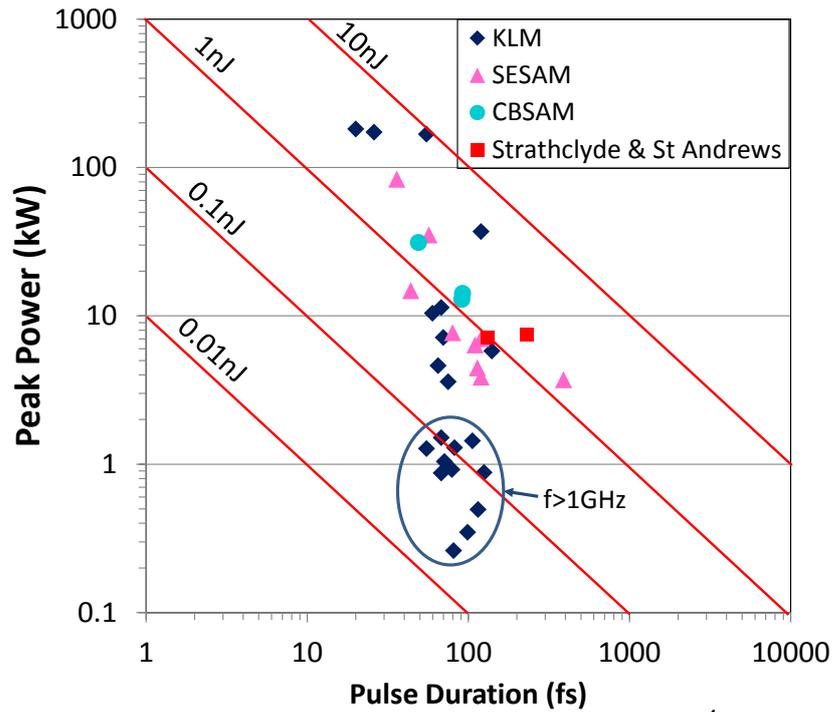


Fig. 44 : Etat de l'art fin 2014 des performances des lasers Cr<sup>4+</sup>:YAG fonctionnant en régime de modes synchronisés : durées et puissances crêtes des impulsions.

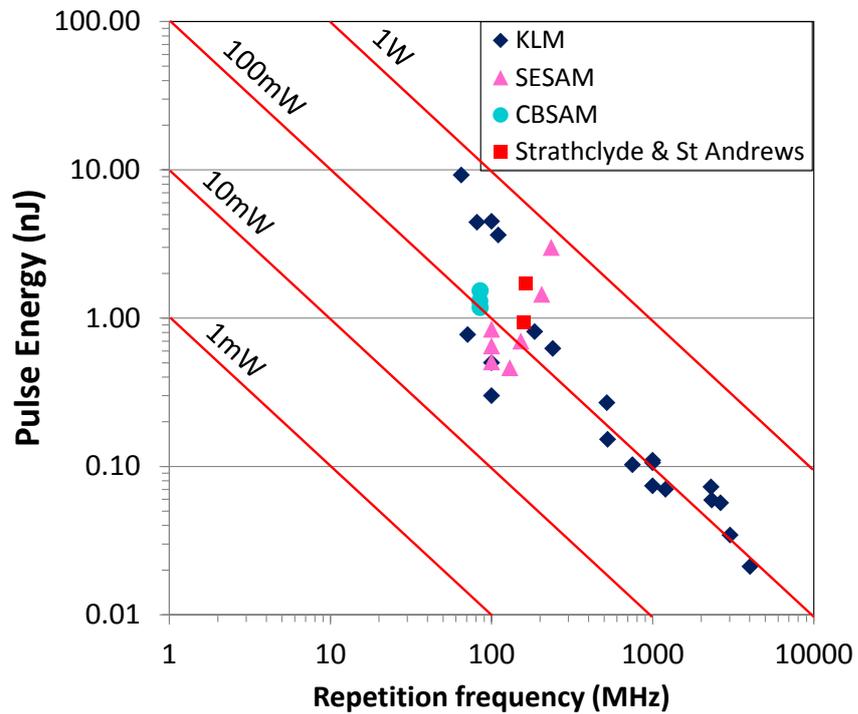


Fig. 45 : Etat de l'art fin 2014 des performances des lasers Cr<sup>4+</sup>:YAG fonctionnant en régime de modes synchronisés : énergies et taux de répétition des impulsions.

Le groupe de Tampere University of Technology a aussi exploré l'utilisation de SESAM en GaInNAs pour générer des impulsions courtes avec des lasers à fibre émettant dans la gamme de 980 à 1160 nm [357]-[361], vu que la concentration d'azote et les recuits permettent d'ajuster simplement le temps de recouvrement de l'absorbant saturable [357]. Ils n'ont toutefois pas fait d'étude comparative directe avec des échantillons à base de puits InGaAs/GaAs pour justifier ce choix.

En résumé, suite à nos travaux initiaux sur les SESAM en GaInNAs(Sb), ces composants ont vu leur utilisation se développer pour établir l'émission d'impulsions pico ou femtosecondes avec une variété de milieux à gain et couvrir la gamme de longueurs d'onde allant de 980 à 1560 nm avec de bonnes performances résumées en Table 2.

Laser active Medium	Wavelength (nm)	Regime of operation	Pulse Duration (ps)	Average output power (mW)	Rep. rate (MHz)	Energy (nJ)	Peak Power (kW)	Ref.
Nd:YALO	1342	Quasi-CW pumped CW ML	24.000	7000	114	61.40	2.559	[SC4]
Nd:YLF	1314	Quasi-CW pumped CW ML	22.000	20000	114	175.43	7.975	[SC4]
Er-doped fibre	~1540	CW ML	1.280	0.8	7	0.115	0.09	[334]
Nd:YLF	1314	CW ML	6.700	520	117.2	4.437	0.663	[313]
Yb-doped fibre	980	CW ML	2.300	3	30	0.100	0.044	[357]
Yb-doped fibre	1030	CW ML	3.000	1	50	0.020	0.007	[358]
Er:Yb glass	1534	CW ML	5.000	70	61	1.148	0.23	[337]
InGaAsP/InP VECSEL	1550	CW ML	3.200	120	2970	0.041	0.013	[338]
Nd:YVO4	1342	CW ML	7.000	45	10000	0.005	0.001	[316]
Cr:forsterite	1280	CW ML	0.062	85	178	0.478	7.71	[SC30]
GaInNAs/GaAs VECSEL	1308	CW ML	18.700	57	6000	0.010	0.001	[317]
Bi-doped fibre	1161	CW ML	50.000	2	13	0.154	0.004	[359]
Cr:YAG	1490	CW ML	0.132	150	159.3	0.942	7.137	[SC48]
Cr:YAG	1530	CW ML	0.230	280	164	1.708	7.427	[SC52]
Bi-doped fibre	1160	CW ML	0.940	1.5	7.5	0.200	0.213	[360]
Er,Yb:YAIBO	1530	CW ML	4.800	280	166	1.687	0.352	[362]
GaInNAs/GaAs VECSEL	1220	CW ML	5.000	275	840	0.328	0.066	[363]
Bi-doped fibre	1160	CW ML	1.900	6	6	1.000	0.527	[361]
AlInGaAs/InP VECSEL	1570	CW ML	16.000	600	2600	0.231	0.015	[364]
AlInGaAs/InP VECSEL	1300	CW ML	6.4	100	910	0.110	0.018	[365]
Cr:forsterite	1280	CW ML	0.151	270	650	0.416	2.755	[SC155]
InAlGaAs/InP VECSEL	1560	CW ML	0.902	10	2000	0.005	0.006	[366]

**Table 2: Liste récapitulative des lasers impulsionnels utilisant des SESAM en GaInNAs.**

Même si, dans notre cas, les performances obtenues n'étaient pas limitées par la largeur de réflectivité des DBR AlAs/GaAs utilisés, l'approche à base d'absorbant en GaInNAs(Sb) est parfaitement adaptée pour exploiter des DBR AlOx/(Al)GaAs réalisés par oxydation latérale sélective de couches d'AlGaAs à haute teneur en aluminium sur des diamètres compatibles avec une insertion dans des lasers à solide (200-500  $\mu\text{m}$ ). Le groupe de E.P. Ippen du Massachusetts Institute of Technology a validé cette méthode notamment avec un absorbant saturable en InGaAs relaxé sur DBR AlOx/GaAs inséré dans un laser Cr:YAG [347] et facilitant l'émission d'impulsions de 36 fs avec 300 mW de puissance moyenne.

Il est toutefois aussi bon de noter que deux alternatives « bas coûts » ont été mises au point en parallèle des développements décrits ci-dessus. La première repose sur la filière silicium avec un SESAM comprenant un miroir a-Si/SiO<sub>2</sub> et un absorbant saturable en germanium [367], méthode adaptée pour une opération à des longueurs d'onde au-delà de 1400 nm. La seconde technique utilise des éléments carbonés comme les nanotubes de carbone ou les feuillets de graphène qui offrent une absorption saturable avec un temps de recouvrement rapide. Les premiers présentent une énergie de bande interdite qui dépend de leur diamètre et qui peut être sélectionnée par filtrage après centrifugation tandis que les seconds présentent une profondeur de modulation essentiellement constante de 2.3% par monocouche du visible au milieu-infrarouge. Depuis leur introduction respectivement en 2004 [368] et 2009 [369][370], on observe en engouement pour l'utilisation de ces nouveaux absorbants saturables tant pour les lasers à fibre que pour les lasers à solide. Dans ce dernier cas, ils sont intégrés sur des miroirs diélectriques conventionnels par pulvérisation [371], par dépôt à la tournette lorsqu'ils sont incorporés dans des matrices polymères [369] ou par transfert à l'aide d'élastomères [372]. Comme l'atteste les Fig. 41-42 et 44-45 et comme résumé en référence [369], ces structures sont adaptées pour induire la génération d'impulsions ultra-courtes à des longueurs d'onde allant au moins de 0.7 à 2,5  $\mu\text{m}$ .

### **3.2.2. Les SESAM en GaInAsSb/GaSb pour les lasers ultra-rapides mi-infra-rouge**

Les travaux sur les SESAM à base d'antimoineures pour les lasers mi-infrarouges ( $\lambda \in 2\text{-}3 \mu\text{m}$ ) en collaboration avec l'University of St Andrews ont commencé au début du projet EPSRC MUSIC dont l'un des objectifs était de démontrer une émission femtoseconde dans cette gamme spectrale.

A ce moment là, en 2008, seul un laser à fibre dopée thulium opérant en régime de synchronisation de modes induit par un SESAM avait été rapporté [373]. Le SESAM employé était constitué d'un absorbant saturable à puits quantiques assez fortement contraints en In<sub>0.7</sub>Ga<sub>0.3</sub>As/In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As sur un DBR en In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As/InP.

Au vu des nouvelles orientations de recherche de J. Gupta du National Research Center Canada vers les lasers à base d'antimoineures et de mon expérience de conception de VECSELS opérant à  $\sim 2,2 \mu\text{m}$  [SC45] utilisant ces matériaux, j'ai naturellement opté pour ce système d'alliages semiconducteurs pour la réalisation de SESAMs pour le mi-infrarouge. Ce choix était aussi dû au fait que les DBR AlAsSb/GaSb présentent de larges bandes de réflexion du fait du fort contraste d'indice entre ces composés et que les puits quantiques de type I permettent de couvrir les longueurs d'onde de 1.9 à

3,6  $\mu\text{m}$ . J'ai donc conçu et réalisé les caractérisations statiques (réflectivité/PL) de différents SESAM épitaxiés par J. Gupta dont l'absorbant saturable était calé pour correspondre au pic d'émission des lasers dopés thullium (Tm,  $\lambda \sim 1975 \text{ nm}$ ), holmium (Ho,  $\lambda \sim 2060 \text{ nm}$ ) et Cr:ZnSe ( $\lambda \sim 2300 \text{ nm}$ ) [374].

L'évaluation de ces structures dans les lasers a été menée par Alexandre Lagatsky, post-doctorant à l'University of St Andrews. En 2009, nous présentions les premiers résultats obtenus en insérant un de ces SESAM dans un laser Tm,Ho:KYW engendrant l'émission d'impulsions de 3,3 ps à 136 MHz avec 315 mW de puissance moyenne [SC57]. Les performances étant relativement indépendantes de la puissance intracavité et de la dispersion, nous avons estimé que le temps de recouvrement de ce SESAM était trop long et avons donc choisi de l'implanter avec des ions arsenic à 4 MeV avec différentes doses au prix de pertes non saturables plus élevées. En insérant un SESAM implanté à  $5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$  dans le même laser que précédemment, nous sommes parvenus à obtenir des impulsions plus courtes (570 fs) mais avec une puissance moyenne réduite à 130 mW [SC60]. A partir de là, la stratégie adoptée a consisté à non plus jouer sur le SESAM mais à changer de milieu à gain pour favoriser les cristaux ou les verres qui présentent des gammes d'amplification plus larges. Les matériaux à gain ainsi testés ont été les verres tellures (TZN) [SC66] et le tungstate  $\text{NaY}(\text{WO}_4)_2$  [SC65] tous deux co-dopés Tm,Ho et les verres germano-fluorés (GNPG) [SC66] et tungstate (KYW) [SC69] dopés Tm. Les meilleures performances en termes de durée d'impulsions ont été obtenues pour le laser à base de  $\text{NaY}(\text{WO}_4)_2$  avec lequel des impulsions de 191 fs (0,56 nJ) ont été générées.

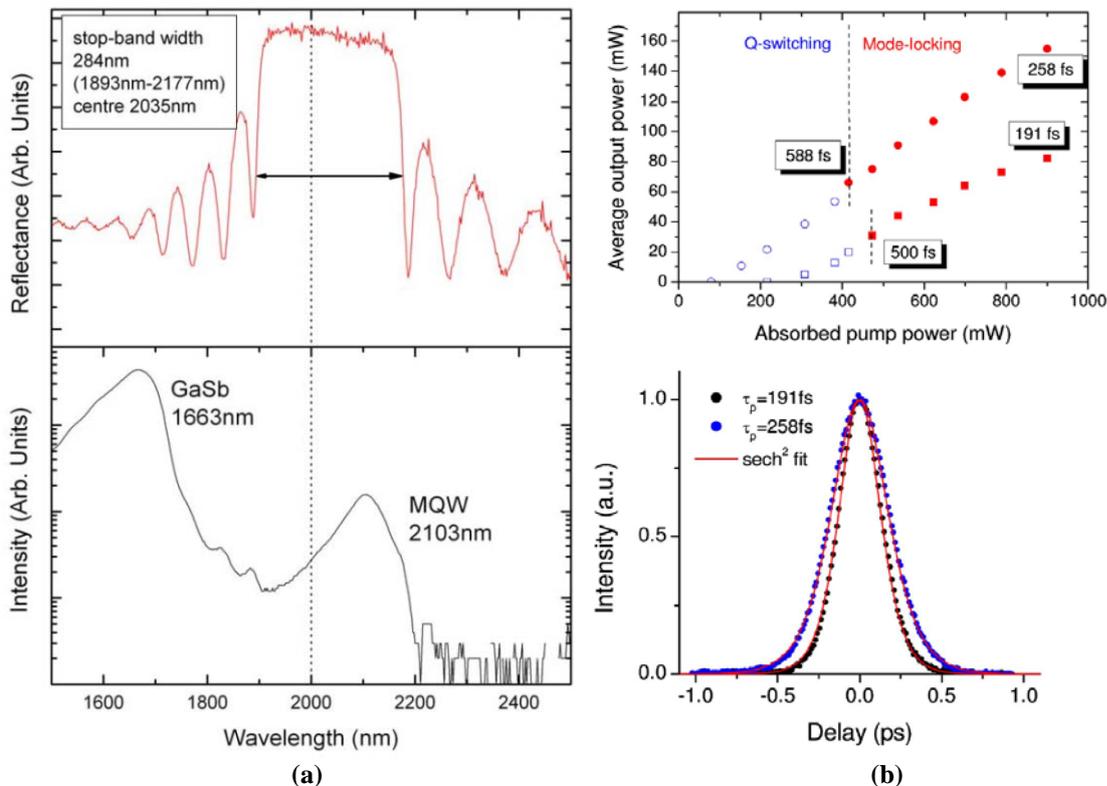


Fig. 46 : Caractéristiques d'un SESAM en antimoinure et résultats obtenus (haut : transfert de puissance ; bas : autocorrelation) lors de son insertion dans un laser Tm,Ho: $\text{NaY}(\text{WO}_4)_2$  [SC65].

Depuis la fin de notre programme collaboratif, ces mêmes SESAM ont été utilisés pour induire une opération à modes synchronisés avec trois autres milieux à gain le Tm:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [375], le Tm:Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [376] et le Tm,Ho:YLF [377] permettant un fonctionnement femtoseconde dans les deux premiers cas et pico-seconde (limité par la largeur de gain) dans le dernier cas. Le choix de ces trois systèmes visait la génération d'impulsions plus énergétiques atteignant respectivement 1,7, 6 et 13 nJ. Le groupe de Tampere University of Technology présente aussi quelques résultats de synchronisation de modes de laser Tm:YAG à l'aide de SESAM à base d'antimoineures [378][379]. Une étude de la dynamique de leurs échantillons montre un temps de recouvrement rapide indépendant de la température de croissance et de la concentration en arsenic dans le puits quantique mais qui peut être réduit en positionnant l'absorbant saturable à proximité immédiate (5 nm) de la surface de l'échantillon [380]. Ce résultat est en opposition avec notre analyse mais peut-être expliqué par le fait que les structures de bande des absorbants sont aussi très différentes. Après optimisation du nombre de puits quantiques du SESAM, leur laser génère des impulsions de ~3 ps limitées par la largeur de gain du crystal choisi [379].

Parallèlement à ces démonstrateurs, près d'une dizaine d'autres lasers à milieu à gain cristallin (dopés Tm ou Ho) émettant des impulsions courtes ont été rapportés. Ils exploitent soit des nanotubes de carbone [381] soit des transitions inter-sous bande dans des puits quantiques In<sub>0,53</sub>Ga<sub>0,47</sub>As/Al<sub>0,53</sub>As<sub>0,47</sub>Sb sur InP [382] soit des SESAM disponibles commercialement (BATOP GmbH) [383]-[387] pour lesquels les absorbants saturables sont des puits quantiques d'InGaAs épitaxiés métamorphiquement sur des DBR en AlGaAs. Comme l'atteste la Fig. 47, à l'exception du système utilisant les nanotubes de carbone [381] qui provoque l'émission d'impulsions de 175 fs, les performances sont en deçà de celles que nous avons pu établir. Cependant une comparaison détaillée des SESAM commerciaux et des SESAM à base d'antimoineures serait la bienvenue pour confirmer l'avantage de ces derniers. Yang et al [378] ont mené une étude préliminaire en ce sens mais avec des SESAMs antimoineures non optimisés empêchant d'établir des conclusions définitives.

Ces résultats sont aussi à mettre perspective avec ceux obtenus depuis 2005 par des systèmes à fibre dopée Tm,(Ho) [388] pour lesquels la synchronisation de modes est généralement engendrée par rotation nonlinéaire de polarisation. Comme on peut le voir en Fig. 48, les performances des lasers à cristaux sont nettement dépassées mais seulement du fait de l'utilisation routinière de chaînes d'amplification d'impulsions chirpées (CPA) dans les systèmes à fibre.

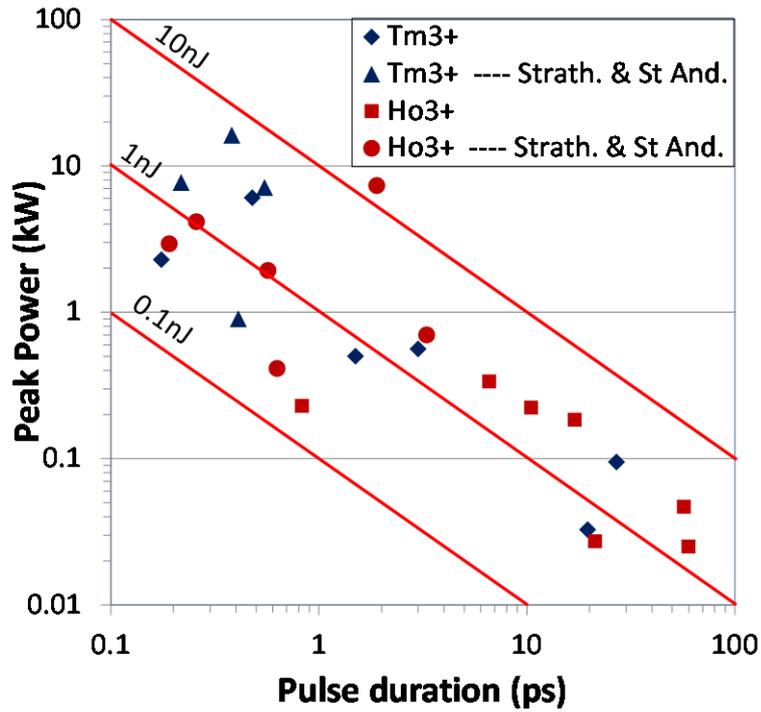


Fig. 47 : Etat de l'art en février 2015 des performances des lasers à cristaux dopés Tm<sup>3+</sup> et Ho<sup>3+</sup> fonctionnant en régime de modes synchronisés : durées et puissances crêtes des impulsions.

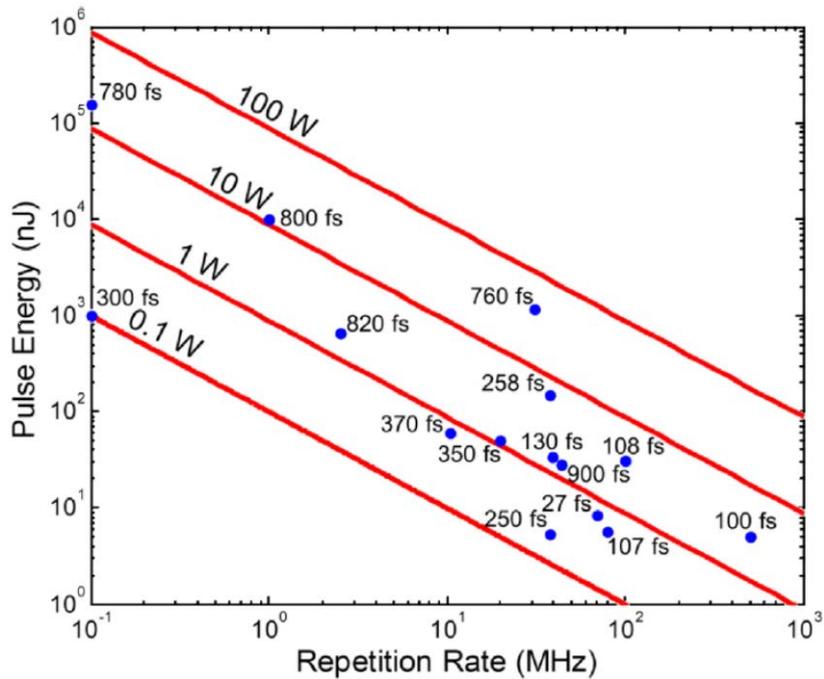


Fig. 48 : Etat de l'art en juillet 2014 des performances des systèmes lasers à fibres dopées Tm<sup>3+</sup> et Ho<sup>3+</sup> fonctionnant en régime de modes synchronisés [388].

### 3.3. Fonctionnalisation des dispositifs

En plus des activités de diversification de longueur d'onde des sources impulsionnelles femtosecondes, un des objectifs du programme EPSRC MUSIC était d'introduire des méthodes permettant le contrôle des lasers à impulsions courtes pour faciliter leur utilisation par des non spécialistes. A partir de 2009, à l'University of Strathclyde, avec Vasili Savitski, le post-doctorant du projet, nous nous sommes intéressés aux effets induits lorsqu'un SESAM est pompé optiquement alors qu'avec Christine Crombie, doctorante à l'University of St Andrews, le but était d'explorer l'utilisation de SESAM contrôlés électriquement. Dans les deux cas, mon implication portait essentiellement sur la conception, la caractérisation des SESAM et de l'analyse de leur réponse.

Initialement, l'objectif de nos travaux sur l'utilisation de SESAM pompés optiquement visait à contrôler la durée d'impulsions de lasers à synchronisation de modes fonctionnant dans le régime d'absorption saturable rapide grâce à l'ajustement de la profondeur de modulation de l'absorbant saturable, phénomène qui avait été observé par notre équipe lors de l'insertion multiple de SESAM dans la cavité d'un laser Nd:KGd(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> [389]. Auparavant, les SESAM pompés optiquement avaient été utilisés pour forcer des lasers à fibre à opérer en régime de synchronisation de modes à une harmonique multiple de la fréquence de la cavité en modulant le SESAM à la fréquence désirée, c'est à dire en implémentant une forme de synchronisation de modes hybride (active et passive) [390][391]. La seconde utilisation d'un SESAM pompé optiquement avait démontré la synchronisation de deux lasers à impulsions ultra-rapides, avec une partie de l'émission du laser maître utilisée pour induire une modulation active des pertes du laser esclave de même longueur de cavité, réalisant ainsi une autre forme de laser impulsionnel à pompage synchrone [392]. Pour tester notre idée de contrôle optique de la durée d'impulsion, un laser Nd:YVO<sub>4</sub> employant pour SESAM le miroir actif d'un VECSEL a été assemblé. Le comportement général du laser observé s'est toutefois trouvé être différent de celui escompté. En effet, quand le niveau de pompage du SESAM augmentait, le laser passait successivement de l'émission continue à l'opération à modes synchronisés puis à l'opération à modes synchronisés instable (QSML) [SC55]. Cet ordre de transition entre les régimes de fonctionnement est inversé par rapport à celui causé par une diminution de la profondeur de modulation par remplissage des bandes, comme initialement envisagé. En caractérisant plus en détail le laser, nous avons pu établir que l'effet dominant était, en fait, le décalage spectral de l'absorption résultant de la variation température induite par le pompage optique.

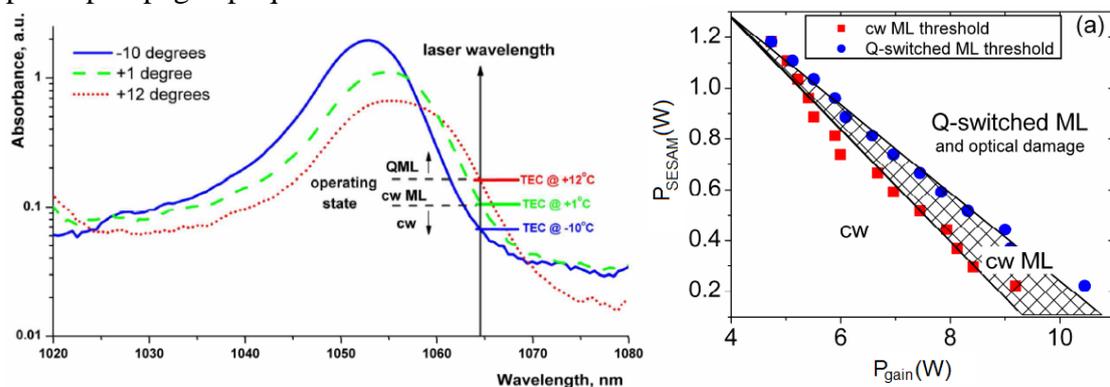
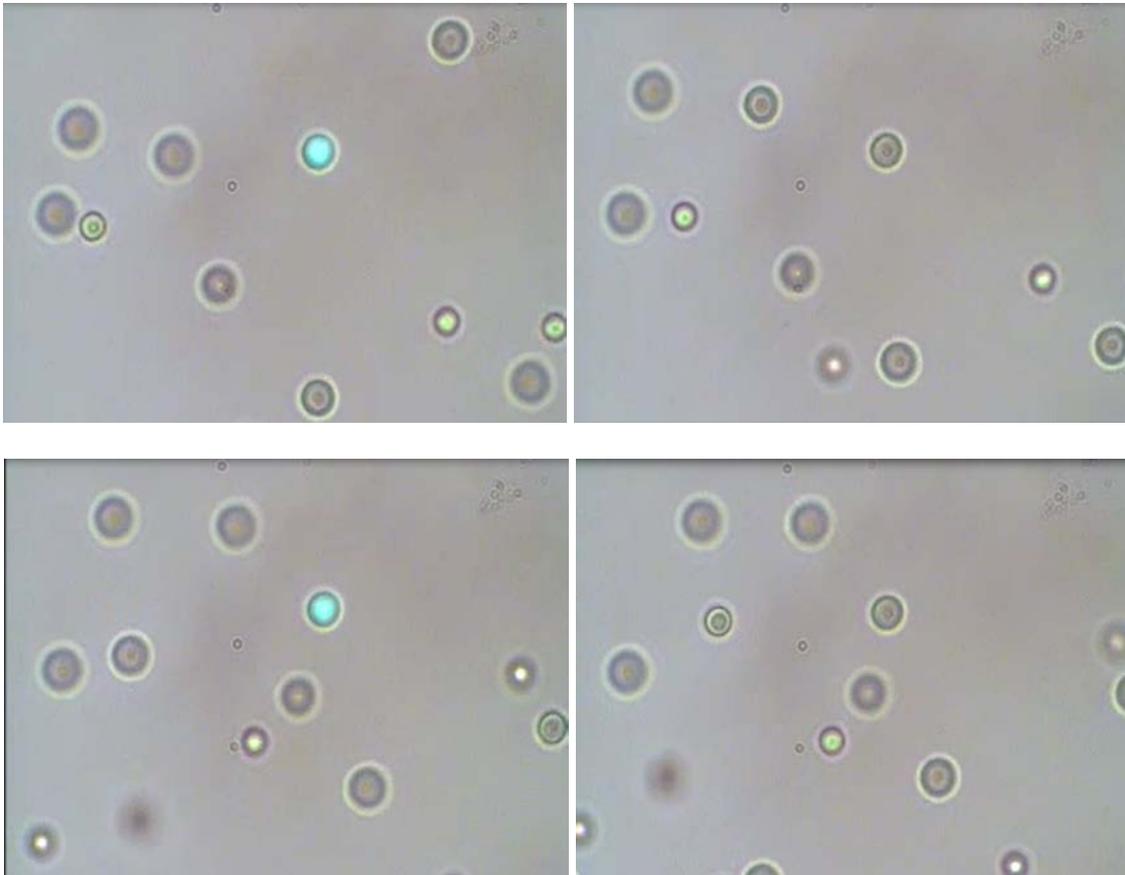


Fig. 49 : Effet du pompage optique sur (a) l'absorption d'un SESAM et (b) sur le régime de fonctionnement d'un laser Nd :KGW [SC55].

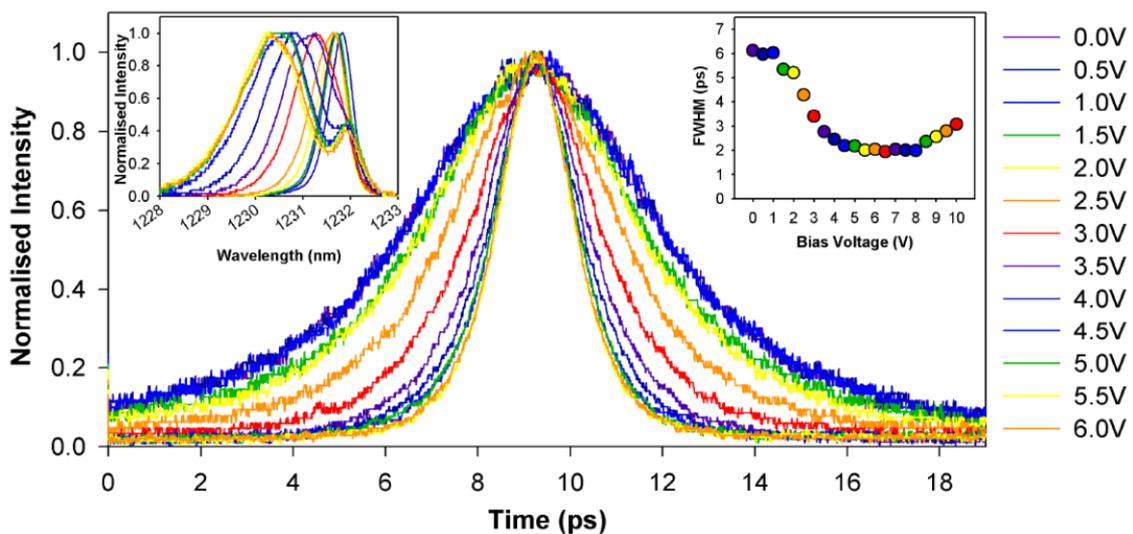
Nous avons ensuite étendu l'étude à des lasers fonctionnant en régime impulsionnel femtoseconde [SC64][SC163], pour lesquels des comportements similaires furent observés et où l'impact de la température fut confirmé par une analyse pompe-sonde de la réponse dynamique et spectrale des SESAM sous pompage optique [SC64]. La zone pompée étant restreinte, les transitoires d'échauffement du SESAM durent quelques dizaines de microsecondes et conduisent à un changement de régime de fonctionnement laser avec des temps de réponse sub-millisecondes [SC64]. Ces temps de commutation sont compatibles avec les applications en bio-photonique qui requièrent le passage entre un mode de manipulation par pince optique et un mode d'observation par fluorescence induite par absorption deux photons [393] ou de photo-perméabilisation de cellules [394]. Nous avons donc vérifié la capacité d'un laser Cr:LiSAF à SESAM pompé optiquement pour réaliser ce type de fonctionnalité en [SC72], simplifiant ainsi le système en n'ayant plus besoin que d'une seule source laser.



**Fig. 50 : Séquence de 4 images montrant une microsphère en polymère teintée avec un colorant bleu et piégée par une pince optique créée par un laser Cr :LiSAF. La fluorescence induite par absorption à deux photons est respectivement présente ou non lorsque le laser opère en régime de synchronisation de modes ou en continu [SC55].**

Parallèlement, Baily et al de Thalès Research Technology [395] exploitent un SESAM pompé optiquement dans un VECSEL pour imposer une synchronisation hybride de modes et ainsi obtenir simultanément des impulsions courtes favorisées par la synchronisation passive de modes et une excellente stabilité de la cadence de répétition (soit une faible gigue temporelle) apanage de la synchronisation active de modes.

La seconde partie des travaux sur le contrôle du régime de fonctionnement ou des caractéristiques des impulsions des lasers à modes synchronisés s'intéressait à l'utilisation de SESAM commandés électriquement. Il s'agissait d'une extension des études mentionnées précédemment avec une simplification de la commande grâce à l'ajout d'une jonction p-i-n dans la structure du SESAM pour contrôler les caractéristiques de l'absorption saturable via une polarisation du composant en inverse (ou éventuellement en direct). L'utilisation d'un tel modulateur à électro-absorption a été rapportée dès 1995 où ce composant sert de modulateur actif dans un laser Nd:YLF pour générer des impulsions pico-secondes à la fréquence de cavité ou ses harmoniques [396]. Le rapport suivant est publié en 2004 par le groupe de l'University of St Andrews où un SESAM résonant contrôlable électriquement est inséré dans un laser Ti:saphir et où l'application d'une tension induit une modification inexplicée de la durée des impulsions de 330 ps à 1 ns [397]. Cinq ans plus tard, Edik Rafailov, ayant quitté l'University of St Andrews pour créer son groupe à Dundee University, démontre que l'insertion d'un SESAM à boîtes quantiques contacté électriquement dans un laser Cr:forsterite fonctionnant en régime de synchronisation de modes sans compensation de dispersion permet de contrôler la durée des impulsions sur une gamme allant de 17,3 à 6,4 ps et s'accompagne d'un décalage de la longueur d'onde d'émission de 2 nm [398]. Cette variation de la durée d'impulsions est en accord avec l'opération en régime d'absorbant saturable rapide où la durée de l'impulsion est contrôlée par le temps de recouvrement de l'absorbant saturable qui diminue lorsqu'une tension est appliquée vu que cette dernière augmente le taux d'extraction des porteurs [399][400]. Avec l'University of St Andrews, nous observons le même type de phénomène en 2012 **[SC73]** lorsque nous insérons un SESAM à base de GaInNAs dans un laser Cr:forsterite cependant avec une excursion en durée d'impulsions plus faible (de 6,1 to 1,9 ps). Nous démontrons aussi qu'il est possible de provoquer le changement de régime de fonctionnement entre le régime continu et le régime de génération d'impulsions pico-secondes et du régime d'impulsions pico-seconde à l'émission d'impulsions femto-secondes avec des durées de transition inférieures à 200  $\mu$ s. Le déclenchement de la transition du régime continu à celui d'émission d'impulsions femto-secondes sera néanmoins impossible.



**Fig. 51 : Variations des caractéristiques des impulsions générées par un laser Cr :forsterite en fonction de la tension de polarisation inverse appliquée à un SESAM en GaInNAs [SC73].**

Récemment, des SESAM contrôlés électriquement ou pompés optiquement ont été utilisés comme modulateurs intra-cavité pour contrôler et stabiliser le décalage entre l'enveloppe et la porteuse (CEO) de lasers à impulsions ultra-courtes [401][402] avec des bandes passantes plus élevées que celles disponibles par modulation de gain comme conventionnellement utilisé.

### **3.4. Conclusions**

Dans ce chapitre, j'ai indiqué comment, au sein du vaste domaine de l'optique des impulsions ultra-courtes, les travaux que j'ai pu faire et diriger sur les SESAM à base de nouveaux alliages (GaInNAsSb sur GaAs ou AlInGaAsSb sur GaSb) ont permis la diversification en longueur d'onde des oscillateurs à impulsions femto-secondes vers les grandes longueurs d'onde ouvrant à minima la gamme allant de 1,2 à 2,2  $\mu\text{m}$ . J'ai aussi pu montrer que le rôle des SESAM n'est pas limité à l'initiation et l'entretien d'impulsions mais qu'ils aussi peuvent servir à contrôler et changer (en moins d'une milliseconde) le régime de fonctionnement du laser entre l'émission continue et la génération d'impulsions femto-secondes ou qu'ils peuvent être utilisés pour définir la durée des impulsions pico-secondes dans des lasers exploitant la synchronisation de modes à absorbant saturable rapide.

Les résultats les plus significatifs sont :

- La proposition et la première démonstration de l'utilisation de SESAM à base GaInNAsSb accordés en maille au substrat GaAs pour initier et maintenir l'action laser à modes synchronisés avec des pertes non-saturables faibles à une longueur d'onde centrale d'émission comprise entre 1250 et 1600 nm **[SC4]**.
- Les premiers démonstrateurs de lasers générant des impulsions femto-secondes avec des SESAM en GaInNAsSb sur GaAs à 1300 **[SC30]** et 1530 nm **[SC52]**.
- L'introduction de SESAM à base d'antimoineures pour la génération d'impulsions femto-secondes avec des lasers à cristaux dopés thulium **[SC60]** et holmium **[SC65]**.
- L'utilisation de SESAM pompés optiquement pour le contrôle des régimes d'opération de lasers à impulsions courtes **[SC55]** et les rendre plus fonctionnels pour les applications en bio-photoniques.

Je tiens aussi à souligner qu'en 2007 a été introduite une nouvelle méthode pour générer des peignes de fréquences qui s'appuie sur l'excitation mono-fréquence de l'effet Kerr (et des mélanges à quatre ondes associés) dans des micro-cavités à modes de galerie [403]. Ces systèmes permettent la génération de peignes de fréquences dont la largeur peut dépasser une octave [404][405] et peuvent être métrologiquement de qualité équivalente aux lasers à fibre à impulsions femto-secondes [403]. Comme ils ont le potentiel d'être entièrement intégrés sur puce, cette approche pourrait être la base d'une technologie disruptive et constituera une fraction significative de mes travaux de recherche à venir.

# CONCLUSIONS ET PROSPECTIVE

Ce chapitre regroupe la conclusion générale des travaux réalisés à l'University of Strathclyde, une description des études auxquelles j'ai participé ou que j'ai initiées depuis mon arrivée au LAAS en février 2012 et, pour terminer, la prospective scientifique de mes recherches.

## ***4.1. Bilan des travaux menés à l'University of Strathclyde***

Comme décrit dans ce manuscrit, les travaux que j'ai menés et dirigés portent sur l'ingénierie de lasers à solide utilisant des composants à semiconducteurs ou les technologies de fabrication des semiconducteurs. Cette activité a été scindée en trois axes traitant respectivement des lasers et amplificateurs à base de GaInNAsSb sur GaAs, des lasers et guides d'onde exploitant le diamant et, pour finir, des nouveaux absorbants saturables pour la génération et le contrôle d'impulsions femto-secondes. Un des fils conducteurs reliant ces trois domaines est l'approche générique mise en place qui comprend une partie dédiée à explorer les propriétés ou à fonctionnaliser le matériau pour révéler ses caractéristiques avantageuses qui sont exploitées, dans une deuxième phase, dans le cadre de développement de composants, eux-mêmes complétés, en fonction des performances obtenues, de démonstrations de principe d'applications.

Si l'on revient à un résumé axe par axe des résultats obtenus, on peut établir les conclusions suivantes.

L'activité sur les lasers et amplificateurs à cavité verticale à base de GaInNAs(Sb) sur GaAs a été initiée dans le cadre de recherches pour les télécommunications optiques visant au déploiement de systèmes d'information amenant la fibre chez l'abonné qui s'accompagne d'objectifs de réduction des coûts de production des composants et d'utilisation d'émetteurs non refroidis fonctionnant à la longueur d'onde de 1.3  $\mu\text{m}$ . Cette activité a été menée en étroite collaboration avec le groupe de Markus Pessa et Mircea Guina de Tampere University of Technology et James Gupta du National Research Centre Canada qui ont épitaxié la majorité des structures étudiées. Suivant l'approche introduite par Kondow et al [19] qui prônait l'utilisation de VCSEL en technologie GaAs dont la région active est constituée de puits quantiques en GaInNAs, nous avons mené des études de photoluminescence et photoluminescence excitée qui

ont permis de mettre en évidence l'influence de la structure des puits quantiques utilisée **[SC19][SC26]** et des recuits **[SC15]** sur les propriétés de luminescence. Ces études spectroscopiques ont aussi conduit à identifier le GaInNAsSb comme le matériau avec le meilleur potentiel pour étendre l'émission vers les longueurs d'onde supérieures à  $\sim 1.4 \mu\text{m}$  **[SC32]**. En limitant la teneur en azote et en recourant au pompage optique, nous sommes parvenus à démontrer des VCSEL émettant des puissances records à  $1,3 \mu\text{m}$  **[SC16]**, les premiers VCSEL émettant en bande C (à  $1530 \text{ nm}$ ) sous excitation nanoseconde à température ambiante **[SC34]**. Nous avons aussi adapté les structures VCSEL pour étudier les caractéristiques de gain des puits GaInNAs et avons ainsi pu démontrer des VCSEA monolithiques dont les performances étaient similaires à celles obtenues avec des structures technologiquement plus complexes impliquant la fusion de wafers d'une région de gain à base d'InGaAsP/InP à des miroirs en AlGaAs/GaAs **[SC25]**. Ayant aussi reconnu le potentiel des VECSEL en tant que laser de pompe pour l'amplification Raman dans les fibres optiques **[SC156]**, nous avons aussi pu être les premiers à démontrer des VECSEL à base GaInNAs à la longueur d'onde de  $1320 \text{ nm}$  **[SC12]**. Suite à la bulle internet, les perspectives de recherche sur les composants optiques ont été modifiées notamment parce que les domaines d'applications comme la bio-photonique, le secteur du divertissement, de la spectroscopie ont pris le pas sur les télécommunications pour établir une nouvelle gamme d'objectifs et de performances à atteindre. En particulier, on a pu voir une recrudescence de demandes pour la réalisation de sources de forte puissance (multi-watt) dans la gamme spectrale piètrement couverte s'étendant du vert à l'orange que ce soit pour la projection cinématographique, l'ophtalmologie, la dermatologie, ou encore l'astronomie (lasers guides sodium). Nous avons donc été les premiers à proposer et démontrer l'utilisation de VECSEL à base de GaInNAs fonctionnant aux longueurs d'onde proches de  $1200 \text{ nm}$  **[SC51]** qui, une fois doublés en fréquence, s'avèrent adaptés pour adresser ces applications **[SC53][406]**.

En ce qui concerne les composants exploitant le diamant, l'activité est née du besoin de gérer de façon efficace de la dissipation de chaleur dans les VECSEL. L'utilisation de fenêtres diamantées placées à l'intérieur de la cavité en contact direct avec la région à gain du laser où la chaleur est générée s'est avérée être la méthode de choix **[SC24]** permettant la diversification en longueur d'onde de ce type de lasers sur la gamme allant de  $0.65$  à  $2.7 \mu\text{m}$  et avec des puissances émises pouvant atteindre plusieurs watt **[SC53]**. En y ajoutant le développement de techniques de micro-structuration du diamant utilisant les outils de la micro-électronique, nous avons pu former des micro-optiques que nous avons exploitées pour réaliser une version quasi-monolithique de VECSEL, les VECSEL microchip, qui permettent d'obtenir des performances intermédiaires ( $\sim 200 \text{ mW}$  en monomode latéral) entre les VCSEL et les VECSEL à cavité étendue standard en rapport avec leur taille ( $10^{-3} \text{ mm}^3$ ) **[SC54]**. Souhaitant faire évoluer l'activité de micro-structuration du diamant vers des systèmes plus complexes pour, en particulier, développer des convertisseurs non linéaires intégrés exploitant l'effet Raman, nous avons mis en place une approche technologique exploitant des diamants de synthèse homoépitaxiés, des dépôt de résine par jet d'encre et de la gravure sèche pour réaliser des guides d'onde de longueur millimétrique sur diamant **[SC67]**. Depuis, cette technique a été reprise et améliorée pour conduire à la fabrication de micro-résonateurs en anneau, utilisés soit pour exalter l'émission des centres azote-lacune et réaliser des sources de photons uniques à température ambiante pour la photonique quantique [258] soit pour promouvoir la conversion non linéaire par effet Kerr et générer des peignes de fréquences [261].

Le dernier axe que j'ai développé à l'University of Strathclyde, en collaboration avec le groupe de Wilson Sibbett de L'University of St Andrews et de James Gupta du National Research Centre Canada, portait sur les nouveaux miroirs à absorbants saturables à semiconducteurs et leur utilisation pour générer et contrôler l'émission d'impulsions courtes (pico ou femto-secondes) dans des lasers dont le milieu à gain est un diélectrique (crystal ou verre) dopés aux ions métalliques ou terres rares. Une fraction significative des travaux visait la diversification en longueur d'onde des sources d'impulsions ultra-courtes grâce au développement de nouvelles sources impulsionnelles et de leurs SESAM associés. Dans un premier temps, les travaux ont concerné l'amélioration des SESAM pour la gamme spectrale allant de 1250 à 1600 nm et s'est appuyée sur l'utilisation de structures à base de GaInNAsSb/GaAs pour obtenir des SESAM monolithiques à faibles pertes non saturables. Nous avons été les premiers à démontrer l'utilisation de tels composants pour générer des d'impulsions pico-secondes à des longueurs d'onde proches de 1320 nm [SC4]. Nous avons ensuite étendu leur utilisation et ouvert l'accès au régime d'impulsions femto-secondes en insérant des SESAM en GaInNAsSb dans des lasers Cr:forsterite et Cr:YAG fonctionnant respectivement à la longueur d'onde de ~1300 [SC30] et ~1500 nm [SC48]. Pour atteindre des longueurs d'onde encore plus élevées et permettre l'émission d'impulsions ultra-courtes dans le mi-infrarouge (2-2.2  $\mu$ m), nous avons été les premiers à rapporter l'utilisation de SESAM à base d'antimoineures (AlInGaAsSb/GaSb) dans des lasers dopés thullium [SC66] ou holmium [SC57][SC60] et avons établi l'état de l'art (voir Fig. 47) notamment avec la génération d'impulsions de 191 fs avec un laser Tm,Ho:NaYW [SC65]. Enfin, nous nous sommes intéressés à l'utilisation de SESAM pompés optiquement ou adressés électriquement pour contrôler et changer à souhait le régime de fonctionnement de ces lasers entre une opération continue et le régime d'émission d'impulsions courtes [SC55][SC64] ou pour faire varier la durée des impulsions produites [SC73].

## **4.2. Travaux en cours au LAAS**

### **4.2.1. Introduction**

Depuis mon arrivée au LAAS (1<sup>er</sup> février 2012), les travaux que j'ai pu mettre en place et auxquels j'ai pu contribuer s'inscrivent dans la lignée des recherches que j'ai réalisées jusqu'à lors dans la mesure où ils continuent de porter sur la mise au point de sources lasers innovantes.

Comme indiqué dans l'introduction générale de ce manuscrit, les études entreprises s'inscrivent dans le domaine de la photonique vu que les composants à l'étude sont ou seront issus de l'utilisation des outils et des procédés de fabrication de la micro-électronique. L'objectif principal de mes travaux est d'introduire dans les systèmes lasers sur puce des fonctions plus complexes que les traitements linéaires d'information (routage, modulation) comme les opérations de conversion non-linéaires. Il s'agit effectivement d'explorer la faisabilité de transférer certaines fonctionnalités d'optique

non-linéaire conventionnellement déployées dans les lasers à solide de puissance telles que la conversion de fréquences vers le domaine de l'optique intégrée à semiconducteur. Plus spécifiquement, le défi à relever consiste à démontrer la possibilité de réaliser, sur un même wafer, un système laser efficace comprenant un oscillateur paramétrique optique et sa diode laser de pompe. En fait, dans un premier temps, le démonstrateur visé est une source générant un peigne de fréquences. Le principe de fonctionnement de cette source, introduit en 2007, consiste à exciter un micro-résonateur à modes de galerie avec une source mono-fréquence pour induire des cascades de mélanges à quatre ondes résonants [403]. Comme on le verra par la suite, cet objectif m'a amené à introduire l'étude et la fabrication de résonateurs optiques à modes de galerie (à disques ou en anneau) au LAAS.

Au vu de mon expérience sur les composants à base de GaInNAsSb/GaAs, des moyens disponibles et de l'expertise de l'équipe « PHOTO » du LAAS, les composants à l'étude sont et seront développés en technologie GaAs. Cette plateforme technologique est particulièrement adaptée pour la réalisation des composants visés. En effet, cette filière a le mérite de permettre la fabrication commerciale de diodes lasers de puissance (fonctionnant notamment aux longueurs d'onde de 808 ou ~980 nm pour le pompage des lasers Nd:YAG et des amplificateurs à fibre dopée erbium ou ytterbium respectivement) avec des densités de puissance atteignant le MW/cm<sup>2</sup>. Par ailleurs, le GaAs est un matériau dont les coefficients non-linéaires d'ordre 2 ( $d_{14} \sim 170 \text{ pm/V}$ ) et d'ordre 3 ( $n_2 \sim 1.6 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2/\text{W}$ ) sont élevés, ouvrant la voie vers des conversions non-linéaires sur de courtes distances. Enfin, en associant les alliages d'AlGaAs avec leur oxyde (l'oxyde d'aluminium - AlOx), il est possible d'obtenir des indices et de contrastes d'indice de réfraction élevés (similaires à ceux du couple Si/SiO<sub>2</sub>) permettant de confiner fortement de la lumière pour une intégration dense mais aussi pour renforcer les effets non-linéaires. Guilhem Almuneau ayant établi l'activité de recherche sur la technologie AlOx et son utilisation pour les composants photoniques (surtout VCSEL), nous travaillons en collaboration étroite pour explorer et tirer le meilleur parti de ce matériau et des procédés de fabrication associés. Comme on le verra par la suite, ce choix technologique contraste par rapport à la tendance pour le « tout silicium » et apporte une originalité aux travaux menés. Pour finir, reconnaissant que les structures des diodes lasers et des convertisseurs non-linéaires sont a priori différentes, je privilégie des réalisations exploitant intégration verticale car cette voie apparaît comme la plus pertinente pour parvenir au résultat escompté. Ce choix constitue une marque d'originalité de mes travaux.

Parallèlement à ces travaux sur l'intégration photonique, je participe aussi aux travaux sur les réseaux de périodicité sub-longueur d'onde mené par Olivier Gauthier-Lafaye avec une perspective centrée sur l'utilisation de ces composants photoniques nanostructurés dans des systèmes lasers en espace libre.

Comme indiqué ci-dessus et décrit dans les paragraphes à venir, les travaux engagés comportent des études matériaux, plus spécialement sur les oxydes de semiconducteurs III-V, et des recherches sur les composants exploitant des effets de résonance qui se présentent sous la forme soit de résonateurs à modes de galerie (WGMR pour whispering gallery mode resonators, c'est-à-dire de micro-disques, micro-anneaux) soit de réseaux résonants de période sub-longueur d'onde.

#### 4.2.2. Les composants à base de résonateurs à modes de galerie

L'activité la plus conséquente que j'ai menée depuis mon arrivée au LAAS est une action qui porte sur le développement de résonateurs à modes de galerie réalisés en technologie (Al)(In)GaAs/oxyde d'aluminium (AlOx) sur GaAs. Ces recherches se déclinent selon trois sous-axes : la caractérisation de l'AlOx, la mise en place de nouveaux procédés technologiques et l'étude (de la conception à la caractérisation) de nouveaux composants exploitant l'ingénierie tridimensionnelle des semiconducteurs III-V-oxyde. Les travaux initiés se font en collaboration étroite avec Guilhem Almuneau et tirent profit du four d'oxydation avec suivi in-situ par réflectométrie optique [407] mis au point au LAAS qui fait, aujourd'hui, l'objet d'un transfert industriel vers la PME, AET Technologies. Les travaux entrepris ici visent à étendre l'utilisation de cette technologie au-delà des applications pour les lasers à cavité verticale émettant par la surface (VCSEL) en ouvrant la voie vers une structuration 3D de l'indice de réfraction et de la conduction électrique dans des structures à semiconducteurs III-V. Ces actions entrent pleinement dans le cadre du GDR Oxyfun dirigé par Catherine Dubourdiou (E.C. Lyon), dédié aux caractérisations et utilisations des oxydes fonctionnels, auquel nous participons activement.

Dans un premier temps, j'ai participé à la qualification par analyse en micro-photoluminescence d'un nouveau procédé d'oxydation planaire suivi d'une étape de recroissance par épitaxie par jets moléculaires, procédé conçu et implémenté par Guilhem Almuneau, Chantal Fontaine et leurs doctorants Farès Chouchane et Hejer Makhloufi (voir Fig. 53) [SC77]. L'idée, comme en [408][409], est non plus de faire une oxydation standard progressant latéralement depuis les bords de mesas gravés mais d'utiliser des trous de taille nanométrique traversant une couche fine inoxyidable (de GaAs) et débouchant dans la couche de haute teneur en aluminium pour obtenir une oxydation essentiellement surfacique. La forme oxydée peut être beaucoup plus libre que par oxydation latérale en disposant judicieusement les ouvertures vers l'AlAs. Nous avons obtenu la photoluminescence de puits quantiques d'InGaAs épitaxiés après l'oxydation (voir Fig. 52 et Fig. 53) à proximité immédiate (~30 nm) de l'oxyde. Ce procédé est prometteur pour une fabrication de matrices de haute densité de VCSEL à diaphragmes d'oxyde.

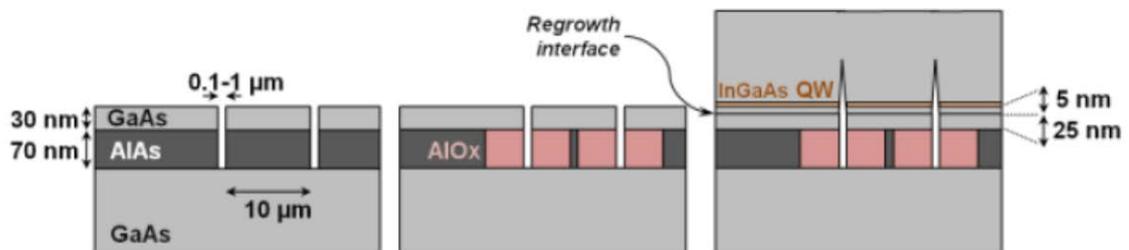
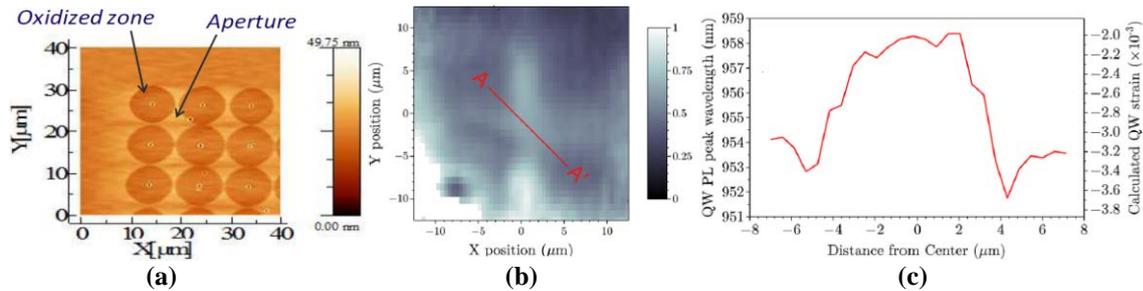
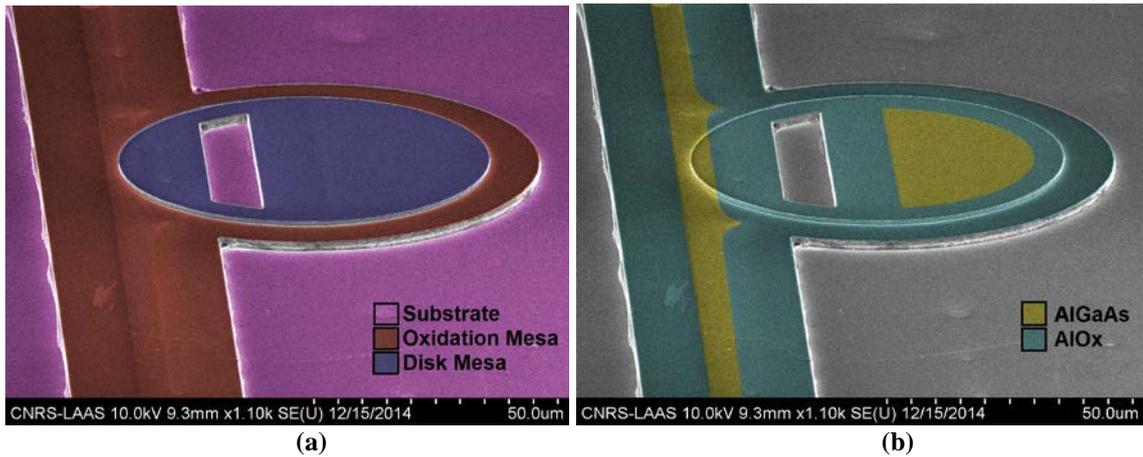


Fig. 52 : Schémas montrant le nouveau procédé PAIOx (pour AlOx planaire) suivi d'une recroissance.

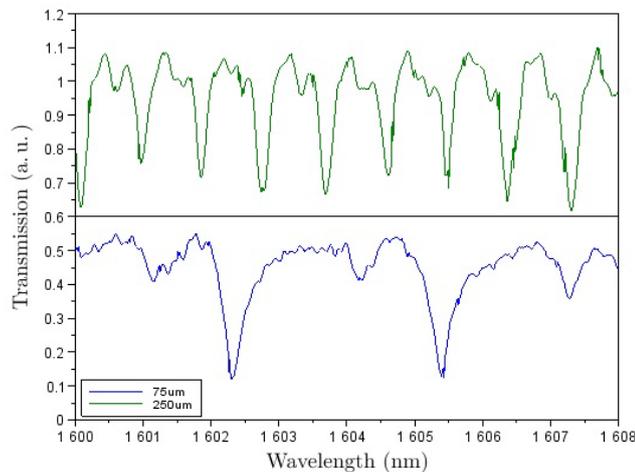


**Fig. 53 :** (a) Images AFM de l'échantillon PAIOx, (b) cartographie de l'intensité de photoluminescence d'une région comprenant 4 zones oxydées et (c) évolution de la longueur d'onde d'émission selon la ligne A-A' indiquant la distribution de contrainte induites par l'AIOx.

En parallèle, j'ai initié une activité visant à explorer la faisabilité de réaliser des peignes de fréquences entièrement intégrés sur une puce de GaAs. Ces travaux sont soutenus par le CNES au travers d'un contrat de R et T et d'un co-financement avec la DGA d'une bourse de thèse (allouée à Clément Arlotti). Techniquement, il s'agit de miniaturiser les systèmes de peignes de fréquences exploitant l'oscillation paramétrique dans des résonateurs à modes de galerie comme introduits par Tobias Kippenberg [403][410] qui ont la capacité de générer des fréquences sur plus d'une octave [404][405] et de comparer les performances des systèmes obtenus aux lasers à semiconducteur à deux sections fonctionnant en régime de synchronisation de modes, sachant que les impulsions produites par ces derniers sont intrinsèquement limitées par la dispersion et la largeur de gain disponibles. Dans ce cadre, j'ai introduit l'étude et le développement technologiques de résonateurs à modes de galerie au LAAS. Plus particulièrement, nous avons mis en place une nouvelle manière de réaliser des résonateurs couplés à leur guide d'accès. Nous avons mis au point une configuration exploitant un couplage vertical réalisé grâce à une oxydation latérale dont les contours de mésas sont judicieusement choisis pour définir des guides d'accès enterrés et augmenter le confinement vertical dans le résonateur (voir Fig. 54 et **[SC78]**). Cette méthode s'inspire des travaux faits sur silicium pour lesquels l'oxydation est induite par implantation et recuit [411]. Notre approche permet de s'affranchir des étapes de planarisation [412][413] ou de fabrication double face avec report [414] comme utilisées jusqu'ici. Cette méthode évite aussi les difficultés de lithographie et de gravure à flancs verticaux associées au couplage évanescent latéral [415] et devrait permettre d'utiliser des matériaux différents pour notamment fabriquer un laser de pompe dans le guide d'accès couplé à son convertisseur non-linéaire passif. L'autre bénéfice de l'utilisation de l'AIOx est de pouvoir réaliser des composants à fort confinement optique sans travailler sur des structures membranaires suspendues dans l'air [415]. La réalisation de tels résonateurs a été menée avec succès et leur caractérisation a montré qu'ils étaient sur-couplés, présentant néanmoins des facteurs de qualité de 4600 (8500 respectivement) pour un diamètre de 75 (250) μm à la longueur d'onde de 1600 nm (voir Fig. 55). Les mesures de pertes dans les guides enterrés ont révélé des pertes inférieures à 3 cm<sup>-1</sup>.

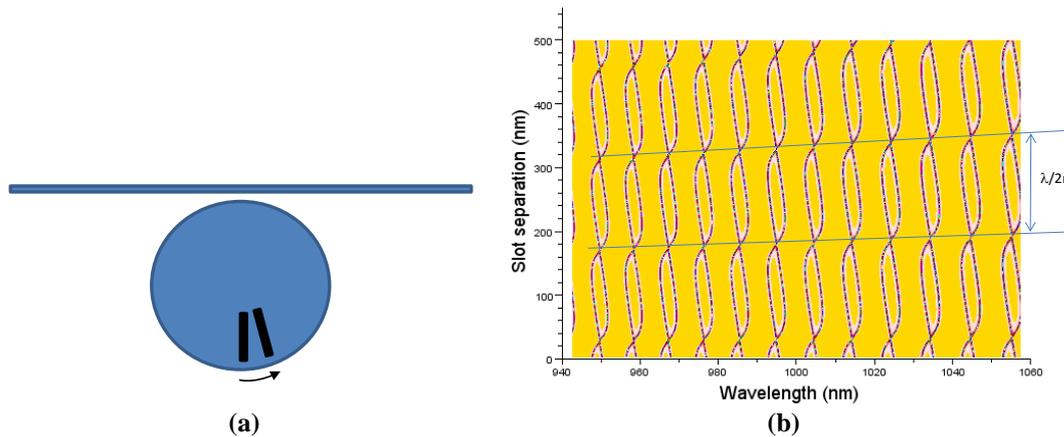


**Fig. 54 :** Images MEB colorisées d'un micro-disque GaAs couplé à un guide enterré défini par oxydation surlignant respectivement le profil vertical de la structure et (b) la distribution spatiale de l' $\text{AlOx}/\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$  [SC78].



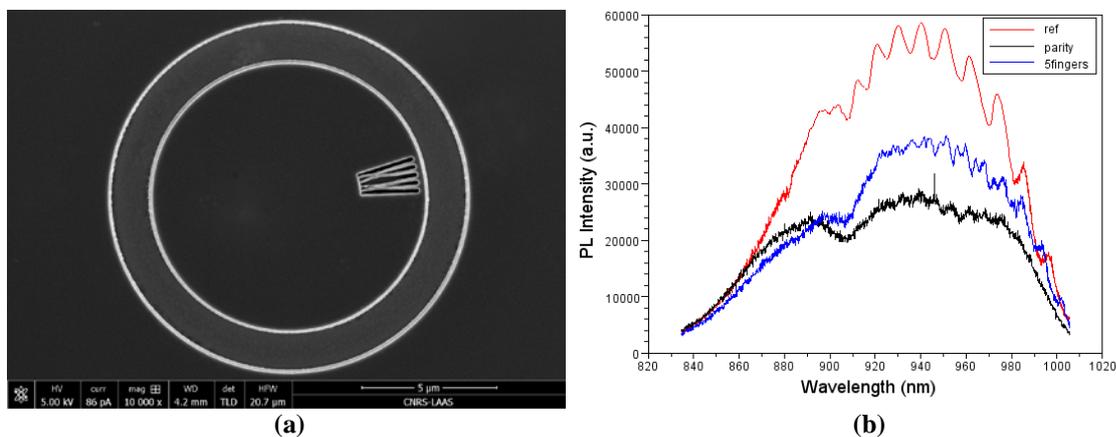
**Fig. 55 :** Courbes de transmission de micro-disques de 75 et 250 $\mu\text{m}$  de diamètre couplés verticalement à leur guide d'accès [SC78].

Pour parfaire notre compréhension des distributions modales dans les résonateurs à modes de galerie, et dans le cadre du LIA « ILNACS », j'ai aussi débuté à partir de juin 2012 une activité collaborative avec Mikhail Maximov du Ioffe Institute visant à induire l'émission monomode dans les lasers à résonateurs à modes de galerie, sujet développé internationalement depuis une quinzaine d'années [416]-[419] dans la mesure où ce type de lasers pourrait être la forme retenue dans les systèmes pour les interconnexions photoniques de demain. Notre approche vise à obtenir l'émission mono-fréquence grâce à l'incorporation d'encoches de taille nanométrique. J'ai donc initié une étude numérique préliminaire basée sur une analyse de modes couplés [420][421] qui a été poursuivie par le stagiaire de M2, Hafedh Hajjaji, et qui a permis d'établir quelques dessins de structures.



**Fig. 56 : (a) Géométrie de micro-disque passif comportant deux encoches et un guide d'accès étudiée numériquement (b) Calcul de l'évolution de la transmission en fonction de l'écart en encoches**

Après fabrication et test sur un banc de micro-photoluminescence monté initialement pour l'évaluation de structures à cristaux photoniques à auto-collimation, on a pu vérifier que les encoches ont bien un effet de filtrage mais l'action laser n'a pas été obtenue [SC169]. Dans le même temps et avec des résonateurs beaucoup plus grands, les groupes de l'Universität Würzburg [422] et du Laboratoire de Matériaux et Phénomènes Quantiques (LMPQ - G. Leo) [423] sont parvenus à démontrer la suppression sélective d'un certain nombre de modes dans des résonateurs respectivement actifs et passifs. Nous allons poursuivre l'action théorique et expérimentale pour démontrer la possibilité de contrôler entièrement l'émission des WGMR par modification de leur forme.



**Fig. 57 : (a) Image MEB d'un micro-disque à encoches suspendu pour opération mono-fréquence. (b) Photoluminescence de micro-disques sans encoche (courbe rouge), incluant deux encoches sélectionnant nominalemt les modes d'ordre pair et à 5 encoches pour obtenir une émission monomode.**

L'utilisation de l' $\text{AlOx}$  dans des guides d'onde, comme dans les composants présentés ci-dessus, impose une interaction plus forte de ce matériau avec le mode optique que celle introduite par l'ouverture d' $\text{AlOx}$  dans les VCSEL [424], il paraît donc important de mieux caractériser les propriétés optiques de l' $\text{AlOx}$  notamment ses pertes internes et d'interfaces, activité qui s'inscrit plus généralement dans le cadre de la reprise des études matériau de l' $\text{AlOx}$  au niveau international [425]-[427]. Pour cela, et en

complément des travaux réalisés en collaboration avec le LMPQ [428], et dans le cadre de la thèse de Gaël Lafleur, nous avons entamé une étude s'appuyant sur des guides à fente horizontale en AlOx/GaAs (guides « slots ») qui présentent la spécificité d'avoir des conditions de guidage très différentes pour les polarisations TE et TM et qui devraient nous permettre de remonter aux différents types de pertes (voir Fig. 58 et [SC176]).

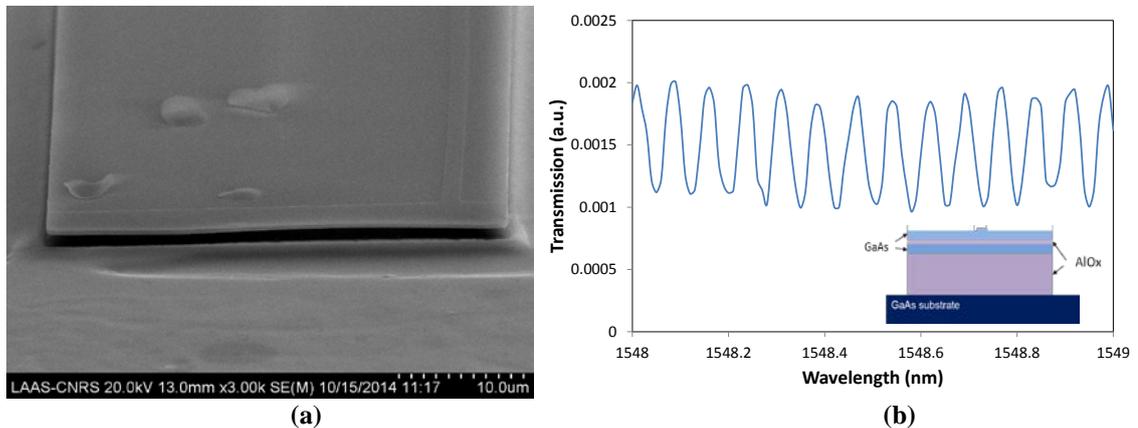


Fig. 58 : (a) Image MEB d'un bord de mesa d'un guide à fente horizontale GaAs/AlOx/GaAs/AlOx et (b) mesure de transmission d'un guide de 4,5mm de long en mode TE.

La réalisation des micro-disques couplés verticalement à leur guide d'accès a aussi mis en exergue le besoin de réaliser des formes d'ouvertures d'oxyde plus complexes et mieux maîtrisées. Cette constatation nous amène à reprendre les études de mesures et de prédictions de l'évolution du front d'oxydation notamment pour évaluer et prendre en compte les anisotropies observées (notamment en Fig. 59), qui, à ce jour, ne sont ni quantifiées (à une exception près [429] et pour des orientations peu conventionnelles), ni expliquées. Juste avant mon arrivée au LAAS, Guilhem Almuneau et son doctorant Farès Chouchane ont pu montrer l'apparition de flancs d'oxyde biseautés verticalement dans des couches épaisses [430], phénomène assigné à l'influence de la contrainte. Dans le cadre de la thèse de Gaël Lafleur, nous poursuivons ces travaux notamment avec la mise en place d'une caractérisation détaillée et d'un modèle macroscopique avancé (inspiré des modèles isotropes [431][432]) qui inclut explicitement ces effets.

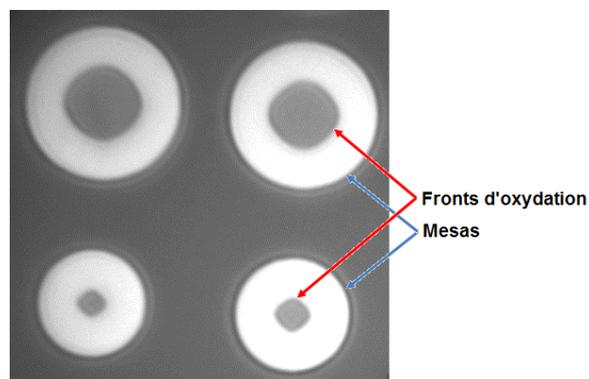


Fig. 59 : Image infrarouge montrant que le front d'oxyde progressant depuis un mesa circulaire devient carré c'est-à-dire que l'oxydation de couches d' $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$  est anisotrope.

### **4.2.3. Lasers à cavité étendue exploitant des réseaux sub-longueur d'onde**

La seconde thématique dans laquelle je me suis impliqué porte sur les réseaux sub-longueur d'onde de type réseaux résonants à mode guidé (GMRF) et sur leur utilisation pour stabiliser des diodes lasers en cavité externe. Ces travaux s'inscrivent dans le cadre du projet CNES « stabilisation spectrale de diodes laser par réseaux résonants » que dirige Olivier Gauthier-Lafaye.

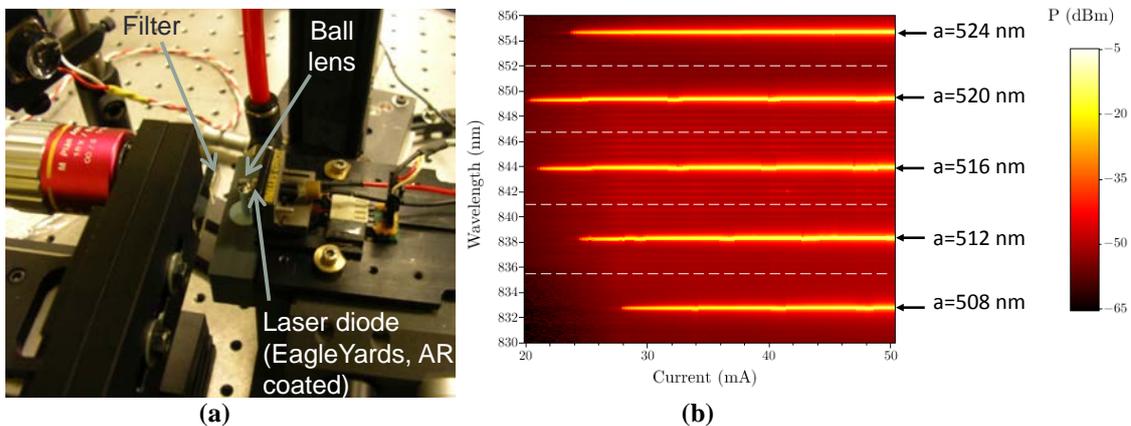
Ces GMRF sont, en fait, des miroirs spectralement sélectifs introduits en 1992 [433] qui utilisent le couplage par un réseau (de pas  $\lambda/2n_{\text{eff}}$ ) d'une onde venant de l'espace libre vers le ou les mode(s) supportés par un guide d'onde (planaire) et qui permettent d'obtenir à la fois une forte réflectivité et une sélection spectrale de grande finesse [210]. Ils présentent donc un fort potentiel pour la stabilisation de fréquence de diodes lasers dont l'évaluation est l'objet du contrat CNES mentionné ci-dessus. Du point de vue applicatif, les motivations du projet et spécifications visées découlent du programme PHARAO<sup>2</sup> dont l'objectif est la satellisation d'une horloge atomique à base d'ions césium refroidis par lasers qui devrait permettre d'établir une référence de mesure du temps ayant précision de  $10^{-16}$ . Le cahier des charges associé en ce qui concerne les lasers demande des sources compactes, stables, de faible consommation énergétique, fiables mais surtout capables de générer à minima 150 mW de signal avec une largeur de raie inférieure d'un ordre de grandeur à celle de la transition D<sub>2</sub> du césium (5.2 MHz autour  $\lambda=852.11873$  nm dans l'air). Ces spécifications s'avèrent suffisamment générales pour les applications de spectroscopie pour servir de guide aux travaux en cours et à venir.

De façon plus générale, la stabilisation de (diodes) lasers est un domaine très actif et, ceci, depuis plus de 35 ans. L'objectif, ces dernières années, est dédié à l'amélioration des performances des systèmes utilisant ces sources, systèmes qui peuvent être classifiés selon deux catégories en fonction de leur application. La première classe correspond aux émetteurs utilisés en tant que lasers de pompe pour des lasers à milieu à gain diélectrique (fibres ou cristaux) dopés terres rares et pour lesquels on cherche à améliorer l'efficacité de pompage en assurant que toute la puissance des diodes ou des tableaux de diodes spatialement multimodes est délivrée spectralement dans la bande spectralement restreinte ( $\sim 1$  nm) d'absorption avec le maximum de densité de puissance. La seconde catégorie concerne les sources utilisées à des fins de métrologie, de spectroscopie, de communication cohérente et dont les propriétés requises sont une émission spatialement monomode et, présentant spectralement, une faible largeur de raie (ou de façon équivalente une grande longueur de cohérence ou encore un faible bruit de phase et d'amplitude), préférablement accordables continument sur une large bande spectrale. De nombreuses approches ont déjà été validées tant en version monolithique (lasers DFB, DBR) qu'avec des configurations à base de cavité étendue. Dans ce cas, les architectures établies utilisent soit des montages de type Littrow [434]-[436] ou Littman-Metcalf [437]-[439] exploitant des réseaux diffractifs, soit des cavités plus simples utilisant des réseaux de Bragg photo-inscrits dans des fibres [440] ou des guides d'onde [441] ou, plus récemment, des réseaux de Bragg inscrits en volume (VBG) dans des verres photo-réfractifs [442]-[446].

---

<sup>2</sup> <http://www.cnes.fr/web/CNES-fr/4444-pharao.php>

En ce qui concerne les GMRF, l'utilisation de ces filtres pour sélectionner la longueur d'onde d'émission de diodes lasers a débuté en 2001 et 2002 [447]-[449] et a été suivie de quelques démonstrations supplémentaires en 2005-2007 [450]-[452]. Néanmoins, l'approche suscite peu d'intérêt de la communauté laser, probablement parce que les réseaux résonants présentent une faible tolérance angulaire et que leur performance s'amointrissent quand ils sont excités par des faisceaux de dimensions restreintes ( $< 200 \mu\text{m}$ ) [214][SC46]. Ceci signifie que ces miroirs filtrants ne peuvent être effectivement utilisés pour stabiliser une diode en cavité externe qu'avec un montage de type Littrow, connu comme étant peu tolérant, et avec des caractéristiques de réseau potentiellement moins attractives que celles des réseaux diffractifs standard. Le renouvellement de l'intérêt pour cette approche tient essentiellement à une avancée proposée initialement de façon théorique à partir de 2008 [453][454] par le groupe du professeur Shogo Ura du Kyoto Institute of Technology, qui inclut une zone de couplage à réseau résonant au sein d'une cavité Fabry-Pérot d'optique guidée pour former un filtre à réseau intégré dans une cavité résonante (CRIGF pour Cavity-Resonant Integrated Grating Filter) et permettre le découplage efficace d'une onde guidée sur des dimensions réduites. La première validation expérimentale par ce même groupe survient en janvier 2012 [455] suivie de près (avril 2012) d'une étude du LAAS, qui confirme expérimentalement l'élargissement de la gamme d'acceptance angulaire de ce type de filtres possédant des zones de réseau résonant de 10 à 50  $\mu\text{m}$  de large [456]. Nous avons inséré ensuite un de ces filtres (réalisés en  $\text{Si}_3\text{N}_4$  sur verre) dans la cavité externe d'une diode laser avec un montage de type œil de chat, plus tolérant aux désalignements que les configurations Littrow et avons démontré la stabilisation spectrale de l'émission laser avec des puissances émises allant jusqu'à 30mW [SC74] (voir aussi Fig. 60). Nous avons depuis confirmé que l'émission peut être mono-fréquence. Les perspectives de ces travaux sur les sources de haute pureté spectrale seront décrits au prochain paragraphe.



**Fig. 60 : (a) Montage expérimental de la diode laser à cavité externe à réinjection optique filtrée par un CRIGF et (b) ses caractéristiques spectrales en fonction du courant d'injection de la diode laser et du pas des réseaux.**

### **4.3. Prospective**

Pour la période à venir, ma prospective de recherche porte sur l'ingénierie des lasers et convertisseurs non-linéaires avec un double objectif, d'une part, une montée en complexité des systèmes lasers intégrés sur puce et, d'autre part, une exploration des bénéfices de composants issus des nanotechnologies dans des macro-systèmes lasers.

Plus spécifiquement, mes recherches s'inscriront dans la continuité de mes travaux en cours sur les systèmes lasers intégrant une fonctionnalité d'optique non-linéaire. L'objectif sera d'étendre les études théoriques et technologiques entreprises pour proposer de nouveaux concepts et de nouveaux composants photoniques exploitant les micro- et nanotechnologies et utilisant, en particulier, les résonateurs à modes de galerie ou des structures à base de réseaux résonants à des fins de réalisation d'oscillateurs paramétriques optiques tout intégrés.

De manière plus globale, ces travaux portent sur l'intégration photonique avec une vision de type « More than Moore » dans la mesure où l'objectif n'est pas centré sur la démonstration de composants de ultra-haute performance ou de taille réduite ultime mais vise plutôt la diversification des fonctionnalités accessibles en optique intégrée avec des dispositifs fabriqués à l'aide des techniques et des équipements de la micro-électronique disponibles au LAAS. Cette évolution vers des systèmes photoniques plus complexes et donc plus largement utilisables s'inscrit naturellement dans les perspectives définies par Photonics21, groupe d'académiques et d'industriels qui promeut, au niveau européen, les actions de recherche et d'industrialisation qui feront de la photonique la technologie clé du 21<sup>ème</sup> siècle comme la micro-électronique le fut pour le 20<sup>ème</sup> siècle. L'ambition d'intégrer des fonctions de conversion de fréquences sur puce peut être vue comme une alternative à l'ingénierie des bandes interdites pour étendre la gamme spectrale d'émission des lasers à semiconducteur, et, de ce fait entre là encore dans la continuité des travaux sur le GaInNAsSb/GaAs. L'approche non-linéaire s'inspire de l'avènement de cette méthode de diversification en longueur d'onde pour les lasers à solide (diélectriques) [457], et s'intègre à l'activité internationale dynamique sur la conversion nonlinéaire dans les milieux semiconducteurs dont un état de l'art est dressé en références [458][459]. Si l'oscillation paramétrique optique a été obtenue tant en exploitant des effets non-linéaires du second [460] que du troisième ordre [403], l'intégration du système complet, c'est-à-dire avec sa diode laser de pompe, reste un défi entier dans la mesure où ces démonstrateurs ont été obtenus avec des matériaux ou des structures incompatibles avec l'intégration du laser de pompe.

Les travaux seront menés en collaboration très étroite avec les membres de l'équipe PHOTO ainsi qu'avec certains chercheurs de MOST du LAAS. Si des collaborations externes qu'elles soient nationales ou internationales, portant sur les procédés technologiques, sur le développement d'éléments théoriques ou d'outils de simulation, ou encore sur les caractérisations ou l'utilisation des composants développés, sont envisagées pour faciliter l'échange de connaissance, de savoir-faire et de compétences complémentaires, l'état d'avancement actuel des travaux ne permet pas encore d'identifier formellement ces collaborations.

Techniquement, les perspectives s'articuleront donc essentiellement en deux grands axes :

1. Les systèmes non-linéaires à résonateurs à modes de galerie
2. Les lasers à miroirs à réseaux sub-longueur d'onde

## **Les systèmes non-linéaires à résonateurs à modes de galerie**

L'axe principal d'étude que je compte continuer de développer concerne les systèmes non-linéaires entièrement intégrés sur puce, c'est-à-dire des systèmes qui non seulement incluent le laser de pompe mais aussi leur convertisseur non-linéaire, avec pour objectif ultime la démonstration d'un peigne de fréquences induit par effet Kerr (plus précisément par mélange à quatre ondes ou, de façon équivalente, par oscillation paramétrique optique à non-linéarité d'ordre 3).

Pour atteindre cet objectif ambitieux, notre stratégie repose sur l'utilisation du GaAs comme milieu de fort indice Kerr (2 ordres de grandeur plus élevé que le  $\text{Si}_3\text{N}_4$  qui s'est avéré être le matériau plus performant jusqu'à présent), l'exploitation de résonateurs de très haut facteur de qualité ( $Q \sim 2 \cdot 10^5$ ) et un pompage intra-cavité par une diode laser de puissance. Pour cela, comme indiqué dans la partie précédente et rapporté en **[SC78]**, nous avons introduit et mis au point une méthode d'intégration tridimensionnelle exploitant les structures à base de semiconducteurs III-V et de leur oxyde pour obtenir des résonateurs à modes de galerie couplés verticalement avec leurs guides d'onde d'accès. Cette approche a été spécifiquement conçue pour être compatible avec l'insertion d'éléments à gain (puits ou boîtes quantiques) adressés électriquement dans le guide d'onde d'accès c'est à dire adaptée pour créer des lasers. L'empilement de couches utilisé tout comme le confinement par oxyde enterré sont par ailleurs favorables à la réalisation de diodes lasers de puissance dans la mesure où ces structures sont adaptées pour supporter des modes de large volume.

Pour réaliser les résonateurs de haut facteur de qualité requis, nous comptons lancer un certain nombre d'études visant à (i) optimiser la géométrie du disque/anneau pour limiter les pertes [461] tout en produisant une dispersion adaptée (ii) adapter le procédé fabrication pour réduire les rugosités induites par la gravure [462] et (iii) développer, en collaboration avec les chercheurs du Ioffe Institute (dans le cadre du LIA ILNACS), des méthodes de passivation [463][464] et d'encapsulation [465] de surface stables.

Par ailleurs, pour favoriser l'élargissement spectral du peigne de fréquences, nous évaluerons la possibilité obtenir une dispersion plate et légèrement anormale [466] en déployant la méthode d'ingénierie de la dispersion la plus adaptée qu'elle soit basée sur le choix d'un profil géométrique spécifique du guide constituant de l'anneau [404], le dépôt conforme d'encapsulants mono ou multi-couches [467] ou encore induite par des modulations ou des effilements de géométrie [468]. Les résonateurs seront choisis pour présenter des écarts fréquentiels dans la gamme micro-onde ( $< 100$  GHz) pour permettre des caractérisations fines de stabilité et de pureté spectrale comme souhaité par le CNES. Enfin, pour assurer le réglage et le contrôle de la porteuse, nous analyserons les différents moyens disponibles (thermiques [469], piézo-électriques [470] ou encore électro-optiques [471]) pour accorder finement le peigne de fréquences et implémenterons la technique la plus efficace. Afin de mieux évaluer le potentiel de

notre approche ainsi que pour orienter stratégiquement l'ensemble de cette activité, nous serons aussi amenés à adapter et développer des modèles [472]-[474], prenant en compte les spécificités de notre architecture notamment le pompage intra-cavité, les effets potentiellement limitant des pertes non-linéaires ainsi que les dépendances spectrales des caractéristiques des résonateurs (couplage, dispersion, pertes).

L'approche technologique étant intégralement basée sur l'utilisation de l'AlOx, nous continuerons nos études matériaux visant à mieux connaître et mieux maîtriser les propriétés de ces oxydes. Les travaux dans ce cadre porteront notamment sur l'évaluation des compromis entre la vitesse d'oxydation et les effets d'anisotropie d'oxydation induits par le choix de la composition du matériau à oxyder, sur l'étude et la mise en place de nouvelles méthodes permettant un contrôle plus précis encore de la taille des ouvertures d'oxyde, et des études des effets des conditions d'oxydation sur la qualité optique de l'oxyde obtenu.

Par ailleurs, pour confirmer la maîtrise des propriétés optiques de ces résonateurs à modes de galerie, nous poursuivrons l'activité visant à contrôler spectralement la transmission ou l'émission dans les résonateurs à modes de galerie grâce à l'insertion de pertes localisées sous forme de fentes de taille nanométrique, ou grâce à l'introduction, par gravure ou par oxydation sélective, de modulation périodique de leur forme. Ces travaux devraient permettre aussi d'évaluer la pertinence de ce type de stratégies pour exacerber ou au contraire diminuer la sensibilité de ces résonateurs à leur environnement immédiat. Les résultats de ces études seront donc directement utiles et utilisables pour l'application de ces micro-résonateurs en tant que capteurs environnementaux, une activité offrant de nouvelles perspectives de collaborations tant en interne avec le groupe MICA qu'avec des partenaires externes.

## **Les lasers à miroirs à réseaux sub-longueur d'onde**

Les travaux dans ce domaine ont pour objectif principal de développer des lasers à semiconducteurs à cavité étendue (émettant par la tranche (ECDL) ou par la surface (VECSEL)) de forte brillance utilisant des miroirs à réseaux de périodicité sub-longueur d'onde mais aussi d'explorer le potentiel de ces dernières structures pour la réalisation de sources auto-converties en fréquences (par oscillation paramétrique optique intra-cavité).

L'essentiel de l'activité reposera sur l'analyse de diverses formes de réseaux sub-longueur d'onde, que ce soit des réseaux résonants, des réseaux résonants en cavité (CRIGFs mono ou bidimensionnels) ou encore des miroirs à fort contraste d'indice (HCGs) pour identifier et exploiter de nouveaux points de fonctionnement ou mettre en œuvre de nouvelles variantes qui permettront d'améliorer les performances de ce type de lasers. Nous évaluerons aussi le potentiel d'intégration de ces solutions directement dans les puces lasers elles-mêmes.

Plus spécifiquement, dans un premier temps et dans le cadre du projet ANR ASTRID Calitrec, il s'agira de capitaliser sur les résultats récemment obtenus de stabilisation fréquentielle d'une diode laser à ruban monomode émettant dans le proche infra-rouge à l'aide d'un CRIGF en  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$  et, plus particulièrement, d'évaluer les performances accessibles, tant en matière de puissance que de pureté spatiale et spectrale, en fonction des paramètres de la cavité laser et des caractéristiques du CRIGF.

De façon plus générale, l'objectif de ce programme consiste à prouver que les diodes lasers à cavité externe fermée par un CRIGF constituent une approche compétitive pour la réalisation de sources de haute pureté spectrale. Techniquement, au-delà du test de performances, le programme peut-être sous divisé en quatre activités visant respectivement à :

- améliorer les caractéristiques (réflectivité, bande passante) des filtres
- rendre ces filtres accordables
- évaluer la faisabilité de transfert de cette technique vers d'autres gammes spectrales et, pour finir,
- étudier la possibilité de simplifier encore la source.

La première partie de cette action vise à optimiser les performances des CRIGFs y compris de les rendre hautement réfléchissants afin de pouvoir les utiliser du côté opposé à la sortie utile du système à base de diode laser mais aussi, potentiellement de les rendre compatibles avec une utilisation dans des lasers à faible gain tels que les VECSEL ou les oscillateurs paramétriques optiques. Pour cela, nous serons amenés à identifier précisément l'origine des pertes en analysant les effets et l'influence du revêtement spatial des modes, du taux de couplage dans la cavité CRIGF, de la conception de l'empilement vertical et des aspects plus technologiques (rugosité, raccords de champs, etc..). Envisageant de combiner les structures CRIGF à des empilements multi-couches DBR pour augmenter la réflectivité maximale, nous devons étudier l'influence du taux d'extinction pour maintenir l'émission monomode. Par ailleurs, technologiquement, cette approche est associée à un certain nombre de questions liées à la position du CRIGF dans l'empilement et à la nature plane ou corruguée des couches déposées à posteriori.

La mise en place de l'accordabilité de l'émission laser est un impératif imposé par une utilisation à des fins de spectroscopie qui se traduit par la nécessité de rendre le filtre accordable. Nous étudierons donc une variété de méthodes pour introduire une accordabilité de la résonance de structure de type CRIGF allant du filtre présentant un gradient de périodicité et déplacé mécaniquement à des filtres réalisés à l'aide d'autres matériaux (comme le GaAs) pour pouvoir exploiter des effets thermo- ou piezo-électriques.

Un des objectifs du programme est d'adapter cette technologie pour une utilisation dans la gamme de longueurs d'onde mi-infrarouges (8-12 $\mu\text{m}$ ). Pour cela, on envisage un transfert de la fabrication des CRIGF vers la technologie GaAs/AlGaAs combiné un changement de milieu à gain avec le passage à l'utilisation de diodes à cascades quantiques. Les performances de ce système, bien que conceptuellement similaire à celui démontré dans le proche infra-rouge, seront aussi évaluées en détail notamment parce qu'au moins les caractéristiques dynamiques diffèrent de celles des lasers inter-bandes actuellement étudiés et à cause de la réduction potentielle du taux d'extinction induite par l'utilisation de matériaux présentant des indices de réfraction plus élevés.

Toujours dans ce programme, nous évaluerons la faisabilité de simplifier davantage la cavité soit en intégrant la lentille dans le miroir spectralement sélectif sous la forme de gradations de périodicité soit en étudiant des miroirs de type HCG (en technologie

GaAs/AlOx) qui seraient invariants spatialement et qui conserveraient une sélectivité spectrale et des tolérances angulaires suffisantes.

Au-delà de ce programme, je compte explorer la diversification des fonctions rendues par ces miroirs à réseaux dans les lasers. Les fonctionnalités envisagées incluent la mise en forme de faisceau, le contrôle et le façonnage de l'état de polarisation, la mise en phase des éléments de matrice de lasers, la génération multi-longueurs d'onde pour faciliter la conversion non-linéaire, et la conversion non-linéaire elle-même [475].

Globalement, le défi est, dans un premier temps, d'appréhender et de maîtriser les réponses spectrales et spatiales des CRIGF en fonction des caractéristiques géométriques des éléments sub-longueur d'onde constituant ces filtres dont la taille est intermédiaire entre les réseaux infinis (type GMRF) et les nano-cavités à cristaux photoniques et, dans un deuxième temps, de tirer parti des propriétés avantageuses exploitable pour une utilisation dans des systèmes lasers en espace libre.

Pour parvenir à nos fins, nous devons poursuivre la mise en place d'outils de simulation spécifiques adaptés qui, à terme, nous permettront de maîtriser la conception d'éléments incluant à la fois des structurations à l'échelle nanométrique et des anisotropies et variations sur des tailles finies de quelques centaines de micromètres pour, en particulier, prédire leurs réponses linéaire voire non-linéaire. Nous nous appuyerons sur la collaboration existante avec l'Institut Fresnel (A.-L. Fehrembach) sur ces aspects.

A priori, l'exploration des différentes formes de CRIGF ouvrent des perspectives d'utilisations multiples comme le contrôle de la polarisation émise grâce à des CRIGF anisotropes, l'émission multi-fréquence à l'aide de CRIGF multimodes présentant plusieurs longueurs d'onde réfléchies, la génération de faisceau de forte brillance par couplage contrôlé en phase et amplitude de plusieurs éléments d'une matrice de lasers grâce à l'utilisation de plusieurs CRIGF couplés.

En termes d'optique non-linéaire, sous réserve d'utiliser des matériaux appropriés comme les composés AlGaAs/AlOx, les CRIGF offrent une nouvelle voie pour la réalisation de convertisseurs non-linéaires exploitant les mélanges à trois ondes (dont les OPO) en cavité. Comme dans le cas des conversions non-linéaires réalisées avec des microcavités de type VCSEL [476][477] ou avec des nano-cavités à cristaux photoniques [478]-[480], l'efficacité de conversion sera magnifiée par les surintensités associées aux résonances. Les bénéfices des CRIGF en la matière reposent sur la possibilité (i) de pouvoir maximiser et contrôler lithographiquement la zone d'interaction effective grâce à l'ajustement des dimensions latérales de la cavité et (ii) et le fait que leur taille est commensurable avec la taille des modes de lasers à cavité étendue, permettant ainsi d'établir simplement un pompage résonant (intra-cavité) favorable. Cette utilisation nous permettra aussi de nous distinguer dans la mesure où nous serons amenés à nous concentrer sur la conception et l'analyse de CRIGF multi-fréquentiels, de complexité supérieure à celle des études conventionnellement menées sur les cavités mono-fréquences à cristaux photoniques. Le positionnement unique de l'équipe en termes de conception et fabrication font que nous sommes sur le point de lancer des études préliminaires pour évaluer plus précisément le potentiel de cette approche.

Par ailleurs, quel que soit le miroir à réseau choisi, il nous faudra aussi lever un verrou technologique pour rendre la réalisation suffisamment simple et accessible pour permettre les transferts vers l'industrie. Pour cela, on s'appuiera sur le transfert des

motifs par nano-impression, une solution en cours de mise au point, et on évaluera des solutions alternatives comme l'auto-assemblage pour la définition des motifs.



# BIBLIOGRAPHIE

- [1] Chung-En Zah, R. Bhat, B. N. Pathak, F. Favire, Wei Lin, M. C. Wang, N. C. Andreadakis, D. M. Hwang, M. A. Koza, Tein-Pei Lee, Zheng Wang, D. Darby, D. Flanders, and J. J. Heieh, "High-performance uncooled 1.3- $\mu\text{m}$  Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/InP strained-layer quantum-well lasers for subscriber loop applications," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 30, no. 2, pp. 511–523, Feb. 1994.
- [2] H. Soda, K. Iga, C. Kitahara, and Y. Suematsu, "GaInAsP/InP Surface Emitting Injection Lasers," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 18, no. 12, pp. 2329–2330, Dec. 1979.
- [3] J. M. Dallesasse and D. G. Deppe, "III-V Oxidation: Discoveries and Applications in Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers," *Proc. IEEE*, vol. 101, no. 10, pp. 2234–2242, Oct. 2013.
- [4] K. Iga, "Vertical-cavity surface-emitting laser: its conception and evolution," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 47, no. 1R, p. 1, 2008.
- [5] C. H. Henry, R. A. Logan, F. Merritt, and J. Luongo, "The effect of intervalence band absorption on the thermal behavior of InGaAsP lasers," *Quantum Electron. IEEE J. Of*, vol. 19, no. 6, pp. 947–952, 1983.
- [6] T. Kageyama, K. Kiyota, H. Shimizu, Y. Kawakita, N. Iwai, K. Takaki, S. Imai, M. Funabashi, N. Tsukiji, and A. Kasukawa, "Optical absorption coefficient of carbon-doped GaAs epitaxial layer by means of propagation-loss measurement of waveguide for long wavelength VCSEL," in *Indium Phosphide & Related Materials, 2009. IPRM'09. IEEE International Conference on*, 2009, pp. 351–354.
- [7] P. Sundgren, R. Marcks von Würtemberg, J. Berggren, M. Hammar, M. Ghisoni, V. Oscarsson, E. Ödling, and J. Malmquist, "High-performance 1.3 $\mu\text{m}$  InGaAs vertical cavity surface emitting lasers," *Electron. Lett.*, vol. 39, no. 15, p. 1128, 2003.
- [8] E. Söderberg, P. Modh, J. S. Gustavsson, A. Larsson, Z. Z. Zhang, J. Berggren, and M. Hammar, "High speed, high temperature operation of 1.28  $\mu\text{m}$  singlemode InGaAs VCSELs," *Electron. Lett.*, vol. 42, no. 17, pp. 978–979, 2006.
- [9] M. Dinu, J. E. Cunningham, F. Quochi, and J. Shah, "Optical properties of strained antimonide-based heterostructures," *J. Appl. Phys.*, vol. 94, no. 3, p. 1506, 2003.
- [10] S. R. Johnson, C. Z. Guo, S. Chaparro, Y. G. Sadofyev, J. Wang, Y. Cao, N. Samal, J. Xu, S. Q. Yu, D. Ding, and Y.-H. Zhang, "GaAsSb/GaAs band alignment evaluation for long-wave photonic applications," *J. Cryst. Growth*, vol. 251, no. 1–4, pp. 521–525, Apr. 2003.
- [11] T. Anan, M. Yamada, K. Nishi, K. Kurihara, K. Tokutome, A. Kamei, and S. Sugou, "Continuous-wave operation of 1.30  $\mu\text{m}$  GaAsSb/GaAs VCSELs," *Electron. Lett.*, vol. 37, no. 9, p. 566, 2001.
- [12] F. Quochi, D. C. Kilper, J. E. Cunningham, M. Dinu, and J. Shah, "Continuous-wave operation of a 1.3- $\mu\text{m}$  GaAsSb-GaAs quantum-well vertical-cavity surface-emitting laser at room temperature," *Photonics Technol. Lett. IEEE*, vol. 13, no. 9, pp. 921–923, 2001.
- [13] S. Francoeur, M.-J. Seong, A. Mascarenhas, S. Tixier, M. Adamczyk, and T. Tiedje, "Band gap of GaAs 1-x Bi x, 0<x<3.6%," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 82, no. 22, p. 3874, 2003.
- [14] M. Usman, C. A. Broderick, A. Lindsay, and E. P. O'Reilly, "Tight-binding analysis of the electronic structure of dilute bismide alloys of GaP and GaAs," *Phys. Rev. B*, vol. 84, no. 24, Dec. 2011.
- [15] N. N. Ledentsov, "Quantum dot laser," *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 26, no. 1, p. 014001, Jan. 2011.
- [16] I. Vurgaftman, J. R. Meyer, and L. R. Ram-Mohan, "Band parameters for III-V compound semiconductors and their alloys," *J. Appl. Phys.*, vol. 89, no. 11, p. 5815, 2001.
- [17] I. Vurgaftman and J. R. Meyer, "Band parameters for nitrogen-containing semiconductors," *J. Appl. Phys.*, vol. 94, no. 6, p. 3675, 2003.
- [18] S. J. Sweeney and S. R. Jin, "Bismide-nitride alloys: Promising for efficient light emitting devices in the near- and mid-infrared," *J. Appl. Phys.*, vol. 113, no. 4, p. 043110, 2013.
- [19] M. Kondow, K. Uomi, A. Niwa, T. Kitatani, S. Watahiki, and Y. Yazawa, "GaInNAs: A Novel Material for Long-Wavelength-Range Laser Diodes with Excellent High-Temperature Performance," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 35, no. Part 1, No. 2B, pp. 1273–1275, Feb. 1996.
- [20] J. N. Baillargeon, K. Y. Cheng, G. E. Hofler, P. J. Pearah, and K. C. Hsieh, "Luminescence quenching and the formation of the GaP1-xNx alloy in GaP with increasing nitrogen content," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 60, no. 20, p. 2540, 1992.
- [21] S. Miyoshi, H. Yaguchi, K. Onabe, R. Ito, and Y. Shiraki, "Metalorganic vapor phase epitaxy of GaP1-xNx alloys on GaP," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 63, no. 25, p. 3506, 1993.

- [22] O. Igarashi, "Heteroepitaxial Growth of GaN<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub> : x<0.09 on Sapphire Substrates," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 31, no. Part 1, No. 12A, pp. 3791–3793, Dec. 1992.
- [23] M. Kondow, K. Uomi, K. Hosomi, and T. Mozume, "Gas-Source Molecular Beam Epitaxy of GaN<sub>x</sub>As<sub>1-x</sub> Using a N Radical as the N Source," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 33, no. Part 2, No. 8A, pp. L1056–L1058, Aug. 1994.
- [24] W. Shan, W. Walukiewicz, J. W. Ager III, E. E. Haller, J. F. Geisz, D. J. Friedman, J. M. Olson, and S. R. Kurtz, "Band anticrossing in GaInNAs alloys," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 82, no. 6, p. 1221, 1999.
- [25] E. P. O'Reilly, A. Lindsay, S. Tomić, and M. Kamal-Saadi, "Tight-binding and k·p models for the electronic structure of Ga (In) NAs and related alloys," *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 17, no. 8, p. 870, 2002.
- [26] E. P. O'Reilly, A. Lindsay, and S. Fahy, "Theory of the electronic structure of dilute nitride alloys: beyond the band-anti-crossing model," *J. Phys. Condens. Matter*, vol. 16, no. 31, pp. S3257–S3276, Aug. 2004.
- [27] M. Hugues, B. Damilano, J.-Y. Duboz, and J. Massies, "Optimum indium composition for (Ga,In)(N,As)GaAs quantum wells emitting beyond 1.5 μm," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 88, no. 9, p. 091111, 2006.
- [28] G. Jaschke, R. Averbek, L. Geelhaar, and H. Riechert, "Low threshold InGaAsN/GaAs lasers beyond 1500nm," *J. Cryst. Growth*, vol. 278, no. 1–4, pp. 224–228, May 2005.
- [29] N. V. Kryzhanovskaya, A. Y. Egorov, V. V. Mamutin, N. K. Polyakov, A. F. Tsatsulnikov, Y. G. Musikhin, A. R. Kovsh, N. N. Ledentsov, V. M. Ustinov, and D. Bimberg, "Properties of InGaAsN heterostructures emitting at 1.3–1.55 μm," *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 20, no. 9, pp. 961–965, Sep. 2005.
- [30] I. Vurgaftman, J. R. Meyer, N. Tansu, and L. J. Mawst, "(In)GaAsN-based type-II 'W' quantum-well lasers for emission at λ=1.55 μm," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 83, no. 14, p. 2742, 2003.
- [31] L. J. Mawst, J. Y.-T. Huang, D. P. Xu, J.-Y. Yeh, G. Tsvid, T. F. Kuech, and N. Tansu, "MOCVD-Grown Dilute Nitride Type II Quantum Wells," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 14, no. 4, pp. 979–991, 2008.
- [32] J. A. Gupta, G. I. Sproule, X. Wu, and Z. R. Wasilewski, "Molecular beam epitaxy growth of GaInNAs(Sb) double quantum wells with bright and narrow photoluminescence," *J. Cryst. Growth*, vol. 291, no. 1, pp. 86–93, May 2006.
- [33] S. Bank, W. Ha, V. Gambin, M. Wistey, H. Yuen, L. Goddard, S. Kim, and J. S. Harris, "1.5μm GaInNAs(Sb) lasers grown on GaAs by MBE," *J. Cryst. Growth*, vol. 251, no. 1–4, pp. 367–371, Apr. 2003.
- [34] L. H. Li, V. Sallet, G. Patriarche, L. Largeau, S. Bouchoule, L. Travers, and J. C. Harmand, "Investigations on GaInNAsSb quinary alloy for 1.5 μm laser emission on GaAs," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 83, no. 7, p. 1298, 2003.
- [35] D. J. Friedman, A. G. Norman, J. F. Geisz, and S. R. Kurtz, "Comparison of hydrazine, dimethylhydrazine, and t-butylamine nitrogen sources for MOVPE growth of GaInNAs for solar cells," *J. Cryst. Growth*, vol. 208, no. 1, pp. 11–17, 2000.
- [36] M. Kondow, T. Kitatani, K. Nakahara, and T. Tanaka, "A 1.3-μm GaInNAs Laser Diode with a Lifetime of over 1000 Hours," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 38, no. 12A, p. L1355, 1999.
- [37] M. Kondow and F. Ishikawa, "High-Quality Growth of GaInNAs for Application to Near-Infrared Laser Diodes," *Adv. Opt. Technol.*, vol. 2012, pp. 1–11, 2012.
- [38] H. J. Unold, S. W. Z. Mahmoud, R. Jager, M. Kicherer, M. C. Riedl, and K. J. Ebeling, "Improving single-mode VCSEL performance by introducing a long monolithic cavity," *Photonics Technol. Lett. IEEE*, vol. 12, no. 8, pp. 939–941, 2000.
- [39] K.-S. Kim, J. Yoo, G. Kim, S. Lee, S. Cho, J. Kim, T. Kim, and Y. Park, "Enhancement of Pumping Efficiency in a Vertical-External-Cavity Surface-Emitting Laser," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 19, no. 23, pp. 1925–1927, Dec. 2007.
- [40] F. Demaria, S. Lorch, S. Menzel, M. C. Riedl, F. Rinaldi, R. Rosch, and P. Unger, "Design of Highly Efficient High-Power Optically Pumped Semiconductor Disk Lasers," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 15, no. 3, pp. 973–977, 2009.
- [41] M. A. Wistey, S. R. Bank, H. P. Bae, H. B. Yuen, E. R. Pickett, L. L. Goddard, and J. S. Harris, "GaInNAsSb/GaAs vertical cavity surface emitting lasers at 1534 nm," *Electron. Lett.*, vol. 42, no. 5, pp. 282–283, 2006.
- [42] T. Sarmiento, H. P. Bae, T. D. O'Sullivan, and J. S. Harris Jr, "GaAs-based 1.53 μm GaInNAsSb vertical cavity surface emitting lasers," *Electron. Lett.*, vol. 45, no. 19, pp. 978–979, 2009.
- [43] H. Riechert, A. Ramakrishnan, and G. Steinle, "Development of InGaAsN-based 1.3 μm VCSELs," *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 17, no. 8, p. 892, 2002.

- [44] J. Jewell, L. Graham, M. Crom, K. Maranowski, J. Smith, T. Fanning, and M. Schnoes, "Commercial GaInNAs VCSELs grown by MBE," *Phys. Status Solidi C*, vol. 5, no. 9, pp. 2951–2956, Jul. 2008.
- [45] A. Fiore, Y. A. Akulova, J. Ko, E. R. Hegblom, and L. A. Coldren, "Postgrowth tuning of semiconductor vertical cavities for multiple-wavelength laser arrays," *Quantum Electron. IEEE J. Of*, vol. 35, no. 4, pp. 616–623, 1999.
- [46] K. J. Knopp, D. Vakhshoori, P. D. Wang, M. Azimi, M. Jiang, P. Chen, Y. Matsui, K. McCallion, A. Baliga, F. Sakhitab, M. Letsch, B. Johnson, R. Huang, A. Jean, B. DeLargy, C. Pinzone, F. Fan, J. Liu, C. Lu, J. Zhou, H. Zhu, R. Gurjar, P. Tayebati, D. MacDaniel, R. Baorui, R. Waterson, and G. VanderRhodes, "High power MEMs-tunable vertical-cavity surface-emitting lasers," 2001, p. 2.
- [47] C. J. Chang-Hasnain, "Tunable CCSEL," *Sel. Top. Quantum Electron. IEEE J. Of*, vol. 6, no. 6, pp. 978–987, 2000.
- [48] K. Hsu, C. M. Miller, D. Babic, D. Houn, and A. Taylor, "Continuously tunable photopumped 1.3- $\mu\text{m}$  fiber Fabry-Perot surface-emitting lasers," *Photonics Technol. Lett. IEEE*, vol. 10, no. 9, pp. 1199–1201, 1998.
- [49] A. Bousseksou, M. El Kurdi, M. D. Salik, I. Sagnes, and S. Bouchoule, "Wavelength tunable InP-based EP-VECSEL operating at room temperature and in CW at 1.55 [micro sign]m," *Electron. Lett.*, vol. 40, no. 23, p. 1490, 2004.
- [50] V. G. Muradov and D. G. Sannikov, "Study of absorption spectra of gasolines and other hydrocarbon mixtures in the second overtone region of the CH<sub>3</sub>, CH<sub>2</sub>, CH groups," *J. Appl. Spectrosc.*, vol. 74, no. 2, pp. 174–179, 2007.
- [51] W. Drexler and J. Fujimoto, "State-of-the-art retinal optical coherence tomography," *Prog. Retin. Eye Res.*, vol. 27, no. 1, pp. 45–88, Jan. 2008.
- [52] A. G. Podoleanu and R. B. Rosen, "Combinations of techniques in imaging the retina with high resolution," *Prog. Retin. Eye Res.*, vol. 27, no. 4, pp. 464–499, Jul. 2008.
- [53] V. Jayaraman, G. D. Cole, M. Robertson, A. Uddin, and A. Cable, "High-sweep-rate 1310 nm MEMS-VCSEL with 150 nm continuous tuning range," *Electron. Lett.*, vol. 48, no. 14, pp. 867–869, 2012.
- [54] I. Grulkowski, J. J. Liu, B. Potsaid, V. Jayaraman, J. Jiang, J. G. Fujimoto, and A. E. Cable, "High-precision, high-accuracy ultralong-range swept-source optical coherence tomography using vertical cavity surface emitting laser light source," *Opt. Lett.*, vol. 38, no. 5, pp. 673–675, 2013.
- [55] I. Grulkowski, J. J. Liu, B. Potsaid, I. Gorczynska, V. J. Srinivasan, Y. Chen, J. Jiang, A. Cable, and J. Fujimoto, "Ultrahigh speed spectral/Fourier domain OCT ophthalmic imaging at 70,000 to 312,500 axial scans per second," *Opt. Express*, vol. 16, no. 19, pp. 15149–15169, 2008.
- [56] F. Koyama, S. Kubota, and K. Iga, "GaAlAs/GaAs active filter based on vertical cavity surface emitting laser," *Electron. Lett.*, vol. 27, no. 12, p. 1093, 1991.
- [57] P. Wen, M. Sanchez, M. Gross, and S. Esener, "Vertical-cavity optical AND gate," *Opt. Commun.*, vol. 219, no. 1–6, pp. 383–387, Apr. 2003.
- [58] E. S. Bjorlin, A. Dahl, J. Piprek, P. Abraham, Y. J. Chiu, and J. E. Bowers, "Vertical-cavity amplifying modulator at 1.3  $\mu\text{m}$ ," *Photonics Technol. Lett. IEEE*, vol. 13, no. 12, pp. 1271–1273, 2001.
- [59] R. Raj, J. A. Levenson, J. L. Oudar, and M. Bensoussan, "Vertical microcavity optical amplifying switch," *Electron. Lett.*, vol. 29, no. 2, p. 167, 1993.
- [60] E. S. Björilin, J. Geske, and J. E. Bowers, "Optically preamplified receiver at 10 Gbit/s using vertical-cavity SOA," *Electron. Lett.*, vol. 37, no. 24, p. 1474, 2001.
- [61] T. Inoue, M. Asada, N. Yasuoka, T. Kita, and O. Wada, "Vertical stacking of InAs quantum dots for polarization-insensitive semiconductor optical amplifiers," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 245, p. 012076, Sep. 2010.
- [62] S. Björilin, G. Cole, T. Kimura, and J. Bowers, "Vertical-cavity semiconductor optical amplifiers: recent progress and emerging applications," presented at the Optical Amplifiers and their Applications - OSA Topical Meeting and Exhibit, 2004, p. OMB1.
- [63] E. S. Bjorlin and J. E. Bowers, "Noise figure of vertical-cavity semiconductor optical amplifiers," *Quantum Electron. IEEE J. Of*, vol. 38, no. 1, pp. 61–66, 2002.
- [64] Q. Chen, G. D. Cole, E. S. Bjorlin, T. Kimura, S. Wu, C. S. Wang, N. C. MacDonald, and J. E. Bowers, "First Demonstration of a MEMS Tunable Vertical-Cavity SOA," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 16, no. 6, pp. 1438–1440, Jun. 2004.
- [65] X. Zhao, P. Palinginis, B. Pesala, C. Chang-Hasnain, and P. Hemmer, "Tunable ultraslow light in vertical-cavity surface-emitting laser amplifier," *Opt. Express*, vol. 13, no. 20, pp. 7899–7904, 2005.

- [66] Y.-N. Ma, B. Luo, L.-S. Yan, W. Pan, X. H. Zou, J. P. Zhao, N. Q. Li, and X. K. Liu, "Bandwidth improvement for slow light using amplification characteristics of cascaded vertical-cavity surface-emitting lasers," *Opt. Lett.*, vol. 38, no. 3, pp. 308–310, 2013.
- [67] M. Sánchez, "A Review of Vertical Cavity Semiconductor Optical Amplifiers and Applications," in *Applications of Lasers for Sensing and Free Space Communications*, 2010, p. LSTuA2.
- [68] M. Sanchez, P. Wen, M. Gross, and S. Esener, "Polarization anisotropy in vertical-cavity semiconductor optical amplifiers," *Opt. Lett.*, vol. 29, no. 16, p. 1888, 2004.
- [69] A. Hurtado, A. Gonzalez-Marcos, I. D. Henning, and M. J. Adams, "Optical bistability and nonlinear gain in 1.55  $\mu\text{m}$  VCSCOA," *Electron. Lett.*, vol. 42, no. 8, pp. 483–484, 2006.
- [70] A. Hurtado, I. D. Henning, and M. J. Adams, "Bistability and nonlinear gain in 1.55  $\mu\text{m}$  vertical cavity semiconductor optical amplifiers: Theory and experiments," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 91, no. 15, p. 151106, 2007.
- [71] A. M. Kaplan, G. P. Agrawal, and D. N. Maywar, "All-optical flip-flop operation of VCSCOA," *Electron. Lett.*, vol. 45, no. 2, pp. 127–129, 2009.
- [72] V. Gauss, A. Hurtado, D. Jorgesen, M. J. Adams, and S. Esener, "Static and dynamic analysis of an all-optical inverter based on a Vertical Cavity Semiconductor Optical Amplifier (VCSCOA)," *Opt. Commun.*, vol. 284, no. 9, pp. 2345–2350, May 2011.
- [73] F. A. I. Chaqmaqchee and N. Balkan, "Gain studies of 1.3- $\mu\text{m}$  dilute nitride HELLISH-VCSCOA for optical communications," *Nanoscale Res. Lett.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–4, 2012.
- [74] G. E. Giudice, S. C. Guy, S. G. Crigler, L. A. Zenteno, and B. S. Hallock, "Effect of pump laser noise on an erbium-doped fiber-amplified signal," *Photonics Technol. Lett. IEEE*, vol. 14, no. 10, pp. 1403–1405, 2002.
- [75] T. Kimura, N. Tsukiji, A. Iketani, N. Kimura, H. Murata, and Y. Ikegami, "High temperature operation quarter watt 1480 nm pump LD module," in *Optical Amplifiers and their Applications*, 1999, p. ThD12.
- [76] S. V. Chernikov, N. S. Platonov, D. V. Gapontsev, D. IlChang, M. J. Guy, and J. R. Taylor, "Raman fibre laser operating at 1.24  $\mu\text{m}$ ," *Electron. Lett.*, vol. 34, no. 7, pp. 680–681, 1998.
- [77] E. M. Dianov and A. M. Prokhorov, "Medium-power CW Raman fiber lasers," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 6, no. 6, pp. 1022–1028, 2000.
- [78] W. Diehl, P. Brick, B. Kunert, S. Reinhard, K. Volz, and W. Stolz, "Low threshold 1260 nm (GaIn) (NAs) semiconductor disk laser," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 91, no. 7, p. 071103, 2007.
- [79] A. Chamorovskiy, J. Rautiainen, A. Rantamäki, and O. G. Okhotnikov, "Low-noise Raman fiber amplifier pumped by semiconductor disk laser," *Opt. Express*, vol. 19, no. 7, pp. 6414–6419, 2011.
- [80] A. Chamorovskiy, J. Rautiainen, A. Rantamaki, and O. G. Okhotnikov, "Raman Fiber Oscillators and Amplifiers Pumped by Semiconductor Disk Lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 47, no. 9, pp. 1201–1207, Sep. 2011.
- [81] D. Bisping, D. Pucicki, M. Fischer, J. Koeth, C. Zimmermann, P. Weinmann, S. Hofling, M. Kamp, and A. Forchel, "GaInNAs-based high-power and tapered laser diodes for pumping applications," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 15, no. 3, pp. 968–972, 2009.
- [82] J. Rautiainen, A. Härkönen, P. Tuomisto, J. Konttinen, L. Orsila, M. Guina, and O. G. Okhotnikov, "1 W at 617 nm generation by intracavity frequency conversion in semiconductor disk laser," *Electron. Lett.*, vol. 43, no. 18, pp. 980–981, 2007.
- [83] J. Rautiainen, V.-M. Korpijärvi, P. Tuomisto, M. Guina, and O. G. Okhotnikov, "2.7 W tunable orange-red GaInNAs semiconductor disk laser," *Opt. Express*, vol. 15, no. 26, pp. 18345–18350, 2007.
- [84] C. E. Max, "Image Improvement from a Sodium-Layer Laser Guide Star Adaptive Optics System," *Science*, vol. 277, no. 5332, pp. 1649–1652, Sep. 1997.
- [85] B. Ellerbroek and F. Rigaut, "Astronomy: Optics adapt to the whole sky," *Nature*, vol. 403, no. 6765, pp. 25–26, 2000.
- [86] N. S. Sadick and R. Weiss, "The Utilization of a New Yellow Light Laser (578 nm) for the Treatment of Class I Red Telangiectasia of the Lower Extremities," *Dermatol. Surg.*, vol. 28, no. 1, pp. 21–25, Jan. 2002.
- [87] Y. Bandoh, A. Yanai, and K. Tsuzuki, "Dye laser treatment of port-wine stains," *Aesthetic Plast. Surg.*, vol. 14, no. 1, pp. 287–291, Dec. 1990.
- [88] J. G. Cunha-Vaz and J. F. Abreu, "The tunable dye laser in the management of retinal vascular disease," *Int. Ophthalmol.*, vol. 12, no. 3, pp. 193–196, 1988.
- [89] V. Kapoor, V. Karpov, C. Linton, F. V. Subach, V. V. Verkhusha, and W. G. Telford, "Solid state yellow and orange lasers for flow cytometry," *Cytometry A*, vol. 73A, no. 6, pp. 570–577, Jun. 2008.
- [90] E. Simbuerger, T. Pflanz, and A. Masters, "Confocal microscopy: new lasers enhance live cell imaging," *Phys. Best*, pp. 10–13, 2008.

- [91] F.-Q. Jia, Q. Zheng, Q. Xue, and Y. Bu, "LD-pumped Nd:YAG/LBO 556nm yellow laser," *Opt. Laser Technol.*, vol. 38, no. 8, pp. 569–572, Nov. 2006.
- [92] Y. Yao, Q. Zheng, D. P. Qu, K. Zhou, Y. Liu, and L. Zhao, "All-solid-state continuous-wave frequency-doubled Nd:YAG/LBO laser with 1.2 W output power at 561 nm," *Laser Phys. Lett.*, p. NA–NA, Oct. 2009.
- [93] I. T. Mckinnie and A. L. Oien, "Tunable red-yellow laser based on second harmonic generation of Cr: forsterite in KTP," *Opt. Commun.*, vol. 141, no. 3, pp. 157–161, 1997.
- [94] C. A. Denman, P. D. Hillman, G. T. Moore, J. M. Telle, J. D. Drummond, and A. L. Tuffli, "20 W CW 589 nm sodium beacon excitation source for adaptive optical telescope applications," *Opt. Mater.*, vol. 26, no. 4, pp. 507–513, Sep. 2004.
- [95] Y. Feng, L. R. Taylor, and D. B. Calia, "25 W Raman-fiber-amplifier-based 589 nm laser for laser guide star," *Opt. Express*, vol. 17, no. 21, pp. 19021–19026, 2009.
- [96] H. Ohta, S. P. DenBaars, and S. Nakamura, "Future of group-III nitride semiconductor green laser diodes [Invited]," *JOSA B*, vol. 27, no. 11, pp. B45–B49, 2010.
- [97] L. Fan, C. Hassenius, M. Fallahi, J. Hader, H. Li, J. V. Moloney, W. Stolz, S. W. Koch, J. T. Murray, and R. Bedford, "Highly strained InGaAs/GaAs multiwatt vertical-external-cavity surface-emitting laser emitting around 1170 nm," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 91, no. 13, p. 131114, 2007.
- [98] V.-M. Korpijärvi, M. Guina, J. Puustinen, P. Tuomisto, J. Rautiainen, A. Härkönen, A. Tukiainen, O. Okhotnikov, and M. Pessa, "MBE grown GaInNAs-based multi-Watt disk lasers," *J. Cryst. Growth*, vol. 311, no. 7, pp. 1868–1871, Mar. 2009.
- [99] M. Guina, T. Leinonen, A. Härkönen, and M. Pessa, "High-power disk lasers based on dilute nitride heterostructures," *New J. Phys.*, vol. 11, no. 12, p. 125019, Dec. 2009.
- [100] V.-M. Korpijärvi, T. Leinonen, J. Puustinen, A. Härkönen, and M. D. Guina, "11 W single gain-chip dilute nitride disk laser emitting around 1180 nm," *Opt. Express*, vol. 18, no. 25, pp. 25633–25641, 2010.
- [101] M. Guina, A. Härkönen, V.-M. Korpijärvi, T. Leinonen, and S. Suomalainen, "Semiconductor Disk Lasers: Recent Advances in Generation of Yellow-Orange and Mid-IR Radiation," *Adv. Opt. Technol.*, vol. 2012, pp. 1–19, 2012.
- [102] E. Kantola, T. Leinonen, S. Ranta, M. Tavast, and M. Guina, "High-efficiency 20 W yellow VECSEL," *Opt. Express*, vol. 22, no. 6, p. 6372, Mar. 2014.
- [103] A. J. Lee, H. M. Pask, P. Dekker, and J. A. Piper, "High efficiency, multi-Watt CW yellow emission from an intracavity-doubled self-Raman laser using Nd: GdVO<sub>4</sub>," *Opt. Express*, vol. 16, no. 26, pp. 21958–21963, 2008.
- [104] E. M. Dianov, A. V. Shubin, M. A. Melkumov, O. I. Medvedkov, and I. A. Bufetov, "High-power cw bismuth-fiber lasers," *JOSA B*, vol. 24, no. 8, pp. 1749–1755, 2007.
- [105] A. Shirakawa, H. Maruyama, K. Ueda, C. B. Olausson, J. Broeng, and others, "High-power Yb-doped photonic bandgap fiber amplifier at 1150-1200 nm," *Opt. Express*, vol. 17, no. 2, pp. 447–454, 2009.
- [106] Y. Fujimoto, O. Ishii, and M. Yamazaki, "Yellow laser oscillation in Dy<sup>3+</sup>-doped waterproof fluoro-aluminate glass fibre pumped by 398.8 nm GaN laser diodes," *Electron. Lett.*, vol. 46, no. 8, pp. 586–587, 2010.
- [107] A. Taniguchi, T. Kuwayama, A. Shirakawa, M. Musha, K. Ueda, and M. Prabhu, "1212 nm pumping of 2 μm Tm–Ho-codoped silica fiber laser," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 81, no. 20, p. 3723, 2002.
- [108] S. D. Jackson, F. Bugge, and G. Erbert, "High-power and highly efficient Tm<sup>3+</sup>-doped silica fiber lasers pumped with diode lasers operating at 1150 nm," *Opt. Lett.*, vol. 32, no. 19, pp. 2873–2875, 2007.
- [109] T. D. Germann, A. Strittmatter, J. Pohl, U. W. Pohl, D. Bimberg, J. Rautiainen, M. Guina, and O. G. Okhotnikov, "Temperature-stable operation of a quantum dot semiconductor disk laser," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 93, no. 5, p. 051104, 2008.
- [110] A. R. Albrecht, T. J. Rotter, C. P. Hains, A. Stintz, J. V. Moloney, K. J. Malloy, and G. Balakrishnan, "Multi-watt 1.25 μm quantum dot VECSEL," *Electron. Lett.*, vol. 46, no. 12, pp. 856–857, 2010.
- [111] A. R. Albrecht, C. P. Hains, T. J. Rotter, A. Stintz, K. J. Malloy, G. Balakrishnan, and J. V. Moloney, "High power 1.25 μm InAs quantum dot vertical external-cavity surface-emitting laser," *J. Vac. Sci. Technol. B Microelectron. Nanometer Struct.*, vol. 29, no. 3, p. 03C113, 2011.
- [112] A. R. Albrecht, A. Stintz, F. T. Jaekel, T. J. Rotter, P. Ahirwar, V. J. Patel, C. P. Hains, L. F. Lester, K. J. Malloy, and G. Balakrishnan, "1220 and 1280-nm Optically Pumped InAs Quantum Dot-Based Vertical External-Cavity Surface-Emitting Laser," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 17, no. 6, pp. 1787–1793, Nov. 2011.

- [113] M. Butkus, J. Rautiainen, O. G. Okhotnikov, C. J. Hamilton, G. G. Malcolm, S. S. Mikhrin, I. L. Krestnikov, D. D. Livshits, and E. U. Rafailov, "Quantum Dot Based Semiconductor Disk Lasers for 1-1.3 $\mu\text{m}$ ," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 17, no. 6, pp. 1763–1771, Nov. 2011.
- [114] D. B. Jackrel, S. R. Bank, H. B. Yuen, M. A. Wistey, J. S. Harris, A. J. Ptak, S. W. Johnston, D. J. Friedman, and S. R. Kurtz, "Dilute nitride GaInNAs and GaInNAsSb solar cells by molecular beam epitaxy," *J. Appl. Phys.*, vol. 101, no. 11, p. 114916, 2007.
- [115] V. Sabnis, H. Yuen, and M. Wiemer, "High-efficiency multijunction solar cells employing dilute nitrides," 2012, pp. 14–19.
- [116] D. J. Friedman, "Progress and challenges for next-generation high-efficiency multijunction solar cells," *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.*, vol. 14, no. 6, pp. 131–138, Dec. 2010.
- [117] R. R. King, D. Bhusari, D. Larrabee, X.-Q. Liu, E. Rehder, K. Edmondson, H. Cotal, R. K. Jones, J. H. Ermer, C. M. Fetzer, D. C. Law, and N. H. Karam, "Solar cell generations over 40% efficiency: Solar cell generations over 40% efficiency," *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, vol. 20, no. 6, pp. 801–815, Sep. 2012.
- [118] S. Almosni, C. Robert, T. Nguyen Thanh, C. Cornet, A. Létoublon, T. Quinci, C. Levallois, M. Perrin, J. Kuyyalil, L. Pedesseau, A. Balocchi, P. Barate, J. Even, J. M. Jancu, N. Bertru, X. Marie, O. Durand, and A. Le Corre, "Evaluation of InGaPN and GaAsPN materials lattice-matched to Si for multi-junction solar cells," *J. Appl. Phys.*, vol. 113, no. 12, p. 123509, 2013.
- [119] A. J. Ptak, R. France, C.-S. Jiang, and R. C. Reedy, "Effects of bismuth on wide-depletion-width GaInNAs solar cells," *J. Vac. Sci. Technol. B Microelectron. Nanometer Struct.*, vol. 26, no. 3, p. 1053, 2008.
- [120] J. P. R. David and C. H. Tan, "Material Considerations for Avalanche Photodiodes," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 14, no. 4, pp. 998–1009, 2008.
- [121] S. L. Tan, W. M. Soong, J. E. Green, M. J. Steer, S. Zhang, L. J. J. Tan, J. S. Ng, I. P. Marko, S. J. Sweeney, A. R. Adams, J. Allam, and J. P. R. David, "Experimental evaluation of impact ionization in dilute nitride GaInNAs diodes," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 103, no. 10, p. 102101, 2013.
- [122] G. E. Stillman, M. D. Sirkis, J. A. Rossi, M. R. Johnson, and N. Holonyak Jr, "Volume excitation of an ultrathin single-mode CdSe laser," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 9, no. 7, p. 268, 1966.
- [123] C. Roxlo, R. Putnam, and M. Salour, "Optically pumped semiconductor platelet lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 18, no. 3, pp. 338–342, Mar. 1982.
- [124] H. Q. Le, S. Di Cecca, and A. Mooradian, "Scalable high-power optically pumped GaAs laser," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 58, no. 18, pp. 1967–1969, 1991.
- [125] W. B. Jiang, S. R. Friberg, H. Iwamura, and Y. Yamamoto, "High powers and subpicosecond pulses from an external-cavity surface-emitting InGaAs/InP multiple quantum well laser," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 58, no. 8, pp. 807–809, 1991.
- [126] M. A. Hadley, G. C. Wilson, K. Y. Lau, and J. S. Smith, "High single-transverse-mode output from external-cavity surface-emitting laser diodes," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 63, no. 12, pp. 1607–1609, 1993.
- [127] J. V. Sandusky and S. R. J. Brueck, "A CW external-cavity surface-emitting laser," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 8, no. 3, pp. 313–315, Mar. 1996.
- [128] M. Kuznetsov, F. Hakimi, R. Sprague, and A. Mooradian, "Design and characteristics of high-power (> 0.5-W CW) diode-pumped vertical-external-cavity surface-emitting semiconductor lasers with circular TEM<sub>00</sub> beams," *Sel. Top. Quantum Electron. IEEE J. Of*, vol. 5, no. 3, pp. 561–573, 1999.
- [129] A. Giesen, H. Hügel, A. Voss, K. Wittig, U. Brauch, and H. Opower, "Scalable concept for diode-pumped high-power solid-state lasers," *Appl. Phys. B*, vol. 58, no. 5, pp. 365–372, 1994.
- [130] A. Giesen and J. Speiser, "Fifteen Years of Work on Thin-Disk Lasers: Results and Scaling Laws," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 13, no. 3, pp. 598–609, 2007.
- [131] M. A. Holm, D. Burns, P. Cusumano, A. I. Ferguson, and M. D. Dawson, "High-power diode-pumped AlGaAs surface-emitting laser," *Appl. Opt.*, vol. 38, no. 27, pp. 5781–5784, 1999.
- [132] M. A. Holm, D. Burns, A. I. Ferguson, and M. D. Dawson, "Actively stabilized single-frequency vertical-external-cavity AlGaAs laser," *Photonics Technol. Lett. IEEE*, vol. 11, no. 12, pp. 1551–1553, 1999.
- [133] M. A. Holm, D. Burns, A. I. Ferguson, and M. D. Dawson, "Single-frequency second-harmonic generation in a vertical external-cavity semiconductor laser," 2000, pp. 440–441.
- [134] M. A. Holm, P. Cusumano, D. Burns, A. I. Ferguson, and M. D. Dawson, "Mode-locked operation of a diode-pumped, external-cavity GaAs/AlGaAs surface emitting laser," in *Conference on Lasers and Electro-Optics*, Baltimore, Maryland United States, 1999, p. CTuK63.

- [135] T. D. Raymond, W. J. Alford, M. H. Crawford, and A. A. Allerman, "Intracavity frequency doubling of a diode-pumped external-cavity surface-emitting semiconductor laser," *Opt. Lett.*, vol. 24, no. 16, pp. 1127–1129, 1999.
- [136] G. W. Yang, R. J. Hwu, Z. T. Xu, and X. Y. Ma, "High-performance 980-nm quantum-well lasers using a hybrid material system of an Al-free InGaAs-InGaAsP active region and AlGaAs cladding layers grown by metal-organic chemical vapor deposition," *Quantum Electron. IEEE J. Of*, vol. 35, no. 10, pp. 1535–1541, 1999.
- [137] A. D. Greentree, B. A. Fairchild, F. M. Hossain, and S. Prawer, "Diamond integrated quantum photonics," *Mater. Today*, vol. 11, no. 9, pp. 22–31, 2008.
- [138] J. Limpert, F. Roser, S. Klingebiel, T. Schreiber, C. Wirth, T. Peschel, R. Eberhardt, and A. Tiinnermann, "The Rising Power of Fiber Lasers and Amplifiers," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 13, no. 3, pp. 537–545, 2007.
- [139] D. C. Brown, R. Nelson, and L. Billings, "Efficient cw end-pumped, end-cooled Nd: YVO<sub>4</sub> diode-pumped laser," *Appl. Opt.*, vol. 36, no. 33, pp. 8611–8613, 1997.
- [140] M. Tsunekane, N. Taguchi, T. Kasamatsu, and H. Inaba, "Analytical and experimental studies on the characteristics of composite solid-state laser rods in diode-end-pumped geometry," *Sel. Top. Quantum Electron. IEEE J. Of*, vol. 3, no. 1, pp. 9–18, 1997.
- [141] D. Kracht, R. Wilhelm, M. Frede, K. Dupré, and L. Ackermann, "407 W end-pumped multi-segmented Nd: YAG laser," *Opt. Express*, vol. 13, no. 25, pp. 10140–10144, 2005.
- [142] R. Wilhelm, M. Frede, and D. Kracht, "Power Scaling of End-Pumped Solid-State Rod Lasers by Longitudinal Dopant Concentration Gradients," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 44, no. 3, pp. 232–244, 2008.
- [143] R. Wilhelm, D. Freiburg, M. Frede, and D. Kracht, "End-pumped Nd: YAG laser with a longitudinal hyperbolic dopant concentration profile," *Opt. Express*, vol. 16, no. 24, pp. 20106–20116, 2008.
- [144] A. Ikesue and Y. L. Aung, "Synthesis and Performance of Advanced Ceramic Lasers," *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 89, no. 6, pp. 1936–1944, Jun. 2006.
- [145] W. J. Alford, T. D. Raymond, and A. A. Allerman, "High power and good beam quality at 980 nm from a vertical external-cavity surface-emitting laser," *JOSA B*, vol. 19, no. 4, pp. 663–666, 2002.
- [146] Z. L. Liao, "Semiconductor wafer bonding via liquid capillarity," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 77, no. 5, p. 651, 2000.
- [147] W. Schmid, "Optically pumped, vertically emitting semiconductor laser," WO 2003030316 A3, 26-Sep-2002.
- [148] J. E. Hastie, "High Power Surface Emitting Semiconductor Lasers," University of Strathclyde, Glasgow, 2004.
- [149] H. Lindberg, M. Strassner, J. Bengtsson, and A. Larsson, "High-Power Optically Pumped 1550-nm VECSEL With a Bonded Silicon Heat Spreader," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 16, no. 5, pp. 1233–1235, May 2004.
- [150] H. Lindberg, M. Strassner, E. Gerster, J. Bengtsson, and A. Larsson, "Thermal management of optically pumped long-wavelength InP-based semiconductor disk lasers," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 11, no. 5, pp. 1126–1134, Sep. 2005.
- [151] S. Haupt, M. Furitsch, H. H. Lindberg, I. Pietzonka, U. Strauss, and G. Bacher, "Analysis of the Pump Wavelength Dependence of a 1060-nm VECSEL," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 24, no. 5, pp. 341–343, Mar. 2012.
- [152] M. Schmid, S. Benchabane, F. Torabi-Goudarzi, R. Abram, A. I. Ferguson, and E. Riis, "Optical in-well pumping of a vertical-external-cavity surface-emitting laser," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 84, no. 24, p. 4860, 2004.
- [153] N. Schulz, M. Rattunde, C. Ritzenthaler, B. Rösener, C. Manz, K. Köhler, J. Wagner, and U. Brauch, "Resonant optical in-well pumping of an (AlGaIn)(AsSb)-based vertical-external-cavity surface-emitting laser emitting at 2.35  $\mu\text{m}$ ," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 91, no. 9, p. 091113, 2007.
- [154] N. Schulz, B. Rösener, R. Moser, M. Rattunde, C. Manz, K. Köhler, and J. Wagner, "An improved active region concept for highly efficient GaSb-based optically in-well pumped vertical-external-cavity surface-emitting lasers," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 93, no. 18, p. 181113, 2008.
- [155] K. G. Wilcox, H. J. Khashi, A. H. Quarterman, O. J. Morris, V. Apostolopoulos, M. Henini, and A. C. Tropper, "Wetting-Layer-Pumped Continuous-Wave Surface-Emitting Quantum-Dot Laser," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 24, no. 1, pp. 37–39, Jan. 2012.
- [156] A. Chernikov, J. Herrmann, M. Scheller, M. Koch, B. Kunert, W. Stolz, S. Chatterjee, S. W. Koch, T. L. Wang, Y. Kaneda, J. M. Yarborough, J. Hader, and J. V. Moloney, "Influence of the

- spatial pump distribution on the performance of high power vertical-external-cavity surface-emitting lasers,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 97, no. 19, p. 191110, 2010.
- [157] L. Fan, M. Fallahi, J. Hader, A. R. Zakharian, J. V. Moloney, J. T. Murray, R. Bedford, W. Stolz, and S. W. Koch, “Multichip vertical-external-cavity surface-emitting lasers: a coherent power scaling scheme,” *Opt. Lett.*, vol. 31, no. 24, pp. 3612–3614, 2006.
- [158] E. J. Saarinen, S. Suomalainen, O. G. Okhotnikov, and others, “Power scalable semiconductor disk laser using multiple gain cavity,” *Opt. Express*, vol. 14, no. 26, pp. 12868–12871, 2006.
- [159] L. E. Hunziker, Q.-Z. Shu, D. Bauer, C. Ihli, G. J. Mahnke, M. Rebut, J. R. Chilla, A. L. Caprara, H. Zhou, E. S. Weiss, and M. K. Reed, “Power-scaling of optically pumped semiconductor lasers,” presented at the Photonics West 2007, 2007, p. 64510A–64510A–6.
- [160] D. J. Stothard, J. M. Hopkins, D. Burns, and M. H. Dunn, “Stable, continuous-wave, intracavity, optical parametric oscillator pumped by a semiconductor disk laser (VECSEL).,” *Opt. Express*, vol. 17, no. 13, pp. 10648–10658, 2009.
- [161] A. Caprara, “2 W cw OPO in mid-IR pumped by OPSL laser intra-cavity radiation,” 2011, p. 79190A–79190A–13.
- [162] O. G. Okhotnikov, “NATAL STREP - Periodic Activity Report - Deliverable 1.6.” 23-Sep-2008.
- [163] J. Walker, “Optical absorption and luminescence in diamond,” *Rep. Prog. Phys.*, vol. 42, no. 10, p. 1605, 1979.
- [164] R. S. Balmer, J. R. Brandon, S. L. Clewes, H. K. Dhillon, J. M. Dodson, I. Friel, P. N. Inglis, T. D. Madgwick, M. L. Markham, T. P. Mollart, N. Perkins, G. A. Scarsbrook, D. J. Twitchen, A. J. Whitehead, J. J. Wilman, and S. M. Woollard, “Chemical vapour deposition synthetic diamond: materials, technology and applications,” *J. Phys. Condens. Matter*, vol. 21, no. 36, p. 364221, Sep. 2009.
- [165] T. Sharda, M. M. Rahaman, Y. Nukaya, T. Soga, T. Jimbo, and M. Umeno, “Structural and optical properties of diamond and nano-diamond films grown by microwave plasma chemical vapor deposition,” *Diam. Relat. Mater.*, vol. 10, no. 3–7, pp. 561–567, Mar. 2001.
- [166] P. Millar, R. B. Birch, A. J. Kemp, and D. Burns, “Synthetic Diamond for Intracavity Thermal Management in Compact Solid-State Lasers,” *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 44, no. 8, pp. 709–717, Aug. 2008.
- [167] H. Pinto and R. Jones, “Theory of the birefringence due to dislocations in single crystal CVD diamond,” *J. Phys. Condens. Matter*, vol. 21, no. 36, p. 364220, Sep. 2009.
- [168] A. R. Lang, “Causes of Birefringence in Diamond,” *Nature*, vol. 213, no. 5073, pp. 248–251, Jan. 1967.
- [169] I. Friel, S. L. Clewes, H. K. Dhillon, N. Perkins, D. J. Twitchen, and G. A. Scarsbrook, “Control of surface and bulk crystalline quality in single crystal diamond grown by chemical vapour deposition,” *Diam. Relat. Mater.*, vol. 18, no. 5–8, pp. 808–815, May 2009.
- [170] H. Lindberg, M. Strassner, and A. Larsson, “Improved spectral properties of an optically pumped semiconductor disk laser using a thin diamond heat spreader as an intracavity filter,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 17, no. 7, pp. 1363–1365, Jul. 2005.
- [171] H. Lindberg, A. Larsson, and M. Strassner, “Single-frequency operation of a high-power, long-wavelength semiconductor disk laser,” *Opt. Lett.*, vol. 30, no. 17, pp. 2260–2262, 2005.
- [172] J. J. Zayhowski, “Microchip lasers,” *Opt. Mater.*, vol. 11, no. 2–3, pp. 255–267, Jan. 1999.
- [173] S. A. Smith, “High power infrared vertical external cavity surface emitting lasers,” University of Strathclyde, Glasgow (UK), 2008.
- [174] J. . Hansen, R. . Copperthwaite, T. . Derry, and J. . Pratt, “A tensiometric study of diamond (111) and (110) faces,” *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 130, no. 2, pp. 347–358, Jul. 1989.
- [175] M. Tarutani, Y. Takai, and R. Shimizu, “Application of the Focused-Ion-Beam Technique for Preparing the Cross-Sectional Sample of Chemical Vapor Deposition Diamond Thin Film for High-Resolution Transmission Electron Microscope Observation,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 31, no. Part 2, No. 9A, pp. L1305–L1308, Sep. 1992.
- [176] Y. Fu and K. A. B. Ngoi, “Focused ion beam direct fabrication of micro-optical elements: features compared with laser beam and electron beam direct writing,” 2004.
- [177] J. P. Hadden, J. P. Harrison, A. C. Stanley-Clarke, L. Marseglia, Y.-L. D. Ho, B. R. Patton, J. L. O’Brien, and J. G. Rarity, “Strongly enhanced photon collection from diamond defect centers under microfabricated integrated solid immersion lenses,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 97, no. 24, p. 241901, 2010.
- [178] S. Gloor, V. Romano, W. Lüthy, H. P. Weber, V. V. Kononenko, S. M. Pimenov, V. I. Konov, and A. V. Khomich, “Antireflection structures written by excimer laser on CVD diamond,” *Appl. Phys. A*, vol. 70, no. 5, pp. 547–550, 2000.

- [179] A. W. Schell, J. Kaschke, J. Fischer, R. Henze, J. Wolters, M. Wegener, and O. Benson, "Three-dimensional quantum photonic elements based on single nitrogen vacancy-centres in laser-written microstructures," *Sci. Rep.*, vol. 3, Apr. 2013.
- [180] M. P. Hiscocks, K. Ganesan, B. C. Gibson, S. T. Huntington, F. Ladouceur, and S. Praver, "Diamond waveguides fabricated by reactive ion etching," *Opt. Express*, vol. 16, no. 24, pp. 19512–19519, 2008.
- [181] H. W. Choi, C. Liu, E. Gu, G. McConnell, J. M. Girkin, I. M. Watson, and M. D. Dawson, "GaN micro-light-emitting diode arrays with monolithically integrated sapphire microlenses," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 84, no. 13, p. 2253, 2004.
- [182] C.-L. Lee, "Micro-scale Processing of Diamond Structures and Devices," University of Strathclyde, 2008.
- [183] G. S. Sandhu and W. K. Chu, "Reactive ion etching of diamond," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 55, no. 5, p. 437, 1989.
- [184] H. Shiomi, "Reactive Ion Etching of Diamond in O<sub>2</sub> and CF<sub>4</sub> Plasma, and Fabrication of Porous Diamond for Field Emitter Cathodes," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 36, no. Part 1, No. 12B, pp. 7745–7748, Dec. 1997.
- [185] Y. Ando, Y. Nishibayashi, K. Kobashi, T. Hirao, and K. Oura, "Smooth and high-rate reactive ion etching of diamond," *Diam. Relat. Mater.*, vol. 11, no. 3–6, pp. 824–827, Mar. 2002.
- [186] R. Otterbach and U. Hilleringmann, "Reactive ion etching of CVD-diamond for piezoresistive pressure sensors," *Diam. Relat. Mater.*, vol. 11, no. 3, pp. 841–844, 2002.
- [187] D. S. Hwang, T. Saito, and N. Fujimori, "New etching process for device fabrication using diamond," *Diam. Relat. Mater.*, vol. 13, no. 11–12, pp. 2207–2210, Nov. 2004.
- [188] H. W. Choi, E. Gu, C. Liu, C. Griffin, J. M. Girkin, I. M. Watson, and M. D. Dawson, "Fabrication of natural diamond microlenses by plasma etching," *J. Vac. Sci. Technol. B*, vol. 23, no. 1, pp. 130–132, 2005.
- [189] M. Karlsson and F. Nikolajeff, "Diamond micro-optics: microlenses and antireflection structured surfaces for the infrared spectral region," *Opt. Express*, vol. 11, no. 5, pp. 502–507, 2003.
- [190] Z. D. Popovic, R. A. Sprague, and G. A. Connell, "Technique for monolithic fabrication of microlens arrays," *Appl. Opt.*, vol. 27, no. 7, pp. 1281–1284, 1988.
- [191] E. Gu, H. W. Choi, C. Liu, C. Griffin, J. M. Girkin, I. M. Watson, M. D. Dawson, G. McConnell, and A. M. Gurney, "Reflection/transmission confocal microscopy characterization of single-crystal diamond microlens arrays," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 84, no. 15, p. 2754, 2004.
- [192] C. L. Lee, H. W. Choi, E. Gu, M. D. Dawson, and H. Murphy, "Fabrication and characterization of diamond micro-optics," *Diam. Relat. Mater.*, vol. 15, no. 4–8, pp. 725–728, Apr. 2006.
- [193] C. L. Lee, E. Gu, and M. D. Dawson, "Micro-cylindrical and micro-ring lenses in CVD diamond," *Diam. Relat. Mater.*, vol. 16, no. 4–7, pp. 944–948, Apr. 2007.
- [194] C. L. Lee, M. D. Dawson, and E. Gu, "Diamond double-sided micro-lenses and reflection gratings," *Opt. Mater.*, vol. 32, no. 9, pp. 1123–1129, Jul. 2010.
- [195] G. Scarsbrook, D. J. Twitchen, C. Wort, M. Schwitters, and E. Kohn, "Diamond Transistor And Method Of Manufacture Thereof," WO 2006117621 A1, 09-Nov-2006.
- [196] C. L. Lee, E. Gu, M. D. Dawson, I. Friel, and G. A. Scarsbrook, "Etching and micro-optics fabrication in diamond using chlorine-based inductively-coupled plasma," *Diam. Relat. Mater.*, vol. 17, no. 7–10, pp. 1292–1296, Jul. 2008.
- [197] K. S. Kim, Y. H. Lee, B. Y. Jung, and C. K. Hwangbo, "Single mode operation of a curved-mirror vertical-emitting laser with an active distributed Bragg reflector," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 41, no. 7B, p. L827, 2002.
- [198] A. M. Sarangan and G. M. Peake, "Enhancement of Lateral Mode Discrimination in Broad-Area VCSELs Using Curved Bragg Mirrors," *J. Light. Technol.*, vol. 22, no. 2, pp. 543–549, Feb. 2004.
- [199] R. Aldaz, M. Wiemer, D. Miller, and J. Harris Jr, "Monolithically-integrated long vertical cavity surface emitting laser incorporating a concave micromirror on a glass substrate," *Opt. Express*, vol. 12, no. 17, pp. 3967–3971, 2004.
- [200] G. A. Keeler, D. K. Serkland, K. M. Geib, G. M. Peake, and A. Mar, "Single transverse mode operation of electrically pumped vertical-external-cavity surface-emitting lasers with micromirrors," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 17, no. 3, pp. 522–524, Mar. 2005.
- [201] M. Severi, "Etching selectivity control during resist pattern transfer into silica for the fabrication of microlenses with reduced spherical aberration," *Opt. Eng.*, vol. 38, no. 1, p. 146, Jan. 1999.
- [202] J. T. Sheridan, J. Schwider, N. Striebl, S. Haselbeck, M. Eisner, M. Heissmeier, and O. Falkenstoerfer, "Modelling and measurement of melted microlens shapes," *Opt.-Int. J. Light Electron Opt.*, vol. 97, no. 4, pp. 174–180, 1994.

- [203] H. Martinsson, J. A. Vukusic, M. Grabberr, R. Michalzik, R. Jager, K. J. Ebeling, and A. Larsson, "Transverse mode selection in large-area oxide-confined vertical-cavity surface-emitting lasers using a shallow surface relief," *Photonics Technol. Lett. IEEE*, vol. 11, no. 12, pp. 1536–1538, 1999.
- [204] A. Haglund, J. S. Gustavsson, J. Vukusic, P. Modh, and A. Larsson, "Single Fundamental-Mode Output Power Exceeding 6 mW From VCSELs With a Shallow Surface Relief," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 16, no. 2, pp. 368–370, Feb. 2004.
- [205] T. Y. Fan, "Laser beam combining for high-power, high-radiance sources," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 11, no. 3, pp. 567–577, May 2005.
- [206] A. V. Shchegrov, J. P. Watson, D. Lee, A. Umbrasas, S. Hallstein, G. P. Carey, W. R. Hitchens, K. Scholz, B. D. Cantos, G. Niven, M. Jansen, J.-M. Pelaprat, and A. Mooradian, "Development of compact blue-green lasers for projection display based on Novalux extended-cavity surface-emitting laser technology," 2005, pp. 113–119.
- [207] G. Niven and A. Mooradian, "Trends in laser light sources for projection display," in *13th International Display Workshop (IDW 2006)*, Otsu, Japan, 2006.
- [208] J.-F. Seurin, C. L. Ghosh, V. Khalfin, A. Miglo, G. Xu, J. D. Wynn, P. Pradhan, and L. A. D'Asaro, "High-power high-efficiency 2D VCSEL arrays," 2008, pp. 690808–690808–14.
- [209] O. M. Efimov, L. B. Glebov, L. N. Glebova, K. C. Richardson, and V. I. Smirnov, "High-efficiency Bragg gratings in photothermorefractive glass," *Appl. Opt.*, vol. 38, no. 4, pp. 619–627, 1999.
- [210] Z. S. Liu, S. Tibuleac, D. Shin, P. P. Young, and R. Magnusson, "High-efficiency guided-mode resonance filter," *Opt. Lett.*, vol. 23, no. 19, pp. 1556–1558, 1998.
- [211] N. Destouches, A. Tishchenko, J. Pommier, S. Reynaud, O. Parriaux, S. Tonchev, and M. Ahmed, "99% efficiency measured in the-1st order of a resonant grating," *Opt. Express*, vol. 13, no. 9, pp. 3230–3235, 2005.
- [212] G. P. Nordin, R. V. Johnson, and A. R. Tanguay, Jr., "Diffraction properties of stratified volume holographic optical elements," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 9, no. 12, p. 2206, Dec. 1992.
- [213] S. S. Wang, R. Magnusson, J. S. Bagby, and M. G. Moharam, "Guided-mode resonances in planar dielectric-layer diffraction gratings," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 7, no. 8, p. 1470, Aug. 1990.
- [214] I. A. Avrutsky and V. A. Sychugov, "Reflection of a Beam of Finite Size from a Corrugated Waveguide," *J. Mod. Opt.*, vol. 36, no. 11, pp. 1527–1539, Nov. 1989.
- [215] J. E. Hellstrom, B. Jacobsson, V. Pasiskevicius, and F. Laurell, "Finite Beams in Reflective Volume Bragg Gratings: Theory and Experiments," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 44, no. 1, pp. 81–89, Jan. 2008.
- [216] L. B. Glebov, "Volume Bragg Gratings in PTR Glass—New Optical Elements for Laser Design," in *Advanced Solid-State Photonics*, 2008, p. MD1.
- [217] M. A. Ahmed, M. Rumpel, A. Voss, and T. Graf, "Applications of sub-wavelength grating mirrors in high-power lasers," *Adv. Opt. Technol.*, vol. 1, no. 5, Jan. 2012.
- [218] W. Zhou, D. Zhao, Y.-C. Shuai, H. Yang, S. Chuwongin, A. Chadha, J.-H. Seo, K. X. Wang, V. Liu, Z. Ma, and S. Fan, "Progress in 2D photonic crystal Fano resonance photonics," *Prog. Quantum Electron.*, vol. 38, no. 1, pp. 1–74, Jan. 2014.
- [219] J. K. Bresseur, K. S. Repasky, and J. L. Carlsten, "Continuous-wave Raman laser in H<sub>2</sub>," *Opt. Lett.*, vol. 23, no. 5, pp. 367–369, 1998.
- [220] L. S. Meng, K. S. Repasky, P. A. Roos, and J. L. Carlsten, "Widely tunable continuous-wave Raman laser in diatomic hydrogen pumped by an external-cavity diode laser," *Opt. Lett.*, vol. 25, no. 7, pp. 472–474, 2000.
- [221] E. O. Ammann and J. Falk, "Stimulated Raman scattering at kHz pulse repetition rates," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 27, no. 12, p. 662, 1975.
- [222] A. S. Grabtchikov, V. A. Lisinetskii, V. A. Orlovich, M. Schmitt, R. Maksimenka, and W. Kiefer, "Multimode pumped continuous-wave solid-state Raman laser," *Opt. Lett.*, vol. 29, no. 21, pp. 2524–2526, 2004.
- [223] T. T. Basiev, A. A. Sobol, P. G. Zverev, V. V. Osiko, and R. C. Powell, "Comparative spontaneous Raman spectroscopy of crystals for Raman lasers," *Appl. Opt.*, vol. 38, no. 3, pp. 594–598, 1999.
- [224] A. A. Demidovich, A. S. Grabtchikov, V. A. Lisinetskii, V. N. Burakevich, V. A. Orlovich, and W. Kiefer, "Continuous-wave Raman generation in a diode-pumped Nd<sup>3+</sup>: KGd (WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> laser," *Opt. Lett.*, vol. 30, no. 13, pp. 1701–1703, 2005.
- [225] A. A. Kaminskii, V. G. Ralchenko, and V. I. Konov, "CVD-diamond – a novel  $\chi(3)$ -nonlinear active crystalline material for SRS generation in very wide spectral range," *Laser Phys. Lett.*, vol. 3, no. 4, pp. 171–177, Apr. 2006.

- [226] R. P. Mildren, J. E. Butler, and J. R. Rabeau, "CVD-diamond external cavity Raman laser at 573 nm," *Opt. Express*, vol. 16, no. 23, pp. 18950–18955, 2008.
- [227] R. P. Mildren and A. Sabella, "Highly efficient diamond Raman laser," *Opt. Lett.*, vol. 34, no. 18, pp. 2811–2813, 2009.
- [228] W. Lubeigt, G. M. Bonner, J. E. Hastie, M. D. Dawson, D. Burns, and A. J. Kemp, "An intracavity Raman laser using synthetic single-crystal diamond," *Opt. Express*, vol. 18, no. 16, pp. 16765–16770, 2010.
- [229] W. Lubeigt, G. M. Bonner, J. E. Hastie, M. D. Dawson, D. Burns, and A. J. Kemp, "Continuous-wave diamond Raman laser," *Opt. Lett.*, vol. 35, no. 17, p. 2994, Sep. 2010.
- [230] W. Lubeigt, V. G. Savitski, G. M. Bonner, S. L. Geoghegan, I. Friel, J. E. Hastie, M. D. Dawson, D. Burns, and A. J. Kemp, "1.6 W continuous-wave Raman laser using low-loss synthetic diamond," *Opt. Express*, vol. 19, no. 7, pp. 6938–6944, 2011.
- [231] D. C. Parrotta, A. J. Kemp, M. D. Dawson, and J. E. Hastie, "Tunable continuous-wave diamond Raman laser," *Opt. Express*, vol. 19, no. 24, pp. 24165–24170, 2011.
- [232] A. Sabella, J. A. Piper, and R. P. Mildren, "1240 nm diamond Raman laser operating near the quantum limit," *Opt. Lett.*, vol. 35, no. 23, pp. 3874–3876, 2010.
- [233] A. Sabella, J. A. Piper, and R. P. Mildren, "Efficient conversion of a 1.064  $\mu\text{m}$  Nd: YAG laser to the eye-safe region using a diamond Raman laser," *Opt. Express*, vol. 19, no. 23, pp. 23554–23560, 2011.
- [234] J.-P. M. Feve, K. E. Shortoff, M. J. Bohn, and J. K. Brasseur, "High average power diamond Raman laser," *Opt. Express*, vol. 19, no. 2, pp. 913–922, 2011.
- [235] M. Jelínek, O. Kitzler, H. Jelínková, J. Šulc, and M. Němec, "CVD-diamond external cavity nanosecond Raman laser operating at 1.63  $\mu\text{m}$  pumped by 1.34  $\mu\text{m}$  Nd:YAP laser," *Laser Phys. Lett.*, vol. 9, no. 1, pp. 35–38, Jan. 2012.
- [236] V. G. Savitski, I. Friel, J. E. Hastie, M. D. Dawson, D. Burns, and A. J. Kemp, "Characterization of Single-Crystal Synthetic Diamond for Multi-Watt Continuous-Wave Raman Lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 48, no. 3, pp. 328–337, Mar. 2012.
- [237] V. G. Savitski, I. Friel, J. E. Hastie, M. D. Dawson, D. Burns, and A. J. Kemp, "Corrections to Characterization of Single-Crystal Synthetic Diamond for Multi-Watt Continuous-Wave Raman Lasers [Mar 12 328-337]," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 48, no. 11, pp. 1494–1494, Nov. 2012.
- [238] D. C. Parrotta, A. J. Kemp, M. D. Dawson, and J. E. Hastie, "Multiwatt, Continuous-Wave, Tunable Diamond Raman Laser With Intracavity Frequency-Doubling to the Visible Region," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 19, no. 4, pp. 1400108–1400108, Jul. 2013.
- [239] R. J. Williams, O. Kitzler, A. McKay, and R. P. Mildren, "Investigating diamond Raman lasers at the 100 W level using quasi-continuous-wave pumping," *Opt. Lett.*, vol. 39, no. 14, p. 4152, Jul. 2014.
- [240] O. Lux, V. G. Ralchenko, A. P. Bolshakov, V. I. Konov, G. V. Sharonov, A. Shirakawa, H. Yoneda, H. Rhee, H. J. Eichler, R. P. Mildren, and A. A. Kaminskii, "Multi-octave frequency comb generation by  $\chi^{(3)}$ -nonlinear optical processes in CVD diamond at low temperatures," *Laser Phys. Lett.*, vol. 11, no. 8, p. 086101, Aug. 2014.
- [241] A. M. Warriar, J. Lin, H. M. Pask, R. P. Mildren, D. W. Coutts, and D. J. Spence, "Highly efficient picosecond diamond Raman laser at 1240 and 1485 nm," *Opt. Express*, vol. 22, no. 3, p. 3325, Feb. 2014.
- [242] M. Murtagh, J. Lin, R. P. Mildren, and D. J. Spence, "Ti:sapphire-pumped diamond Raman laser with sub-100-fs pulse duration," *Opt. Lett.*, vol. 39, no. 10, p. 2975, May 2014.
- [243] V. G. Savitski, S. Reilly, and A. J. Kemp, "Steady-State Raman Gain in Diamond as a Function of Pump Wavelength," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 49, no. 2, pp. 218–223, Feb. 2013.
- [244] J. L. O'Brien, A. Furusawa, and J. Vučković, "Photonic quantum technologies," *Nat. Photonics*, vol. 3, no. 12, pp. 687–695, Dec. 2009.
- [245] P. Olivero, S. Rubanov, P. Reichart, B. C. Gibson, S. T. Huntington, J. Rabeau, A. D. Greentree, J. Salzman, D. Moore, and D. N. Jamieson, "Ion-Beam-Assisted Lift-Off Technique for Three-Dimensional Micromachining of Freestanding Single-Crystal Diamond," *Adv. Mater.*, vol. 17, no. 20, pp. 2427–2430, 2005.
- [246] N. R. Parikh, J. D. Hunn, E. McGucken, M. L. Swanson, C. W. White, R. A. Rudder, D. P. Malta, J. B. Posthill, and R. J. Markunas, "Single-crystal diamond plate liftoff achieved by ion implantation and subsequent annealing," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 61, no. 26, p. 3124, 1992.
- [247] P. Olivero, S. Calusi, L. Giuntini, S. Lagomarsino, A. Lo Giudice, M. Massi, S. Sciortino, M. Vannoni, and E. Vittone, "Controlled variation of the refractive index in ion-damaged diamond," *Diam. Relat. Mater.*, vol. 19, no. 5–6, pp. 428–431, May 2010.

- [248] S. Lagomarsino, P. Olivero, F. Bosia, M. Vannoni, S. Calusi, L. Giuntini, and M. Massi, "Evidence of Light Guiding in Ion-Implanted Diamond," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 105, no. 23, Dec. 2010.
- [249] S. Lagomarsino, P. Olivero, S. Calusi, D. G. Monticone, L. Giuntini, M. Massi, S. Sciortino, A. Sychkova, A. Sordini, and M. Vannoni, "Complex refractive index variation in proton-damaged diamond," *Opt. Express*, vol. 20, no. 17, p. 19382, Aug. 2012.
- [250] I. Bayn, B. Meyler, A. Lahav, J. Salzman, R. Kalish, B. A. Fairchild, S. Praver, M. Barth, O. Benson, T. Wolf, P. Siyushev, F. Jelezko, and J. Wrachtrup, "Processing of photonic crystal nanocavity for quantum information in diamond," *Diam. Relat. Mater.*, vol. 20, no. 7, pp. 937–943, Jul. 2011.
- [251] C. F. Wang, R. Hanson, D. D. Awschalom, E. L. Hu, T. Feygelson, J. Yang, and J. E. Butler, "Fabrication and characterization of two-dimensional photonic crystal microcavities in nanocrystalline diamond," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 91, no. 20, p. 201112, 2007.
- [252] C. F. Wang, Y.-S. Choi, J. C. Lee, E. L. Hu, J. Yang, and J. E. Butler, "Observation of whispering gallery modes in nanocrystalline diamond microdisks," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 90, no. 8, p. 081110, 2007.
- [253] J. Riedrich-Möller, L. Kipfstuhl, C. Hepp, E. Neu, C. Pauly, F. Mücklich, A. Baur, M. Wandt, S. Wolff, M. Fischer, S. Gsell, M. Schreck, and C. Becher, "One- and two-dimensional photonic crystal microcavities in single crystal diamond," *Nat. Nanotechnol.*, vol. 7, no. 1, pp. 69–74, Nov. 2011.
- [254] X. Checoury, D. Néel, P. Boucaud, C. Gesset, H. Girard, S. Saada, and P. Bergonzo, "Nanocrystalline diamond photonics platform with high quality factor photonic crystal cavities," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 101, no. 17, p. 171115, 2012.
- [255] Y. Zhang, "Diamond and GaN waveguides and microstructures for integrated quantum photonics," University of Strathclyde, 2012.
- [256] P. Rath, N. Gruhler, S. Khasminskaya, C. Nebel, C. Wild, and W. H. P. Pernice, "Waferscale nanophotonic circuits made from diamond-on-insulator substrates," *Opt. Express*, vol. 21, no. 9, p. 11031, May 2013.
- [257] A. Faraon, P. E. Barclay, C. Santori, K.-M. C. Fu, and R. G. Beausoleil, "Resonant enhancement of the zero-phonon emission from a colour centre in a diamond cavity," *Nat. Photonics*, vol. 5, no. 5, pp. 301–305, May 2011.
- [258] A. Faraon, C. Santori, Z. Huang, K.-M. C. Fu, V. M. Acosta, D. Fattal, and R. G. Beausoleil, "Quantum photonic devices in single-crystal diamond," *New J. Phys.*, vol. 15, no. 2, p. 025010, Feb. 2013.
- [259] B. J. M. Hausmann, B. Shields, Q. Quan, P. Maletinsky, M. McCutcheon, J. T. Choy, T. M. Babinec, A. Kubanek, A. Yacoby, M. D. Lukin, and M. Lončar, "Integrated Diamond Networks for Quantum Nanophotonics," *Nano Lett.*, vol. 12, no. 3, pp. 1578–1582, Mar. 2012.
- [260] B. J. M. Hausmann, I. B. Bulu, P. B. Deotare, M. McCutcheon, V. Venkataraman, M. L. Markham, D. J. Twitchen, and M. Lončar, "Integrated High-Quality Factor Optical Resonators in Diamond," *Nano Lett.*, vol. 13, no. 5, pp. 1898–1902, May 2013.
- [261] B. J. M. Hausmann, I. Bulu, V. Venkataraman, P. Deotare, and M. Lončar, "Diamond nonlinear photonics," *Nat. Photonics*, vol. 8, no. 5, pp. 369–374, Apr. 2014.
- [262] N. Vermeulen, J. E. Sipe, L. G. Helt, and H. Thienpont, "Opportunities for wavelength conversion with on-chip diamond ring resonators," *Laser Photonics Rev.*, vol. 6, no. 6, pp. 793–801, Nov. 2012.
- [263] R. L. Fork, O. E. Martinez, and J. P. Gordon, "Negative dispersion using pairs of prisms," *Opt. Lett.*, vol. 9, no. 5, pp. 150–152, 1984.
- [264] R. Szipocs and A. Koházi-Kis, "Theory and design of chirped dielectric laser mirrors," *Appl. Phys. B Lasers Opt.*, vol. 65, no. 2, pp. 115–135, 1997.
- [265] F. Gires and P. Tournois, "Interféromètre utilisable pour la compression d'impulsions lumineuses modulées en fréquence," *Comptes Rendus Académie Sci. Paris*, vol. 258, no. 5, pp. 6112–6115, 1964.
- [266] D. E. Spence, P. N. Kean, and W. Sibbett, "60-fsec pulse generation from a self-mode-locked Ti: sapphire laser," *Opt. Lett.*, vol. 16, no. 1, pp. 42–44, 1991.
- [267] Y.-M. Liu, K. W. Sun, P. R. Prucnal, and S. A. Lyon, "Simple method to start and maintain self-mode-locking of a Ti: sapphire laser," *Opt. Lett.*, vol. 17, no. 17, pp. 1219–1221, 1992.
- [268] U. Keller, G. W. Thooft, W. H. Knox, J. E. Cunningham, and others, "Femtosecond pulses from a continuously self-starting passively mode-locked Ti: sapphire laser," *Opt. Lett.*, vol. 16, no. 13, pp. 1022–1024, 1991.
- [269] G. Cerullo, S. De Silvestri, and V. Magni, "Self-starting Kerr-lens mode locking of a Ti: sapphire laser," *Opt. Lett.*, vol. 19, no. 14, pp. 1040–1042, 1994.

- [270] U. Keller, K. J. Weingarten, F. X. Kartner, D. Kopf, B. Braun, I. D. Jung, R. Fluck, C. Honninger, N. Matuschek, and J. Aus der Au, "Semiconductor saturable absorber mirrors (SESAM's) for femtosecond to nanosecond pulse generation in solid-state lasers," *Sel. Top. Quantum Electron. IEEE J. Of*, vol. 2, no. 3, pp. 435–453, 1996.
- [271] S. Tsuda, W. H. Knox, E. A. De Souza, W. Y. Jan, and J. E. Cunningham, "Low-loss intracavity AIAs/AlGaAs saturable Bragg reflector for femtosecond mode locking in solid-state lasers," *Opt. Lett.*, vol. 20, no. 12, pp. 1406–1408, 1995.
- [272] S. Tsuda, W. H. Knox, S. T. Cundiff, W. Y. Jan, and J. E. Cunningham, "Mode-locking ultrafast solid-state lasers with saturable Bragg reflectors," *Sel. Top. Quantum Electron. IEEE J. Of*, vol. 2, no. 3, pp. 454–464, 1996.
- [273] J. Hall, "Nobel Lecture: Defining and measuring optical frequencies," *Rev. Mod. Phys.*, vol. 78, no. 4, pp. 1279–1295, Nov. 2006.
- [274] T. Hänsch, "Nobel Lecture: Passion for precision," *Rev. Mod. Phys.*, vol. 78, no. 4, pp. 1297–1309, Nov. 2006.
- [275] K. Sugioka and Y. Cheng, "Ultrafast lasers—reliable tools for advanced materials processing," *Light Sci. Appl.*, vol. 3, no. 4, p. e149, Apr. 2014.
- [276] S. Maruo and J. T. Fourkas, "Recent progress in multiphoton microfabrication," *Laser Photonics Rev.*, vol. 2, no. 1–2, pp. 100–111, Apr. 2008.
- [277] R. Osellame, H. J. W. M. Hoekstra, G. Cerullo, and M. Pollnau, "Femtosecond laser microstructuring: an enabling tool for optofluidic lab-on-chips," *Laser Photonics Rev.*, vol. 5, no. 3, pp. 442–463, May 2011.
- [278] E. E. Hoover and J. A. Squier, "Advances in multiphoton microscopy technology," *Nat. Photonics*, vol. 7, no. 2, pp. 93–101, Jan. 2013.
- [279] P. J. Campagnola and C.-Y. Dong, "Second harmonic generation microscopy: principles and applications to disease diagnosis," *Laser Photonics Rev.*, vol. 5, no. 1, pp. 13–26, Jan. 2011.
- [280] R. R. Frontiera and R. A. Mathies, "Femtosecond stimulated Raman spectroscopy," *Laser Photonics Rev.*, vol. 5, no. 1, pp. 102–113, Jan. 2011.
- [281] A. L. Cavalieri, N. Müller, T. Uphues, V. S. Yakovlev, A. Baltuška, B. Horvath, B. Schmidt, L. Blümel, R. Holzwarth, S. Hendel, M. Drescher, U. Kleineberg, P. M. Echenique, R. Kienberger, F. Krausz, and U. Heinzmann, "Attosecond spectroscopy in condensed matter," *Nature*, vol. 449, no. 7165, pp. 1029–1032, Oct. 2007.
- [282] H. J. Wörner and P. B. Corkum, "Attosecond Spectroscopy," in *Handbook of High-resolution Spectroscopy*, M. Quack and F. Merkt, Eds. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2011.
- [283] W. R. Zipfel, R. M. Williams, and W. W. Webb, "Nonlinear magic: multiphoton microscopy in the biosciences," *Nat. Biotechnol.*, vol. 21, no. 11, pp. 1369–1377, Nov. 2003.
- [284] I. D. Jung, F. X. Kärtner, N. Matuschek, D. H. Sutter, F. Morier-Genoud, Z. Shi, V. Scheuer, M. Tilsch, T. Tschudi, and U. Keller, "Semiconductor saturable absorber mirrors supporting sub-10-fs pulses," *Appl. Phys. B Lasers Opt.*, vol. 65, no. 2, pp. 137–150, 1997.
- [285] D. H. Sutter, G. Steinmeyer, L. Gallmann, N. Matuschek, F. Morier-Genoud, U. Keller, V. Scheuer, G. Angelow, and T. Tschudi, "Semiconductor saturable-absorber mirror assisted Kerr-lens mode-locked Ti: sapphire laser producing pulses in the two-cycle regime," *Opt. Lett.*, vol. 24, no. 9, pp. 631–633, 1999.
- [286] R. Ell, U. Morgner, F. X. Kärtner, J. G. Fujimoto, E. P. Ippen, V. Scheuer, G. Angelow, T. Tschudi, M. J. Lederer, A. Boiko, and others, "Generation of 5-fs pulses and octave-spanning spectra directly from a Ti: sapphire laser," *Opt. Lett.*, vol. 26, no. 6, pp. 373–375, 2001.
- [287] S. A. Diddams, "The evolving optical frequency comb [Invited]," *JOSA B*, vol. 27, no. 11, pp. B51–B62, 2010.
- [288] U. Keller, "Ultrafast solid-state laser oscillators: a success story for the last 20 years with no end in sight," *Appl. Phys. B*, vol. 100, no. 1, pp. 15–28, Jul. 2010.
- [289] C. R. Baer, O. H. Heckl, C. J. Saraceno, C. Schriber, C. Kränkel, T. Südmeyer, and U. Keller, "Frontiers in passively mode-locked high-power thin disk laser oscillators," *Opt. Express*, vol. 20, no. 7, pp. 7054–7065, 2012.
- [290] E. I. Moses, J. J. Turner, and C. L. Tang, "Mode locking of laser oscillators by injection-locking," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 28, no. 5, p. 258, 1976.
- [291] J. Squier, D. Harter, F. Salin, and G. Mourou, "100-fs pulse generation and amplification in Ti: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>," *Opt. Lett.*, vol. 16, no. 5, pp. 324–326, 1991.
- [292] D. Strickland and G. Mourou, "Compression of amplified chirped optical pulses," *Opt. Commun.*, vol. 55, no. 6, pp. 447–449, 1985.

- [293] C. Horvath, A. Braun, H. Liu, T. Juhasz, and G. Mourou, "Compact directly diode-pumped femtosecond Nd: glass chirped-pulse-amplification laser system," *Opt. Lett.*, vol. 22, no. 23, pp. 1790–1792, 1997.
- [294] J. Limpert, F. Roser, T. Schreiber, and A. Tunnermann, "High-power ultrafast fiber laser systems," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 12, no. 2, pp. 233–244, Mar. 2006.
- [295] P. Russbuedt, T. Mans, J. Weitenberg, H. D. Hoffmann, and R. Poprawe, "Compact diode-pumped 1.1 kW Yb: YAG Innoslab femtosecond amplifier," *Opt. Lett.*, vol. 35, no. 24, pp. 4169–4171, 2010.
- [296] A. Dubietis, G. Jonušauskas, and A. Piskarskas, "Powerful femtosecond pulse generation by chirped and stretched pulse parametric amplification in BBO crystal," *Opt. Commun.*, vol. 88, no. 4, pp. 437–440, 1992.
- [297] I. . Ross, P. Matousek, M. Towrie, A. . Langley, and J. . Collier, "The prospects for ultrashort pulse duration and ultrahigh intensity using optical parametric chirped pulse amplifiers," *Opt. Commun.*, vol. 144, no. 1–3, pp. 125–133, Dec. 1997.
- [298] S. Witte and K. S. E. Eikema, "Ultrafast Optical Parametric Chirped-Pulse Amplification," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 18, no. 1, pp. 296–307, Jan. 2012.
- [299] A. Vaupel, N. Bodnar, B. Webb, L. Shah, and M. Richardson, "Concepts, performance review, and prospects of table-top, few-cycle optical parametric chirped-pulse amplification," *Opt. Eng.*, vol. 53, no. 5, pp. 051507–051507, 2014.
- [300] P. . Guerreiro, S. Ten, E. Slobodchikov, Y. . Kim, J. . Woo, and N. Peyghambarian, "Self-starting mode-locked Cr:forsterite laser with semiconductor saturable Bragg reflector," *Opt. Commun.*, vol. 136, no. 1–2, pp. 27–30, Mar. 1997.
- [301] Z. Zhang, K. Torizuka, T. Itatani, K. Kobayashi, T. Sugaya, and T. Nakagawa, "Self-starting mode-locked femtosecond forsterite laser with a semiconductor saturable-absorber mirror," *Opt. Lett.*, vol. 22, no. 13, pp. 1006–1008, 1997.
- [302] V. Petrov, V. Shcheslavskiy, T. Mirtchev, F. Noack, T. Itatani, T. Sugaya, and T. Nakagawa, "High-power self-starting femtosecond Cr:forsterite laser," *Electron. Lett.*, vol. 34, no. 6, p. 559, 1998.
- [303] R. Fluck, G. Zhang, U. Keller, K. J. Weingarten, and M. Moser, "Diode-pumped passively mode-locked 1.3- $\mu\text{m}$  Nd:YVO<sub>4</sub> and Nd:YLF lasers by use of semiconductor saturable absorbers," *Opt. Lett.*, vol. 21, no. 17, p. 1378, Sep. 1996.
- [304] V. Shcheslavskiy, V. V. Yakovlev, and A. Ivanov, "High-energy self-starting femtosecond Cr<sup>4+</sup>:Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> oscillator operating at a low repetition rate," *Opt. Lett.*, vol. 26, no. 24, p. 1999, Dec. 2001.
- [305] B. C. Collings, J. B. Stark, S. Tsuda, K. Bergman, W. H. Knox, J. E. Cunningham, W. Y. Jan, and R. Pathak, "Saturable Bragg reflector self-starting passive mode locking of a Cr<sup>4+</sup>: YAG laser pumped with a diode-pumped Nd: YVO<sub>4</sub> laser," *Opt. Lett.*, vol. 21, no. 15, pp. 1171–1173, 1996.
- [306] S. Spälter, M. Böhm, M. Burk, B. Mikulla, R. Fluck, I. D. Jung, G. Zhang, U. Keller, A. Sizmann, and G. Leuchs, "Self-starting soliton-modelocked femtosecond Cr<sup>4+</sup>: YAG laser using an antiresonant Fabry–Pérot saturable absorber," *Appl. Phys. B Lasers Opt.*, vol. 65, no. 3, pp. 335–338, 1997.
- [307] M. . Hayduk, S. . Johns, M. . Krol, C. . Pollock, and R. . Leavitt, "Self-starting passively mode-locked tunable femtosecond Cr<sup>4+</sup>:YAG laser using a saturable absorber mirror," *Opt. Commun.*, vol. 137, no. 1–3, pp. 55–58, Apr. 1997.
- [308] Y. Chang, R. Maciejko, R. Leonelli, and A. S. Thorpe, "Self-starting passively mode-locked tunable Cr<sup>4+</sup>: yttrium–aluminum–garnet laser with a single prism for dispersion compensation," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 73, no. 15, pp. 2098–2100, 1998.
- [309] M. Zirngibl, L. W. Stulz, J. Stone, J. Hugi, D. DiGiovanni, and P. B. Hansan, "1.2 ps pulses from passively mode-locked laser diode pumped Er-doped fibre ring laser," *Electron. Lett.*, vol. 27, no. 19, pp. 1734–1735, 1991.
- [310] Z. Zhang, T. Nakagawa, K. Torizuka, T. Sugaya, and K. Kobayashi, "Self-starting mode-locked Cr<sup>4+</sup>: YAG laser with a low-loss broadband semiconductor saturable-absorber mirror," *Opt. Lett.*, vol. 24, no. 23, pp. 1768–1770, 1999.
- [311] E. A. de Souza, C. . Soccolich, W. Pleibel, R. H. Stolen, M. N. Islam, J. R. Simpson, and D. J. DiGiovanni, "Saturable absorber modelocked polarisation maintaining erbium-doped fibre laser," *Electron. Lett.*, vol. 29, no. 5, p. 447, 1993.
- [312] W. H. Loh, D. Atkinson, P. R. Morkel, M. Hopkinson, A. Rivers, A. J. Seeds, and D. N. Payne, "Passively mode-locked Er<sup>3+</sup> fiber laser using a semiconductor nonlinear mirror," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 5, no. 1, pp. 35–37, 1993.

- [313] V. Liverini, S. Schön, R. Grange, M. Haiml, S. C. Zeller, and U. Keller, "Low-loss GaInNAs saturable absorber mode locking a 1.3- $\mu\text{m}$  solid-state laser," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 84, no. 20, p. 4002, 2004.
- [314] R. Grange, A. Rutz, V. Liverini, M. Haiml, S. Schon, and U. Keller, "Saturation fluence and modulation depth of GaInNAs SESAMs around the band edge for optimal mode locking," 2005, pp. 301–301.
- [315] A. Rutz, V. Liverini, R. Grange, M. Haiml, S. Schön, and U. Keller, "Parameter tunable GaInNAs saturable absorbers for mode locking of solid-state lasers," *J. Cryst. Growth*, vol. 301–302, pp. 570–574, Apr. 2007.
- [316] G. J. Spuhler, L. Krainer, V. Liverini, R. Grange, M. Haiml, S. Pawlik, B. Schmidt, S. Schon, and U. Keller, "Passively mode-locked 1.3- $\mu\text{m}$  multi-GHz Nd:YVO<sub>4</sub> lasers with low timing jitter," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 17, no. 6, pp. 1319–1321, Jun. 2005.
- [317] A. Rutz, V. Liverini, D. Maas, B. Rudin, A.-R. Bellancourt, S. Schön, and U. Keller, "Passively modelocked GaInNAs VECSEL at centre wavelength around 1.3  $\mu\text{m}$ ," *Electron. Lett.*, vol. 42, no. 16, pp. 926–927, 2006.
- [318] A. Seas, V. Petričević, and R. R. Alfano, "Self-mode-locked chromium-doped forsterite laser generates 50-fs pulses," *Opt. Lett.*, vol. 18, no. 11, pp. 891–893, 1993.
- [319] Y. Pang, B. I. Minkov, V. Yanovsky, and F. Wise, "Self-mode-locked Cr: forsterite laser," *Opt. Lett.*, vol. 18, no. 14, pp. 1168–1170, 1993.
- [320] V. Yanovsky, B. I. Minkov, Y. Pang, and F. Wise, "Generation of 25-fs pulses from a self-mode-locked Cr: forsterite laser with optimized group-delay dispersion," *Opt. Lett.*, vol. 18, no. 18, pp. 1541–1543, 1993.
- [321] Y. P. Tong, P. M. W. French, and J. R. Taylor, "All-solid-state Kerr lens mode-locked Cr<sup>4+</sup>: forsterite laser," *Electron. Lett.*, vol. 32, no. 8, pp. 737–737, 1996.
- [322] L. J. Qian, X. Liu, and F. W. Wise, "Femtosecond Kerr-lens mode locking with negative nonlinear phase shifts," *Opt. Lett.*, vol. 24, no. 3, pp. 166–168, 1999.
- [323] T. Miura, K. Kobayashi, Z. Zhang, K. Torizuka, and F. Kannari, "Stable mode-locking operation in a Cr: forsterite laser with a five-mirror cavity," *Opt. Lett.*, vol. 24, no. 8, pp. 554–556, 1999.
- [324] C. Chudoba, J. G. Fujimoto, E. P. Ippen, H. A. Haus, U. Morgner, F. X. Kärtner, V. Scheuer, G. Angelow, and T. Tschudi, "All-solid-state Cr: forsterite laser generating 14-fs pulses at 1.3  $\mu\text{m}$ ," *Opt. Lett.*, vol. 26, no. 5, pp. 292–294, 2001.
- [325] A. Agnesi, A. Guandalini, A. Lucca, G. Reali, A. Tomaselli, and C. Vacchi, "Low misalignment sensitivity Kerr-lens mode-locked femtosecond Cr/sup 4+/:Forsterite laser for nonlinear microscopy," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 40, no. 11, pp. 1569–1574, Nov. 2004.
- [326] T.-M. Liu, F. X. Kärtner, J. G. Fujimoto, and C.-K. Sun, "Multiplying the repetition rate of passive mode-locked femtosecond lasers by an intracavity flat surface with low reflectivity," *Opt. Lett.*, vol. 30, no. 4, pp. 439–441, 2005.
- [327] A. Sennaroglu, F. X. Kaertner, and J. G. Fujimoto, "Low-threshold, room-temperature femtosecond Cr<sup>4+</sup>: forsterite laser," *Opt. Express*, vol. 15, no. 20, pp. 13043–13048, 2007.
- [328] H. Çankaya, J. G. Fujimoto, and A. Sennaroglu, "Low-threshold, 12-MHz, multipass-cavity femtosecond Cr<sup>4+</sup>: Forsterite laser," *Laser Phys.*, vol. 19, no. 2, pp. 281–284, Feb. 2009.
- [329] X. Liu, L. Qian, F. Wise, Z. Zhang, T. Itatani, T. Sugaya, T. Nakagawa, and K. Torizuka, "Diode-pumped Cr: forsterite laser mode locked by a semiconductor saturable absorber," *Appl. Opt.*, vol. 37, no. 30, pp. 7080–7084, 1998.
- [330] A. McWilliam, A. A. Lagatsky, C. T. A. Brown, W. Sibbett, A. E. Zhukov, V. M. Ustinov, A. P. Vasil'Ev, and E. U. Rafailov, "Quantum-dot-based saturable absorber for femtosecond mode-locked operation of a solid-state laser," *Opt. Lett.*, vol. 31, no. 10, pp. 1444–1446, 2006.
- [331] S. A. Zolotovskaya, K. G. Wilcox, A. Abdolvand, D. A. Livshits, and E. U. Rafailov, "Electronically Controlled Pulse Duration Passively Mode-Locked Cr<sup>4+</sup>:Forsterite Laser," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 21, no. 16, pp. 1124–1126, Aug. 2009.
- [332] W.-B. Cho, S.-Y. Choi, J.-W. Kim, D.-I. Yeom, K.-H. Kim, F. Rotermund, and H.-J. Lim, "Solid-State Laser Mode-Locking Near 1.25  $\mu\text{m}$  Employing a Carbon Nanotube Saturable Absorber Mirror," *J. Opt. Soc. Korea*, vol. 15, no. 1, pp. 56–60, Mar. 2011.
- [333] S. Ozharar, I. Baylam, M. N. Cizmeciyan, O. Balci, E. Pince, C. Kocabas, and A. Sennaroglu, "Graphene mode-locked multipass-cavity femtosecond Cr<sup>4+</sup>: forsterite laser," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 30, no. 5, p. 1270, May 2013.
- [334] T. Jouhti, J. Kontinen, S. Karirinne, O. G. Okhotnikov, and M. Pessa, "1.55 $\mu\text{m}$  monolithic GaInNAs semiconductor saturable absorber," *IEE Proc. - Optoelectron.*, vol. 150, no. 1, p. 77, 2003.

- [335] O. G. Okhotnikov, T. Jouhti, J. Konttinen, S. Karirinne, and M. Pessa, "1.5- $\mu\text{m}$  monolithic GaInNAs semiconductor saturable-absorber mode locking of an erbium fiber laser," *Opt. Lett.*, vol. 28, no. 5, pp. 364–366, 2003.
- [336] A. Harkonen, T. Jouhti, N. V. Tkachenko, H. Lemmetyinen, B. Ryvkin, O. G. Okhotnikov, T. Sajavaara, and J. Keinonen, "Dynamics of photoluminescence in GaInNAs saturable absorber mirrors," *Appl. Phys. Mater. Sci. Process.*, vol. 77, no. 7, pp. 861–863, Dec. 2003.
- [337] A. Rutz, R. Grange, V. Liverini, M. Haiml, S. Schon, and U. Keller, "1.5  $\mu\text{m}$  GaInNAs semiconductor saturable absorber for passively modelocked solid-state lasers," *Electron. Lett.*, vol. 41, no. 6, pp. 321–323, 2005.
- [338] H. Lindberg, M. Sadeghi, M. Westlund, S. Wang, A. Larsson, M. Strassner, and S. Marcinkevicius, "Mode locking a 1550 nm semiconductor disk laser by using a GaInNAs saturable absorber," *Opt. Lett.*, vol. 30, no. 20, pp. 2793–2795, 2005.
- [339] M. Le Du, J.-C. Harmard, O. Mauguin, L. Largeau, L. Travers, and J.-L. Oudar, "Quantum-well saturable absorber at 1.55  $\mu\text{m}$  on GaAs substrate with a fast recombination rate," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 88, no. 20, p. 201110, 2006.
- [340] P. J. Conlon, A. V. Shestakov, Y. P. Tong, P. M. W. French, and J. R. Taylor, "Passive mode locking and dispersion measurement of a sub-100-fs Cr<sup>4+</sup>: YAG laser," *Opt. Lett.*, vol. 19, no. 18, pp. 1468–1470, 1994.
- [341] A. Sennaroglu, H. Nathel, and C. R. Pollock, "Continuous-wave self-mode-locked operation of a femtosecond Cr<sup>4+</sup>: YAG laser," *Opt. Lett.*, vol. 19, no. 6, pp. 390–392, 1994.
- [342] Y. Ishida and K. Naganuma, "Characteristics of femtosecond pulses near 15  $\mu\text{m}$  in a self-mode-locked Cr<sup>4+</sup>:YAG laser," *Opt. Lett.*, vol. 19, no. 23, p. 2003, Dec. 1994.
- [343] Y. P. Tong, P. M. W. French, and J. R. Taylor, "All-solid-state Kerr lens mode-locked Cr<sup>4+</sup>:forsterite laser," *Electron. Lett.*, vol. 32, no. 8, p. 737, 1996.
- [344] R. Mellish, S. V. Chernikov, P. M. W. French, and J. R. Taylor, "All-solid-state compact high repetition rate modelocked Cr<sup>4+</sup>: YAG laser," *Electron. Lett.*, vol. 34, no. 6, pp. 552–553, 1998.
- [345] T. Tomaru and H. Petek, "Femtosecond Cr<sup>4+</sup>: YAG laser with an L-fold cavity operating at a 1.2-GHz repetition rate," *Opt. Lett.*, vol. 25, no. 8, pp. 584–586, 2000.
- [346] T. Tomaru, "Two-element-cavity femtosecond Cr<sup>4+</sup>: YAG laser operating at a 2.6-GHz repetition rate," *Opt. Lett.*, vol. 26, no. 18, pp. 1439–1441, 2001.
- [347] D. J. Ripin, J. T. Gopinath, H. M. Shen, A. A. Erchak, G. S. Petrich, L. A. Kolodziejski, F. X. Kärtner, and E. P. Ippen, "Oxidized GaAs/AlAs mirror with a quantum-well saturable absorber for ultrashort-pulse Cr<sup>4+</sup>: YAG laser," *Opt. Commun.*, vol. 214, no. 1, pp. 285–289, 2002.
- [348] S. Naumov, E. Sorokin, V. L. Kalashnikov, G. Tempea, and I. T. Sorokina, "Self-starting five optical cycle pulse generation in Cr<sup>4+</sup>:YAG laser," *Appl. Phys. B Lasers Opt.*, vol. 76, no. 1, pp. 1–11, Jan. 2003.
- [349] C. G. Leburn, A. A. Lagatsky, C. T. A. Brown, and W. Sibbett, "Femtosecond Cr<sup>4+</sup>: YAG laser with 4 GHz pulse repetition rate," *Electron. Lett.*, vol. 40, no. 13, pp. 805–807, 2004.
- [350] S. Naumov, E. Sorokin, and I. T. Sorokina, "Directly diode-pumped Kerr-lens mode-locked Cr<sup>4+</sup>:YAG laser," *Opt. Lett.*, vol. 29, no. 11, p. 1276, 2004.
- [351] A. A. Lagatsky, C. G. Leburn, C. T. A. Brown, W. Sibbett, A. M. Malyarevich, V. G. Savitski, K. V. Yumashev, E. L. Raaben, and A. A. Zhilin, "Passive mode locking of a Cr<sup>4+</sup>:YAG laser by PbS quantum-dot-doped glass saturable absorber," *Opt. Commun.*, vol. 241, no. 4–6, pp. 449–454, Nov. 2004.
- [352] A. Alcock, P. Ma, P. Poole, S. Chepurov, A. Czajkowski, J. Bernard, A. Madej, J. Fraser, I. Mitchell, I. Sorokina, and others, "Ultrashort pulse Cr<sup>4+</sup>: YAG laser for high precision infrared frequency interval measurements," *Opt. Express*, vol. 13, no. 22, pp. 8837–8844, 2005.
- [353] W. Bae Cho, A. Schmidt, S. Young Choi, V. Petrov, U. Griebner, G. Steinmeyer, S. Lee, D.-I. Yeom, and F. Rotermund, "Mode locking of a Cr:YAG laser with carbon nanotubes," *Opt. Lett.*, vol. 35, no. 16, p. 2669, Aug. 2010.
- [354] S. D. Di Dio Cafiso, E. Ugolotti, A. Schmidt, V. Petrov, U. Griebner, A. Agnesi, W. B. Cho, B. H. Jung, F. Rotermund, S. Bae, B. H. Hong, G. Reali, and F. Pirzio, "Sub-100-fs Cr:YAG laser mode-locked by monolayer graphene saturable absorber," *Opt. Lett.*, vol. 38, no. 10, p. 1745, May 2013.
- [355] S. D. Di Dio Cafiso, E. Ugolotti, A. Schmidt, V. Petrov, U. Griebner, A. Agnesi, W. B. Cho, Y. G. Zhang, S. Y. Choi, F. Rotermund, G. Reali, and F. Pirzio, "Sub-50 fs mode-locking of a Cr:YAG laser using an SWCNT-SA," *Laser Phys. Lett.*, vol. 10, no. 8, p. 085801, Aug. 2013.
- [356] M. Le Du, J.-C. Harmard, and J.-L. Oudar, "Investigation of fast monolithic saturable absorber microcavities on GaAs substrate," in *Indium Phosphide and Related Materials Conference Proceedings, 2006 International Conference on*, pp. 356–359.

- [357] O. Okhotnikov and M. Pessa, "Dilute nitride saturable absorber mirrors for optical pulse generation," *J. Phys. Condens. Matter*, vol. 16, no. 31, pp. S3107–S3120, Aug. 2004.
- [358] O. Okhotnikov, A. Grudinin, and M. Pessa, "Ultra-fast fibre laser systems based on SESAM technology: new horizons and applications," *New J. Phys.*, vol. 6, pp. 177–177, Nov. 2004.
- [359] E. M. Dianov, A. A. Krylov, V. V. Dvoyrin, V. M. Mashinsky, P. G. Kryukov, O. G. Okhotnikov, and M. Guina, "Mode-locked Bi-doped fiber laser," *JOSA B*, vol. 24, no. 8, pp. 1807–1808, 2007.
- [360] S. Kivisto, J. Puustinen, M. Guina, O. G. Okhotnikov, and E. M. Dianov, "Tunable modelocked bismuth-doped soliton fibre laser," *Electron. Lett.*, vol. 44, no. 25, pp. 1456–1458, 2008.
- [361] S. Kivisto, R. Gumenyuk, J. Puustinen, M. Guina, E. M. Dianov, and O. G. Okhotnikov, "Mode-Locked Bi-Doped All-Fiber Laser With Chirped Fiber Bragg Grating," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 21, no. 9, pp. 599–601, May 2009.
- [362] A. A. Lagatsky, V. E. Kisel, A. E. Troshin, N. A. Tolstik, N. V. Kuleshov, N. I. Leonyuk, A. E. Zhukov, E. U. Rafailov, and W. Sibbett, "Diode-pumped passively mode-locked Er, Yb: YAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> laser at 1.5-1.6  $\mu\text{m}$ ," *Opt. Lett.*, vol. 33, no. 1, pp. 83–85, 2008.
- [363] J. Rautiainen, V.-M. Korpijärvi, J. Puustinen, M. Guina, and O. Okhotnikov, "Passively mode-locked GaInNAs disk laser operating at 1220 nm," *Opt. Express*, vol. 16, no. 20, pp. 15964–15969, 2008.
- [364] E. J. Saarinen, J. Puustinen, A. Sirbu, A. Mereuta, A. Caliman, E. Kapon, and O. G. Okhotnikov, "Power-scalable 1.57  $\mu\text{m}$  mode-locked semiconductor disk laser using wafer fusion," *Opt. Lett.*, vol. 34, no. 20, pp. 3139–3141, 2009.
- [365] J. Rautiainen, J. Lyytikäinen, L. Toikkanen, J. Nikkinen, A. Sirbu, A. Mereuta, A. Caliman, E. Kapon, and O. G. Okhotnikov, "1.3- $\mu\text{m}$  Mode-Locked Disk Laser With Wafer Fused Gain and SESAM Structures," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 22, no. 11, pp. 748–750, Jun. 2010.
- [366] Z. Zhao, S. Bouchoule, J. Song, E. Galopin, J.-C. Harmand, J. Decobert, G. Aubin, and J.-L. Oudar, "Subpicosecond pulse generation from a 1.56  $\mu\text{m}$  mode-locked VECSEL," *Opt. Lett.*, vol. 36, no. 22, pp. 4377–4379, 2011.
- [367] F. J. Grawert, J. T. Gopinath, F. Ilday, H. M. Shen, E. P. Ippen, F. X. Kaertner, S. Akiyama, J. Liu, K. Wada, and L. C. Kimerling, "220-fs erbium-ytterbium: glass laser mode locked by a broadband low-loss silicon/germanium saturable absorber," *Opt. Lett.*, vol. 30, no. 3, pp. 329–331, 2005.
- [368] S. Y. Set, H. Yaguchi, Y. Tanaka, and M. Jablonski, "Ultrafast Fiber Pulsed Lasers Incorporating Carbon Nanotubes," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 10, no. 1, pp. 137–146, Jan. 2004.
- [369] T. Hasan, Z. Sun, F. Wang, F. Bonaccorso, P. H. Tan, A. G. Rozhin, and A. C. Ferrari, "Nanotube-Polymer Composites for Ultrafast Photonics," *Adv. Mater.*, vol. 21, no. 38–39, pp. 3874–3899, Oct. 2009.
- [370] Z. Sun, T. Hasan, F. Torrisi, D. Popa, G. Privitera, F. Wang, F. Bonaccorso, D. M. Basko, and A. C. Ferrari, "Graphene Mode-Locked Ultrafast Laser," *ACS Nano*, vol. 4, no. 2, pp. 803–810, Feb. 2010.
- [371] Y.-W. Song, S. Yamashita, C. S. Goh, and S. Y. Set, "Passively mode-locked lasers with 17.2-GHz fundamental-mode repetition rate pulsed by carbon nanotubes," *Opt. Lett.*, vol. 32, no. 4, pp. 430–432, 2007.
- [372] Y. Zhou, L. Hu, and G. Grüner, "A method of printing carbon nanotube thin films," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 88, no. 12, p. 123109, 2006.
- [373] R. C. Sharp, D. E. Spock, N. Pan, and J. Elliot, "190-fs passively mode-locked thulium fiber laser with a low threshold," *Opt. Lett.*, vol. 21, no. 12, pp. 881–883, 1996.
- [374] N. Hempler, J.-M. Hopkins, B. Rösener, M. Rattunde, J. Wagner, V. V. Fedorov, I. S. Moskalev, S. B. Mirov, and D. Burns, "Semiconductor disk laser pumped Cr<sup>2+</sup>: ZnSe lasers," *Opt. Express*, vol. 17, no. 20, pp. 18136–18141, 2009.
- [375] A. A. Lagatsky, O. L. Antipov, and W. Sibbett, "Broadly tunable femtosecond Tm: Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic laser operating around 2070 nm," *Opt. Express*, vol. 20, no. 17, pp. 19349–19354, 2012.
- [376] A. A. Lagatsky, P. Koopmann, P. Fuhrberg, G. Huber, C. T. A. Brown, and W. Sibbett, "Passively mode locked femtosecond Tm: Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> laser at 2.1  $\mu\text{m}$ ," *Opt. Lett.*, vol. 37, no. 3, pp. 437–439, 2012.
- [377] N. Coluccelli, A. Lagatsky, A. D. Lieto, M. Tonelli, G. Galzerano, W. Sibbett, and P. Laporta, "Passive mode locking of an in-band-pumped Ho: YLiF<sub>4</sub> laser at 2.06  $\mu\text{m}$ ," *Opt. Lett.*, vol. 36, no. 16, pp. 3209–3211, 2011.

- [378] K. Yang, D. Heinecke, J. Paajaste, C. Kölbl, T. Dekorsy, S. Suomalainen, and M. Guina, "Mode-locking of 2  $\mu\text{m}$  Tm, Ho: YAG laser with GaInAs and GaSb-based SESAMs," *Opt. Express*, vol. 21, no. 4, pp. 4311–4318, 2013.
- [379] A. Gluth, Y. Wang, V. Petrov, J. Paajaste, S. Suomalainen, A. Härkönen, M. Guina, G. Steinmeyer, X. Mateos, S. Veronesi, M. Tonelli, J. Li, Y. Pan, J. Guo, and U. Griebner, "GaSb-based SESAM mode-locked Tm:YAG ceramic laser at 2  $\mu\text{m}$ ," *Opt. Express*, vol. 23, no. 2, p. 1361, Jan. 2015.
- [380] J. Paajaste, S. Suomalainen, A. Härkönen, U. Griebner, G. Steinmeyer, and M. Guina, "Absorption recovery dynamics in 2  $\mu\text{m}$  GaSb-based SESAMs," *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. 47, no. 6, p. 065102, Feb. 2014.
- [381] A. Schmidt, P. Koopmann, G. Huber, P. Fuhrberg, S. Y. Choi, D.-I. Yeom, F. Rotermund, V. Petrov, and U. Griebner, "175 fs Tm: Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> laser at 2.07  $\mu\text{m}$  mode-locked using single-walled carbon nanotubes," *Opt. Express*, vol. 20, no. 5, pp. 5313–5318, 2012.
- [382] K. Yang, H. Bromberger, H. Ruf, H. Schäfer, J. Neuhaus, T. Dekorsy, C. V.-B. Grimm, M. Helm, K. Biermann, and H. Künzel, "Passively mode-locked Tm, Ho: YAG laser at 2  $\mu\text{m}$  based on saturable absorption of intersubband transitions in quantum wells," *Opt. Express*, vol. 18, no. 7, pp. 6537–6544, 2010.
- [383] N. Coluccelli, G. Galzerano, D. Gatti, A. Di Lieto, M. Tonelli, and P. Laporta, "Passive mode-locking of a diode-pumped Tm:GdLiF<sub>4</sub> laser," *Appl. Phys. B*, vol. 101, no. 1–2, pp. 75–78, Oct. 2010.
- [384] B. Y. Baoquan Yao, W. W. Wei Wang, K. Y. Kuaikuai Yu, G. L. Gnag Li, and Y. W. Yuezhu Wang, "Passively mode-locked Tm,Ho:YVO<sub>4</sub> laser based on a semiconductor saturable absorber mirror," *Chin. Opt. Lett.*, vol. 10, no. 7, pp. 071402–71404, 2012.
- [385] J. Ma, G. Q. Xie, W. L. Gao, P. Yuan, L. J. Qian, H. H. Yu, H. J. Zhang, and J. Y. Wang, "Diode-pumped mode-locked femtosecond Tm: CLNGG disordered crystal laser," *Opt. Lett.*, vol. 37, no. 8, pp. 1376–1378, 2012.
- [386] K. J. Yang, D. C. Heinecke, C. Kölbl, T. Dekorsy, S. Z. Zhao, L. H. Zheng, J. Xu, and G. J. Zhao, "Mode-locked Tm, Ho: YAP laser around 2.1  $\mu\text{m}$ ," *Opt. Express*, vol. 21, no. 2, pp. 1574–1580, 2013.
- [387] Z. Qin, G. Xie, L. Kong, P. Yuan, L. Qian, X. Xu, and J. Xu, "Diode-Pumped Passively Mode-Locked Tm: CaGdAlO<sub>4</sub> Laser at 2 $\mu\text{m}$  wavelength," *IEEE Photonics J.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–5, Feb. 2015.
- [388] C. W. Rudy, M. J. F. Digonnet, and R. L. Byer, "Advances in 2- $\mu\text{m}$  Tm-doped mode-locked fiber lasers," *Opt. Fiber Technol.*, vol. 20, no. 6, pp. 642–649, Dec. 2014.
- [389] P. Černý, G. Valentine, D. Burns, and K. McEwan, "Passive stabilization of a passively mode-locked laser by nonlinear absorption in indium phosphide," *Opt. Lett.*, vol. 29, no. 12, pp. 1387–1389, 2004.
- [390] N. H. Bonadeo, W. H. Knox, J. M. Roth, and K. Bergman, "Passive harmonic mode-locked soliton fiber laser stabilized by an optically pumped saturable Bragg reflector," *Opt. Lett.*, vol. 25, no. 19, pp. 1421–1423, 2000.
- [391] M. Guina and O. G. Okhotnikov, "Harmonic mode locking by synchronous optical pumping of a saturable absorber with the residual pump," *Opt. Lett.*, vol. 28, no. 5, pp. 358–360, 2003.
- [392] W. Seitz, R. Ell, U. Morgner, and F. X. Kaertner, "All-optical synchronization and mode locking of solid-state lasers with nonlinear semiconductor Fabry-Perot mirrors," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 9, no. 4, pp. 1093–1101, Jul. 2003.
- [393] B. Agate, C. T. A. Brown, W. Sibbett, and K. Dholakia, "Femtosecond optical tweezers for in-situ control of two-photon fluorescence," *Opt. Express*, vol. 12, no. 13, p. 3011, 2004.
- [394] J. Ando, G. Bautista, N. Smith, K. Fujita, and V. R. Daria, "Optical trapping and surgery of living yeast cells using a single laser," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 79, no. 10, p. 103705, 2008.
- [395] G. Baili, M. Alouini, L. Morvan, D. Dolfi, A. Khadour, S. Bouchoule, and J.-L. Oudar, "Timing Jitter Reduction of a Mode-Locked VECSEL Using an Optically Triggered SESAM," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 22, no. 19, pp. 1434–1436, Oct. 2010.
- [396] L. R. Brovelli, M. Lanker, U. Keller, K. W. Goossen, J. A. Walker, and J. E. Cunningham, "Antiresonant Fabry-Perot quantum-well modulator to actively modelock and synchronise solid-state lasers," *Electron. Lett.*, vol. 31, no. 5, pp. 381–382, Mar. 1995.
- [397] B. Stormont, E. U. Rafailov, I. G. Cormack, A. Mooradian, and W. Sibbett, "Extended-cavity surface-emitting diode laser as active mirror controlling modelocked Ti: sapphire laser," *Electron. Lett.*, vol. 40, no. 12, pp. 732–734, 2004.

- [398] S. A. Zolotovskaya, K. G. Wilcox, A. Abdolvand, D. A. Livshits, and E. U. Rafailov, "Electronically Controlled Pulse Duration Passively Mode-Locked Cr:Forsterite Laser," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 21, no. 16, pp. 1124–1126, Aug. 2009.
- [399] J. R. Karin, R. J. Helkey, D. J. Derickson, R. Nagarajan, D. S. Allin, J. E. Bowers, and R. L. Thornton, "Ultrafast dynamics in field-enhanced saturable absorbers," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 64, no. 6, p. 676, 1994.
- [400] S. A. Zolotovskaya, M. Butkus, R. Häring, A. Able, W. Kaenders, I. L. Krestnikov, D. A. Livshits, and E. U. Rafailov, "pin junction quantum dot saturable absorber mirror: electrical control of ultrafast dynamics," *Opt. Express*, vol. 20, no. 8, pp. 9038–9045, 2012.
- [401] C.-C. Lee, C. Mohr, J. Bethge, S. Suzuki, M. E. Fermann, I. Hartl, and T. R. Schibli, "Frequency comb stabilization with bandwidth beyond the limit of gain lifetime by an intracavity graphene electro-optic modulator," *Opt. Lett.*, vol. 37, no. 15, pp. 3084–3086, 2012.
- [402] M. Hoffmann, S. Schilt, and T. Südmeyer, "CEO stabilization of a femtosecond laser using a SESAM as fast opto-optical modulator," *Opt. Express*, vol. 21, no. 24, p. 30054, Dec. 2013.
- [403] P. Del'Haye, A. Schliesser, O. Arcizet, T. Wilken, R. Holzwarth, and T. J. Kippenberg, "Optical frequency comb generation from a monolithic microresonator," *Nature*, vol. 450, no. 7173, pp. 1214–1217, Dec. 2007.
- [404] Y. Okawachi, K. Saha, J. S. Levy, Y. H. Wen, M. Lipson, and A. L. Gaeta, "Octave-spanning frequency comb generation in a silicon nitride chip," *Opt. Lett.*, vol. 36, no. 17, pp. 3398–3400, 2011.
- [405] P. Del'Haye, T. Herr, E. Gavartin, M. L. Gorodetsky, R. Holzwarth, and T. J. Kippenberg, "Octave Spanning Tunable Frequency Comb from a Microresonator," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 107, no. 6, Aug. 2011.
- [406] T. Leinonen, V.-M. Korpjärvi, A. Härkönen, and M. Guina, "7.4 W yellow GaInNAs-based semiconductor disk laser," *Electron. Lett.*, vol. 47, no. 20, pp. 1139–1440, 2011.
- [407] 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.*, vol. 23, no. 10, p. 105021, Oct. 2008.
- [408] C. L. Chua, R. L. Thornton, D. W. Treat, and R. M. Donaldson, "Anisotropic apertures for polarization-stable laterally oxidized vertical-cavity lasers," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 73, no. 12, p. 1631, 1998.
- [409] C. Amat, G. Almuneau, P. Gallo, L. Jalabert, S. Moudjji, P. Dubreuil, T. Camps, J. B. Doucet, E. Havard, V. Bardinal, and others, "Free engineering of buried oxide patterns in GaAs/AlAs epitaxial structures," *Electron. Lett.*, vol. 43, no. 13, pp. 730–732, 2007.
- [410] T. Kippenberg, S. Spillane, and K. Vahala, "Kerr-Nonlinearity Optical Parametric Oscillation in an Ultrahigh-Q Toroid Microcavity," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 93, no. 8, Aug. 2004.
- [411] P. Koonath, T. Indukuri, and B. Jalali, "Vertically-coupled micro-resonators realized using three-dimensional sculpting in silicon," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 85, no. 6, p. 1018, 2004.
- [412] S. Suzuki, K. Shuto, and Y. Hibino, "Integrated-optic ring resonators with two stacked layers of silica waveguide on Si," *Photonics Technol. Lett. IEEE*, vol. 4, no. 11, pp. 1256–1258, 1992.
- [413] M. Ghulinyan, R. Guider, G. Pucker, and L. Pavesi, "Monolithic Whispering-Gallery Mode Resonators With Vertically Coupled Integrated Bus Waveguides," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 23, no. 16, pp. 1166–1168, Aug. 2011.
- [414] P. P. Absil, J. V. Hryniewicz, B. E. Little, F. G. Johnson, K. J. Ritter, and P.-T. Ho, "Vertically coupled microring resonators using polymer wafer bonding," *Photonics Technol. Lett. IEEE*, vol. 13, no. 1, pp. 49–51, 2001.
- [415] C. Baker, C. Belacel, A. Andronico, P. Senellart, A. Lemaitre, E. Galopin, S. Ducci, G. Leo, and I. Favero, "Critical optical coupling between a GaAs disk and a nanowaveguide suspended on the chip," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 99, no. 15, p. 151117, 2011.
- [416] S. A. Backes, "Microdisk laser structures for mode control and directional emission," *J. Vac. Sci. Technol. B Microelectron. Nanometer Struct.*, vol. 16, no. 6, p. 3817, Nov. 1998.
- [417] M. Fujita and T. Baba, "Microgear laser," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 80, no. 12, p. 2051, 2002.
- [418] F. Mandorlo, P. Rojo Romeo, X. Letartre, R. Orobtcouk, and P. Viktorovitch, "Compact modulated and tunable microdisk laser using vertical coupling and a feedback loop," *Opt. Express*, vol. 18, no. 19, pp. 19612–19625, 2010.
- [419] I. V. Ermakov, S. Beri, M. Ashour, J. Danckaert, B. Docter, J. Bolk, X. J. M. Leijtens, and G. Verschaffelt, "Semiconductor Ring Laser With On-Chip Filtered Optical Feedback for Discrete Wavelength Tuning," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 48, no. 2, pp. 129–136, Feb. 2012.

- [420] Y. M. Kang, A. Arbabi, and L. L. Goddard, "A microring resonator with an integrated Bragg grating: a compact replacement for a sampled grating distributed Bragg reflector," *Opt. Quantum Electron.*, vol. 41, no. 9, pp. 689–697, Jul. 2009.
- [421] Y. M. Kang, A. Arbabi, and L. L. Goddard, "Engineering the spectral reflectance of microring resonators with integrated reflective elements," *Opt. Express*, vol. 18, no. 16, pp. 16813–16825, 2010.
- [422] A. Schlehahn, F. Albert, C. Schneider, S. Höfling, S. Reitzenstein, J. Wiersig, and M. Kamp, "Mode selection in electrically driven quantum dot microring cavities," *Opt. Express*, vol. 21, no. 13, p. 15951, Jul. 2013.
- [423] S. Mariani, A. Andronico, I. Favero, S. Ducci, Y. Todorov, C. Sirtori, M. Kamp, M. Munsch, J. Claudon, J.-M. Gerard, and others, "Microring Diode Laser for THz Generation," *Terahertz Sci. Technol. IEEE Trans. On*, vol. 3, no. 4, pp. 472–478, 2013.
- [424] S. T. M. Fryslie, D. F. Siriani, and K. D. Choquette, "Cold-cavity measurement of optical loss from oxide-confined vertical-cavity surface-emitting lasers," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 104, no. 10, p. 101103, Mar. 2014.
- [425] Y. Hirai, T. Yamada, M. Kondow, and F. Ishikawa, "Characterization of the Oxide Film Obtained by Wet Oxidation of Al-Rich AlGaAs," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 51, no. 2, p. 02BG10, Feb. 2012.
- [426] A. Strittmatter, A. Schliwa, J.-H. Schulze, T. D. Germann, A. Dreismann, O. Hitzemann, E. Stock, I. A. Ostapenko, S. Rodt, W. Unrau, U. W. Pohl, A. Hoffmann, D. Bimberg, and V. Haisler, "Lateral positioning of InGaAs quantum dots using a buried stressor," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 100, no. 9, p. 093111, 2012.
- [427] H. Hibi, M. Yamaguchi, N. Yamamoto, and F. Ishikawa, "Selective Synthesis of Compound Semiconductor/Oxide Composite Nanowires," *Nano Lett.*, vol. 14, no. 12, pp. 7024–7030, Dec. 2014.
- [428] C. Ozanam, M. Savanier, L. Lanco, X. Lafosse, G. Almuneau, A. Andronico, I. Favero, S. Ducci, and G. Leo, "Toward an AlGaAs/AlOx near-infrared integrated optical parametric oscillator," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 31, no. 3, pp. 542–550, Mar. 2014.
- [429] P. O. Vaccaro, K. Koizumi, K. Fujita, and T. Ohachi, "AlAs oxidation process in GaAs/AlGaAs/AlAs heterostructures grown by molecular beam epitaxy on GaAs (n11) A substrates," *Microelectron. J.*, vol. 30, no. 4, pp. 387–391, 1999.
- [430] F. Chouchane, G. Almuneau, N. Cherkashin, A. Arnoult, G. Lacoste, and C. Fontaine, "Local stress-induced effects on AlGaAs/AlOx oxidation front shape," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 105, no. 4, p. 041909, Jul. 2014.
- [431] A. C. Alonzo, X.-C. Cheng, and T. C. McGill, "Effect of cylindrical geometry on the wet thermal oxidation of AlAs," *J. Appl. Phys.*, vol. 84, no. 12, p. 6901, 1998.
- [432] Pei-Cheng Ku and C. J. Chang-Hasnain, "Thermal oxidation of AlGaAs: modeling and process control," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 39, no. 4, pp. 577–585, Apr. 2003.
- [433] R. Magnusson and S. S. Wang, "New principle for optical filters," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 61, no. 9, p. 1022, 1992.
- [434] T. W. Hänsch, "Repetitively Pulsed Tunable Dye Laser for High Resolution Spectroscopy," *Appl. Opt.*, vol. 11, no. 4, p. 895, Apr. 1972.
- [435] M. Fleming and A. Mooradian, "Spectral characteristics of external-cavity controlled semiconductor lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 17, no. 1, pp. 44–59, Jan. 1981.
- [436] C. J. Hawthorn, K. P. Weber, and R. E. Scholten, "Littrow configuration tunable external cavity diode laser with fixed direction output beam," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 72, no. 12, p. 4477, 2001.
- [437] M. G. Littman and H. J. Metcalf, "Spectrally narrow pulsed dye laser without beam expander," *Appl. Opt.*, vol. 17, no. 14, p. 2224, Jul. 1978.
- [438] K. C. Harvey and C. J. Myatt, "External-cavity diode laser using a grazing-incidence diffraction grating," *Opt. Lett.*, vol. 16, no. 12, pp. 910–912, 1991.
- [439] S. Lecomte, E. Fretel, G. Mileti, and P. Thomann, "Self-Aligned Extended-Cavity Diode Laser Stabilized by the Zeeman Effect on the Cesium D2 Line," *Appl. Opt.*, vol. 39, no. 9, pp. 1426–1429, 2000.
- [440] B. F. Ventrudo, G. A. Rogers, G. S. Lick, D. Hargreaves, and T. N. Demayo, "Wavelength and intensity stabilisation of 980 nm diode lasers coupled to fibre Bragg gratings," *Electron. Lett.*, vol. 30, no. 25, pp. 2147–2149, Dec. 1994.
- [441] K. Numata, J. Camp, M. A. Krainak, and L. Stolpner, "Performance of planar-waveguide external cavity laser for precision measurements," *Opt. Express*, vol. 18, no. 22, pp. 22781–22788, 2010.

- [442] B. L. Volodin, S. V. Dolgy, E. D. Melnik, E. Downs, J. Shaw, and V. S. Ban, "Wavelength stabilization and spectrum narrowing of high-power multimode laser diodes and arrays by use of volume Bragg gratings," *Opt. Lett.*, vol. 29, no. 16, pp. 1891–1893, 2004.
- [443] G. J. Steckman, W. Liu, R. Platz, D. Schroeder, C. Moser, and F. Havermeyer, "Volume Holographic Grating Wavelength Stabilized Laser Diodes," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 13, no. 3, pp. 672–678, 2007.
- [444] D. Paboeuf, D. Vijayakumar, O. B. Jensen, B. Thestrup, J. Lim, S. Sujecki, E. Larkins, G. Lucas-Leclin, and P. Georges, "Volume Bragg grating external cavities for the passive phase locking of high-brightness diode laser arrays: theoretical and experimental study," *JOSA B*, vol. 28, no. 5, pp. 1289–1299, 2011.
- [445] Y. Wang, T. Kasamatsu, Y. Zheng, H. Miyajima, H. Fukuoka, S. Matsuoka, M. Niigaki, H. Kubomura, T. Hiruma, and H. Kan, "Cesium vapor laser pumped by a volume-Bragg-grating coupled quasi-continuous-wave laser-diode array," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 88, no. 14, p. 141112, 2006.
- [446] E. Luvsandamdin, C. Kürbis, M. Schiemangk, A. Sahm, A. Wicht, A. Peters, G. Erbert, and G. Tränkle, "Micro-integrated extended cavity diode lasers for precision potassium spectroscopy in space," *Opt. Express*, vol. 22, no. 7, p. 7790, Apr. 2014.
- [447] I. Avrutsky and R. Rabaday, "Waveguide grating mirror for large-area semiconductor lasers," *Opt. Lett.*, vol. 26, no. 13, pp. 989–991, 2001.
- [448] N. V. Baidus, I. F. Salakhutdinov, H. Hoekstra, B. N. Zvonkov, S. M. Nekorkin, and V. A. Sychugov, "A compact tunable narrow-band LD based on emission through the substrate and an external abnormal-reflection mirror," *Photonics Technol. Lett. IEEE*, vol. 13, no. 11, pp. 1155–1157, 2001.
- [449] A. S. P. Chang, Shufeng Bai, Hua Tan, Wei Wu, Zhaoning Yu, and S. Y. Chou, "A novel, simple and low-cost external cavity laser using subwavelength resonant grating filter," 2002, vol. 2, pp. 793–794.
- [450] S. Block, E. Gamet, and F. Pigeon, "Semiconductor laser with external resonant grating mirror," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 41, no. 8, pp. 1049–1053, Aug. 2005.
- [451] S. Bai and S. Chou, "A Spectrum-narrowed, Wavelength and Temperature Stabilized Broad Area Laser Using a Subwavelength Resonant Grating Filter Feedback," 2006, pp. 659–660.
- [452] A. S. P. Chang, Hua Tan, S. Bai, Wei Wu, Zhaoning Yu, and S. Y. Chou, "Tunable External Cavity Laser With a Liquid-Crystal Subwavelength Resonant Grating Filter as Wavelength-Selective Mirror," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 19, no. 14, pp. 1099–1101, Jul. 2007.
- [453] S. Ura, S. Murata, Y. Awatsuji, and K. Kintaka, "Design of resonance grating coupler," *Opt. Express*, vol. 16, no. 16, pp. 12207–12213, 2008.
- [454] S. Ura, J. Inoue, K. Kintaka, and Y. Awatsuji, "Proposal of small-aperture guided-mode resonance filter," in *Transparent Optical Networks (ICTON), 2011 13th International Conference on*, 2011, pp. 1–4.
- [455] K. Kintaka, T. Majima, J. Inoue, K. Hatanaka, J. Nishii, and S. Ura, "Cavity-resonator-integrated guided-mode resonance filter for aperture miniaturization," *Opt. Express*, vol. 20, no. 2, pp. 1444–1449, 2012.
- [456] X. Buet, E. Daran, D. Belharet, F. Lozes-Dupuy, A. Monmayrant, and O. Gauthier-Lafaye, "High angular tolerance and reflectivity with narrow bandwidth cavity-resonator-integrated guided-mode resonance filter," *Opt. Express*, vol. 20, no. 8, pp. 9322–9327, 2012.
- [457] E. Garmire, "Nonlinear optics in daily life," *Opt. Express*, vol. 21, no. 25, p. 30532, Dec. 2013.
- [458] A. S. Helmy, P. Abolghasem, J. Stewart Aitchison, B. J. Bijlani, J. Han, B. M. Holmes, D. C. Hutchings, U. Younis, and S. J. Wagner, "Recent advances in phase matching of second-order nonlinearities in monolithic semiconductor waveguides," *Laser Photonics Rev.*, vol. 5, no. 2, pp. 272–286, Mar. 2011.
- [459] L. Caspani, D. Duchesne, K. Dolgaleva, S. J. Wagner, M. Ferrera, L. Razzari, A. Pasquazi, M. Peccianti, D. J. Moss, J. S. Aitchison, and R. Morandotti, "Optical frequency conversion in integrated devices [Invited]," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 28, no. 12, p. A67, Dec. 2011.
- [460] M. Savanier, C. Ozanam, L. Lanco, X. Lafosse, A. Andronico, I. Favero, S. Ducci, and G. Leo, "Near-infrared optical parametric oscillator in a III-V semiconductor waveguide," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 103, no. 26, p. 261105, Dec. 2013.
- [461] T. Kippenberg, J. Kalkman, A. Polman, and K. Vahala, "Demonstration of an erbium-doped microdisk laser on a silicon chip," *Phys. Rev. A*, vol. 74, no. 5, Nov. 2006.
- [462] G. A. Porkolab, P. Apiratikul, B. Wang, S. H. Guo, and C. J. K. Richardson, "Low propagation loss AlGaAs waveguides fabricated with plasma-assisted photoresist reflow," *Opt. Express*, vol. 22, no. 7, pp. 7733–7743, Apr. 2014.

- [463] C. J. Sandroff, R. N. Nottenburg, J.-C. Bischoff, and R. Bhat, "Dramatic enhancement in the gain of a GaAs/AlGaAs heterostructure bipolar transistor by surface chemical passivation," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 51, no. 1, p. 33, 1987.
- [464] V. L. Berkovits, D. Paget, A. N. Karpenko, V. P. Ulin, and O. E. Tereshchenko, "Soft nitridation of GaAs(100) by hydrazine sulfide solutions: Effect on surface recombination and surface barrier," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 90, no. 2, p. 022104, 2007.
- [465] M. Bosund, P. Mattila, A. Aierken, T. Hakkarainen, H. Koskenvaara, M. Sopanen, V.-M. Airaksinen, and H. Lipsanen, "GaAs surface passivation by plasma-enhanced atomic-layer-deposited aluminum nitride," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 256, no. 24, pp. 7434–7437, Oct. 2010.
- [466] S. Coen and M. Erkintalo, "Universal scaling laws of Kerr frequency combs," *Opt. Lett.*, vol. 38, no. 11, p. 1790, Jun. 2013.
- [467] J. Riemensberger, K. Hartinger, T. Herr, V. Brasch, R. Holzwarth, and T. J. Kippenberg, "Dispersion engineering of thick high-Q silicon nitride ring-resonators via atomic layer deposition," *Opt. Express*, vol. 20, no. 25, p. 27661, Dec. 2012.
- [468] Z. Wang, H. Liu, Q. Sun, N. Huang, and X. Li, "Frequency non-degenerate phase-sensitive optical parametric amplification based on four-wave-mixing in width-modulated silicon waveguides," *Opt. Express*, vol. 22, no. 25, p. 31486, Dec. 2014.
- [469] I. Christiaens, D. Van Thourhout, and R. Baets, "Low-power thermo-optic tuning of vertically coupled microring resonators," *Electron. Lett.*, vol. 40, no. 9, pp. 560–561, 2004.
- [470] S. B. Papp, P. Del'Haye, and S. A. Diddams, "Mechanical Control of a Microrod-Resonator Optical Frequency Comb," *Phys. Rev. X*, vol. 3, no. 3, Jul. 2013.
- [471] H. Jung, K. Y. Fong, C. Xiong, and H. X. Tang, "Electrical tuning and switching of an optical frequency comb generated in aluminum nitride microring resonators," *Opt. Lett.*, vol. 39, no. 1, p. 84, Jan. 2014.
- [472] Y. K. Chembo and N. Yu, "Modal expansion approach to optical-frequency-comb generation with monolithic whispering-gallery-mode resonators," *Phys. Rev. A*, vol. 82, no. 3, Sep. 2010.
- [473] T. Hansson, D. Modotto, and S. Wabnitz, "On the numerical simulation of Kerr frequency combs using coupled mode equations," *Opt. Commun.*, vol. 312, pp. 134–136, Feb. 2014.
- [474] T. Hansson, D. Modotto, and S. Wabnitz, "Analytical approach to the design of microring resonators for nonlinear four-wave mixing applications," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 31, no. 5, p. 1109, May 2014.
- [475] G. Purvinis, P. S. Priambodo, M. Pomerantz, M. Zhou, T. A. Maldonado, and R. Magnusson, "Second-harmonic generation in resonant waveguide gratings incorporating ionic self-assembled monolayer polymer films," *Opt. Lett.*, vol. 29, no. 10, pp. 1108–1110, 2004.
- [476] D. Vakhshoori, R. J. Fischer, M. Hong, D. L. Sivco, G. J. Zydzik, G. N. S. Chu, and A. Y. Cho, "Blue-green surface-emitting second-harmonic generators on (111)B GaAs," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 59, no. 8, p. 896, 1991.
- [477] N. Yamada, Y. Kaneko, S. Nakagawa, D. E. Mars, T. Takeuchi, and N. Mikoshiba, "Continuous-wave operation of a blue vertical-cavity surface-emitting laser based on second-harmonic generation," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 68, no. 14, pp. 1895–1897, 1996.
- [478] K. Rivoire, Z. Lin, F. Hatami, W. T. Masselink, and J. Vučković, "Second harmonic generation in gallium phosphide photonic crystal nanocavities with ultralow continuous wave pump power," *Opt. Express*, vol. 17, no. 25, p. 22609, Dec. 2009.
- [479] S. Buckley, M. Radulaski, K. Biermann, and J. Vučković, "Second harmonic generation in photonic crystal cavities in (111)-oriented GaAs," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 103, no. 21, p. 211117, 2013.
- [480] Y. Ota, K. Watanabe, S. Iwamoto, and Y. Arakawa, "Nanocavity-based self-frequency conversion laser," *Opt. Express*, vol. 21, no. 17, p. 19778, Aug. 2013.

# LISTE DES ACRONYMES

CBSAM	Carbon-Based Saturable Absorber Mirror – Miroir à absorbant saturable à base de carbone
DBR	Distributed Bragg Reflecteur – Miroir de Bragg distribué
DFB	Distributed FeedBack – Contre-réaction distribuée
EJM	Epitaxie à Jets Moléculaires
EPVOM	Epitaxie en Phase Vapeur Organo-Métallique
MEMS	Micro-Electro-Mechanical System – Système micro-électro-mécanique
OPO	Oscillateur Paramétrique Optique
SESAM	SEmiconductor Saturable Absorber Mirror – Miroir à absorbant semiconducteur saturable
SOA	Semiconductor Optical Amplifier - Amplificateur optique à semiconducteur
VCSEL	Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser – Laser à cavité verticale émettant par la surface
VCSSOA	Vertical-Cavity Semiconductor Optical Amplifier - Amplificateur optique à semiconducteur à cavité verticale
VECSEL	Vertical Extended-Cavity Surface Emitting Laser – Laser à cavité verticale étendue émettant par la surface
WDM	Wavelength Division Multiplexing – Multiplexage en longueur d'onde



# BIBLIOGRAPHIE DE S. CALVEZ

## Tableau Récapitulatif

Journaux		Conférences Total (invitées)	Chapitres de livres	Brevets (internationaux)
A comité	Sans comité			
78	1	96 (10)	4	2

## Liste classée des publications

### Brevets

**[SC-P1]:** S. Calvez, J.-M. Hopkins, D. Burns, M.D. Dawson, C.W. Jeon, H.W. Choi, "Vertical Cavity Semiconductor Optical Devices", PCT/GB04/01285 (2004).

**[SC-P2]:** S. Calvez, J.-M. Hopkins, D. Burns, M.D. Dawson, "Vertical Cavity Semiconductor Optical Devices", PCT/GB04/01233 (2004).

### Chapitres de livres

#### 2008

**[SC-B1]:** S. Calvez and N. Laurand, "Vertical Cavity Semiconductor Optical Amplifiers based on dilute nitrides", chapter 20 in *Dilute III-V Nitride Semiconductors and material systems*, ed. E. Ayse, Springer, ISBN: 978-3-540-74528-0, 525-562 (2008).

#### 2010

**[SC-B2]:** S. Calvez, J.E. Hastie, A.J. Kemp, N. Laurand, and M.D. Dawson, "Thermal management, structure Design and integration considerations for VECSELs", chapter 2 in *Semiconductor Disk Lasers: Physics and Technology*, ed. O.G. Okhotnikov, Wiley, ISBN: 978-3-527-40933-4, (2010).

#### 2012

**[SC-B3]:** J.E. Hastie, S. Calvez, and M.D. Dawson, "Semiconductor Disk Lasers (VECSELs)", chapter 11 in *Semiconductor lasers: fundamentals and applications*, ed. Alexei Baranov and Eric Tournie, Woodhead Publishing, ISBN: 978-0-85709-121-5 (2012).

#### 2013

**[SC-B4]:** A.J. Kemp, J.-M. Hopkins, J.E. Hastie, S. Calvez, Y. Zhang, E; Gu, M.D. Dawson and D. Burns, "Thermal management of lasers and LEDs using diamond", chapter 11 in *Optical Engineering of diamond*, ed. R. Mildren and J. Rabeau, Wiley-VCH, ISBN: 978-3-527-41102-3 (2013).

## Articles sans comité de lecture

### 2007

A.J. Kemp, J.E. Hastie, J.-M. Hopkins, S. Calvez, M.D. Dawson, D. Burns and T. Holt, "Semiconductor disk lasers: the future's bright; the colour's flexible", *The Laser User*, Issue 47, 34-37 (2007).

## Articles à comité de lecture

### 1999

**[SC1]:** X. Rejeaunier, S. Calvez, P. Mollier, H. Porte, J.-P. Goedgebuer, "A tunable mode-locked erbium-doped fibre lasing using a Lyot type tuner integrated in lithium niobate", *Optics Communications*, **185**, 375-380 (1999).

### 2001

**[SC2]:** S. Calvez, X. Rejeaunier, P. Mollier, J.-P. Goedgebuer, W. T. Rhodes, "Erbium-doped fiber laser tuning using two cascaded unbalanced Mach-Zehnder interferometers as intracavity filter : Numerical analysis and experimental confirmation", *IEEE Journal of Lightwave of Technology*, **19** (6), 893-896 (2001).

### 2002

**[SC3]:** S. Calvez, D. Burns, M.D. Dawson, "Optimisation of an optically-pumped 1.3  $\mu\text{m}$  GaInNAs vertical-cavity surface-emitting laser", *IEEE Photonics Technology Letters*, **14** (2), 131-133 (2002).

**[SC4]:** H.D. Sun, G.J. Valentine, R. Macaluso, S. Calvez, D. Burns, M.D. Dawson, T. Jouhti, M. Pessa, "Low-loss 1.3 $\mu\text{m}$  GaInNAs saturable Bragg reflector for high-power picosecond neodymium lasers", *Optics Letters*, **27** (3), 2124-2126 (2002).

### 2003

**[SC5]:** S. Calvez, A.H. Clark, J.-M. Hopkins, R. Macaluso, P. Merlin, H.D. Sun, M.D. Dawson, T. Jouhti, M. Pessa, "1.3 $\mu\text{m}$  GaInNAs optically-pumped Vertical Cavity Semiconductor Optical Amplifier (VCSOA)", *IEE Electronics Letters*, **39** (1), 100-102 (2003).

**[SC6]:** R. Macaluso, F. Robert, A.C. Bryce, S. Calvez, M.D. Dawson, "Resonant wavelength control of a 1.3 $\mu\text{m}$  microcavity by intracavity steam oxidation", *Semiconductor Science and Technology*, **18**, L12-15 (2003).

**[SC7]:** R. Macaluso, F. Robert, A.C. Bryce, S. Calvez, M.D. Dawson, "Microreflectivity studies of wavelength control in oxidised AlGaAs microcavities", *Materials Science and Engineering B*, **102** (1-3), 317-322 (2003).

**[SC8]:** J.E. Hastie, J.-M. Hopkins, S. Calvez, C.-W. Jeon, D. Burns, R. Abram, E. Riis, A.I. Ferguson and M.D. Dawson, "0.5W single transverse mode operation of 850-nm diode-pumped surface emitting laser", *IEEE Photonics Technology Letters*, **15** (7), 894-896 (2003).

**[SC9]:** J.E. Hastie, J.-M. Hopkins, C.-W. Jeon, S. Calvez, D. Burns, M.D. Dawson, R. Abram, E. Riis, A.I. Ferguson, W.J. Alford, T.D. Raymond and A.A. Allerman, "Microchip vertical external cavity surface emitting lasers", *IEE Electronics Letters*, **38** (18), 1324-1326 (2003).

**[SC10]:** H.D. Sun, R. Macaluso, S. Calvez, M.D. Dawson, F. Robert, A.C. Bryce, J.H. Marsh, P. Gilet, L. Grenouillet, A. Million, "Selective modification of the bandgaps of GaInNAs/GaAs structures by quantum well intermixing techniques", *Materials Science and Engineering C*, **23** (6-8), 983-987 (2003).

**[SC11]:** H.D. Sun, R. Macaluso, S. Calvez, M.D. Dawson, F. Robert, A.C. Bryce, J.H. Marsh, P. Gilet, L. Grenouillet, A. Million, K.B. Nam, J.Y. Lin, and H.X. Jiang, "Quantum well intermixing in GaInNAs/GaAs structures", *Journal of Applied Physics*, **94** (12), 7581-7585 (2003).

## 2004

**[SC12]:** J.-M. Hopkins, S.A. Scott, D. Burns, S. Calvez and M.D. Dawson, "A 0.6W CW GaInNAs vertical external cavity surface emitting laser emitting at 1.32 $\mu$ m", *IEE Electronics Letters*, **40** (1), 30-31 (2004).

**[SC13]:** A.H. Clark, N. Laurand, R. Macaluso, S. Calvez, M.D. Dawson, T. Jouhti, J. Kontinen and M. Pessa, "Long-wavelength GaInNAs monolithic vertical-cavity semiconductor optical amplifiers", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **40** (7), 878-883 (2004).

**[SC14]:** S.A. Smith, J.-M. Hopkins, J.E. Hastie, D. Burns, S. Calvez, M. D. Dawson, T. Jouhti, J. Kontinen, and M. Pessa, "A diamond-microchip GaInNAs vertical external-cavity surface-emitting laser operating CW at 1315nm", *IEE Electronics Letters*, **40** (15), 935-937 (2004).

**[SC15]:** H.D. Sun, R. Macaluso, S. Calvez, G.J. Valentine, D. Burns, M.D. Dawson, K. Gundogdu, K.C. Hall, and T.F. Boggess, T. Jouhti, and M. Pessa, "Effect of rapid thermal annealing on the optical properties of low-loss 1.3  $\mu$ m GaInNAs/GaAs saturable Bragg reflectors", *Journal of Applied Physics*, **96** (3), 1418-1424 (2004).

**[SC16]:** S. Calvez, J.-M. Hopkins, S.A. Smith, A.H. Clark, R. Macaluso, H.D. Sun, M.D. Dawson, T. Jouhti, M. Pessa, K. Gundogdu, K.C. Hall and T.F. Boggess, "GaInNAs/GaAs Bragg-mirror-based structures for novel 1.3 $\mu$ m device applications", *Journal of Crystal Growth*, **268** (3-4), 457-465 (2004).

**[SC17]:** S. Calvez, N. Laurand, S.A. Smith, A.H. Clark, J.-M. Hopkins, H.D. Sun, M.D. Dawson, T. Jouhti, J. Kontinen, M. Pessa, "Novel 1.3 $\mu$ m GaInNAs surface-normal devices", *IEE Proceedings Optoelectronics*, **151** (5), 442-446 (2004).

**[SC18]:** H. D. Sun, A. H. Clark, S. Calvez, M. D. Dawson, H. Y. Liu, M. Hopkinson, P. Navaretti, M. Gutierrez, J. S. Ng, J. P. R. David, P. Gilet, L. Grenouillet, and A. Million, "Investigations of 1.55  $\mu$ m GaInNAs/GaAs heterostructures by optical spectroscopy", *IEE Proceedings Optoelectronics*, **151** (5), 331-334 (2004).

**[SC19]:** H.D. Sun, A.H. Clark, H.Y. Liu, M. Hopkinson, S. Calvez, M.D. Dawson, Y.N. Qiu, J.M. Rorison, "Optical characteristics of 1.55 $\mu$ m GaInNAs multiple quantum wells", *Applied Physics Letters*, **85** (18), 4013-4015 (2004).

## 2005

**[SC20]:** H.D. Sun, S. Calvez, M.D. Dawson, P. Gilet, L. Grenouillet, A. Million, "Photoluminescence characteristics of 1.5  $\mu$ m Ga<sub>(1-x)</sub>In<sub>x</sub>N<sub>y</sub>As<sub>(1-y)</sub>/GaAs structures grown by molecular beam epitaxy", *Applied Physics A*, **80** (1), 9-12 (2005).

**[SC21]:** H.D. Sun, A.H. Clark, S. Calvez, M.D. Dawson, P. Gilet, L. Grenouillet, A. Million, "Investigation of phase-separated electronic states in 1.5  $\mu$ m GaInNAs/GaAs heterostructures by optical spectroscopy", *Journal of Applied Physics*, **97** (3), 033517 (2005)

**[SC22]:** H.D. Sun, A.H. Clark, S. Calvez, M.D. Dawson, Y.N. Qiu, J.M. Rorison, K.S. Kim, T Kim, Y.J. Park, "Spectroscopic characterization of 1.3 $\mu$ m GaInNAs quantum-well structures grown by metal-organic vapor phase epitaxy", *Applied Physics Letters*, **86** (9), 092106 (2005)

**[SC23]:** J.E. Hastie, S. Calvez, M.D. Dawson, T. Leinonen, A. Laakso, J. Lyytikainen, and M. Pessa, "High power CW red VECSEL with linearly polarised TEM<sub>0,0</sub> output", *Optics Express*, **13** (1), 77-81 (2005).

**[SC24]:** A.J. Kemp, G.J. Valentine, J.-M. Hopkins, J.E. Hastie, S.A. Smith, S. Calvez, M.D. Dawson, D. Burns, "Thermal management in Vertical-External-Cavity

Surface-Emitting lasers: finite-element analysis of a heatspreader approach", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **41** (2), 148-155 (2005).

**[SC25]**: N. Laurand, S. Calvez, M.D. Dawson, C. Bryce, T. Jouhti, J. Kontinnen, M. Pessa, "Performance comparison of GaInNAs vertical cavity semiconductor amplifiers", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **41** (5), 642-649 (2005).

**[SC26]**: H.D. Sun, A.H. Clark, S. Calvez, M.D. Dawson, K.S. Kim, T. Kim, Y.J. Park, "Effect of multilayer barriers on the optical properties of GaInNAs single quantum-well structures grown by metalorganic vapor phase epitaxy", *Applied Physics Letters*, **87** (2), 021903 (2005)

**[SC27]**: H.D. Sun, A.H. Clark, S. Calvez, M.D. Dawson, D.K. Shih, H.H. Lin, "Photoluminescence characterization of mid-infrared  $\text{In}_x\text{As}_{1-x}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$  multiquantum wells with various N contents", *Applied Physics Letters*, **87** (8): art. 081908 (2005)

**[SC28]**: J. E. Hastie, L. G. Morton, S. Calvez, and M. D. Dawson, T. Leinonen and M. Pessa, G. Gibson and M. J. Padgett, "Red microchip VECSEL array", *Optics Express*, **13** (18), 7209 – 7214 (2005)

**[SC29]**: N. Laurand, S. Calvez, M.D. Dawson, T. Jouhti, J. Kontinnen, M. Pessa, "Continuously tunable fibre-coupled tunable GaInNAs VCSEL", *Physics Status Solidi C*, **2** (11), 3895-3898 (2005).

**[SC30]**: A. McWilliam, A.A. Lagatsky, C.G. Leburn, P. Fischer, C.T.A. Brown, W. Sibbett, G.J. Valentine, A.J. Kemp, S. Calvez, D. Burns, M.D. Dawson, M. Pessa, W. Sibbett, "Low-loss GaInNAs saturable Bragg reflector for modelocking of a femtosecond  $\text{Cr}^{4+}$ :forsterite laser", *IEEE Photonics Technology Letters*, **17** (11), 2292- 2294 (2005).

**[SC31]**: N. Laurand, S. Calvez, M.D. Dawson, T. Kelly, "Index and gain dynamics of optically-pumped GaInNAs vertical-cavity semiconductor optical amplifiers", *Applied Physics Letters*, **87**, 231115 (2005).

**[SC32]**: H.D. Sun, S. Calvez, M.D. Dawson, J. Gupta, G.I. Sproule and Z.R. Wasilewski, "Role of Sb in the growth and optical properties of  $1.55\mu\text{m}$  GaInN(Sb)As/GaNAs quantum-well structures by molecular beam epitaxy", *Applied Physics Letters*, **87**, 181908 (2005).

**[SC33]**: Y.N. Qiu, J.M. Rorison, H.D. Sun, S. Calvez, M.D. Dawson, A.C. Bryce, "Influence of composition diffusion on the band structure of InGaAsN/GaAs quantum wells investigated by band-anticrossing model", *Applied Physics Letters*, **87**, 231112 (2005).

## 2006

**[SC34]**: N. Laurand, S. Calvez, H.D. Sun, M.D. Dawson, J. Gupta, G. Aers, "C-band emission from GaInNAsSb VCSEL on GaAs", *IEE Electronics Letters*, **42** (1), 29-30 (2006).

**[SC35]**: A.J. Kemp, A.J. Maclean, J.E. Hastie, S.A. Smith, J.-M. Hopkins, S. Calvez, G. Valentine, D. Burns and M.D. Dawson, "Thermal lensing, thermal management and transverse mode control in microchip VECSELs", *Applied Physics A*, **83** (2), 189-194 (2006).

**[SC36]**: J.-M. Hopkins, S. Calvez, A.J. Kemp, J.E. Hastie, S.A. Smith, A.J. Maclean, D. Burns and M.D. Dawson, "Thermal lensing, thermal management and transverse mode control in microchip VECSELs", *Physica Status Solidi C*, **3** (3), 380-385 (2006).

**[SC37]**: A. Harkonen, S. Suomalainen, E. Saarinen, L. Orsila, R. Koskinen, O. Okhotnikov, S. Calvez, and M.D. Dawson, "4W single transverse mode VECSEL utilising intracavity diamond heat spreader", *IEE Electronics Letters*, **42** (12), 693-694 (2006).

**[SC38]**: N. Laurand, S. Calvez, M.D. Dawson and A.E. Kelly, "Slow-light in a Vertical-Cavity Semiconductor Optical amplifier", *Optics Express*, **14** (15), 6858-6863 (2006).

**[SC39]:** H.D. Sun, S. Calvez, M.D. Dawson, J. A. Gupta, G.C. Aers and G.I. Sproule, "Thermal quenching mechanism of photoluminescence in 1.55  $\mu\text{m}$  GaInNAsSb /Ga(N)As quantum-well structures", *Applied Physics Letters*, **89** (10), art. 101909 (2006).

**[SC40]:** S. Giet, H.D. Sun, S. Calvez, M.D. Dawson, S. Suomalainen, A. Härkönen, M. Guina, O. Okhotnikov, and M. Pessa, "Spectral narrowing and locking of a Vertical External-Cavity Surface-Emitting Lasers using an intra-cavity volume Bragg grating", *IEEE Photonics Technology Letters*, **18** (13-16), 1786-1788 (2006).

**[SC41]:** F. van Loon, A.J. Kemp, A.J. MacLean, S. Calvez, J.-M. Hopkins, J.E. Hastie, M.D. Dawson, and D. Burns, "Intracavity diamond heatspreaders in lasers: the effects of birefringence", *Optics Express*, **14** (20), 9250-9260 (2006).

## 2007

**[SC42]:** N. Laurand, C.L. Lee, E. Gu, J.E. Hastie, S. Calvez, M.D. Dawson, "Microlensed Microchip VECSEL", *Optics Express*, **15** (15), 9341-9346 (2007).

**[SC43]:** N. Laurand, B. Guilhabert, E. Gu, S. Calvez, M.D. Dawson, "Tunable single-mode fiber-VCSEL using an intracavity polymer lens", *Optics Letters*, **32** (19), 2831-2833 (2007).

**[SC44]:** A.J. Kemp, A.J. Maclean, J.-M. Hopkins, J.E. Hastie, S. Calvez, M.D. Dawson and D. Burns, "Thermal management of disc lasers: doped dielectric and semiconductor gain media in thin-disc and microchip formats", *Journal of Modern Optics*, **54** (12), 1669-1676 (2007).

**[SC45]:** J.-M. Hopkins, R.D. Preston, A.J. Maclean, S. Calvez, H. Sun, J. Ng, M. Steer, M. Hopkinson, and D. Burns, "High performance 2.2 $\mu\text{m}$  optically-pumped vertical external-cavity surface-emitting laser", *Journal of Modern Optics*, **54** (12), 1677-1683 (2007).

**[SC46]:** S. Giet, C.L. Lee S. Calvez, M.D. Dawson, N. Destouches, J.-C. Pommier, O. Parriaux, "Stabilization of a semiconductor disk laser using an intra-cavity high reflectivity grating", *Optics Express*, **15** (25), 16520-16526 (2007).

## 2008

**[SC47]:** A. Maclean, A.J. Kemp, S. Calvez, J.-Y. Kim, T. Kim, M.D. Dawson, D. Burns, "Continuous tuning efficient intracavity second harmonic generation in a semiconductor disk laser with an intracavity heatspreader", *IEEE Journal Quantum Electronics*, **44** (3), 216-225 (2008).

**[SC48]:** S. Calvez, N. Laurand, H.D. Sun, J. Weda, D. Burns, M.D. Dawson, A. Harkonen, T. Jouthi, M. Pessa, M. Hopkinson, D. Poitras, J.A. Gupta, C.G. Leburn, C.T.A. Brown, W. Sibbett, "GaInNAs(Sb) surface normal devices", *Physics Status Solidi a*, **205** (1), 85-92 (2008).

**[SC49]:** Y.N. Qiu, H.D. Sun, J.M. Rorison, S. Calvez, M.D. Dawson, A.C. Bryce, "Quantum well intermixing influence on GaInNAs/GaAs quantum well laser gain: theoretical study", *Semiconductor Science and Technology*, **23** (9), 095010 (2008).

**[SC50]:** N. Laurand, H.D. Sun, S. Calvez and M.D. Dawson, "Array-format microchip semiconductor disk lasers", *IEEE Journal Quantum Electronics*, **44** (11), 1096-1103 (2008).

**[SC51]:** S.L. Vetter, J.E. Hastie, V.-M. Korpjarvi, J. Puustinen, M. Guina, O. Okhotnikov, S. Calvez, and M.D. Dawson, "Short Wavelength GaInNAs/GaAs semiconductor disk lasers", *IEEE Electronics Letters*, **44** (18), 1069-1070 (2008).

**[SC52]:** N.K. Metzger, C.G. Leburn, A.A. Lagatski, C.T.A. Brown, W. Sibbett, S. Calvez, D. Burns, H.D. Sun, M.D. Dawson, M. Le Du et J.-C. Harmand, "Femtosecond pulse generation from a Cr<sup>4+</sup>:YAG laser using a GaInNAsSb SESAM", *Optics Express*, **16** (23), 18739-18744 (2008).

## 2009

- [SC53]: S. Calvez, J.E. Hastie, M. Guina, O. Okhotnikov, M.D. Dawson, "Semiconductor disk laser for the generation of visible and ultra-violet radiation", *Laser and Photonics Review*, **3** (5), 407-434 (2009).
- [SC54]: N. Laurand, C.-L. Lee, E. Gu, S. Calvez, M.D. Dawson, "Power-scaling of diamond micro-lensed microchip semiconductor disk lasers", *IEEE Photonics Technology Letters*, **21** (3), 152-154 (2009).
- [SC55]: V.G. Savitski, D. Burns, S. Calvez, "Optically-pumped saturable absorber for fast switching between continuous-wave and passively modelocked regimes of a Nd:YVO<sub>4</sub> laser", *Optics Express*, **17** (7), 5373-5378 (2009).
- [SC56]: N. Laurand, S. Calvez, M.D. Dawson, S. Bouchoule, J.-C. Harmand, J. Decobert, "Tunable doped-fibre Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers", *IEE Electronics Letters*, **45** (17), 887-888 (2009).
- [SC57]: A.A. Lagatsky, F. Fusari, S. Calvez, J.A. Gupta, C.T.A. Brown, M.D. Dawson, W. Sibbett, "Passive mode-locking of a Tm,Ho:KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> laser around 2μm", *Optics Letters*, **34** (17), 2587-2589 (2009).
- [SC58]: P.J. Schlosser, J.E. Hastie, S. Calvez, A.B. Krysa, M.D. Dawson, "InP/AlGaInP quantum dot semiconductor disk lasers for CW TEM<sub>00</sub> emission at 716-755 nm", *Optics Express*, **17** (24), 21782-21787 (2009).
- [SC59]: P.A. Loiko, K.V. Yumashev, N.V. Kuleshov, V.G. Savitski, S. Calvez, D. Burns, A.A. Pavlyuk, "Thermal lens study in diode pumped N<sub>g</sub>- and N<sub>p</sub>-cut Nd:KGd(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> laser crystals", *Optics Express*, **17** (26), 23536-23543 (2009).

## 2010

- [SC60]: A.A. Lagatsky, F. Fusari, S. Calvez, S.V. Kurilchik, V.E. Kisel, N.V. Kuleshov, M.D. Dawson, C.T.A. Brown, W. Sibbett, "Femtosecond pulse operation of a Tm,Ho co-doped crystalline laser near 2μm", *Optics Letters*, **35** (2), 172-174 (2010).
- [SC61]: V.G. Savitski, P. Schlosser, J.E. Hastie, A.B. Krysa, J.S Roberts, M.D. Dawson, S. Calvez, "Passive mode-locking of a Ti:sapphire laser by InGaP quantum dot saturable absorber", *IEEE Photonics Technology Letters*, **22** (4), 209-211 (2010).
- [SC62]: V.S. Savitski, J.E. Hastie, S. Calvez, M.D. Dawson, "Cavity dumping of a semiconductor disk laser for the generation of wavelength-tunable micro-Joule nanosecond pulses", *Optics Express*, **18** (11), 11933-11941 (2010).
- [SC63]: F. Fusari, S. Vetter, B. Richards, A.A. Lagatsky, A. Jha, M.D. Dawson, S. Calvez, W. Sibbett, C.T.A. Brown, "Tunable laser operation of a Tm<sup>3+</sup>-doped tellurite glass laser near 2μm pumped by a 1211nm semiconductor disk laser", *Optical Materials*, **32**, 1007-1010 (2010).
- [SC64]: V.S. Savitski, D. Burns, S. Calvez, "Optically-pumped saturable Bragg reflectors: non-linear spectroscopy and application in ultrafast lasers", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **46** (11), 1650-1655 (2010).
- [SC65]: A.A. Lagatsky, X. Han, M.D. Serrano, C. Cascales, C. Zaldo, S. Calvez, M.D. Dawson, J.A. Gupta, C.T.A. Brown, W. Sibbett, "191-fs Tm-Ho:NaY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> lasers", *Optics Letters*, **35** (18), 3027-3029 (2010).
- [SC66]: F. Fusari, A.A. Lagatsky, G. Jose, S. Calvez, A. Jha, M.D. Dawson, J.A. Gupta, W. Sibbett, C.T.A. Brown, "Femtosecond mode-locked Tm<sup>3+</sup> and Tm<sup>3+</sup>-Ho<sup>3+</sup> doped 2μm glass lasers", *Optics Express*, **18** (21), 22090-22098 (2010).

## 2011

**[SC67]:** Y. Zhang, L.J. McKnight, Z. Tian, S. Calvez, E. Gu and M.D. Dawson, "Large cross-section edge-coupled diamond waveguides", *Diamond and Related Materials*, **20**, 564-567 (2011).

**[SC68]:** L.J. Mcknight, M.D. Dawson and S. Calvez, "Diamond Raman rib waveguide lasers: feasibility and evaluation of potential with analytical scattering loss calculation", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **47** (8), 1069-1077 (2011).

**[SC69]:** A.A. Lagatsky, C.T.A. Brown, W. Sibbett, S. Calvez, M.D. Dawson, J.A. Gupta, "Broadly tunable femtosecond mode locking in a Tm:KYW laser near 2 $\mu$ m", *Optics Express*, **19** (10), 9995-10000 (2011).

**[SC70]:** Y. Zhang, L.J. McKnight, E. Engin, I.M. Watson, M. Cryan, M. Thomson, S. Calvez, J. O'Brien and M.D. Dawson, "GaN directional couplers for integrated quantum photonics", *Applied Physics Letters*, **99**, 161119 (2011).

## 2012

**[SC71]:** S.L. Vetter, and S. Calvez, "Thermal management of near-infrared semiconductor disk lasers with lattice (mis)-matched AlGaAs mirrors", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **48** (3), 345-352 (2012).

**[SC72]:** V.G. Savitski, N.K. Metzger, S. Calvez, D. Burns, W. Sibbett and C.T.A. Brown, "Optical-trapping with "on-demand" two-photon luminescence using Cr:LiSAF laser with optically-addressed saturable Bragg reflector", *Optics Express*, **20** (7), 7066-7070 (2012).

**[SC73]:** C. Crombie, D. A. Walsh, W. Lu, S. Zhang, Z. Zhang, K. Kennedy, S. Calvez, W. Sibbett and C.T.A. Brown, "Electrically-controlled Rapid Femtosecond Pulse Duration Switching in an Ultrafast Cr<sup>4+</sup>:forsterite Laser", *Optics Express*, **20** (16), 18138-18144 (2012).

**[SC74]:** X. Buet, A. Guelmami, A. Monmayrant, S. Calvez, C. Tourte, F. Lozes-Dupuy and O. Gauthier-Lafaye, "Wavelength-stabilised external-cavity laser diode using a Cavity Resonator Integrated Guided Mode Filter", *IEE Electronics Letters*, **48** (25), 1619-1621 (2012).

## 2013

**[SC75]:** S. L. Vetter, Y. Zhang, E. Gu, M. D. Dawson and S. Calvez, "Power-scaling properties of apertured microchip Vertical External-Cavity Surface-Emitting Lasers", *IEE Electronics Letters*, **49** (2), 146-148 (2013).

**[SC76]:** Y. Qiu, W. Lu, and S. Calvez, "Quantum confinement stark effect of different GaInNAs quantum well structures", *Advanced Material Research*, **73**, 622-627 (2013).

## 2014

**[SC77]:** F. Chouchane, H. Makhloufi, S. Calvez, C. Fontaine and G. Almuneau, "Photoluminescence from InGaAs/GaAs quantum well regrown on a buried patterned oxidized AlAs layer", *Applied Physics Letters*, **104**, 061912 (2014).

## 2015

[SC78]: S. Calvez, G. Lafleur, A. Larrue, P.-F. Calmon, A. Arnoult, G. Almuneau and O. Gauthier-Lafaye, "Vertically-coupled microdisk resonators using AlGaAs/AlOx technology", accepted for publication in *IEEE Photonics Technology Letters*, DOI : 10.1109/LPT.2015.2405031 (2015)

## Articles de conférences à comité de lecture

### 2000

[SC79]: S. Calvez, X. Rejeaunier, P. Mollier and J.-P. Goedgebuer, "Generation of multiwavelength pulses from an erbium doped fibre laser", *Conference on Lasers and Electro-Optics, CLEO Europe 2000, Nice (France)*, Poster CThE52, 2000.

[SC80]: S. Calvez, P. Mollier, X. Rejeaunier and J.-P. Goedgebuer, "Génération d'impulsions multicolores par un laser à fibre dopée erbium", *Journées Nationales de l'Optique Guidée (JNOG), Limoges (France)*, 2000.

### 2001

[SC81]: S. Calvez, P. Mollier and J.-P. Goedgebuer, "Etude numérique d'un laser à fibre dopée erbium accordable par voie électro-optique," *Journées Nationales de l'Optique Guidée (JNOG), Toulouse (France)*, Affiche A2, (2001).

[SC82]: S. Calvez, D. Burns and M.D. Dawson, "Efficient optically pumped 1.3 $\mu$ m GaInNAs VCSELs", *European Workshop on Gallium Arsenide based lasers at 1300nm, Lecce (Italy)*, (2001).

[SC83]: S. Calvez, D. Burns and M.D. Dawson, "Optimised design of optically-pumped 1.3 $\mu$ m VCSELs", *15th National Quantum Electronics and Photonics Meeting (QEP-15), Glasgow(UK)*, (2001).

[SC84]: S. Calvez, "Optical amplification and lasing in 1.3 $\mu$ m GaInNAs/GaAs microcavity structures", *Rank Prize Funds Mini-Symposium on broadband optical amplifiers, Grasmere (UK)*, (2001).

[SC85]: S. Calvez, J.-M. Hopkins, D. Burns and M.D. Dawson, "1.3 $\mu$ m optically-pumped surface-emitting lasers", *Symposium on current trends in semiconductor physics and optoelectronic technologies (2001), Tampere (Finland)*, (2001).

### 2002

[SC86]: S. Calvez, J.-M. Hopkins and M.D. Dawson, "Optically-pumped 1.3 $\mu$ m GaInNAs vertical cavity surface-emitting lasers", *PHOTON '02 Conference, Cardiff (UK)*, paper LWL2.4, (2002).

[SC87]: S. Calvez, A.H. Clark, J.-M. Hopkins, P. Merlin, H.D. Sun, M.D. Dawson, T. Jouhti and M. Pessa, "Amplification and laser action in diode-pumped 1.3 $\mu$ m GaInNAs vertical-cavity structures", *LEOS 2002 Annual meeting, Glasgow (UK)*, paper TuC4 (2002).

[SC88]: J.E. Hastie, C. W. Jeon, D. Burns, J.-M. Hopkins, S. Calvez, R. Abram and M.D. Dawson, "A 0.5W, 850nm Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As VECSEL with intra-cavity silicon carbide heatspreader", *LEOS 2002 Annual meeting, Glasgow (UK)*, V1, pp165-166, paper TuC4 (2002).

[SC89]: J. E. Hastie, C. W. Jeon, D. Burns, J.-M. Hopkins, S. Calvez, R. Abram and M.D. Dawson, "A 0.5W, 850nm Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As VECSEL with intra-cavity silicon carbide

heatspreader", Technical digest of IOEC-QATS 2002 conference, paper LWD6 (2002).

**[SC90]:** H.D. Sun, R. Macaluso, S. Calvez, G.J. Valentine, D. Burns and M. D. Dawson, "1.3 $\mu$ m GaInNAs/GaAs Bragg-mirror-based structures for passive mode-locking of solid-state and semiconductor lasers", *International Research Workshop on Physics and Technology of dilute nitrides for optical communications, Istanbul (Turkey)*, (2002).

**[SC91]:** R. Macaluso, S. Calvez, F. Robert and M.D. Dawson, "Microreflectivity studies of wavelength control in oxidised AlGaAs microcavities", *E-MRS, Strasbourg (France)*, (2002).

**[SC92]:** A. Balocchi, R.J. Warburton, H.-J. Kutschera, K. Karrai, R.H. Abram, A.I. Ferguson, S. Calvez and M.D. Dawson, "A fiber-based vertically emitting semiconductor laser at 850nm", *LEOS Annual meeting 2002*, paper ThH2 (2002)

## 2003

**[SC93]:** S. Calvez, A. H. Clark, J.-M. Hopkins, R. Macaluso, P. Merlin, H. D. Sun, M. D. Dawson, T. Jouhti and M. Pessa, "Diode-pumped 1.3 $\mu$ m GaInNAs vertical-cavity semiconductor optical amplifier", *Semiconductor and integrated opto-electronics conference (SOIE)*, (2003).

**[SC94]:** S. Calvez, A. H. Clark, J.-M. Hopkins, R. Macaluso, P. Merlin, H.D. Sun, M.D. Dawson, T. Jouhti and M. Pessa, "1.3 $\mu$ m GaInNAs Monolithic Vertical-Cavity Semiconductor Optical Amplifier", *Indium Phosphide and Related Materials IPRM 2003*, paper WB1.3, 243-246 (2003).

**[SC95]:** J.E. Hastie, J.-M. Hopkins, S. Calvez, C.W. Jeon, D. Burns, M.D. Dawson, R. Abram and A.I. Ferguson, "Characteristics of high power VECSELs with silicon carbide heatspreaders", *CLEO Europe 2003*, paper CC1-4 (2003).

**[SC96]:** P. Merlin, S. Calvez, J.-M. Hopkins, H.D. Sun, M.D. Dawson, T. Jouhti and M. Pessa, "1.3 $\mu$ m CW GaInNAs VCSEL giving 4.1mW of single transverse mode power", *CLEO Europe 2003*, paper CC2-4 (2003).

**[SC97]:** M.D. Dawson, S. Calvez, P. Merlin, H.D. Sun, and J.-M. Hopkins, "GaInNAs/GaAs Bragg-mirror-based structures for novel 1.3 $\mu$ m device applications", **invited talk** for *International Conference on Materials for Advanced Technologies (ICMAT) 2003*, Singapore, paper H-3-2-I (2003).

## 2004

**[SC98]:** S.A. Smith, J.-M. Hopkins, H.D. Sun, S. Calvez, D. Burns, M.D. Dawson, "A microchip GaInNAs vertical external-cavity surface-emitting laser operating CW at 1.32 $\mu$ m", *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, paper CTuC5 (2004).

**[SC99]:** S. Calvez, N. Laurand, S.A. Smith, A.H. Clark, J.-M. Hopkins, H.D. Sun, M.D. Dawson, T. Jouhti, J. Kontinen, M. Pessa, "Novel 1.3 $\mu$ m GaInNAs surface-normal devices", *Conference of the European Research Material Society (EMRS)*, poster 0804 (2004).

**[SC100]:** H. D. Sun, A. H. Clark, S. Calvez, M.D. Dawson, H. Y. Liu, M. Hopkinson, P. Navaretti, M. Gutierrez, J. S. Ng, J. P. R. David, P. Gilet, L. Grenouillet, and A. Million, "Investigations of 1.55  $\mu$ m GaInNAs/GaAs heterostructures by optical spectroscopy", *Conference of the European Research Material Society (EMRS)*, poster 0736 (2004).

**[SC101]:** N. Laurand, S. Calvez, T. Jouhti, M. Pessa, "External Optical Feedback Effects on the Performance of Vertical Cavity Semiconductor Optical Amplifiers", *PHOTON'04*, oral presentation 000008 (2004).

**[SC102]:** S.A. Smith, J.-M. Hopkins, H.D. Sun, S. Calvez, D. Burns, M.D. Dawson, "A microchip GaInNAs vertical external-cavity surface-emitting laser operating CW at 1315nm", *PHOTON'04*, oral presentation 000012 (2004).

## 2005

- [SC103]:** A. McWilliam, C. G. Leburn, A. A. Lagatsky, C. T. Brown, W. Sibbett, G. J. Valentine, A. J. Kemp, S. Calvez, D. Burns, M. D. Dawson, J. Kontinen, T. Jouhti, M. Pessa, "Femtosecond Cr:Forsterite laser modelocked with a GaInNAs Saturable Bragg Reflector", *Advanced Solid State Photonics Topical meeting 2005*, poster TuB1 (2005).
- [SC104]:** J.E. Hastie, S. Calvez, H.D. Sun, M.D. Dawson, T. Leinonen, M. Pessa, "High Power, Continuous Wave Operation of a Vertical External Cavity Surface Emitting Laser at 674nm", *Advanced Solid State Photonics Topical meeting 2005*, oral presentation WC2 (2005).
- [SC105]:** A.J. Kemp, J.E. Hastie, S.A. Smith, J.-M. Hopkins, S. Calvez, G.J. Valentine, M.D. Dawson, D. Burns, "Heatspreader-based thermal management in VECSELs: Thermal lensing in microchip devices", *Advanced Solid State Photonics Topical meeting 2005*, poster MB34 (2005).
- [SC106]:** N. Laurand, S. Calvez, M.D. Dawson, T. Jouhti, J. Kontinen, M. Pessa, "1.3- $\mu$ m Continuously-Tunable Fiber-Coupled GaInNAs VCSEL", *CLEO 2005*, paper CWI 5 (2005)
- [SC107]:** J.E. Hastie, S. Calvez, M.D. Dawson, T. Leinonen and M. Pessa, "0.3W CW red microchip VECSEL", *CLEO 2005*, paper CWI 6 (2005)
- [SC108]:** H.D. Sun, A.H. Clark, J.-M. Hopkins, S. Calvez, D. Burns and M.D. Dawson, P.W. Liu and H. H. Lin, "Photoluminescence properties of dilute nitride InNAs/InGaAs multi-quantum wells for mid-infrared applications", *Indium Phosphide and Related Materials IPRM 2005*, poster TP31 (2005).
- [SC109]:** H.D. Sun, A.H. Clark, J.-M. Hopkins, S. Calvez, D. Burns and M.D. Dawson, K.S. Kim, T. Kim, and Y.J. Park, "Influence of strain-compensating and strain-mediating layers on the optical properties of MOVPE-grown GaInNAs single quantum-well structures", *Indium Phosphide and Related Materials IPRM 2005*, poster TP22 (2005).
- [SC110]:** N. Laurand, S. Calvez, M.D. Dawson, T. Jouhti, J. Kontinen, M. Pessa, "14.5-nm emission tuning from a fiber-coupled GaInNAs VCSEL", *Indium Phosphide and Related Materials IPRM 2005*, p287-290 (2005)
- [SC111]:** S.A. Smith, S. Calvez, J.-M. Hopkins, J.E. Hastie, A.J. Kemp, H.D. Sun, D. Burns, and M.D. Dawson, "Polarisation and modal characteristics of a 1.3 $\mu$ m diamond-microchip GaInNAs vertical external-cavity surface-emitting laser", *CLEO Europe 2005*, poster CB-17-MON (2005).

## 2006

- [SC112]:** A.J. Maclean, A.J. Kemp, J.-M. Hopkins, J.E. Hastie, S. Giet, S. Calvez, M.D. Dawson, D. Burns, J.Y. Kim, K.-S. Kim and T. Kim, "An analysis of power scaling and thermal management in 1060nm VECSELs with diamond heatspreader", *CLEO 2006*, poster JWB21 (2006).
- [SC113]:** N. Laurand, S. Calvez, M.D. Dawson, J.A. Gupta, G.C. Aers, "1550nm pulsed operation of a GaInNAsSb VCSEL", *CLEO 2006*, oral presentation CTuX5 (2006).
- [SC114]:** H.D. Sun, S. Calvez, M.D. Dawson, J.A. Gupta, G.I. Sproule, X. Wu and Z.R. Wasilewski, "Spectroscopic characterization of 1.5  $\mu$ m GaInN(Sb)As/GaNAs quantum-well structures by molecular-beam epitaxy", *International Conference of Physics of Semiconductor*, oral presentation TuA3-J5 (2006).
- [SC115]:** S. Giet, H.D. Sun, S. Calvez, M.D. Dawson, S. Suomalainen, A. Härkönen, M. Guina, O. Okhotnikov, and M. Pessa, "Spectral narrowing and locking of a Vertical External-Cavity Surface-Emitting Lasers using a Volume Bragg Grating", *Photon 06 - QEP*, Wed 06/09/06 – 16:45 (2006).

[**SC116**]: J.-M. Hopkins, A.J. Maclean, D. Burns, J. Ng, M. Hopkinson, S. Calvez, and H.D. Sun, "High performance 2.2 $\mu$ m optically-pumped Vertical External Cavity Surface Emitting Laser", *Photon 06 - QEP*, Thur 07/09/06 – 11:30 (2006).

[**SC117**]: C.G. Leburn, A.D. McRobbie, A.A. Lagatsky, C.T.A. Brown, W. Sibbett, S. Calvez, D. Burns, M.D. Dawson, J.A. Gupta, G.C. Aers, "Self-starting femtosecond Cr<sup>4+</sup>:YAG laser mode locked with a GaInNAs saturable Bragg reflector", *Photon 06 - QEP*, oral presentation Wed 06/09/06 – 16:15 (2006).

[**SC118**]: A. Kemp, A.J. Maclean, J.-M. Hopkins, J.E. Hastie, S. Giet, S. Calvez, M.D. Dawson, D. Burns, "Thermal management in disk lasers: doped-dielectric and semiconductor laser gain media in thin-disk and microchip formats", *Photon 06 - QEP*, poster 2.22 (2006).

[**SC119**]: N. Laurand, S. Calvez, M.D. Dawson, and A.E. Kelly, "Slow light in a 1300nm GaInNAs Vertical Cavity Semiconductor Optical Amplifier", *LEOS Annual meeting 2006*, oral presentation MA4 (2006).

[**SC120**]: S. Giet, H.D. Sun, S. Calvez, M.D. Dawson, S. Suomalainen, A. Härkönen, M. Guina, O. Okhotnikov, and M. Pessa, "Spectral narrowing and locking of a Vertical External-Cavity Surface-Emitting Lasers using a Volume Bragg Grating", *LEOS Annual meeting 2006*, oral presentation WZ1 (2006).

## 2007

[**SC121**]: S. Calvez, S. Giet, A.J. Kemp, J.E. Hastie, M.D. Dawson, T. Jouhti, J. Kontinnen, and M. Pessa, "Tunable red laser emission by intra-cavity doubling of a GaInNAs VECSEL", *CLEO 07*, oral presentation CMFF2 (2007).

[**SC122**]: S. Calvez and M.D. Dawson, "Optoelectronic devices based on dilute nitrides", *EMRS spring meeting 2007- Symposium F, invited talk F-6.1* (2007).

[**SC123**]: N. Laurand, C.L. Lee, E. Gu, J.E. Hastie, S. Calvez, M.D. Dawson, S. Suomalainen, M. Guina, O. Okhotnikov, and M. Pessa, "Microchip Vertical-External Cavity Surface Emitting Laser using a concave-shaped diamond micromirror", *CLEO Europe 2007*, oral presentation CB-614 (2007).

[**SC124**]: S. Giet, S. Calvez, M.D. Dawson, N. Destouches, O. Parriaux, S. Suomalainen, M. Guina, O. Okhotnikov, and M. Pessa, "Stabilisation of a Vertical External-Cavity Surface-Emitting Laser using an intra-cavity high-reflectivity grating", *CLEO Europe 2007*, oral presentation CB-506 (2007).

[**SC125**]: N. Laurand, B. Guilhabert, E. Gu, S. Calvez, M.D. Dawson, "Tunable fiber-VCSEL with an intracavity polymer microlens", *LEOS Annual meeting 2007*, oral presentation WZ4 (2007).

## 2008

[**SC126**]: S. Giet, A.J. Kemp, D. Burns, S. Calvez, M.D. Dawson, S. Suomalainen, A. Harkonen, M. Guina, O. Okhotnikov, and M. Pessa, "Comparison of thermal management techniques for semiconductor disk lasers", proceedings of SPIE (*Photonics West – LASE 2008*), **6871**, 687116 (2008).

[**SC127**]: J.A. Gupta, S. Calvez, J. Weda, D. Burns, D. Poitras, and G.C. Aers, "Characteristics of GaInNAsSb/GaAs VCSELs Operating Near 1.55 $\mu$ m", proceedings of SPIE (*Photonics West – OPTO 2008*), **6908**, 69080E (2008).

[**SC128**]: S. Calvez, J.E. Hastie, S. Vetter and M.D. Dawson, "Short-wavelength GaInNAs semiconductor disk lasers", *CLEO 2008*, oral presentation CWD1 (2008).

[**SC129**]: P. Roth, A.J. MacLean, A.J. Kemp, S. Calvez, M.D. Dawson and D. Burns, "Efficiency and beam quality analysis of a semiconductor disk laser", *CLEO 2008*, oral presentation CWD3 (2008).

[**SC130**]: P. Schlosser, S. Calvez, J.E. Hastie, S. Jin, T. Germann, A. Strittmatter, U.W. Pohl, D. Bimberg and M.D. Dawson, "", *CLEO 2008*, oral presentation CWD5 (2008).

**[SC131]:** N. Laurand, C.L. Lee, E. Gu, S. Calvez and M.D. Dawson, "Longitudinal mode selection in a fiber-coupled microlensed microchip VECSEL", *CLEO 2008*, poster JThA6 (2008).

**[SC132]:** C.G. Leburn, N.K. Metzger, C.T.A. Brown, W. Sibbett, S. Calvez, D. Burns, H.D. Sun, M.D. Dawson, M. Le Dû and J.-C. Harmand, "Femtosecond pulse generation at 1530nm using a GaInNAsSb SESAM", *CLEO 2008*, oral presentation CFP5 (2008).

**[SC133]:** S.L. Vetter, S. Calvez, M.D. Dawson, L. Bigot, I. Razdobreev, and G. Bouwmans, "Amplification characteristics of bismuth-doped silica fibres", *Europhoton 2008*, poster Thp.2 (2008).

**[SC134]:** S.L. Vetter, S. Calvez, M.D. Dawson, F. Fusari, A.A. Lagatski, W. Sibbett, C.T.A. Brown, V.-M. Korpijarvi, M. Guina, B. Richards, G. Jose and A. Jha, "1213nm Semiconductor disk laser pumping of a Tm<sup>3+</sup>-doped tellurite glass", *Laser and Electro-Optics Society Annual meeting 2008*, oral presentation ThS 4 (2008).

## 2009

**[SC135]:** S.L. Vetter, S. Calvez, M.D. Dawson, F. Fusari, A.A. Lagatski, W. Sibbett, C.T.A. Brown, V.-M. Korpijarvi, M. Guina, B. Richards, G. Jose and A. Jha, "GaInNAs Semiconductor disk lasers as pump sources for Tm<sup>3+</sup>(-Ho<sup>3+</sup>)-doped glass, crystal and fibre lasers", proceedings of SPIE (*Photonics West- Lase 2009*), **7193**, 719347 (2009).

**[SC136]:** M.D. Dawson, J.E. Hastie, S. Calvez, N. Laurand, D. Burns, A.J. Kemp "Semiconductor Disk Lasers: Recent developments in bulk and microlasers", *Advanced Solid-State Photonics 2009*, **invited talk** ME1 (2009).

**[SC137]:** S. Calvez, "Semiconductor Disk Lasers: Introduction and recent progress", *Young Optical Society Conference 2009 - Moscow*, **invited talk** number 2 (2009).

**[SC138]:** N. Laurand, S. Calvez, M.D. Dawson, S. Bouchoule, J.-C. Harmand, J. Decobert, "1.55- $\mu$ m tunable doped-fiber vertical-cavity surface-emitting laser", *European Conference on Lasers and Electro-Optics (ECLEO) 2009*, oral presentation CB13.3 (2009).

**[SC139]:** V. Savitski, D. Burns, and S. Calvez, "Fast switching between continuous wave and passively mode-locked regimes of Nd:YVO<sub>4</sub> and Cr:LiSAF lasers", *European Conference on Lasers and Electro-Optics (ECLEO) 2009*, oral presentation CA8.1 (2009).

**[SC140]:** A.A. Lagatsky, F. Fusari, C.T.A. Brown, W. Sibbett, S. Calvez, M.D. Dawson and J.A. Gupta, "Passively mode-locked Tm,Ho:KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> laser around 2 $\mu$ m", *European Conference on Lasers and Electro-Optics (ECLEO) 2009*, oral presentation CA10.2 (2009).

**[SC141]:** V. Savitski, J.E. Hastie, D. Burns, M.D. Dawson, S. Calvez, A.B. Krysa, J.S. Roberts, "InGaP quantum dot saturable absorber for self-starting mode-locked operation of a Ti:sapphire laser", *European Optical Society Laser Meeting 2009*, TML 2147 (2009).

**[SC142]:** V. Savitski, S. Calvez, P.A. Loiko, K.V. Yumashev, N.V. Kuleshov, A.A. Palyuk, D. Burns, "Thermal lensing in N<sub>g</sub> and b-cut Nd:KGd(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> laser crystals", *European Optical Society Laser Meeting 2009*, TML2231 (2009).

**[SC143]:** P.J. Schlosser, J.E. Hastie, S. Calvez, A.B. Krysa, and M.D. Dawson, "InP/GaN quantum dot semiconductor disk laser for TEM<sub>00</sub> emission at 740nm", *Laser and Electro-Optic Society (LEOS) Annual Meeting 2009*, oral presentation ThP 5 (2009).

**[SC144]:** S. Calvez, "Dilute nitrides for optical surface-normal operating devices", *COST MP0805 Delphi training school*, **invited lecture** (2009).

## 2010

- [**SC145**]: S.L. Vetter, N. Laurand, M. Guina, M.D. Dawson and S. Calvez, "~1200nm tunable fibre vertical-cavity surface-emitting laser", *Photonics West-Lase 2010*, Proceedings of SPIE, 7578, article 7578-33 (2010)
- [**SC146**]: A.J. Kemp, A.J. Maclean, P. Millar, J.-M. Hopkins, J.E. Hastie, S. Calvez, M.D. Dawson, and D. Burns, "Intracavity synthetic diamond: underpinning wavelength diversity in semiconductor disk lasers", *Advanced Solid State Photonics 2010 (ASSP2010)*, poster AWB3 (2010)
- [**SC147**]: A.A. Lagatsky, F. Fusari, C.T.A. Brown, S. Calvez, M.D. Dawson, V.E. Kisel, S.V. Kurilchik, N.V. Kuleshov, and J.A. Gupta, "Femtosecond modelocking of a Tm:Ho:KYW laser near 2 $\mu$ m", *Advanced Solid State Photonics 2010 (ASSP2010)*, poster ATuA1 (2010)
- [**SC148**]: P.J. Schlosser, J.E. Hastie, S. Calvez, A.B. Krysa, and M.D. Dawson, "Semiconductor disk lasers incorporating InP/GaInP quantum dots for 716-755 emission", *Advanced Solid State Photonics 2010 (ASSP2010)*, poster AWB5 (2010)
- [**SC149**]: L.J. Mcknight, Y. Zhang, Z. Tian, E. Gu, S. Calvez, and M.D. Dawson, "Large-cross section diamond waveguides", oral presentation at *Photon 2010*, (2010)
- [**SC150**]: Y. Zhang, L.J. Mcknight, Z. Tian, S. Calvez, E. Gu, and M.D. Dawson, "Large-cross section diamond waveguides: design, fabrication and characterisation", *Diamond 2010*, oral presentation DIA2010\_98 (2010)
- [**SC151**]: L.J. Mcknight and S. Calvez, "Gain-guided KYb(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> Laser", *Europhoton 2010*, poster WeP20 (2010)
- [**SC152**]: V.G. Savitski, J.E. Hastie, S. Calvez, and M.D. Dawson, "Micro-Joule cavity-dumped semiconductor disk laser", *Europhoton 2010*, oral presentation ThD4 (2010)
- [**SC153**]: S.L. Vetter, S. Calvez, and M.D. Dawson, "Thermal management of semiconductor disk lasers with lattice-(mis)matched AlGaAs mirrors", *Europhoton 2010*, poster TuP19 (2010)

## 2011

- [**SC154**]: V.G. Savitski, I.M. Ranieri, A.B. Krysa and S. Calvez, "Passively Q-switched Pr:YLF laser", *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2011*, oral presentation CMB7 (2011)
- [**SC155**]: C.G. Leburn, C.T.A. Brown, W. Sibbett, W. Liu, S. Calvez, M.D. Dawson, "Towards femtosecond GHz-repetition-rate operation of a Cr:fosterite laser using GaInNAs SESAMs", *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2011*, poster JWA76 (2011)
- [**SC156**]: S. Calvez, "GaInNAs(Sb) for solid-state laser engineering", DELSEM-PHOTON workshop at *International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON) 2011*, **Invited Talk** (2011)
- [**SC157**]: A.A. Lagatski, C.T.A. Brown, W. Sibbett, S. Calvez, M.D. Dawson, J.A. Gupta, "Highly efficient, broadly tunable 2- $\mu$ m femtosecond Tm:KYW laser", *European Conference on Lasers and Electro-Optics (ECLEO) 2011*, oral presentation CA3.1 (2011)
- [**SC158**]: L.J. McKnight, Y. Zhang, I.M. Watson, E. Gu, S. Calvez, M.D. Dawson, "GaN waveguides: Towards a new platform for integrated quantum photonics", *International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS) 2011*, poster PE2.14 (2011)
- [**SC159**]: Y. Zhang, L.J. McKnight, I.M. Watson, E. Gu, S. Calvez, M.D. Dawson, "Compact large-cross section GaN directional couplers", *IEEE Photonics Society Annual Meeting 2011*, oral presentation WB6 (2011)
- [**SC160**]: P. Tian, E. Xie, Z. Gong, Z. Chen, T. Yu, Y. Sun, S. Qi, Y. Chen, Y. Zhang, S. Calvez, E. Gu, G. Zhang and M. D. Dawson, "Flexible Vertical Structure

GaN-Based Light Emitting Diodes on an AuSn Substrate", Photonic Conference, oral presentation WS3 (2011)

## 2012

**[SC161]**: M.D. Dawson, J.E. Hastie, S. Calvez, "Monolithic approaches to VECSEL devices", *Photonics West- Lase 2012*, **Invited presentation**, PW12-LA116-37 (2012)

**[SC162]**: C. Crombie, D. A. Walsh, W. Lu, S. Zhang, Z. Zhang, K. Kennedy, S. Calvez, W. Sibbett and C.T.A. Brown, "Electrically-controlled Rapid Femtosecond Pulse Duration Switching in an Ultrafast Cr<sup>4+</sup>:forsterite Laser", *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2012*, paper CF2L (2012)

**[SC163]**: D. A. Walsh, C. Crombie, W. Sibbett, C.T.A. Brown, V.G. Savitski, D. Burns and S. Calvez, "Optically-induced switching between mode-locked and unmode-locked continuous wave regimes of a femtosecond Cr<sup>4+</sup>:forsterite laser", *Photonics Europe 2012*, **Invited presentation**, proc. of SPIE, **8433**, 844330G (2012)

**[SC164]**: S. Reilly, V.G. Savitski, W. Lu, A.J. Kemp, E. Clarke, and S. Calvez, "Study of bulk GaInNAs/GaAs material for application in passive Q-switching devices", *European Material Research Society (EMRS) – Spring Meeting – Symposium T*, poster 2-19 (2012)

**[SC165]**: W. Liu, C. Crombie, D. A. Walsh, Y.N. Qiu, S. Zhang, Z. Zhang, K. Kennedy, W. Sibbett and C.T.A. Brown, and S. Calvez, "Electrically-controlled GaInNAs Semiconductor Saturable Absorber Mirrors for ultrafast laser control", *European Material Research Society (EMRS) – Spring Meeting – Symposium T*, poster 2-20 (2012)

**[SC166]**: L.J. McKnight, and S. Calvez, "Reconfigurable integrated optics", *European Conference on Integrated Optics (ECIO) (2012)*

## 2013

**[SC167]**: X. Buet, A. Monmayrant, S. Calvez, C. Tourte, F. Lozes-Dupuy and O. Gauthier-Lafaye, "Design and performances of simplified external cavity laser diodes using CRIGF mirrors", *European Conference on Lasers and Electro-Optics (E-CLEO) 2013*, poster CB-P16 (2013)

**[SC168]**: Y. Qiu, W. Lu, and S. Calvez, "Quantum confinement stark effect of different GaInNAs quantum well structures", conference on *Materials for renewable energy and environment 2013*, paper 132 (2013).

**[SC169]**: S. Calvez, A. Larrue, G. Almuneau, O. Gauthier-Lafaye, F. Lozes-Dupuy, M. Maximov, "Sélection modale dans les lasers à modes de galerie", *Journées Nano, Micro et Optoélectronique*, poster (2013)

**[SC170]**: G. Almuneau, F. Chouchane, S. Calvez, H. Makhloufi, C. Fontaine, "Three dimensional confinement technology based on buried patterned AlOx layers: potentials and applications for VCSEL arrays", *International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, **Invited Talk** Mo B2-2 (2013).

**[SC171]**: X. Buet, A. Guelmani, A. Monmayrant, S. Calvez, F. Lozes-Dupuy, O. Gauthier-Lafaye, "Robust and simplified cat's-eye external-cavity lasers using cavity resonant integrated grating filters", *International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, **Invited Talk** We B2.2 (2013).

## 2014

**[SC172]:** G. Almuneau, F. Chouchane, S. Calvez, and C. Fontaine, "Planar technological solutions for embedded oxide-based confinement for new VCSELs architectures", European VCSEL Day, Rennes (22-23/5/2014).

**[SC173]:** G. Lafleur, A. Larrue, G. Almuneau, P.-F. Calmon, A. Arnoult, O. Gauthier-Lafaye, and S. Calvez, "Vertically-coupled AlGaAs microdisks using selective lateral oxidation", *European Conference on Integrated Optics (ECIO)*, poster P011 (2014).

## Articles de conférences sans comité de lecture

### 2014

**[SC174]:** Z. Abdallah, A. Ali Slimane, V. Auroux, A. Fernandez, S. Calvez, F. Lozes and O. Llopis, "Fibered and integrated approaches for ultra-high Q optical resonators and comb generation", International workshop on "Frequency combs: from sources to applications", poster 3, Toulouse (14/2/2014).

**[SC175]:** G. Lafleur, A. Larrue, G. Almuneau, P.-F. Calmon, A. Arnoult, O. Gauthier-Lafaye, and S. Calvez, "Vertically-coupled AlGaAs/AlOx microdisks", *GDR Oxyfun*, poster, Autrans (29/6-2/7/2014).

**[SC176]:** G. Lafleur, G. Almuneau, P.-F. Calmon, A. Arnoult, O. Gauthier-Lafaye, and S. Calvez, "Mesure de pertes optiques dans des guides d'onde slot GaAs/AlOx", *GDR Oxyfun*, poster (2014).



# CURRICULUM VITAE

Stéphane Calvez

40 ans

## Titres

- Jul 1998 – Nov 2000 Thèse de doctorat - Mention Très Honorable  
Soutenue 23/06/2002 Sujet: “Lasers à fibres pour les télécommunications multiplexées en longueur d’onde : Etude de l’accordabilité en longueur d’onde et génération de trains d’impulsions multi-longueurs d’onde par voie électro-optique”
- Sep 1997 – Jul 1998 Programme d’échange ERASMUS - ENSPM / Heriot Watt University  
Titre du projet: “Modélisation du bruit et de la résolution verticale d’instruments satellite de mesure de l’atmosphère”
- Sep 1995 – Jul 1998 Ingénieur avec spécialité “Optique et Optoélectronique” de l’Ecole Nationale Supérieure de Physique de Marseille (E.N.S.P.M.)
- 1993 Baccalauréat C

## Expérience Professionnelle

- Fév. 2012 – présent Chargé de Recherche 1<sup>ère</sup> classe  
*LAAS-CNRS (Toulouse, France)*  
Thématique: Lasers et convertisseurs non-linéaires à semiconducteurs, micro-fabrication
- Juil. 2002 – Fév. 2012 Chercheur  
*University of Strathclyde/Institute of Photonics (Glasgow, Grande-Bretagne)*  
Thématique: Composants (lasers, amplificateurs, modulateurs) à semiconducteurs à opération verticale, Lasers à solide exploitant des composants ou technologies semiconducteurs (lasers disque semiconducteur, lasers à impulsions ultra-rapides utilisant des absorbants saturables semiconducteurs, lasers guidés).
- Déc 2000 – Juin 2002 Service Militaire “Coopérant Chercheur”.  
*University of Strathclyde/Institute of Photonics (Glasgow, Grande Bretagne) en lien avec le CEA-LETI (Grenoble, France)*  
Sujet: Lasers à cavité verticale émettant par la surface à base de nitrures dilués.
- Jul 1998 – Nov 2000 Thèse de doctorat - Mention Très Honorable  
Soutenue 23/06/2002 Sujet: “Lasers à fibres pour les télécommunications multiplexées en longueur d’onde : Etude de l’accordabilité en longueur d’onde et génération de trains d’impulsions multi-longueurs d’onde par voie électro-optique”

## Administration de la recherche

### *Expertise Scientifique*

- 2012 – Membre du panel d'experts nationaux pour l'agence de financement de la recherche française l'Agence Nationale pour la Recherche (ANR)
- 2012 – Expert dans la thématique "matériaux et composants pour l'optique" de l'Observatoire des Micro- et Nano-Technologies (OMNT)
- 2006 – Membre du panel d'experts de l'agence de financement de la recherche britannique Engineering and Physical Sciences Research Council (EPSRC)
- 2007 – 2012 Membre du panel d'experts internationaux pour l'ANR.

### *Gestion et participation à des contrats de recherche*

- **Investigateur Principal** pour les contrats :
  - CNES R et T R-S13/LN-0001-025: "Peignes de fréquences sur puce" (50k€-2013-2016)
  - EPSRC EP/E064450/1 "Lasers modulaires ultra-rapides" (£761k, 2007-2011)
  - EPSRC GR/S59994/01 "Amplificateurs optiques semiconducteurs à cavité verticale (VCISOAs) à base de GaInNAs opérant à 1.3µm et leurs applications" (~£110k, 2003-2006)
  - transfert industriel SUPA: "Lasers à disques semiconducteurs émettant à 850nm" avec SOLUS Ltd (~£15k, 2010).
- **Co-Investigateur** pour les contrats :
  - EPSRC EP/E006000/1 on "Sources et systèmes lasers à solide avancés" (~£849k, 2006-2011)
  - EPSRC EP/E056989/1 "Lasers à base de boîtes quantiques InP/AlGaInP pour émission de 650-780nm" (~£133k, 2007-2010),
  - EPSRC EP/D078555/1 "Structures hybrides à semiconducteurs pour micro-composants émettant dans l'ultraviolet" (~£734k, 2007-2010)
  - Project européen "NATAL" sur les lasers disques semiconducteurs avec émission dans le visible et l'ultraviolet (~€320k, 2005-2008)

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

- 2013 – Membre du comité Georges Giralt d'organisation de séminaires au LAAS-CNRS
- 2002 – 2012 Membre du comité de sécurité de l'University of Strathclyde/Institute of Photonics

## *Participation à des jurys de thèses externes*

- 2014 Rapporteur – Ranta Sanna, Tampere University of Technology (Tampere, Finlande)  
Sujet : Wavelength extension of visible VECSELs by structural engineering
- 2012 Examineur – Zhuang Zhao, Université Paris-Sud XI (Marcoussis, France)  
Sujet : Pulse generation from mode-locked VECSELs at 1.55 $\mu$ m
- 2012 Rapporteur – Esa Janne Saarinen, Tampere University of Technology (Tampere, Finlande)  
Sujet : Optical pulse generation using semiconductor disk lasers
- 2011 Examineur – Julien Campos, Université Paul Sabatier (Toulouse, France)  
Sujet : Étude de cavités membranaires GaAs à autocollimation
- 2011 Rapporteur – Gabrielle Marie Thomas, Imperial College (London, Grande-Bretagne)  
Sujet : High-power modelocking using a nonlinear mirror
- 2009 Rapporteur - Stephen Paul Elsmere, University of Southampton (Southampton, Grande-Bretagne)  
Sujet : Semiconductor seeded-fibre amplified sources of ultra short pulses
- 2006 Examineur - Mélanie le Dû, Université Paris-Sud XI (Marcoussis, France)  
Sujet : Absorbants saturables sur GaAs pour fonctions optiques rapides à 1,55 $\mu$ m

## **Activités d'encadrement**

### *Encadrement de post-doctorants*

- 2008 – 2012 **Vasili.G. Savitski**, University of Strathclyde - Institute of Photonics (Glasgow, Grande-Bretagne) – co-encadrement 75%  
Sujet : Lasers ultra-rapides  
Publications : Articles : [SC55][SC58][SC61][SC62][SC64]  
Conf. Int : [SC142][SC139][SC141][SC152][SC154]
- 2006 – 2009 **Nicolas Laurand**, University of Strathclyde - Institute of Photonics (Glasgow, Grande-Bretagne) –encadrement 100%  
Sujet : Lasers émettant par la surface à cavité étendue (VECSELs)  
Publications : Articles : [SC42][SC43][SC50][SC54]  
Conf. Int. : [SC123][SC125][SC131][SC138]
- 2002 – 2006 **Handong Sun**, University of Strathclyde - Institute of Photonics (Glasgow, Grande-Bretagne) – co-encadrement 75%  
Sujet : Spectroscopie des alliages GaInNAsSb sur GaAs  
Publications : Articles : [SC4][SC10][SC15][SC19][SC20][SC21]  
[SC22][SC27][SC32][SC26]  
Conf. Int. : [SC90][SC109][SC108][SC97][SC100]

## *Encadrement de doctorants*

- 2014 – **Clément Arlotti**, LAAS-CNRS (Toulouse, France) – co-encadrement 50%  
Sujet : Peignes de fréquences sur puce
- 2013 – **Gaël Lafleur**, LAAS-CNRS (Toulouse, France) – co-encadrement 50%  
Sujet : Nouvelles architectures de composants photoniques par l'ingénierie du confinement électrique et optique  
Publications : Articles : **[SC78]**  
Conférences Internationales : **[SC173]**
- 2009 – 2012 **Loyd James Mcknight**, University of Strathclyde - Institute of Photonics (Glasgow, Grande-Bretagne) – encadrement 100%  
Sujet : Waveguides in large bandgap materials for lasers and quantum photonics  
Publications : Articles : **[SC67][SC70][SC68]**  
Conf. Int. : **[SC150][SC158][SC159][SC166]**
- 2008 – 2011 **Sharon Louise Vetter**, University of Strathclyde - Institute of Photonics (Glasgow, Grande-Bretagne) – encadrement 100%  
Sujet : Novel applications of semiconductor disk lasers  
Publications : Articles : **[SC51][SC71][SC75]**  
Conf. Int. : **[SC134][SC135][SC145]**
- 2005 – 2008 **Stéphanie Giet**, University of Strathclyde - Institute of Photonics (Glasgow, Grande-Bretagne) – encadrement 100%  
Sujet : Grating-controlled near-infrared vertical external-cavity surface-emitting lasers  
Publications : Articles : **[SC40][SC46]**  
Conf. Int. : **[SC120][SC124][SC126]**
- 2003 – 2006 **Nicolas Laurand**, University of Strathclyde - Institute of Photonics (Glasgow, Grande-Bretagne) – encadrement 100%  
Sujet : Long-wavelength dilute-nitride vertical-cavity semiconductor optical amplifiers  
Publications : Articles: **[SC13][SC17][SC25][SC29][SC31][SC38]**  
Conf. Int. : **[SC106][SC110][SC119][SC113]**

## *Encadrement de stages d'ingénieurs et de Master*

- 2013 Hamed Hajjaji, Master 2 “Electronique des Systèmes Embarqués et Télécommunications”, Université Paul Sabatier (Toulouse, France)  
Sujet : Sélection de fréquences dans des résonateurs à modes de galerie
- 2008 Isabelle Léonard, 2<sup>ème</sup> année, Institut de Formation des Ingénieurs Paris-Sud (IFIPS), Université Paris-Sud XI (Orsay, France)  
Sujet : Investigations and demonstrations of compact frequency-doubled semiconductor disk lasers with emission in the red/orange
- 2007 Sylvain Giraud, 2<sup>ème</sup> année, Institut de Formation des Ingénieurs Paris-Sud (IFIPS), Université Paris-Sud XI (Orsay, France)  
Sujet : Experimental assessment of Vertical External Cavity Surface-Emitting Lasers

## Enseignement

- 2010 – 2011 Enseignant au MSc “Photonics and device micro-fabrication”, University of Strathclyde (Glasgow, Grande-Bretagne)  
Sujet : Optique intégrée : guides d’onde et couches minces -20 heures
- 2010 – 2011 Coordinateur au MSc “Photonics and device micro-fabrication”, University of Strathclyde (Glasgow, Grande-Bretagne)  
Gestion du planning des cours

## Organisation de conférences - Editorialisme

- 2014 Organisateur de l’atelier international “Optical frequency combs: from sources to applications” / 60 participants / France
- 2011 – 2013 Membre du sous-comité “semiconductor laser” de la Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) / ~80-100 participants (sur ~700 participants) / USA
- 2012 – 2013 Membre du comité scientifique du European workshop on VECSELS / ~45 participants / France
- 2013 National workshop on “Optical instrumentation for mobile systems” / 65 participants / France
- 2012 Editeur invité du numéro spécial de *Physica Status Solidi* rassemblant les contributions du Symposium T de European Material Research Society 2012
- 2012 Membre du comité d’organisation du Symposium T de European Material Research Society 2012 / 50 participants / France
- 2009 Organisateur de l’atelier international du Rank Prize sur les “ultrafast lasers and applications” / 40 participants / Grande-Bretagne
- 2005 European Semiconductor Laser Workshop / 50 participants / Grande-Bretagne

## Renseignements complémentaires

- 2003 – Examineur (reviewer) d’articles pour publication dans les journaux de IEEE, OSA, AIP,...
- 2010 – 2011 Membre de la société savante Optical Society of America (OSA)
- 2005 – 2010 Membre de la société savante Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)
- 2007 – 2009 Chairman du chapitre écossais de IEEE/Photonics (avant IEEE/LEOS) society
- 2005 – 2007 Vice-Chair du chapitre écossais de IEEE/Photonics (avant IEEE/LEOS) society

## Résumé

Ce manuscrit décrit les contributions que j'ai pu apporter et que je compte mener dans le domaine de recherche portant sur le développement de sources lasers à solide exploitant nouveaux matériaux semiconducteurs. Plus spécifiquement, je résume l'activité menée à l'University de Strathclyde sur les lasers à cavité verticale (étendue) émettant par la surface et les amplificateurs optiques à base de nitrures dilués, le développement de miroirs à absorbant saturable contrôlables pour les oscillateurs femto-secondes fonctionnant dans la gamme de longueurs d'onde allant de 1,2 à 2,2  $\mu\text{m}$  ainsi que les travaux sur l'utilisation évolutive du diamant dans les lasers pour des fonctions de dissipation thermique ou d'utilisation en tant qu'élément d'optique passive. Enfin, je présente les travaux initiés depuis 2012 au LAAS qui portent sur les résonateurs à modes de galerie et les réseaux sub-longueur d'onde et dont la finalité est la réalisation d'oscillateurs paramétriques optiques tout intégrés.

**Mots clés :** lasers à cavité verticale (étendue) émettant par la surface, absorbants saturables, conversion de fréquences, nitrures dilués, diamant, antimoinures, résonateurs à modes de galerie, réseau sub-longueur d'onde, oscillateurs paramétriques optiques.

## Summary

In this manuscript are described the research activities I have lead and intend to pursue on the development of advanced solid-state lasers which exploit novel semiconductor materials. More specifically, the summarised activity essentially concerns the work which I have carried out at the University of Strathclyde on vertical-(extended)-cavity surface emitting lasers and semiconductor optical amplifiers using dilute nitride alloys, on the development of semiconductor saturable absorber mirrors used in novel remotely-controlled femtosecond pulse sources operating in the 1,2 à 2,2  $\mu\text{m}$  wavelength band, and on the use of diamond in lasers including for heat dissipation, as a material for optical passive elements. Finally, the work I have initiated since 2012 at LAAS is presented. It concerns the development of whispering-gallery-mode resonators and sub-wavelength gratings, elements intended to be used as the heart of a new generation of integrated optical parametric oscillators.

**Keywords :** vertical-(extended)-cavity surface emitting laser, saturable absorbers, nonlinear frequency conversion, dilute nitrides, diamond, antimonides, whispering-gallery-mode resonators, sub-wavelength gratings, optical parametric oscillators.