



HAL
open science

Contribution à l'épitaxie et à l'étude de composants optoélectroniques à base de semi-conducteurs

Laurent Cerutti

► **To cite this version:**

Laurent Cerutti. Contribution à l'épitaxie et à l'étude de composants optoélectroniques à base de semi-conducteurs . Optique / photonique. Université de Montpellier, 2016. tel-02063667

HAL Id: tel-02063667

<https://hal.science/tel-02063667>

Submitted on 11 Mar 2019

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.

DOCUMENT DE SYNTHÈSE

Présenté à l'Université Montpellier
pour obtenir le diplôme d'

HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

« CONTRIBUTION A L'ÉPITAXIE ET A L'ÉTUDE DE COMPOSANTS OPTOELECTRONIQUES A BASE DE SEMI-CONDUCTEURS »

par

Laurent Cerutti

Soutenue publiquement le : 08 Juillet 2016 devant le jury composé de :

| | | |
|-----------------------------|--|----------------|
| Prof. Nicolas Grandjean | École Polytechnique Fédérale de Lausanne | (Rapporteur) |
| Prof. Daniel Mathiot | Université de Strasbourg | (Rapporteur) |
| Dr. Jean-Christophe Harmand | LPN-CNRS | (Rapporteur) |
| Dr. Véronique Bardinal | LAAS-CNRS | (Examinatrice) |
| Dr. Xavier Wallart | IEMN-CNRS | (Examineur) |
| Prof. Enrique Calleja | Universidad Politecnica de Madrid | (Examineur) |
| Prof. Frédéric Genty | Mahindra Ecole Centrale | (Examineur) |
| Prof. Philippe Combette | Université de Montpellier | (Examineur) |
| Prof. Eric Tournié | Université de Montpellier | (Examineur) |

| | |
|--|----|
| Chapitre 1 – Curriculum Vitae | 1 |
| Chapitre 2 – Activité d’enseignement, encadrement d’étudiants, diffusion scientifique et contrats de recherche | 5 |
| 1 – Enseignement | 6 |
| 2 – Encadrement d’étudiants : doctorants, masters | 7 |
| 2.1 – Doctorants | 7 |
| 2.2 – Masters | 8 |
| 3 – Diffusion scientifique | 8 |
| 4 – Contrats de recherche | 9 |
| 4.1 – Projets internationaux | 9 |
| 4.2 – Projets nationaux/locaux | 10 |
| 4.3 – Contrats industriels | 11 |
| 4.4 – Valorisation | 11 |
| 4.5 – Collaborations | 12 |
| Chapitre 3 – Publications et conférences | 13 |
| 1 – Bilan des communications | 15 |
| 2 – Liste des communications | 15 |
| 2.1 – Chapitre de livre | 15 |
| 2.2 – Publications dans des revues internationales à comité de lecture | 15 |
| 2.3 – Conférences internationales avec comité de lecture et actes | 19 |
| 2.4 – Conférences internationales avec comité de lecture | 22 |
| 2.5 – Conférences nationales avec comité de lecture | 27 |
| 2.6 – Groupement de recherche | 29 |
| 2.7 – Brevet | 29 |
| Chapitre 4 – Introduction | 31 |
| Chapitre 5 – VCSELS antimoniures | 35 |
| 1 – Travaux de thèse : premiers résultats sur les V(E)CSELS antimoniures | 37 |
| 2 – VCSELS antimoniures pompés électriquement : du pulsé au continu | 39 |
| 3 – Confinement électro-optique de VCSELS à base d’antimoine | 42 |
| 3.1 – Confinement par gravure de la jonction tunnel | 43 |
| 3.2 – Confinement par oxydation d’AlAs métamorphique | 46 |
| 4 – Améliorations des propriétés et des performances des V(E)CSELS antimoniures | 48 |
| 4.1 – Conception de V(E)CSELS pour émission à $\lambda > 2,3 \mu\text{m}$ | 48 |
| 4.1.1 – VCSEL | 48 |
| 4.1.2 – V(E)CSEL | 50 |
| 4.2 – Amélioration de la puissance optique des VCSELS | 51 |
| 4.3 – Miroir à réseau à haut contraste d’indice pour VCSELS antimoniures | 53 |
| 5 – Perspectives et conclusion sur mon implication dans les VCSELS antimoniures | 55 |

| | |
|--|----|
| Chapitre 6 – Épitaxie pour nouveaux composants optoélectroniques | 57 |
| 1 – Études post doctoral sur les nano-colonnes de GaN | 59 |
| 1.1– Études sur la formation « spontanée » des nano-colonnes de GaN | 59 |
| 1.2 – Croissance des nano-colonnes de GaN sur Si(100) | 61 |
| 2 – Nouvelles zones actives à base de super réseau pour émission à $\lambda > 3 \mu\text{m}$ | 62 |
| 2.1 – Contexte de l'étude | 62 |
| 2.2 – Lasers à super-réseau InAs/GaSb | 63 |
| 2.3 – Lasers à super-réseau InAs/InSb/GaSb | 64 |
| 3 – Laser télécom sur GaSb | 64 |
| 3.1 – Lasers antimoniures métamorphiques | 64 |
| 3.2 – Résultats préliminaires à $1,55 \mu\text{m}$ sur GaSb et Si | 65 |
| 3.3 – Améliorations technologiques sur Si pour émission en régime continue | 66 |
| 3.4 – Nouvelles zones actives à $1,55 \mu\text{m}$ sur GaSb pour l'amélioration des performances | 67 |
| Chapitre 7- perspectives et conclusion | 71 |
| 1– Plasmonique | 72 |
| 2 – Sources à quasi-accord de phase pour la conversion de longueurs d'onde à base d'antimoniure | 73 |
| 3 – Conclusion générale | 74 |
| Références bibliographiques | 76 |
| Tirés à part de publications | 81 |

CHAPITRE 1

~

Curriculum Vitae

~

Laurent CERUTTI

Né le 30 septembre 1976 à Antibes (06)
39 ans, Marié, 2 enfants
Nationalité Française

✉ 2 Rue des prés
34430 Saint Jean de Védas

✉ **Institut d'Electronique et des systèmes (IES)**
Université Montpellier
860 rue saint Priest
Bât. 5, CC05014
34095 Montpellier
☎ (+33) 4 67 14 32 81
Fax (+34) 4 67 54 42 48

✉ laurent.cerutti@umontpellier.fr

Docteur en Électronique : Composants et Systèmes

- Epitaxie par jets moléculaires
- Semi-conducteurs III-V
- Dispositifs photoniques
- Nanotechnologies

Maître de conférences en électronique, section CNU n°63

IUT Génie Electrique et Informatique Industriel (GEII) de Montpellier depuis le 1^{er} septembre 2006.

Formation

2001-04 Thèse de Doctorat - Université Montpellier II. Spécialité : Electronique, Optronique et Systèmes
Réalisée au Centre d'Electronique et de Microoptoelectronique de Montpellier. Soutenue le 19 novembre 2004.

Sujet : Etude et mise au point des moyens et procédures d'épitaxie par jets moléculaires pour fabriquer des structures VCSEL à base d'antimoniures

Jury : Pr. Alibert C., CEM2, Université de Montpellier II (Directeur de Thèse)
Dr. Chaix C., RIBER, Laboratoire d'applications, Rueil Malmaison (Examineur)
Pr. Decoster D., IEMN, Lille (Rapporteur)
Dr. Fontaine C., LAAS, Toulouse (Rapporteur)
Pr. Foucaran A., CEM2, Université Montpellier II (Président du jury ; examinateur)
Dr. Genty F., CEM2, Université Montpellier II (Co-directeur de thèse)
Dr. Garnache A., CEM2, Université Montpellier II (Invité)

Mentions : Très honorable

Bourse : CIFRE avec la société RIBER S.A. (Bezon 95)

2000-01 Diplôme d'Etudes Approfondies – Université Montpellier II

Spécialité : Electronique, Composants et Systèmes

Mention: Bien (1^{er}/12)

1999-2000 Diplôme d'Etudes Supérieures Spécialisées – Université Joseph Fourier Grenoble

Spécialité : Technique et Applications de la Physique (option Optique et Photonique)

Mention: Très Bien (1^{er}/12)

Expériences de professionnelle

09/2006 - Maître de conférences, Université Montpellier, Institut Universitaire de Technologie (IUT), Genie Électrique et Informatique Industrielle (GEII). Rattaché à l'Institut d'Electronique et des Systèmes (IES)

04/2005- 09/2006 Post doc – Instituto de Sistemas Optoelectrónica y Microtecnología , Universidad Politécnica – Madrid (Espagne)
Conceptions et études de nano-dispositifs émetteurs à base de semiconducteurs nitrurés pour applications en communications, génération de lumière blanche et bio-photonique

2004-05 Ingénieur recherche RIBER / Centre d'Electronique et de Microoptoelectronique de Montpellier, UMII - Montpellier
Etudes optiques poussées de source VCSELs émettant à 2,3 μ m et conception de nouvelles zones actives à puits quantiques pour une émission au-delà de 3 μ m

2001-04 Thèse de Doctorat – Centre d'Electronique et de Microoptoelectronique de Montpellier, UMII - Montpellier
Etude et mise au point des moyens et procédures d'épitaxie par jets moléculaires pour fabriquer des structures VCSEL à base d'antimoniures
Directeurs de thèse : Pr. C. Alibert et Dr. F. Genty

2-7/2001 Stage de DEA - Centre d'Electronique et de Microoptoelectronique de Montpellier, UMII - Montpellier.
Conception d'un banc optique de détection de méthane par effet mirage
Responsable: Pr. C. Alibert et Mlle. F. Bournazeaud (Ingénieur R&D Gaz de France)

1-9/2000 Stage de DESS - Centre d'Electronique et de Microoptoelectronique de Montpellier, UMII - Montpellier.
Conception d'un laser moyen IR à émission par la surface pompée par diode laser
Responsable: Pr. C. Alibert et Dr. T. Boudet (Ingénieur R&D Gaz de France)

Informatique Logiciel : Bureautique, internet, Mathcad, Maple, Matlab, Origin, Xpert Epitaxy, COMSOL

Anglais : Bon niveau scientifique.

Espagnol : Bonnes connaissances

Renseignement divers

Sports/Activités : Plongée Sous marine (N4), Randonnée, Natation.

CHAPITRE 2

~

Activité d'enseignement, encadrement d'étudiants, diffusion
scientifique et contrats de recherche

~

1 – Enseignement

Mes activités d'enseignement ont commencé par des vacances en 2001 à la faculté des sciences de Montpellier, à l'ISIM et à l'IUT GEII lors de ma thèse, puis à partir de 2006 lors de ma prise de fonction comme maître de conférences à l'université de Montpellier au sein de l'IUT GEII.

- **2014-2015 – Maître de conférences, IUT GEII - 225 heures ETD**
Cours et TD de physique (1^{ère} année), TP système électronique (1^{ère} année), cours et TD optoélectronique (2^{ème} année), Technologie du composant (LP).
- **2013-2014 – Maître de conférences, IUT GEII - 225 heures ETD**
Cours et TD de physique (1^{ère} année), TP système électronique (1^{ère} année), cours et TD optoélectronique (2^{ème} année).
- **2012-2013 – Maître de conférences, IUT GEII - 230 heures ETD**
Cours et TD de physique (1^{ère} année), TP système électronique (1^{ère} année et 2^{ème} année), cours et TD optoélectronique (2^{ème} année).
- **2011-2012 – Maître de conférences, IUT GEII - 210 heures ETD**
Cours et TD de physique (1^{ère} année), TP système électronique (1^{ère} année et 2^{ème} année),
- **2010-2011 – Maître de conférences, IUT GEII - 200 heures ETD**
Cours et TD de physique (1^{ère} année), TP système électronique (1^{ère} année et 2^{ème} année), TD optoélectronique (2^{ème} année).
- **2009-2010 – Maître de conférences, IUT GEII - 200 heures ETD**
Cours et TD de physique (1^{ère} année), TP système électronique (1^{ère} année), TD optoélectronique (2^{ème} année).
- **2008-2009 – Maître de conférences, IUT GEII - 200 heures ETD**
Cours et TD de physique (1^{ère} année), TP système électronique (1^{ère} année), TD optoélectronique (2^{ème} année).
- **2007-2008 – Maître de conférences, IUT GEII - 200 heures ETD**
Cours et TD de physique (1^{ère} année), TP système électronique (1^{ère} année), TD optoélectronique (2^{ème} année).
- **2006-2007 – Maître de conférences, IUT GEII - 192 heures ETD**
Cours et TD de physique (1^{ère} année), TP système électronique (1^{ère} année), TD optoélectronique (2^{ème} année).
- **2003-2004 – Vacataire, IUT GEII, L3 EEA - 24 heures ETD**
TP traitement du signal (L3 EEA), TD optoélectronique (IUT 2^{ème} année).
- **2002-2003 – Vacataire, IUT GEII, L3 EEA - 55 heures ETD**
TP traitement du signal (L3 EEA), TP d'électronique (L3 EEA), TD optoélectronique (IUT 2^{ème} année).
- **2001-2002 – Vacataire, ISIM - 66 heures ETD**
TD et TD d'analyse numérique (1^{ère} année),

Le tableau 1, reprend l'ensemble de mon enseignement et des thématiques abordées.

| Enseignement | Niveau | Cours/TD/TP | Dates |
|---------------------------------|-----------------------------|-------------|-----------------------|
| Analyse numérique | ISIM 1 ^{ère} année | TD + TP | 2001-2002 |
| Traitement du signal | L3 EEA | TP | 2002-2004 |
| Optoélectroniques | IUT 2 ^{ème} année | TD | 2001-2004 ; 2006-2011 |
| | | Cours + TD | Depuis 2012 |
| Systèmes électroniques | IUT 1 ^{ère} années | TP | Depuis 2006 |
| | IUT 2 ^{ème} année | TP | 2010-2013 |
| Physique | IUT 1 ^{ère} année | Cours + TD | Depuis 2006 |
| Technologie du composant | LP mécatronique | Cours +TD | Depuis 2014 |

Responsabilités d'enseignement :

Responsable des Travaux Pratiques en systèmes électroniques et énergie renouvelable en 1^{ère} année d'IUT GEII.

Membre des jurys de 1^{ère} année et 2^{ème} année d'IUT GEII.

2 - Encadrement d'étudiants, doctorants et master

2.1 – Doctorants

Arnaud Ducanchez (Projet NEMIS) : 2006-2009 (Laurent Cerutti 50% - Frédéric Genty 50%)

Fabrication et développement de VCSEL à base d'antimoniures pompé électriquement

Thèse soutenu le 08 juillet 2009

Situation en 2015 : Maîtres de conférence à Sup'Agro Montpellier

Prix de thèse EEA 2010

Alban Gassenq (Bourse MESR) : 2007-2010 (Laurent Cerutti 40% - Eric Tournié 60%)

Nouvelles sources lasers à super-réseau InAs/GaSb/InSb pour l'émission moyen infrarouge

Thèse soutenu le 20/07/2010

Situation en 2015 : Chercheur contractuel au CEA-INAC

Dorian Sanchez (Bourse MESR) : 2009-2012 (Laurent Cerutti 70%, Eric Tournié 30%)

Lasers à semi-conducteurs émettant par la surface (VCSELs) dans le moyen infrarouge

Thèse soutenu le 05 novembre 2012

Situation en 2015 : Post doctorant au LPN

Youness Laaroussi (ANR Marsupilami) : 2009-2012 (Laurent Cerutti 40%, Guilhem Almuneau 60%) –

Doctorant en co-encadrement avec le LAAS

Développement de VCSELs à miroir à réseau sub longueur d'onde pour le Moyen-infra-rouge

Thèse soutenu le 25 octobre 2012

Situation en 2015 : Post doctorant au LETI

Andrea Castellano (CIFRE Alcatel-Lucent) : 2013-2016 (Laurent Cerutti 70%, Eric tournié 30%)

Sb-based telecom laser : toward Si integration

Soutenance prévu en 2016

Sophie Roux (CIFRE Thales Research & Technology) : 2013-2016 (Laurent Cerutti 30%, Eric Tournié 70%)

Conversion de fréquence vers les grandes longueurs d'onde dans les guides d'onde en semiconducteur à orientation périodique
Soutenance prévu en 2016

Mario Bomers (ITN PROMIS) : 2015-2018 (Laurent Cerutti 50%, Thierry Taliercio 50%)

Functionalised semiconductor metamaterials and plasmonics for high sensitivity chemical and bio-sensing
Soutenance prévu en 2018

Durant mon post-doc à l'ISOM (2005-2006), j'ai également encadré 2 doctorants :

Jelena Ristic : 2001-2006

Growth and characterization of group III-nitride nanocolumnar structures

Sergio Fernandez- Garrido : 2004-2009

Growth of group III-nitride by molecular beam epitaxy for the fabrication of light emitting diodes in the visible to UV range

2.2 - Masters

Master 1 :

Antoine Leparquier : Avril 2008 – Mai 2008

Simulation et caractérisation de structures épitaxiées sur GaSb visant à l'amélioration d'EP-VCSELs émettant entre 2 μm et 3 μm .

Rachid Taalat : Mai 2010 – Juin 2010

Réalisation et étude des contacts ohmiques pour l'optimisation de diodes lasers infrarouge sur substrat GaAs et Si

Yasmine Morice : Mai 2011 – Juin 2011

Étude et mise au point des procédés technologiques pour la fabrication des lasers à cavité verticale émettant par la surface à base de GaSb.

Élodie Garavaglia : Mai 2013 - Juin 2013

Conception et étude d'un ellipsomètre infra-rouge

Olivier Delorme : Mai 2015 – Juin 2015

Réalisation des structures pour le moyen infrarouge par épitaxie par jets moléculaires

Master 2 :

Alban Gassenq : Mars 2007 – Juin 2007

Conception de diodes lasers à boîtes quantiques moyen infra rouge

Henri Nguyen : Mars 2008 – Septembre 2008

Optimisation de laser semi-conducteur à cavité verticale émettant par la surface

Dorian Sanchez : Mars 2009 – Juin 2009

Technologies de confinement électrique pour les lasers à cavité verticale émettant par la surface

Bilan :

Depuis 2005, j'ai co-encadré 7 doctorants, dont 3 en cours et j'ai encadré 3 étudiants en Master 2 et 5 étudiants en Master 1.

3 - Diffusions scientifiques**3.1 - Rapporteur pour journaux scientifiques internationaux**

- IEEE Photonics Technology Letters,
- IET Electronics Letters,
- Journal of Crystal Growth,
- Journal of Vacuum Science and Technology B,
- IEEE Journal of Lightwave Technology

3.2 - Jurys de thèse (extérieurs)

Youness Laaroussi – Université Paul Sabatier – LAAS Toulouse – 25/10/2012 – co-directeur de thèse
Christyves Chevallier – Université de Lorraine – Supelec Metz – 15/11/2013 - examinateur

3.3 - Groupements de recherche (GDR)

Membre du GDR PULSE (Processus ULtimes d'épitaxie de SEMiconducteurs). Participation au 1^{er} colloque annuel à l'université d'Aix-Marseille du 3-5 juillet 2013 et au 2^{ème} colloque annuel à l'université Paul Sabatier de Toulouse du 27-31 octobre 2014

Membre du GDR NanoTeraMir (Nanosciences et nanotechnologies pour le Terahertz et le Moyen Infra-Rouge)

3.4 - Expertises

2013 : Expertise d'un projet ANR P2N-nanotechnologie et nanosystème

2014 : Expertise d'un projet ANR ASTRID

3.5 - Organisations de congrès internationaux

CSWEEK 2014 (Compounds Semiconductor Week) 11-15 Mai 2014 - Membre du comité d'organisation local

MIOMD 2014 (Mid-IR Optoelectronics : Materials and Devices) 5-9 octobre 2014 - Membre du comité d'organisation local

4 – Contrats de recherche et collaborations

4.1 – Projets internationaux

DOMINO (IST 2005-017383) - Juin 2006 – Février 2010 : **Participant.**

Antimonide quantum dots for Mid-infrared Nanophotonic Devices

Financement: 2,2 M€ dont 500 k€ pour l'IES

Partenaires: **IES**, Paul Drude Institute (Berlin, All.), Consoglio Nazionale delle Ricerche (Lecce, It.), University of Hull (Hull, UK), Ioffe Institute (St Petersburg, Russie), Alcatel-Thales III-V lab. (Palaiseau, Fr.)

NEMIS (IST-2005-31845) - Juin 2006 – Février 2010 : **Participant.**

New Mid infrared Sources for photonic Sensors

Financement: 2 M€ dont 500 k€ pour l'IES

Partenaires: **Walter Shottky Institute** (Munich, All.), IES, Vertilas GmbH (Munich, All.), Siemens AG (Munich, All.), Chalmers University (Chalmers, Suède), Académie des Sciences Tchèque (Prague, Tch.), Omnisens (Lausanne, Suisse).

Projet « Procope » EGIDE - mars 2012 – mars 2014 : **Participant**

Interface Engineering for integration of III-V devices on Silicon.

Financement: voyages et hébergements au PDI

Partenaires : **IES**, Paul Drude Institute (Berlin-Allemagne).

PROMIS (ITN-641899) – 2015 - 2018 : **Participant**

Postgraduate Research on Dilute Metamorphic Nanostructures and Metamaterials in Semiconductor Photonics

Financement: 4M € dont 525 k€ pour l'IES

Partenaires: **University of Lancaster** (Lancaster, UK.), IES, University of Nottingham (Nottingham, UK), University of Sheffield (Sheffield, UK), III-V Lab (Palaiseau, Fr.), University College Cork (Cork, Ir.), University of Cadiz (Cadiz, Sp.), Sapienza University of Roma (Roma, It.), Sgenia (Madrid, Sp.).

4.2 – Projets nationaux/locaux

ANR Blanc : MIREV - Décembre. 2008 – Décembre. 2011 – **Participant**

Nouveaux composants photoniques à membrane pour le Moyen-Infra-Rouge à Emission Verticale

Financement: 385 k€ dont 180 k€ pour l'IES

Partenaires: **IES**, LPN (Marcoussis), LSP (St Martin d'Hères), LMOPS (Metz)

ANR PNANO : MIRnano - Décembre. 2008 – Décembre. 2011 – **Participant**

Mid-IR Optoelectronics with Sb-based nanostructures.

Financement: 500 k€ dont 250 k€ pour l'IES

Partenaires: **IES**, Thales III-V Lab (Palaiseau), Paul Drude Institute (Berlin-Allemagne)

ANR Blanc : MARSUPILAMI - Septembre 2009 - Mars. 2013 – **Coordinateur local**

Miroir A Réseau SUB-longueur d'onde Pour les LASers à émission verticale dans le Moyen-Infrarouge

Financement: 630 k€ dont 210 k€ pour l'IES

Partenaires: LAAS (Toulouse), IES, SUPELEC/LMOPS (Metz)

ANR Blanc : BLANC MICPHIR - Février 2011 - Février 2014 - **Participant**

Nouveaux Micro-emetteurs à Cristaux-PHOToniques moyen-IR cohérent accordable de puissance.

Financement: 670 k€ dont 270 k€ pour l'IES

Partenaires: IES, LPN (Marcoussis), laboratoire Charles Fabry (Palaiseau), société Innoptics (Talence)

ANR BLANC : OPTOSI - Novembre 2012 - Novembre 2015 – **Participant**

Optoelectronic on Silicon.

Financement: 720 k€ dont 210 k€ pour l'IES

Partenaires: IES, Alcatel-III-V Lab (Marcoussis), INSA-FOTON (Rennes), LPN (Marcoussis), INSA-LPCNO (Toulouse),

ANR P2N : MOREMIR - Janvier 2013 - Janvier 2016 – **Coordinateur local**

Multiwavelength Optical micRosourcEs on silicon for Mid-InfraRed integrated sensing).

Financement: 700 k€ dont 130 k€ pour l'IES

Partenaires: INL (Ecully), IES, Thales III-V Lab (Palaiseau), LETI (Grenoble).

ANR ASTRID : Great GaSby - Janvier 2014 - Janvier 2017 – **Participant**

Guides d'onde à retournement d'orientation cristalline pour des diodes laser GaSb accordables dans le moyen-infrarouge

Financement: 300 k€ dont 100 k€ pour l'IES

Partenaires: IES, III-V lab (Palaiseau), Thales RT (Palaiseau)

ANR BLANC : ANTIPODE - Janvier 2015 - Janvier 2018 – **Participant**

Advanced analysis of III-V/Si nucleation for highly integrated photonic devices

Financement: 480 k€ dont 50 k€ pour l'IES

Partenaires: INSA-FOTON (Rennes), IPR (Rennes), IES, LPN (Marcoussis), CEMES (Toulouse), CRHEA (Valbonne)

ANR Blanc : SUPREME-B - Janvier 2014 - Janvier 2018 – **Participant**

Localised surface plasmon resonance in highly doped semiconductors for infrared biosensing

Financement: 530 € dont 310 k€ pour l'IES

Partenaires: IES, UTT (Troyes), Sikémia (Montpellier)

ANR JC : BIOMAN - Janvier 2015 - Janvier 2018 – **Participant**

Bismuth pour matériaux semi-conducteurs à base d'antimoine

Financement: 220 k€ pour l'IES

Investissement d'avenir EquipEx : EXTRA – Juillet 2012- Juillet 2019 - Participant

EXcellence cenTeR on Antimonides

Financement: 4,2 M€ pour l'IES

Partenaires : IES, Centrale de Technologie de Montpellier

Projet «Nanosciences» UM2: septembre 2010-Septembre 2011 - Coordinateur

Nouveaux composants lasers à base d'AlGaInSb sur substrats GaAs.

Financement: 15 k€ pour l'IES

4.3 – Contrats industriels

RIBER - 2013 - 2016 – Responsable scientifique pour l'IES

Développement et étude d'une nouvelle cellule à vanne d'antimoine pour l'épitéxie par jets moléculaires

Financement: 75 k€ pour l'IES

Partenaires: société RIBER (Bezon), IES

Alcatel Lucent-III-V Lab - 2013 - 2016 – Co-encadrant de thèse

Contrat d'accompagnement de la bourse de thèse CIFRE d'Andrea Castellano

Financement: 50 k€ pour l'IES

Partenaires: Alcatel Lucent -III-V Lab (Marcoussis), IES

4.4 – Valorisation

Société d'Accélération du Transfert Technologique (SATT) AxLR - 2014-2016 – Participant

Lasers VECSELS

Financement: 340 k€

Partenaires: IES, LPN (Marcoussis), INNOPTICS (Talence)

4.5 – Collaborations

University of Surrey (Guilford, UK.) : Temperature and pressure dependance of 1.55 μm Sb-based laser

University of Ghent (Ghent, Belg.) : Heterogeneous integration of Sb-based devices on SOI

Paul Drude Institute (Berlin, All.): TEM characterization of metamorphic Sb based semiconductor

CHAPITRE 3

~

Publications et conférences

~

1 – Bilan des communications

| | |
|--|---------|
| Chapitre de livre | 1 |
| Publications dans des revues internationaux à comité de lecture | 57 |
| Communications orales dans des conf. internat. avec comité de lecture et acte (invité) | 34 (13) |
| Posters dans des conf. internat. avec comité de lecture et acte | 1 |
| Communications orales dans des conf. internat. avec comité de lecture (invité) | 52 (17) |
| Posters dans des conf. internat. avec comité de lecture | 25 |
| Communications orales dans des conf. nat. avec comité de lecture (invité) | 1 (1) |
| Posters dans des conf. nat. avec comité de lecture | 17 |
| Communications orales dans des GDR (invité) | 2 (2) |

2– Liste des communications

2.1 - Chapitre de livre

- [1] F. Genty, A. Garnache and **L. Cerutti**, “*VCSELs emitting in the 2 – 3 μm wavelength range*” Mid Infrared Optoelectronics (T. Krier éditeur associé), Editeur Springer- Verlag, mars 2006 ISBN: 978-1-84628-208-9

2.2 - Publications dans des revues internationales à comité de lecture

- [1] F. Genty, **L. Cerutti**, A. Garnache, E. Picard, E. Hadji, D. Romanini, F. Bournazaud, P. Grech, S. Gaillard and C. Alibert “*Type-I quantum-well VCSEL structure on GaSb emitting in the 2 μm -2.5 μm range*” IEE Proceedings of Optoelectronics, Vol. 149, p 22-26, Février 2002, ISSN: 1350-2433.
- [2] **L. Cerutti**, A. Garnache, F. Genty, A. Ouvrard and C. Alibert “*Low threshold, room temperature laser diode pumped Sb-based VCSEL emitting around 2.1 μm* ” IEE Electronics Letters, Vol. 39, p 291-292, Février 2003. ISSN : 0013-5194
- [3] **L. Cerutti**, A. Garnache, A. Ouvrard, and F. Genty “*High temperature continuous wave operation of Sb-based vertical external cavity surface emitting laser near 2.3 μm* ” Journal of Crystal growth, Vol. 268/1-2, p 128-134, Juillet 2004, ISSN: 0022-0248
- [4] **L. Cerutti**, A. Garnache, A. Ouvrard, M. Garcia, E. Cerda, and F. Genty “*2.36 μm diode pumped VCSEL operating at room temperature in continuous with circular TEM₀₀ output beam*” IEE Electronics Letters, Vol. 40, p 869-871, Juillet 2004. ISSN : 0013-5194.
- [5] **L. Cerutti**, A. Garnache, A. Ouvrard, F. Genty, E. Cerda, A. Lastras-Martinez, D. Romanini “*Continuous-wave operation up to 350K of optically-pumped antimony-based midinfrared VCSELs*” SPIE proceedings Vol. 5582, Advanced in Optoelectronics and Laser, p 77-87, Septembre 2004. ISBN: 0-8 194-5535-0
- [6] J.B. Rodriguez, P. Christol, **L. Cerutti**, F. Chevrier, and A. Joulié “*MBE Growth and characterization of type-II InAs/GaSb superlattices for mid-infrared detection*” Journal of Crystal growth, Vol. 274, p 6-13, Janvier 2005, ISSN: 0022-0248.
- [7] **L. Cerutti**, A. Garnache, A. Ouvrard, and F. Genty “*Sb-based VCSEL operating at 2.3 μm in continuous wave regime up to 350K with TEM₀₀ beam*” Journal de la Physique IV, Vol. 119, p 147-148. ISSN : 1155-4339
- [8] **L. Cerutti**, A. Garnache, A. Ouvrard, M. Garcia, and F. Genty “*Vertical Cavity Surface Emitting Laser Sources for Gas Detection*” Physica Status Solidi A, Vol. 202, p 631-635, Février 2005. ISSN : 0031-8965
- [9] A. Ouvrard, A. Garnache, **L. Cerutti**, F. Genty, and D. Romanini “*Single frequency tunable Sb-based VCSELs emitting at 2.3 μm* ” IEEE Photonics Technologic Letters, Vol. 17, p 2020-2022, Octobre 2005. ISSN : 1041-1135

- [10] E. Cerda, R. Balderas, A. Lastras, L. Lastras, A. Garnache, **L. Cerutti** and A. Joullié “Interfaces in $Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y}/Al_xGa_{1-x}As_ySb_{1-y}$ multi-quantum well heterostructures probed by transmittance anisotropy spectroscopy” *Journal of Applied Physics*, Vol. 98, Octobre 2005. ISSN : 0021-8979
- [11] A. Garnache, A. Liu, **L. Cerutti**, and A. Campargue “Intracavity Laser Absorption Spectroscopy with a Vertical External Cavity Emitting Laser at 2.3 μm : application to water and carbon dioxide” *Chemical Physics Letters*, Vol. 416, p 22-27, Octobre 2005. ISSN : 0009-2614
- [12] **L. Cerutti**, J. Ristic, S. Fernandez-Garrido, E. Calleja, A. Trampert, K.H. Ploog, S. Lazic, and J.M. Calleja “*Wurtzite GaN Nanocolumns Grown on Si (001) by Molecular Beam Epitaxy*” *Applied Physics Letters*, Vol. 88, 213114, Mai 2006. ISSN :
- [13] **L. Cerutti**, G. Boissier, P. Grech, A. Pérona, J. Angellier, Y. Rouillard, G.C. Dente, R. Kaspi and F.Genty “*Novel Hole well antimonide laser diodes on GaSb operating near 2.93 μm* ” *IEE Electronics Letters*, Vol. 42, p 1400-1401, Novembre 2006 . ISSN : 0013-5194.
- [14] E. Calleja, J. Ristic, S. Fernandez-Garrido, **L. Cerutti**, M.A. Sanchez-Garcia, J. Grandal, A. Trampert, U. Jahn, G. Sanchez, A. Griol, and B. Sanchez “*Growth, morphology, and structural properties of group-III-nitride nanocolumns and nanodisks*” *Physica Status Solidi B*, Vol. 244, p 2816-2837, Juillet 2007. ISSN ?
- [15] J.M. Calleja, S. Lazic, J. Sanchez-Paramo, F. Agullo-Rueda, **L. Cerutti** , J. Ristic, S. Fernandez-Garrido, M.A. Sanchez-Garcia, J. Grandal, E. Calleja, A. Trampert, and U. Jahn “*Inelastic light scattering spectroscopy of semiconductor nitride nanocolumns*” *Physica Status Solidi B*, Vol. 244, p 2838-2846, Juillet 2007.
- [16] A.Perona, A. Garnache, **L. Cerutti**, A. Ducanhez, S. Mihindou, P. Grech, G. Boissier, and F. Genty “*ALAsb/GaSb doped distributed Bragg reflectors for electrically pumped VCSELs emitting around 2.3 μm* ” *Semiconductor Sciences Technology*, Vol. 22 (10), Octobre 2007, p1140-1144,....
- [17] N. Deguffroy, V. Tasco, A. Gassenq, **L. Cerutti**, A. Trampert, A.N. Baranov, and E. Tournié “*InAs/GaSb short-period super-lattice injection lasers operating in the 2.5 μm to 3.5 μm mid-infrared wavelength range*” *IET Electronics Letters*, Vol. 43, p 1285-1286, Novembre 2007. ISSN : 0013-5194.
- [18] A.Ducanhez, **L. Cerutti**, P.Grech and F.Genty “*Room Temperature Continuous Wave operation of electrically-injected Sb-based RC-LED emitting near 2.3 μm* ” *Superlattices and Microstructures*, Vol. 44, p 62-69, Juillet 2008, ISSN: 0749-6036.
- [19] A.Ducanhez, **L. Cerutti**, A. Gassenq, P.Grech and F.Genty “*Fabrication and characterization of GaSb-based Monolithic Resonant-Cavity Light Emitting Diodes emitting around 2.3 μm and including a Tunnel Junction*” *IEEE Journal of Selected Topics in quantum Electronics*, Vol.14 (4), juillet-aout 2008
- [20] **L. Cerutti**, A.Ducanhez, P.Grech, A. Garnache and F.Genty “*Room-temperature, monolithic, electrically-pumped type-I quantum-well Sb-based VCSELs emitting at 2.3 μm* ” *IET Electronics letters*, Vol. 44, p 203-205, Janvier 2008. ISSN : 0013-5194
- [21] J. Ristic, S. Fernandez-Garrido, E. Calleja, **L. Cerutti**, A. Trampert, U. Jahn, and K. Ploog “*Mechanisms of Spontaneous Growth of III-Nitride nanocolumns by Plasma-Assisted Molecular Beam Epitaxy*” *Journal of Crystal growth*, Vol. 310, p 4035-4045, 2008, ISSN: 0022-0248.
- [22] A. Ducanhez, **L. Cerutti**, P.Grech and F.Genty “*Room-Temperature Continuous-Wave Operation of 2.3 μm Sb-based Monolithic Vertical-Cavity Lasers Electrically-Pumped*” *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 20, No. 20, p1745-1747, 2008
- [23] M. Triki, P. Cermak, **L. Cerutti**, A. Garnache, and D. Romanini “*Extended continuous tuning of a single-frequency diode-pumped vertical-external-cavity surface-emitting laser at 2.3 μm* ” *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 20, No. 23, p1947-1949, 2008
- [24] A.Ducanhez, **L. Cerutti**, P.Grech and F.Genty “*GaSb-based monolithic EP-VCSEL emitting above 2.5 μm* ” *IET Electronics Letters*, *IET Electronics letters*, Vol. 44, p 1357-1359, Novembre 2008. ISSN : 0013-5194

- [25] JB Rodriguez, **L. Cerutti**, and E. Tournié "GaSb-Based, 2.2 μ m type-I laser fabricated on GaAs substrate operating continuous-wave at room-temperature" Applied Physics Letters, Vol. 94, 023506, Janvier 2009. ISSN :
- [26] JB Rodriguez, **L. Cerutti**, P.Grech and E. Tournié "Room-temperature operation of a 2.25 μ m electrically-pumped laser fabricated on a silicon substrate" Applied Physics Letters, Vol. 94, 061124, Février 2009. ISSN :
- [27] A.Ducanchez, **L. Cerutti**, P.Grech, F.Genty and E.Tournié "Mid-infrared GaSb-based EP-VCSEL emitting at 2.63 μ m" IET Electronics Letters, IET Electronics letters, Vol. 45, p 265-267, Février 2009. ISSN : 0013-5194
- [28] A.Ouvrard, **L. Cerutti**, and A.Garnache "Continuous tunable range with a single frequency Sb-based External cavity emitting in the MIR" IET Electronics Letters, Vol. 45, p 629-631, Juin 2009. ISSN : 0013-5194
- [29] A. Gassenq, T. Taliercio, **L. Cerutti**, A.N. Baranov and E. Tournié "Mid-IR lasing from highly tensile-strained, type II, GaInAs/GaSb quantum wells" IET Electronics Letters, IET Electronics letters, Vol. 45, p 1320-1321, Décembre 2009. ISSN : 0013-5194
- [30] J.P. Perez, A. Laurain, **L. Cerutti**, I. Sagnes, and A. Garnache "Technologies for thermal management of mid-IR Sb-based surface emitting lasers" Semiconductor Sciences Technology, Vol. 25 (4), avril 2010, article 04521
- [31] **L.Cerutti**, J.B. Rodriguez and E. Tournié "GaSb-based laser, monolithically grown on Silicon substrate emitting at 1.55 μ m at room temperature" IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 22 (8), p 553-555, avril 2010.
- [32] P.Cermak, M.Triki, A.Garnache, **L.Cerutti**, and D.Romanini "Optical-feedback cavity-enhanced absorption spectroscopy using a short cavity vertical external cavity surface emitting laser" IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 22 (21), p 1607-1609, Novembre 2010.
- [33] Y. Laaroussi, G.Almuneau, D.Sanchez and **L. Cerutti** "Efficient lateral confinement by an oxide aperture in a mid infrared GaSb based vertical light emitting source" Journal of Physics D: applied physics, Vol 44, 142001, 2011
- [34] J.R. Reboul, **L.Cerutti**, J.B. Rodriguez, P. Grech, and E. Tournié "Continuous-wave operation above room temperature of GaSb-based laser diodes grown on Si" Applied Physics Letters, Vol. 99, 121113, Septembre 2011.
- [35] N. Hattasan, A. Gassenq, **L. Cerutti**, J.B. Rodriguez, E. Tournié, and G. Roelkens "Heterogeneous integration of GaInAsSb p-i-n photodiodes on a silicon-on-insulator waveguide circuit" IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 23 (23), p 1760-1762, Décembre 2011.
- [36] A. Laurain, **L.Cerutti**, M. Myara and A. Garnache "2.7 μ m Single-frequency TEM₀₀ low-threshold Sb-based diode pumped external cavity VCSEL" IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 24 (4), p 246-248, Février 2012.
- [37] G. Roelkens, W.M.J. Green, B. Kuyken, X. Liu, N. Hattasan, A. Gassenq, **L. Cerutti**, J.B. Rodriguez, R.M. Osgood, E. Tournié, and R.G. Baets "III-V/silicon Photonics for Short-Wave Infrared Spectroscopy" IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 48 (2), p. 292-297, Février 2012
- [38] A. Gassenq, N. Hattasan, **L. Cerutti**, J.B. Rodriguez, E. Tournié, and G. Roelkens "Study of evanescently-coupled and grating-assisted GaInAsSb photodiodes integrated on a silicon photonic chip" Optics Express, Vol. 20 (11), p.11665-11672, 2012
- [39] D. Sanchez, **L. Cerutti**, and E. Tournié "Selective lateral etching of InAs/GaSb tunnel junctions for mid-infrared photonics" Semiconductor Science & Technology, Vol. 27 (4), article 085011, aout 2012
- [40] D. Sanchez, **L. Cerutti**, and E. Tournié "Single-Mode Monolithic GaSb Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser " Optics Express, Vol. 20 (8), p.15540-15546, 2012
- [41] V. N'Tsame Guilengui, **L.Cerutti**, J.B. Rodriguez, E. Tournié, and T. Taliercio "Localized surface plasmon resonances in highly doped semiconductors nanostructures" Applied Physics Letters, Vol. 101 (16), 161113, 2012

- [42] Y. Laaroussi, D. Sanchez, **L. Cerutti**, C. Levallois, C. Paranthoën, A. Rumeau, C. Tourte, and G. Almuneau "Oxide-confined mid-infrared VCSELs" IET Electronics Letters, Vol. 48, p 629-631, Juin 2012. ISSN : 0013-5194
- [43] E. Ryckeboer, A. Gassenq, M. Muneeb, N. Hattasan, S. Pathak, **L. Cerutti**, J.B. Rodriguez, E. Tournié, W. Bogaerts, R. Baets, and G. Roelkens "Silicon-on-insulator spectrometers with integrated GaInAsSb photodiodes for wide-band spectroscopy from 1510 to 2300 nm" Optics Express, Vol. 21 (5), p.6101-6108, 2013
- [44] D. Sanchez, **L. Cerutti**, and E. Tournié "Mid-IR GaSb based Bipolar cascade VCSELs" IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 25 (9), p.882-884, May, 2013
- [45] Y. Laaroussi, C. Chevallier, F. Genty, N. Fressengeas, **L. Cerutti**, T. Taliercio, O. Gauthier-Lafaye, P.F. Calmon, B. Reig, J. Jacquet, and G. Almuneau. "Oxide confinement and high contrast grating mirrors for Mid-infrared VCSELs" Optics Material Express, Vol. 3 (10), p.1576-1585, 2013
- [46] G. Roelkens, U. Dave, A. Gassenq, N. Hattasan, C. Hu, B. Kuyken, F. Leo, A. Malik, M. Muneeb, E. Ryckeboer, S. Uvin, Z. Hens, R. Baets, Y. Shimura, F. Gencarelli, B. Vincent, R. Loo, J. Van Campenhout, **L. Cerutti**, J.B. Rodriguez, E. Tournié, M. Nedeljkovic, G. Mashanovich, L. Shen, N. Healy, A.C. Peacock, X. Liu, R. Osgood, and W. Green. "Silicon-based heterogeneous photonic integrated circuits for the mid-infrared" Optics Material Express, Vol. 3 (9), p.1523-1536, 2013
- [47] Y. Laaroussi, J.B. Doucet, P. Fadel, **L. Cerutti**, I. Suarez, A. Mlayah, and G. Almuneau " Method for improving the electrical insulating properties of wet thermal oxide of ALAsSb on GaSb substrate" Applied Physics Letters, Vol. 103 (10), 101911, 2013
- [48] M. Deveautour, A. Michon, G. Beaudoin, I. Sagnes, **L. Cerutti**, and A. Garnache "Thermal management for high-power single-frequency tunable diode-pumped VECSEL emitting in the near- and mid-IR" IEEE Journal of Selected Topics in quantum Electronics, Vol.19 (4), 1701108, 2013
- [49] D. Sanchez, **L. Cerutti**, and E. Tournié "Mid-IR GaSb based monolithic vertical-cavity surface-emitting lasers" Journal of physics D : Applied physics, Vol. 46 (49), 495101, December, 2013
- [50] G. Roelkens, U. Dave, A. Gassenq, N. Hattasan, C. Hu, B. Kuyken, F. Leo, A. Malik, M. Muneeb, E. Ryckeboer, D. Sanchez, R.J. Wang, S. Uvin, Z. Hens, R. Baets, Y. Shimura, F. Gencarelli, B. Vincent, R. Loo, J. Van Campenhout, **L. Cerutti**, J.B. Rodriguez, E. Tournié, X. Chen, M. Nedeljkovic, G. Mashanovich, L. Shen, N. Healy, A.C. Peacock, X.P. Liu, R. Osgood, and W.M.J Green " Silicon-based photonic integration beyond the telecommunication wavelength range" IEEE Journal of Selected Topics in quantum Electronics, Vol.20 (4), 8201511, 2014
- [51] Q. Gaimard, **L. Cerutti**, R. Teissier and A. Vicet " Distributed Feedback GaSb based laser diodes with buried grating" Applied Physics Letters, Vol. 104 (16), 161111, 2014
- [52] T. Taliercio, V. Ntsame Guilengui, **L. Cerutti**, E. Tournié, and J.J. Greffet "Brewster "mode" in highly doped semiconductor layers: an all-optical technique to monitor doping concentration" Optics Express, Vol. 22 (20), p.24294-24303, 2014
- [53] M. Muneeb, A. Ruocco, A. Malik, S. Pathak, E. Ryckeboer, D. Sanchez, **L. Cerutti**, J.B. Rodriguez, E. Tournié, W. Bogaerts, M.K. Smit, and G. Roelkens "Silicon-on-insulator shortwave infrared wavelength meter with integrated photodiodes for on-chip laser monitoring" Optics Express, Vol. 22 (22), p.27300-27308, 2014
- [54] K. Madiomanana, M. Bahri, J.B. Rodriguez, L. Largeau, **L. Cerutti**, O. Mauguin, A. Castellano, G. Patriarche, and E. Tournié "Silicon surface preparation for III-V molecular beam epitaxy" Journal of Crystal growth, Vol. 413 p 17-24, 2015.
- [55] **L. Cerutti**, A. Castellano, J.B. Rodriguez, M. Bahri, L. largeau, A. Ballochi, K. Madiomanana, F. Lelarge, G. Patriarche, X. Marie, and E. Tournié "GaSb-based composite quantum wells for laser diodes operating in the telecom wavelength range near 1.55 μm " Applied Physics Letters, Vol. 106 (10), 101102, 2015.

- [56] Q. Gaimard, M. tTiki, T. Nguyen-Ba, L. Cerutti, G. Boissier, R. Teissier, A.N. Baranov, Y. rouillard, and A.Vicet "Distributed feedback GaSb laser diodes with buried grating: a new field of single-frequency sources from 2 to 3 μ m for gas sensing applications" Optics Express, Vol. 23 (15), p.19118-19128, 2015.
- [57] S. Roux, P. Barritault, O. Lartigue, **L. Cerutti**, E. Tournié, B. Gérard and A. Grisard "Mid-infrared characterization of refractive indices and propagation losses in GaSb/Al_xGa_{1-x}AsSb waveguides" Applied Physics Letters, Vol. 107 (17), 171901, 2015.

2.3 - Conférences internationales avec comité de lecture et actes

- [1] F. Genty, **L. Cerutti**, C. Alibert, T. Boudet, E. Picard, D. Romanini and A. Garnache "Optically pumped Sb-based microcavity laser emitting between 2.2 μ m and 2.3 μ m" **Poster:** Mid Infrared and Optical Material Devices (MIOMD) 2001, Paper P2-8, Montpellier, France, 1-3 Avril 2001 - IEE Proceedings of Optoelectronics, Vol. 149, p 22-26, 2002
- [2] **L. Cerutti**, A. Garnache, F. Genty, C. Alibert, D. Romanini, and E. Picard "Low threshold efficient Sb-based type-I quantum-well laser VCSEL emitting in the $\lambda=2-2.5 \mu$ m range" **Oral:** IEEE Indium Phosphide and Related Materials (IPRM) 2002, Paper B9-3, Stockholm, Sweden, IEEE Proceedings of IPRM: p 739-742, Mai 2002.
- [3] A. Garnache, **L. Cerutti**, F. Genty, C. Alibert and D.Romanini "Diode pumped Sb-based VCSEL emitting between 2 and 2.5 μ m at RT in CW" **Oral:** IEEE Conference on Laser and Electro-Optics (CLEO) Europe 2003, Paper CC2-3-MON, Munich, Germany, 22-27 Juin 2003. ISBN: 0-7803-7734-6
- [4] **L. Cerutti**, A. Garnache, A. Ouvrard, F. Genty, E. Cerda, A.L. Martinez, D. Romanini and A. Joullié "Continuous-Wave operation at Room temperature of Diode-pumped Antimony-Based VCSEL above 2 μ m" **Oral:** IEEE 5TH International Workshop on Laser and Fiber-Optical Networks Modelling, p 29-31, Alushta, Ukraine, 19-20 Septembre 2003. ISBN: 0-7803-7709-5 - SPIE proceedings : Advanced in Optoelectronics and Laser, Vol. 5582, p 77-87, 2004.
- [5] **L. Cerutti**, A. Garnache, A. Ouvrard and F. Genty "Continuous wave operation up to 350K of Sb-based vertical cavity surface emitting laser near 2.3 μ m" **Oral:** IEEE Conference on Laser and Electro-Optics (CLEO) 2004, Paper CMC2, San-Francisco, USA, 16-21 Mai 2004. ISBN: 1-55752-770-9
- [6] A. Garnache, A.Ouvrard, **L. Cerutti**, F. Genty, and D. Romanini "Single frequency Sb-based Vertical Cavity Surface Emitting Lasers emitting at 2.3 μ m" **Oral:** IEEE Conference on Laser and Electro-Optics (CLEO) 2004, Paper CPDB9, San-Francisco, USA, 16-21 Mai 2004. ISBN: 1-55752-770-9.
- [7] **L. Cerutti**, A. Garnache, A. Ouvrard, M. Garcia, and F.Genty "Vertical Cavity Surface Emitting Laser sources for gas detection" **Oral:** 7th International Workshop on Expert Evaluation & Control of Compound Semiconductor Materials & Technologies (EXMATEC) 2004, Paper CPDB9, Montpellier, France, 1- 4 Juin 2004. ISSN : 0031-8965
- [8] A. Ouvrard, A. Garnache, **L. Cerutti**, F. Genty, and D. Romanini "Single frequency Tunable VECSELS emitting at 2.3 μ m for spectroscopy application" **Oral:** IEEE Conference on Laser and Electro-Optics (CLEO) Europe 2005, Paper CB7-5-THU, Munich, Germany, 12-17 Juin 2005. ISBN: 0-7803-7734-6
- [9] F. Genty, **L.Cerutti**, A. Garnache, A. Perona, A. Ouvrard, M. Garcia, and C. Alibert "Room temperature Mid-IR VCSELS" **Invité:** International Symposium on Compound Semiconductors 2006 (ISCS), Vancouver, Canada, 13-17 Août 2006.
- [10] **L.Cerutti**, J. Ristic, S. Fernandez-Garrido, E. Calleja, A. Trampert, K.H. Ploog, S. Lazic, and J.M. Calleja "GaN Nanocolumns Grown on Si by Molecular Beam Epitaxy for integrated nanophotonics" **Oral:** International Molecular Beam Epitaxy Conference (MBE international), Paper TuB2-6, Tokyo, Japon, 03-08 Septembre 2006.

- [11] **L. Cerutti**, G. Boissier, P. Grech, A. Perona, J. Angellier, Y. Rouillard, E. Tournié, F. Genty, R. Kaspi, and G. C. Dente “*GaInSb/GaInAsSb Hole well laser diodes emitting near 2.93 μ m*” **Poster**: International Molecular Beam Epitaxy Conference (MBE international), Paper WeP-52, Tokyo, Japon, 03-08 Septembre 2006. Journal of Crystal growth, Vol. 301-302, p 967-970, 2007
- [12] **J. Ristic**, **L. Cerutti**, E. Calleja, A. Trampert, U. Jahn, and K.H. Ploog, “*Growth mechanisms and nucleation of GaN nanocolumns on Si(111) and Si(001)*” **Oral**: International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN 2006), paper Tu-LN9, Kyoto, Japon, 23-27 octobre 2006.
- [13] **A. Garnache**, A. Ouvrard, **L. Cerutti**, D. Barat, A. Vicet, F. Genty, Y. Rouillard, D. Romanini, and E.A. Cerda-Méndez “*2-2.7 μ m Single frequency tunable Sb-Based lasers operating in CW at RT: Microcavity and external cavity VCSELS, DFB*” **Invité**: SPIE Photonics Europe 2006, paper 6184-23, Strasbourg, France, 3-7 Avril 2006. SPIE Proceedings: Semiconductor Lasers and Laser dynamics II, Vol. 6184, Art. Numb. 61840N, 2006
- [14] **A. Garnache**, A. Bouchier, A. Ouvrard, **L. Cerutti**, and E. Cerda-Méndez “*Gain, dichroism and quantum efficiency of Sb-based quantum-well VCSELS*” **Oral**: IEEE Conference on Laser and Electro-Optics (CLEO) Europe 2007, Paper CB5-5-TUE, Munich, Germany, 12-22 Juin 2007.
- [15] **A. Ducanhez**, **L. Cerutti**, A. Garnache and F. Genty “*Monolithic, Sb-based Electrically pumped VCSELS emitting at 2.3 μ m*” **Poster**: IEEE Indium Phosphide and Related Materials (IPRM) 2008, Paper WEP47, Versailles, France, 26-30 Mai 2008
- [16] **A. Ducanhez**, **L. Cerutti**, A. Garnache and **F. Genty** “*Room Temperature, Sb-Based Monolithic EP-VCSEL at 2.3 μ m Including 2 N-Type DBR*” **Oral**: IEEE Conference on Laser and Electro-Optics (CLEO) 2008, Paper CTUZ6, San-José, USA, 5-9 Mai 2008. .
- [17] **L. Cerutti**, A. Ducanhez, G. Narcy, P. Grech, G. Boissier, A. Garnache, E. Tournié, and F. Genty “*GaSb-based VCSELS emitting in the mid-infrared wavelength range (2-3 μ m) grown by molecular beam epitaxy*” **Invité**: International Molecular Beam Epitaxy Conference (MBE international), Vancouver, Canada, 03-08 Aout 2008. Journal of Crystal growth, Vol. 311 (7), p 1912-1916, 2009
- [18] A. Gassenq, **L. Cerutti**, A. Baranov, and **E. Tournié** “*MBE growth of mid-IR diode lasers based on InAs/GaSb/InSb short-period superlattice active zones*” **Oral**: International Molecular Beam Epitaxy Conference (MBE international), Vancouver, Canada, 03-08 Aout 2008. Journal of Crystal growth, Vol. 311 (7), p 1905-1907, 2009
- [19] **A. Ducanhez**, **L. Cerutti**, P. Grech and F. Genty “*GaSb-based microcavity EP-VCSEL emitting above 2.2 μ m in CW at RT*” **Oral**: IEEE International Semiconductor Laser Conference (ISLC) 2008, Paper TUA2, Sorrento, Italy, 14-18 Septembre 2008.
- [20] **L. Cerutti**, J.B. Rodriguez, P. Grech and E. Tournié “*Room Temperature, Continuous Wave Operation of an Sb-Based Laser Grown on GaAs Substrate*” **Oral**: IEEE Conference on Laser and Electro-Optics (CLEO) 2009, Paper CTUGG4, Baltimore, USA, 1-5 Juin 2009.
- [21] J.B. Rodriguez, **L. Cerutti**, and E. Tournié “*Demonstration of Laser Operation at Room-Temperature of an Sb-Based Mid-Infrared Multi-Quantum-Well Structure Monolithically Grown on a Silicon Substrate*” **Oral (post deadline)**: IEEE Conference on Laser and Electro-Optics (CLEO) 2009, Paper CPDA4, Baltimore, USA, 1-5 Juin 2009.
- [22] **A. Ducanhez**, **L. Cerutti**, P. Grech, F. Genty, and E. Tournié “*GaSb-based mid-IR electrically-pumped VCSELS covering the wavelength range from 2.3 to 2.7 μ m*” **Oral**: IEEE Conference on Laser and Electro-Optics (CLEO Europe) 2009, Paper CB7.2, Munich, Germany, 14-19 Juin 2009.
- [23] **J.B. Rodriguez**, **L. Cerutti**, P. Grech, G. Boissier, G. Narcy, and E. Tournié “*Sb-based laser sources grown by molecular beam epitaxy on silicon substrates*” **Invité**: SPIE Photonics West 2010, paper 7616-31, San-

Francisco, USA, 22-27 Janvier 2010. Proceedings of SPIE, Novel In Plane Semiconductor Lasers IX, Vol. 7616, Art. Num. 76160V, 2010

- [24] A.Garnache, A.Laurain, M. Myara, J.P.Perez, **L. Cerutti**, A. Michon, G. Beaudoin, I. Sagnes, P. Cermak, and D. Romanini “*Design and properties of high power highly coherent single frequency VECSEL emitting in the near to mid-IR photonic applications*” **Invité:** SPIE Photonics West 2011, paper 7919-14, San-Francisco, USA, 22-27 Janvier 2011. Proceedings of SPIE, Vertical External Cavity Surface Emitting Lasers, Vol. 7619, Art. Num. 791914, 2011
- [25] N. Hattasan, **L. Cerutti**, J.B. Rodriguez, E. Tournié, D. Van Thourout, and G. Roelkens “*Heterogeneous GaSb/SOI mid-infrared photonic integrated circuits for spectroscopic applications*” **Invité:** SPIE Photonics West 2011, paper 7945-58, San-Francisco, USA, 22-27 Janvier 2011. Proceedings of SPIE, Quantum Sensing and nanophotonic Devices VIII, Vol. 7945, Art. Num. 79451K, 2011
- [26] J.B. Rodriguez, **L. Cerutti**, J.R. Reboul and E. Tounié “*CW operation at RT of Sb-based laser monolithically grown on Si substrate*” **Invité:** SPIE Photonics West 2012, paper 8268-53, San-Francisco, USA, 22-26 Janvier 2012 Proceedings of SPIE : Quantum Sensing and Nanophotonic Devices IX, Vol.8268, Art. Num. 82681I, 2012
- [27] A.Laurain, **L.Cerutti**, M. Myara and A. Garnache “*2.7- μ m single-frequency TEM₀₀ operation of Sb-based diode-pumped external-cavity VCSEL*” **Oral:** SPIE Photonics West 2012, paper 8242-13, San-Francisco, USA, 22-26 Janvier 2012-proceedings of SPIE: Vertical External Cavity Surface Emitting Lasers II, Vol. 8242, Art. Num. 82420L, 2012
- [28] T. Taliercio, V. Ntsame Guilengui, **L. Cerutti**, J.B. Rodriguez and E. Tounié “*GaSb-based all-semiconductor mid-IR plasmonics*” **Invité:** SPIE Photonics West 2012, paper 8631-120, San-Francisco, USA, 3-7 February 2013 - Proceedings of SPIE : Quantum Sensing and Nanophotonic Devices IX, Vol.8631, Art. Numb. 8631120-1, 2013
- [29] N. Hattasan, A. Gassenq, **L. Cerutti**, J.B. Rodriguez, E. Tounié and G. Roelkens “*Integrated Thin-Film GaSb-based Fabry-Perot Lasers: Towards a Fully Integrated Spectrometer on a SOI Waveguide Circuit*” **Oral:** SPIE Photonics West 2012, paper 8631-14, San-Francisco, USA, 3-7 February 2013 - Proceedings of SPIE : Quantum Sensing and Nanophotonic Devices I X, Vol.8631, Art. Numb. 863114-1, 2013
- [30] T. Taliercio, V. Ntsame Guilengui, **L. Cerutti**, J.B. Rodriguez and E. Tounié “*All-semiconductor plasmonics for mid-IR applications*” **Invité:** SPIE 2013 Optics+Photonics, paper 8807-1, San-Diego, USA, 25-29 August 2013 - Proceedings of SPIE : Nanophotonic Materials X, Vol.8631, Art. Numb. 8631120-1, 2013
- [31] G. Roelkens, U. Dave, A. Gassenq, N. Hattasan, C. Hu, B. Kuyken, F. Leo, A. Malik, M. Muneeb, E. Ryckeboer, S. Uvin, Z. Hens, R. Baets, Y. Shimura, F. Gencarelli, B. Vincent, R. Loo, J. Van Campenhout, **L. Cerutti**, J.B. Rodriguez, E. Tournié, X. Chen, M. Nedeljkovic, G. Mashanovich, L. Shen, N. Healey, A.C. Peacock, X.P. Liu, R. Osgood, and W. Green “*Mid-IR heterogeneous silicon photonics*” **Invité:** SPIE Photonics West 2014, paper 899316, San Francisco, USA, 2-6 February 2014 - Proceedings of SPIE: Quantum Sensing and Nanophotonic devices XI, Vol. 8993, art. Numb. 899316, 2014
- [32] A. Garnache, V. Lecocq, L. Ferrieres, A. Bensalma, M. Myara, **L. Cerutti**, I. Sagnes, and S. Denet, “*Industrial integration of high coherence tunable VECSEL in the NIR & MIR*” **Invité:** SPIE Photonics West 2014, paper 89660V, San Francisco, USA, 2-6 February 2014 - Proceedings of SPIE: VECSEL IV, Vol. 8966, art. Numb. 899660V, 2014
- [33] Q. Gaimard, T. Nguyen-Ba, A. Larrue, **L. Cerutti**, Y. Rouillard, O. Gauthier-Lafaye, R. Teissier, and A. Vicet “*Distributed-feedback GaSb-based laser diodes in the 2.3 to 3.3 μ m wavelength range*” **Oral:** SPIE Photonics Europe 2014, paper 91341J, Brussels, Belgium, 14-17 April 2014 - Proceedings of SPIE: Semiconductor Lasers and Laser Dynamics VI, Vol. 9134, art. Numb. 91341J, 2014
- [34] C. Chevallier, N. Fressengeas, J. Jacquet, G. almuneau, Y. Laaroussi, O. Gauthier-Lafaye, **L. Cerutti**, and F. Genty “*Parameter-tolerant design of high contrast gratings*” **Invité:** SPIE Photonics West 2015, paper 93720N,

- [35] G. Almuneau, Y. Laaroussi, C. Chevallier, F. Genty, N. Fressegeas, **L. Cerutti**, and O. Gauthier-Lafaye “*GaAs/AlOx high contrast grating mirrors for mid-infrared VCSELs*” **Invité**: SPIE Photonics West 2015, paper 93720S, San Francisco, USA, 8-12 February 2015 - Proceedings of SPIE: High Contrast Metastructure IV, Vol. 9372, art. Numb. 93720S, 2015

2.4 - Conférences internationales avec comité de lecture

- [1] A.Garnache, D. Romanini, F. Genty, S Hoogland, **L. Cerutti**, W.Y. Hwang, S. Koulikov, W. Martin, V. Thierry Miege, A.C. Tropper, B. Paldus, C. Alibert and A. Kachanov “*Diode pumped surface emitting semiconductor lasers in the 1-3 μm range for spectroscopy and trace gas detection application*” **Oral**: Middle Infrared Coherent Source (MICS) 2001, Paper Th.07, St Petersburg, Russia, 25-29 Juin 2001
- [2] **L. Cerutti**, F. Genty, C. Alibert, A.N. Baranov, T. Boudet, E. Picard, D. Romanini and A. Garnache “*Optically pumped Sb-based microcavity laser emitting between 2.2 and 2.4 μm* ” **Oral**: Middle Infrared Coherent Source (MICS) 2001, Paper Fr.05, St Petersburg, Russia, 25-29 Juin 2001.
- [3] **L. Cerutti**, A. Garnache, F. Genty, C. Alibert, D. Romanini and E. Picard “*Diode pumped Sb-based V(E)CSEL emitting between 2 and 2.5 μm* ” **Oral**: Mid Infrared and Optical Material Devices (MIOMD) 2002, Paper P2-8, Annapolis, USA, 8-11 Septembre 2002
- [4] C. Alibert, **L. Cerutti**, F. Genty, and A. Garnache “*Diode pumped Sb-based VECSEL emitting in the 2 and 2.5 μm range*” **Invité**: Office National Research (ONR) Workshop on 6.1 Angstrom Semiconductors, South Padre Island, USA, 13-16 Janvier 2003
- [5] A. Vicet, A. Ouvrard, **L. Cerutti**, A. Sahli, A. Garnache, F. Genty, Y. Rouillard, R. Teissier, A. N. Baranov and C. Alibert “*Tunable antimonide-based quantum well lasers for trace gas detection in atmospheric windows*” **Poster**: Tunable Diode Laser Spectroscopy (TDLS)-2003, Paper A1, Zermatt, Switzerland, 14-18 Juillet 2003
- [6] **L.Cerutti**, A. Garnache, A. Ouvrard, M. Garcia, and F. Genty “*Room temperature continuous wave operation of an optically pumped Sb-based microcavity laser emitting at 2.36 μm* ” **Oral**: Semiconductor and Integrated OptoElectronics 2004 (SIOE), Paper 18, Cardiff, Wales, 5-7 Avril 2004.
- [7] C.Alibert, J.Angellier, D.Barate, **L.Cerutti**, J.Commalonga, S.Gaillard, A.Garnache, F.Genty, A.Ouvrard, Y.Rouillard, A.Sahli, E.M.Skouri, R.Teissier, A.Vicet and A.Baranov “*Recent progress on the heterostructures grown by MBE on GaSb and InAs. Overview of laser diodes (FP, QCL, DFB, and VCSEL) and applications (trace gas analysis)*” **Invité**: IX^e Journées Maghrébines sur les Sciences des Matériaux. JMSM’2004, ORAN Algérie 8-10 Mai 2004
- [8] **L. Cerutti**, A. Garnache, A. Ouvrard, M. Garcia and F. Genty “*Réalisation par Epitaxie par Jet moléculaires de VCSEL à base d’antimoine*” **Poster**: IX^e Journées Maghrébines sur les Sciences des Matériaux. JMSM’2004, ORAN Algérie 8-10 Mai 2004
- [9] **L. Cerutti**, A. Garnache, A. Ouvrard and F. Genty “*High temperature Sb-based Vertical External Cavity surface Emitting Laser around 2.3 μm* ” **Oral**: Mid Infrared and Optical Material Devices (MIOMD) 2004, Paper Mo.09o, Saint Petersburg, Russia, 28 Juin- 03 Juillet 2004.
- [10] A. Ouvrard, A. Garnache, **L. Cerutti**, A. Sahli, A. Vicet, Y. Rouillard, F. Genty, D. Romanini, and R. Werner “*Single frequency tunable Sb-based semiconductor lasers emitting in CW at 300K in the 2.3 μm spectral range*” **Invité**: SIRIS 2004, Vienna, Austria, 6-8 Septembre 2004.
- [11] A. Garnache, A. Ouvrard, **L.Cerutti**, F. Genty and D. Romanini “*Single-frequency Tunable External-cavity VCSELs in the near-IR*” **Oral** : PHysics and Applications of SEMiconductor LASERs (PHASE) 2005, Metz, France, 29-30 Mars 2005

- [12] **L. Cerutti**, A. Garnache, A. Ouvrard, M. Garcia and F. Genty “Mid-IR GaSb-based Vertical Cavity Surface Emitting laser sources” **Poster:** Physics and Applications of Semiconductor LASERS (PHASE) 2005, Metz, France, 29-30 Mars 2005
- [13] C. Alibert, J. Angellier, D. Barate, **L. Cerutti**, j. Commalunga, S. Gaillard, F. Genty, A. Garnache, A. Ouvrard, Y. Rouillard, A. Salhi, E. M. Skouri, R. Teissier, A. Vicet and A. Baranov **Invité:** “Overview of Laser Diodes (FP, QCL, DFB and VCSEL) for Trace gas analysis grown by the University of Montpellier” Tunable Diode Laser Spectroscopy (TDLS)-2005, Paper P1, Florence, Italie, 11-15 Juillet 2004.
- [14] A. Ouvrard, A. Garnache, **L. Cerutti**, F. Genty, and D. Romanini **Poster:** “2.3 μ m Single-Frequency Tunable VCSEL for Gas Detection” Tunable Diode Laser Spectroscopy (TDLS)-2005, Paper D19, Florence, Italie, 11-15 Juillet 2004.
- [15] A. Garnache, **L. Cerutti**, P. Grech, F. Genty and A. Campargue **Poster:** “External-Cavity VCSEL Emitting in the 2-2.5 μ m range applied to high sensitivity intracavity laser absorption spectroscopy” Tunable Diode Laser Spectroscopy (TDLS)-2005, Paper A15, Florence, Italie, 11-15 Juillet 2004.
- [16] A. Garnache, A. Ouvrard, **L. Cerutti**, J. Angellier, A. Vicet, D. Barat, Y. Rouillard, F. Genty, D. Romanini, R. Werner, and J. Koeth **Invité:** “2-3 μ m Single frequency tunable Sb-Based lasers operating in CW at RT” Mid Infrared and Optical Material Devices (MIOMD) 2005, Lancaster, UK, 12-14 Septembre 2005.
- [17] A. Garnache, **L. Cerutti**, P. Grech, F. Genty and A. Campargue **Poster:** “External-Cavity VCSEL Emitting in the 2-2.5 μ m range applied to high sensitivity intracavity laser absorption spectroscopy” Mid Infrared and Optical Material Devices (MIOMD) 2005, Lancaster, UK. 12-14 Septembre 2005.
- [18] J. Ristic, **L. Cerutti**, S. Fernandez-Garrido, E. Calleja, A. Trampert, U. Jahn and K.H. Ploog “III-Nitride Nanocolumnar Heterostructures on Silicon: Growth Mechanisms and Application to Devices” **Invité:** International Symposium on Blue Laser and Light Emitting Diodes (ISBLLED) 2006, Paper C1-05, Montpellier, France, 15-19 Mai 2006.
- [19] M. Utrera, J. Ristic, S. Fernandez-Garrido, **L. Cerutti**, G. Fuentes, E. Calleja, A. Trampert, U. Jahn, and K.H. Ploog **Poster:** “Ordered growth of GaN Nanostructures on Si by MBE” 14th European Molecular Beam epitaxy Workshop, Granada, Spain, 5-7 mars 2007.
- [20] E.A. Cerda-Méndez, A. Gorvachev, R.E. Balderas-Navarro; A. Lastras-Martínez, **L. Cerutti** and A. Garnache **Poster:** “Effects of post-growth thermal annealing on GaInAsSb/AlGaAsSb quantum-well structures” 6th International Conference on Low Dimensional Structures and Devices (LDS2007), San Andrés Island, Colombie, 15-20 avril 2007.
- [21] A. Ducanhez, **L. Cerutti**, A. Garnache, A. Perona, P. Grech and F. Genty **Poster:** “Fabrication of GaSb-based heterostructures designed for EP-VCSELs emitting above 2 μ m” Mid Infrared and Optical Material Devices (MIOMD) 2007, Paper P19, Bad-Ischl, Austria. 14-16 Mai 2007.
- [22] A. Garnache, M. Myara, **L. Cerutti**, A. Ouvrard, J.-P. Perez, A. Ducanhez, A. Laurain, A. Bouchier, and P. Signoret **Oral:** “Single-frequency low-noise broadly-tunable extended-cavity VCSEL for gas analysis in the MIR” Mid Infrared and Optical Material Devices (MIOMD) 2008, Paper 82, Freiburg, Germany. 7-11 September 2008.
- [23] A.A. Bachmann, K. Kashani-Shirazi, M.-C. Amann, (WSI) F. Genty, **L. Cerutti**, A. Ducanhez, P. Grech, and E. Tournié (UM2) **Invité:** “Recent progress on electrically-pumped GaSb-based VCSELs emitting above 2 μ m for sensing applications” Mid Infrared and Optical Material Devices (MIOMD) 2008, Paper 82, Freiburg, Germany. 7-11 September 2008.
- [24] A. Gassenq, **L. Cerutti**, A. Baranov, and E. Tournié **Poster:** “InAs/GaSb/InSb short-period superlattice diode lasers emitting near 3.3 μ m at room temperature” Mid Infrared and Optical Material Devices (MIOMD) 2008, Paper P6-132, Freiburg, Germany. 7-11 September 2008.

- [25] E. Tournié, **L. Cerutti**, A. Ducanhez, A. Gassenq, F. Genty, JB Rodriguez, and AN. Baranov **Invité**: “*Sb-based Mid-infrared lasers*” Workshop on Compound Semiconductor Devices and integrated Circuits (WOCS-DICE) 2009, Paper Mon7, Malaga, Spain. 17-20 mai 2009.
- [26] JB Rodriguez, **L. Cerutti**, and E. Tournié **Oral**: “*Mid-IR GaSb-based lasers on highly mismatched GaAs and Si substrates*” Workshop on Compound Semiconductor Devices and integrated Circuits (WOCS-DICE) 2009, Paper Mon7, Malaga, Spain. 17-20 mai 2009.
- [27] J.B. Rodriguez, **L. Cerutti**, and E. Tournié “*Mid-IR Sb-Based Lasers Grown on Highly Mismatched GaAs and Si Substrates*” **Oral**: International Symposium on Compound Semiconductors 2009 (ISCS), Santa Barbara, USA, 30 Août-2 Septembre 2009.
- [28] E. Luna, Y. Rouillard, **L. Cerutti**, E. Tournié, and A. Trampert, “*Interface Stability of Metastable Quaternary (Ga,In)(As,Sb) Quantum Wells*” **Oral**: International Symposium on Compound Semiconductors 2009 (ISCS), Santa Barbara, USA, 30 Août-2 Septembre 2009.
- [29] **L. Cerutti**, J.B. Rodriguez, and E. Tournié “*GaSb based, 1.55 μm laser monolithically integrated on Silicon substrate operating at room temperature*” **Oral**: IEEE Indium Phosphide and Related Materials (IPRM) 2010, Paper Tha1-2, Kagawa, Japon, 31 mai-3 juin 2010
- [30] J.P. Perez, A. Laurain, **L. Cerutti**, I. Sagnes, and A. Garnache “*Thermal management of mid-IR Sb-based surface emitting lasers*” **Oral**: 10th International Workshop on Expert Evaluation & Control of Compound Semiconductor Materials & Technologies (EXMATEC) 2010, Paper session E6, Darmstadt, Germany, 19-21 mai 2010.
- [31] A. Gassenq, **L. Cerutti**, and E. Tournié “*Growth optimization of InAs/GaSb/InSb short-period super-lattices as active regions of mid-IR lasers*” **Poster**: International Molecular Beam Epitaxy Conference (MBE international), Paper Thu A1.5 Berlin, Germany, 22-27 Aout 2010.
- [32] **L. Cerutti**, J.R. Reboul, J.B. Rodriguez, and E. Tournié **Oral**: “*Sb-based lasers grown on highly mismatched substrates*” Mid Infrared and Optical Material Devices (MIOMD) 2010, Shanghai, China. 5-9 September 2010.
- [33] N. Hattasan, **L. Cerutti**, J.B. Rodriguez, E. Tournié, D. Van Thourhout, and G. Roelkens **Oral**: “*Heterogeneous Integration of GaSb-based epitaxy on silicon-on-insulator: towards mid-infrared photonic integrated circuits for environmental and bio-medical applications*” Mid Infrared and Optical Material Devices (MIOMD) 2010, Shanghai, China. 5-9 September 2010.
- [34] A. Gassenq, **L. Cerutti**, and E. Tournié **Poster**: “*Laser emission in the 3 – 3.5 μm wavelength range with InAs/GaSb/InSb short-period super-lattice active regions*” Mid Infrared and Optical Material Devices (MIOMD) 2010, Shanghai, China. 5-9 September 2010.
- [35] E. Tournié, A. Gassenq and **L. Cerutti** “*The InAs/GaSb/InSb superlattice: an active zone for mid infrared lasers*” **Invité**: SPIE Photonics West 2011, paper 7945-17, San-Francisco, USA, 22-27 Janvier 2011.
- [36] J.B. Rodriguez, **L. Cerutti**, J.R. Reboul, and E. Tournié **Invité**: “*Current developments in MBE of highly mismatched materials*” Euro-Molecular Beam Epitaxy (Euro-MBE) 2011, Alpes d’huez, France. 20-23 Mars 2011.
- [37] **L. Cerutti**, J.B. Rodriguez, and E. Tournié **Poster**: “*Metamorphic 6.3 Å GaInSb templates grown on GaAs substrates for mid-infrared lasers*” Euro-Molecular Beam Epitaxy (Euro-MBE) 2011, Alpes d’huez, France. 20-23 Mars 2011.
- [38] Y. Laaroussi, **L. Cerutti**, and G. Almuneau, “*Wet thermal oxidation of ALAsSb for lateral confinement in GaSb-based VCSELs*” **Poster**: International Symposium on Compound Semiconductors 2011 (ISCS), Berlin, Germany, 20-24 mai 2011.

- [39] **L. Cerutti**, J.R. Reboul, J.B. Rodriguez and E. Tournié, “*Sb-based laser grown on Si substrate operating in CW above room temperature*” **Oral (Post deadline)**: International Symposium on Compound Semiconductors 2011 (ISCS), Berlin, Germany, 20-24 mai 2011.
- [40] **C. Chevallier**, N. Fressengeas, F. Genty, J. Jacquet, Y. Laaroussi, G. Almuneau, D. Sanchez, **L. Cerutti**, and T. Taliercio **Oral**: “*Optimized GaAs High Contrast Grating Design and Fabrication for Mid-infrared Application at 2.3 μm*” Frontiers in Optic 2011, Paper FWS5, San-José, Etats-unis, 17-20 Octobre
- [41] A. Laurain, **L. Cerutti**, M. Myara, and **A. Garnache** **Oral (post deadline)**: “*2.7 μm Single-frequency TEM00 operation of Sb-based Diode-Pumped External-Cavity VCSEL*” 2nd EOS Topical Meeting on Lasers (ETML'11), Capri, Italy, 26 - 28 September 2011
- [42] **Y. Laaroussi**, O. Gauthier-Lafaye, T. Taliercio, **L. Cerutti**, C. Chevallier, N. Fressengeas, F. Genty, and G. Almuneau “*GaAs-based monolithic high contrast gratings for mid-infrared VCSELs*” **Oral**: Semiconductor and Integrated Optoelectronics 2012 (SIOE), Paper 34, Cardiff, Wales, 2-4 Avril 2012.
- [43] **D. Sanchez**, **L. Cerutti**, and E. Tournié “*New confinement method for monolithic GaSb-VCSEL emitting in the mid-IR*” **Invité**: SPIE Photonics Europe 2012, paper 8432-06, Brussels, Belgium, 15-19 Avril 2012
- [44] **V. Ntsame Guilengui**, **L. Cerutti**, J.B. Rodriguez and T. Taliercio “*Experimental study of surface plasmons polaritons on arrays of doped and un-doped semiconductors*” **Oral**: 3rd International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (META2012), Session Mid-infrared and THz plasmonics, Paris, France, 19-22 Avril 2012
- [45] **E. Ryckeboer**, A. Gassenq, N. Hattasan, B. Kuyken, **L. Cerutti**, J.B. Rodriguez, E. Tournié, G. Roelkens, W. Bogaerts, and R. Baets “*Integrated spectrometer and integrated detectors on Silicon-on-Insulator for short-wave infrared applications*” **Oral**: IEEE Conference on Laser and Electro-Optics (CLEO) 2012, Paper CTu1A.3, San-Jose, USA, 6-11 Mai 2012.
- [46] **D. Sanchez**, **L. Cerutti**, and E. Tournié “*High temperature continuous wave operation of Sb-based monolithic EP-VCSEL with selectively etched Tunnel-junction apertures*” **Oral**: IEEE Conference on Laser and Electro-Optics (CLEO) 2012, Paper CW3N.7, San-Jose, USA, 6-11 Mai 2012.
- [47] **V. Ntsame Guilengui**, **T. Taliercio**, **L. Cerutti**, J.B. Rodriguez and E. Tournié “*Highly doped semiconductors for mid-infrared plasmonics*” **Oral**: 36th Workshop on Compound Semiconductor Devices and Integrated Circuits (WOCS-DICE 2012), Session Electromagnetics, Porquerolles, France, 28-30 mai 2012
- [48] **Y. Laaroussi**, O. Gauthier-Lafaye, L. Bouscayrol, C. Fontaine, G. Almuneau, **L. Cerutti**, T. taliercio, C. Chevallier, F. genty, and N. Fressengas. “*AlOx/GaAs high contrast grating mirrors for mid-infrared VCSELs*” **Invité**: 14th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Mo.B4.4, Coventry, UK, 2-5 July 2012
- [49] **D. Sanchez**, **L. Cerutti**, and **E. Tournié**, “*High temperature, single mode, continuous wave operation of electrically pumped monolithic GaSb VCSELs*” **Oral**: 29th International Symposium on Compound Semiconductors 2012 (ISCS), Th-1A.3, Santa Barbara, USA, 27-30 August 2012.
- [50] **M. Devautour**, A. Michon, G. Beaudoin, I. Sagnes, **L. Cerutti**, and **A. Garnache** “*Thermal management for high power VCSEL emission in the near- and mid-IR*” **Poster**: 5th EPS-QEOD Europhoton conference, TuP.21, Stockholm, Sweden, 26-31 August 2012.
- [51] **D. Sanchez**, **L. Cerutti**, and E. Tournié, “*Single mode, CW GaSb-VCSEL operating at 70°C*” **Poster**: 11th Infrared Optoelectronics: Materials and devices (MIOMD-XI), Day 2-Session 2, Chicago, USA, 4-8 September 2012
- [52] J.B. Rodriguez, **L. Cerutti**, J.R. Reboul and E. Tournié, “*Mid-IR laser diodes epitaxially grown by Molecular Beam epitaxy on silicon substrates*” **Invité**: 11th Infrared Optoelectronics: Materials and devices (MIOMD-XI), Day 2-Session 4, Chicago, USA, 4-8 September 2012

- [53] T. Taliercio, V. Ntsame Guilengui, **L. Cerutti**, J.B. Rodriguez, and E. Tournié, "Surface and localized plasmons polaritons on arrays of doped and un-doped semiconductors" **Poster**: 11th Infrared Optoelectronics: Materials and devices (MIOMD-XI), Day 3-Session 3, Chicago, USA, 4-8 September 2012
- [54] K. Madiomanana, J.B. Rodriguez, **L. Cerutti** and E. Tournié "Impact of nucleation conditions on the properties of GaSb-based heterostructures grown by MBE on GaAs substrates" **Poster**: 17th Conference on Molecular Beam epitaxy (MBE2012), MoP-9, Nara, Japan, 23-28 September 2012
- [55] **L. Cerutti**, D. Sanchez and E. Tournié "Single-mode GaSb-based monolithic VCSELs grown by MBE operating in CW up to 70°C" **Oral**: 17th Conference on Molecular Beam epitaxy (MBE2012), ThB-2-3, Nara, Japan, 23-28 September 2012
- [56] N. Hattasan, A. Gassenq, **L. Cerutti**, J.B. Rodriguez, E. Tournié, and G. Roelkens "InGaAsSb/GaSb lasers and photodetectors integrated on a silicon-on-insulator waveguide circuit for spectroscopic application" **Invité**: 2nd International workshop on opportunities and challenge in mid-infrared laser-based gas sensing (MIRSENS 2), , Session lasers 2, Wrocław, Poland, 18-20 october 2012
- [57] E. Tournié, D. Sanchez and **L. Cerutti** "Single-mode operation of monolithic GaSb- VCSELs " **Invité**: 2nd International workshop on opportunities and challenge in mid-infrared laser-based gas sensing (MIRSENS 2), , Session lasers 4, Wrocław, Poland, 18-20 october 2012
- [58] E. Tournié, **L. Cerutti**, G. Boissier, Y. Rouillard, A.N. Baranov, J.P. Perez, and J. B. Rodriguez **invité**: "Antimonide-based compound semiconductors and devices grown by molecular beam epitaxy " 17th Euro-Molecular Beam Epitaxy (Euro-MBE), Paper Mo-C1, Levi, Finland. 10-13 Mars 2013.
- [59] **L. Cerutti**, Y. Laaroussi, D. Sanchez, C. Levallois, C. Paranthoen, and G. Almuneau **Poster**: "GaSb VCSEL with III-As metamorphic confinement layer grown by molecular beam epitaxy" 17th Euro-Molecular Beam Epitaxy (Euro-MBE), Paper Mo-P37, Levi, Finland. 10-13 Mars 2013.
- [60] D. Sanchez, **L. Cerutti**, and E. Tournié "VCSELs with cascaded active region for improved output power" **Oral**: International Symposium on Compound Semiconductors 2013 (ISCS), Kobe, Japan, 19-23 may 2013.
- [61] Q. Gaimard, T. Nguyen-Ba, A. Larrue, **L. Cerutti**, Y. Rouillard, R. Teissier, and A. Vicet "Index-coupled distributed-feedback GaSb-based lasers diodes in the 2.3 to 3.3 μm wavelength range" **Oral**: International Symposium on Compound Semiconductors 2013 (ISCS), Paper Tu-B2-6, Montpellier, France, 11-15 may 2014.
- [62] A. Castellano, , **L. Cerutti**, J.B. Rodriguez, K. Madiomanana, F. Lelarge and E. Tournié "GaSb-based active zones for laser emission at 1.55 μm " **Oral**: International Symposium on Compound Semiconductors 2013 (ISCS), Paper Tu-A3-5, Montpellier, France, 11-15 may 2014.
- [63] A. Al Mohtar, A. Bruyant, J. Vaillant, M. Kazan, A. Khoury, V. N'Tsime Guilengui, **L. Cerutti**, and T. Taliercio "Phase sensitive Near-field Optical Nanoscopy Detecting Localized Surface Plasmons in Highly doped Semiconductor Nanostructures" **Oral**: 13th Near Field optics, Nanophotonics, and related techniques, Salt-Lake City, USA, 31 August-4 september 2014.
- [64] M. Bahri, L. Largeau, O. Mauguin, G. Patriarche, K. Madiomanana, J. B. Rodriguez, L. Cerutti, and E. Tournié "Structural characterization of GaSb-based heterostructures grown on Si" **Poster**: 18th International Microscopy Congress (IMC 2014), MS-8-P-1648, Prague, Czech Republic, 7- 12 September 2014
- [65] K. Madiomanana, J.B. Rodriguez, **L. Cerutti**, A. Castellano, M. Bahri, L. Largeau, O. Mauguin, G. Patriarche and E. Tournié "Substrate cleaning process for the MBE for the MBE growth of Sb-based 1.55 μm lasers on Si" **Poster**: 18th Conference on Molecular Beam epitaxy (MBE2014), P-57, Flagstaff, USA, 7-12 September 2014
- [66] A. Castellano, **L. Cerutti**, J. B. Rodriguez, K. Madiomanana, F. Lelarge, and E. Tournié "GaSb active zones grown by MBE for emission near 1.55 μm " **Poster**: 18th Conference on Molecular Beam epitaxy (MBE2014), P-56, Flagstaff, USA, 7-12 September 2014

- [67] **L. Cerutti**, J. B. Rodriguez, Q. Gaimard, V. N'Tsame Guilengui, T. Taliercio, A. Vicet and E. Tournié "*GaSb grating regrowth for Mid-Infrared optoelectronic devices*" **Oral**: 18th Conference on Molecular Beam epitaxy (MBE2014), ThA2-4, Flagstaff, USA, 7-12 September 2014
- [68] E. Tournié, **L. Cerutti**, A. Castellano, K. Madiomanana, and J. B. Rodriguez, "*1.55 μm GaSb-based lasers monolithically grown on Si substrates*" **Invité**: 18th Conference on Molecular Beam epitaxy (MBE2014), FrA1-1, Flagstaff, USA, 7-12 September 2014
- [69] Q. Gaimard, A. Larue, , **L. Cerutti**, Y. Rouillard, O. Gauthier-Lafaye, R. Teissier, and A. Vicet "*Index coupled distributed feedback GaSb lasers diodes in the 2.3 to 3 μm wavelength range*" **Oral**: 12th Infrared Optoelectronics: Materials and devices (MIOMD-XI), Tu-A33, Montpellier, France, 5-9 October 2014
- [70] T. Taliercio, V. Ntsame Guilengui, **L. Cerutti**, and E. Tournié "*Brewster "mode" to monitor optically the doping concentration in highly doped semiconductor layers*" **Poster**: 12th Infrared Optoelectronics: Materials and devices (MIOMD-XI), P28, Montpellier, France, 5-9 October 2014
- [71] **L. Cerutti**, A. Castellano, K. Madiomanana, J.B. Rodriguez, F. Lelarge and E. Tournié "*GaInSb/AlInSb coupled QWs on GaSb for telecom laser*" **Oral**: SPIE Photonics West 2015, paper 9382-2, San Francisco, USA, 8-12 February 2015
- [72] K. Madiomannana, J.B. Rodriguez, **L. Cerutti**, A. Castellano, M. Bahri, L. Largeau, O. Mauguin, G. G. Patriarche and E. Tournié **Poster**: "*Substrate cleaning process for the MBE growth of Sb-based heterostructures on Si substrates*" 18th Euro-Molecular Beam Epitaxy (Euro-MBE), Paper Tu-P6, Canazei, Italy. 15-18 March 2015.
- [73] A. Vicet, Q. Gaimard, A. Larrue, **L. Cerutti**, T. Nguyen-Ba, M. Triki, Y. Rouillard, O. Gauthier-Lafaye, R. Teissier, and E. Tournié "*New index-coupled distributed-feedback GaSb-based lasers diodes in the 2 to 3 μm wavelength range. Applications to spectroscopy*" **Invité**: 3th International workshop on opportunities and challenge in mid-infrared laser-based gas -sensing (MIRSENS 3), Paper Fr16, Session lasers sources 3, Würzburg, Germany, 5-7 March 2015
- [74] T. Taliercio, V. Guilengui, **L. Cerutti**, J.B. Rodriguez, and E. Tournié "*Highly doped semiconductor plasmonics for mid-IR applications*" **Oral**: Surface Plasmon Photonics (SPP7), paper Mo-01-E-3, Jerusalem, Israel, May 31 – June 5, 2015
- [75] T. Taliercio, **L. Cerutti**, E. Tournié, and J.J. Greffet "*Brewster mode or how to optically monitor the doping concentration in highly doped semiconductor*" **Oral**: META 2015, Session Advances in hybrid plasmonics III (2A22), New York, USA, 4-7 August 2015
- [76] T. Taliercio, V. N'Tsame Guilengui, J.B. Rodriguez, **L. Cerutti** and E. Tournié "*Observation of Fano resonances in highly doped semiconductors plasmonic resonators*" **Oral**: SPIE Optics + Photonics 2015, paper 9547-40, San Diego, USA, 9-13 August 2015
- [76] T. Taliercio, E. Tournié, J.B. Rodriguez, **L. Cerutti** and J.J. Greffet "*Observation of Fano resonances in highly doped semiconductors plasmonic resonators*" **Poster**: SPIE Optics + Photonics 2015, paper 9547-129, San Diego, USA, 9-13 August 2015
- [77] S. Roux, P. Barritault, O. Lartigue, **L. Cerutti**, E. Tournié, B. Gérard, and A. Grisard "*M-lines characterization of the refractive index of GaSb and $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ lattice-matched onto GaSb in the mid-infrared*" **Poster**: Advanced Solid State laser (ASSL2015), Paper AM5A.10, Berlin, Germany, 4-9 October 2015

2.5 - Conférences nationales

- [1] **L. Cerutti**, F. Genty, C. Alibert, E. Picard, E. Hadji, E. Molva, D. Romanini et A. Garnache "*Émetteur à microcavité à base d'antimoine émettant entre 2 et 3 μm par pompage optique*" **Poster** : 8^{èmes} Journées Nationales de Micro-électronique et Optoélectronique III-V, Papier E9, Session Composants Optoélectroniques, Aussois, 15-17 Janvier 2001

- [2] **L. Cerutti**, A. Garnache, F. Genty, C. Alibert, D. Romanini, et E. Picard “*V(E)CSELS antimonures pompés par diodes émettant dans la gamme 2 μm -2.5 μm* ” **Poster** : 9^{èmes} Journées Nationales de Micro-électronique et Optoélectronique III-V, Papier A-3.34, Session Composants Optoélectroniques, Saint Aygulf, 29 septembre - 02 octobre 2002
- [3] **L. Cerutti**, A. Garnache, A. Ouvrard, and F. Genty “*Sb-based VCSEL operating at 2.3 μm in continuous wave regime up to 350K with TEM₀₀ beam*” **Poster** : 8^{èmes} Colloque sur les Lasers et l’Optique Quantique, Horizons de l’Optique’03, Papier P-267, Toulouse, 3-5 septembre 2003
- [4] A. Ouvrard, A. Garnache, **L. Cerutti**, F. Genty, et D. Romanini. “*VCSELS monofréquences émettant en continu à 300K à 2,3 μm appliqués à l’analyse de gaz*” **Poster** : 10^{èmes} Journées Nationales de Micro-électronique et Optoélectronique III-V, Session Composants Optoélectroniques, P-165 La Grande Motte, 8-11 juin 2004
- [5] **L. Cerutti**, A. Garnache, A. Ouvrard, F. Genty, et M. Garcia. “*Microcavité VCSEL émettant à 2,36 μm en continu et à température ambiante*” **Poster** : 10^{èmes} Journées Nationales de Micro-électronique et Optoélectronique III-V, Session Composants Optoélectroniques, P-197 La Grande Motte, 8-11 juin 2004
- [6] A. Ouvrard, **L. Cerutti**, J. Angellier, A. Vicet, D. Barat, Y. Rouillard, F. Genty, A. Garnache, E. Cerda, et D. Romanini. “*2-2.7- μm single-frequency tunable Sb-based lasers in cw at RT*” **Poster**: 11^{èmes} Journées Nano et Micro-électronique et Optoélectronique, Papier E9, Session Composants Optoélectroniques, Aussois, 4-7 Avril 2006.
- [7] A. Ducanchez, **L. Cerutti**, P. Grech, et F. Genty. “*Réalisation de lasers VCSELS pompés électriquement émettant au dessus de 2.2 μm en régime continu à température ambiante*” **Poster**: 12^{èmes} Journées Nano et Micro-électronique et Optoélectronique, Papier F7, Session Composants et integration de systèmes (opto) électroniques, Oléron, 4-6 Juin 2008.
- [8] A. Gasseng, **L. Cerutti**, A. Baranov, et E. Tournié “*Nouveaux laser moyen infrarouge à super réseau InAs/GaSb*” **Poster**: 12^{èmes} Journées Nano et Micro-électronique et Optoélectronique, Papier A.3, Session micro et nanotechnologies, Oléron, 4-6 Juin 2008.
- [9] A. Laurain, **L. Cerutti**, I. Sagnes, M. Myara, et A. Garnache. “*Méthodes de caractérisation optique de structures VCSELS à fort gain pour le moyen-IR*” **Poster**: 12^{èmes} Journées Nano et Micro-électronique et Optoélectronique, Papier C10, Session Caractérisation structurale, optique et électrique des semi-conducteurs, Oléron, 4-6 Juin 2008.
- [10] J.P. Perez, A. Ducanchez, **L. Cerutti**, A. Laurain, et A. Garnache “*Technologies associées à la réalisation de laser Sb-Vcsl de puissance pour le moyen IR*” **Poster**: 12^{èmes} Journées Nano et Micro-électronique et Optoélectronique, Papier F8, Session Composants et integration de systèmes (opto) électroniques, Oléron, 4-6 Juin 2008.
- [11] Y. Laaroussi, I. Suarez, G. Almuneau, et L. Cerutti “*Oxydation thermique humide d’alliages AlAsSb sur substrat GaSb*” **Poster**: 13^{èmes} Journées Nano et Micro-électronique et Optoélectronique, Papier P82, les Issambres, 28 septembre-1 octobre 2010.
- [12] Y. Laaroussi, D. Belharet, M. Mazas, S. Pinaud, G. Almuneau, D. Sanchez, et L. Cerutti “*Confinement latéral par diaphragme d’oxyde de composants à émission verticale à base d’antimoine pour le moyen infrarouge*” **Poster**: 13^{èmes} Journées Nano et Micro-électronique et Optoélectronique, Papier P84, les Issambres, 28 septembre-1 octobre 2010.
- [13] D. Sanchez, L. Cerutti, E. Tournié “*Développements technologiques pour VCSELS émettant dans le Moyen Infra Rouge*” **Poster**: 13^{èmes} Journées Nano et Micro-électronique et Optoélectronique, Papier P26, les Issambres, 28 septembre-1 octobre 2010.
- [14] JB Rodriguez, JR Reboul, L. Cerutti, E. Tournié “*Lasers moyen-infrarouge à base d’antimoine réalisés sur substrats largement désaccordés*” **Poster**: 13^{èmes} Journées Nano et Micro-électronique et Optoélectronique, Papier P28, les Issambres, 28 septembre-1 octobre 2010.

- [15] A.Gassenq, L.Cerutti, E.Tournié "*Laser moyen infra-rouge à base de super-réseau à courte période InAs/GaSb/InSb pour émission dans la gamme 3 – 3,5 μm* " **Poster:** 13^{èmes} Journées Nano et Micro-électronique et Optoélectronique, Papier P29, les Issambres, 28 septembre-1 octobre 2010.
- [16] JR. Reboul, L. Cerutti, JB. Rodriguez, E. Tournié, "*Lasers antimoniures émettant à 1.55 μm sur substrat silicium*" **Poster:** 13^{èmes} Journées Nano et Micro-électronique et Optoélectronique, Papier P29, les Issambres, 28 septembre-1 octobre 2010.
- [17] A.Vicet, Y. Rouillard, L. Cerutti, R.Teissier, A. Baranov, M. Bahriz et E. Tournié, "*Lasers antimoniures et applications à la spectroscopie des gaz*" **Invité:** 14^{èmes} Journées Nano et Micro et Optoélectronique, Evian, 21-23 mai 2013.
- [18] S. Roux, P. Barritault, O. Lartigue, **L. Cerutti**, E. Tournié, B. Gérard and A. Grisard "*Mesures Mlines de l'indice de réfraction dans le moyen infrarouge de GaSb et $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{AsSb}$ adapté en maille sur GaSb*" **Poster:** Optique Bretagne 2015, Session JNOG, rennes, 6-9 Juillet 2015.

2.6 - Groupement de recherche

- [1] **L. Cerutti**, J. B. Rodriguez, K. Madiomanana, A. Castellano, et E. Tournié "*Épitaxie par jets moléculaires de semi-conducteurs à base d'antimoine sur substrat Si pour la photonique*" **Invité :** GDR Processus Ultimes en épitaxie de SEMiconducteurs (PULSE), Toulouse, 27-31 octobre 2014
- [2] E. Tournié, **L. Cerutti**, A. Castellano, K. Madiomanana, et J. B. Rodriguez "*Intégration épitaxiale de lasers à base de GaSb sur substrat Si pour émission du proche au moyen IR*" **Invité :** GDR Ondes – intégration nano-optoélectronique sur Silicium, Orsay 14 novembre 2014

2.7 – Brevet

- [1] **L. Cerutti**, J.B. Rodriguez., and E. Tournié., "*Laser emission system, hetrostructure and active zone having coupled quantum sub-wells, and use for 1.55 μm* " Patent WO2011064475 A1, 2010

CHAPITRE 4

~

Introduction

~

Mon premier contact avec la recherche se situe en 2000 lors de mon stage de DESS effectué au sein du Centre d'Électronique et de Micro-optoélectronique de Montpellier (CEM2) qui a plus tard fusionné avec d'autres laboratoires pour former l'Institut d'Electronique et des Systèmes (IES) UMR 5214 du CNRS. L'objectif de ce stage était de concevoir des structures lasers à émission par la surface et cavité verticale (VCSELs) à base d'antimoine émettant dans le moyen-infrarouge (MIR).

Si au cours de ce stage je n'ai obtenu aucun laser, ce sont ces quelques mois qui ont été l'amorce des années de recherche qui ont suivies. En effet, c'est durant cette période que mon intérêt pour la physique des semi-conducteurs III-V, l'étude des composants optoélectroniques et plus principalement la technique de croissance par épitaxie par jets moléculaires (EJM) a été éveillé. Suite à ce stage, il m'a été proposé de rester dans cette équipe pour effectuer une thèse. Comme à cette époque le diplôme de DESS n'ouvrait pas accès en thèse j'ai passé un DEA lors de la période 2000-2001. J'ai effectué mon stage de fin d'étude dans la même équipe mais sur un aspect plus appliqué, puisqu'il portait sur la conception d'un banc optique de détection de méthane par effet mirage. Lors de ce stage j'ai démontré la possibilité d'utiliser cette technique pour détecter du méthane en utilisant des diodes lasers fabriquées au sein de l'équipe.

Durant ma thèse débutée en novembre 2001, j'ai étudié en détail les paramètres de croissance nécessaires à la réalisation VCSELs performants. Cette thèse a permis d'établir les bases pour la croissance de telles structures et d'obtenir les premiers VCSELs pompés par diodes lasers opérant en régime continu au-delà de la température ambiante dans le MIR.

À la suite de ma thèse, j'ai souhaité élargir mes connaissances sur la croissance par EJM, ce qui m'a poussé à partir début 2005 en post-doc à l'Université Polytechnique de Madrid (UPM) dans l'Institut des Systèmes Optiques et Microélectroniques (ISOM). L'une des thématiques de ce laboratoire est la croissance par EJM et l'étude de dispositifs à base de nano-fils nitrurés. Durant ce séjour postdoctoral, j'ai encadré une équipe composée de stagiaires et de doctorants pour étudier la croissance de ces nano-fils sur substrat Si.

Enfin en septembre 2006, je suis revenu en tant que Maître de conférences dans le groupe Nanomir de l'Institut d'Electronique et Systèmes (IES) de l'UM2. De 2006 à 2012 mes recherches se sont principalement orientées autour des structures VCSELs dans le but d'améliorer les propriétés et les performances de ces composants. J'ai animé la thématique sur la conception de VCSELs pompés électriquement avec la co-direction de 3 thèses axées sur les procédés technologiques.

Durant cette période, j'ai également contribué aux diverses améliorations des VCSELs à cavité externe (VECSELs) antimoniures développés par Arnaud Garnache.

À partir de 2007, j'ai commencé en parallèle de mes activités sur les VCSELs à diversifier mes recherches. J'ai ainsi participé à l'étude de nouvelles zones actives à base de super-réseau pour des lasers émettant au-delà de $3\mu\text{m}$ et développé des lasers à $1,55\mu\text{m}$ sur GaSb. Ces différentes études m'ont conduit au co-encadrement de 2 thèses.

Ce manuscrit détaillera principalement les résultats obtenus sur les VCSELs antimoniures. En effet, comme je l'ai présenté, cette thématique a été depuis l'année 2000 l'axe principal de mes recherches. Il est donc pertinent (de mon point de vue) de faire la synthèse de ces résultats. Ils m'ont permis d'une part de développer une thématique de recherche et d'autre part d'encadrer des doctorants et des stagiaires.

Ensuite je résumerai mes travaux de recherche effectués durant mon post doc puis les résultats obtenus sur les lasers à super réseau et télécom.

Enfin je présenterai les perspectives de mes travaux de recherches en m'appuyant sur les premiers résultats de structures nécessitant une épitaxie sur surface structurée.

CHAPITRE 5

~

VCSELS antimoniures

~

Les semi-conducteurs à base d'antimoine permettent d'obtenir l'effet laser dans la gamme de longueur d'onde comprise entre $2\ \mu\text{m}$ - $6\ \mu\text{m}$ qui s'avère très intéressante pour des applications telles que la détection de gaz. Pour l'analyse de gaz les lasers doivent fournir une émission monomode selon les axes transverse et longitudinale, opérer en régime continu à température ambiante avec une puissance de sortie supérieure à $1\ \text{mW}$ et montrer une accordabilité d'au moins $30\ \text{GHz}$ sans saut de mode. Les Lasers à Cavity Verticale à Émission par la Surface (VCSEL¹) répondent à ces critères. Au début des années 2000, seuls quelques VCSELs à base d'antimoniures avaient été réalisés pour une émission au-delà de $2\ \mu\text{m}$ [Baranov98, Bewley98] ne fonctionnaient ni à température ambiante ni en régime continu.

1 – Travaux de thèse : premiers résultats sur les V(E)CSELs antimoniures

Si les études effectuées durant la thèse de doctorat n'entrent strictement pas dans le cadre défini par la HDR, les résultats obtenus au cours de cette période ont servi de point de départ aux différentes recherches effectuées sur ce sujet pendant la période 2006-2012. Ce paragraphe permettra ainsi de présenter les 2 familles de lasers à cavity verticale ainsi que les alliages constituant ces composants.

Ma thèse a commencé en octobre 2001, suite à l'acquisition par l'équipe d'un nouveau bâti d'épitaxie par jets moléculaires (EJM) qui m'a permis de bénéficier d'une bourse CIFRE financée par la société RIBER. L'objet de ce travail de thèse était la réalisation par EJM et la caractérisation de VCSELs à base d'antimoniures.

Deux types de lasers émettant par la surface ont été abordés et réalisés (Figure 1) : les microcavités VCSELs ainsi que les VCSELs à cavity externe (VECSEL²). Bien que les microcavités VCSELs soient très compactes (cavité $\sim 1\ \mu\text{m}$) et permettent un fonctionnement laser intrinsèquement monomode longitudinal, l'utilisation de deux miroirs plans dégrade la qualité spectrale et transverse du faisceau à forte puissance. Dans le cas des VECSELs où un miroir plan est remplacé par un miroir externe concave dans la configuration la plus simple, la cavité devient stable et permet alors un fonctionnement à haute puissance en gardant un faisceau de bonne qualité (TEM_{00} et faible divergence $< 5^\circ$). Dans cette configuration les qualités spectrales sont améliorées au détriment de la compacité du système ($\sim \text{cm}$).

Dans ce type de structure, la zone active est de faible épaisseur (quelques μm) ce qui génère un faible gain par passage. En conséquence, l'effet laser ne peut être atteint que par l'utilisation de miroirs très réfléchissants ($> 99\%$), type miroir de Bragg. Pour un fonctionnement autour de $2,3\ \mu\text{m}$, l'utilisation du couple de matériaux AlAsSb/GaSb, qui présente un écart d'indice avantageux pour cette longueur d'onde, représente la meilleure solution pour la fabrication de miroirs de Bragg semi-conducteur performants sur substrat GaSb.

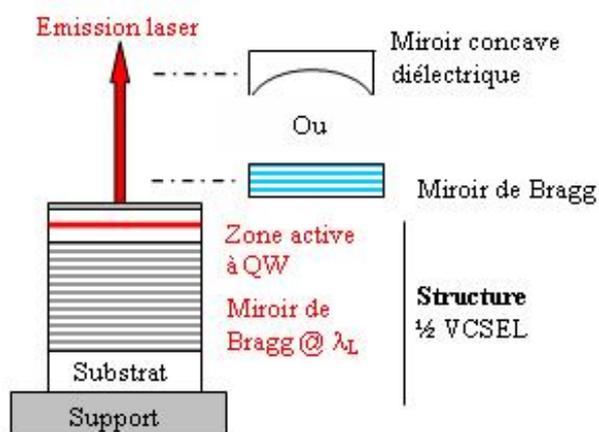


Figure 1 : Représentation schématique d'une microcavité VCSEL et d'un VECSEL

¹ VCSEL : Vertical Cavity Surface Emitting Laser

² VECSEL : Vertical External Cavity Surface Emitting Laser

L'une des principales difficultés est d'épitaxier des couches d'AlAsSb qui contiennent 2 éléments V (As et Sb) accordées en maille sur GaSb (soit 8,5% d'As). En effet, un mauvais contrôle des compositions amène à des contraintes importantes pour ces couches épaisses qui provoquent l'apparition de dislocations rendant impossible la croissance d'une zone active à puits quantiques efficace à la surface du miroir de Bragg. La recherche des conditions de croissance pour obtenir l'accord de maille (rapport des flux As/Sb, technique des trois ouvertures) ainsi qu'une grande qualité cristalline (température de croissance, vitesse de croissance...) a amené à la réalisation d'un miroir de Bragg dont les études optiques et cristallographiques ont démontré que celui-ci présentait les propriétés (longueur d'onde, pouvoir réflecteur, composition, qualité cristalline...) nécessaires à la fabrication d'un laser.

Le choix de la zone active s'est porté sur des puits quantiques de type I contraints en compression de 10 nm de $\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{As}_{0,1}\text{Sb}_{0,9}$ dans des barrières d' $\text{Al}_{0,35}\text{Ga}_{0,65}\text{As}_{0,04}\text{Sb}_{0,96}$ permettant un très bon confinement des porteurs ($> 5 k_B T$), un rendement quantique interne important, un gain différentiel élevé et donc un fonctionnement laser en régime continu à température ambiante.

De même que pour le miroir de Bragg, la recherche des conditions de croissance pour les barrières et les puits nous a amené à étudier les différents paramètres pour obtenir les meilleures propriétés optiques par exemple en termes de rendement de photoluminescence et qualité cristalline.

À partir de ces données, il a été réalisé par EJM des $\frac{1}{2}$ VCSELs (miroir de Bragg + zone active) permettant de réaliser soit des microcavités VCSEL (par évaporation d'un miroir de Bragg diélectrique) soit des VECSELs. Ces composants étaient pompés optiquement par des diodes lasers de faible puissance GaAs à 830nm, longueur d'onde adaptée pour une absorption efficace dans les barrières. De plus ce type de pompage permet d'extraire les paramètres intrinsèques de la structure car il n'y a pas besoin de doper ou de réaliser de technologie post-croissance.

La figure 2a présente une photo d'une coupe d'un $\frac{1}{2}$ VCSEL prise au microscope électronique à balayage (MEB). Cette structure est composée d'un miroir de 23,5 paires d'une cavité λ avec 5 puits quantiques avec à la surface une couche épaisse d'AlAsSb dont la fonction est de dissiper la chaleur générée dans la structure par le pompage optique.

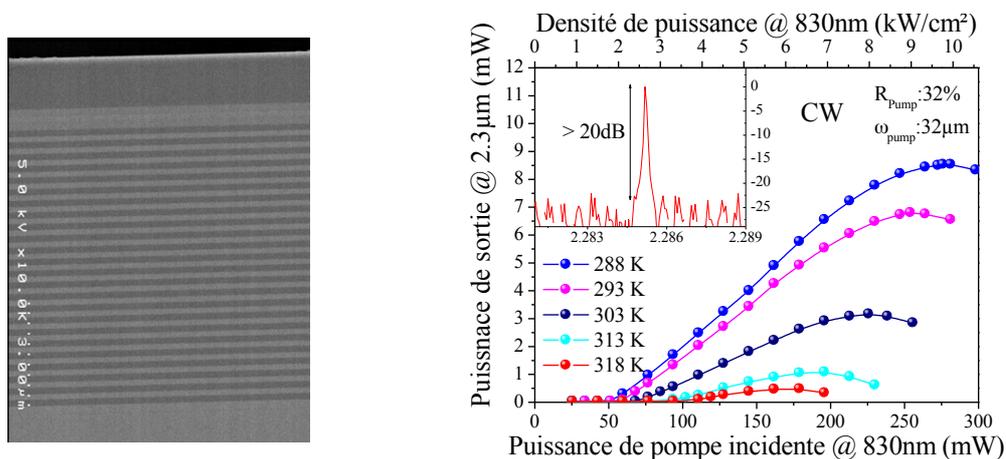


Figure 2 : a) Image MEB d'une structure $\frac{1}{2}$ VCSEL. b) P(P) d'un VECSEL en régime de pompage continu à différentes températures. *Insert* : Spectre d'émission laser

Cette structure testée en configuration VECSEL a fonctionné en régime continu au-delà de la température ambiante. La figure 2b montre les caractéristiques de puissance de sortie en fonction de la puissance de pompe incidente de ce VECSEL avec un miroir de sortie ayant un pouvoir réflecteur de

99,4%. De plus d'un point de vue spatial, cette structure a montré un faisceau circulaire TEM_{00} avec une divergence de $1,7^\circ$ à $1/e^2$.

L'étude des pertes internes de différentes structures et donc du gain a permis d'optimiser le nombre de puits quantiques à intégrer pour à la fois garder un seuil laser faible et augmenter le gain disponible de la structure. Ainsi la réalisation d'un VECSEL optimisé contenant 8 puits quantiques a permis un fonctionnement plus poussé en termes de puissance et de température.

Il est important de noter que grâce à leurs propriétés spectrales, ces sources ont été utilisées dans différents systèmes d'analyse de gaz [Ouvrard05, Cermak10].

2 – VCSELS antimoniures pompés électriquement : du pulsé au continu

Si ma thèse avait pour but la conception par EJM et l'étude de VECSELS pompés optiquement, la miniaturisation des systèmes d'analyse de gaz a conduit naturellement la recherche vers la conception de VCSELS pompés électriquement. Ainsi mon arrivée en septembre 2006 au sein du groupe NANOMIR de l'IES en tant qu'enseignant chercheur coïncidait avec le démarrage du projet européen NEMIS. Ce projet piloté par le Walter Schottky Institute (Munich, Allemagne) proposait de développer les VCSELS antimoniures pompés électriquement. À cette date, il n'existait qu'un seul résultat sur ce type de composant [Baranov98]. Cette structure fabriquée par le CEM2 en 1998 comprenait un miroir de type N, un miroir de type P ainsi qu'une zone active avec des puits quantiques de type II. Une technologie simple composée d'une gravure d'un plot de $300 \mu\text{m}$ de diamètre avait permis d'obtenir un fonctionnement en régime pulsé à température ambiante.

Afin d'améliorer les performances et de rendre ces composants compatibles à une intégration dans des modules de détection de gaz, le consortium du projet NEMIS proposait d'étudier 2 approches technologiques différentes afin d'améliorer le confinement électro-optique :

- Par jonction tunnel enterrée (BTJ) développée par le WSI
- Par gravure d'un méssa développée par l'IES.

La première technologie reprenait des procédés technologiques déjà développés sur InP par le WSI et sa start-up VERTILAS [Ortsiefer00]. La deuxième technologie s'appuyait sur les résultats de 1998 mais en réduisant le diamètre du méssa et en utilisant des puits quantiques de type I qui avaient fait leurs preuves pour les VECSELS.

Mon implication dans ce projet portait sur le design, la croissance et les études électro-optiques des structures VCSELS. Je me suis appuyé pour la mise au point des procédés technologiques sur Arnaud Ducanhez, doctorant financé par ce projet dont j'ai co-encadré la thèse.

Des travaux préliminaires conduits en 2005 par A. Perona [Perona07] alors ATER à l'IES avaient permis de pointer les mauvaises propriétés électriques et optiques des miroirs de Bragg GaSb/AlAsSb dopés P. En effet, ceux-ci présentaient une chute de potentiel par paire de l'ordre de 155mV contre 25mV pour les miroirs dopés N. La résistivité élevée dans les miroirs de type P, principalement due à la faible mobilité des porteurs, contribue à l'échauffement de la structure. À ces mauvaises propriétés électriques on pouvait également ajouter des pertes optiques supérieures à 30 cm^{-1} limitant le pouvoir réflecteur maximum des miroirs dopés P à $99,75\%$. Pour les miroirs de types N, les pertes optiques avaient été estimées entre 5 et 10 cm^{-1} ce qui permettait d'obtenir un miroir avec un pouvoir réflecteur supérieur à $99,9\%$. Ces mesures nous ont donc amené à éliminer l'utilisation d'un miroir dopé P dans ces structures. La solution la plus simple étant alors d'utiliser un miroir diélectrique. Malheureusement, les premiers tests réalisés au sein du laboratoire ont montré que ces miroirs déposés par PECVD (Plasma Enhanced

Chemical Vapor deposition) présentait également des pertes optiques trop élevées probablement dues aux conditions du dépôt.

L'autre solution étant de remplacer le miroir P par un autre miroir N, en utilisant une jonction tunnel (ou jonction Esaki). Ce type de technologie, déjà mature pour les VCSELs sur GaAs et InP, était en cours de développement avec des résultats prometteurs sur GaSb [Dier06].

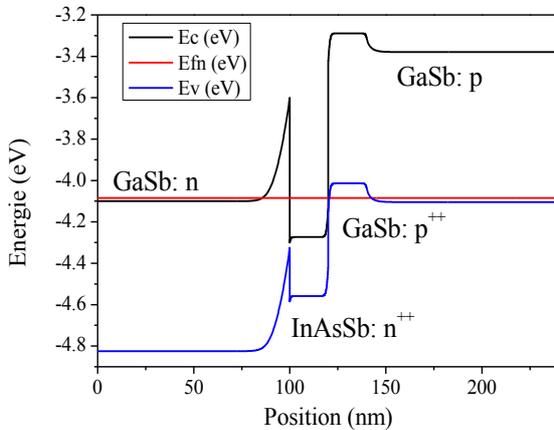


Figure 3 : Diagramme de bande d'une jonction tunnel InAsSb(n⁺⁺)/GaSb(p⁺⁺) à interface abrupte

phénomènes de dégradation des caractéristiques électriques causés par l'inter-diffusion de ces atomes. Pour pallier ce problème, ces 2 dopants ont été remplacés par du Si pour bénéficier de son caractère amphotère.

La fabrication d'une jonction tunnel de test formée de couches de GaSb et InAsSb de 20 nm a permis d'obtenir une résistance série de $1,5 \cdot 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$ ce qui rendait ce type de structure compatible à la réalisation d'un VCSEL pompé électriquement sur GaSb.

À partir de ce constat, des VCSELs complets ont été réalisés pour une émission proche de $2,3 \mu\text{m}$. Les épaisseurs de chaque partie ont été choisies avec soin pour obtenir un pouvoir réflecteur maximum pour les miroirs, un recouvrement optimal entre le champ électrique et les puits quantiques pour bénéficier du maximum de gain ainsi que le placement de la jonction tunnel à un minimum du champ pour minimiser les pertes optiques par absorption de porteurs libres.

S'il est facile de dessiner une structure, il faut néanmoins tenir compte du fait que l'épaisseur totale est d'environ $14 \mu\text{m}$. Ainsi à la vitesse de croissance choisie de $0,9 \mu\text{m}/\text{h}$, le temps d'épitaxie était de 15h. Pour ajuster précisément les temps et les conditions de croissance des différentes parties du VCSEL, il était réalisé au préalable de chaque structure VCSEL des couches de calibration :

- Un miroir de Bragg de 4 paires permettant d'ajuster à la fois l'accord de maille de l'AlAsSb et les épaisseurs du couple AlAsSb/GaSb pour obtenir un pouvoir réflecteur centré à $2,3 \mu\text{m}$.
- Une zone active permettant d'évaluer l'accord de maille de l' $\text{Al}_{0,35}\text{Ga}_{0,65}\text{AsSb}$ et la contrainte des puits quantiques de GaInAsSb. La photoluminescence de cette zone active complète les caractérisations et permet d'ajuster la longueur d'onde d'émission pour obtenir le meilleur recouvrement entre le gain et le mode de résonance de la cavité.

Suite à ces calibrations, la croissance de cette structure est réalisée en une seule étape sur un substrat de $2''$ de GaSb dopé n et orienté (001). La température de croissance change suivant les parties de la structure. Si le miroir inférieur est réalisé à 500°C , la zone active se fait à 470°C qui est la température optimale pour la qualité cristalline et l'efficacité lumineuse des puits quantiques [Cerutti04]. La jonction tunnel et le miroir

Pour réaliser notre jonction tunnel, nous avons utilisé le couple $n^{++}\text{-InAsSb}/p^{++}\text{-GaSb}$. En effet, comme le présente la figure 3, le diagramme de bande d'une telle jonction montre un raccordement de bande de type III entre ces 2 matériaux ce qui facilite le transfert par effet tunnel des porteurs de la bande de conduction de l'InAs(Sb) vers celle de valence du GaSb. De plus l'utilisation d'un fort dopage ($\sim 5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) permet d'augmenter la probabilité pour les porteurs de franchir la barrière par effet tunnel.

Si les dopants usuels des matériaux à base d'antimoine sont le Te pour le dopage n et le Be pour le dopage p, il a été observé des

supérieur se font autour de 420°C afin d'éviter le recuit des puits quantiques pouvant provoquer un décalage du pic d'émission vers les courtes longueurs d'onde [Dier05].

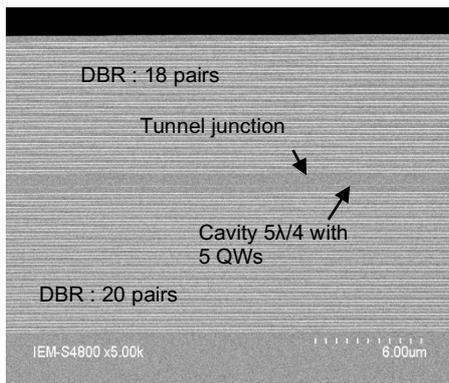


Figure 4 : Image MEB d'une structure VCSEL monolithique à jonction tunnel

La figure 4 montre une photo MEB d'un VCSEL complet après croissance où l'on peut clairement voir l'empilement des couches constituant les miroirs de Bragg supérieur et inférieur, ainsi que la cavité du VCSEL placée entre les 2 miroirs.

Un exemple de caractérisation structurale par diffraction de rayons-X à haute résolution (HRXRD) d'une telle structure est présenté sur la figure 5.b avec la simulation de la structure visée. On s'aperçoit du très bon accord entre les spectres expérimental et simulé. Il est à noter que l'on ne voit qu'un seul pic autour du substrat ce qui signifie qu'il n'y a eu aucune variation du rapport As/Sb durant ce long temps de croissance. Ainsi les différentes couches d'AlAsSb et d'AlGaAsSb sont parfaitement accordées

minimisant la contrainte et donc l'apparition de dislocations.

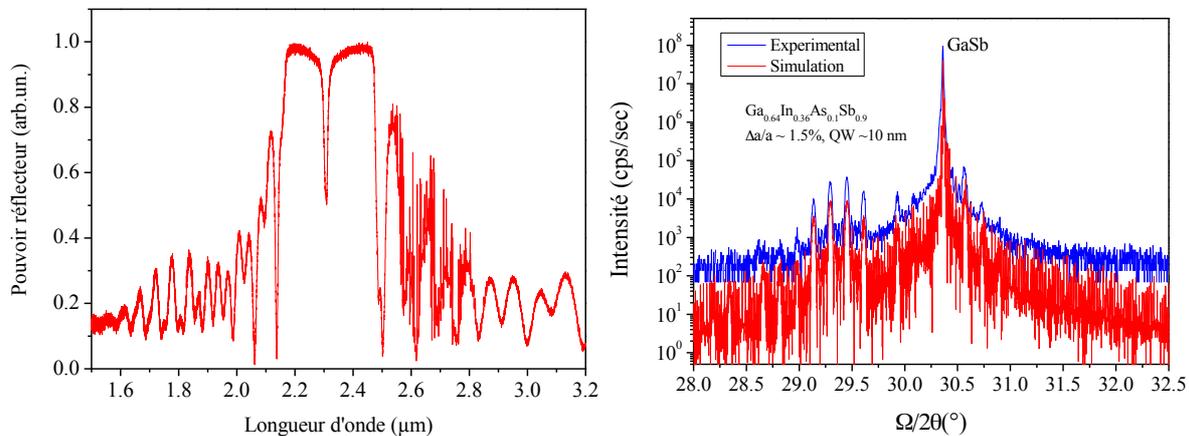


Figure 5 : a) Spectre du pouvoir réflecteur. b) Diagramme de diffraction de rayons X d'une structure VCSEL monolithique

Une mesure du spectre de pouvoir réflecteur (Figure 5.a) vient compléter ces caractérisations préliminaires afin de déterminer si les 2 miroirs ainsi que la cavité sont centrés à la longueur d'onde visée.

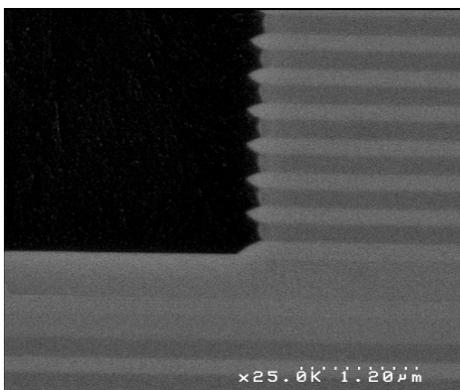


Figure 6 : image MEB du profil de gravure d'une structure VCSEL avec arrêt sur la couche d'InAsSb constituant la JT

Ces structures sont ensuite traitées suivant plusieurs étapes technologiques. Ces étapes mises au point dans le cadre de la thèse d'Arnaud Ducanhez ne seront pas détaillées ici. Néanmoins la figure 6 présente l'image MEB d'une structure après la gravure humide du miroir supérieur avec une solution à base d'acide chromique. On peut observer l'effet de l'InAsSb constituant la jonction tunnel qui joue le rôle d'une couche d'arrêt pour la gravure. Il apparaît des flancs abrupts sans défauts structuraux.

Les premières mesures effectuées avec des composants de diamètre 80μm (40μm interne + 20μm d'anneau) en régime pulsé (1μs, 100kHz) ont permis d'obtenir l'effet laser à température ambiante [Cerutti08].

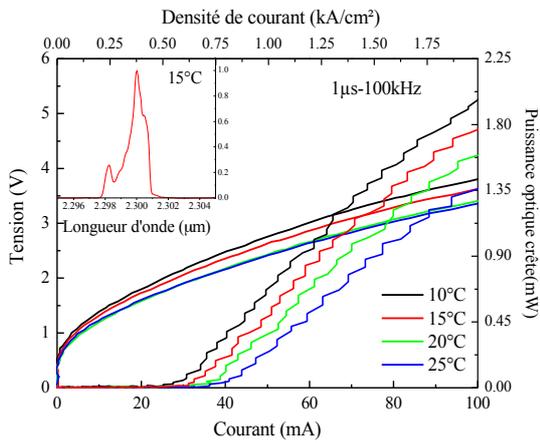


Figure 7 : P(I) et I(V) en régime pulsé (1μs, 100kHz) d'un VCSEL de diamètre 80 μm en fonction de la température. *Insert* : spectre d'émission laser

Il faut tout de même souligner qu'à la même date, nos partenaires du WSI réalisaient un VCSEL avec jonction tunnel enterrée sur GaSb opérant en régime continu jusqu'à 50°C [Bachmann08]. Ces deux résultats sont d'ailleurs publiés dans le même numéro d'Electronics Letters (44(3)-2008). Cette supériorité s'explique par le confinement électro-optique. En effet dans notre cas le diamètre de pompage électrique de la zone active était de 80 μm alors qu'il n'était que de 6 μm dans le composant du WSI.

Suite à ce résultat, de nouvelles mesures avec des composants ayant un diamètre réduit à 60 μm (20 μm interne + 20 μm d'anneau) ont permis d'obtenir un fonctionnement en régime continu jusqu'à une température de 20°C (figure 8). Ce fonctionnement limité en température a pu être expliqué par une

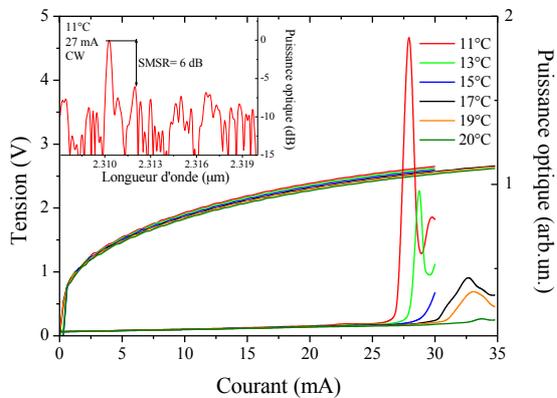


Figure 8 : P(I) et I(V) en régime continu d'un VCSEL de diamètre 60 μm en fonction de la température. *Insert* : spectre d'émission laser

Comme le montre la figure 7, ces composants présentent un courant de seuil passant de 30 mA à 41 mA pour des températures respectives de 10 et 25°C. La puissance optique crête est supérieure au mW. Un fonctionnement multimode autour de 2,3 μm, attribué à la très large surface des composants, est illustré dans l'insert de la figure 7. Si aucun fonctionnement en régime continu n'a pu être atteint avec ces composants, un fonctionnement avec un rapport cyclique de 30% a été obtenu à 25°C.

Ces premiers résultats ont permis de montrer la supériorité de la jonction tunnel alliée à des puits quantiques de type I par comparaison au premier VCSEL monolithique (PIN + type II) [Baranov].

La mesure de l'évolution du seuil avec la température. Le minimum du seuil a été atteint à -30°C car c'est à cette valeur que le gain modal présente un alignement optimal avec le mode de microcavité [Ducanchez08a]. Lorsqu'on augmente la température la variation en longueur d'onde du gain étant plus rapide que celle du mode de microcavité, un désalignement de plus en plus important apparaît, ce qui limite le fonctionnement en température. Le spectre laser en régime continu montre un SMSR de 6dB ce qui est insuffisant pour la spectroscopie, mais qui s'explique encore une fois par le manque de confinement électro-optique.

3 – Confinement électro-optique des VCSELs à base d'antimoine

Les différents résultats obtenus sur les VCSELs monolithiques pompés électriquement ont permis de démontrer que ces structures étaient potentiellement intéressantes pour la réalisation de sources pour des applications à la détection de gaz. L'unique verrou technologique était alors de concevoir un moyen de confinement à la fois des porteurs et des photons sur ces VCSELs monolithiques antimoniures afin d'obtenir un seuil faible et une émission mono-fréquence.

Pour réaliser le confinement dans les VCSELs, il est possible d'utiliser différents procédés technologiques dont les principaux sont :

- un diaphragme d'oxyde
- l'implantation ionique
- la jonction tunnel enterrée
- la sous gravure de la jonction tunnel.

Pour les matériaux antimoniures, la technologie basée sur l'implantation ionique nécessite d'utiliser des ions lourds pour dégrader le matériau [Nitta10] ce qui complique la technologie. Dans le cas de l'oxydation d'une couche d'AlAsSb accordée sur GaSb, celle-ci présente une forte expansion de volume (~150%) qui se traduit par des contraintes internes considérables pouvant bloquer le processus d'oxydation. De plus il se forme de l'antimoine métallique au sein de la couche oxydée qui perd alors ses propriétés isolantes [Meneou04]. La jonction tunnel enterrée qui a été utilisée par le WSI nécessite une phase de désoxydation après gravure de la jonction tunnel qui peut s'avérer critique. En effet cette désoxydation à haute température avant reprise d'épitaxie entraîne un recuit de la structure ce qui conduit à un décalage de l'émission des puits quantiques vers les courtes longueurs d'onde [Dier05] ainsi qu'à une détérioration des performances électriques [Dier04a].

La sous gravure de la jonction tunnel qui a été auparavant utilisée sur des VCSELs [Reddy04] sur substrat InP nécessite une haute sélectivité de gravure entre le matériau constituant la jonction tunnel et celui qui l'entoure.

3.1 – Confinement par sous gravure de la jonction tunnel

Durant la thèse d'A. Ducanhez, il a été observé que la couche d'InAsSb formant la jonction tunnel jouait également le rôle de couche d'arrêt pour la gravure humide du miroir de Bragg. De même pour graver cette couche, il est nécessaire d'utiliser une solution à base d'acide citrique qui a l'avantage de graver faiblement les couches de GaSb et d'AlSb [Dier04b]. La sélectivité de gravure entre l'InAsSb et le GaSb présente la même similitude que celle entre l'AlInAs et l'InP utilisée pour le confinement par sous gravure de la jonction tunnel des VCSELs sur InP [Reddy04]. À partir de ce constat, il a été réalisé une étude sur la cinétique de gravure de la jonction tunnel InAsSb/GaSb pour démontrer la possibilité de confiner par cette méthode les VCSELs sur GaSb.

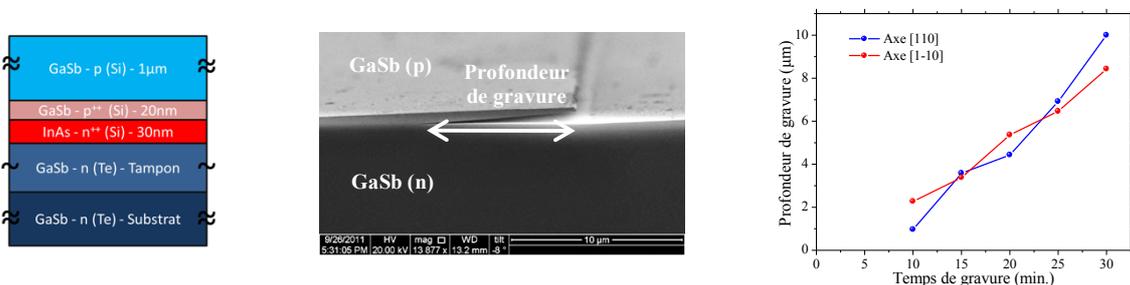


Figure 9: a) Schéma de la jonction tunnel utilisée pour l'étude de la cinétique. b) Image MEB d'une gravure latérale de l'InAs(Sb). c) Profondeurs de gravure mesurées suivant les directions cristallines [110] et [1-10]

Cette étude a fait l'objet du stage de Master 2 de D. Sanchez en 2009 ainsi qu'une partie de son étude de thèse. Pour déterminer la cinétique de sous gravure, des jonctions tunnels (figure 9.a) ont été réalisées.

La figure 9.c présente les vitesses de sous gravure mesurées au MEB (figure 9.b) suivant les axes cristallins [110] et [-110] et montre qu'il n'y a aucune anisotropie entre ces 2 axes cristallins. Les vitesses de

gravure sont de l'ordre de 400 nm/min ce qui permettait d'envisager une gravure latérale d'une vingtaine de micron pour un temps d'exposition de 60 min, valeur largement suffisante pour obtenir le confinement électrique nécessaire du VCSEL.

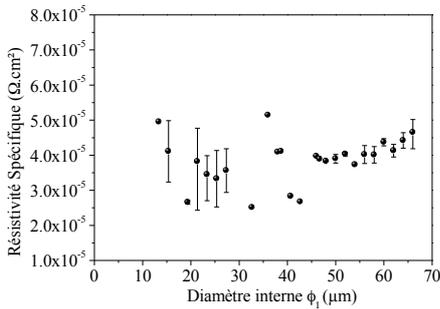


Figure 10: Résistivités spécifiques de la structure jonction tunnel en fonction du diamètre d'ouverture

VCSELS monolithiques antimoniures [Sanchez12].

Les étapes technologiques pour la réalisation d'un VCSEL GaSb pompé électriquement avec confinement électro-optique ayant été identifiées, il a été épitaxié une structure VCSEL monolithique sur substrat GaSb constituée d'un miroir de Bragg inférieur de 24 paires et supérieur de 21 paires, d'une cavité $3\lambda/4$ contenant 5 puits quantiques pour une émission à $2,3 \mu\text{m}$ et d'une jonction tunnel InAsSb/GaSb dopée 10^{19} porteurs/cm³.

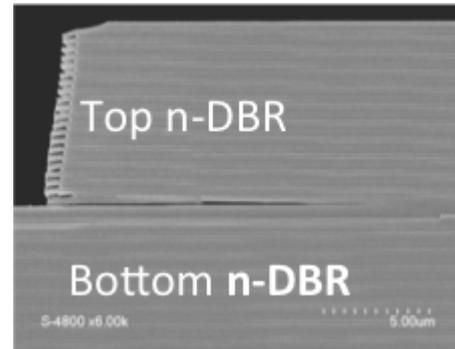
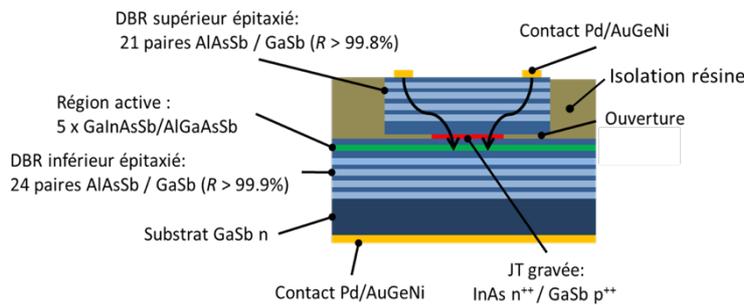


Figure 11 : a) Schéma du VCSEL monolithique après procédés technologiques. b) Coupe MEB d'un VCSEL monolithique avec sous gravure de la jonction tunnel.

Un schéma de principe ainsi qu'une photo MEB du VCSEL après procédés technologiques sont présentés figure 11. L'isolation est réalisée avec de la résine de photolithographie qui permet de consolider le composant sous gravé.

Des mesures électro-optiques ont été effectuées sur des composants ayant des diamètres de jonction tunnel variant de $6 \mu\text{m}$ à $23,5 \mu\text{m}$. Comme le présente la figure 12.a, l'effet laser a été obtenu en régime continu à température ambiante sur l'ensemble de ces VCSELS. On remarque que la puissance optique n'excède pas les $300 \mu\text{W}$ à 20°C pour les VCSELS de larges diamètres, alors que pour les diamètres allant de 6 à $13,3 \mu\text{m}$ la puissance optique ne dépasse pas les $150 \mu\text{W}$.

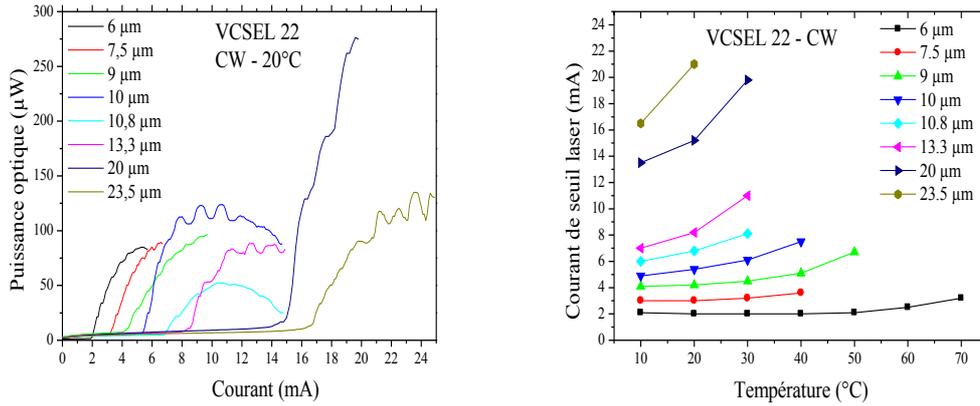


Figure 12: Caractéristiques électro-optiques en régime continu de VCSELs monolithiques avec des diamètres de jonction tunnel de 6 à 23,5 µm a) P(I) ; b) Courant de seuil en fonction de la température

Cette faible puissance a été attribuée à la tension de coude élevée ($\sim 3,5V$) combinée à une forte résistance série ce qui entraînent un échauffement rapide de la structure. Ces mauvaises performances électriques peuvent être imputées au contact sur GaSb-n qui est Schottky ainsi qu'à la présence des 2 miroirs de Bragg. Néanmoins la figure 12.b montre l'évolution du seuil laser en fonction de la température pour ces différents composants ; il a été possible d'atteindre un fonctionnement en régime continu jusqu'à 70°C pour le VCSEL dont le diamètre de la jonction tunnel est de 6 µm.

La figure 13.a montre en détail la caractéristique P(I) de ce composant en fonction de la température. On peut voir que le courant de seuil le plus faible est de 1,9 mA autour de 30°C et que c'est donc la température à laquelle le gain modal présente un alignement optimal avec le mode de résonance de la cavité. Le fonctionnement en régime continu de cette diode jusqu'à 70°C avec un seuil de 3,2 mA montre l'efficacité de la sous gravure sélective comme système de confinement électrique. Pour aller plus loin, la figure 13.b présente l'évolution du spectre d'émission de ce VCSEL en fonction du courant à 20°C. On peut voir que l'émission est monomode avec un SMSR supérieur à 20 dB.

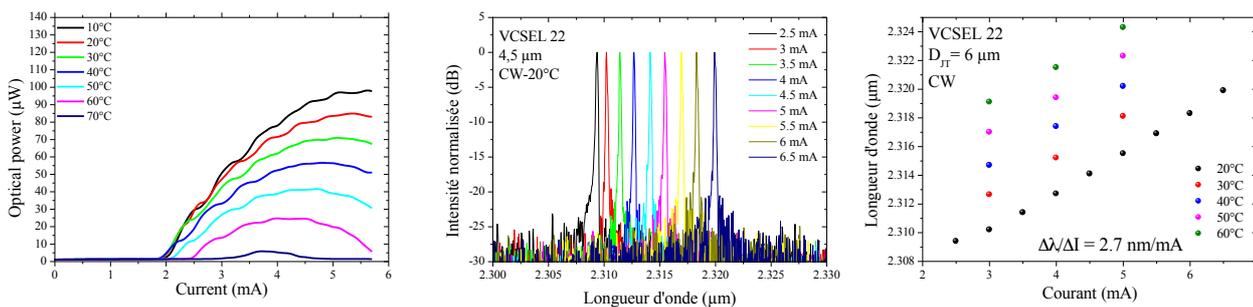


Figure 13: Caractéristiques électro-optiques en régime continu et en fonction de la température d'un VCSEL monolithique avec un diamètre de jonction tunnel de 6 µm. a) P(I), b) spectre laser en fonction de l'injection de courant ; c) accordabilité de l'émission en longueur d'onde en fonction du courant d'injection et de la température

Il est à noter que les VCSELs dont le diamètre est supérieur à 10 µm présente un fonctionnement multimode transverse causé par l'élargissement de la cavité transverse lorsque le diamètre de la jonction tunnel augmente. L'étude de la longueur d'onde d'émission en fonction de la température et du courant

d'injection est présentée figure 13.c. On obtient une caractéristique linéaire, montrant une accordabilité continue de 14 nm, particulièrement intéressante pour l'analyse de gaz.

Le développement de la sous gravure sélective a permis la première réalisation de VCSELs monolithiques émettant à 2,3 μm en régime continu jusqu'à 70°C [Sanchez12b] avec un fonctionnement monomode. Cependant, la puissance optique de sortie est limitée à la centaine de μW à 10°C.

3.2 – Confinement par oxydation d'AlAs métamorphique

Le confinement des VCSELs par sous gravure de la jonction tunnel a permis d'obtenir un fonctionnement en régime continu avec une émission mono-fréquence. Nous avons en plus de cette méthode tenté une approche alternative reposant sur le confinement par oxydation d'une couche riche en aluminium. Comme il a été précisé l'oxydation de l'AlAsSb accordé sur GaSb est compliquée par la présence de l'antimoine. Nous avons donc contourné le problème en utilisant non pas une couche accordée sur GaSb mais une couche métamorphique en arséniure. Cette méthode avait déjà été utilisée pour confiner le courant dans des lasers à émission par la tranche sur GaSb [Hanfoug01]. La partie au-dessus des puits quantiques avait été réalisée en arséniure et une couche d'AlAs insérée dans le cladding avait été oxydée pour contrôler la largeur d'injection. C'est dans le cadre du projet ANR MARSUPILAMI piloté par le LAAS que nous avons réalisé des VCSELs utilisant ce concept. En effet le LAAS maîtrise la technologie d'oxydation des VCSELs sur GaAs [Almuneau08]. Concernant ces structures, l'épitaxie, les caractérisations structurales et électro-optiques ont été faites à Montpellier et les étapes technologiques de gravure et d'oxydation ont été réalisées au LAAS. De plus la partie technologique et caractérisations électro-optiques des structures métamorphiques ont fait l'objet de la thèse de Y. Laaroussi que j'ai co-encadré avec G. Almuneau du LAAS.

L'efficacité de ce type de confinement latéral a été démontrée tout d'abord en réalisant une diode électroluminescente à cavité résonante (RCLED) [Laaroussi11]. Cette démonstration nous a conduit à la conception d'un VCSEL pour une émission à 2,3 μm dont la figure 14.a montre une coupe prise au MEB. Si la croissance jusqu'à la jonction tunnel reste identique aux structures précédentes, le GaAs type-n est directement épitaxié sur l'InAs juste en changeant l'élément III. Ici le large désaccord de paramètre de maille ($\sim 7\%$) entre l'InAs et le GaAs entraîne une relaxation rapide du GaAs après seulement 1 monocouche de GaAs. Le diagramme de RHEED devenant parfaitement « streaky » après seulement 20 monocouches de GaAs avec l'apparition d'une nette reconstruction 2×4 typique du GaAs stabilisé As.

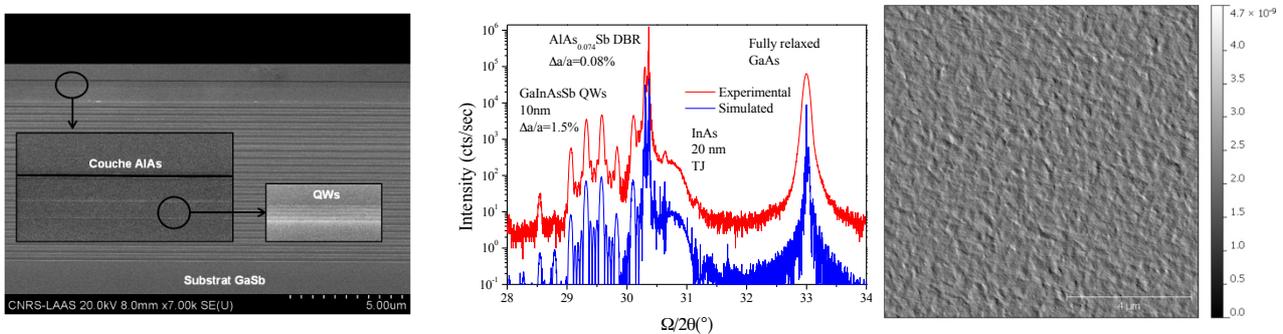


Figure 14: Caractérisations d'une structure $\frac{1}{2}$ VCSEL sur substrat GaSb avec partie supérieure métamorphique en GaAs/AlAs/GaAs. a) Photo MEB. b) Spectres de diffraction de rayons X expérimental et simulé. c) Image AFM de la surface

Il est important de noter que la position de cette interface métamorphique est proche de la jonction tunnel, elle est donc placée à un nœud du champ électrique ce qui permet de réduire les pertes optiques générées par les défauts d'interface. Une couche de 50 nm d' $\text{Al}_{0,98}\text{Ga}_{0,02}\text{As}$ dédiée à l'oxydation est placée au nœud du champ électrique suivant, pour également réduire les pertes optiques dues à la couche d' AlOx . Pour finir une couche de $\sim 1\mu\text{m}$ de GaAs est épitaxiée à la fois pour permettre le transport des porteurs et pour réaliser le contact intra-cavité.

La figure 14.b montre le spectre de diffraction de rayons X. On peut observer que la qualité cristalline de la structure à base d'antimoine n'a pas été altérée par la croissance du GaAs métamorphique. De plus, la position angulaire sur ce spectre de rayons X de l' AlGaAs montre que ces couches sont parfaitement relaxées. La figure 14.c, présente une image AFM de la surface, bien que l'on n'observe pas la présence de marche atomique, la surface est relativement plane avec une rugosité RMS de 0.6 nm.

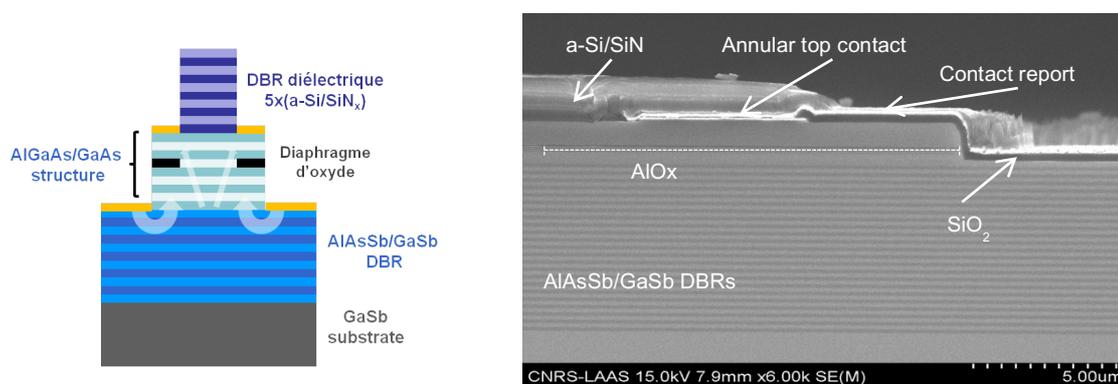


Figure 15 : Structure VCSEL sur substrat GaSb avec couche de confinement par oxydation d'AlAs et miroir de Bragg supérieur diélectrique a-Si/SiN_x. a) Schéma de principe. b) Image MEB de la structure après procédés technologiques

La structure a ensuite suivi les différentes étapes de procédés technologiques de gravures, dépôts des contacts et oxydation latérale au LAAS. Comme on peut le constater, cette structure ne possédait pas de miroir de Bragg supérieur en semi-conducteur pour à la fois réduire le temps d'épitaxie et les pertes (électrique et optique) induites par un miroir métamorphique. Nous avons sollicité la collaboration de C. Levallois et C. Paranthoen de l'équipe OHM du laboratoire FOTON à Rennes pour réaliser un miroir de Bragg diélectrique formé du couple a-Si/SiN_x. En effet les couches diélectriques réalisées à l'IES ou au LAAS ne présentaient pas les propriétés optiques nécessaires à l'obtention de l'effet laser. Or cette équipe avait déjà réalisé des miroirs de ce type pour des structures VCSELs pompées optiquement à 1,55 μm et donc ayant des pertes optiques suffisamment faibles pour atteindre un seuil laser [Levallois05]. La figure 15.b présente une coupe au MEB ainsi qu'une représentation schématique du VCSEL après les différentes étapes technologiques (figure 15.a).

La figure 16a montre la caractéristique électro-optique d'un VCSEL avec un diamètre d'ouverture de 8 μm . Ce composant a fonctionné en régime continu jusqu'à -10°C . L'évolution du seuil ainsi que du rendement quantique externe (en unité arbitraire) à une température de -23°C en fonction du diamètre d'ouverture est représentée sur la figure 16b.

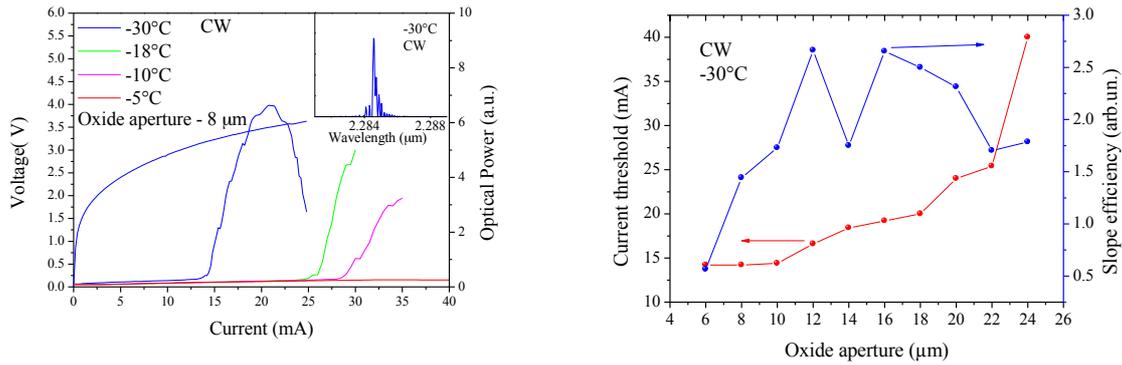


Figure 16 : a) V(I) et P(I) en régime continu et en fonction de la température d'un VCSEL métamorphique de diamètre d'ouverture de 8 μm. Insert : spectre d'émission laser. b) Courant de seuil et rendement en fonction du diamètre d'ouverture à -30°C

On observe sur cette figure que le seuil commence à augmenter pour un diamètre supérieur à 10 μm alors que le rendement reste relativement constant, ce qui démontre bien l'effet de confinement latéral.

Néanmoins on peut expliquer les faibles performances de cette structure par différents paramètres. La faible température de fonctionnement ainsi que le courant de seuil élevé sont dus au décalage spectral du gain vers les grandes longueurs d'onde par rapport à la résonance de la cavité pour cette structure. La faible variation du courant de seuil en fonction du diamètre s'explique par la distance importante (~400 nm) entre la couche de confinement électro-optique et les puits quantiques permettant aux porteurs de diffuser latéralement, ce qui va augmenter la surface de pompage au niveau des puits par rapport au diamètre du diaphragme d'oxyde. De plus ce phénomène peut également être confirmé par le fait que les VCSELs même avec un diamètre de 8 μm ne présentaient pas d'émission mono-fréquence (insert figure16a)

Bien que le fonctionnement de ces composants soit très limité, cela a été la première démonstration d'un VCSEL [Laaroussi12] utilisant les avantages de l'oxydation des arséniures dans la filière des antimoniures pour obtenir une émission dans le MIR.

4 – Améliorations des propriétés et des performances des V(E)CSELS antimoniures

4.1 - Conception de V(E)CSELS pour émission à $\lambda > 2,3\mu\text{m}$

4.1.1 – VCSELs

Si l'objectif principal du projet NEMIS était atteint, à savoir obtenir un VCSEL opérant en régime continu autour de 2,3 μm, un autre objectif était de réaliser des VCSELs à des longueurs d'onde supérieures permettant la détection d'autres espèces mais également d'améliorer la sensibilité de détection. À ce stade du projet, les performances obtenues à la longueur d'onde de 2,3 μm avec un VCSEL monolithique sans confinement électro-optique ont conforté nos choix sur le design de la structure pour des VCSELs émettant à plus grande longueur d'onde.

Toutefois si le miroir de Bragg reste constitué du même couple de matériau, la dispersion spectrale de l'indice optique de ces matériaux [Alibert91] montre une diminution du contraste d'indice (~7% entre 2,3 μm et 2,7 μm). Il est donc nécessaire d'augmenter de quelques paires les miroirs de Bragg supérieur en

inférieur afin de garder un pouvoir réflecteur de l'ordre de 99,9%. De plus l'épaisseur de chaque couche constituant le miroir de Bragg étant proportionnelle à la longueur d'onde cela impacte directement l'épaisseur de la structure complète et donc implique un temps de croissance plus long.

À cette contrainte il faut rajouter des zones actives émettant à plus grande longueur d'onde. Une solution est d'augmenter la concentration en In et en As dans les puits quantiques ce qui permet de garder des puits de 10 nm d'épaisseur, une contrainte en compression de l'ordre de 1,5% et un confinement des porteurs toujours supérieur à $5k_B T$ avec les mêmes barrières que les zones actives émettant à 2,3 μm . Par contre une augmentation de la composition en In et As rapproche l'alliage de GaInAsSb de sa lacune de miscibilité. Bien que la croissance par EJM soit hors équilibre thermodynamique, il est nécessaire de baisser la température de croissance ce qui a pour conséquence de diminuer la mobilité des ad-atomes à la surface et donc limite les effets de séparation de phase qui apparaissent à haute température.

Ainsi l'étude de zones actives pour une émission à 2,7 μm constituées de 10nm de $\text{Ga}_{0,53}\text{In}_{0,47}\text{As}_{0,17}\text{Sb}_{0,83}$ en fonction de la température de croissance montre un optimum à la fois pour le rendement de photoluminescence et la qualité cristalline à 450°C [Cerutti09].

Afin d'adapter progressivement la fabrication des VCSELs pour une émission à 2,7 μm , des structures à 2,5 μm et 2,6 μm ont été réalisées. Ces 2 structures épitaxiées en une seule étape, avec des épaisseurs respectives d'environ 16 μm et 18 μm , ont nécessité un temps de croissance respectif de 17h et 19h. Si les structures à 2,3 μm et 2,5 μm possédaient 5 puits quantiques, celle à 2,6 μm avait 6 puits quantiques permettant alors d'accroître le gain de la zone active.

Les pouvoirs réflecteurs de ces 2 structures sont présentés sur la figure 17a. Ils montrent une large « stop-band » avec leur mode de microcavité centré à 2,52 μm et 2,63 μm .

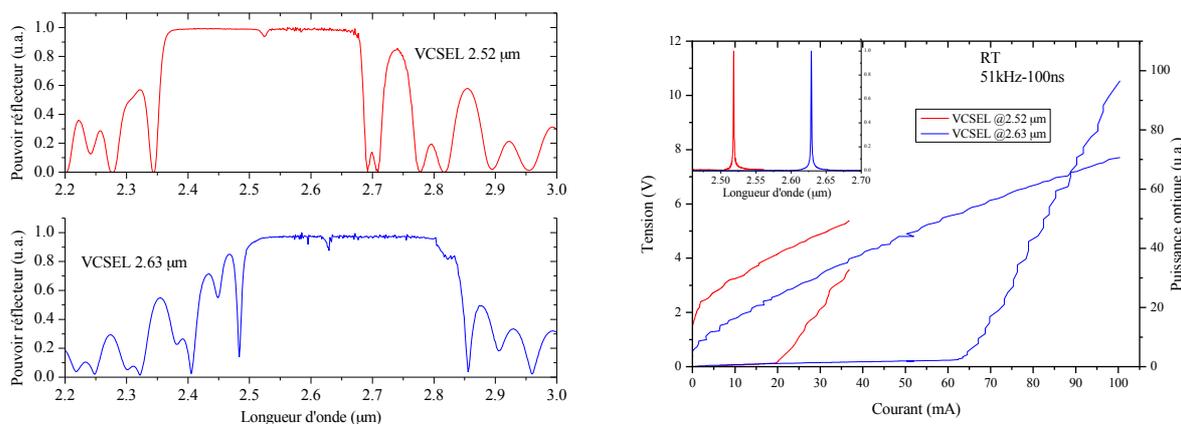


Figure 17: Caractérisations des VCSELs pour émission à 2,5 et 2,6 μm . a) Pouvoir réflecteur. b) P(I) et I(V) en régime pulsé (51kHz-100ns) à température ambiante. *Insert* : spectres d'émission laser

Les caractérisations électro-optiques qui suivent les différentes étapes technologiques pour définir le méso circulaire ont permis d'obtenir un fonctionnement laser en régime pulsé à température ambiante. La figure 17b montre l'évolution de la puissance optique en fonction du courant injecté ainsi que les spectres lasers pour ces 2 structures. Si le composant émettant à 2,5 μm a fonctionné avec un rapport cyclique maximal de 10% (2 μs /50 kHz) [Ducanchez08b], celui à 2,6 μm était limité à 5% (1 μs /50 kHz) [Ducanchez09].

Ces résultats posent les limites des structures monolithiques utilisant la technologie méso. En effet le manque de confinement électro-optique nécessite d'injecter plus de courant pour obtenir l'effet laser. Or l'épaisseur importante ($> 15 \mu\text{m}$) de la structure ajoutée aux résistances thermiques des matériaux

constituant le VCSEL réduisent l'évacuation de la chaleur générée par effet Joule et conduisent à l'élévation de la température du composant.

A cette problématique on peut ajouter la diminution de l'efficacité quantique interne des puits de GaInAsSb avec la longueur d'onde. Une des explications semblent être liée à la diminution de confinement pour les trous et à l'augmentation de celui des électrons. La baisse de confinement des trous accentue la fuite des trous du puits quantique vers la barrière alors que l'élévation de la barrière de potentiel pour les électrons contribue à une distribution inhomogène des porteurs dans les différents puits.

Enfin la dégradation des performances peut-être également attribuée à l'augmentation des pertes par effet Auger qui augmente de manière exponentielle avec la longueur d'onde [Bewley98b].

Malgré un fonctionnement en régime pulsé, 2,63 μm reste à ce jour la longueur d'onde la plus élevée atteinte par un VCSEL à température ambiante. Il faut tout de même noter que le WSI a réalisé un VCSEL opérant en régime continu à 2,59 μm jusqu'à 50°C [Arafin09].

4.1.2 - VECSEL

Pour atteindre de plus grandes longueurs d'onde avec des lasers à cavité verticale, une option est d'utiliser des structures VECSELS. Pour rappel ce type de composant permet de s'affranchir des problèmes liés à la technologie du composant ainsi que de diminuer l'épaisseur de la structure. En effet seul un $\frac{1}{2}$ VCSEL est nécessaire et le pompage se fait à l'aide d'une diode laser.

C'est dans le cadre du projet ANR MICPHIR, piloté par l'IES et qui portait sur l'étude des VECSELS antimoniures qu'il a été choisi de concevoir une structure émettant à 2,7 μm .

La structure était composée de 22,5 paires d'AlAsSb/GaSb ce qui permet d'atteindre un pouvoir réflecteur supérieur à 99,8%. La cavité d'une longueur optique de $3\lambda/2$ comportait 8 puits quantiques distribués en 2 séries de 5 et 3 placées aux ventres du champ électrique. Cette répartition, avec le nombre de puits quantiques qui diminue en direction du miroir de Bragg, permet une excitation homogène des puits en raison du profil exponentiel de l'absorption de la pompe dans la cavité.

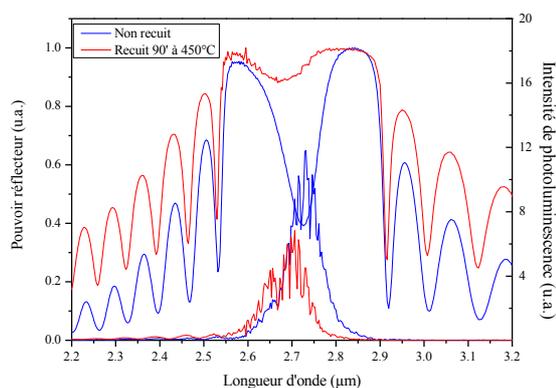


Figure 18: Spectres de pouvoir réflecteur et photoluminescence d'une structure $\frac{1}{2}$ VCSEL pour émission à 2,7 μm avant et après recuit à 450°C

Les mesures du pouvoir réflecteur avec la photoluminescence par la surface de la structure juste après croissance sont présentées sur la figure 10. On peut observer que la « stop-band » du pouvoir réflecteur est centrée à 2,7 μm et qu'il y a un creux en son centre dû au mode de micro-cavité entre l'air et le miroir de Bragg accentué par l'absorption des puits quantiques. La position de ce creux indique que le design de la structure est parfaitement optimisé mais sa profondeur ($\sim 40\%$) met en évidence un décalage du gain vers les grandes longueurs d'onde.

Si des tests en cavité externe ont été effectués, il n'a pas été possible d'atteindre le régime laser. Cela

s'explique uniquement par le mauvais alignement spectral entre le mode de microcavité et le maximum de gain de la zone active. Mais comme il a été souligné auparavant, les puits quantiques de GaInAsSb sont sensibles à la température et plus particulièrement ceux « riches » en In. Un recuit de la zone active peut créer un décalage spectral des puits quantiques vers les plus courtes longueurs d'onde. Pour ce faire la

structure a été remplacée dans le bâti EJM et laissée à une température de 450°C pendant 90' sous flux de Sb_2 pour éviter toute dégradation de la surface liée à la désorption de l'antimoine.

Le pouvoir réflecteur ainsi que la photoluminescence de la structure après recuit sont également présentés sur la figure 18. On peut clairement voir la différence sur le spectre du pouvoir réflecteur, où suite au recuit, le creux lié à l'absorption des puits est réduit ce qui signifie que le maximum de gain des

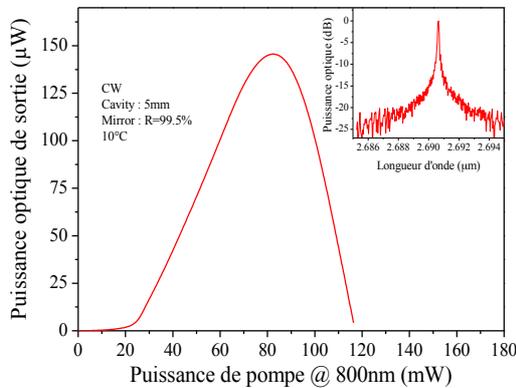


Figure 19: P(P) en régime continu d'un VECSEL émettant à 2,7 μm . Insert : spectre d'émission laser

puits quantiques est maintenant à plus courte longueur d'onde que le mode de microcavité. De plus le maximum du spectre de photoluminescence est atténué ainsi que décalé vers les plus courtes longueurs d'onde. L'étude de cette structure en configuration VECSEL a permis d'obtenir l'effet laser à 2,7 μm jusqu'à 15°C en régime de pompage optique continu [Laurain12]. La figure 19 montre que le maximum de puissance optique atteint est de 150 μW à 10°C. Cette faible puissance est limitée par l'échauffement thermique causé par la résistance thermique élevée ($\sim 380 K/W$) du $\frac{1}{2}$ VCSEL. Le seuil de la structure est de 24mW ce qui correspond à une densité de puissance de 0,7kW/cm². Cette valeur est similaire à celle obtenue avec des VECSELS émettant 2,3 μm ce qui démontre la très bonne qualité cristalline de la zone active même après recuit. De plus un faisceau circulaire TEM₀₀ avec une divergence de 3,6° et une émission longitudinale monomode avec un SMSR > 23 dB (figure 19) démontrent le fonctionnement mono-fréquence. Enfin il a été montré la possibilité d'accorder l'émission de ce VECSEL sans saut de mode et perte de puissance sur 0,8 nm.

4.2- Amélioration de la puissance optique des VCSELS

Si les VCSELS avec confinement électro-optique utilisant la sous-gravure latérale de la jonction tunnel présentaient des performances suffisantes pour l'analyse de gaz en termes de seuil, de qualité spectrale et d'accordabilité, ils étaient néanmoins très limités en termes de puissance optique. En effet une puissance maximale 100 μW pour un diamètre de 6 μm a été atteinte. Pour augmenter la puissance optique de ces structures, nous avons proposé une approche basée sur la mise en cascade de zones actives. Dans ce cas les porteurs sont « recyclés » pour permettre l'émission de plusieurs photons ce qui permet d'augmenter le gain par passage. Ce type d'architecture avait déjà été employé pour des VCSELS réalisés sur substrat GaAs et InP afin d'augmenter leurs puissances de sortie [Knödl03, Koda05]. Le principal désavantage étant l'augmentation de la tension de coude relative à la superposition des jonctions PN ce qui entraîne une augmentation de la température interne du dispositif par effet Joule.

Pour cette structure nous avons repris le même schéma que les VCSELS monolithiques présentés auparavant, seule la cavité a été allongée pour rajouter une autre zone active contenant 5 puits quantiques ainsi qu'une jonction tunnel. Pour ces composants 2 approches de fabrication différentes ont été définies.

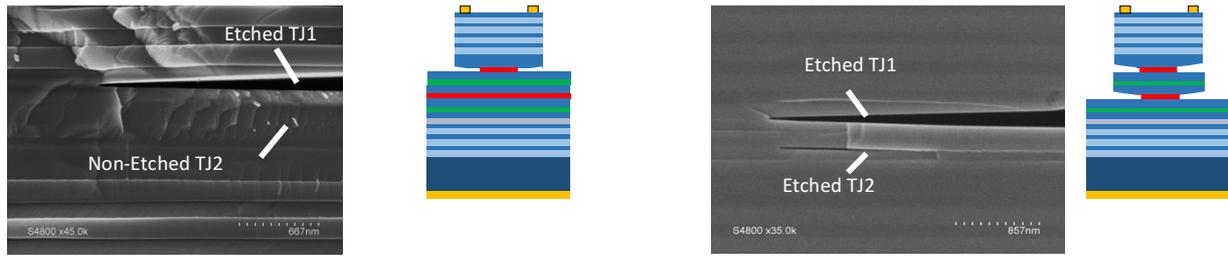


Figure 20: Schémas de principe et images MEB des structures VCSELs monolithiques à zones actives en cascade. a) Sous gravure d'une seule jonction tunnel. b) Sous gravure des 2 jonctions tunnel

La figure 20 présente à la fois le schéma de principe de la structure après technologie ainsi qu'une photo MEB au niveau des jonctions tunnels. Dans la première approche (figure 20.a) seule la jonction tunnel supérieure est sous gravée alors que la seconde (figure 20.b) consiste à graver les 2 jonctions tunnels simultanément.

Ces 2 configurations ont permis d'atteindre l'effet laser en régime continu à température ambiante. Afin de comparer ces 2 configurations aux VCSELs avec une unique zone active la figure 21 présente respectivement les caractéristiques P(I) en continu à une température de 30°C pour des VCSELs ayant une ouverture de la jonction tunnel de 9 et 12 μm .

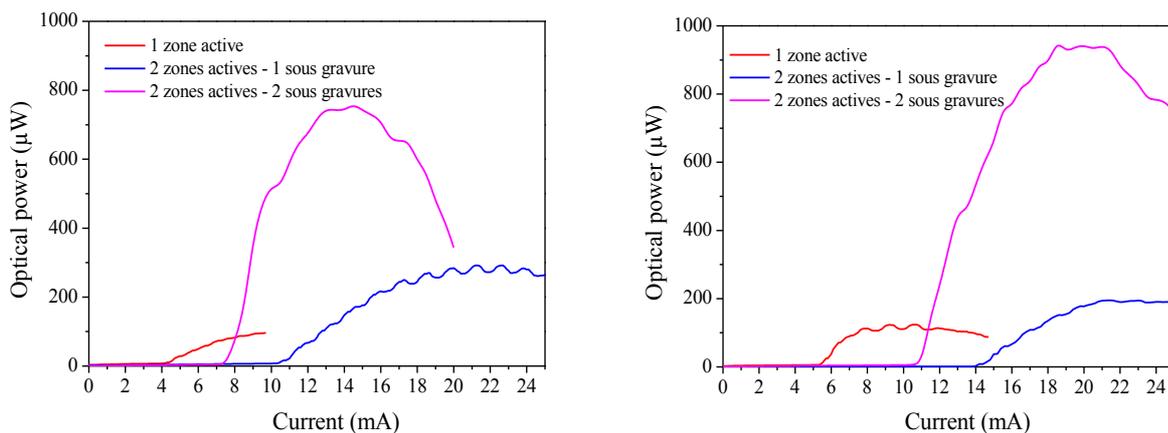


Figure 21 : Comparaison des caractéristiques P(I) entre les différentes technologie de VCSEL monolithiques sur GaSb avec confinement par sous gravure de jonctions tunnel. a) Diamètre d'ouverture de 9 μm . b) Diamètre d'ouverture de 12 μm

On peut observer sur la figure 21 que le VCSEL avec 2 zones actives et une sous gravure présente un seuil plus élevé et une puissance légèrement supérieure au VCSEL avec une seule zone active. Par contre on note une nette amélioration des performances pour celui avec les 2 jonctions tunnels sous gravées aussi bien pour la puissance de sortie que pour le rendement quantique externe. En effet la puissance approche le mW pour la structure de 12 μm de diamètre [Sanchez13a]. Cette différence de performances entre les 2 technologies s'explique parfaitement par l'étalement du courant entre les 2 zones actives. Cela empêche la zone active inférieure d'atteindre le seuil au même courant que la zone active supérieure. Ce phénomène de bistabilité est habituel pour les VCSELs à cascade sans couche de confinement latéral entre les 2 zones actives [Knödl02]

La difficulté de réaliser des diamètres inférieurs à 9 μm avec la double gravure n'a pas permis d'obtenir de fonctionnement monomode. Cependant des mesures sur les VCSELs avec double sous gravure et un

diamètre de 15 nm ont permis un accordabilité sans saut de mode de 14 nm avec un SMSR de l'ordre de 10 dB [Sanchez13b].

4.3 – Miroir à réseau à haut contraste d'indice pour VCSELS antimoniures

Comme nous l'avons vu dans les paragraphes précédents, l'épaisseur des VCSELS antimoniures monolithiques, pour une émission au-delà de 2 μm , est supérieure à la dizaine de μm ce qui limite les propriétés électro-optiques. Ce constat nous a conduit à faire évoluer l'architecture de ces VCSELS en remplaçant le miroir de Bragg supérieur par un miroir à haut contraste d'indice (High Contrast Grating mirror : HCG). Ce type de structuration sub-longueur d'onde permet à la fois d'avoir une réflectivité proche des 100% sur une large plage spectrale ($\Delta\lambda/\lambda > 30\%$) et d'être sélectif en polarisation. L'amélioration des performances des VCSELS sur GaAs et InP [Benbakir06, Chang-Hasnain09] en ce qui concerne l'accordabilité et la stabilité de polarisation, a démontré tout le potentiel de ces réseaux à haut contraste d'indice. Ainsi ce type de miroir permettrait d'améliorer l'efficacité des VCSELS sur GaSb. Ces travaux ont été initiés dans le cadre du projet ANR-MARSUPILAMI déjà évoqué pour l'étude du confinement électro-optique par oxydation d'une couche d'AlAs métamorphique. L'objectif premier de ce projet était de réaliser des VCSELS antimoniures avec un HCG comme miroir supérieur. En plus du LAAS et de l'IES, SUPELEC Metz/Université de Lorraine participait dans le projet pour la modélisation des miroirs HCG. La proposition d'utiliser une structure métamorphique pour ces VCSELS venait de la maturité de la technologie GaAs vis à vis de celle sur GaSb pour la gravure. En effet la nécessité d'avoir des flancs de gravures verticaux, le moins rugueux possible avec le plus de précision nous a naturellement amené à choisir cette filière.

La figure 22 montre un schéma de principe ainsi que des photos MEB de la section du composant après les différentes étapes technologiques. Cette structure a été réalisée en fin de projet suite aux études sur les structures métamorphiques, à l'optimisation du design d'un miroir HCG robuste du point de vue des contraintes technologiques [Chevallier13] et à la détermination des paramètres pour obtenir des gravures conformes à la structure optimisée.

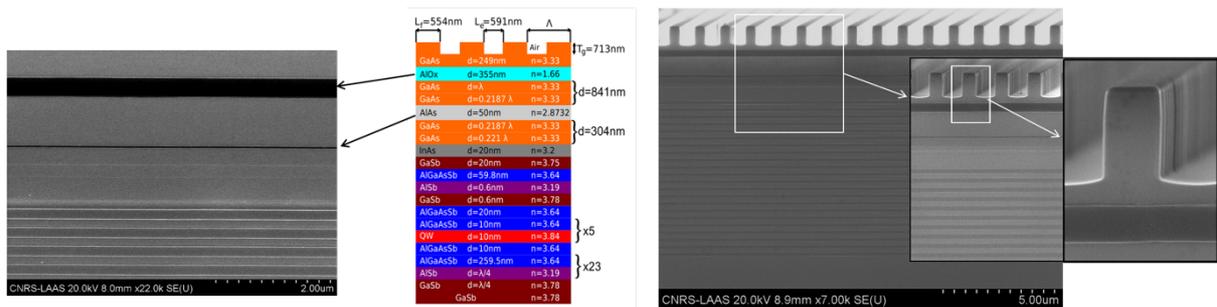


Figure 22 : Images MEB et schéma de principe de la structure VCSEL sur GaSb avec couches métamorphiques GaAs-AlAs pour confinement et miroir HCG supérieur

Si cette structure ressemble en partie à celle réalisée pour la démonstration du confinement électro-optique par oxydation d'une couche d'AlAs, il a été également rajouté une couche de GaAs et une couche de 400 nm d'AlAs. Cette dernière a été complètement oxydée afin de former une couche de faible indice. Cette couche est couverte d'environ 1 μm de GaAs qui est la partie structurée du HCG. On peut parfaitement voir sur la figure 21 le réseau du miroir HCG ainsi que les couches d'AlAs oxydées.

La figure 23 montre les caractérisations électro-optiques effectuées sur des composants avec différents diamètres d'oxyde (20, 12, 3 μm) en régime continu à 18°C. Si aucun seuil laser n'a pu être observé, on peut voir que la résistance série augmente bien lorsque le diamètre diminue confirmant le bon confinement du courant. Malgré la très faible puissance de sortie, il a été possible d'enregistrer un spectre qui présentait un effet de filtrage de l'électroluminescence autour de 2,23 μm dû à la résonance de cavité entre le miroir de Bragg inférieur et le miroir HCG.

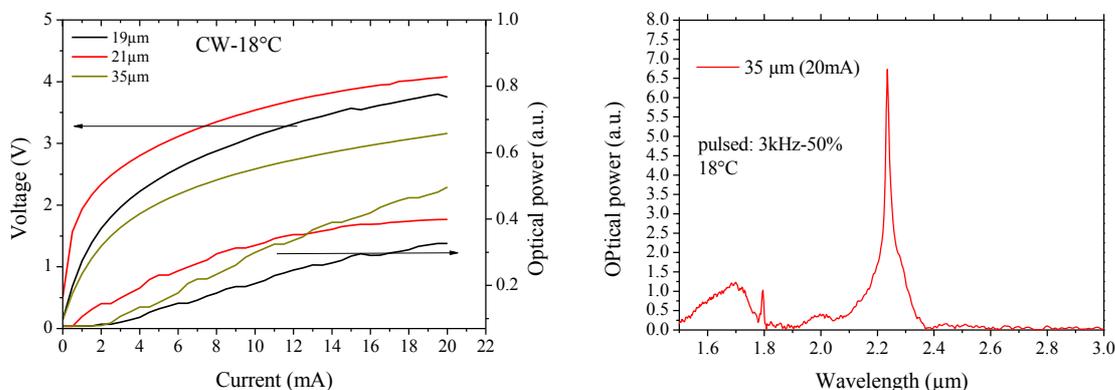


Figure 23 : a) V(I) et P(I) à 18°C en régime continu d'une structure VCSEL sur GaSb avec couche de confinement et miroir HCG métamorphiques de différents diamètres. b) Spectre d'électroluminescence en régime pulsé.

Ce résultat s'explique tout d'abord par une gravure trop profonde du réseau (au-delà des tolérances données par l'optimisation) et une cavité trop courte relative à la non prise en compte de la diminution de l'épaisseur d'AlAs lors de son oxydation ce qui a décalé la cavité à 2,23 μm alors que l'optimum du gain des puits quantiques était autour de 2,32 μm [Laaroussi13].

Les différentes études menées sur les VCSELs antimoniures et plus particulièrement ceux pompés électriquement lors de ces 6 années ont permis d'améliorer nettement les performances de ces composants et d'obtenir des propriétés satisfaisantes au regard des applications visées.

À cette date, les performances de nos VCSELs sont proches de celles obtenues par le WSI sur GaSb et utilisant une jonction tunnel enterrée. Le WSI ayant maintenant choisi de se concentrer essentiellement sur l'augmentation de la longueur d'onde pour des VCSELs InP dont la technologie est maintenant parfaitement établie en utilisant des puits quantiques de type II. Ils ont ainsi récemment obtenu un VCSEL émettant à 2,5 μm et fonctionnant en régime continu jusqu'à 10°C [Sprengel15].

Pour les VCSELs à base d'antimoine, on peut recenser 3 autres équipes. Le Fraunhofer Institute de Freiburg en Allemagne, l'université de Tampere en Finlande et l'université de Tempe aux États Unis qui focalisent leurs recherches sur l'augmentation de la puissance dans ces composants. Ils ont pu atteindre en régime continu et à température ambiante des puissances de 3 W à 2 μm [Paajaste09] et 2,3 μm [Manz09] et de 800 mW à 2,8 μm [Rösener11] grâce au collage d'un dissipateur thermique (SiC ou diamant) sur la surface du $\frac{1}{2}$ VCSEL. Les fortes puissances optiques atteintes le sont alors au dépend des propriétés optiques qui se dégradent à cause de cet élément intra-cavité. Ainsi il est impossible dans ce cas d'obtenir une émission mono fréquence.

Ainsi les 3 projets, les 3 thèses co-encadrées et les 4 stages de master et de licence sur ce sujet ont amené 1 chapitre de livre, 18 publications et 26 conférences.

5 – Perspectives et conclusion sur ma contribution dans les VCSELS antimoniures

Je continue à m'impliquer dans 2 projets sur le développement de VCSELS pompés optiquement en me focalisant uniquement sur la croissance.

Le projet ANR MOREMIR2 qui s'apparente au projet MARSUPILAMI par l'utilisation de miroir de type HCG. Ce projet piloté par l'Institut des Nanotechnologies de Lyon (INL) vise à concevoir une plateforme sur Si pour intégrer des composants émettant dans le MIR pour réaliser un capteur de gaz multi-longueurs d'onde. Une partie est consacrée à intégrer des lasers à cascade quantique émettant à 4,5 μm développés par le III-V lab. L'autre partie du projet vise à réaliser des microcavités VCSEL où les 2 miroirs de Bragg sont remplacés par 2 HCG de Si encapsulé dans du SiO_2 . La figure 24 montre un schéma de cette structure utilisant un double miroir HCG.

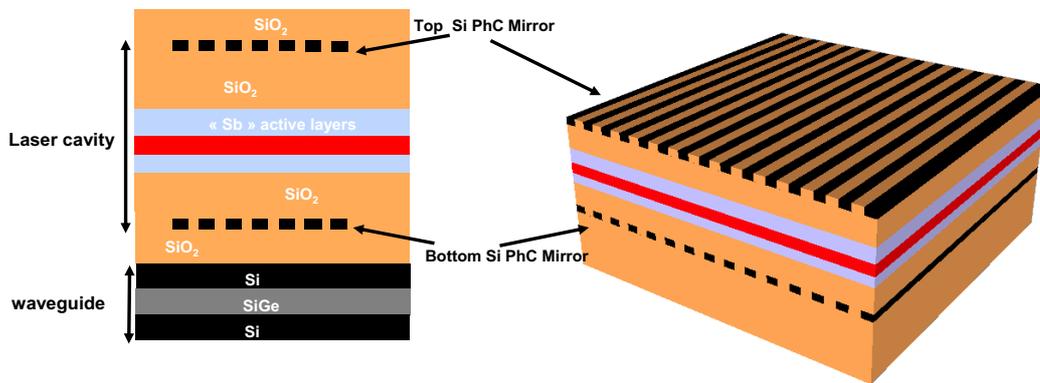


Figure 24 : Schémas de principe d'une structure VCSEL 2.5D

Ce concept de VCSEL développé par l'INL a déjà fait ses preuves avec des zones actives sur InP et émettant à 1,55 μm [BenBakir06]. L'un des principaux avantages (pour un épitaxieur) est le gain de temps par rapport à une structure utilisant des miroirs de Bragg. En effet il est seulement nécessaire de réaliser la partie active. Dans ce projet les principales difficultés sont technologiques avec tout d'abord le collage de la zone active épitaxiée sur Si. Le procédé développé au LETI repose sur le collage moléculaire hydrophile via l'oxyde qui se trouve sur la partie III-V et le Si. Cette étape de collage nécessite des surfaces sans défauts avec une rugosité inférieure au nm. L'épitaxie d'une zone active avec une faible densité de défauts de surface combinée à une croissance par avancée de marche qui amène une rugosité de l'ordre de la monocouche atomique a rendu possible le collage de ces structures réalisées sur un substrat de 2" sur un substrat de Si de 8". La deuxième difficulté est de retirer le substrat en utilisant une couche d'arrêt. Si cette étape est parfaitement maîtrisée pour le GaAs et l'InP, elle est encore loin d'être mature pour le GaSb. Pour cette partie étudiée par l'INL, il a été inséré 2 couches de 300 nm d'InAsSb accordées sur GaSb séparées par 150 nm de GaSb sous la zone active. Ces couches jouent le rôle de couche d'arrêt pour le retrait du substrat soit par voie humide en s'appuyant sur la sélectivité de la gravure humide du GaSb vis à vis de l'InAsSb ou par voie sèche en contrôlant la composition des ions présent lors de la gravure.



Figure 25 : Photo d'un module VECSEL à 2.3 μm commercialisé par la société INNOPTICS

L'autre projet porté par A. Garnache capitalise sur les résultats obtenus avec les VECSELS. En effet la SATT-LR a décidé de financer le développement de ces composants à 2,3 μm pour les intégrer dans des modules compacts avec contrôleur de température et actionneur piézo-électrique afin de contrôler précisément la longueur d'onde d'émission. La figure 25 montre une photo du prototype d'un tel module développé par la société INNOPTICS (<http://innoptics.com/fr/opscan-26>) et qui intègre un VECSEL sur GaSb réalisé par notre groupe.

Ainsi pour conclure cette partie, si au début de ma thèse il n'existait aucun V(E)CSEL antimoniure fonctionnant en régime continu à température ambiante avec des propriétés spectrales intéressantes pour la spectroscopie, j'ai pu depuis ma thèse et durant la partie de ma carrière d'enseignant-chercheur qui nous intéresse pour cette HDR contribuer directement à l'amélioration de ces structures et pour ce qui concerne les VECSELS participer à leur future commercialisation. Il est également certain que si nous avons mis en pause les études sur les VCSELS pompés électriquement, il reste encore des domaines à explorer en s'appuyant sur nos résultats. Ainsi franchir la longueur d'onde de 3 μm reste un challenge avec ce type de structure. Il est aussi nécessaire de réfléchir à augmenter la puissance des VECSELS tout en gardant une émission mono-fréquence.

CHAPITRE 6

~

Épitaxie pour nouveaux composants optoélectroniques

~

Comme je l'ai présenté l'axe principal de ma recherche durant ces dernières années était centré principalement sur les composants laser à cavité vertical mais en parallèle j'ai également participé au développement de nouveaux composants optoélectroniques.

Je commencerai par les études menées au cours de mon post-doc à l'ISOM puis sur mon implication sur les zones actives à base de super réseau pour la conception de lasers émettant au-delà de 3 μm et enfin je présenterai les résultats sur les zones actives et lasers émettant à 1,55 μm sur substrat de GaSb en vue de leur intégration directe sur substrat de Si.

1. Études post-doctoral sur les nano-colonnes de GaN

De mars 2005 à aout 2006, j'ai été titulaire d'une bourse post doctoral « Juan de la Cierva » du ministère de la recherche espagnole au sein de l'ISOM et dont l'objectif était l'étude de nano-émetteurs à base de semi-conducteur III-N réalisé par EJM. En effet les applications de ces nanostructures vont de la physique fondamentale (couplage excitonique fort dans les semi-conducteurs nitrurés, structure à 1 dimension, émetteur à 1 photon...), aux applications les plus diverses (LED blanche, panneau d'affichage, détection de produits explosifs, stockage de données...).

1.1 – Etudes sur la formation « spontanée » des nano-colonnes de GaN

C'est à partir de 1997 lors d'optimisation des conditions de croissances par EJM de couches épaisses de GaN que les groupes du Pr. Kishino à l'université de Sophia au Japon [Yoshizawa97] ainsi que celui du Pr. E. Calleja [Sanchez-Garcia98] respectivement sur saphir et Si (111) ont observé la présence de ces nano-colonnes de GaN. La plupart des travaux qui ont suivi ont montré l'intérêt de ces nanostructures car s'il n'existe pas de substrat de GaN de diamètre suffisamment large la plupart des croissances se réalisent sur substrats de saphir, de Si (111) ou de SiC. Or le désaccord de paramètre de maille conduit à la formation de défauts et donc à du matériau de qualité moindre. L'avantage des nano-colonnes réside dans l'obtention de matériaux semi-conducteurs III-N non-contraints et sans dislocation conduisant à une efficacité de luminescence bien plus importante que les couches épaisses. En effet il a été démontré que le désaccord de paramètre de maille entre le GaN et le substrat s'accommodait à l'interface via la génération d'une forte densité de dislocations qui prennent fin sur les surfaces libres de la nano-colonne. Une fois le GaN relaxé, la nano-colonne continue de croître en gardant son propre paramètre de maille. Cet effet est aidé par le fort rapport entre la surface libre et le volume de la nano-colonne. Par contre le mécanisme de croissance des nano-colonnes généralement accepté pour le Si et les semi-conducteurs III-As, III-P et III-Sb est le procédé vapeur-liquide-solide (VLS) qui nécessite la présence d'un catalyseur liquide (Ga, In, Au, ...) pour démarrer la croissance sous forme de fils [Fontcuberta11].

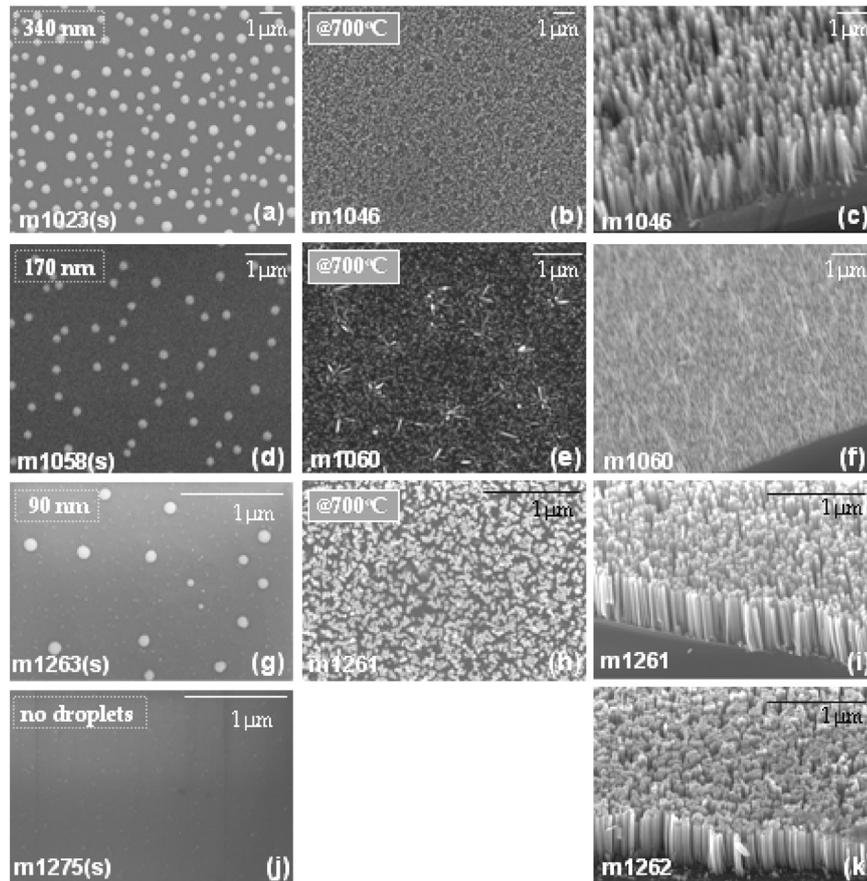


Figure 26 : Images MEB de substrats de Si (111) avec : à gauche: gouttelettes de Ga (gauche) et leurs tailles , au milieu et à droite en vue plan et sur la tranche respectivement après épitaxie des nano-colonnes de GaN

Pour les matériaux nitrurés il nécessite seulement un excès d'azote et il n'y a aucune intervention d'un catalyseur comme des gouttelettes de Ga dans le procédé de formation ou de géométrie des nano-colonnes. Si le premier effet a été démontré à partir des observations sur la croissance par EJM des nano-colonnes de GaN, j'ai pu participer lors de mon post doc à la démonstration du deuxième phénomène. En effet j'ai encadré les recherches des doctorants J. Ristic et S. Fernandez-Garrido sur cet aspect. Pour démontrer cet effet il a été effectué des dépôts de gouttelettes de Ga de différentes tailles sur substrat de Si(111) suivies par la croissance de nano-colonnes de GaN. Or il s'est avéré que les gouttelettes au-dessus d'une taille critique, dépendante des conditions de croissance, gênaient la formation des nano-colonnes (figure 26).

L'étude du mécanisme de nucléation des nano-colonnes de GaN adressait 2 autres aspects qui sont connectés sur le contrôle de la densité et du diamètre des nano-colonnes.

Ainsi la formation de nano-colonnes nécessite la formation de *nuclei* 3D par croissance de type Volmer-Webber de GaN et qui au-dessus d'une taille critique vont commencer à pousser verticalement. L'excès de N supprime la croissance latérale en favorisant l'incorporation des ad-atomes de Ga sur le haut de la nano-colonne empêchant les îlots de coalescer. Le contrôle de ces îlots au démarrage de la croissance en changeant la température et/ou le rapport V/III va directement impacter la morphologie des nano-colonnes.

1.2 – Croissance des nano-colonnes de GaN sur Si (001)

Comme il a été précédemment mentionné à la date de mon post-doc la totalité des travaux réalisés sur les nano-colonnes de GaN étaient sur substrats de Si (111), saphir et SiC. Or l'un des challenge, toujours d'actualité, était d'intégrer des semi-conducteurs III-V avec la technologie Si or celle-ci utilise uniquement du Si (001). En se basant sur les propriétés exceptionnelles des nano-colonnes de GaN, j'ai conduit les recherches pour déterminer s'il était possible de réaliser des nano-colonnes sans contrainte ni dislocation et avec une structure hexagonale sur Si (001). Pour ce faire il a été épitaxié des nano-colonnes de GaN sur substrat de Si (111) et Si (001) dans les conditions optimales de température connues sur Si (111) puis leurs propriétés ont été comparées.

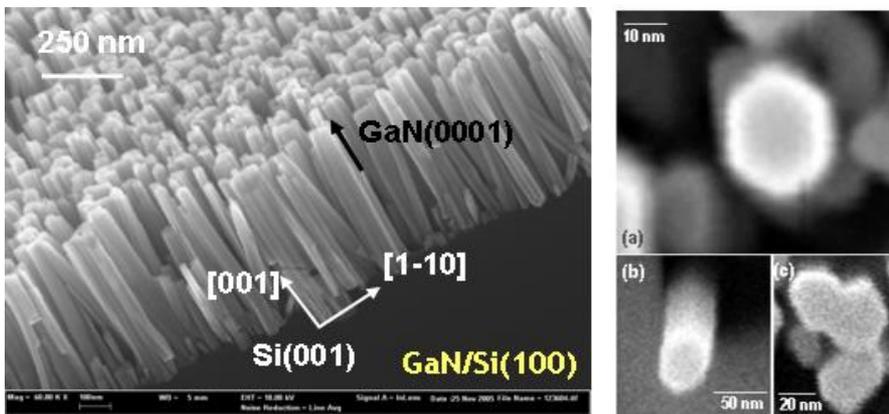


Figure 27 : Image MEB de nano-colonnes de GaN épitaxiées par EJM sur substrat de Si (001), à gauche : vue par la tranche et à droite : vue par dessus

La figure 27 montre les images au MEB des nano-colonnes réalisées sur substrat de Si (001). On peut observer que tout comme celles réalisées sur Si(111) les nano-colonnes sont alignées perpendiculairement au substrat avec une symétrie hexagonale. La distribution est homogène avec une hauteur moyenne de 600 nm et un diamètre compris entre 20 et 40 nm.

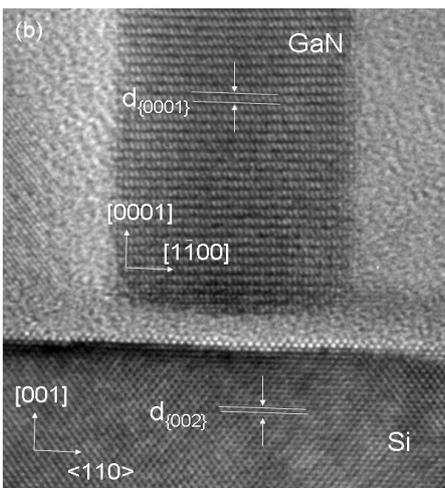


Figure 28 : Image MET d'une nano-colonne de GaN sur Si (100)

La caractérisation au microscope électronique en transmission (MET) réalisée au Paul Drude Institute (PDI) de Berlin par A. Trampert (figure 28) montre un exemple d'une nano-colonne de GaN sur Si(001) parfaitement alignée avec le substrat.

On peut juste remarquer à l'interface une couche amorphe probablement du SiN formé par le passage d'azote au travers du réseau de dislocations d'interface.

On peut également observer qu'il n'y a aucune dislocation ni de défaut étendu dans la nano-structure.

Les caractérisations optiques telles que la PL à basse température (10K) et l'effet Raman sont présentées sur la figure 29. Le spectre de PL à basse température des nano-colonnes sur Si (001) montre la même signature que celui sur Si (111) avec une émission excitonique intense et étroite. De plus il n'apparaît pas d'émission autour de 2,4 eV (bande jaune) qui traduit la présence de défauts, ni autour de 3,3 eV qui signifierait la présence d'inclusions de GaN cubique.

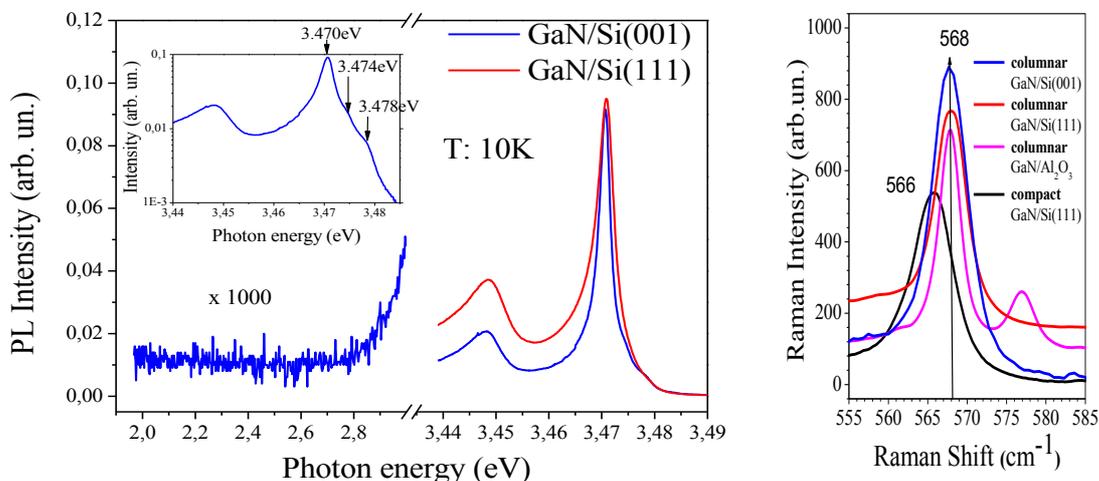


Figure 29 : a) Spectre de PL à 10 K des nano-colonnes de GaN sur substrat de Si (111) et Si (001). Insert : agrandissement sur la partie dominante de la PL proche du gap de GaN. b) Spectres Raman de GaN massif et en nano-colonnes sur différents types de substrats

Les mesures par effet Raman montrent que tout comme les nano-colonnes sur Si (111) ou saphir celles sur Si(001) sont positionnées à 568 cm⁻¹ c'est à dire la position du GaN complètement relaxé, contrairement au GaN compact sur Si(111) qui est légèrement contraint.

Durant ce post-doc à l'ISOM, j'ai pu acquérir des connaissances sur les semi-conducteurs à base de nitrure aussi bien d'un point de vue fondamentale que sur la croissance de ces semi-conducteurs qui ont peu de point commun avec les autres III-V. De plus la démonstration de nano-colonnes de GaN sur Si(001) ayant les mêmes propriétés que sur Si(111) [Cerutti06] a été utilisée par le groupe du Pr. P.Bhattacharya de l'université du Michigan pour développer des composants tel que des LEDs [Guo10] et plus récemment des lasers à base de nano-colonnes de GaN sur Si (001) [Frost14]

2 – Nouvelles zones actives à base de super-réseau pour émission à $\lambda > 3 \mu\text{m}$

2.1– Contexte de l'étude

À partir de 2005, le groupe Nanomir a piloté le projet européen DOMINO sur la croissance, les propriétés physiques et la caractérisation de composants à base de boîtes quantiques d'InSb dans du GaSb. En effet en se basant sur les résultats obtenus par le couple InAs/GaAs, pour les lasers proche infra-rouge, il a été proposé d'étudier la croissance d'InSb sur GaSb qui présente un désaccord de paramètre de maille similaire d'environ 7%. Si on tient compte uniquement de cet aspect de contrainte, il est possible de former des îlots quantiques d'InSb sur GaSb en suivant le mode de croissance Stransky-Krastanov (SK). De plus de part leur taille et leur géométrie, ces nanostructures permettent d'améliorer les propriétés des composants optoélectroniques par rapport à des zones actives à puits quantiques. En particulier la

diminution de la densité d'état de 2D à 0D entraîne, en théorie, une réduction du courant de seuil, une augmentation de la température caractéristique (T_0), de la température de fonctionnement, de la puissance de sortie... Pour finir l'utilisation d'InSb devait permettre de réaliser des composants couvrant la gamme spectrale comprise entre 3 et 5 μm ce qui à cette date n'était possible qu'en utilisant des lasers à cascade quantique.

Ce projet a permis de montrer que si la croissance d'InSb sur GaSb suit bien le mode SK, les îlots étaient toujours relaxés dès le début de la croissance et cela malgré les variations des paramètres cinétiques et thermodynamiques (vitesse, température, rapport V/III, etc.) [Deguffroy07a]. Pour s'affranchir de ce problème, une croissance utilisant un dépôt amorphe d'InSb à basse température (250-300°C) suivi d'un recuit a permis d'obtenir des boîtes quantiques non relaxées. Mais la faible photoluminescence obtenue sur ces structures et des modélisations prenant en compte les effets de contrainte dans les boîtes et dans la matrice [Iskevitch] ont montré qu'il existait une transition indirecte à la fois dans l'espace réel et dans l'espace réciproque entre les électrons du GaSb et les trous localisés dans l'InSb. Les faibles performances de ces nanostructures ont orienté le groupe vers une autre approche en utilisant non plus des boîtes quantiques d'InSb mais une couche d'InSb dans une matrice en super réseau InAs/GaSb. Ce travail a fait l'objet à la fois de la thèse d'A. Gassenq que j'ai co-encadré et du projet ANR MIRNANO conduit par le groupe Nanomir. Durant cette thèse il a été modélisé les différents aspects nécessaires à l'obtention de structures lasers tels que le gain des zones actives en jouant sur la période du super réseau et/ou l'épaisseur de l'InSb et le design du guide optique pour obtenir le meilleur recouvrement du mode. Ensuite il a été étudié la croissance de ces structures tout d'abord par PL puis en passant par la fabrication de lasers. Durant cette thèse et ce projet, mon implication a été principalement sur l'optimisation de la croissance des super-réseaux.

2.2 – Laser à super-réseau InAs/GaSb

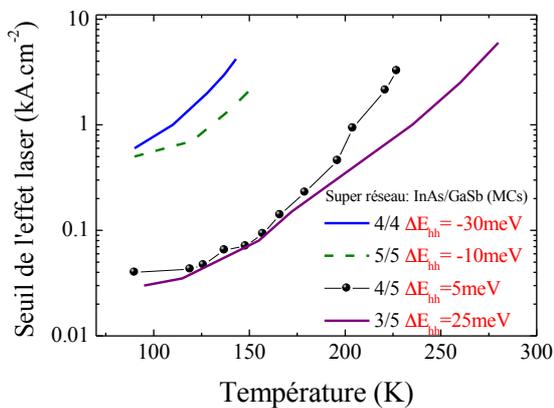


Figure 30 : Densité de courant de seuil en fonction de la température en régime pulsé pour des diodes lasers avec 20 périodes d'InAs/GaSb pour différentes épaisseurs

tension, en augmentant la composition du super réseau en GaSb, a entraîné une nette amélioration des performances. Comme le montre la figure 30, le passage d'un super réseau de 20 périodes de 4MCs d'InAs et 4 MCs de GaSb à respectivement 3 et 5 MCs a permis une baisse importante de la densité de seuil ce qui a augmenté la température de fonctionnement de ces lasers jusqu'à 230K en régime pulsé.

2.3 – Laser à super réseau InAs/InSb/GaSb

Les résultats obtenus sur les super-réseaux InAs/GaSb ont permis de mettre en place les outils théoriques mais également expérimentaux pour les lasers utilisant ces zones actives. À partir de là une amélioration notable a pu être obtenue en insérant dans chaque période du super-réseau de l'InSb. L'effet de cette couche d'une épaisseur de 1 à 1.5 ML joue directement sur la contrainte de la zone active qui passe alors en compression amenant une augmentation du gain mais également un confinement des trous plus important.

Ainsi nous avons effectué la croissance de diverses structures en jouant sur le nombre de période du super-réseau, sur l'épaisseur d'InSb ainsi que sur la composition de la couche de confinement entourant le super-réseau. Si je ne vais pas reprendre tous les résultats obtenus au cours de cette thèse au vue du grand nombre de structures lasers réalisées (25), je ne présenterai que le meilleur laser qui synthétise parfaitement cette étude.

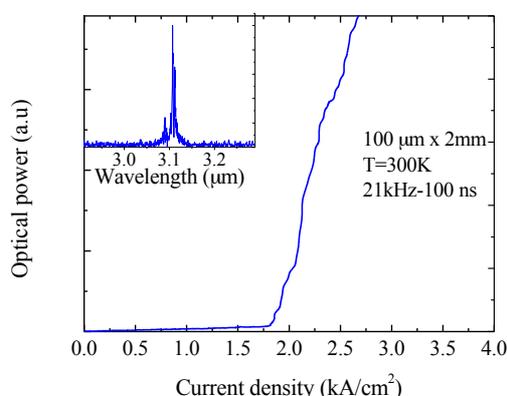


Figure 31 : P(I) à température ambiante en régime pulsé pour un laser à zone active en super-réseau InAs/InSb/GaSb et barrière en quinaire AlGaInAsSb. Insert : spectre laser

La zone active de ce laser était composée de 14 périodes d'un super-réseau de 2,75/2/1,25/2 MCs d'InAs/GaSb/InSb/GaSb. Les barrières de confinement autour de cette zone active étaient en quinaire réalisé également à partir d'un super-réseau Al_{0,5}Ga_{0,5}Sb(5MCs)/InAs (3MCs), l'ajout d'In améliorant le confinement des trous dans la zone active. Les claddings étaient en Al_{0,9}Ga_{0,1}AsSb accordés sur GaSb et d'une épaisseur de 1,8 µm. La figure 31 présente la caractérisation électro-optique en régime pulsé de cette structure pour une cavité de 2 mm et une largeur de 100 µm. À température ambiante la densité de seuil est autour de 1,8 kA/cm². L'insert de la figure 31 montre le spectre d'émission laser autour de 3,1 µm. La densité de seuil élevée de cette structure n'a pas permis d'obtenir le fonctionnement en régime continu à température ambiante mais seulement jusqu'à 200 K suite à la fabrication de diodes avec des largeurs de ruban de 8 µm.

Au début de cette étude les lasers à super réseau InAs/Ga(In)Sb fonctionnaient uniquement à basse température ainsi les études conduites au cours de cette thèse et du projet MIRNANO ont abouti à la réalisation d'un laser opérant à température ambiante avec des transitions de type II et une densité de seuil inférieure à 2 kA/cm². Depuis ces travaux, les seuls lasers utilisant des zones actives de type II ayant dépassés ces performances sont les lasers à cascade interbande (ICL) [Vurgaftman15].

3 – Laser télécom sur GaSb

3.1 – Lasers antimoniures métamorphiques

En 2008 le groupe a démarré un nouvel axe de recherche initié par l'arrivée d'un CR CNRS (JB. Rodriguez) au sein de l'équipe dont le projet portait sur la croissance métamorphique de composants à base d'antimoniures en vue d'une intégration monolithique sur plateforme Si. Ce sujet s'appuyait notamment sur le fait que depuis les années 1998, il avait été démontré que les faibles coefficients

d'élasticité des antimoniures, au regard des autres semi-conducteurs III-V, permettaient de relâcher une forte contrainte ($> 5\%$) via la formation de dislocations de type Lomer [Rocher98]. Ces dislocations qui possèdent un vecteur de Burger à 90° restent confiner à l'interface sous forme d'un réseau ce qui en théorie diminue la densité de dislocations qui traverse le matériau (avec un vecteur de Burger à 60°) et donc améliore les propriétés du matériau relaxé. Les premiers composants lasers réalisés par le groupe de D. Huffaker de l'Université du Nouveau Mexique aussi bien sur GaAs que sur Si ont fonctionné en pulsé à température ambiante sur GaAs [Metha07] et à 80K sur Si [Huffaker07].

Si j'ai participé à l'optimisation des conditions de croissance sur substrat de GaAs et Si, je ne présenterai ici que des résultats sur les composants qui constituent mon apport principal. Ainsi nous avons obtenu en 2009 les premiers lasers à base d'antimoine sur GaAs opérant en régime continu jusqu'à 50°C [Rodriguez09a] et sur Si fonctionnant en régime pulsé à température ambiante [Rodriguez09b]. Il est important de noter que le mode de relaxation via la formation de ce réseau de dislocations confiné à l'interface permet de s'affranchir d'une couche tampon épaisse entre le substrat et le dispositif et ainsi dans ces 2 structures, contrairement aux autres filières de semi-conducteurs, l'épaisseur de la couche buffer entre le substrat et la structure laser était seulement de $1\ \mu\text{m}$.

3.2 – Résultats préliminaires à $1.55\ \mu\text{m}$ sur GaSb et Si.

Aujourd'hui la grande majorité des études d'intégration sur plateforme Si de composants optoélectroniques III-V est consacrées à la filière télécom. Les lasers télécoms sont généralement fabriqués dans la filière InP mais leur épitaxie directe n'est pas possible sans la croissance d'une couche buffer d'épaisseur supérieure à $3\ \mu\text{m}$. Cette épaisseur rend difficile toute idée de couplage avec le circuit photonique Si. Les seuls dispositifs ayant les propriétés nécessaires reposent sur le collage de composants III-V sur circuiterie photonique Si [Liang10]. Mais cette technologie, bien que mature, pose plusieurs problèmes comme la différence de taille entre les substrats III-V et Si, le retrait du substrat III-V après collage au vue du prix du substrat mais également l'alignement entre le circuit sur Si et le composant III-V. Bien que des dispositifs soient commercialisés cela reste encore confiné à la réalisation de câble actif pour des interconnexions [Luxtera].

Si généralement les antimoniures sont utilisés pour la conception de composants optoélectroniques opérant à des longueurs d'onde au delà de $2\ \mu\text{m}$, les résultats obtenus sur Si, nous ont poussé vers la réalisation de structures émettant à $1,55\ \mu\text{m}$. En 1995 notre groupe en partenariat avec Alcatel avait commencé à étudier des zones actives à puits quantiques sur substrat de GaSb pour émettre à $1,55\ \mu\text{m}$. Ces études ont permis d'obtenir un laser opérant en régime pulsé à température ambiante [Almuneau99]. Pour atteindre cette longueur d'onde la zone active était constituée de puits quantiques de $4\ \text{nm}$ en $\text{Ga}_{0,96}\text{InSb}$ très faiblement contraints en compression ($0,3\%$) dans des barrières en $\text{Al}_{0,2}\text{GaAs}_{0,02}\text{Sb}$ accordées en maille sur GaSb. Pour améliorer les performances de cette structure, il a été apporté des changements dans la structure de bande de la zone active avec des puits quantiques de $4\ \text{nm}$ de $\text{Ga}_{0,8}\text{InSb}$ et des barrières en $\text{Al}_{0,35}\text{GaAs}_{0,03}\text{Sb}$ ce qui permettait d'augmenter à la fois le confinement des porteurs dans les puits mais également la contrainte (Figure 34). Ainsi l'utilisation de cette zone active dans une structure laser a permis d'obtenir un fonctionnement en régime continu à température ambiante [Cerutti07] avec une émission à $1,57\ \mu\text{m}$ sur substrat de GaSb.

À partir de ce résultat, une structure laser identique a été épitaxiée sur un substrat de Si. Celui-ci est choisi de type-N et désorienté de 4° . Il est important de rappeler que la croissance d'un matériau polaire,

comme les III-V, sur un matériau non polaire, comme le Si, entraîne la formation de paroi d'antiphase. La densité de ces parois pouvant être diminuée en utilisant des substrats désorientés afin de promouvoir la formation de double marche atomique [Huang08]. L'initiation de la croissance est réalisée avec 5 nm d'AlSb à 450°C suivie par 1 µm de GaSb dopé-Te à 500°C. La structure laser est composée de 2 claddings de 1,5 µm d'Al_{0,9}GaAs_{0,07}Sb de part et d'autre d'un guide d'onde de 400nm d'Al_{0,35}GaAs_{0,03}Sb contenant les 3 puits quantiques de 4 nm séparées par 20 nm de barrière. Une couche finale de 300nm de GaSb dopée-P est réalisée comme couche de contact.

La figure 32.a montre le diagramme de rayons X de cette structure épitaxiée sur Si, sa simulation, mais également celle sur GaSb. La position du pic de GaSb s'adapte parfaitement avec la position du GaSb en tenant compte d'une relaxation à 100%. La simulation a été calculée en prenant 20% d'In dans les puits quantiques et une périodicité puit-barrière de 24 nm. Ces valeurs correspondent à celles visées pour une émission à 1,55 µm comme on peut le voir sur le spectre de rayons X de la structure réalisée sur GaSb.

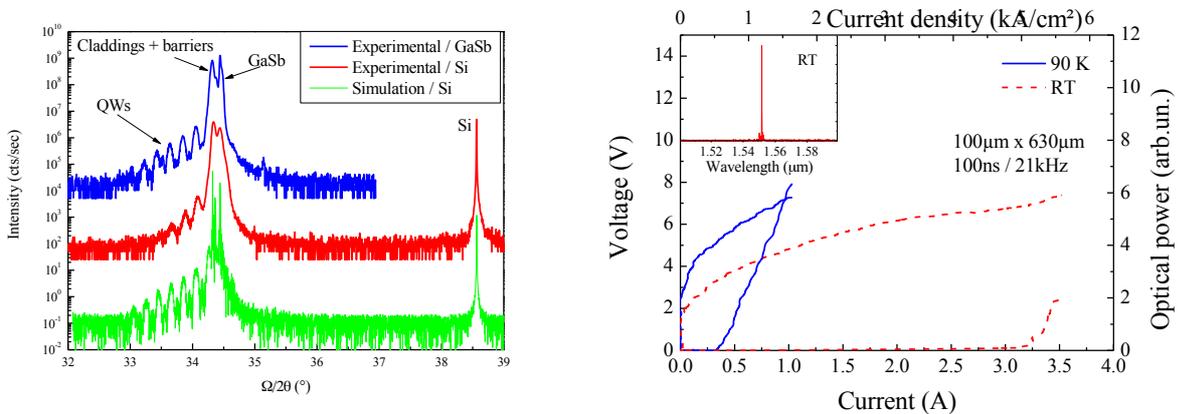


Figure 32 : a) Spectres de rayons X expérimentaux et simulés de structures lasers à 1,55 µm sur substrat GaSb et Si. b) Caractéristiques P-I-V en régime pulsé à 80 et 300K d'un laser sur substrat Si. Insert : spectre laser à température ambiante

La figure 32.b montre la caractérisation électro-optique d'un composant de 100 µm de ruban avec une longueur de cavité de 630 µm conçu à partir de cette structure. Ce composant a fonctionné en régime pulsé (100 ns/21 kHz) à 90 K et à température ambiante avec une densité de courant de seuil respective de 0,75 et 5kA/cm². La tension de coude est autour de 3 V ce qui est bien plus élevée que les lasers sur GaSb (~0,8V). Cela peut s'expliquer par la faible conductivité électrique à l'interface entre le Si et le GaSb ainsi que par l'utilisation d'une métallisation inadaptée sur le substrat de Si. L'insert de la figure 32.b montre bien une émission à 1,55 µm à température ambiante.

3.3 – Améliorations technologiques sur Si pour émission en régime continu

La démonstration de l'effet laser à température ambiante mais uniquement en régime pulsé de lasers à base d'antimoine sur Si a alors conduit à repenser les procédés technologiques jusqu'ici utilisés. Les principales limites étaient la tension de coude (> 3V) et la forte résistance série provoquées par le passage du courant au travers de l'interface Si/III-Sb. Pour contourner ce problème il a été inséré une couche d'InAs_{0,91}Sb_{0,09} dopée-n dans la couche buffer de GaSb. Cette couche présente plusieurs avantages tels qu'une meilleure conductivité électrique ainsi qu'une faible résistance de contact en comparaison du GaSb dopé-N. De plus comme il a déjà été précisé dans ce manuscrit, l'InAsSb peut être utilisé comme couche d'arrêt. Néanmoins à cause d'une forte absorption aux longueurs d'onde inférieures à 5 µm, il est nécessaire de positionner correctement cette couche pour éviter tout recouvrement avec le mode optique

mais en gardant un buffer de 1 μm . En plaçant cette couche après seulement 100 nm de GaSb et ainsi à 2 μm de la zone active, le recouvrement entre la couche d'InAsSb et le mode optique est négligeable.

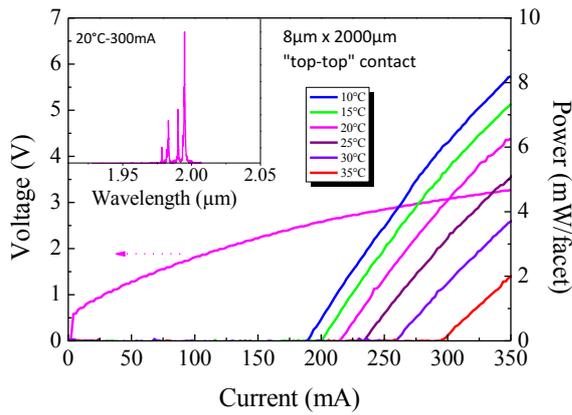


Figure 33 : P-I-V en régime continu d'un laser III-Sb sur Si avec prise de contact par le haut. *Insert* : Spectre laser à 20°C

Après croissance d'une structure laser sur Si intégrant cette couche d'InAsSb, il a été réalisé des diodes avec des tailles de ruban de 8 μm et une longueur de 2 mm. Le contact N normalement réalisé sur la face arrière du substrat a été pris par le « haut » sur la couche d'InAsSb afin de s'affranchir du passage du courant au travers de l'interface Si/III-Sb. Cette structure optimisée pour une émission à 2 μm a fonctionné en régime continu jusqu'à une température de 35°C et un courant de seuil de 215 mA à 20°C (figure 33). Ce fonctionnement en continu s'explique par la tension de coude autour de 0,8 V qui limite l'échauffement de la diode par effet Joule et donc améliore les performances.

La mesure du gain par la méthode d'Hakki-Paoli a permis de remonter à des pertes internes de l'ordre de 20 cm^{-1} [Reboul11] soit 5 à 10 fois plus élevées que les lasers sur GaSb [Sahli04] et qui sont principalement attribuées aux dislocations qui augmentent la diffusion de la lumière.

3.4 – Nouvelles zones actives à 1,55 μm sur GaSb pour l'amélioration des performances

Suite à ces résultats, l'équipe a obtenu en 2012 le projet ANR OPTOSI sur la croissance de sources lasers télécom sur substrat de Si ainsi que le financement d'A. Castellano boursier CIFRE avec la société Alactel-Lucent dont je suis co-encadrant.

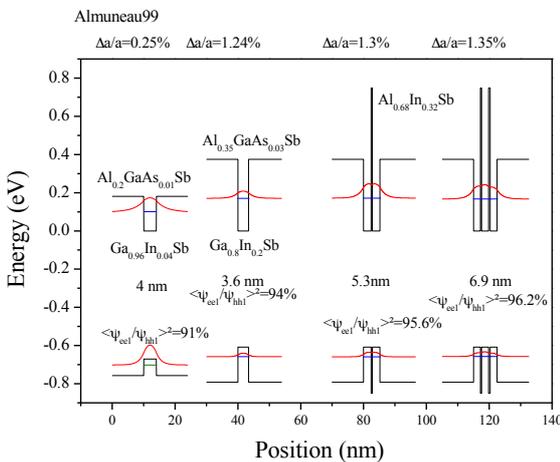


Figure 34 : Diagramme de bande de différentes zones actives pour émission à 1,55 μm dans la filière GaSb

Les premières investigations aussi bien dans le projet que dans la thèse ont porté sur les propriétés des zones actives émettant à 1,55 μm sur GaSb. Le point de départ a été la zone active ayant donné le laser en régime continu sur GaSb avec des puits de $\text{Ga}_{0.2}\text{InSb}$ d'une épaisseur de 3,6 nm. Pour augmenter la taille du puits afin d'améliorer le recouvrement avec le mode optique et donc le gain il faut diminuer la concentration en In ce qui implique une réduction de la contrainte en compression et donc du gain.

Nous avons donc eu l'idée [Cerutti10] d'insérer à l'intérieur du puits une barrière très fine d' $\text{Al}_{0.68}\text{InSb}$ de 1,5 MCs qui a une bande d'énergie interdite de 1,6 eV et une contrainte en compression par rapport au GaSb de 2,95%. L'insertion de cette couche permet d'augmenter la flexibilité sur le design des puits quantiques. Comme le montre la figure 31 en insérant une couche ou deux, on augmente respectivement la taille du puits à 4,8 nm et 6 nm mais également la contrainte tout en gardant le même confinement des porteurs.

Afin de déterminer l'influence de cette couche d'AlInSb, il a été épitaxié 3 zones actives contenant chacune 3 puits quantiques avec les structures de bande décrites par la figure 34 et séparées par 20 nm d' $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}_{0.03}\text{Sb}_{0.97}$.

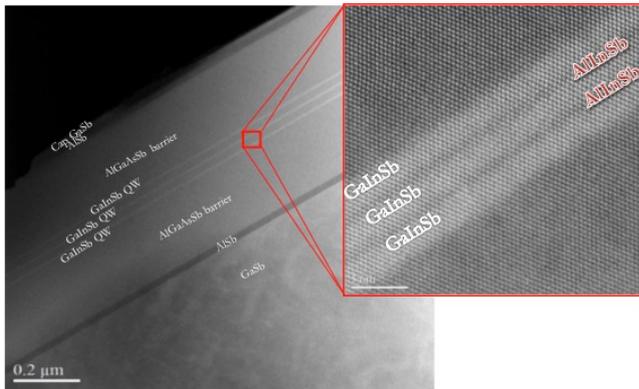


Figure 35 : Images MET de la zone active contenant 2 barrières d'AlInSb

La figure 35 montre une photo prise au MET par le groupe de G. Patriarche au LPN (CNRS) de la structure contenant 2 barrières d'AlInSb. On peut clairement identifier les couches d'AlInSb d'une épaisseur de 0,45 nm soit 1,5 MC. Pour déterminer l'influence de cette barrière sur les propriétés du puits quantiques, il a été effectué des mesures de photoluminescence en fonction de la température et de la densité de puissance comme le présente la figure 36 pour la structure avec 2 barrières. L'intensité de PL intégrée suit une loi d'Arrhenius avec une énergie d'activation de 35 meV probablement due à des niveaux d'énergie de défauts présents à l'interface entre le puits et la barrière en AlGaAsSb [Xu11]. La variation de PL intégrée en fonction de la densité de pompage et de la température suit bien une loi du type $I_{PL} \propto I_{Ex}^\alpha$. α étant proche de 1 à basse température (80 et 130K) ce qui signifie que la PL vient de recombinaisons excitoniques. À température ambiante α est autour de 1,3 ce qui signifie que les recombinaisons entre électrons et trous libres interviennent mais également des recombinaisons sur des pièges peu profonds. Il est à noter que le comportement et les valeurs obtenues pour les zones actives sans et avec une barrière d'AlInSb ne diffèrent que très peu de celle-ci.

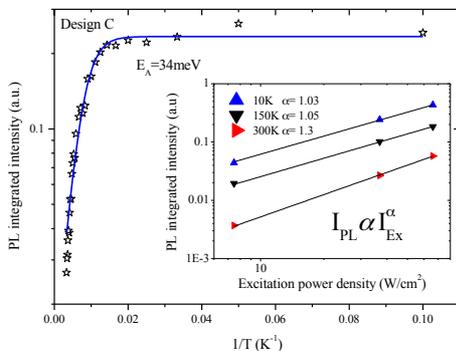


Figure 36 : PL intégrée en fonction de la température pour la zone active avec 2 barrières d'AlInSb. *Insert* : PL intégrée en fonction de la densité de puissance à différentes températures

Dans le cadre du projet OPTOSI, ces échantillons ont été étudiés en PL résolue en temps au LPCNO (INSA-Toulouse) par A. BALOCCHI. Les valeurs obtenues sont typiques de celles mesurées dans les puits quantiques des autres filières de matériaux III-V. Ainsi l'insertion de cette barrière n'influence pas les propriétés de luminescence du puits quantiques [Cerutti15]. Suite à ces résultats et pour affiner l'étude sur ces zones actives, il a été fabriqué 3 structures lasers sur substrat de GaSb contenant les 3 différents designs de puits quantiques. Les mesures électro-optiques ont été effectuées sur des composants de 10 μm de taille de ruban et de 0,5 et 1 mm de long. L'évolution de la densité de courant de seuil en régime continu en fonction de la température (figure 37.a) montre que toutes les structures ont fonctionné à température ambiante. Mais on peut également remarquer une nette amélioration des performances pour le laser contenant 2 barrières aussi bien pour la température de fonctionnement que pour la température caractéristique (T_0). La figure 37.b reporte les mesures de P-I-V de cette structure en fonction de la température en régime continu. Si on peut voir une baisse du rendement quantique externe, on n'observe pas de limitation thermique dans la limite de fonctionnement de notre banc de mesure (500 mA-40°C). Ce résultat permet de démontrer que l'insertion de fines couches d'AlInSb à l'intérieur du puits quantique de

GaInSb améliore les performances en augmentant le recouvrement du mode optique avec les puits quantiques.

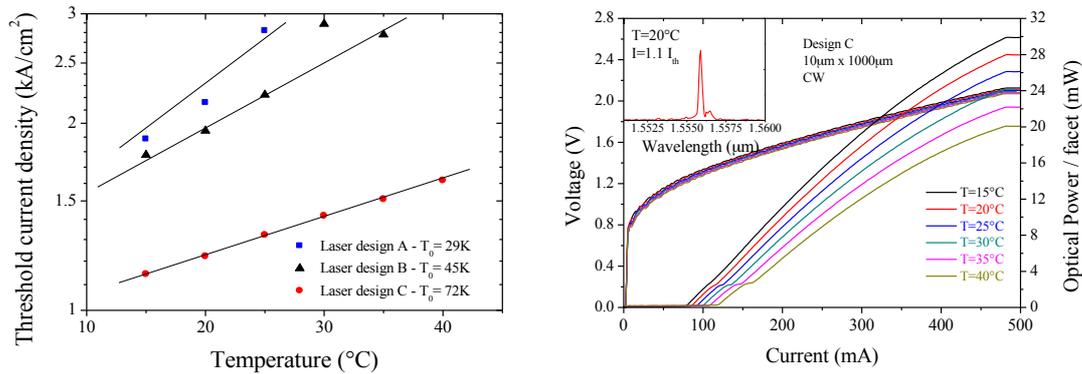


Figure 37 : a) Densité de courant de seuil en fonction de la température pour des lasers avec les 3 différents designs de zones actives. b) P-I-V en régime continu et en fonction de la température d'un laser avec zones actives contenant 2 barrières d'AlInSb. *Insert* : Spectre laser à 20°C

À partir de ces résultats récents, nous avons commencé dans le cadre de la thèse d'A. Castellano à optimiser le design de ces structures afin de rendre les performances compatibles aux applications télécom. Il est par exemple important d'étudier le nombre de puits quantiques optimal pour avoir le seuil le plus faible possible, mais également les épaisseurs du guide d'onde et des claddings pour avoir une émission monomode transverse. En parallèle à ces optimisations de design, des études sur les procédés technologiques, en particulier sur la gravure sèche par ICP-RIE sont en cours à Alcatel-Lucent afin d'obtenir une technologie robuste et reproductible. N'oublions pas que l'objectif final étant de transférer ces études réalisées sur GaSb sur Si pour obtenir un laser télécom à base d'antimoine opérant en continu au-delà de la température ambiante. Si ces performances sont atteintes alors il sera envisageable d'épitaxier ces composants sur une plateforme photonique Si.

Pour conclure cette partie, ces 3 sujets m'ont amené à participer à 4 projets, d'encadrer 4 doctorants, 3 masters, de publier 17 articles, de participer à 25 conférences et de déposer 1 brevet.

CHAPITRE 7

~

Perspectives et conclusion

~

Depuis 2010 et l'apparition d'une nouvelle thématique au sein du laboratoire concernant la conception de structures plasmoniques tout semi-conducteur, j'ai commencé à étudier la croissance des antimoniures sur surface texturée avec pour objectif la réalisation de nouveaux types de composants. Ainsi cette technique nous a permis de développer les 1^{ers} lasers à DFB enterrés sur GaSb à 2,3 μm et 3 μm [Gaimard15] et a également ouvert la possibilité de réaliser des sources à conversion de fréquence par effet paramétrique dans des matériaux structurés à base d'antimoine. Dans cette partie je présenterai uniquement les premiers résultats obtenus sur la partie plasmonique et sources à conversion de fréquences qui ouvrent vers la conception de nouvelles structures et également vers une recherche plus amont sur la cinétique de croissance des antimoniures sur surfaces structurées.

1 – Plasmonique

Depuis 2010 la plasmonique a suscité l'intérêt du groupe Nanomir car ce domaine de recherche, très actif depuis ces dernières années, permet le développement de nouvelles fonctionnalités (contrôle de la polarisation, mise en forme du faisceau optique, filtrage, ...) sur des circuits et des composants optiques. Comme son nom l'indique la plasmonique repose sur les plasmons de surface qui sont des ondes de surface confinées à l'interface entre un diélectrique et un matériau conducteur. Ces ondes résultent du couplage fort entre une onde électromagnétique et les oscillations collectives des électrons libres du conducteur. Les systèmes plasmoniques nécessitent donc des matériaux à caractère métallique avec une forte concentration en électrons. Dans la majorité des cas elle est basée sur l'utilisation de nanostructures de métaux nobles comme l'or ou l'argent. Bien que les propriétés de ces matériaux sont parfaitement adaptées à la plasmonique, ils ont un certain nombre d'inconvénients ainsi l'or n'est pas compatible avec la technologie Si ce qui est un frein à son développement industriel et l'argent se dégrade rapidement au contact de l'air. Une des solutions est de réaliser des circuits plasmoniques à base de semi-conducteurs dopés. Il est important de noter que la densité de charge dans les semi-conducteurs étant bien inférieure à celle des métaux, les résonances plasmoniques ont lieu aux grandes longueurs d'onde, typiquement au-delà de 20 μm . Dans notre filière de matériau, l'InAsSb accordé en maille sur GaSb présente plusieurs avantages. Tout d'abord il est facile à doper à des niveaux élevés (10^{19} à 10^{20} cm^{-3}) et ce matériau possède une faible masse effective ce qui conduit à des longueurs d'onde plasma entre 5 et 10 μm . De plus comme nous l'avons fait remarquer pour les jonctions tunnels, l'alignement de bande est de type III ce qui permet même si le niveau de fermi pénètre fortement dans la bande de conduction d'éviter toute fuite des électrons libres vers le GaSb.

Ainsi pour démontrer le potentiel de ce matériau, dans l'optique d'intégrer un résonateur plasmonique dans des systèmes optoélectroniques complexes, il est nécessaire de pouvoir l'encapsuler dans du semi-conducteur. Tout d'abord, il a été réalisé une couche de 100 nm d'InAsSb dopé n à $3,5 \cdot 10^{19} \text{cm}^{-3}$ sur un substrat de GaSb. Cette structure a ensuite suivi les différentes étapes technologiques pour former un réseau plasmonique d'InAsSb [N'Tsame12] de période 540 nm et de largeur de 240 nm. Pour réaliser la reprise d'épitaxie sur ce réseau, le réseau a été tout d'abord désoxydé sous flux d'hydrogène atomique et de Sb à une température de 420°C puis recouvert de 500 nm de GaSb. La figure 38.a montre une photo de cette structure après reprise d'épitaxie prise au MET par A. Trampert du PDI. On peut observer parfaitement le réseau d'InAsSb encapsulé dans le GaSb et l'absence de défaut étendu (confirmé sur d'autres images de cette structure).

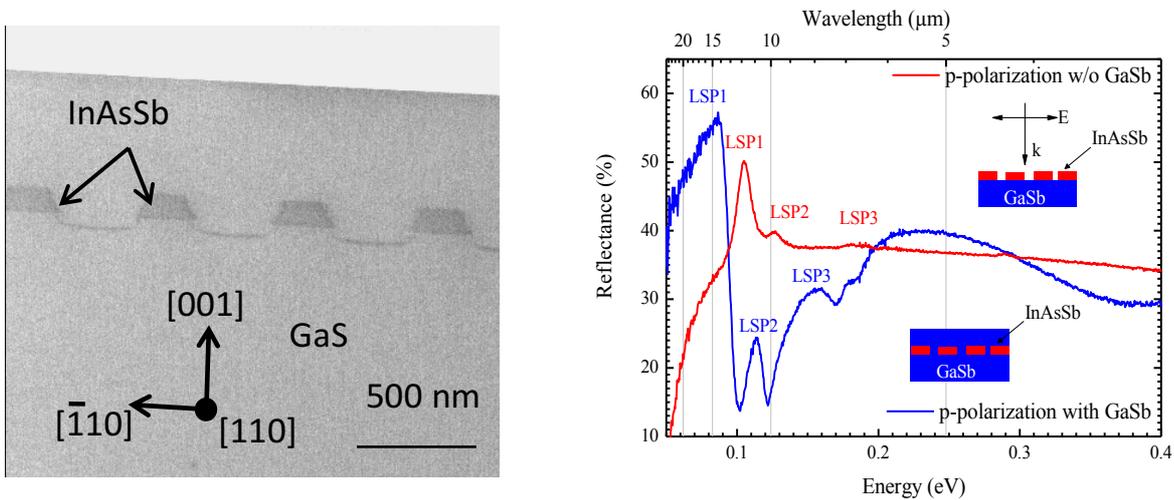


Figure 38 : a) Image TEM du réseau plasmonique d’InAsSb enterré dans une matrice de GaS. b) Mesure de la réflectivité en polarisation p du réseau plasmonique d’InAsSb avant et après reprise d’épithaxie.

La mesure de la réflectivité en polarisation p avant et après reprise d’épithaxie est présentée sur la figure 38.b. On observe une nette modification du spectre de réflectivité avec un déplacement vers les grandes longueurs d’onde des résonances de plasmons de surface. Cet effet s’explique parfaitement par le changement de matériau diélectrique entourant le réseau qui passe de l’air à du GaS. Ce résultat étant la première réalisation d’un réseau plasmonique entièrement intégrée dans une matrice semi-conducteur ce qui ouvre la voie à la conception de nouvelles fonctions pour les émetteurs et détecteurs dans le moyen infrarouge avec en perspective des études de modélisation, de croissance et de technologie pour co-intégrer composants et structures plasmoniques.

2 – Sources à quasi accord de phase pour la conversion de longueurs d’onde

La possibilité de pouvoir réaliser de l’épithaxie de matériau à base d’antimoine sur des surfaces structurées sans dégradation de la qualité cristalline a ouvert de nouvelles opportunités. Si la gamme 4-10 μm est maintenant largement couverte par les lasers à cascade quantique inter-sous-bandes et interbandes, ces sources ne sont accordables que sur quelques dizaines de nm autour de leur longueur d’onde d’émission. À ce jour, les seules sources permettant une large accordabilité sont les oscillateurs paramétriques optiques (OPO). Ces sources sont réalisées à partir de matériaux non linéaires ce qui permet la décomposition fréquentielle d’un faisceau de pompe en 2 ondes (signal et complémentaire) de fréquence inférieure à la pompe mais satisfaisant la conservation d’énergie.

Depuis quelques années, de plus en plus d’études ont été effectuées sur les semi-conducteurs zinc blende III-V car le principal avantage par rapport aux autres cristaux est de pouvoir faire varier l’indice optique en changeant l’alliage mais sans changer le paramètre de maille. Ainsi il est possible de créer des guides d’onde permettant d’augmenter le rendement de conversion en confinant le mode optique. Les semi-conducteurs zinc-blende sont non-centro symétrique ce qui signifie qu’ils ont une réponse optique non-linéaire du second ordre pour une polarisation donnée. Par contre à cause de leur nature cubique, ils ne sont pas biréfringents et donc cela exclut toute conversion directe dans le cristal. Ce problème peut être résolu en utilisant la méthode du quasi accord de phase. Pour cette technique il faut inverser le signe du coefficient de non linéarité du matériau toute les longueurs de cohérence [Hemly11].

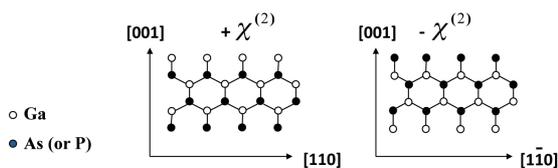


Figure 39 : La rotation du cristal zinc blende résulte dans une inversion du signe du coefficient de non linéarité du second ordre

Dans les matériaux cristallins le coefficient de non linéarité est déterminé par l'orientation cristalline. Pour les semi-conducteur zinc blende changer le signe de ce coefficient revient à tourner le réseau cristallin de 90° par exemple autour de la direction [001] ce qui équivaut, comme le montre la figure 39, à échanger les éléments III et V du sous-réseau cubique à face centrée.

D'un point de vue technologique le procédé ayant permis d'obtenir les meilleurs résultats consiste à réaliser un substrat avec un réseau à orientation cristalline périodique et à effectuer une croissance sur ce substrat. La croissance de semi-conducteur III-As réalisée par épitaxie en phase vapeur d'hydride (HVPE) ou d'organo-métallique (MOVPE) ou EJM montre qu'il y a bien une conservation de l'orientation cristalline avec la création de parois d'antiphase qui sont contrôlées. Il a pu être démontré aussi bien sur des structures massives [Grisard12] que sur des guides d'ondes [Yoo95, Koh01] la possibilité de convertir la fréquence d'un laser de pompe en 2 signaux de fréquence inférieure et complémentaire. Adapter ce concept aux matériaux III-Sb présentent plusieurs avantages. Le premier et non des moindres est que le coefficient de non linéarité est 4 fois plus important dans le GaSb que dans le GaAs. De plus les performances des lasers à base d'antimoine entre 2 et 3 μm permettent d'envisager une intégration de la pompe avec l'OPO. C'est dans cette optique que le groupe en partenariat avec TRT et le III-V Lab a obtenu en 2013 l'ANR ASTRID Great GaSb sur ce sujet ainsi que le financement de la thèse CIFRE de S. Roux avec TRT que je co-encadre. Les premières épitaxies de GaSb ont été réalisées sur des substrats à orientation cristalline périodique en GaAs car la fabrication de ces substrats sur GaAs est parfaitement maîtrisée par TRT. De plus comme je l'ai déjà mentionné, il est possible de faire croître par EJM des composants à base d'antimoine performants sur substrat de GaAs [Rodriguez09a].

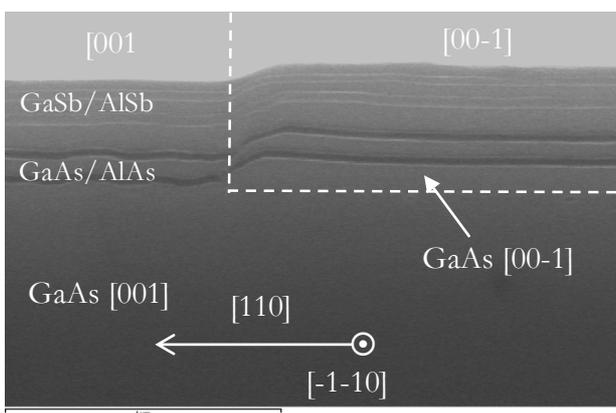


Figure 40 : Image MEB d'une structure contenant une alternance de couche GaAs/AlAs et GaSb/AlSb sur substrat à orientation cristalline périodique de GaAs épitaxiée par EJM

La figure 40 montre la photo MEB d'une structure de test composée d'empilement de GaAs/AlAs puis GaSb/AlSb afin de suivre l'évolution de la croissance sur ce substrat structuré. On peut voir que la croissance par EJM préserve la corrugation du substrat. Une analyse plus poussée au MET réalisée par G. Patriarche a permis de montrer qu'il y a bien une conservation de l'orientation cristalline même lorsqu'on passe dans les antimoniures. La prochaine étape étant de concevoir sur ce type de substrat une structure guide d'onde afin de déterminer les pertes optiques qui sont le principal verrou à l'obtention d'une oscillation paramétrique efficace. Afin de s'affranchir des pertes optiques pouvant être générées

par la présence des dislocations causées par la croissance métamorphique de GaSb sur GaAs, TRT et le III-V Lab étudient également la fabrication de substrat à orientation périodique en GaSb.

3 – Conclusion générale

Durant ces dix dernières années, je me suis principalement concentré sur la croissance des matériaux semi-conducteurs III-V avec comme unique objectif de réaliser des composants performants. Ainsi il a été important pour moi de ne pas rester confiner à l'épitanie mais également d'étudier les structures et composants réalisés afin d'avoir un retour direct sur les conditions de croissance à appliquer.

Dans les années à venir, je vais bien entendu continuer à m'investir dans la croissance par EJM des matériaux antimoniures. Par contre il est indispensable, pour moi, de regarder le composant non plus dans sa fonction unique de détecteur ou d'émetteur mais dans une vision plus globale avec l'intégration de plusieurs fonctionnalités au sein même de sa structure. L'évolution des techniques d'EJM avec une maîtrise de plus en plus précise de la cinétique de croissance permet d'envisager pour les matériaux antimoniures de nouvelles structures. Comme par exemple le contrôle des sites d'initiations de la croissance, l'épitanie directe de nanofils de GaSb ou encore utiliser la croissance sur des couches 2D tels que le graphène, tout cela reste à explorer. Elles permettront, j'en suis persuadé, d'ouvrir de nouveaux champs d'applications sans rester cloisonné aux composants pour le moyen-infrarouge mais tout en restant dans notre spécificité à savoir les matériaux à base d'antimoine.

De plus l'équipex EXTRA (pôle d'excellence sur les antimoniures) dont bénéficie le groupe Nanomir depuis 2012 a permis de s'équiper avec de nouveaux moyens technologiques (bâti EJM, gravure, dépôt,...) qui sans nul doute permettra l'apparition de nouveaux sujets de recherche et pour ma part de développer mes futures activités scientifiques et d'enseignements.

Références bibliographiques :

- [Alibert91] Alibert C., Skouri M., Joullie A., Benouna M., and Sadiq S., “Refractive indexes of AlSb and GaSb lattice matched $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ in the transparent wavelength region”, *J. Appl. Phys.*, 69(5), 3208, 1991
- [Almuneau08] Almuneau G., Bossuyt R., Colliere., Bouscayrol L., Conde M., Suarez I, Bardinal V., and Fontaine C., “Real-time In-situ monitoring of wet thermal oxidation for precise confinement in VCSELs” *Semicond. Sc. and Technol.*, 23(10), 105021, 2008
- [Almuneau99] Almuneau G., Genty F., Wilk A., Grech P., Joullie A., and Chusseau L., “GaInSb/AlGaAsSb quantum well semiconductor lasers for 1.55 μm operation”, *Semicond. Sc. and Technol.*, 14(1), 89, 1999
- [Arafin09] Arafin S., Bachmann A., Kashani-Shirazi K., Amann M.C., “Electrically pumped continuous wave vertical-cavity surface-emitting lasers at wavelength similar to 2.6 μm ”, *Appl. Phys. Lett.*, 95(13), 2009
- [Bachmann08] Bachmann A., Lim T., Kashani-Shirazi K., Dier O., Lauer C., and Amann M.C., “Continuous-wave operation of electrically pumped GaSb-based vertical cavity surface emitting laser at 2.3 μm ”, *Elect. Lett.*, 44(3), 202, 2008
- [Baranov98] Baranov A.N., Rouillard Y., Boissier G., Grech P., Gaillard S., and Alibert C “Sb-based monolithic VCSEL operating near 2.2 μm at room temperature”, *Elect. Lett.*, 34 (3), 281, 1998
- [BenBakir06] Ben Bakir B, Seassal C., Letartre X., Regreny P., Gendry M., Viktorovitch P., Zussy M., Di Cioccio L., and Fedeli J.M., “Room temperature InAs/InP quantum dots laser operation based on heterogeneous 2.5D photonic crystal”, *Opt. Expr.*, 14(20), 9269, 2006
- [Bewley98a] Bewley W.W., Felix C.L., Vurgaftmann I, Aifer E.H., Meyer J.R., Goldberg L., Lindle J.R., Chow P.H., and Selvig E., “Continuous-wave mid-infrared VCSELs” *IEEE Phot. Tech. Lett.*, 10(5), 660, 1998
- [Bewley98b] Bewley W.W., Vurgaftman I, Felix C.L., Meyer J.R., Lin C.H., Zhang D., Murry S.J., Pei S.S., and Ram-Mohan L.R., “Role of internal loss in limiting type-II mid-IR laser performance”, *J. Appl. Phys.*, 83(5), 2384, 1998
- [Cermak10] Cermak P., Triki M., Garnache A., Cerutti L., and Romanini D., “Optical-feedback Cavity Enhanced absorption spectroscopy using a short-cavity vertical-external-cavity surface-emitting laser” *IEEE Phot. Techn. Lett.*, 22(21), 1607, 2010
- [Cerutti04] Cerutti L., Garnache A., Ouvrard A., and Genty F. “High temperature continuous wave operation of Sb-based vertical external cavity surface-emitting laser near 2.3 μm ”, *J. Cryst. Growth.*, 268 (1-2), 128, 2004
- [Cerutti06] Cerutti L., Ristic J., Fernandez-Garrido S., Calleja E., Trampert A. Ploog K. H., Lazic S., and Calleja J.M., “Wurtzite GaN nanocolumns grown on Si(001) by molecular beam epitaxy” *Appl. Phys. Lett.*, 88(21), 213114, 2006
- [Cerutti07] Cerutti L., Rodriguez J.B, and Tournié E., “GaSb based laser, monolithically grown on Si substrate, emitting at 1.55 μm at room temperature” *IEEE Phot. Technol. Lett.*, 22(8), 553, 2007
- [Cerutti08] Cerutti L., Ducanhez A., Grech P., Garnache A., and Genty F., “Room- temperature, monolithic, electrically pumped type-I quantum-well Sb-based VCSELs emitting at 2.3 μm ”, *Elect. Lett.*, 44(3), 203, 2008
- [Cerutti09] Cerutti L., Ducanhez A., Narcy G., Grech P., Boissier G., Garnache A., Tournié E. and Cerutti L., “GaSb-based VCSELs emitting in the mid-infrared wavelength range (2-3 μm) grown by MBE” *J. Cryst. Growth.*, 311(7), 1912, 2009
- [Cerutti10] Cerutti L., Rodriguez J.B., and Tournié E., “Laser emission system, hetrostructure and active zone having coupled quantum sub-wells, and use for 1.55 μm ” Patent WO2011064475 A1, 2010
- [Cerutti15] Cerutti L., Castellano A., Rodriguez J.B., Bahri M., Largeau L., Balocchi A., Madiomanana K., elarge F., Patriarche G., Marie X., and Tournié E., “GaSb-based composite quantum wells for laser diodes operating in the telecom wavelength range near 1.55 μm ”, *Appl. Phys. Lett.*, 106(10), 101102, 2015
- [Chang-Hasnain09] Chang-Hasnain C., Zhou Y., Huang M.C.Y., and Chase C., “High-contrast grating VCSELs”, *IEEE J. Select. Top. Quant. Elect.*, 15(3), 869, 2009

- [Chevallier13] Chevallier C., Genty F., Fressengeas N., and Jacquet J., “Robust design by antioptimization for parameter tolerant GaAs/AlOx high contrast grating mirror for VCSEL application”, *IEEE J. Light. Technol.*, 31(21), 3374, 2013
- [Deguffroy07a] Deguffroy N., Tasco V., Baranov A.N., Tournié E., Satpati ., Trampert A., Dunaevskii M.S., Titkov A., and Ramonda M., “Molecular beam epitaxy of InSb/GaSb quantum dots”, *J. Appl. Phys.*, 101(12), 124309, 2007
- [Deguffroy07b] Deguffroy N., Tasco V. Gassenq A., Cerutti L., Trampert A., Baranov A.N., and Tournié E., “InAs/GaSb short period superlattice injection lasers operating in 2.5 μm -3.5 μm mid-infrared avelength range”, *Elect. Lett.*, 43(23), 1285, 2007
- [Dier04a] Dier O., Sterkel M., Grau M., Lin C., Lauer C., and Amann M.C., “Tunnel junctions for ohmic intra-device contacts on GaSb-substrates”, *Appl. Phys. Lett.*, 85(12), 2388, 2004
- [Dier04b] Dier O., Lin C., Grau M., and Amann M.C., “Selective and non-selectivewet-chemical etchants for GaSb-based materials”, *Semicond. Sc. and Technol.*, 19(11), 1250, 2004
- [Dier05] Dier O, Dachs S., Grau M., Lin C., Lauer C., and Amann M.C., “Effects of thermal annealing on the band gap of GaInAsSb”, *Appl. Phys. Lett.*, 86(15), 151120, 2005
- [Dier06] Dier O., Lauer C., and Amann M.C., “n-InAsSb/p-GaSb tunnel junctions with extremely low resistivity”, *Elect. Lett.*, 42(7), 419, 2006
- [Ducanhez08a] Ducanhez A., Cerutti L., Grech P., and Genty F., “Room-temperature continuous-wave operation of 2.3 μm Sb-based electrically pumped monolithic vertical cavity lasers”, *IEEE Phot. Techn. Lett.*, 20(17-20), 1745, 2008
- [Ducanhez08b] Ducanhez A., Cerutti L., Grech P., and Genty F., “GaSb-based monolithic EP-VCSEL emitting above 2.5 μm ”, *Elect. Lett.*, 44(23), 1357, 2008
- [Ducanhez09] Ducanhez A., Cerutti L. , Grech P., Genty F. and Tournié E., “Mid-Infrared GaSb based EP-VCSEL emitting at 2.63 μm ”, *Elect. Lett.*, 45(5), 265
- [Fontcuberta11] Fontcuberta i Morral A., “Gold-free GaAs nanowire synthesis and optical properties”, *IEEE J. Select. Top. Quant. Elect.*, 17(4), 819, 2011
- [Frost14] Frost T., Jahangir S., Stark E., Deshpande S., Hazari A., Zhao C., Ooi B.S., and Bhattacharya P., “Monolithic electrically injected nanowire array edge emitting laser on Si(001)”, *Nanolett.*, 14(8), 4535, 2014
- [Gaimard15] Gaimard Q., Triki M., Nguyen-Ba T., Cerutti L., Boissier G., Teissier R., Baranov A.N., Rouillard Y., and Cerutti L., “Distributed feedback GaSb based laser diodes with buried grating: a new field of single-frequency sources from 2 to 3 μm for gas sensing applications”, *Opt. Expr.*, 23(15), 19118, 2015
- [Grisard12] Grisard A., Lallier E., and Gérard B., “Quasi-phase-matched gallium arsenide for versatile mid-infrared frequency conversion”, *Opt. Mat. Expr.*, 2(8), 1020, 2012
- [Guo10] Guo W., Zhang M., Banerjee A., and Bhattacharya P., “Catalyst free InGaN/GaN nanowire light emitting diodes grown on (001) silicon by molecular beam epitaxy”, *Nanolett.*, 10(9), 3355, 2010
- [Hanfoug01] Hanfoug R., Salesse A., Yarekha D.A., Baranov A.N., and Alibert C., “Use of AlOx in cladding layers of an antimonide laser structure emitting at 2.3 μm ”, *Semicond. Sc. and Technol.*, 16(11), 936, 2001
- [Hemly11] Hemly A.S., Abolghasem P., Aitchison J.S., Bijlani B.J., Han J., Holmes B.M., Hutchings D.C., Younis U., and Wagner S.J., “Recent advances in phase matching second-order nonlinearities in monolithic semiconductor waveguides”, *Laser Phot. Rev.*, 5(2), 272, 2011
- [Huang08] Huang S.H., Balakrishnan G., Khoshakhlagh A., Dawson L.R., and Huffaker D.L. “Simultaneous interfacial misfit array formation and antiphase domain suppression on miscut silicon substrate” *Appl. Phys. Lett.*, 93(7), 071102, 2008
- [Huffaker07] Huffaker D.L., Balakrishnan G., Jallipali A., Kutty M.N., Huang S.H., and dawson L.R., “Monolithically integrated III-Sb diode lasers on Si using interfacial misfit arrays”, *Conference on active and passive optical components IV, Boston (USA), Art. 67750L*, 2007

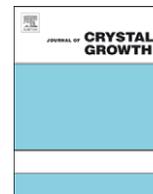
- [Knödl02] Knödl T., Michalzik R., Golling M. and Ebeling K. J., “Current-spreading-induced bistability in bipolar cascade vertical-cavity surface-emitting lasers”, *Appl. Phys. Lett.*, 81(4), 583, 2002
- [Knödl03] Knödl T., Golling M., Straub A., Jager R., Michalzik R., and Ebeling K.J., “Multistage bipolar cascade vertical-cavity surface-emitting laser”, *IEEE J. Select. Top. Quant. Elect.*, 9(5), 1406, 2003
- [Koda05] Koda R., Wang C.S., Lofgreen D.D., and Coldren L.A., “High-differential-quantum-efficiency, long wavelength vertical-cavity lasers using five stage bipolar cascade active regions”, *Appl. Phys. Lett.*, 86(21), 211104, 2005
- [Koh01] Koh S., Kondo T., Shiraki Y., and Ito R., “GaAs/Ge/GaAs sublattice reversal epitaxy and its application to nonlinear optical devices”, *J. Cryst. Growth*, 227-228, 183, 2001
- [Laaroussi11] Laaroussi Y., Almuneau G., Sanchez D., and Cerutti L., “Efficient lateral confinement by an oxide aperture in a mid-infrared GaSb based vertical light-emitting source” *J. Phys. D - Appl. Phys.*, 44(14), 142001, 2011
- [Laaroussi12] Laaroussi Y., Sanchez D., Cerutti L., Levallois C., Paranthoen C., Rumeau A., Tourte C., and Almuneau G., “Oxide-confined mid-infrared VCSELs”, *Elect. Lett.*, 48(25), 2012
- [Laaroussi13] Laaroussi Y., Chevallier C., Genty F., Fressengeas N., Cerutti L., Taliercio T., Gauthier-Lafaye O., Calmon P.F., Reig. B., Jacquet J., and Almuneau G., “Oxide confinement and high contrast grating mirrors for Mid-infrared VCSELs” *Opt. Mat. Exp.*, 3(10), 2013
- [Laurain12] Laurain A., Cerutti L., Myara M., and Garnache A., “2.7 μm single frequency TEM₀₀ low-threshold Sb-based diode-pumped external-cavity VCSEL”, *IEEE Phot. Tech. Lett.*, 24(4), 2012
- [Levallois05] Levallois C., Le Corre A., Loualiche S., Dehaese O., Folliot H., Paranthoen C., Thoumyre F., and Labbe ., “Si wafer bonded a-Si/SiN_x distributed Bragg reflectors for 1.55 μm wavelength vertical cavity surface emitting lasers” *J. Appl. Phys.*, 98(4), 043107, 2005
- [Liang10] Liang Di, and Bowers E., “Recent progress in lasers on Silicon”, *Nat. Phot.*, 4, 511, 2010
- [Luxtera] Luxtera.com
- [Manz09] Manz C., Yang Q., Rattunde M., Schulz N., Rösener B., Lutz K., Wagner J., and Kölher K., “Quaternary GaInAsSb/AlGaAsSb vertical-external-cavity surface-emitting lasers – a challenge for MBE growth”, *J. Cryst. Growth*, 311, 1920, 2009
- [Meneou04] Meneou K., Lin H.C., Cheng K.Y., Kim J.G., and Martinelli R.U., “Wet thermal oxidation of AlAsSb alloys lattice matched to GaSb”, *J. Appl. Phys.*, 95(9), 5131, 2004
- [Metha07] Metha M., Balakrishnan G., Kutty M.N., Patel P., Dawson L.R., and Huffaker D.L., “1.55 μm GaSb/AlGaSb MQW diode lasers grown on GaAs substrates using interfacial misfit (IMF) arrays”, *CLEO conference, Baltimore (USA)*, 1187, 2007
- [N’Tsame12] N’Tsame Guilengui V., Cerutti L., Rodriguez J.B., Tournié E., and Taliercio T., “Localized surface plasmon resonances in highly doped semiconductors nanostructures”, *Appl. Phys. Lett.*, 101(16), 161113, 2012
- [Nitta10] Nitta N., Hasegawa T., Yasuda H., Hayashi Y., Yoshiee T., Taniwaki M., and Mori H., “Void formation and structure change induced by heavy ion irradiation in GaSb and InSb” *Mat. Trans.*, 51 (6), 1059, 2010
- [Ortsiefer00] Ortsiefer M., Shau R., Bohm G., Kohler F, and Amann M.C., “Room- temperature operation of index-guided 1.55 μm InP-based vertical-cavity surface-emitting laser”, *Elect. Lett.*, 36(5), 437, 2000
- [Ouvrard05] Ouvrard A, Garnache A, Cerutti L, Genty F, and Romanini D, “Single-frequency tunable Sb-based VCSEL emitting at 2.3 μm ” *IEEE Phot. Techn. Lett.*, 17(10), 2020, 2005
- [Paajaste09] Paajaste J., Suomailanen S., Koskinen R., Harkönen A., Guina M., and Pessa M., “High-power and broadly tunable GaSb-based optically pumped VCSELs near 2 μm ”, *J. Cryst. Growth*, 311, 1917, 2009
- [Perona07] Perona A., Garnache A., Cerutti L., Ducanchez A., Mihindou S., Grech P., Boissier G., and F. Genty, “AlAsSb/GaSb doped distributed Bragg reflectors for electrically pumped VCSELs emitting around 2.3 μm ”, *Semicond. Sc. and Techn.*, 22(10), 1140, 2007
- [Reboul11] Reboul J.R, Cerutti L., Rodriguez J.B., Grech P., and Tournié E., “Continuous-wave operation above room temperature of GaSb-based laser diodes grown on Si”, *Appl. Phys. Lett.*, 99(12), 121113, 2011

- [Reddy04] Reddy M.H.M., Feezell A.D., Buell D.A., Huntington A.S., Koda R., and Coldren L.A., "Selectively etched tunnel junction for lateral current and optical confinement in InP-based vertical cavity lasers", *J. Elect. Mat.*, 33(2), 118, 2004
- [Rocher98] Rocher A., and Snoeck E., "Studies of metamorphic III-V heterostructures by digital processing of HREM images", *Thin Sol. Film*, 319, 172, 1998
- [Rodriguez09a] Rodriguez J.B., Cerutti L. and Tournié E., "GaSb-based, 2.2 μm type I laser fabricated on GaAs substrate operating continuous wave at room temperature", *Appl. Phys. Lett.*, 94(2), 023506, 2009
- [Rodriguez09b] Rodriguez J.B., Cerutti L., Grech P., and Tournié E., "Room temperature operation of a 2.25 μm electrically pumped laser fabricated on a silicon substrate", *Appl. Phys. Lett.*, 94(6), 061124, 2009
- [Rösener11] Rösener B., Rattunde M., Moser R., Kaspar S., Töpfer T., Manz C., Kölher K., and Wagner J., "continuous-wave room-temperature operation of a 2.8 μm GaSb-based semiconductor disk laser", *Opt. Lett.*, 36(3), 319, 2001
- [Sahli04] Sahli A., Rouillard Y., Angellier J., and Garcia M., "Very low threshold 2.4 μm GaInAsSb-AlGaAsSb laser diodes operating at room temperature in the continuous wave regime", *IEEE Phot. Technol. Lett.*, 16(11), 2424 2004
- [Sanchez-Garcia98] Sanchez-Garcia M.A., Calleja E., Monroy E., Sanchez F.J., Calle F., Munoz E., and Beresford R., "The effect of III/V ratio and substrate temperature on the morphology and the properties of GaN and AlN layers grown by molecular beam epitaxy on Si(111)" *J. Cryst. Growth*, 183(1-2), 23, 1998
- [Sanchez12a] Sanchez D., Cerutti L., and Tournié E., "Selective lateral etching of InAs/GaSb tunnel junctions for mid-infrared photonics", *Semicond. Sc. and Technol.*, 27(08), 085011, 2012
- [Sanchez12b] Sanchez D., Cerutti L., and Tournié E., "Single-mode monolithic GaSb Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser", *Opt. Exp.*, 20(14), 15540, 2012
- [Sanchez13a] Sanchez D., Cerutti L., and Tournié E., "Mid-IR GaSb-based bipolar cascade VCSELs" *IEEE Phot. Technol. Lett.*, 25(9), 2013
- [Sanchez13b] D. Sanchez, L. Cerutti, and E. Tournié "VCSELs with cascaded active region for improved output power" *International Symposium on Compound Semiconductors 2013 (ISCS)*, Kobe, Japan, 19-23 may 2013.
- [Sprengel15] Sprengel S., Andrejew A., Federer F., Veerabathran G.K., Boehm G., and Amann M.C., "Continuous-wave vertical surface emitting lasers 2.5 μm with InP based type-II quantum wells", *Appl. Phys. Lett.*, 106(15), 151102, 2015
- [Vurgaftman15] Vurgaftman I., Weih R., Kamp M., Meyer J., Canedy C.L., Kim C.S., Kim M., Bewley W.W., Merrit C.D., Abell J., and Hofling S., "Interband cascade laser", *J. Phys – D Appl. Phys.*, 48(12), 123001, 2015
- [Xu11] Xu Z.Y., Lu Z.D., Yuan Z.L., Yang X.P., Zheng B.Z., Xu J.Z., Ge W.K., Wang Y., Wang J., Chang L.L., "Thermal activation and thermal transfer of localized excitons in InAs self-organized quantum dots", *Superlatt. And Microstruct*, 23(2), 381, 2011
- [Yoo95] Yoo S.J.B., Bhat R. , Caneau C., and Koza M.A., "Quasi-phase-matched second-harmonic generation in AlGaAs waveguides with periodic domain inversion achieved by wafer bonding", *Appl. Phys. Lett.*, 66(25), 3410, 1995
- [Yoshizawa97] Yoshizawa M., Kikuchi A., Mori M., Fujita N., and Kishino K., "Growth of self organized GaN nanostructures on Al₂O₃(0001) by RF-radical source molecular beam epitaxy", *Jap. J. Appl. Phys.*, 36(4b), L459, 1997

~

Tirés à part de publications

~



GaSb-based VCSELs emitting in the mid-infrared wavelength range (2–3 μm) grown by MBE

L. Cerutti*, A. Ducanhez, G. Narcy, P. Grech, G. Boissier, A. Garnache, E. Tournié, F. Genty

Université Montpellier 2, Institut d'Electronique du Sud (IES), UMR CNRS 5214, Case 067, 34095 Montpellier, Cedex 05, France

ARTICLE INFO

Available online 17 November 2008

PACS:

42.55.Px
78.55.Cr
81.05.Ea
81.07.Ta
85.35.Be

Keywords:

A3. Molecular beam epitaxy
A3. Quantum wells
B1. Antimonides
B3. Laser diodes

ABSTRACT

We report the growth conditions and operations of electrically pumped monolithic Sb-based type-I quantum-well vertical cavity surface emitting lasers (VCSELs) emitting above 2.2 μm . The structures were grown on (001)-GaSb substrates by molecular beam epitaxy (MBE) and are made of two N-type GaSb/AlAsSb Bragg reflectors, a GaInAsSb/AlGaAsSb multi-quantum-well active region and an InAsSb/GaSb tunnel junction. Growth conditions have been optimized for each target wavelength. Laser emission in CW up to 293 K at 2.3 μm and in pulsed regime at 2.52 μm at room temperature (RT) is demonstrated. These are the longest wavelength achieved with electrically pumped VCSELs to date.

© 2008 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

The mid-infrared (MIR) wavelength range between 2 and 3 μm contains absorption lines of most gas species of interest for atmospheric measurements. Not only environmental monitoring, but also applications in medicine, process control or leak detection need adequate gas analysis. Tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) is a sensitive, selective and fast-response technique for gas analysis. Laser diode sources must operate in single transverse and longitudinal mode with sufficiently broad wavelength tunability without mode hopping. Sb-based diode laser have already shown good performance for absorption spectroscopy in this transparency window [1]. Till date, most TDLAS experiments have been performed with edge-emitting devices, but these devices can exhibit mode hops that may change with time and degrade the spectroscopic performances. In contrast, vertical cavity surface emitting lasers (VCSELs) exhibit characteristics such as a single mode operation and a wide mode-hop-free tuning range which are particularly well adapted for trace gas detection by absorption spectroscopy [2,3].

Several kinds of VCSELs for different applications have been demonstrated in the 2–3 μm wavelength range. Indeed, the first structure operating in CW at room temperature (RT) emitting at

2.3 μm was based on diode-pumped VCSELs grown on GaSb substrate. VCSELs demonstrated single-mode operation with a large continuous tuning and have an ability to be used as gas spectroscopy [4,5]. Furthermore Sb-based VCSELs working at high power ($>1\text{W}$) were achieved with the addition of a high-thermal conductivity heat spreader at the surface of the structure [6,7]. Nevertheless VCSELs present a longitudinal multimode behaviour at high power. Even though they present good optical properties, such devices are not compact enough for integration in microsystems for spectroscopy. It is thus important to develop electrically pumped (EP) microcavity VCSELs emitting in this wavelength range. Mid-infrared EP-VCSELs are far less developed. Up to date, the best results for EP-VCSEL emitting above 2 μm were obtained with InP-based structures. Nevertheless, 2.3 μm seems to represent the unsurpassable wavelength limit of such a material system [8]. Concerning GaSb-based EP-VCSELs, PIN monolithic Sb-based VCSELs have been demonstrated at RT emitting at 2.2 μm but only in pulsed regime and with a very high threshold [13]. The first RT operations of devices operating near 2.3 μm were demonstrated simultaneously very recently, in CW regime for an all-epitaxial microcavity structure [9,10] and for a hybrid dielectric/semiconductor structure with a highly complex buried tunnel junction (BTJ) devices processing [11].

In this letter, we report on the design, the growth conditions and the performance of Sb-based monolithic VCSELs emitting at RT at 2.3 μm in CW and at 2.5 μm in pulsed regime.

*Corresponding author.

E-mail address: cerutti@univ-montp2.fr (L. Cerutti).

2. Design of the monolithic Sb-based VCSEL

The typical monolithic VCSEL structure is composed of multi quantum wells (MQW) active region embedded between 2 semiconductor Bragg mirrors. Moreover both top and bottom Bragg mirrors are N-type doped to avoid the use of a P-type Bragg mirror that presents poor electrical and optical properties [12]. In the monolithic structures presented here, the electron/hole conversion occurs in an InAsSb (n^{++})/GaSb (p^{++}) tunnel junction (TJ) located at a node of the field intensity to reduce absorption. Indeed, such heterostructure presents a type-III junction [14] with a very low specific resistance ($\sim 5 \times 10^{-5} \Omega \text{cm}^2$).

The bottom and top Bragg mirrors composed of 20 and 18 pairs, respectively, of quarterwave GaSb and AlAsSb layers lattice matched to GaSb. Both mirrors are Te-doped with a concentration of $1.2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ in order to optimize their electrical conduction properties [12]. The GaSb–AlAsSb system exhibits a high refractive index and a constant contrast between 2 and $3 \mu\text{m}$ ($\Delta n \sim 0.6$). This allows reaching a high reflectivity with less than 30 pairs, a better configuration compared to InP-based mirrors. The active region is composed of several compressively strained type-I GaInAsSb QWs in AlGaAsSb barriers located at the antinodes of the electric field to optimize the maximum gain in the structure. Indeed, RT CW edge-emitting laser diodes based on such type-I QWs system have already been achieved in the $1.55\text{--}3.04 \mu\text{m}$ wavelength range [15,16]. Such performances are related to the high confinement of both holes and electrons ($> 4k_B T$) which prevents thermal escape of carriers and ensures high temperature operation.

Circular electrically injected VCSEL devices were fabricated from the epitaxial wafer using a simple device fabrication process [14]. First, Au/Ge/Ni ring N-contacts with internal diameter ranging from 20 to $160 \mu\text{m}$ were released by photolithography and sputtering. Then, circular mesa diodes were fabricated by wet chemical etching to obtain gain guided devices. No particular treatments for current confinement such as wet oxidation or implantation were performed. The wet etching stops at TJ. Finally, an Au/Ge/Ni back contact was deposited on the N-type GaSb-substrate. A scanning electronic micrography of a processed VCSEL is shown in Fig. 1.

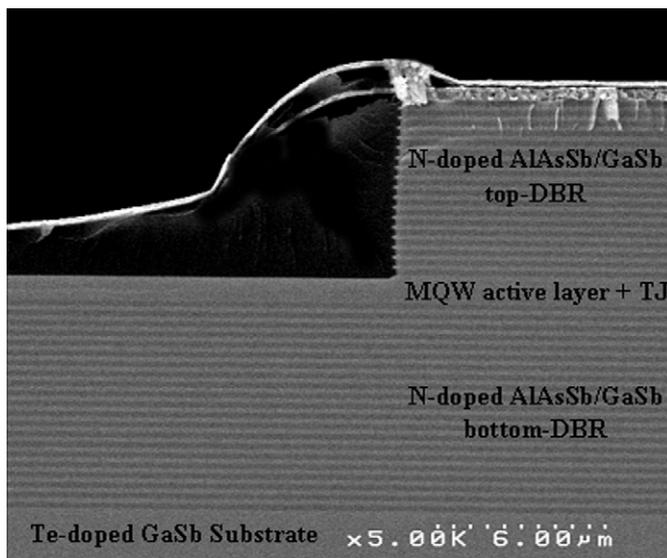


Fig. 1. Scanning electron micrography of MBE-grown all-epitaxial monolithic GaSb-based EP-VCSEL microcavity after processing.

3. Growth condition of active region for emission in 2–3 μm wavelength range

The Sb-based structures were grown by solid-source MBE in a RIBER Compact 21E system equipped with valved As- and Sb- cracker cells providing As_2 and Sb_2 , respectively. N-type, Te-doped (001)-GaSb substrates were used. The growth temperatures were measured with an optical pyrometer, calibrated using (1×3) to (2×5) surface reconstruction transition for GaSb. After outgassing at 150°C in the load-lock chamber, the substrate surface oxide was thermally desorbed at high temperature (555°C) under high Sb_2 flux. During this oxide desorption, the substrate surface was monitored by *in-situ* reflection high-energy electron diffraction (RHEED) to avoid any problem.

With laser and more particularly VCSELs, the quality of QWs is very important to reach laser emission at low threshold. The most important growth parameter for GaInAsSb QWs is the growth temperature [17,18]. Active regions emitting either at 2.3 or $2.8 \mu\text{m}$ were grown at different temperatures and characterized by photoluminescence (PL) spectroscopy. PL was excited at RT with a pulsed (20 kHz/50%) 780 nm GaAs laser diode using $30 \text{W}/\text{cm}^2$ power density. It was detected with a cooled InSb detector.

For emission at $2.3 \mu\text{m}$, the gain region composed of five compressively strained, 10-nm-thick, $\text{Ga}_{0.65}\text{In}_{0.35}\text{As}_{0.10}\text{Sb}_{0.9}$ QWs, separated by 20-nm-thick $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}_{0.04}\text{Sb}_{0.96}$ barriers. For emission at $2.8 \mu\text{m}$, 12 nm-thick $\text{Ga}_{0.57}\text{In}_{0.43}\text{As}_{0.16}\text{Sb}_{0.84}$ QWs are used. Both QW compositions induce a 1.5% compressive strain. Each active zone was grown at 1 ML/s at five different growth temperatures, keeping the V/III ratio constant around 2.

Both PL peak intensity and line-width measured for the different samples are shown in Fig. 2. This figure evidences clearly that 470 and 450°C are the growth temperatures that show the best PL performances for emissions at 2.3 and $2.8 \mu\text{m}$, respectively. Such difference between the best growth temperatures can be attributed to the fact that the $\text{Ga}_{0.57}\text{In}_{0.43}\text{As}_{0.16}\text{Sb}_{0.84}$ alloy, emitting at $2.8 \mu\text{m}$, is close to the alloy miscibility gap. A lower growth temperature prevents phase separation which would occur at higher temperatures.

From these PL results, we conclude that temperatures between 470 and 450°C are optimized for GaInAsSb/AlGaAsSb QWs emitting between 2.3 and $2.8 \mu\text{m}$.

4. Characterizations and performances of monolithic Sb-based VCSELs emitting above $2 \mu\text{m}$

4.1. VCSEL emitting at $2.3 \mu\text{m}$

At first, VCSEL centred at $2.3 \mu\text{m}$ was grown in one MBE run following the design previously described. The total thickness of this structure is $12.5 \mu\text{m}$ (i.e. 14 h growth times at 1 ML/s). Crystal and optical properties of this monolithic VCSEL structure were first studied at RT. Reflectivity measurements are shown in Fig. 3a. The reflectivity spectrum exhibits both stop-band and microcavity mode centred at $2.3 \mu\text{m}$ indicating optimized DBRs and cavity optical length.

The crystal quality of the VCSEL was checked by HRXRD. The experimental and simulated HRXRD (004) patterns are reproduced in Fig. 3b. On this figure, the satellite peaks of the experimental curve are narrow and intense, demonstrating sharp interfaces between the QWs and the barrier layers. Pendellösung fringes are well resolved indicating a high crystalline quality. The simulated pattern of this VCSEL was calculated with a quantum well composition of 35% of In and 10% of As and a

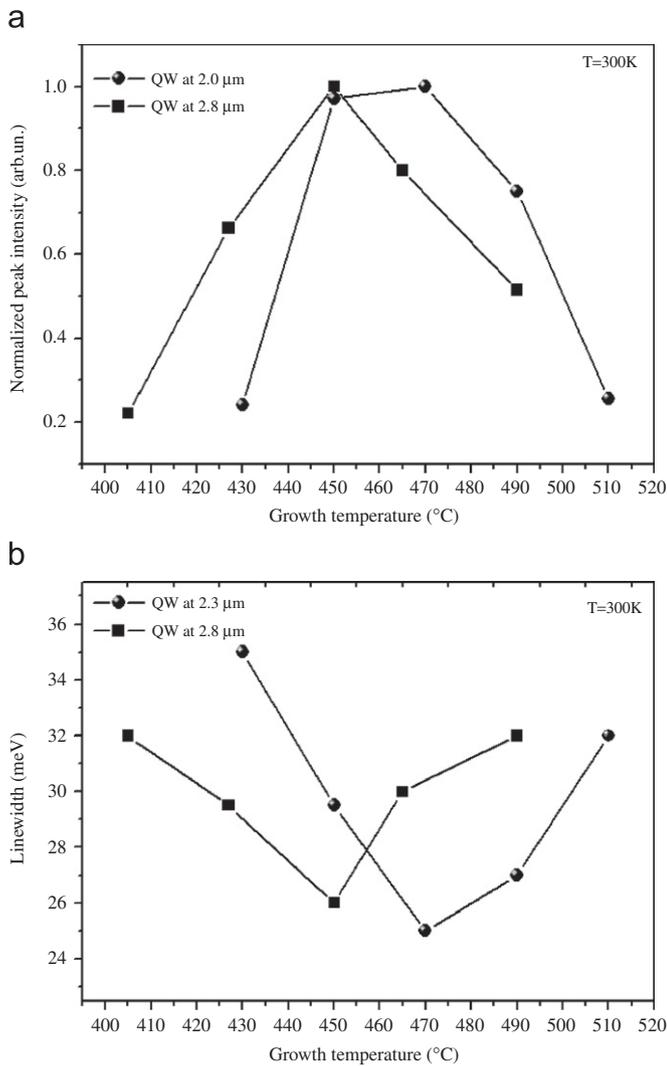


Fig. 2. PL properties at RT of active layers for emission at 2.3 and 2.8 μm grown at different temperatures: (a) normalized PL peak intensity and (b) PL linewidth.

well+barrier thickness of 30 nm. These values correspond to those aimed for a laser emission near 2.3 μm . An excellent agreement between simulated and experimental curves is obtained. Moreover, only one peak appears around the substrate peak which demonstrates that the AlAsSb DBR layers are lattice matched and that there is no As/Sb ratio variation during its long growth-period

Processed devices with a total diameter of 60 μm (i.e. 20 μm ring contact width+40 μm inner diameter) were characterized. These VCSELs were operated under pulsed regime (3 $\mu\text{s}/30\%$) above RT [9]. Typical light-current and voltage-current characteristics in CW-operation at various temperatures ranging from 284 to 294 K are reported in Fig. 4. RT CW laser operation was obtained up to 294 K with a threshold density as low as 1.1 kA/cm^2 . I - V characteristics exhibit an average threshold voltage of about 1.5 V, a relatively low value while considering the structure to be a 12.5- μm -thick all-epitaxial microcavity containing two Bragg mirrors. In L - I characteristics, several kinks, related to the multimode transverse laser operation, clearly appear when the injected current increases. The maximum CW temperature is 294 K, limited by mismatch between the maximum gain and microcavity mode at high temperature [10]. Fig. 3a presents the laser spectrum in CW regime at 284 K under a driving current of

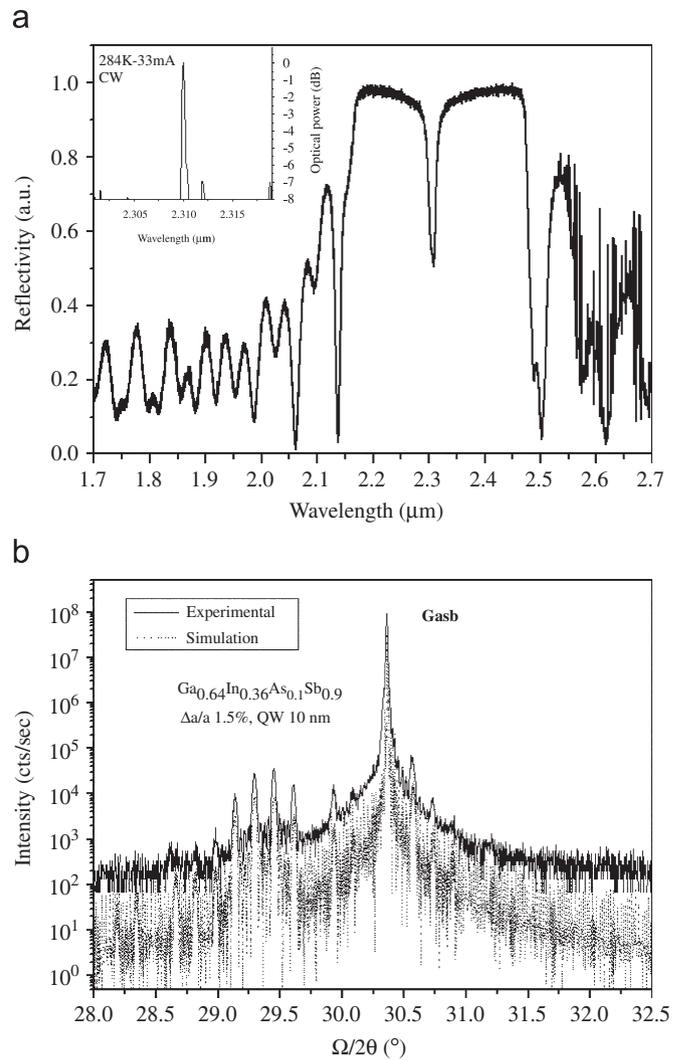


Fig. 3. Optical and structural characteristics of a 2.3 μm emitting VCSEL structure: (a) reflectivity of the VCSEL structure. Inset: emission spectrum of CW operating 60 μm -total diameter EP-VCSEL with 33 mA drive current and (b) $\theta/2\theta$ X-ray diffraction scans for the VCSEL (upper curve) and associated simulation pattern (lower curve).

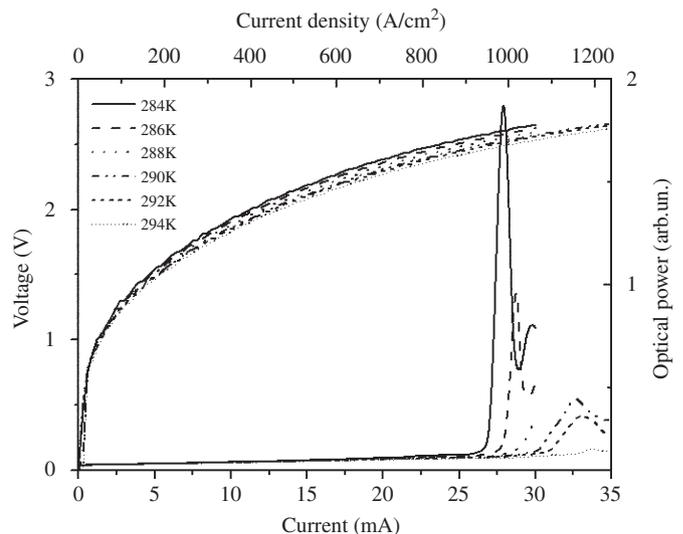


Fig. 4. L - I - V characteristics of CW operating 60 μm -total diameter VCSEL emitting at 2.3 μm for different temperatures.

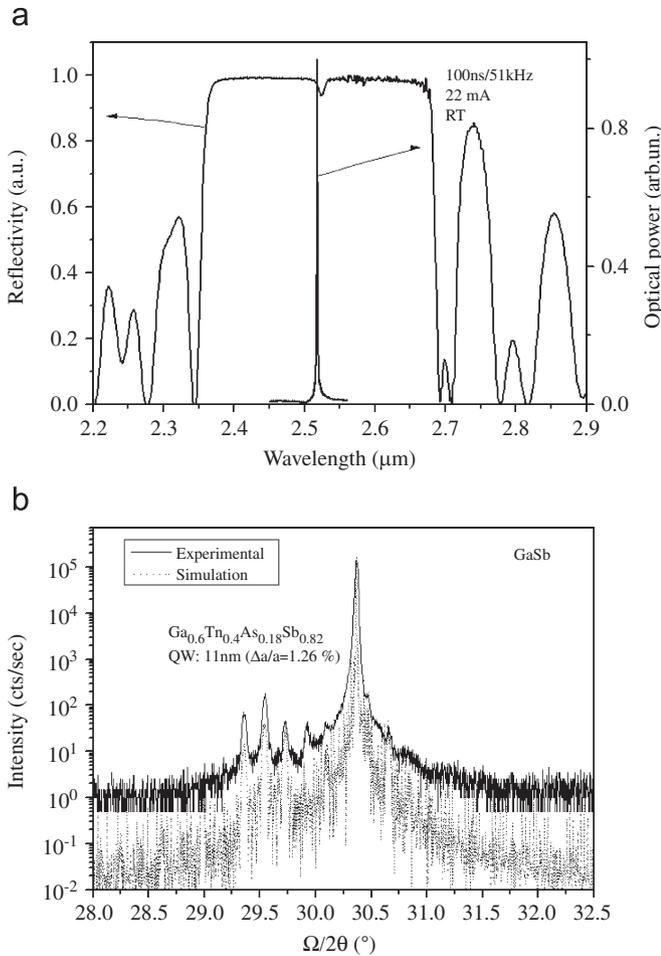


Fig. 5. Optical and structural characteristics of a 2.5 μm emitting VCSEL structure: (a) reflectivity of the VCSEL structure and emission spectrum under pulsed operation of 30 μm -total diameter EP-VCSEL at RT with 22 mA drive current and (b) $\theta/2\theta$ X-ray diffraction scans for the VCSEL (upper curve) and associated simulation pattern (lower curve).

33 mA. The side mode suppression ratio (SMSR) of 6 dB is limited to poor optical confinement in our devices.

4.2. VCSEL emitting at 2.5 μm

On the way to longer wavelength, we have then grown a VCSEL structure for emission at 2.5 μm . The structure, based on the same design than the 2.3 μm VCSEL, is now 15 μm thick (i.e. 18 h growth times at 1 ML/s). The active region is composed of 11-nm-thick $\text{Ga}_{0.6}\text{In}_{0.4}\text{As}_{0.22}\text{Sb}_{0.78}$ QWs which correspond to an emission at 2.55 μm . Crystal and optical characterizations are presented on Fig. 3. The reflectivity spectrum presents a stop-band and a microcavity mode well centred at 2.52 μm .

The HRXRD pattern shows that the experimental curve almost perfectly matches the simulated nominal one (Fig. 3b). It gives evidence that (i) the compressively strained QWs are grown in perfect registry and (ii) the AlAsSb QW layers are lattice matched to the GaSb substrate.

Devices were processed from this structure with 30 μm total diameter (i.e. 10 μm ring contact width+20 μm inner diameter). Laser emission at RT in pulsed regime (100 ns/0.5%) was demonstrated with a threshold density of 6 kA/cm^2 (Fig. 6). The Fig. 5a presents a laser spectrum at 2.52 μm under pulse operation at RT under a driving current of 22 mA. This is the longest wavelength EP-VCSEL reported so far (Fig. 6).

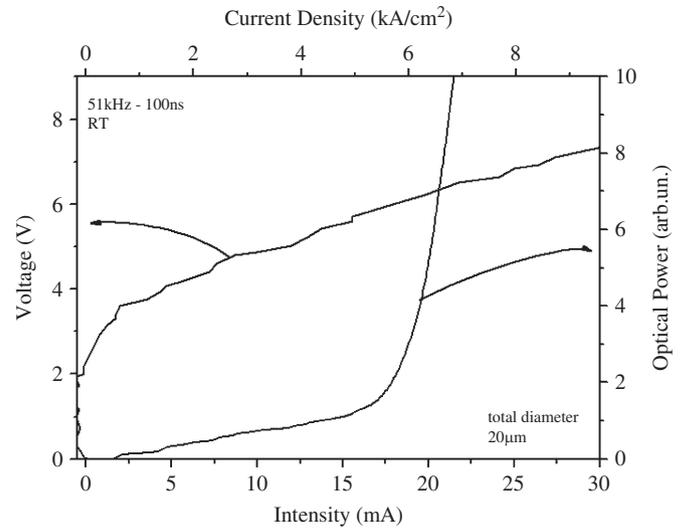


Fig. 6. L - I - V characteristics under pulsed operation (100 ns/51 kHz) of 30 μm -total diameter VCSEL emitting at 2.52 μm at RT.

5. Conclusion

In this paper, we have reported the MBE growth and performances of monolithic GaSb-based EP-VCSEL operating above 2.2 μm at RT. For the first time, CW RT operation is obtained at 2.3 μm with a threshold density as low as 0.9 kA/cm^2 , and under pulsed operation at 2.52 μm with a threshold density of 6 kA/cm^2 . To increase the operating temperature the next issue is to improve the matching of the gain maximum with the microcavity mode and to develop a technology process that enables achieving optical and electrical confinement.

Acknowledgments

This work was supported in part by the European Project NEMIS no. FP6-31845, and in part by the Région Languedoc-Roussillon.

References

- [1] A. Vicet, D.A. Yarekha, A. Perona, Y. Rouillard, S. Gaillard, A.N. Baranov, *Spectrochim. Acta Part A* 58 (2002) 2405.
- [2] D.C. Hovde, C.A. Parsons, *Appl. Opt.* 36 (1997) 1135.
- [3] G. Totschnig, M. Lackner, R. Shau, M. Ortsiefer, J. Roskopf, M.-C. Amann, *F. Winter, Meas. Sci. Technol.* 14 (2003) 472.
- [4] A. Ouvrard, A. Garnache, L. Cerutti, F. Genty, D. Romanini, *IEEE Photon. Technol. Lett.* 17 (2005) 2020.
- [5] A. Garnache, A. Ouvrard, L. Cerutti, D. Barat, A. Vicet, F. Genty, Y. Rouillard, D. Romanini, E.A. Cerda-Méndez, *Proc. SPIE Photon. Europe* (2006) 6184.
- [6] N. Schulz, M. Rattunde, C. Manz, K. Köhler, C. Wild, J. Wagner, S.-S. Beyertt U. Brauch, T. Kübler, A. Giesen, *IEEE Photon. Technol. Lett.* (2006) 1070.
- [7] A. Härkönen, M. Guina, O. Okhotnikov, K. Rössner, M. Hümmer, T. Lenhardt, M. Müller, A. Forchel, M. Fisher, *Opt. Exp.* 14 (2006) 6479.
- [8] M. Ortsiefer, G. Böhm, M. Grau, K. Windhorn, E. Rönneberg, J. Roskopf, R. Shau, O. Dier, M.-C. Amann, *Electron. Lett.* 42 (2006) 640.
- [9] L. Cerutti, A. Ducanhez, P. Grech, A. Garnache, F. Genty, *Electron. Lett.* 44 (2008) 203.
- [10] A. Ducanhez, L. Cerutti, P. Grech, F. Genty, *IEEE Photon. Technol.* 20 (2008) 1745.
- [11] A. Bachmann, T. Lim, K. Kashani-Shirazi, O. Dier, C. Lauer, M.-C. Amann, *Electron. Lett.* 44 (2008) 202.
- [12] A. Perona, A. Garnache, L. Cerutti, A. Ducanhez, S. Mihindou, P. Grech G. Boissier, F. Genty, *Semicond. Sci. Technol.* 22 (2007) 1140.

- [13] A.N. Baranov, Y. Rouillard, G. Boissier, P. Grech, S. Gaillard, C. Alibert, *Electron. Lett.* 34 (1998) 281.
- [14] A. Ducanhez, L. Cerutti, A. Gassenq, P. Grech, F. Genty, *IEEE J. Select. Top. Quantum Electron.* 14 (2008) 1014.
- [15] G. Almuneau, F. Genty, A. Wilk, P. Grech, A. Joullie, L. Chusseau, *Semicond. Sci. Technol.* 14 (1999) 89.
- [16] L. Shterengas, G. Belenky, G. Kipshidze, T. Hosoda, *Appl. Phys. Lett.* 92 (2008) 171111.
- [17] S. Simanowski, C. Mermelstein, M. Walther, N. herres, R. Kiefer, M. rattunde, J. Schmitz, J. wagner, G. Weimann, *J. Crystal Growth* 227–228 (2001) 595.
- [18] L. Cerutti, A. Garnache, A. Ouvrard, F. Genty, *J. Crystal Growth* 268 (2004) 128.

Single-Mode Monolithic GaSb Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser

Dorian Sanchez,* Laurent Cerutti, and Eric Tournié

Institut d'Electronique du Sud, Université Montpellier 2, CNRS, UMR 5214, Place Eugène Bataillon, CC067,
F-34095 Cedex 5, Montpellier France
*sanchez@ies.univ-montp2.fr

Abstract: We report on the fabrication and performances of an electrically-pumped GaSb *monolithic* VCSEL, *i.e.*, a VCSEL with two epitaxial Bragg mirrors. Selective lateral etching of a tunnel junction is used to provide current and optical confinement. Laser devices with a 6 μm tunnel-junction effective diameter operate at 2.3 μm in CW up to 70 $^{\circ}\text{C}$, with a threshold current as low as 1.9 mA at 30 $^{\circ}\text{C}$. The laser emission is single mode with a SMSR near 25 dB and mode-hop-free electro-thermal tunability around 14 nm. This is the first demonstration of a single-mode electrically-pumped monolithic GaSb-based VCSEL.

©2012 Optical Society of America

OCIS codes: (250.7260) Vertical cavity surface emitting lasers; (250.5960) Semiconductor lasers.

References and links

1. A. Vicet, D. A. Yarekha, A. Pérona, Y. Rouillard, S. Gaillard, and A. N. Baranov, "Trace gas detection with antimonide-based quantum-well diode lasers," *Spectrochim. Acta A Mol. Biomol. Spectrosc.* **58**(11), 2405–2412 (2002).
2. A. Salhi, D. Barat, D. Romanini, Y. Rouillard, A. Ouvrard, R. Werner, J. Seufert, J. Koeth, A. Vicet, and A. Garnache, "Single-frequency Sb-based distributed-feedback lasers emitting at 2.3 microm above room temperature for application in tunable diode laser absorption spectroscopy," *Appl. Opt.* **45**(20), 4957–4965 (2006).
3. J. A. Gupta, P. J. Barrios, J. Lapointe, G. C. Aers, C. Storey, and P. Waldron, "Modal gain of 2.4 μm InGaAsSb-AlGaAsSb complex-coupled distributed-feedback lasers," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **21**(20), 1532–1534 (2009).
4. S. Forouhar, R. M. Briggs, C. Frez, K. J. Franz, and A. Ksendzov, "High-power laterally coupled distributed-feedback GaSb-based diode lasers at 2 μm wavelength," *Appl. Phys. Lett.* **100**(3), 031107 (2012).
5. L. Cerutti, A. Garnache, A. Ouvrard, M. Garcia, E. Cerda, and F. Genty, "2.36 μm diode pumped VCSEL operating at room temperature in continuous wave with TEM₀₀ output beam," *Electron. Lett.* **40**, 869–871 (2004).
6. A. Ouvrard, A. Garnache, L. Cerutti, F. Genty, and D. Romanini, "Single-frequency tunable Sb-based VCSELs emitting at 2.3 μm ," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **17**(10), 2020–2022 (2005).
7. N. Schulz, A. Rattunde, C. Manz, K. Kohler, C. Wild, J. Wagner, S. S. Beyertt, U. Brauch, T. Kubler, and A. Giesen, "Optically pumped GaSb-based VCSEL emitting 0.6 W at 2.3 μm ," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **18**(9), 1070–1072 (2006).
8. H. Li and K. Iga, in *Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser Devices*, H. Li, and K. Iga, eds. (Springer-Verlag, 2003).
9. K. Meneou, H. C. Lin, K. Y. Cheng, J. G. Kim, and R. U. Martinelli, "Wet thermal oxidation of AlAsSb alloys lattice matched to GaSb," *J. Appl. Phys.* **95**(9), 5131–5136 (2004).
10. A. Perona, A. Garnache, L. Cerutti, A. Ducanchez, S. Mihindou, P. Grech, G. Boissier, and F. Genty, "AlAsSb/GaSb doped distributed Bragg reflectors for electrically pumped VCSELs emitting around 2.3 μm ," *Semicond. Sci. Technol.* **22**(10), 1140–1144 (2007).
11. A. N. Baranov, Y. Rouillard, G. Boissier, P. Grech, S. Gaillard, and C. Alibert, "Sb-based monolithic VCSEL operating near 2.2 μm at room temperature," *Electron. Lett.* **34**(3), 281–282 (1998).
12. O. Dier, M. Sterkel, M. Grau, C. Lin, C. Lauer, and M.-C. Amann, "Tunnel junctions for ohmic intra-device contacts on GaSb-substrates," *Appl. Phys. Lett.* **85**(12), 2388–2389 (2004).
13. O. Dier, C. Lauer, and M.-C. Amann, "n-InAsSb/p-GaSb tunnel junctions with extremely low resistivity," *Electron. Lett.* **42**(7), 419–420 (2006).

14. A. Ducanhez, L. Cerutti, A. Gassenq, P. Grech, and F. Genty, "Fabrication and Characterization of GaSb-Based Monolithic Resonant-Cavity Light-Emitting Diodes Emitting Around 2.3 μm and Including a Tunnel Junction," *IEEE Select. Top.in Quant. Electron.* **14**, 1014–1021 (2008).
15. K. Vizbaras, M. Törpe, S. Arafin, and M.-C. Amann, "Ultra-low resistive GaSb/InAs tunnel junctions," *Semicond. Sci. Technol.* **26**(7), 075021 (2011).
16. A. Bachmann, K. Kashani-Shirazi, S. Arafin, and M.-C. Amann, "GaSb-Based VCSEL with buried tunnel junction for emission around 2.3 μm ," *IEEE Select. Top.in Quant. Electron.* **15**, 933–940 (2009).
17. A. Bachmann, S. Arafin, and K. Kashani-Shirazi, "Single-mode electrically pumped GaSb-based VCSELs emitting continuous-wave at 2.4 and 2.6 μm ," *New J. Phys.* **11**(12), 125014 (2009).
18. S. Arafin, A. Bachmann, K. Kashani-Shirazi, and M.-C. Amann, "Electrically pumped continuous-wave vertical-cavity surface-emitting lasers at $\sim 2.6 \mu\text{m}$," *Appl. Phys. Lett.* **95**(13), 131120 (2009).
19. O. Dier, S. Dachs, M. Grau, C. Lin, C. Lauer, and M.-C. Amann, "Effects of thermal annealing on the band gap of GaInAsSb," *Appl. Phys. Lett.* **86**(15), 151120 (2005).
20. A. Ducanhez, L. Cerutti, P. Grech, and F. Genty, "Room-Temperature Continuous-Wave Operation of 2.3 μm Sb-Based Electrically Pumped Monolithic Vertical-Cavity Lasers," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **20**(20), 1745–1747 (2008).
21. A. Ducanhez, L. Cerutti, P. Grech, F. Genty, and E. Tournié, "Mid-infrared GaSb-based EP-VCSEL emitting at 2.63 μm ," *Electron. Lett.* **45**(5), 265–266 (2009).
22. D. Sanchez, L. Cerutti, and E. Tournié, "New confinement method for monolithic GaSb-VCSEL emitting in the mid-IR," presented at the SPIE Photonics Europe conference, Brussels, Belgium, 15–19 Apr. 2012.
23. D. Feezell, D. Buell, and L. Coldren, "InP-based 1.3-1.6- μm VCSELs with selectively etched tunnel-junction apertures on a wavelength flexible platform," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **17**(10), 2017–2019 (2005).
24. D. Feezell, D. Buell, D. Lofgreen, M. Mehta, and L. Coldren, "Optical design of InAlGaAs low-loss tunnel-junction apertures for long-wavelength vertical-cavity lasers," *IEEE J. Quantum Electron.* **42**(5), 494–499 (2006).
25. J. Sigmund, M. Saglam, A. Vogt, H. L. Hartnagel, V. Buschmann, T. Wieder, and H. Fuess, "Microstructure analysis of ohmic contacts on MBE grown n-GaSb and investigation of sub-micron contacts," *J. Cryst. Growth* **228**, 625–629 (2001).
26. Y. Lao, C. Cao, H. Wu, M. Cao, and Q. Gong, "InAsP/InGaAsP quantum-well 1.3 μm vertical-cavity surface-emitting lasers," *Electron. Lett.* **45**(2), 105–106 (2009).
27. J. Piprek, Y. A. Akulova, D. I. Babic, L. A. Coldren, and J. E. Bowers, "Minimum temperature sensitivity of 1.55 μm vertical-cavity lasers at -30 nm gain offset," *Appl. Phys. Lett.* **72**(15), 1814–1816 (1998).
28. A. B. Ikyo, I. P. Marko, A. R. Adams, S. J. Sweeney, A. Bachmann, K. Kashani-Shirazi, and M.-C. Amann, "Gain peak-cavity mode alignment optimisation in buried tunnel junction mid-infrared GaSb vertical cavity surface emitting lasers using hydrostatic pressure," *IET Optoelectron.* **3**(6), 305–309 (2009).
29. S. Arafin, A. Bachmann, and M.-C. Amann, "Transverse-mode characteristics of GaSb-based VCSELs with buried-tunnel junctions," *IEEE Select. Top. Quantum Electron.* **17**, 1576–1583 (2011).

1. Introduction

The mid-infrared (MIR) wavelength (2 – 5 μm) range is rich of interest due to numerous absorption lines of pollutants such as, *e.g.*, CO_2 , CH_4 , NH_3 , which is very useful for trace gas sensing with Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS) [1]. Wavelengths around 2.3 μm are particularly attractive thanks to strong absorption of alkanes, including methane, and weak absorption of water vapor in this spectral range. GaSb-based materials allow covering this wavelength range by exploiting the efficient GaInAsSb/AlGaAsSb type-I quantum well (QW) system.

The TDLAS technique requires single-mode laser emission and large electro-thermal tunability without mode hops. Distributed feed-back (DFB) diode lasers are the most widespread technology to get such performances but they rely on complex technology [2–4]. Vertical-Cavity Surface Emitting Lasers (VCSELs) fulfill all the requirements and, moreover, exhibit low laser thresholds. MIR GaSb-VCSELs operating in continuous wave (CW) at room temperature (RT) were first optically pumped devices [5–7]. Indeed, unlike GaAs or InP based materials, the realization of electro-optical confinement with oxidation of an Al-rich layer or ion implantation [8] is not possible with GaSb-based materials [9].

Moreover, p-type AlAsSb/GaSb Distributed Bragg Reflectors (DBRs) exhibit poor conductivity and high free-carrier absorption losses [10] which limits electrically-pumped *p-n* junction VCSELs to pulsed operation at RT [11]. Insertion of a low-resistivity type-III InAs/GaSb tunnel junction (TJ) has been proposed to overcome this issue [12–15]. In the last few years, hybrid semiconductor/dielectric structures using buried tunnel junction (BTJ)

processing allowed demonstrating single mode operation in CW up to 75°C around 2.3 μm [16, 17] and up to 50°C around 2.6 μm [18]. Output powers around 300 μW and wavelength tunability around 10 nm have been achieved at 2.3 μm at RT [16–18]. However, processing of these devices is complex and relies on epitaxial re-growth where high temperature is required for oxide desorption. This raises the TJ resistivity [12] and blue-shifts the active-zone emission [19].

A monolithic approach has also been developed using two n-type DBRs and a TJ which allowed fabricating VCSELs operating at RT up to 2.3 μm in CW mode [20] and up to 2.63 μm in pulsed mode [21]. However, this technology was based on large-area etched mesas and lacked efficient electro-optical confinement, leading to multimode emission and high threshold currents. Recently, we have shown the possibility of selective lateral etching of the InAs/GaSb TJ while keeping a low TJ resistivity around $2 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^{-2}$ [22]. Such a technique has previously been proved efficient to realize single-mode InP VCSELs [23, 24] operating in CW up to 70°C in the 1.3–1.6 μm wavelength range.

In this letter, we report the technology and characterizations of a single-mode monolithic GaSb-VCSEL emitting CW at 2.3 μm with a current aperture formed by selective lateral wet-etching of the TJ.

2. VCSEL structure and fabrication

The device structure is illustrated in Fig. 1. The epitaxial stack is grown in a single run by solid source molecular beam epitaxy on an (001) n-doped GaSb substrate. The $3\lambda/4$ cavity contains five 10-nm wide $\text{Ga}_{0.68}\text{In}_{0.32}\text{As}_{0.08}\text{Sb}_{0.92}$ QWs embedded in 15-nm-thick $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}_{0.03}\text{Sb}_{0.97}$ barrier layers. The QWs are 1.5% compressively strained and have been designed for an emission wavelength of 2.3 μm. The TJ is positioned at the second standing wave null-position above the QWs in order to reduce free-carrier absorption losses. The TJ is realized with a 10^{19}cm^{-3} n⁺⁺-InAs/ 10^{19}cm^{-3} p⁺⁺-GaSb heterostructure. Both InAs and GaSb layers are 20nm thick. Amphoteric Si is used as dopant in the TJ for both p-type GaSb and n-type InAs layers.

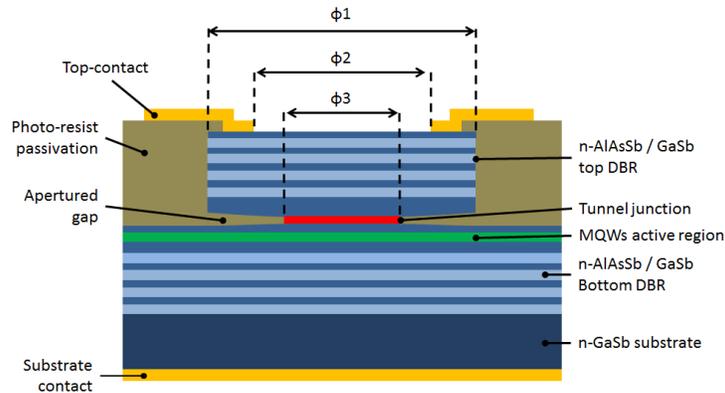


Fig. 1. Schematic diagram of the processed structure, with Φ_1 the external diameter of the etched mesa, Φ_2 the internal diameter of the output VCSEL and Φ_3 the effective diameter of the TJ.

This ensures high doping levels in both layers and prevents dopant interdiffusion at the interface [13, 15]. The active region is embedded between two Te-doped lattice-matched AlAsSb/GaSb DBRs made of 23 and 21 quarter-wavelength pairs for the bottom and the top mirror, respectively. Both AlAsSb and GaSb layer in the DBRs are Te-doped with a concentration of 10^{18}cm^{-3} in order to improve their electrical conduction [10].

Device fabrication involved wet etching of the top DBR with a $\text{CrO}_3:\text{HF}:\text{H}_2\text{O}$ solution. The InAs layer of the TJ plays the role of an etch-stop layer. Then, InAs is selectively etched with a solution of citric acid and hydrogen peroxide to form the thin air-gap aperture. The process set-up for the lateral etching of the TJ is described in ref [22]. Figure 2 presents a cross-section scanning electron microscope (SEM) picture of a selectively etched TJ in a monolithic VCSEL structure. Deep lateral etching can be achieved.

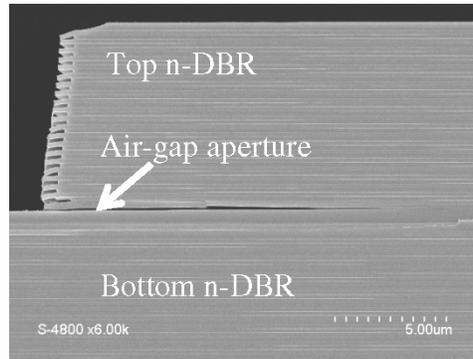


Fig. 2. Cross-section SEM picture of selectively etched InAs/GaSb tunnel-junction in a monolithic GaSb-VCSEL.

Devices with $35\ \mu\text{m}$ pillar diameter (Φ_1) and a top aperture of $25\ \mu\text{m}$ (Φ_2) have been fabricated. Using the method described above to form the aperture, we realized VCSELs with a $6\ \mu\text{m}$ TJ effective diameter (Φ_3). After the lateral etching step of the TJ the devices were passivated with the AZ4533 photoresist and annealed in an oven to form a solid passivation layer. Before metallization, the samples were etched with HCl (1:2) in order to remove native oxide. The top ring contact is made with sputtered Pd/Au/Ge/Ni. The substrate was thinned down to $300\ \mu\text{m}$ and Au/Ge/Ni back contact was deposited on the GaSb substrate. The whole sample was then annealed around 200°C to form top and bottom ohmic contacts [25].

3. Results and discussions

Typical light-current (L-I) and voltage-current (V-I) characteristics obtained in CW at various temperatures are reported in Fig. 3. CW operation is obtained up to a heat-sink temperature as high as 70°C .

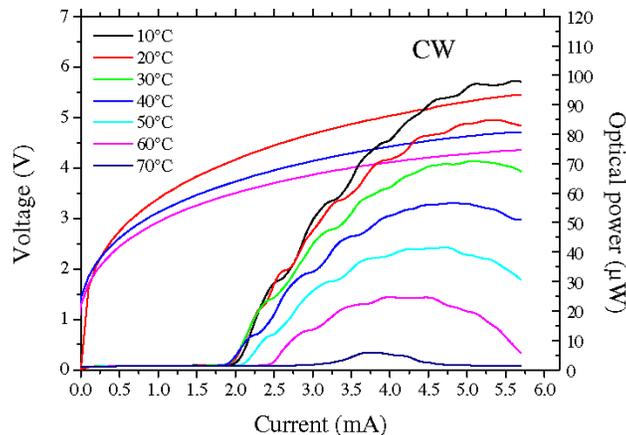


Fig. 3. L-I and V-I characteristics (same color code) taken at various temperatures in CW for a monolithic GaSb-VCSEL with a $6\ \mu\text{m}$ TJ effective diameter.

The maximum output power is around 100 μW . This rather low value can partly be explained by the very high reflectivity of the top DBR. Indeed, the calculated reflectivity is around 99.8%, taking into account 7 cm^{-1} optical absorption losses in n-type DBR [11]. The I-V characteristic at 20°C exhibits a turn-on voltage of 3V. This value which is twice the value previously obtained with large-area monolithic VCSELs can be attributed to the narrow aperture of the TJ combined with the total thickness of the structure ($\sim 16\text{ }\mu\text{m}$). Such an increase of the turn-on voltage has already been observed with InP-based apertured TJ VCSEL [27]. It also limits the output power as we discuss later in the paper.

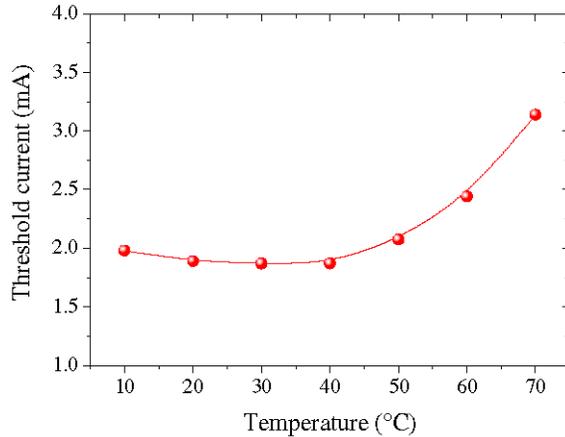


Fig. 4. Threshold current *versus* temperature of a monolithic GaSb-VCSEL with a $6\text{ }\mu\text{m}$ TJ effective diameter.

Figure 4 presents the variation of the threshold current with the temperature. The gain shifts faster with the temperature than the microcavity resonance which results in this parabolic variation of the threshold current with the temperature. Notice that the threshold current is almost constant in the $10 - 40^\circ\text{C}$ temperature range. Still, a minimum value of 1.9 mA is observed between 30°C and 40°C which is thus the range of temperature at which the modal gain is maximum [27, 28].

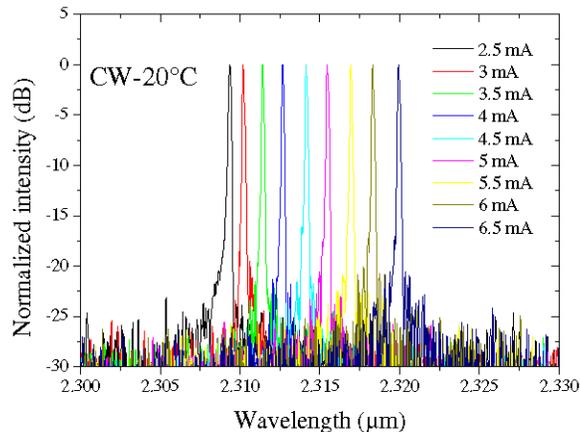


Fig. 5. Laser emission spectra taken at 20°C under different CW drive currents for a monolithic GaSb-VCSEL with a $6\text{ }\mu\text{m}$ TJ effective diameter.

Figure 5 presents CW laser emission spectra (measured with a FTIR) taken at 20°C under various drive currents. The laser exhibits single-mode emission with a Side Mode

Suppression Ratio (SMSR) around 25 dB in the whole range of drive current. Single-mode emission is also achieved in the whole temperature range up to 70 °C (Fig. 5). Single-mode emission arises from narrow TJ effective diameters [29]. VCSELs with TJ effective-diameter larger than 8 μm exhibit multimode emission, as also reported in Ref [29].

Figure 6 reports the wavelength tunability of the VCSEL as a function of the drive current and heat-sink temperature. The wavelength shifts at a rate of 2.7 nm/mA at constant heat-sink temperature (Fig. 6(a)) and at a rate of 0.21 nm/K at constant drive current (Fig. 6(b)). These electro-thermal effects allow shifting the laser emission continuously in a wavelength range as large as 14 nm without mode hop. This wavelength agility demonstrates that such devices are well suited to scan several gas absorption lines as required for TDLAS applications.

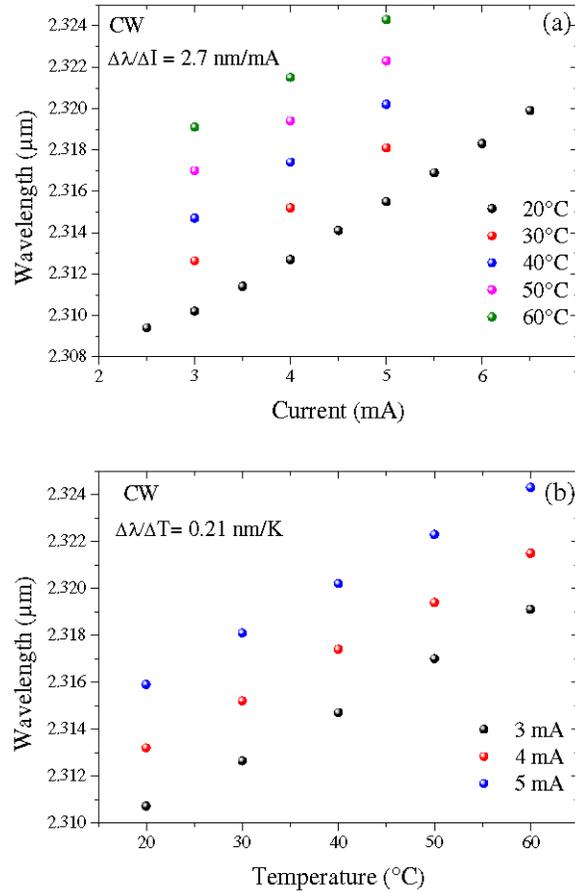


Fig. 6. Wavelength tunability of the VCSEL with 6 μm TJ effective diameter: (a) evolution of the emitted wavelength with drive current at different temperatures (20, 30, 40, 50 and 60 °C); (b) evolution of the emission wavelength with heat-sink temperature at different drive currents (3, 4 and 5 mA).

To estimate the thermal resistance of the device, we calculated a power tenability of 0.47 nm/mW, taking into account the applied voltage. The thermal resistance for a constant temperature and an electrical power is given by the following relation [8]:

$$R_{th} = \frac{\Delta\lambda / \Delta P}{\Delta\lambda / \Delta T}$$

We deduced a thermal resistance of 2240 K/W, which is comparable to the value obtained for the same diameter with buried-TJ VCSELs emitting in the same wavelength range [17]. This explains also that we observe similar wavelength tunability.

Based on this calculated value, we estimate the temperature rise in the active region of the device to be around 20 K at threshold and 65 K at the thermal rollover which appears only 4 mA above threshold (Fig. 3). The rapid occurrence of the thermal rollover arises from the high voltage (~4 V) at laser threshold and high series resistance of DBRs. This limits the maximum operating temperature and, together with the high top-DBR reflectivity, the output power which is a factor of ~4 lower than that of BTJ VCSELs at 2.3 μm and 20 $^{\circ}\text{C}$ [16–18]. To increase the output power it will be necessary to reduce both the turn-on voltage and serial resistance of the devices. Several ways can be explored, such as improving the InAs/GaSb TJ resistivity [15] or developing intra-cavity contacts in order to avoid driving the current through the DBRs.

3. Conclusion

In this paper, we have reported the fabrication and the characterization of a monolithic GaSb VCSEL emitting at 2.3 μm with selective lateral etching of the TJ. This process allows simultaneous electrical and optical confinement. A small TJ effective diameter of 6 μm allowing low current threshold has led to CW operation up to 70 $^{\circ}\text{C}$. Identified limitations of this device are high turn-on voltage and serial resistance which reduce the operating current range and the output optical power. Improvement of the TJ and development of intracavity contact should allow reaching higher output powers. Single mode operation in the whole range of current and temperature is demonstrated for the first time with electrically-pumped monolithic GaSb VCSELs. This work shows that this technology is viable for developing mid-IR photonic devices and systems.

Wurtzite GaN nanocolumns grown on Si(001) by molecular beam epitaxy

L. Cerutti,^{a)} J. Ristić, S. Fernández-Garrido, and E. Calleja
ISOM and Departamento de Ingeniería Electrónica, ETSI Telecomunicación, Universidad Politécnica, Ciudad Universitaria s/n, 28040 Madrid, Spain

A. Trampert and K. H. Ploog
Paul-Drude-Institut für Festkörperelektronik, Hausvogteiplatz 5-7, 10117 Berlin, Germany

S. Lazic and J. M. Calleja
Departamento de Física de Materiales, Universidad Autónoma de Madrid, Cantoblanco, 28049 Madrid, Spain

(Received 31 January 2006; accepted 30 March 2006; published online 24 May 2006)

Wurtzite single crystal GaN nanocolumns were grown by plasma-assisted molecular beam epitaxy on bare Si(001) substrates. Nanocolumns with diameters in the range of 20–40 nm have no traces of extended defects and they grow aligned along the [0001] direction. Photoluminescence measurements in nanocolumns evidence a very high crystal quality in terms of intense and narrow excitonic emissions. Raman scattering data show that the nanocolumns are strain-free. These results open the way to an efficient integration of optoelectronic devices with the complementary metal oxide semiconductor technology. © 2006 American Institute of Physics. [DOI: 10.1063/1.2204836]

III-nitrides have a wide potential for a new generation of devices with exceptional performances in electronics applications (high electron mobility transistors, field emission, surface acoustic wave) and optoelectronics (detectors, lasers, light emitting diodes)^{1,2} leading the technological edge in many fields, such as lightning, communications, and data storage. One of the most challenging issues is the achievement of a reliable integration of optoelectronic devices with complementary metal oxide semiconductor (CMOS) technology in real integrated circuits. Though sophisticated approaches on heteroepitaxial growth (buffer layer engineering) yielded promising results, no commercial solutions were provided because of complexity, unreliability, high cost, and thermal incompatibility. III-nitrides have been grown on Si(111) at temperatures compatible with Si technology, either by molecular beam epitaxy (MBE) or metal organic vapor phase epitaxy, but still, lattice and thermal mismatches generate a very high density of extended defects in compact (Al)GaN layers. A few attempts to grow GaN compact epilayers on Si(001) aimed either to obtain pure cubic phase GaN (Ref. 3) or wurtzite GaN avoiding cubic inclusions by means of complex buffer structures.⁴ None of them were able to achieve high quality, defect-free, single crystal structure layers, neither cubic nor wurtzite.

In the last couple of years a huge effort has been devoted to achieve and to control the growth of III-nitride columnar-shaped nanostructures (nanorods, nanocolumns, nanopillars). Results have shown, so far, an extremely high crystal quality of the (Al)GaN nanocolumns, that are strain-free and have no dislocations or other extended defects, thus, yielding an outstanding emission efficiency. After the growth of self-assembled (Al)GaN and InN nanocolumns on Si(111) by plasma-assisted MBE (PAMBE),^{5,6} the achievement of nanocolumnar heterostructures including quantum disks (QDisks) (Ref. 7) and nanocavities with QDisks and Bragg mirrors⁸ has been reported. It must be pointed out that nanocolumnar

heterostructures can be grown on bare Si(111), without any buffer layer.

It has been shown that III-nitride nanocolumns grown on Si(111) accommodate the lattice mismatch at the heterointerface through a dense network of dislocations that end at the nanocolumn free surface. Once relaxation takes place, the nanocolumn grows keeping its own lattice parameter, a fact that is helped by the nanocolumns high free-surface-to-volume ratio.⁹ As a consequence, the nanocolumns should grow without strain and dislocation-free, as it was experimentally observed. In addition, (Al)GaN nanocolumns were grown on a wide variety of substrates [SiC, sapphire, Si(111)].^{10,11} Based on these findings, GaN nanocolumns are expected to grow strain-free, defect-free on Si(001) with a single hexagonal crystal structure.

This letter presents the growth of extremely high quality GaN wurtzite nanocolumns on bare Si(001) substrates.

The samples were grown by PAMBE and characterized by scanning electron microscopy (SEM), high resolution transmission electronic microscopy (HRTEM), Raman Spectroscopy (RS), and low temperature photoluminescence (PL).

GaN nanocolumns, 0.6 μm high, were grown on on *axis* ($\pm 0.5-1^\circ$) Si(111) and Si(001) substrates at the optimal temperature used for Si(111) as a starting point in order to compare results from both substrates. Though the optimal temperature to grow on Si(100) may be different, the most important aspect to achieve nanocolumnar growth is the use of strong nitrogen-rich conditions⁵ (III/V ratio $\ll 1$). The growth rate was estimated to be around 0.2 $\mu\text{m}/\text{h}$ (SEM data in Fig. 1).

The GaN nanocolumn morphology was assessed by SEM. On both, Si(001) (Fig. 1) and Si(111) (not shown) substrates, the nanocolumns are aligned perpendicular to the substrate with a rather uniform distribution of diameters (20–40 nm) and heights.

HRTEM data, obtained with a Jeol JEM 3010 microscope operating at 300 kV, prove that GaN nanocolumns grown on Si(001) are structurally uniform and single crystal-

^{a)}Electronic mail: cerutti@die.upm.es

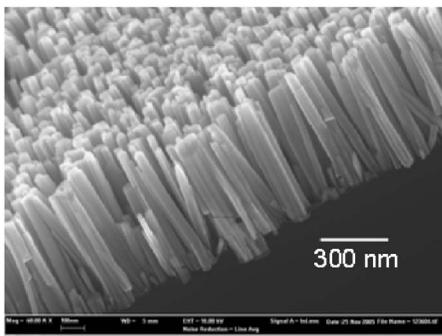


FIG. 1. SEM micrograph of GaN nanocolumns grown by PAMBE on Si(001) substrate.

line, with the growth direction along the hexagonal [0001] axis [Fig 2(a)]. As it was the case of (Ga,Al)N nanocolumns grown on Si(111),⁹ no dislocations or other extended defects were detected [the very few stacking faults found are probably related to the occasional coalescence of columns, as shown in Fig 2(b)]. The selected area electron diffraction (SAED) pattern, shown in Fig. 2(c), reflects a texturelike behavior of the nanocolumns, i.e., the GaN(0002) planes are parallel to the Si(002), while the in-plane alignment is not well defined, although few columns show an epitaxial orientation with their [11-20] [1-100] directions parallel to the Si<110> axis. The HRTEM micrograph shown in Fig. 2(b) gives an example of a perfect epitaxially aligned hexagonal nanocolumn with GaN(0002)∥Si(002) and GaN[11-20]∥Si<110>. The interface structure reflects an amorphous layer, most probably SiN, likely formed during the growth due to nitrogen diffusion beneath the nanocolumns through the dislocations network. The study of the degree of columnar twist with respect to the Si substrate surface is still in progress.

Low temperature PL on GaN nanocolumns grown on Si(001) and Si(111) was excited with the 325 nm line of a He-Cd laser, dispersed by a Jobin-Yvon THR 1000 monochromator and detected with a UV-enhanced GaAs photomultiplier and a lock-in amplifier.

PL spectra from GaN nanocolumns grown on Si(001) reveal the same emission lines as those measured on nanocolumns grown on Si(111) (Fig. 3 and Refs. 10 and 12).

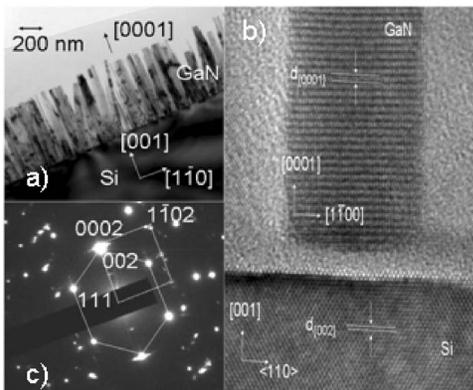


FIG. 2. (a) Cross-sectional TEM image of GaN nanocolumns grown on Si(001). (b) Cross-sectional HRTEM image of a GaN nanocolumn epitaxially aligned to the Si(001) substrate. (c) SAED pattern. The solid and dashed lines indicate the Si[110] and GaN[11-20] zone axis orientations, respectively. All spots in the SAED pattern belong to either Si or hexagonal GaN.

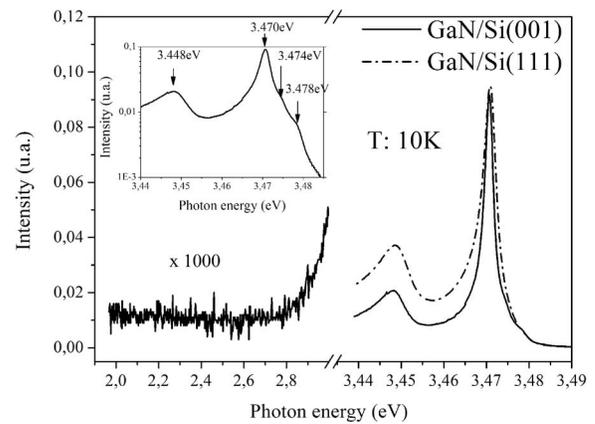


FIG. 3. Low temperature PL spectra of GaN nanocolumns grown on both Si(111) and Si(001) substrates. The inset shows in more detail the dominant near band edge emissions from the GaN nanocolumns grown on Si(001) substrate.

Emission lines at 3.470–3.478 eV correspond to excitonic transitions, either donor bound or free. The inset in Fig. 3 resolves up to three excitonic lines at 3.470, 3.474, and 3.478 eV, most probably related to two neutral-donor bound excitons (D^0X) and the free exciton A (FXA), respectively.^{11,12} PL emission is dominated by a D^0X line with a full width at half maximum (FWHM) of 2.3 meV, a lower value than that measured on GaN nanocolumns grown on Si(111) (4.3 meV) and far smaller than the corresponding to compact GaN layers grown on Si(111) substrates.⁵ Deep level emissions related to structural defects and impurities, such as the *yellow band* centered at 2.3 eV,¹³ were not detected (Fig. 3). Similarly, cubic GaN-related emissions, typically observed around 3.3 eV, were not observed.¹⁴ The sharp and intense excitonic emissions and the absence of deep level related emissions point to a very high crystal quality of the GaN nanocolumns grown on Si(001). From the band edge PL emission energies measured, we can conclude that the nanocolumns are strain-free. This is further confirmed by Raman measurements. Data in Fig. 4 show the high energy E_2 Raman mode of GaN nanocolumns grown either on Si(001) or Si(111). In both cases the peak is centered at 566 cm^{-1} , corresponding to fully relaxed thick GaN layers. The width ($\sim 5\text{ cm}^{-1}$) of the Raman lines is the same for both samples and comparable to that of high quality GaN compact samples.¹⁵ This is again indicative of the high crys-

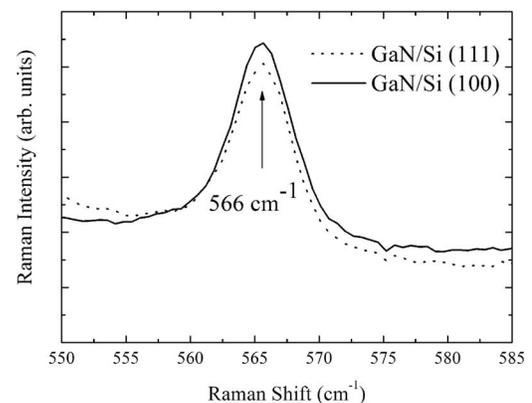


FIG. 4. Room temperature Raman spectra of GaN nanocolumns grown on both Si(001) and Si(111) substrates.

talline quality of the nanocolumns grown on both substrate orientations.

In conclusion, this work demonstrates that pure hexagonal GaN nanocolumns can be grown on Si (001) substrates, with an extremely high crystal quality evidenced by the intense and narrow emission PL lines. The GaN nanocolumns grown on Si(001) substrates are defect-free and strain-free, as it was the case when grown on Si(111) substrates. TEM data demonstrate that the GaN nanocolumns grow along the [0001] direction. These results open the way to an efficient integration of optoelectronic devices with the CMOS technology.

The authors wish to acknowledge partial funding support by CAM Projects GR/MAT/0042/2004 and S-0505/ESP-0200 and MEC Projects NAN04/09109/C04/2 and MAT04/2875.

¹S. Nakamura, M. Senoh, S. Nagahama, N. Isawa, T. Yamada, T. Matsushita, H. Kiyoku, and Y. Sugimoto, *Jpn. J. Appl. Phys., Part 2* **35**, L74 (1996).

²M. A. Khan, A. Bhattarai, J. N. Kuznia, and D. T. Olson, *Appl. Phys. Lett.* **63**, 1214 (1993).

³B. Yang, O. Brandt, A. Trampert, B. Jenichen, and K. H. Ploog, *Appl. Surf. Sci.* **123**, 1 (1998).

⁴S. Joblot, F. Semond, Y. Cordier, P. Lorenzini, and J. Massies, *Appl. Phys. Lett.* **87**, 133505 (2005).

⁵M. A. Sanchez-Garcia, E. Calleja, E. Monroy, F. J. Sanchez, F. Calle, E. Muñoz, and R. Beresford, *J. Cryst. Growth* **183**, 23 (1998).

⁶J. Grandal and M. A. Sanchez-Garcia, *J. Cryst. Growth* **278**, 373 (2005).

⁷J. Ristic, E. Calleja, M. A. Sanchez-Garcia, J. M. Ulloa, J. Sanchez-Paramo, J. M. Calleja, U. Jahn, A. Trampert, and K. H. Ploog, *Phys. Rev. B* **68**, 125305 (2003).

⁸J. Ristic, E. Calleja, A. Trampert, S. Fernández-Garrido, C. Rivera, U. Jahn, and K. H. Ploog, *Phys. Rev. Lett.* **94**, 146102 (2005).

⁹A. Trampert, J. Ristic, U. Jahn, E. Calleja, and K. H. Ploog, *Inst. Phys. Conf. Ser.* **180**, 167 (2003).

¹⁰M. Yoshizawa, A. Kikuchi, N. Fujita, K. Kushi, H. Sasamoto, and K. Kishino, *J. Cryst. Growth* **189/190**, 138 (1998).

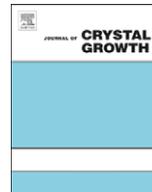
¹¹E. Calleja, M. A. Sanchez-Garcia, F. J. Sanchez, F. Calle, F. B. Naranjo, E. Muñoz, U. Jahn, and K. H. Ploog, *Phys. Rev. B* **62**, 16826 (2000).

¹²Y. S. Park, C. M. Park, D. J. Fu, T. W. Kang, and J. E. Oh, *Appl. Phys. Lett.* **85**, 5718 (2004).

¹³M. A. Reshchikov and H. Morkoc, *J. Appl. Phys.* **15**, 061301 (2005).

¹⁴M. Godlewski, J. P. Bergman, B. Monemar, U. Rossner, R. Langer, and A. Barski, *Mater. Sci. Eng., B* **50**, 113 (1997).

¹⁵V. Yu. Davydov, Yu. E. Kitaev, I. N. Goncharuk, A. N. Smirnov, J. Graul, O. Semchinova, D. Uffmann, M. B. Smirnov, A. P. Mirgorodsky, and R. A. Evarestov, *Phys. Rev. B* **B58**, 12899 (1998).



MBE growth of mid-IR diode lasers based on InAs/GaSb/InSb short-period superlattice active zones

A. Gassenq, L. Cerutti, A.N. Baranov, E. Tournié*

Institut d'Electronique du Sud (IES), Université Montpellier 2, CNRS, UMR 5214, cc 067, Place Eugène Bataillon, F-34095 Montpellier cedex 5, France

ARTICLE INFO

Available online 5 November 2008

PACS:

81.15.Hi
42.55.Px
68.65.Cd
81.05.Ea

Keywords:

A3. Molecular beam epitaxy
A3. Superlattices
B1. Antimonides
B2. Semiconductor III–V materials
B3. Laser diodes

ABSTRACT

We report on the MBE growth and properties of heterostructures and laser diodes based on 4 ML InAs/3 ML GaSb/1 ML InSb/3 ML GaSb short-period superlattices (SPSLs) for emission in the 3–4 μm wavelength range. We show that the interface configuration has a strong influence on both the structural and electronic properties of the SPSL. Excellent agreement between experimental and simulated X-ray diffraction patterns reveals the excellent crystal quality achieved with such complex SPSLs. Lasing is demonstrated up to 300 K in pulsed conditions and up to 200 K under continuous wave operation. Laser emission is centered at 3.32 μm , a technologically very interesting wavelength. Our results demonstrate the potential of these new active zones for mid-IR laser diodes.

© 2008 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

The 3–4 μm wavelength range of the mid-IR is a transparency window of the atmosphere that encompasses absorbing lines of various gaseous and/or organic species such as, e.g., alkanes, alkenes, or acid gases (HCl, HF, etc.) [1]. Semiconductor lasers operating in this wavelength range are thus the enabling technology for a variety of photonic sensors for environment, well-being, safety, security, and also photonic diagnosis devices for health care, laser-assisted surgery, etc. However, in spite of this potential there is currently a lack of mid-IR semiconductor lasers for these applications.

The “type-II broken gap”, also called type-III, band alignment at the InAs–GaSb interface allows one to adjust the effective bandgap of InAs/GaSb superlattices (SLs) from the mid- to the long-IR range by adjusting the individual-layer thickness and SL period [2]. This system has been studied till now mainly to fabricate IR detectors operating at wavelength longer than 5 μm based on SLs with periods in the ~ 20 monolayers (MLs) range [2]. Shorter wavelengths in principle can be achieved with short-period SLs (SPSLs) where the period is as thin as 5–10 MLs. In fact, we have recently succeeded in achieving low-temperature lasing at a wavelength as short as 2.5 μm [3]. Finally, intentional insertion of ML-thin, highly strained ($\epsilon=6.3\%$) InSb layers within the SLs gives additional degrees of freedom to tailor

the band structure. In this work, we investigate the MBE growth and properties of InAs/GaSb/InSb SPSLs and we demonstrate laser emission around 3.5 μm at room temperature.

2. Experimental procedure

All samples have been grown by solid-source MBE in a reactor equipped with both As- and Sb-valved cracker cells and conventional element-III cells. Be and Te are used as p- and n-type dopants. The substrates were on-axis (100)-oriented n-type GaSb. All growth runs have been monitored by *in situ* RHEED. After substrate deoxydation at 550 $^{\circ}\text{C}$, a GaSb:Te buffer layer is first grown at $\sim 500^{\circ}\text{C}$ followed by a 1.7 μm -thick, n-type, $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}_{0.07}\text{Sb}_{0.93}$ cladding layer and a 400-nm-thick, undoped, $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}_{0.03}\text{Sb}_{0.97}$ bottom waveguide layer. The substrate temperature is then decreased down to $\sim 420\text{--}430^{\circ}\text{C}$ to grow the SPSL-active zone. The temperature is then increased again to grow the upper waveguide, the p-type cladding and the highly doped p-type GaSb contact layer. The growth rates were 1 ML/s for the claddings and waveguides, and 0.5 ML/s for the SPSL layers. The group V–III flux ratios were kept close to 2.

As-grown samples have been characterized by high-resolution X-ray diffraction (HRXRD) and photoluminescence (PL) spectroscopy. Standard ridge diode lasers (DLs) have been fabricated from selected wafers and tested by electroluminescence (EL). A Fourier transform infrared spectrometer and a cooled-InSb detector have been used for material and device characterisations (PL & EL).

*Corresponding author. Tel.: +33 467143280; fax: +33 467544842.

E-mail addresses: etournie@univ-montp2.fr, eric.tournie@univ-montp2.fr (E. Tournié).

3. MBE growth and properties of InAs/GaSb/InSb SPSLs active zones

Varying the period and the individual-layer thickness of the SPSL allows one to tailor its effective bandgap. In addition, successive InAs and GaSb layers have no common atom (NCA), which means that the interface can take any configuration from Ga–As to In–Sb, depending on the growth conditions. In this work, we have chosen to study a 4 ML InAs/3 ML GaSb/1 ML InSb/3 ML GaSb SPSL-active zone in order to obtain an emission around 3.3 μm. The active zone contains 30 such periods. We have then investigated the influence of the shutter sequence on the interface configuration and on the electronic properties of the SPSL. We show in Table 1 the shutter positions that we have employed during growth of two typical samples. In both samples, all fluxes were shut for the GaSb-to-InAs transition. In sample V759 (resp. V653) the Sb shutter was kept open for 5 s (resp. closed) before resuming the GaSb growth at the InAs/GaSb interface. The HRXRD pattern taken from these two samples is shown in Fig. 1(a) and (b). The presence both of clear Pendellösung fringes and of intense and narrow first-order SL satellite peaks in both patterns reveals an excellent crystal quality for both samples. These two patterns differ by the position of the 0th-order SPSL peak. In fact, for sample V653 it is merged with the substrate and cladding peaks, while for sample V759 it appears as a distinct peak at lower angles. This indicates that the SPSL is quasi-lattice matched to the GaSb substrate for sample V653 while it is under compressive strain for sample V759. Fig. 1(c) shows the simulated pattern corresponding to sample V759. Excellent agreement between simulated and experimental patterns is obtained, which allows

Table 1
Shutter positions during growth of the SPSL layer sequence for two different samples.

| | GaSb | InSb | GaSb | Interface | InAs | Interface | GaSb |
|----|------|------|------|-----------|------|---------------------------------------|------|
| Ga | On | Off | On | Off | Off | Off | On |
| In | Off | On | Off | Off | On | Off | Off |
| Sb | On | On | On | Off | Off | On (V759) Off (V653) | On |
| As | Off | Off | Off | Off | On | Off | Off |

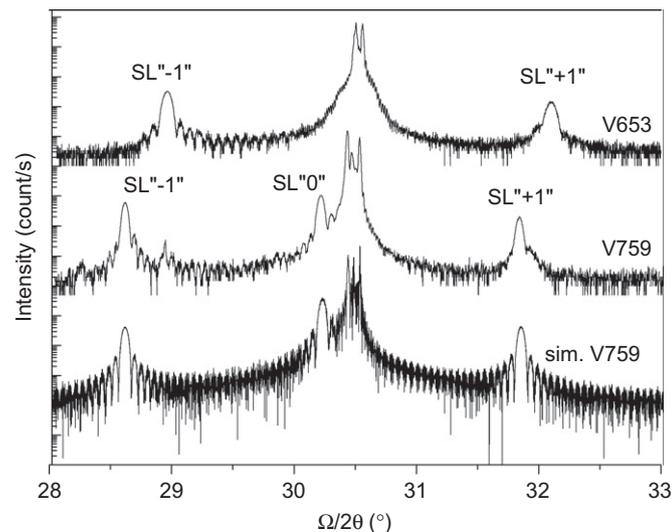


Fig. 1. Experimental HRXRD patterns taken from samples V653 (a) and V759 (b) and simulated pattern for sample V759. The *i*th-order satellite peaks are labeled as SL"*i*".

identifying the origin of all peaks. A comparison of simulated and experimental curves for both samples indicates that the interfaces in V653 are As-rich while in V759 they are Sb-rich. Consequently, the “natural” interfaces (V653) are As-rich while a Sb-soak (V759) is needed to force an Sb-rich interface. This arises from the fact that since the binding energy of In–As is higher than that of In–Sb, As incorporates better than Sb in As–Sb mixed interfaces [4,5]. In turn, the Sb-rich interfaces have a composition close to InSb, which results in a compressive strain for the whole SPSL as shown by the HRXRD curve [6]. We display in Fig. 2 a zoom around the main peaks, which shows the excellent agreement achieved between simulation and experiments. The fact that the waveguide peaks are not resolved indicates that they overlap with the claddings and substrates peaks. This indicates that both quaternary claddings and quaternary waveguides are closely lattice-matched to the substrate and reveals a good control of the MBE growth of these complex alloys. Pendellösung fringes are observed again and confirm the crystal quality.

We show in Fig. 3 the PL spectra taken at 90 and 300 K from these two samples. Their relative intensities are comparable.

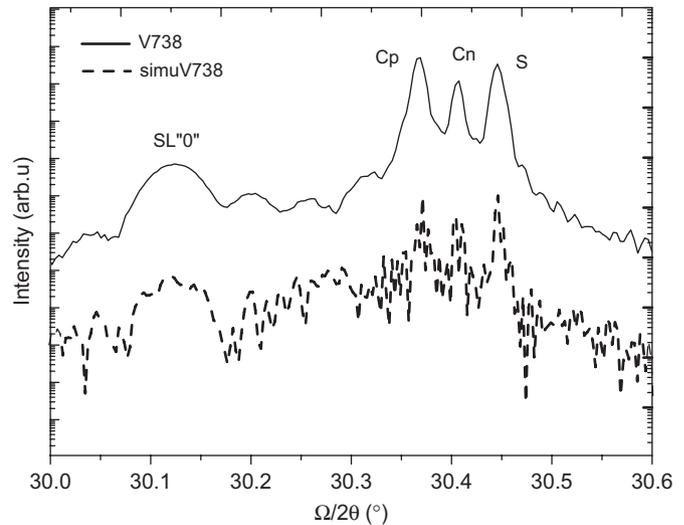


Fig. 2. Zoom around the main peaks. The peaks arising from the p-cladding, n-cladding and substrate are labeled Cp, Cn and S, respectively.

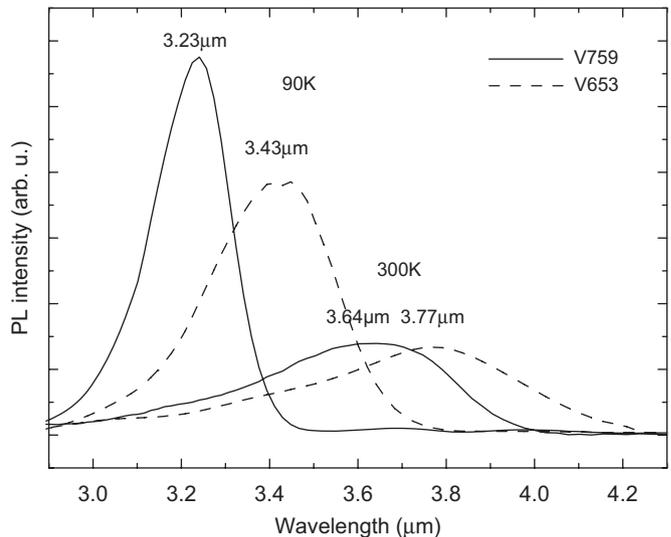


Fig. 3. PL spectra taken at 90 and 300 K from samples V653 and V759.

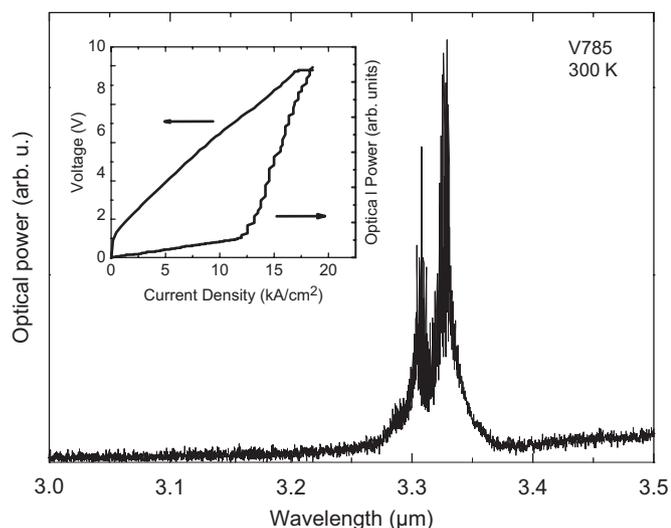


Fig. 4. Emitted spectrum, L - I and V - I characteristics taken under pulsed conditions from an LD at 300 K.

However, the spectra from V759 peak at shorter wavelengths than for V653 in spite of InSb-rich interfaces. Indeed, in these structures InSb is highly strained ($\epsilon=6.3\%$). Its bandgap is then 0.55 eV, i.e. much larger than the bulk InSb bandgap (0.17 eV). Inserting InSb next to InAs moves both the conduction and valence-band edges up. However, the conduction-band offset being larger than the valence-band offset, the conduction band moves faster and the effective bandgap of the SPSL increases. Emission then occurs at shorter wavelength.

4. Lasers characterisations

The SPSLs studied above were inserted as the active zone of laser diodes (LDs), which have been thoroughly characterized. Lasing is achieved under pulsed conditions up to room temperature and under continuous wave operation up to 220 K. Fig. 4 displays the laser characteristics taken under pulsed conditions at 300 K from such an LD. The threshold current density is around 12 kA/cm^2 with a threshold voltage near 1.5 V. Laser emission is centered at $3.32 \mu\text{m}$, right in the target wavelength range. Improvement of the laser design and technology should lead to continuous wave lasing at room temperature.

These results show that the InAs/GaSb/InSb SPSL is a promising active zone for laser emission in the $3\text{--}4 \mu\text{m}$ wavelength range.

Acknowledgements

Part of this work has been sponsored by the European Commission (project DOMINO, FP6-017383) and by the Région Languedoc-Roussillon. The authors thank G. Boissier, P. Grech and G. Narcy for technical help.

References

- [1] L.S. Rothman, et al., *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* 96 (2005) 139.
- [2] H.J. Haugan, F. Szmulowicz, G.J. Brown, K. Mahalingam, *J. Appl. Phys.* 96 (2004) 2580.
- [3] N. Deguffroy, V. Tasco, A. Gassenq, L. Cerutti, A. Trampert, A.N. Baranov, E. Tournié, *Electron. Lett.* 43 (2007) 1285.
- [4] R. Kaspi, *J. Crystal Growth* 201/202 (1999) 864.
- [5] J.C. Kim, J.G. Tischler, C.L. Canedy, E.H. Aifer, I. Vurgaftman, J.R. Meyer, L.J. Whitman, *J. Crystal Growth* 303 (2007) 515.
- [6] B. Satpati, J.B. Rodriguez, A. Trampert, E. Tournié, A. Joullié, P. Christol, *J. Crystal Growth* 301–302 (2007) 889.

GaSb-based composite quantum wells for laser diodes operating in the telecom wavelength range near 1.55- μm

L. Cerutti,^{1,2} A. Castellano,^{1,2,3} J.-B. Rodriguez,^{1,2} M. Bahri,⁴ L. Largeau,⁴ A. Balocchi,⁵ K. Madiomanana,^{1,2} F. Lelarge,³ G. Patriarche,⁴ X. Marie,⁵ and E. Tournié^{1,2,a)}

¹Université de Montpellier, IES, UMR 5214, F-34000 Montpellier, France

²CNRS, IES, UMR 5214, F-34000 Montpellier, France

³III-V lab, F-91460 Marcoussis, France

⁴CNRS, LPN, UPR 20, F-91460 Marcoussis, France

⁵INSA-CNRS-UPS, LPCNO, Université de Toulouse, 135 Av. de Rangueil, F-31077 Toulouse, France

(Received 28 January 2015; accepted 3 March 2015; published online 10 March 2015)

We have investigated in detail the material, optical, and lasing properties of innovative GaInSb/AlInSb composite quantum wells (CQWs). The CQWs are confined by AlGaAsSb barrier layers, and a monolayer-thin AlInSb barrier layer has been inserted within the GaInSb QWs in order to achieve lasing emission within the telecom window. High-resolution X-ray diffraction, transmission electron microscopy, and photoluminescence spectroscopies reveal high structural quality of the samples. Inserting AlInSb layers allows wider QWs, and thus higher gain-material volume and CQW/optical mode overlap. This translates into better laser performances. Near room temperature, a threshold current of 85 mA and an output power of ~ 30 mW/uncoated-facet under continuous wave operation are demonstrated at 1.55 μm with 10 $\mu\text{m} \times 1$ mm laser diodes. © 2015 AIP Publishing LLC.

[<http://dx.doi.org/10.1063/1.4914884>]

Telecom laser diodes (LDs) designed for long haul transmissions operate around 1.5 μm . Even though InP-based quantum well (QW) LDs are now the reference technology for these applications,¹ much work is still being carried out on QWs² or on alternative approaches such as, e.g., quantum dots³ or quantum dashes.⁴

Although GaSb-based LDs are mainly used in the 2–3 μm mid-IR wavelength range,⁵ they have long been considered as candidates for fabricating LDs emitting around 1.5 μm .^{6,7} Room temperature (RT) laser operation in continuous wave (CW) however has been achieved only recently.⁸

In this work, we have designed and investigated in detail the properties of GaSb-based LD active zones for efficient laser emission near 1.5 μm .

The starting point of this study is the active region previously used to achieve RT-CW laser operation.⁸ It consists of three 3.6-nm-wide Ga_{0.8}In_{0.2}Sb QWs confined by 20-nm-thick Al_{0.35}Ga_{0.65}As_{0.03}Sb_{0.97} barrier layers. The band structure of this design is labelled as A in Fig. 1. Calculations have been performed using the material data and formalism given by Vurgaftman *et al.*⁹ Any attempt to increase the Ga_{0.8}In_{0.2}Sb QW width, however, results in a rapid decrease of the transition energy which has to be compensated in order to maintain the emission near 1.55 μm . The original idea here consists in inserting monolayer-thin (0.45 nm) Al_{0.68}In_{0.32}Sb barrier layers within the Ga_{0.8}In_{0.2}Sb QW. The bandgap of Al_{0.68}In_{0.32}Sb is 1.6 eV, while its lattice parameter is 6.27 Å. The insertion of such thin layers gives design flexibility. In this work, design B is based on a 4.8-nm-wide Ga_{0.8}In_{0.2}Sb QW with a single insertion of Al_{0.68}In_{0.32}Sb, while design C consists in a 6-nm-wide Ga_{0.8}In_{0.2}Sb QW with insertion of two Al_{0.68}In_{0.32}Sb layers. The Al_{0.35}Ga_{0.65}As_{0.03}Sb_{0.97} barrier layers remain unchanged for the three designs. The

corresponding band diagrams are given in Fig. 1. The insertion of thin Al_{0.68}In_{0.32}Sb layers results in totally delocalized electron and hole wavefunctions and their overlap increases from 94% for design A to 95.6% and 96.2% for designs B and C, respectively. Therefore, the QW material acts very similarly to a single AlGaInSb effective layer and the resulting heterostructures can thus be regarded as type-I Ga_{0.8}In_{0.2}Sb/Al_{0.68}In_{0.32}Sb composite QWs (CQWs) with effective widths of 5.2 nm and 6.9 nm, respectively, confined by Al_{0.35}Ga_{0.65}As_{0.03}Sb_{0.97} barrier layers. The lattice mismatch with respect to GaSb of the A, B, and C designs amount to 1.25%, 1.3%, and 1.35%, respectively.

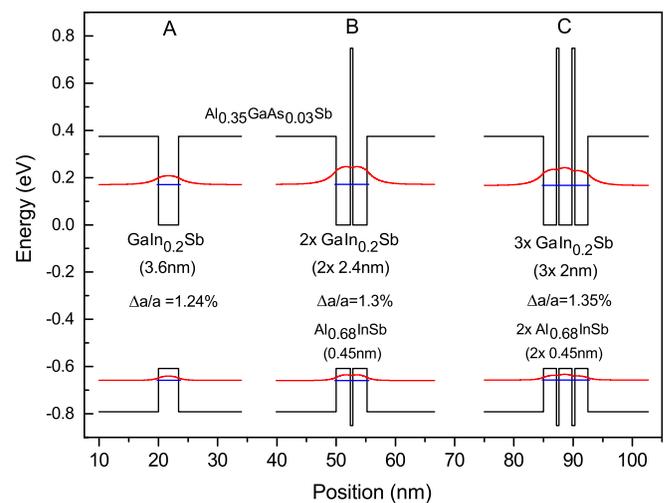


FIG. 1. Schematic energy-band diagram of the different active regions for emission at 1.55 μm based on single Ga_{0.8}In_{0.2}Sb QW (design A) or Ga_{0.8}In_{0.2}Sb/Al_{0.68}In_{0.32}Sb CQW (designs B and C). The energy-level reference is taken at the bottom of the Ga_{0.8}In_{0.2}Sb conduction band. The blue and red lines represent, respectively, the fundamental confined energies and the profile of the envelop wavefunction.

^{a)}eric.tournie@univ-montp2.fr

Next, active zones and LD heterostructures have been grown by solid-source molecular-beam epitaxy (MBE) on (001)-oriented, *n*-type, GaSb substrates. The active zone heterostructures mimic LD active zones. They consist of three $\text{Ga}_{0.8}\text{In}_{0.2}\text{Sb}$ QWs (design A) or CQWs (designs B and C) separated by 20 nm $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}_{0.03}\text{Sb}_{0.97}$ barrier layers, the whole QW system being embedded in 200-nm-thick $\text{AlAs}_{0.08}\text{Sb}_{0.92}$ layers. 20-nm thick lattice-matched $\text{AlAs}_{0.08}\text{Sb}_{0.92}$ layers were grown on both sides of the heterostructures to prevent carriers from escaping toward the surface or the substrate. In the case of LDs, these $\text{AlAs}_{0.08}\text{Sb}_{0.92}$ layers were substituted by 1.2 μm thick *n*-type or *p*-type $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}_{0.07}\text{Sb}_{0.93}$ cladding layers. The laser structures were completed with a 300 nm highly *p*-doped GaSb top-contact layer.

The crystalline perfection of the samples was studied by High Resolution X-Ray Diffraction (HRXRD) and Scanning Transmission Electron Microscopy (STEM). The active zone heterostructures have further been characterized by temperature-dependent photoluminescence (PL) spectroscopy between 20 K and 300 K. Time-Resolved Photo-Luminescence (TRPL) experiments were performed using a mode-locked Ti-Sapphire laser (1.2 ps pulses at 80.5 MHz) at 850 nm. The laser beam is focused onto the sample to a 50 μm diameter spot with average power $P_{\text{exc}} = 15$ mW. The PL was dispersed by a spectrometer and detected by an S1 synchroscan Hamamatsu streak camera with an overall temporal resolution of 8 ps.

HRXRD experiments (not shown here) revealed that all samples are perfectly strained onto the GaSb substrates. Fig. 2 shows TEM pictures taken from the active zone grown according to design C, i.e., with 2 $\text{Al}_{0.68}\text{In}_{0.32}\text{Sb}$ insertion

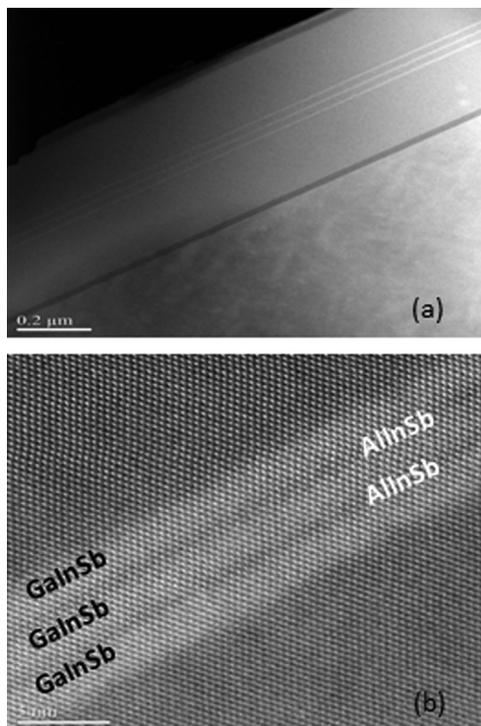


FIG. 2. High-Angle Annular Dark-Field (HAADF) STEM image taken from the active zone design C (a) and atomic-resolution HAADF-STEM image of the central $\text{Ga}_{0.8}\text{In}_{0.2}\text{Sb}/\text{Al}_{0.68}\text{In}_{0.32}\text{Sb}$ CQW (b). The sample is observed from a $\langle 110 \rangle$ zone axis.

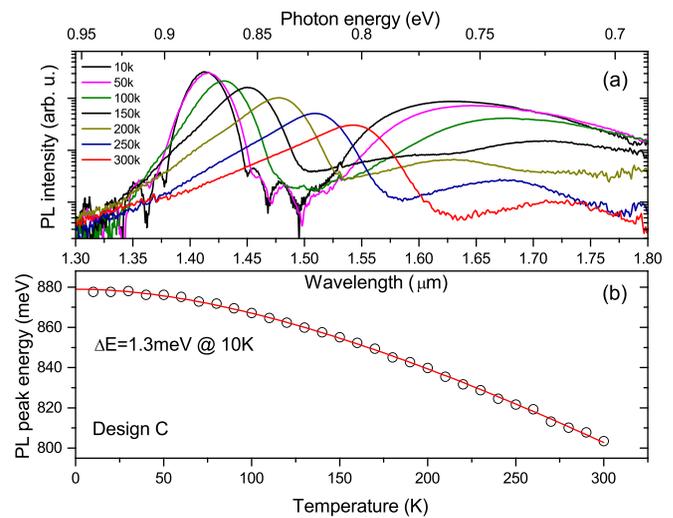


FIG. 3. PL spectra taken between 10 K and 300 K from the active zone with design C (a) and evolution with temperature of the PL peak emission from the CQW (b). The line in (b) represents the fit according to the Varshni's law.

layers within the CQWs. Fig. 2(a) reveals well-defined CQWs with sharp interfaces and the absence of any extended defect. We display in Fig. 2(b) a high-resolution image of the central CQW. The $\text{Al}_{0.68}\text{In}_{0.32}\text{Sb}$ insertion layers are very well defined. Their apparent thickness is around 1–2 monolayer, which corresponds to the intended thickness of 0.45 nm, i.e., ~ 1.5 monolayer. Fig. 2(b) thus confirms the realization of the CQW design and shows the excellent control which can be achieved with the MBE growth of such nanostructures.

Figure 3(a) shows the temperature dependence of the PL spectrum of the same CQW (design C). Two peaks near 1.42 and 1.62 μm are clearly detected at 10 K. The peak at 1.42 μm is ascribed to excitonic transitions between the first electron and heavy-hole confined levels in the CQWs, while the peak near 1.62 μm corresponds to band-to-band radiative transitions in GaSb. Upon increasing the temperature, the GaSb PL intensity decreases relatively to the CQWs PL efficiency. This reveals efficient carrier transfer from the barrier layers to the CQWs and non-radiative recombination in GaSb. In addition, the CQW PL spectrum becomes asymmetric on the high energy side due to thermal activation of the carriers. The temperature dependence of the CQW PL-peak energy extracted from these spectra is reported in Fig. 3(b). When the measurement temperature increases, the PL peak energy decreases obeying almost ideally a Varshni's law¹⁰ with parameters $E_0 = 879$ meV, $\alpha = 0.37$ meV/K, and $\beta = 150$ K. A very small excitonic localization of ~ 1.3 meV is observed at 10 K indicating weak potential fluctuations.

Next, we show in Fig. 4 the Arrhenius plot of the integrated PL intensity for the same sample. Note that the PL efficiency drops by less than one-order-of-magnitude between 10 K and 300 K, which reveals a robust behaviour. The data can be well fitted with single activation energy $E_a \approx 35$ meV (Fig. 4). This value does not correspond to either the electron or the hole confinement energy (Fig. 1). In addition, the second quantized-levels lie at much higher energies than E_a . The decrease of the PL efficiency thus

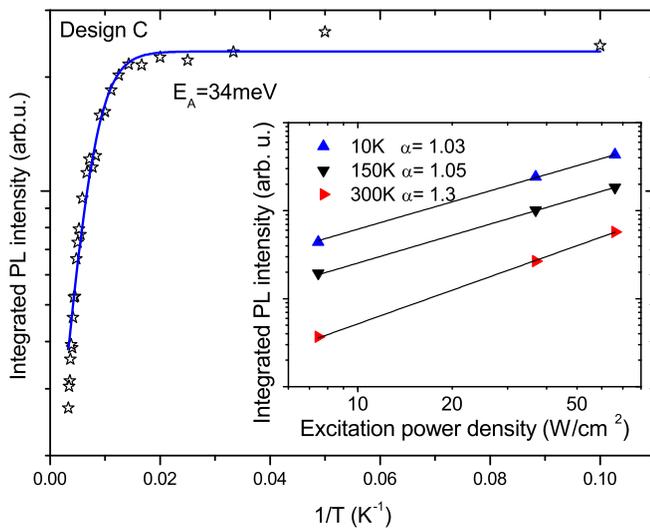


FIG. 4. Temperature dependence of the integrated PL intensity of the CQW with design C. Inset: integrated PL intensity versus excitation power at different temperatures.

occurs via other energy levels which we ascribe to the presence of defects near the interface between the CQW and the quaternary barrier-layer.¹¹ Finally, the inset in Fig. 4 displays the evolution of the integrated PL intensity with the power density at three different temperatures. At all three temperatures, the variation follows the $I_{PL} \propto I_{ex}^\alpha$ equation with α typically between 1 and 2. At 10 K and 150 K, α is very close to 1, which indicates that the PL arises from excitonic recombination. This is consistent with the increase of the PL decay time with temperature (see below).^{12–14} At 300 K, the value of $\alpha = 1.3$ demonstrates that free electron-hole recombination comes into play. Recombination involving shallow traps might also play a role.

Although not presented here, both other designs A and B behave in the very same way than design C. The only noticeable difference is that PL quenching occurs at slightly higher temperature for design C (60 K) than for designs B (50 K) and A (45 K).

Next, samples with the three designs have been characterized by TRPL. The dynamics are compatible with a mono-exponential decay for all samples and at all temperatures between 8 K and 300 K. Figs. 5(a) and 5(b) present, respectively, the decay time and rise time for the three designs. The increase in the decay time with the temperature and the large values obtained at room temperature (Fig. 5(a)) demonstrate the high quality of the samples.^{12–14} It is worth mentioning that the values measured at 300 K are much larger than that of high-quality GaInAsSb/AlGaAsSb QWs used for laser emission above $2 \mu\text{m}$.¹⁵ Stabilization or decrease of the decay time above around 200 K can be explained by the activation of non-radiative centers in the CQW.^{12–14} Note, however, that due to the lower signal level, the error in the determination of the decay times is substantially higher at high temperature than at low temperature. For the rise time, the same trend was again found in all three samples: A monotonic decrease in the rise time is measured as a function of temperature. The data show that carrier cooling, cross-well transport, and capture are complete within

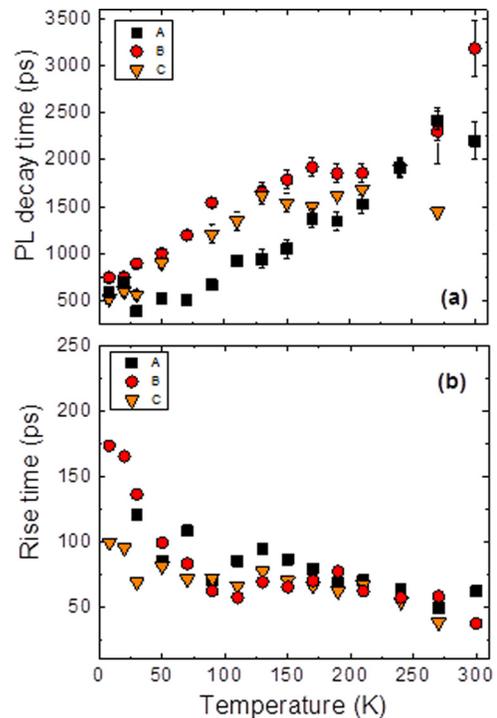


FIG. 5. Evolution with temperature of the PL decay time (a) and PL rise time (b) extracted from the PL dynamics for the CQWs with designs A, B, and C.

less than 50 ps after excitation at higher temperature. The long rise time associated to exciton cooling and localization at low temperature is consistent with what is typically measured in QW structures in other materials systems.¹⁶

All steady-state and transient PL experiments thus demonstrate that inserting $\text{Al}_{0.68}\text{In}_{0.32}\text{Sb}$ layers within the QWs to form CQWs does not alter significantly the properties of the QWs. In particular, this introduces neither QW potential fluctuation nor non-radiative recombination centers in spite of additional interfaces and high Al-content. All designs thus appear to be suited for active zones of laser diodes operating near $1.55 \mu\text{m}$.

Finally, the LD heterostructures have been processed into 0.5 and 1-mm long LDs of different ridge width (10 and $100 \mu\text{m}$) using standard photolithography. Backside n-contact

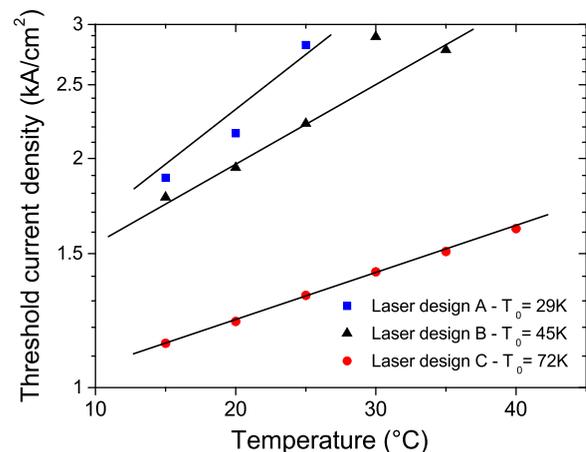


FIG. 6. Evolution of the threshold current-density with the CW operating-temperature of $10 \mu\text{m} \times 0.5 \text{ mm}$ LDs with the three designs.

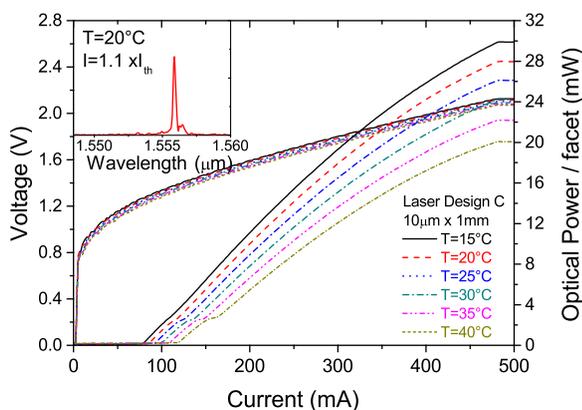


FIG. 7. L–I–V curves taken under CW conditions at different temperatures between 10 °C and 40 °C. Inset: Laser spectrum taken under CW operation at 20 °C from a 10 $\mu\text{m} \times 1\text{mm}$ LD with design C.

was insured by Au-Ge-Ni deposition. The cleaved laser facets remained uncoated.

All 10- μm -ridge LDs exhibited CW lasing at room temperature and above. Fig. 6 shows the evolution with temperature of the threshold current density for the three designs with 0.5 mm cavity length, their lasing emission being 1.545, 1.555, and 1.555 μm , respectively. The T_0 characteristic temperatures between 15 °C and 40 °C extracted from these plots are 29, 45, and 72 K, respectively. The gradual improvement of both the threshold current and T_0 reveals a very positive impact of the CQW on the LD performances which we ascribe to an increase of the overlap between the CQWs and the optical mode: 2.6%, 3.8%, and 5.2% for designs A, B, and C, respectively.

Fig. 7 shows light–current–voltage curves at different temperatures for CW operation of a LD with design C. An output power 30 mW/facet was measured at 15 °C for a current of 450 mA. No thermal roll over is observed until 40 °C (our setup limit) indicating that an even higher output power could be reached. The diode current–voltage characteristics were basically unchanged over the same temperature range with a turn-on voltage close to 1.2 eV and a series resistance around 5 Ω . Finally, the inset of Fig. 7 depicts the spectrum

obtained with the LD operating in CW at 15 °C, showing an emission peaked at the target wavelength of 1.55 μm .

In conclusion, we have proposed laser active zones based on Ga_{0.8}In_{0.2}Sb/Al_{0.68}In_{0.32}Sb composite quantum wells for emission near 1.55 μm . After careful LD optimization, this will open the way to the development of a new technology for telecom laser diodes.

We acknowledge fruitful discussion with H. Carrère. This work has been partly supported by French ANR under Project OPTOSi No. 12-BS03-002 ET acknowledges Institut Universitaire de France (IUF).

- ¹See, e.g., T. Katsuyama, *SEI Tech. Rev.* **69**, 13 (2009).
- ²T. Garrod, D. Olson, M. Klaus, C. Zenner, C. Galstad, L. Mawst, and D. Botez, *Appl. Phys. Lett.* **105**, 071101 (2014).
- ³P. Poole, in *Semiconductors and Semimetals*, Advances in Semiconductor Lasers Vol. 86, edited by J. J. Coleman, A. C. Bryce, and C. Jagadish (Academic Press, Elsevier, 2012), pp. 419–453.
- ⁴N. Chimot, S. Joshi, F. Lelarge, A. Accard, J. G. Provost, F. Franchin, and H. Debyegeas-Sillard, *IEEE Photonics Technol. Lett.* **25**, 1660 (2013).
- ⁵E. Tournié and A. N. Baranov, in *Semiconductors and Semimetals*, Advances in Semiconductor Lasers Vol. 86, edited by J. J. Coleman, A. C. Bryce, and C. Jagadish (Academic Press, Elsevier, 2012), pp. 183–226.
- ⁶Y. Ohmori, Y. Suzuki, and H. Okamoto, *Jpn. J. Appl. Phys., Part 2* **24**, L657 (1985).
- ⁷G. Almuneau, F. Genty, A. Wilk, P. Grech, A. Joullié, and L. Chusseau, *Semicond. Sci. Technol.* **14**, 89 (1999).
- ⁸L. Cerutti, J. B. Rodriguez, and E. Tournié, *IEEE Photonics Technol. Lett.* **22**(8), 553 (2010).
- ⁹I. Vurgaftman, J. R. Meyer, and L. R. Ram-Mohan, *J. Appl. Phys.* **89**, 5815 (2001).
- ¹⁰Y. P. Varshni, *Physica* **34**, 149 (1967).
- ¹¹Z. Y. Xu, Z. D. Lu, Z. L. Yuan, X. P. Yang, B. Z. Zheng, J. Z. Xu, W. K. Ge, Y. Wang, J. Wang, and L. L. Chang, *Superlattices Microstruct.* **23**, 381 (1998).
- ¹²M. Gurioli, A. Vinattieri, M. Colocci, C. Deparis, J. Massies, G. Neu, A. Bosacchi, and S. Franchi, *Phys. Rev. B* **44**, 3115 (1991).
- ¹³L. C. Andreani, F. Tassone, and F. Bassani, *Solid State Commun.* **77**, 641 (1991).
- ¹⁴P. Michler, A. Hangleiter, M. Moser, M. Geiger, and F. Scholz, *Phys. Rev. B* **46**, 7280 (1992).
- ¹⁵G. Rainò, A. Salhi, V. Tasco, R. Intartaglia, R. Cingolani, Y. Rouillard, E. Tournié, and M. De Giorgi, *Appl. Phys. Lett.* **92**, 101931 (2008).
- ¹⁶X. Marie, F. Lephay, T. Amand, J. Barrau, F. Voillot, and M. Brousseau, *Superlattices Microstruct.* **10**, 415 (1991).