



HAL
open science

Journées Nano, Micro et Optoélectronique (JNMO)

Jean-Philippe Perez, Fernando Gonzalez-Posada Flores, Aurore Vicet, Laurent Cerutti, Eric Tournié, Thierry Taliercio

► **To cite this version:**

Jean-Philippe Perez, Fernando Gonzalez-Posada Flores, Aurore Vicet, Laurent Cerutti, Eric Tournié, et al.. Journées Nano, Micro et Optoélectronique (JNMO). Journées Nano, Micro et Optoélectronique (JNMO) 2024, 2024. hal-04904732

HAL Id: hal-04904732

<https://hal.science/hal-04904732v1>

Submitted on 21 Jan 2025

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

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



Distributed under a Creative Commons CC0 - Public Domain Dedication 4.0 International License



Journées Nano, Micro et Optoélectronique 2024



Du 1^{er} au 04 octobre 2024
Le Lazaret (Sète)



COMITÉS

Comité de programme :

Guilhem ALMUNEAU	LAAS	Toulouse
Frédéric ANIEL	C2N	Palaiseau
Philippe BOUCAUD	CRHEA	Valbonne
Thierry CAMPS	LAAS	Toulouse
Joël CIBERT	Institut Néel	Grenoble
Thomas ERNST	CEA-LETI	Grenoble
Lionel HIRSCH	IMS	Bordeaux
Xavier LETARTRE	INL	Lyon
Patrick BOUCHON	ONERA	Chatillon
Hassan MAHER	LN2	Sherbrooke
Francis PRESSECQ	CNES	Toulouse
Julien NAGLE	Thales-R&T	Palaiseau
Jean-Luc PELOUARD	C2N	Palaiseau
Isabelle SAGNES	C2N	Palaiseau
Guillaume SAINT-GIRONS	INL	Lyon
Fabrice SEMOND	CRHEA	Valbonne
Carlo SIRTORI	LP-ENS	Paris
Eric TOURNIE	IES	Montpellier
Agnès TRASSOUDAINE	Institut Pascal	Clermont-Ferrand
Mohammed ZAKNOUNE	IEMN	Lille

Comité d'organisation :

- Laurent CERUTTI
- Marie FRANK
- Fernando GONZALEZ-POSADA
- Jean Philippe PEREZ
- **Thierry TALIERCIO**
- Eric TOURNIÉ
- Aurore VICET

Les JNMO 2024 n'auraient pas été possibles sans le généreux support de nos sponsors :



PLAN DU SITE : LE LAZARET



PROGRAMME :

Mercredi 2 octobre		Jeudi 3 octobre		Vendredi 4 octobre	
Micro-nano-technologies et systèmes, Caractérisation structurale, optique et électrique des semiconducteurs		Composants photoniques, intégration photonique et optoélectronique		Structures de basse dimensionalité, Micro et nanophotonique, cristaux photoniques, métamatériaux, plasmonique	
8h20-8h40	Accueil et Bienvenue aux JNMO 2024	8h20-8h40	Charles Cornet	8h20-8h40	Angela Vasanelli
8h40-9h00	Maria Tchernycheva	8h40-9h00		8h40-9h00	
9h00-9h20		9h00-9h20	Claire Besançon	9h00-9h20	Philip Schulz
9h20-9h40	Hanako Okuno	9h20-9h40		9h20-9h40	
9h40-10h00		9h40-10h00	Moustafa El Kurdi	9h40-10h10	Antonin Moreau
10h00-10h30	Alexandre Arnoult	10h00-10h20		10h10-10h40	Pause
10h30-11h00	Pause	10h20-10h50	Pause		Physique des structures de basse dimensionalité
	Composants électroniques, intégration micro-nano-électronique		Matériaux et nanostructures	10h40-11h00	Guillaume Cassabois
11h00-11h20	Bruno Gayral	10h50-11h10	Fabrice Semond	11h00-11h20	
11h20-11h40		11h10-11h30		11h20-11h40	Matthieu Jamet
11h40-12h00	Marianne Germain	11h30-11h50	Jean-Baptiste Rodriguez	11h40-12h00	
12h00-12h20		11h50-12h10		12h00-12h10	Conclusion des JNMO 2024
12h20-12h50	Laurent Markey	12h10-12h40	Céline Chevalier		Déjeuner
	Déjeuner		Déjeuner		
	Temps libre		Temps libre		
	Composants et technologies THz, Technologies et capteurs quantiques		PEPRs Electronique et Spintronique		
16h00-16h20	Juliette Mangeney	16h00-16h20	Vincent Cros		
16h20-16h40		16h20-16h40			
16h40-17h00	Mathias Van Den Bossche	16h40-17h00	Isabelle Sagnes		
17h00-17h20		17h00-17h20			
17h20-17h40	Présentations Flash	17h20-17h40	Présentations Flash		
17h40-19h30	Session Poster 1	17h40-19h30	Session Poster 2		
20h00	Dîner	20h00	Dîner de Gala		

Papiers invités
Mercredi 2 octobre

NITRIDE NANOSTRUCTURED LIGHT EMITTING DIODES

M. Tchernycheva¹, R. Hernandez¹, N. Amador¹, S. Bouchoule¹, S. Vézian², B. Damilano², J. Bosch², B. Alloing², J. Eymery³, C. Durand³

¹ C2N-CNRS, University Paris Saclay, 91120 Palaiseau, France

² CRHEA, Université Côte d'Azur, CNRS, 06560 Valbonne, France

³ Université Grenoble Alpes, CEA, IRIG, PHELIQS, NPSC, 38000 Grenoble, France.

* E-mail: marie.tchernycheva@cns.fr

SUMMARY

The existing limitations of thin film light emitting diode (LED) performance have motivated a strong research effort on nanostructured LEDs as a way to improve the efficiency, to reduce their cost or to bring new functionalities. In this presentation, we will discuss the fabrication and nanoscale analyses of both nanowire and nanoporous nitride LEDs.

1. INTRODUCTION

InGaN LEDs are of great importance for high efficiency / high brightness lighting technologies. The existing limitations of thin film macroscopic LEDs as well the new need of micro-LEDs have motivated a strong research effort on the nanostructuring with a primary goal to reduce defects by releasing strain. In particular, nanowires were strongly researched as a way to boost the LED performance in particular for full-color micro-LEDs. Indeed, three-dimensional nanowire-based LEDs can improve the material quality and offer new opportunities for strain engineering. Moreover, the core-shell architecture is expected to reduce the efficiency droop at high current by increasing the active area. In nanowires having their elongated axis aligned with the [0001] direction, quantum confined Stark effect is not present thanks to the growth of the active region on non-polar m-planes. Additionally, the use of nanowires, rather than 2D layers, opens new possibilities for the development of multifunctional light sources. For example, flexible nanowire LEDs can be fabricated by transferring the active nanowires to flexible substrates.

Another approach to eliminate defects from nitride thin films is their nano-porosification. The porosification of semiconductors is a well-known approach to control their optical and electrical properties, however in nitrides, additional interest of porosification stems from the strain and dislocation density reduction. In particular, selective area sublimation shows promise for defect reduction in LEDs.

2. RESULTS

In this presentation, we will expose our work on InGaN/GaN nanowire-based as well as nanoporous

LEDs. We will first discuss single nanowire properties and nanowire array LEDs on rigid substrates [1, 2, 3]. We use electron beam induced current microscopy and cathodoluminescence spectroscopy to detect failures and optimize the LED structure. Then we will focus on the application of nitride nanowires to flexible devices. We will describe the approach for nanowire lift-off, transfer into polymer-embedded membranes and flexible contacting, which allows to combine high flexibility of polymer films with high quantum efficiency provided by nitride nanowires. Realization and characterization of blue, green, ultraviolet, two-color and white flexible light sources will be presented [4, 5, 6, 7, 8]. Fig. 1 shows an example of a UV flexible LED emitting light in the UV-B range [8]. Finally, we will also address the alternative approach to eliminate threading dislocations -- the nanoporosification and we will present the fabrication of fully nanoporous LEDs [9, 10].

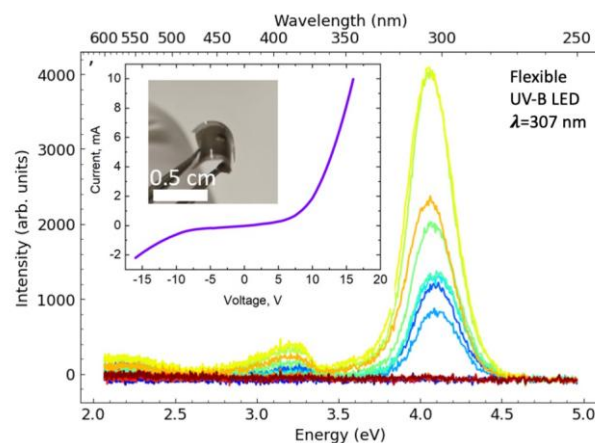


Figure 1 : Electroluminescence spectra of a flexible nanowire LED emitting in the UV-B spectral range under increasing injection. Inset: IV-curve of the device and a photo of a bended LED.

3. REFERENCES

[1] M. Tchernycheva, V. Neplokh, H. Zhang, P. Lavenus, L. Rigutti, F. Bayle, F. H. Julien, A. Babichev, G. Jacopin, L. Largeau, R. Ciechonski, G. Vescovi and O. Kryliouk, "Core-shell InGaN/GaN nanowire light emitting diodes analyzed by

- electron beam induced current microscopy and cathodoluminescence mapping”, *Nanoscale* 7, 11692 (2015).
- [2] H. Zhang, G. Jacopin, V. Neplokh, L. Largeau, F. H. Julien, O. Kryliouk, M. Tchernycheva, “Color control of nanowire InGaN/GaN light emitting diodes by post-growth treatment”, *Nanotechnology*, 26, 465203A (2015).
- [3] H. Zhang, V. Piazza, V. Neplokh, N. Guan, F. Bayle, S. Collin, A. Babichev, F. H. Julien, M. Tchernycheva, “Correlated optical and electrical analyses of inhomogeneous core/shell InGaN/GaN nanowire light emitting diodes”, *Nanotechnology* 32, 105202 (2021).
- [4] D. Xing, A. Messanvi, H. Zhang, C. Durand, J. Eymery, F. H. Julien, M. Tchernycheva, “Flexible Light Emitting Diodes Based on Vertical GaN Nanowires”, *Nano Letters* 15 (10), 6958 (2015).
- [5] N. Guan, X. Dai, A. Messanvi, H. Zhang, J. Yan, E. Gautier, C. Bougerol, F. H. Julien, C. Durand, J. Eymery and M. Tchernycheva, “Flexible White Light Emitting Diodes Based on Nitride Nanowires and Nanophosphors”, *ACS Photonics*, 3, 597 (2016).
- [6] N. Guan, N. Amador-Mendez, J. Wang, S. Das, A. Kapoor, F. H. Julien, N. Gogneau, M. Foldyna, S. Som, J. Eymery, C. Durand and M. Tchernycheva « Colour optimization of phosphor-converted flexible nitride nanowire white light emitting diodes » *J. Phys.: Photonics* 1 (2019) 035003
- [7] N. Guan, N. Amador-Mendez, A. Kunti, A. Babichev, S. Das, A. Kapoor, N. Gogneau, J. Eymery, F. Henri Julien, C. Durand, M. Tchernycheva, “Heat dissipation in flexible nitride nanowire light-emitting diodes” *Nanomaterials* 10 (11), 2271 (2020)
- [8] Nuno Amador-Mendez, Fedor M. Kochetkov, Roberto Hernandez, Vladimir Neplokh, Vincent Grenier, Sylvain Finot, Lucie Valera, Jules Duraz, Nikita Fominykh, Elizaveta K. Parshina, Konstantin V. Deriabn, Regina M. Islamova, Etienne Herth, Sophie Bouchoule, François Julien, Malini Abraham, Subrata Das, Gwénoél Jacopin, Dmitry V. Krasnikov, Albert Nasibulin, Joël Eymery, Christophe Durand, Ivan S. Mukhin, Maria Tchernycheva, “UV-A Flexible LEDs Based on Core-Shell GaN/AlGaIn Quantum Well Microwires” *ACS Appl Mat and Int*, ASAP DOI: 10.1021/acsami.4c06181
- [9] N. Amador-Mendez, T. Mathieu-Pennober, S. Vézian, M-P Chauvat, M. Morales, P. Ruterana, A. Babichev, F. Bayle, F. H. Julien, S. Bouchoule, S. Collin, B. Gil, N. Tappy, A. Fontcuberta i Morral, B. Damilano, M. Tchernycheva, “Porous nitride light-emitting diodes”, *ACS photonics* 9 (4), 1256-1263 (2022)
- [10] B Damilano, S Vézian, J Brault, P Ruterana, B Gil, M Tchernycheva “Nanoporous GaN by selective area sublimation through an epitaxial nanomask: AlN versus Si x N y” *Nanotechnology* 34 (24), 245602 (2023)

SCANNING TRANSMISSION ELECTRON MICROSCOPY FOR THE STUDY OF LOW-DIMENSIONAL MATERIALS

Hanako Okuno

Univ. Grenoble Alpes, CEA-Grenoble, IRIG-MEM
17 Avenue des Martyrs, 38054 Grenoble, France

*hanako.okuno@cea.fr

1. INTRODUCTION

Two-dimensional (2D) layered structures, such as graphene and transition metal dichalcogenides (TMDs), have attracted much attention for future electronics and optoelectronics due to their unique electronic structures. However, the fabrication of high quality films is still a challenge. Synthesized materials generally contain inevitable intrinsic atomic defects, which are the cause of a discrepancy between the properties measured in synthesized materials and those theoretically predicted from a perfect model system. When we aim at large scale functional materials, the materials should be considered as a patchwork of different types of defect structures. Therefore, identification and characterization of defects present in synthesized materials and exploration of their local properties have become essential processes.

In recent years, high-resolution scanning transmission electron microscopy (STEM) has become the most powerful technique providing detailed local atomic structure of 2D layers such as graphene and transition metal dichalcogenides (TMDs) by a direct imaging as well as the associated chemical information by electron energy loss spectroscopy (EELS). Recently a new STEM acquisition technique so-called four-dimensional STEM (4D-STEM) has demonstrated its great potential to fulfil information on either upscaled structures or on local electrical properties. The technique consists in recording a diffraction pattern for each position of the scanning beam on the sample [1], enabling the visualization of multiple structural information at the micrometer scale. In addition, analyzing the deviation of the transmitted beam position (Center of Mass: CoM) in 4D-datasets gives access to the local electric field at the atomic scale, and to the electrostatic potential and the charge density through Poisson's equation [2].

2. DESCRIPTION DE L'ETUDE

This presentation aims to introduce STEM-based techniques dedicated to the study of 2D and other low-dimensional materials. In particular, a new acquisition method, 4D-STEM, will be presented as a powerful technique that provides structural and electrical properties of 2D materials from the atomic to the micron scale. Our recent study demonstrates the practical application of the 4D-STEM for the study of 2D materials grown at both

laboratory and industrial scales developed for various field of applications.

3. RESULTATS

First, multi-scale analytical process will be demonstrated. A combination of atomic-resolution analysis and micron-scale structural mapping provides an overview of the structural properties of monolayer and multilayer materials. By extracting multiple structural information appearing in the electron diffraction pattern, orientation, polarity and phase maps of wafer-scale epitaxial TMDs are reconstructed. Density and distribution of typical domain junctions are quantitatively measured and directly correlated with their atomic structures studied by HAADF-STEM imaging and DFT calculations [3]. Secondly, the correlative application of different STEM techniques is demonstrated to fully study a single dopant atom incorporated in an MBE grown WSe₂ monolayer. Single dopant atoms were localized in defective host materials by HAADF imaging and chemically identified by EELS. The local electric field around the dopant atoms was then investigated at the atomic scale by the CoM method [4].

4. CONCLUSIONS

Finally, our results show the potential of STEM-based techniques to provide knowledge on an overview of synthesized 2D materials from large scale down to atomic scale with multiple information on structure, chemistry and electrical characters. Further application of these analytical techniques to other types of materials is also discussed.

4. REFERENCES

- [1] Ophus, *Microscopy and Microanalysis*, 25 (2019) 563.
- [2] Muller et al., *Nat. Commun.* 2014, 5 (1), No. 5653
- [3] D. Dosenovic et al., *2D Materials*, 10 (2023) 045024.
- [4] D. Dosenovic et al., *ACS Nano*, 18 (2024) 23354.

IN SITU AND REAL-TIME CHARACTERIZATION INSTRUMENTS FOR MOLECULAR BEAM EPITAXY AND CHEMICAL VAPOR DEPOSITION

A. Arnoult¹, P. Dubreuil, P. Gavras, L. Bourdon, S. Calvez and G. Almuneau

¹ LAAS-CNRS, Université de Toulouse, CNRS, UPS, F-31400 Toulouse, France

* E-mail: aarnoult@laas.fr

Measuring the key parameters of a growing layer is a means of obtaining information on dynamic phenomena that ex situ growth characterization cannot access to. In a more pragmatic way, they allow to optimize the growth of multilayer stacks, or at least help to grow them successfully. Some tools or techniques are well established such as RHEED in the MBE community, or end point detectors based on reflectometry in CVD. But spectral reflectivity (Fig 1., top), atomic absorption [1], band gap inferred temperature [2] or curvature (Fig. 1., bottom) [3] are much less used, despite the richness of information they can provide.

Among complex structures, Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers (VCSELs) are one of the trickiest to grow as they require an almost perfect control of layers thicknesses and alloy concentrations in order to tune the quantum wells emitting wavelength to the cavity optical properties and obtain the lasing effect. Furthermore, their long-time growth require either stable fluxes during several hours or in situ control and direct feedback to correct any drift or misadjustment of the effusion cells fluxes. VCSELs are widely grown by MOCVD as the demand for such structures has been increasing in recent years, and most of the published work concern this epitaxy technique [4]. However, MBE growth chambers allow the simultaneous use of numerous instruments and we will show how they can be used synchronously and how their complementarity can be exploited.

We will present some of the in-situ characterization tools that are developed and used at LAAS-CNRS on our III-V MBE growth chambers, and will show through some examples how the information they give during growth help understanding growth phenomena or grow complex structures.

Finally, we will then show how some tools developed for MBE can also give interesting results in a CVD deposition chamber.

This study benefited from the support of both the LAAS-CNRS micro and nanotechnologies platform, member of the French RENATECH network, and the EPICENTRE common laboratory between RIBER S.A. and LAAS-CNRS.

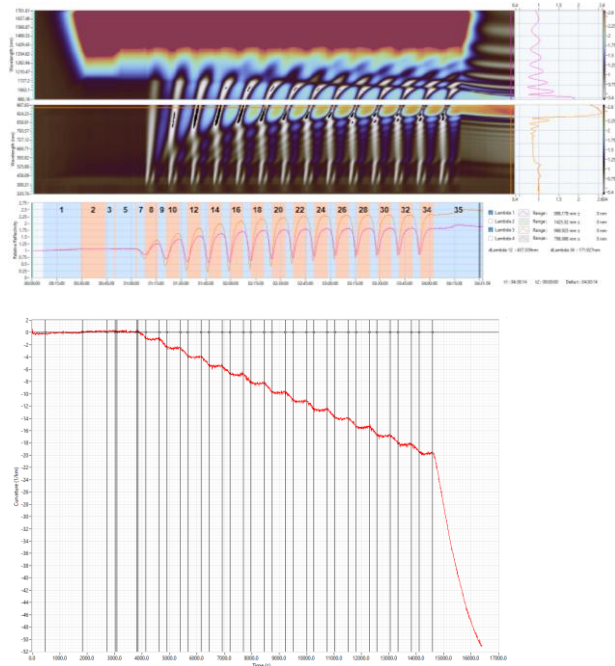


Fig. 1. Simultaneous spectral reflectivity (top) and curvature changes (bottom) during the growth of a GaAs/Al_{0.9}Ga_{0.1}As Bragg mirror

[1] P. Pinsukanjana et al. “Real-time simultaneous optical-based flux monitoring of Al, Ga, and In using atomic absorption for molecular beam epitaxy” *J. Vac. Sci. Technol. B* 14(3), 2147-2150, May/June 1996

[2] S. Johnson et al. “In situ temperature control of molecular beam epitaxy growth using band-edge thermometry”, *J. Vac. Sci. Technol. B* 16, 1502–1506 (1998)

[3] A. Arnoult, J. Colin “Magnification inferred curvature for real-time curvature monitoring”, *Sci Rep* 11, 9393 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88722-6>

[4] A. Maaßdorf, J. K. Zettler, K. Haberland and M. Weyers, “Growth and Calibration of GaAs-Based VCSEL Structures—Enabled by In Situ and Ex Situ Optical Metrology”, *ICMOVPE 2024*, 2B-2.1

REBOUND EFFECTS AND SEMICONDUCTOR DEVICES : CONSIDERATIONS ON TECHNOLOGIES AND THEIR USAGE

Bruno Gayral

Univ. Grenoble Alpes, CEA, Grenoble INP, IRIG, PHELIQS, 38000 Grenoble, France

* E-mail: bruno.gayral@cea.fr

RÉSUMÉ

The various rebound effects have been studied for the last fifty years and play an important role in various sectors of the economy. It can be argued that the rebound effect plays a specific role for semiconductor devices, a field in which energy efficiency gains have been enormous, but have been largely compensated by even larger usage increase. In this talk, I will discuss the basics of rebound effects, then what can be specifically said about the rebound effects for semiconductor technologies, with notably a focus on visible LEDs. I will conclude by discussing how I think these considerations could play a role in the way researchers discuss the impacts of their research.

1. INTRODUCTION

When a technological innovation leads to a larger energy efficiency for a given device or appliance, it may lead to an increase in usage that offsets the expected energy savings due to the innovation. This is generally speaking what the rebound effect is about [1]. The microelectronics industry is quite peculiar in this respect as energy efficiency improvements have been exponential for decades [2]. This tremendous efficiency improvement (typically a factor of 10^9 between 1960 and 2010) has of course not led to reduced energy consumption from the sector, quite the contrary: the exponential energy efficiency gains are more than compensated by an exponential increase in usage. In that case, the rebound effect is said to backfire, and every new generation of more energy efficient chips leads to increase in overall energy consumption. The same conclusion can be drawn for wireless communications.

2. THE CASE OF LEDs

Another interesting device is the white LED for lighting (actually the blue LED combined with a phosphor coating). Developed in the late XXth century and based on InGaN/GaN active layers, lighting systems based on semiconductor LEDs are clearly the most efficient lighting devices. Interestingly, the 2014 Nobel prize in physics was awarded to I. Akasaki, H. Amano and S. Nakamura for “the invention of efficient blue light emitting diodes which has enabled bright and *energy saving* white light sources.” One might then wonder if it

is an established fact that the introduction of the blue LED technology actually led to energy savings. As I will show the answer to this question is not well established, notably due to a lack of studies on the topic in the academic literature. I will then discuss other applications of white LEDs and the possible implications for the rebound effects concerning this technology.

4. CONCLUSIONS

In the context of current ecological catastrophe and the necessary strong reduction of energy consumption in the years ahead, the rebound effect studies show the link between energy efficiency improvements and actual energy savings. This is particularly important for semiconductor technologies for which exponential increase in usage are forecasted in several industrial roadmaps. I argue that for the research communities, this implies a necessary sense of humility and responsibility when discussing potential social and environmental impacts of our innovations.

4. REFERENCES

- [1] D.J. Khazoom, “Economic implications of mandated efficiency standards for household appliances”, *Energy J.* **1** 21 (1980)
- [2] J. Koomey *et al.* “Implications of historical trends in the electrical efficiency of computing”, *IEEE Annals of the History of Computing*, **33**, 46 (2011)

ON-CHIP PLASMO-PHOTONIC WAVEGUIDE SENSORS WITH MICROFLUIDICS

Laurent Markey^{1,*}, Pratyusha Das¹, Omkar Bhalerao², Stephan Suckow², Jean-Claude Weeber¹

¹ *Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne, CNRS UMR6303, 9 Avenue Alain Savary, 21000 Dijon, France*

² *AMO GmbH, Advanced Microelectronic Center Aachen, Otto-Blumenthal-Str. 25, 52074 Aachen, Germany*

* *Laurent.Markey@u-bourgogne.fr*

SUMMARY

We present an on-chip biosensing platform designed to be low-cost based on hybrid plasmonic and photonic waveguides that display a very high refractive index sensitivity, a colloidal quantum dot based configuration to excite the waveguide sensors directly on-chip and microfluidic modules we have developed to work with this type of sensor-chip.

1. INTRODUCTION

The sensing concept presented is based on on-chip Mach-Zehnder interferometric (MZI) photonic waveguides hybridized with a plasmonic structure acting as refractive index sensing element. We also showcase a promising waveguide excitation concept based on the deposition of quantum dots in the heart of the chips, which would avoid the use of the fiber array and would reduce the constraints of a precise alignment in butt coupling.

In parallel we have developed microfluidic modules adapted to this on-chip sensor platform based on molding of PDMS. The most important point is to get a perfect alignment of the microchannel with the micron-size sensors on the chip along with a leak-free bonding to the chip. It also has to be compatible with the presence of sensitive biological materials chemically functionalized on the surface of the chip. We have developed different approaches for this purpose.

All the results presented have been obtained in the framework of the european project GRACED and former project PLASMOFAB [1]. An example of application is the ultra-sensitive detection of contaminants in the food chain supply like e.g. pesticide or bacteria. In particular, the project has led to the development of a prototype of instruments which will be used by producers of fruit and vegetables in particular at the production site[a]. Finally, we will also introduce the new European project MULTILAB which aims at integrating different types of sensors on the same chip to extend the capabilities of the technology towards medical and environmental use cases, where it is important to simultaneously detect various types of analytes including virus, bacteria, RNA, nutrients, etc. This demonstrates the versatility of this sensor platform.

2. CONCEPTS / DESIGN / MATERIALS

Hybrid plasmo-photonic waveguide structures have been developed in a specific single-arm Mach-Zehnder interferometer design in which the reference arm and the measuring arm form a single one and display a bi-modal interference at the output [2,3]. These waveguides are excited by coupling with single-mode fiber arrays and a 1550 nm source. This kind of waveguide has been developed with either SU-8 [4] or SiN as waveguide material by AMO. The deposition of the metal into a cavity etched into the photonic layer is based on a lift-off process [5] initially developed during Plasmofab project.

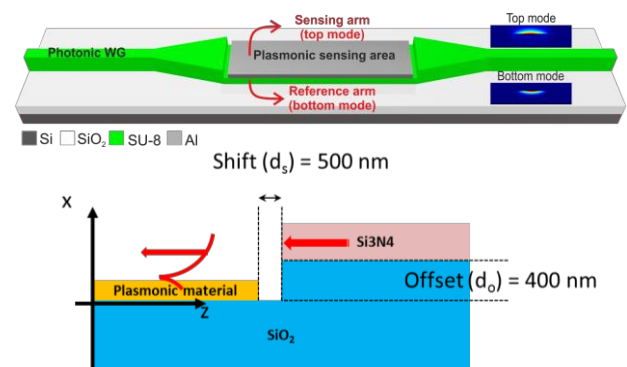


Figure 1 : Bi-modal plasmo-photonic refractive index sensor based on a single arm MZI waveguide [3].

We have also initially studied the influence of different metals on the damping distance of the plasmon in a dielectric-loaded surface plasmon polariton waveguide (DLSPPW) [6]. Although Al has inferior performance as compared to Au or Cu, it has the advantage of being C-MOS compatible and therefore was chosen in our projects which are application-oriented.

In parallel we are developing another concept to excite the waveguides which greatly simplifies the excitation configuration and reduces the fiber-alignment constraints. This is based on integrating nano-light-sources directly deposited on the chip and coupled to the waveguides. We have demonstrated the potentiality of this concept previously with CdS/CdSe colloidal quantum dots (QDs) emitting in the visible [7]. In this work we use PbS@CdS QDs patches deposited after a lithography and lift-off process. They emit 1550 nm fluorescence by simply

illuminating the QDs areas with a pumping beam from a UV led connected to a fiber above the sample.

3. EXPERIMENTS / RESULTS

At the output end of the bi-modal waveguides, an optical system can be positioned to record the sensorgram. The GRACED sensors have already demonstrated sensitivities larger than 6000 nm/RIU [3,4]. Sensitivities continue increasing as the optimization of the fabrication progresses.

Concerning the development of the QDs based excitation concept, an example of structure we have developed is shown in fig.2, a spiral waveguide with encapsulated QDs shaped in a circular area illuminated by the pumping beam. This design appears to be efficient in cumulating the fluorescent photons from the quantum dots situated along the spiral path and to couple them into the waveguide mode. The infrared image in fig.2 shows effectively the coupling through the grating coupler situated at the right end of the structure. The encapsulated configuration shows much better performance than the configuration where the QDs are deposited on top of the waveguide [8]. These first positive results show promise for further development.

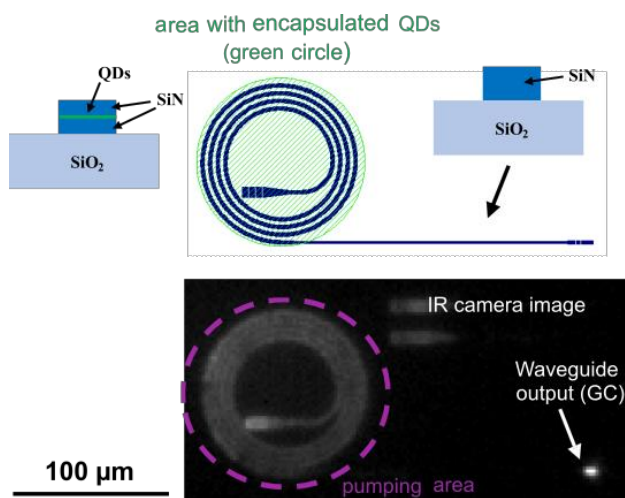


Figure 2 : Spiral waveguide structure contained in a ~110 μm circle where encapsulated QDs are pumped to emit IR light. Light is partly coupled into the straight waveguide terminated by a grating coupler redirecting light towards the IR camera (1550 nm).

These results have been obtained with SiN deposited by PVD. We have also shown that TiO₂ could be used instead of SiN, although the optical performance of TiO₂ still lag behind those of SiN in terms of loss. Although it is a promising photonic material for PICs, TiO₂ still needs further development [9].

In order to realize a true sensing experiment, we have developed microfluidic modules (MFMs) adapted to our sensor chips (see fig.3). We have shown the possibility to align up to 8 independent microchannels with several tens of plasmonic sensors into a 20x20 mm² chip. We have

developed a reversible system in which the chip can be easily exchanged and clamped mechanically with the MFM, as shown in the bottom right image of the figure, which makes it a convenient setup for research and development purposes. We also have the possibility to align and bond them together permanently without affecting the functionalized antibodies deposited at the surface of the chip. This scheme is interesting if a disposable chip+MFM is preferred for easier handling.

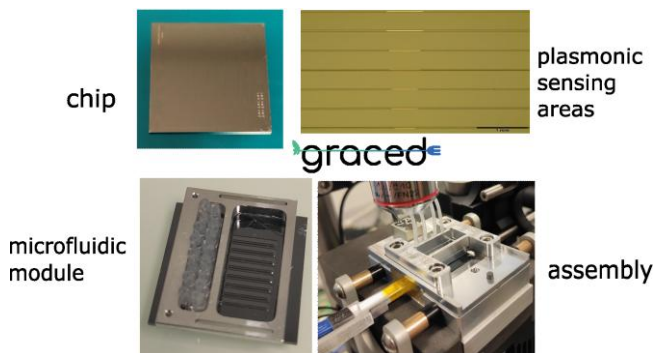


Figure 3 : GRACED biosensor chip based on plasmo-photonic waveguide sensor assembled with microfluidics [10]

4. REFERENCES

- [1] <https://graced.tech/wp-graced/> and <https://icb.u-bourgogne.fr/actualites-fr/projet-plasmofab-la-technologie-plasmonique-au-coeur-des-puces-hautes-performances/>
- [2] E. Chatzianagnostou et al. SPIE Proceedings Vol. 10921, Integrated Optics: Devices, Materials, and Technologies XXIII (2019)
- [3] K. Fotiadis et al., ACS Photonics, 10, 2580-2588 (2023)
- [4] O. Bhalerao et al. Submitted to Optics Express (2024)
- [5] L. Markey et al. Oral presentation at conference JNTE-2019
- [6] J.-C. Weeber et al. Opt. Express 25,1, pp.394-408 (2017)
- [7] J.-C. Weeber et al., Nanophotonics 9, pp.1411-1423 (2020).
- [8] L. Markey, to be presented at conference MNE-2024 (poster)
- [9] A. Andrieux et al. Materials, MDPI, 15 (7), pp.2578 (2022)
- [10] L. Markey et al. conference JNTE-2022 (poster)

BOITES QUANTIQUES ET RESONATEURS HYBRIDES POUR LES DISPOSITIFS QUANTIQUES AUX FREQUENCES THZ

S. Messelot¹, T. Apretna¹, S. Coyemans¹, M. Delbecq¹, J. Tignon¹, S. Dhillon¹, F. Carosella¹, R. Ferreira¹, E. Lhuiller², T. Kontos¹, J. Mangeney¹

¹ *Laboratoire de Physique de l'Ecole normale supérieure, ENS, Université PSL, CNRS, Sorbonne Université, Université Paris-Diderot, Sorbonne Paris Cité, Paris, France*

² *Sorbonne Université, CNRS, Institut des NanoSciences de Paris, 4 place Jussieu, 75005 Paris, France*

* E-mail: juliette.mangeney@phys.ens.fr

RESUME

Dans cet exposé nous présentons le potentiel des boîtes quantiques en graphène et en HgTe, ainsi que des résonateurs hybrides basés sur un couplage ultra-fort entre une cavité Tamm et un métamatériau à circuits LC, pour la réalisation de dispositifs quantiques THz innovants.

également étudié une double boîte quantique de graphène dans une architecture de transistor à un seul électron. En utilisant des mesures de transport à basse température, nous démontrons une fréquence de résonance entre les états antisymétrique et symétrique de la double boîte quantique de 0,14 THz. Ainsi, la double boîte quantique de graphène agit comme un système à deux niveaux dans la gamme spectrale THz, ce qui est très prometteur pour la réalisation de dispositifs quantiques THz.

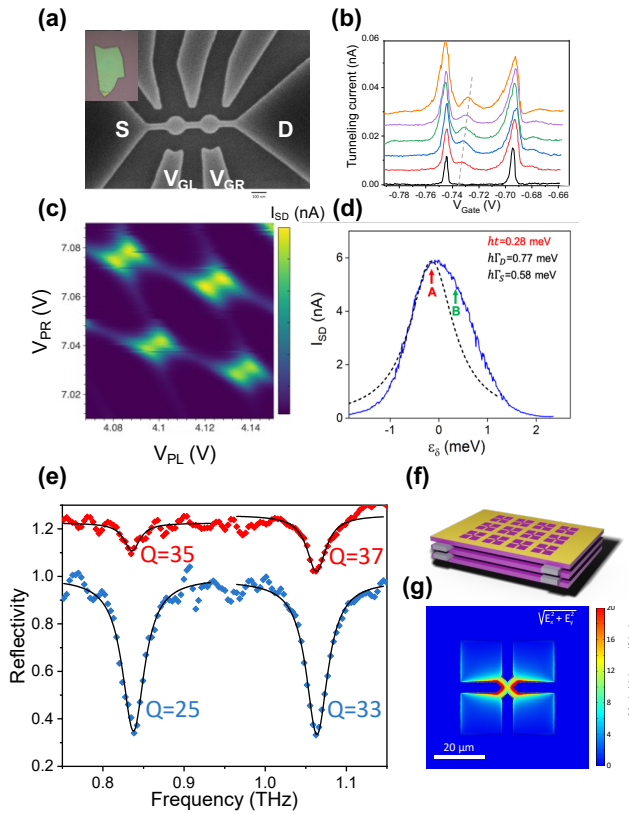
1. INTRODUCTION

À ce jour, les technologies quantiques ont connu essor considérable dans les domaines micro-ondes et optiques, alors que le potentiel de la gamme spectrale THz est resté inexploité. Pourtant, l'utilisation de ces fréquences pourrait offrir de nombreux avantages, notamment une sécurité accrue des communications sans fil via la cryptographie quantique, ainsi qu'une augmentation de la température de fonctionnement des qubits à l'état solide. Une approche prometteuse pour accompagner le développement de la technologie quantique THz consiste à explorer les boîtes quantiques comme matériau actif et les résonateurs THz pour le contrôle de l'interaction lumière-matière.

Avec l'objectif de coupler ce système à deux niveaux à un résonateur pour contrôler l'interaction lumière-matière, nous présentons dans un deuxième temps nos travaux sur les résonateurs hybrides THz. Pour une efficacité d'interaction optimale avec un matériau 'discret' comme une double boîte quantique de graphène, les résonateurs THz doivent associer un facteur de qualité élevé et un volume de mode très faible. En effet, la dimension typique de la boîte quantique est 10^3 fois inférieure à la longueur d'onde à 1 THz. Cependant, dans la gamme spectrale des THz, il est très difficile de réaliser des résonateurs qui concilient un faible volume de mode et un facteur de qualité élevé. Pour relever ce défi, nous étudions des résonateurs THz hybrides originaux basés sur un couplage ultra-fort entre une cavité Tamm [3] et un métamatériau à circuits LC. Notre étude démontre que ces résonateurs hybrides permettent de concilier des facteurs de qualité relativement élevés, $Q=37$, avec un volume de mode très sous-longueur d'onde, $V \sim 3,2 \times 10^{-4} \lambda^3$, grâce à une suppression quasi-complète des pertes radiatives [4]. Ces résonateurs hybrides sont des ingrédients clés pour le développement d'émetteurs et de détecteurs THz à photon unique et pour l'exploration de l'interaction lumière-matière avec un haut degré de cohérence dans la limite d'un électron.

2. RESULTATS

De par son absence de bande interdite, le graphène est un candidat de choix pour le domaine fréquence THz. Dans cet exposé, nous présentons tout d'abord le potentiel des boîtes quantiques de graphène pour la réalisation de dispositifs quantiques THz. Nous avons fabriqué des transistors à un seul électron composé d'une boîte quantique unique de graphène, de diamètre ~ 100 nm, encapsulée par des couches de hBN [1]. Nous avons mesuré le transport à basse température à travers ces transistors sous illumination THz cohérente pour sonder l'interaction de la boîte quantique de graphène avec un champ électrique THz dans le régime quantique. Nous mettons en évidence un très grand moment dipolaire, $d \approx 230$ nm, ce qui ouvre la voie au couplage lumière-matière ultra-fort à un seul électron [2]. Nous avons



- [2] S. Messelot *et al.*, *Phys. Rev. Res.* **4**, L012018 (2022).
 [3] S. Messelot, *et al.*, *ACS Photonics* **7**, 2906 (2020).
 [4] S. Messelot *et al.*, *Photon. Res.* **11**, 1203 (2023).
 [5] T. Apretna, *et al.*, *Nanophotonics* **10**, 2753 (2021).
 [6] T. Apretna *et al.*, *App. Phys. Lett.* **121**, 251101 (2023).

Figure 1 : (a) Image SEM d'une double boîte quantique de graphène. (b) Courant tunnel à travers une boîte quantique de graphène sous illumination THz. (c) Diagramme de stabilité d'une double boîte quantique de graphène. (d) Courant à travers une double boîte en fonction de la différence d'énergie entre les niveaux de chaque boîte. (e) Spectre en réflexion des résonateurs hybrides. (f) Schéma d'un résonateur hybride. (g) Profil spatial du champ électrique THz dans le résonateur hybride.

Enfin, nous présentons des propriétés optiques d'une autre famille de boîtes quantiques, les nanocristaux de HgTe. Nos études révèlent une large absorption intrabande THz de ces boîtes quantiques, une durée de vie des porteurs hors d'équilibre de la dizaine de ps [5] et une émission THz cohérente lorsque les boîtes quantiques sont excitées par des impulsions optiques femtosecondes [6].

4. CONCLUSIONS

Aujourd'hui, les systèmes quantiques dans la gamme spectrale THz en sont encore à leurs balbutiements, principalement parce que la technologie THz est beaucoup moins mature que celle des domaines des micro-ondes et de l'optique. Nos études démontrent que les boîtes quantiques couplées à des résonateurs THz sont des systèmes prometteurs pour le développement de dispositifs quantiques THz innovants.

4. REFERENCES

- [1] E. Riccardi *et al.*, *Nano Lett.*, **20**, 5408 (2020).

Papiers invités
Jeudi 3 octobre

PHOTO-ELECTROCHEMISTRY WITH III-V/SI SEMICONDUCTORS FOR COST-EFFICIENT SOLAR WATER SPLITTING

C. Cornet^{1,*}, H. V. Le¹, B. B. Koumba¹, G. Loget², B. Fabre², L. Largeau³, G. Patriarche³, N. Bertru¹ and Y. Léger¹.

¹ Univ Rennes, INSA Rennes, CNRS, Institut FOTON – UMR 6082, F-35000 Rennes, France

² Univ Rennes, CNRS, ISCR (Institut des Sciences Chimiques de Rennes) – UMR6226, F-35000 Rennes, France

³ Center for Nanoscience and Nanotechnology, C2N UMR 9001, CNRS, Université Paris Saclay, Palaiseau, France.

*E-mail: Charles.cornet@insa-rennes.fr

ABSTRACT

In this contribution, we report on the recent achievement of epitaxial III-V/Si photoelectrodes for solar hydrogen production. After having recalled the motivation for producing hydrogen from renewable energies, the basic concepts of electrochemistry will be first introduced, including overpotentials, catalysis and associated challenges. The physics of photoelectrochemical cells will then be explained. Finally, results obtained about the characterization of III-V/Si photoelectrodes will be discussed in terms of stability, performance and cost.

1. INTRODUCTION

One of the most important problems facing humanity nowadays is the production and storage of clean, renewable, and low-cost energy. Just like photosynthesis that converts solar energy into chemical energy, solar photoelectrochemical (PEC) cells directly store solar energy into hydrogen fuel, which could potentially solve the aforementioned issues [1,3]. Developing stable, cost-efficient, and high yields photoelectrodes for PEC cells is thus an essential step of this research field. Amongst the promising materials considered for photoelectrodes, group III-V semiconductors are quite appealing as they have been intensively studied for photovoltaic and photonic applications. Integrating III-V semiconductors on Si wafers is an economically appealing approach for solar devices [4], as III-V substrates are ten times more expensive than common Si wafers. The development of III-V/Si photoelectrodes is thus considered as a promising route toward practical solar hydrogen production.

2. GENERAL PRINCIPLE OF PHOTO-ELECTRO-CHEMISTRY

Here, general concepts and characterization tools used in electrochemistry are first reviewed for metallic electrodes. The basic requirements to split the water molecule and drive the hydrogen and oxygen evolution reactions are then explained. The need to reduce the

overpotentials and their possible origin is highlighted, and the concept of catalyst defined. The physics of the semiconductor/electrolyte junction is then discussed, and it is shown how the solar radiation can lead to a photopotential, and thus to unassisted water splitting. Finally, the different approaches for solar hydrogen production are exposed. On this basis, it is shown why the development of III-V/Si photoelectrodes is appealing for solar water splitting (Fig. 1).

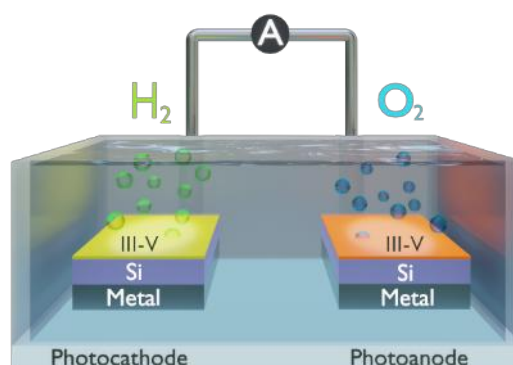


Figure 1 : Principle of a Photo-Electro-Chemical cell composed of III-V/Si photoelectrodes.

3. RESULTS

Performances of recently developed III-V/Si photocathodes and photo-anodes are thus presented, in terms of performance (onset potentials, maximum photo-current), stability, and cost. It is shown that the developed photocathodes present interesting features, such as ambipolar operation,[5] or dual bandgap operation [6]. The concept of bandlineups engineering with GaAs_xP_(1-x)/Si is also demonstrated [7]. The low stability of cathodes however motivates the use of TiO₂ as a protecting layer.[8] It is then shown that, on the contrary, GaAs/Si photocathodes remain stable over at least 120 hours, and allow effective hydrogen production, with a massive onset potential shifting of 0.6 V, when a thin Pt catalyst is used.[9]

4. CONCLUSIONS

In conclusion, we here show characterizations of individual III-V/Si photoelectrodes and assess their potential for robust, cost-efficient and autonomous photoelectrochemical cells. This work opens the route toward practical solar hydrogen production.

The authors acknowledge RENATECH (French Network of Major Technology Centers) within Nanorennnes and C2N-PANAM platform for technological support. This research was supported by the “France 2030” program of the French National Research Agency, NAUTILUS Project (Grant no. ANR-22-PEHY-0013), the EQUIPEX NANOFUTUR (ANR-21-ESRE-0012), Rennes Métropole and Région Bretagne.

4. REFERENCES

- [1] Fujishima, A. & Honda, Nature 238, 37–38 (1972).
- [2] Walter, M. G. et al. Chem. Rev. 110, 6446–6473 (2010).
- [3] Lin, F. & Boettcher, S. W. Nature Mater 13, 81–86 (2014).
- [4] Ramsden, T. *et al.* NREL/TP-560-46267, (2009).
doi: 10.2172/965528.
- [5] Chen, L. *et al.* Advanced Science 9, 2101661 (2022).
- [6] Piriyeve, M. *et al.*, Solar Energy Materials and Solar Cells 251, 112138 (2023).
- [7] Piriyeve, M. *et al.* J. Mater. Chem. C 12, 1091–1097 (2024).
- [8] Alqahtani, M. *et al.* Sustainable Energy & Fuels 3, 1720–1729 (2019).
- [9] H. V. Le *et al.*, submitted (2024).

III-V LASER INTEGRATION ON SILICON BY DIRECT BONDING AND REGROWTH FOR HIGH-SPEED OPTICAL TELECOMMUNICATIONS

Claire Besancon^{1,*}, Delphine Néel¹, Joan Manel Ramírez¹, Giancarlo Cerulo¹, Loïc Sanchez², Frank Fournel² and Jean Decobert¹

¹ *III-V Lab, a joint lab of Nokia Bell Labs, Thales Research and Technology and CEA-LETI, Palaiseau 91767, France*

² *Univ. Grenoble Alpes, CEA LETI, 38000 Grenoble, France*

* claire.besancon@3-5lab.fr

ABSTRACT

In this contribution, we report III-V laser integration on silicon by InP-seed bonding and regrowth for high-speed optical telecommunications. The key steps of this emerging III-V/Si integration scheme and associated challenges, such as hydrogen desorption and thermal strain induced on the III-V stacks at growth temperature, will be presented. Finally, results obtained from laser fabricated from III-V μm -regrowth on a planar InP-seed layer bonded on a SOI wafer will be discussed according to the state of the art.

1. INTRODUCTION

Data traffic exponential growth has pushed forward the demand for high speed, high performance, energy-efficient and cost-effective data transmission [1]. Due to the large number of transmitters required, the current InP-monolithic integration platform used to fabricate photonic integrated circuits (PICs) is challenged [2]. The silicon photonics platform holds a great promise to ensure PICs fabrication scalability since it allows benefitting from the mature complementary metal oxide semiconductor (CMOS) industry [3].

However, it is highly challenging to fabricate a laser source only from Si due to the intrinsic nature of its indirect bandgap. For long-wavelength components such as 1.3 μm and 1.55 μm targeted in telecommunication-oriented applications, the heterogeneous silicon technology using a bonding process has the capacity to integrate III-V materials onto silicon or SOI (Silicon-On-Insulator) wafer with optimal III-V material quality [4]. In this approach, the III-V material stack is grown on an InP wafer in a single epitaxial step prior to the direct bonding process onto the silicon wafer. No additional epitaxial regrowth steps are implemented after the bonding step.

Considering the much larger epitaxial toolkit available in the conventional monolithic III-V platform, where several epitaxial steps are often implemented, this represents a significant limitation. As an example, lasers with buried heterostructure are highly beneficial, compared to ridge waveguide lasers, to reduce driving current and power consumption [5]. In this context, an advanced heterogeneous scheme based on wafer-seed-bonding and epitaxial regrowth has emerged. The latter allows us to combine the advantages of the monolithic III-

V/Si approach without the two major dislocation origins (APDs, lattice mismatch) thanks to the bonding process. The regrowth capability also gives access to the large epitaxial toolkit available in the conventional InP monolithic platform, where several epitaxial steps are often implemented [6]–[8]. Moreover, the possibility to use a thin bonding layer enables efficient light-coupling and therefore complex III-V/Si PICs [9].

2. GENERAL CONCEPT

The advanced heterogeneous integration scheme is based on the regrowth on an InP seed layer bonded onto silicon (InPoSi). The key steps of the fabrication process are presented in Figure 1. First, a 300 nm-thick InGaAs sacrificial layer followed by a 100 nm-thick InP bonding layer are grown on an InP substrate (Figure 1a). In the meantime, a SOI wafer is fabricated at CEA-LETI's 200 mm line using a standard process on a SOI wafer with a 500 nm-thick silicon top layer in our approach [10]. The dimensions of the waveguides are optimized for the evanescent light-coupling with III-V waveguides aligned on top of them. The III-V wafer is then bonded onto the SOI wafer using a hydrophilic bonding process (Figure 1b). The InP substrate as well as the InGaAs sacrificial layers are then selectively removed by chemical etchings (Figure 1c). Then, a typical laser structure composed of a AlGaInAs MQW-based active structure surrounded by n and p-doped InP cladding layers is grown on InPoSi wafer (Figure 1d). Finally, laser fabrication is done on InPoSi.

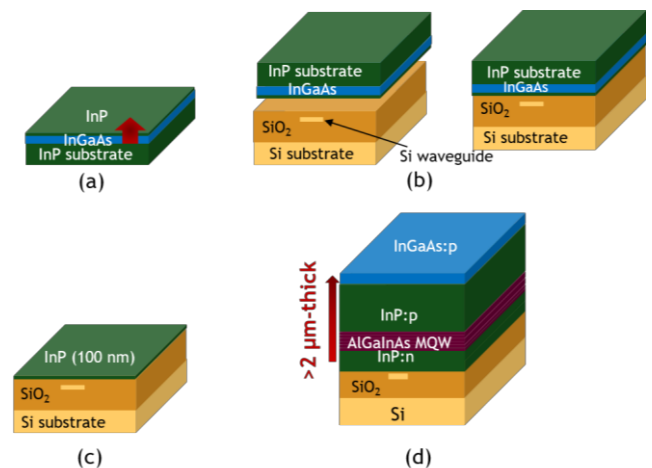


Figure 1: InP-on-silicon fabrication process and regrowth

3. RESULTS

A compressive thermal strain is induced at growth temperature on the III-V grown material on InPoSi because of the difference of thermal coefficients between InP and silicon [11]. The latter was successfully assessed thanks to in-situ curvature measurement performed during growth [12]. Based on this integration scheme, key laser demonstrations were achieved. Similar performance were obtained from a 3 μm -thick AlGaInAs MQW-based laser structure grown on InPoSi and the same structure grown on InP wafer as a reference [13]. Then, a III-V gain region coupled to Si-photonics cavities to fabricate a III-V/Si DBR laser was achieved using this integration scheme [14]. Finally, several key InP-based regrowth technologies such as Selective Area Growth (SAG) [15] and Semi-Insulating Buried Heterostructure (SIBH) were developed on InPoSi [16].

4. CONCLUSIONS

In conclusion, we here show key demonstrators based on InP-seed bonding and MOVPE regrowth. These results show the potential of combining the access to the large epitaxial toolkit available in the conventional InP monolithic platform with efficient light-coupling to Si-photonics circuitry, allowing for high performance III-V/Si PICs for high-speed telecommunications.

4. REFERENCES

- [1] "Cisco Global Cloud Index: Forecast and Methodology - 2018–2023 White Paper," 2020.
- [2] M. Smit, K. Williams, and J. Van Der Tol, "Past, present, and future of InP-based photonic integration," *APL Photonics*, vol. 4, no. 5, May 2019, doi: 10.1063/1.5087862.
- [3] D. Thomson *et al.*, "Roadmap on silicon photonics," *J. Opt.*, vol. 18, no. 7, p. 73003, 2016, doi: 10.1088/2040-8978/18/7/073003.
- [4] A. W. Fang, H. Park, O. Cohen, R. Jones, M. J. Paniccia, and J. E. Bowers, "Electrically pumped hybrid AlGaInAs-silicon evanescent laser," *Opt. Express*, vol. 14, no. 20, pp. 9203–9210, 2006.
- [5] K. Otsubo *et al.*, "1.3- μm AlGaInAs multiple-quantum-well semi-insulating buried-heterostructure distributed-feedback lasers for high-speed direct modulation," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 15, no. 3, pp. 687–693, May 2009, doi: 10.1109/JSTQE.2009.2015194.
- [6] V. Rustichelli *et al.*, "Monolithic integration of buried-heterostructures in a generic integrated photonic foundry process," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 25, no. 5, Sep. 2019, doi: 10.1109/JSTQE.2019.2927576.
- [7] F. Lemaitre *et al.*, "96 nm Extended Range Laser Source Using Selective Area Growth," in *European Conference on Optical Communication, ECOC*, 2018, doi: 10.1109/ECOC.2018.8535218.
- [8] J. Wallin, G. Landgren, K. Streubel, S. Nilsson, and M. Oberg, "Selective area regrowth of butt-joint coupled waveguides in multi-section DBR lasers," *J. Cryst. Growth*, vol. 124, pp. 741–746, 1992.
- [9] Y. Hu, D. Liang, and R. G. Beausoleil, "An advanced iii-v-on-silicon photonic integration platform," *Opto-Electronic Advances*, vol. 4, no. 9. Chinese Academy of Sciences, 2021, doi: 10.29026/oea.2021.200094.
- [10] B. Szlag *et al.*, "Hybrid III–V/Silicon Technology for Laser Integration on a 200-mm Fully CMOS-Compatible Silicon Photonics Platform," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 25, no. 5, pp. 1–10, Mar. 2019, doi: 10.1109/jstqe.2019.2904445.
- [11] K. Takeda, S. Matsuo, T. Fujii, K. Hasebe, T. Sato, and T. Kakitsuka, "Epitaxial growth of InP to bury directly bonded thin active layer on SiO₂/Si substrate for fabricating distributed feedback lasers on silicon," *IET Optoelectron.*, vol. 9, no. 4, pp. 151–157, 2015, doi: 10.1049/iet-opt.2014.0138.
- [12] C. Besancon *et al.*, "Epitaxial Growth of High-Quality AlGaInAs-Based Active Structures on a Directly Bonded InP-SiO₂/Si Substrate," *Phys. Status Solidi Appl. Mater. Sci.*, vol. 217, no. 3, 2020, doi: 10.1002/pssa.201900523.
- [13] C. Besancon *et al.*, "Comparison of AlGaInAs-Based Laser Behavior Grown on Hybrid InP-SiO₂/Si and InP Substrates," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 32, no. 8, pp. 469–472, Apr. 2020, doi: 10.1109/LPT.2020.2979254.
- [14] C. Besancon *et al.*, "AlGaInAs MQW Laser Regrowth on Heterogeneous InP-on-SOI: Performance for Different Silicon Cavity Designs," in *2021 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, 2021, pp. 1–3.
- [15] C. Besancon *et al.*, "Laser Array Covering 155 nm Wide Spectral Band Achieved by Selective Area Growth on Silicon Wafer," in *Proceedings of European Conference on Optical Communication (ECOC)*, 2020, pp. 1–4.
- [16] C. Besancon *et al.*, "AlGaInAs Multi-Quantum Well Laser on Silicon Achieved by Direct-Bonding and MOVPE Semi-Insulating Buried Heterostructure Regrowth," in *Compound Semiconductor Week 2023*, Jan. 2023, vol. 12, no. 1, pp. 1–2, doi: 10.3390/app12010263.

HETEROSTRUCTURES SEMICONDUCTEUR/MÉTAL/SUPRACONDUCTEUR PAR ÉPITAXIE

F. Semond ¹, A. Pedeche ¹, H. Rotella ¹, I. Florea ¹, P. Vennéguès ¹,
M-P. Chauvat ², M. Morales ², P. Ruterana ²,
N. Michel ³, N. Delpuech ³

¹ Université Côte d'Azur, CRHEA-CNRS, Sophia Antipolis, France

² CIMAP-ENSICAEN, Caen, France

³ 3-5Lab, Palaiseau, France

* E-mail: fs@crhea.cnrs.fr

RESUME

L'intérêt et les défis de fabriquer par épitaxie des hétérostructures hybrides semiconducteur/métal, semiconducteur/supraconducteur sont discutés. L'étude se focalise sur les hétérostructures combinant des semiconducteurs III-N et le nitrure de niobium (NbN) métallique à 300K et supraconducteur en dessous de 16K.

1. INTRODUCTION

Les semiconducteurs III-N (GaN, AlN, InN et leurs alliages) occupent aujourd'hui une place importante dans de nombreux domaines de l'industrie : l'éclairage (LED), l'affichage (μ LED), la conversion de l'énergie électrique et les communications radiofréquences (HEMT), ou encore la purification et la stérilisation des surfaces (LED UV). Ces succès remarquables sont intimement liés à la capacité à produire par épitaxie des hétérostructures III-N performantes et robustes. Est-il possible d'aller encore plus loin dans la réalisation d'hétérostructures en intégrant par épitaxie d'autres matériaux comme par exemple les nitrures de métaux de transition (TiN, ZrN, TaN, ScN, NbN, ...), c'est la question à laquelle tente de répondre la communauté des III-N [1].

2. DESCRIPTION DE L'ÉTUDE

L'étude se focalise sur le système III-N/NbN permettant de combiner les propriétés semiconductrices des III-N et les propriétés métallique ou supraconductrice du NbN. Les hétérostructures sont réalisées par épitaxie par jets moléculaires (MBE) sur substrat silicium. La qualité des matériaux et des interfaces est étudiée par microscopie électronique en transmission (TEM). L'étude ambitionne de démontrer plusieurs types de composants: le transistor à base métallique (MBT) [2], le transistor (HEMT) polarité azote [3], le détecteur de photon unique (SNSPD) [4] et la jonction Josephson (Qubit supraconducteur) [5].

3. RESULTATS

La MBE permet d'obtenir un bon contrôle de la phase et de la stœchiométrie du NbN épitaxié sur III-N. Cependant le système est relativement complexe et la formation des

interfaces III-N/NbN est délicate. Un résultat remarquable de cette étude est que le NbN permet d'épitaxier la polarité azote des matériaux III-N, ce qui ajoute de la complexité mais ouvre des opportunités intéressantes, comme par exemple la fabrication de transistors HEMT polarité azote. Des hétérostructures semiconducteur/métal/semiconducteur sont épitaxiées dans le but d'évaluer la faisabilité d'un transistor à base métallique (MBT) [2]. L'étude des propriétés de transport de la couche de NbN montre que la résistivité à 300K peut être bien inférieure à $100 \mu\Omega\cdot\text{cm}$ et que le NbN (phase cubique) est supraconducteur ($T_c \sim 12\text{K}$). Dans le domaine des technologies quantiques, des détecteurs de photons uniques de type SNSPD sont fabriqués sur substrat silicium via une couche tampon AlN [4]. L'apport de l'épitaxie pour le développement de la technologie SNSPD est discuté. Enfin, toujours dans ce domaine, l'intérêt de réaliser par épitaxie des jonctions Josephson NbN/AlN/NbN pour développer des Qubits supraconducteurs plus robustes sera discuté.

4. CONCLUSIONS

Des hétérostructures hybrides III-N/NbN combinant par épitaxie des propriétés semiconductrice, métallique et supraconductrice sont réalisées. Un fantastique terrain de jeu s'ouvre dans de nombreux domaines de la physique et des composants. Au-delà de la réalisation de nouvelles fonctionnalités, l'objectif sera aussi d'évaluer ce que l'épitaxie avec un contrôle ultime de la qualité des matériaux et des interfaces, des épaisseurs et des compositions peut apporter dans la réalisation de ces hétérostructures hybrides.

4. REFERENCES

- [1] Debdeep Jena *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. (2019)
- [2] <https://anr.fr/Projet-ANR-21-CE08-0037>
- [3] Weiyi Li *et al.*, IEEE Trans. Electron Devices (2023)
- [4] Adrian Iovan *et al.*, Appl. Phys. Lett. (2023)
- [5] Sunmi Kim *et al.*, Nature Communications Materials (2021)

The direct epitaxial growth of III-Vs on Silicon substrate

A. Gilbert¹, E. Tournié^{1,2}, G. Patriarche³, C. Cornet⁴, M. Ramonda⁵, L. Cerutti¹, M. Fagot¹,
A. Trampert⁶, K. Graser⁶, and J.-B. Rodriguez¹

¹ IES, Univ. Montpellier, CNRS, F-34000 Montpellier, France

² Institut Universitaire de France (IUF), F-75005 Paris, France

³ C2N, CNRS- Univ. Paris-Saclay, F-91120 Palaiseau, France

⁴ Univ. Rennes, INSA Rennes, CNRS, Institut FOTON – UMR 6082, F-35000 Rennes, France

⁵ CTM, Univ. Montpellier, F-34000 Montpellier, France

⁶ Paul-Drude-Institut für Festkörperphysik, Leibniz-Institut im Forschungsverbund Berlin e.V., Hausvogteiplatz
5-7, 10117 Berlin, Germany

*e-mail : jean-baptiste.rodriguez@cnrs.fr

Molecular Beam Epitaxy of III-V semiconductors on foreign substrates and in particular on Silicon has been an important topic since the 80's. From an application point of view, this monolithic approach would open a wide range of structure engineering possibilities by combining the advantages of the two type of materials. From a more fundamental perspective however, the epitaxy of III-V on group-IV substrates is considered to be very challenging due to the crystal structure differences. Indeed, III-Vs have a zinc blende structure and are grown on a diamond group-IV substrate, which leads to the formation of a high density of the so-called antiphase boundaries, due to the symmetry difference of the two crystals [1]. In addition, in most cases, there is a large lattice-mismatch between the two crystals, resulting in a very large dislocation density upon relaxation of the III-V layers. For this reason, the structural quality of the III-V layers was so poor for a long time that it was not possible to produce any high-performance device.

Much progress has been made in the last two decades, especially in the growth of GaAs and GaSb pseudo-buffers on silicon. Antiphase boundaries have been successfully buried even on very low miscut substrates, and the mechanism governing this process has been elucidated [2-3]. The dislocation density has been reduced but remains quite high. However, new ideas about the active region of the devices have made it possible to fabricate devices with performance as high as their counterparts grown on native substrates [4].

In this talk, we will review the latest developments in this field and present some future prospects for further integration with optical circuits towards the realization of complete photonic chips.

Acknowledgements : Part of this work was supported by the France 2030 program (Equipex EXTRA, ANR11-EQPX-0016, the Equipex+ HYBAT (ANR-21-ESRE-0026), BPI France (project HYQUALITY- DOS0188007/00), the ANR-DFG FILTER (ANR-20-CE92-0045), the ANR PIANIST (ANR-21-CE09-0020), the ANR NUAGES (ANR-21-CE24-0006) projects and the French Renatech network.

- [1] H. Kroemer, *Journal of Crystal Growth* **81**, 193 (1987).
- [2] A. Gilbert, M. Ramonda, L. Cerutti, C. Cornet, G. Patriarche, É. Tournié, and J. Rodriguez, *Advanced Optical Materials* **11**, 2203050 (2023).
- [3] M. Rio Calvo, J.-B. Rodriguez, C. Cornet, L. Cerutti, M. Ramonda, A. Trampert, G. Patriarche, and É. Tournié, *Advanced Electronic Materials* **8**, 2100777 (2022).
- [4] L. Cerutti, D.A. Diaz Thomas, J.-B. Rodriguez, M. Rio-Calvo, G. Patriarche, A.N. Baranov, and E. Tournié, *Optica*, 8 (11), 2021.

INGENIERIE NANOPHOTONIQUE PAR LITHOGRAPHIE PAR NANOIMPRESSION

Céline Chevalier^{1*}, Jean-Louis Leclercq¹, Huiru Ren¹, Cécile Jamois¹, Tam Nguyen¹, Emmanuel Drouard¹, Lydie Ferrier¹, Hai Son Nguyen¹, N. Crespo-Monteiro², Francis Vocanson², Yves Jourlin², Quang-Huy Do³, Johann Bouclé³, Bernard Ratier³, Rémi Antony³
Christian Seassal¹

¹ CNRS, INSA Lyon, Ecole Centrale de Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, CPE Lyon, INL, UMR5270, 69622 Villeurbanne, France

² LHC – Laboratoire Hubert Curien, CNRS UMR5516, Université Jean Monnet de Saint-Étienne Campus Manufacture, Saint-Etienne F-42000, France

³ XLIM UMR CNRS 7252, Université de Limoges, Limoges, France

* celine.chevalier@insa-lyon.fr

RÉSUMÉ

La lithographie par nanoimpression (NIL) est une technique de fabrication alternative aux techniques de lithographie standard, qui permet de créer des structures à l'échelle submicronique à l'aide de moules contenant les structures visées. Nous montrerons que cette technique est particulièrement pertinente pour la photonique, en permettant le contrôle et la manipulation de la lumière par structuration de la matière à ces échelles.

1. INTRODUCTION

La photonique offre des solutions pour améliorer et miniaturiser les composants optiques, tout en offrant des performances accrues en communication, imagerie, et traitement de l'information, voire en permettant de générer de nouvelles fonctions. Nous nous intéresserons en particulier à des concepts photoniques pour la collecte et le piégeage de la lumière incidente, ou le contrôle de l'émission du rayonnement, sur une plage spectrale étendue, du visible au proche et moyen infrarouge. Pour cela, nous développons des technologies de micro et nanostructuration. Après une introduction de notre méthodologie (modélisation / réalisation / caractérisation), nous ferons un focus sur des résultats de structures périodiques obtenues par NIL appliquées aux LEDs à base de pérovskites halogénées. La technologie NIL et les différents procédés seront également décrits.

2. DESCRIPTION DE L'ETUDE

Dans le domaine de la communication optique et le μ -affichage, les LEDs pérovskites halogénées sont des candidats prometteurs comme émetteurs de lumière ultra-compacts et à haute performance [1]. En l'espace d'une décennie, elles ont atteint des performances compétitives grâce à leur émission à bande étroite et à leur large gamme de couleurs [2]. Pour obtenir des émissions finement contrôlées, les réseaux de LEDs compactes (μ -LED) nécessitent un contrôle du rayonnement. Grâce à la

micro-nanostructuration, nous montrerons que ces LEDs à métasurface sont plus lumineuses et plus efficaces. Pour parvenir à ce résultat, nous avons utilisé la simulation électromagnétique pour concevoir des structures photoniques périodiques permettant le piégeage efficace de la lumière dans la gamme des UV. La préparation de couches pérovskites et leur micro-nanostructuration par NIL ont été optimisées.

Pour cette application ou d'autres tels que les photodétecteurs, le photovoltaïque ou encore les carburants solaires, les moules utilisés pour fabriquer les cristaux photoniques sont souvent de taille inférieure au cm, et ce d'autant plus que les nanostructures qu'ils contiennent sont complexes. Ces dimensions sont bien insuffisantes pour proposer des composants répondant au besoin. Pour répondre à ce problème, nous montrerons qu'il est possible d'utiliser le procédé NIL en mode "Step and Repeat" (S&R) pour réaliser des moules de plus grandes surfaces avec des valeurs de raccord de champ contrôlés à quelques centaines de nm.

3. RESULTATS

Les résultats obtenus et reportés sur la figure 1 par structuration de pérovskites démontrent le potentiel du contrôle fin du rayonnement dans les LED/ μ -LED pérovskites. La procédure complète de fabrication sera décrite.

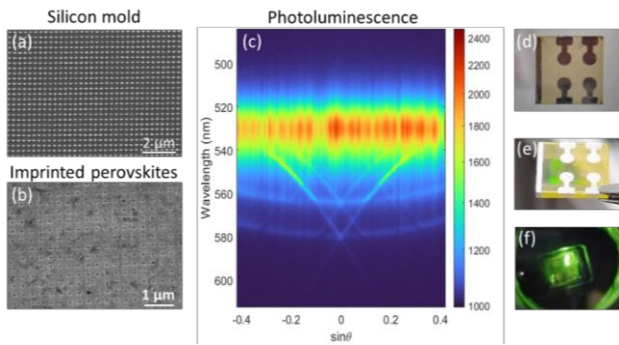


Figure 1 : Figure 1 (a) moule en silicium utilisé en NIL (période de 300 nm) et (b) pérovskites imprimées. (c) Signal PL résolu en angle des pérovskites imprimées. (d) LED de référence PeLED, (e) LED à métasurface de pérovskites, et (f) dispositifs fonctionnels.

Concernant la réalisation de moules de plus grande dimension, la figure 2 montre à titre d'illustration le résultat de surface nanostructurée 4 fois plus grande que la surface du moule. Les étapes technologiques seront également décrites.

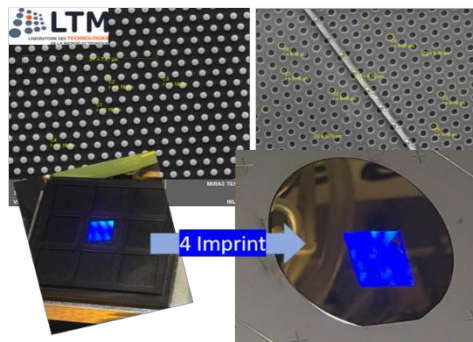


Figure 2 : Résultat de quatre séquences de NIL en mode S&R dans une résine PMMA avec une valeur de raccord de champ de 300nm. Résultats obtenus en collaboration le LTM.

4. CONCLUSIONS

Les travaux qui seront présentés ne sont qu'une partie de ce que la Lithographie par Nanoimpression permet. Les développements autour de cette technologie sont variés et concernent un grand nombre de matériaux et applications. Quelques autres exemples seront présentés comme des travaux sur matériaux sol-gel qui répondent au domaine de la détection pour la santé (systèmes de diagnostic biochimique).

Ces développements entrent dans le cadre des développements technologiques réalisés sur la plateforme Nanolyon, membre du réseau de plateforme technologique Renatech+ et dans le cadre du réseau RÉNIL.

4. REFERENCES

[1] D. Yang et al., "Toward Stable and Efficient Perovskite Light-Emitting Diodes," *Adv. Funct. Mater.*, vol. 32, no. 9, p. 2109495, Feb. 2022, doi: 10.1002/adfm.202109495.
 [2] X. Yang et al., "Towards micro-PeLED displays," *Nat. Rev. Mater.*, Jan. 2023, doi: 10.1038/s41578-022-00522-0.

PRESENTATION DU PEPR ÉLECTRONIQUE

Isabelle SAGNES¹, Thomas ERNST²

¹ *CNRS Ingénierie, 3 rue Michel-Ange 75016 Paris*

² *CEA-Leti, 17 avenue des Martyrs, 38000 Grenoble*

* isabelle.sagnes@cnrs-dir.fr

RESUME

Le programme PEPR (Programmes prioritaires de recherche et d'équipement) Électronique est une priorité stratégique nationale dont l'objectif est d'accélérer la croissance grâce à des solutions technologiques nouvelles et ce, de manière durable sur le plan économique comme sur le plan écologique. Coordonnés par le CNRS et le CEA, les principaux objectifs sont les suivants : Créer et soutenir des filières technologiques nationales basées sur des laboratoires académiques à fort potentiel industriel ; Stimuler le développement de technologies jusqu'à un niveau de maturité convaincant (TRL 4) ; Rassembler des compétences scientifiques dispersées sur le territoire ; Encourager la convergence matériau-composant-sous-système entre les équipes de recherche concernées. Cette présentation donnera un aperçu du programme et de ses ambitions.

Papiers invités
Vendredi 4 octobre

UNIPOLAR QUANTUM OPTOELECTRONICS FOR THERMAL INFRARED RANGE

A. Vasanelli¹, H. Dely¹, T. Bonazzi¹, D. Gacemi¹, P. Didier², M. Beck³, J. Faist³, K. Pantzas⁴, G. Beaudoin⁴, I. Sagnes⁴, F. Grillot² and C. Sirtori¹

¹ *Laboratoire de Physique de l'ENS, Département de Physique, École Normale Supérieure, Université PSL, Sorbonne Université, Université Paris Cité, CNRS, 75005 Paris, France*

² *Télécom Paris, Institut Polytechnique de Paris, LTCI, Palaiseau, France*

³ *Institute for Quantum Electronics, ETH Zürich, CH-8093 Zürich, Switzerland*

⁴ *Université Paris-Saclay, CNRS, Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies, Palaiseau, France*

* E-mail: angela.vasanelli@ens.fr

ABSTRACT

Free-space optical (FSO) communications in the mid-infrared transparency windows (4– 5 μm and 8– 14 μm wavelength regions) is emerging as a viable solution for high bitrate data transmission. In this work, we highlight the potential of unipolar devices embedded into metamaterials for single channel FSO communications at 9 μm wavelength. We demonstrate a data transmission link with a capacity of 68 Gbit/s.

1. INTRODUCTION

Free-Space Optics (FSO) has attracted interest as a possible solution to replace fiber connections whenever their installation is too expensive or not permanent. Remarkable achievements have been made in data rate transmission, reaching the terabits per second, particularly in the telecom wavelength range [1]. However, the thermal infrared domain, specifically between 8 μm and 14 μm , is very relevant for FSO applications particularly because of its atmospheric transparency and resilience in adverse atmospheric conditions.

Unipolar quantum devices, relying on optical transitions between electronic states confined in the conduction band of semiconductor quantum wells, operate in the thermal infrared domain. Due to the very short lifetime of the electrons in the excited states, unipolar quantum devices have a very large bandwidth, that can achieve 100 GHz [2,3]. Intraband quantum detectors [4,5], Stark modulators [6] and quantum cascade lasers [7] form a versatile platform of quantum unipolar devices in the mid-infrared spectral range, known under the name of Unipolar Quantum Optoelectronics (UQO).

In this work, we discuss the importance of metamaterials for improving the performances of UQO devices for FSO applications. We present a data transmission link with a capacity of 68 Gbits/s on a single channel [8].

2. DESCRIPTION OF THE DEVICES

In our experiment, free-space data transmission at 10 μm wavelength is demonstrated using a system entirely based on UQO devices. The system is composed of a quantum cascade laser, a quantum cascade detector, and an external Stark modulator.

Both the quantum cascade detector and the Stark modulator are fabricated on a metamaterial geometry [9,10]. The metamaterial architecture has two main advantages: it improves the coupling between free-space radiation and the absorbing medium and, due to its reduced electrical footprint, increases the electrical bandwidth. The metamaterial devices consist of a one-dimensional array of metal-semiconductor-metal stripe resonators, of period p . Each stripe, of width s and thickness H , contains an ensemble of doped quantum wells, playing the role of the device's active region. Each stripe behaves as a Fabry-Perot resonator, such that the stripe width sets the cavity resonance. The stripe thickness and the array period determine the coupling with free-space radiation. To ensure high-frequency operation for data transmission, the metamaterial array is coupled to a coplanar waveguide through an air bridge.

Coupled mode theory is used to accurately design the devices. For the metamaterial detector, the quantity to maximize is the quantum well absorptivity. On the contrary, for the Stark modulator, the variation of the total absorptivity of the metamaterial within a given voltage range has been maximized.

3. RESULTS

The metamaterial quantum cascade detector operates in photovoltaic mode, with a responsivity of 26 mA/W at room temperature and a frequency bandwidth of 12 GHz. The Stark modulator has a bandwidth of 9 GHz and a contrast of 28% for a modulation of 5.4 V peak-to-peak.

The devices are used for an FSO experiment. The beam emitted by a commercial quantum cascade laser is focused on the metamaterial Stark modulator. The reflected beam impinges on the QCD. An arbitrary waveform generator is connected to the modulator through an amplifier and a bias-tee, as well as a DC

power supply. We use pre-processing of the traces to be transmitted and post-processing of the received data sequences to improve the bitrate, with the same techniques widely employed in telecom data communications. We achieved a maximum bitrate of 68 Gbits/s with a bit error rate lower than 0.4%.

4. CONCLUSIONS

The use of metamaterials enables a significant enhancement of the functionality of unipolar devices. By using metamaterial-based quantum cascade detector and Stark modulator, we have demonstrated a single channel data transmission link, within the 8-14 μm atmospheric transparency window, with a capacity close to 70 Gbit/s.

Similar results have been recorded with a directly modulated quantum cascade laser and a metamaterial quantum well infrared photodetector [11].

These results have been obtained using standard protocols for data transmission which are well established in the telecom industry. To go further, semiconductor fabrication technologies used in telecom can be transferred to unipolar optoelectronics for the realization of photonic integrated circuits. Furthermore, wavelength and phase multiplexing can be implemented to exploit the system's full capacity.

4. REFERENCES

- [1] Y. Horst, B. I. Bitachon, L. Kulmer, J. Brun, T. Blatter, J.-M. Conan, A. Montmerle-Bonnefois, J. Montri, B. Sorrente, C. B. Lim, et al., *Light: Science & Applications* **12**, 153 (2023).
- [2] P. Grant, R. Dudek, M. Buchanan, and H. Liu, *IEEE photonics technology letters* **18**, 2218 (2006).
- [3] M. Hakl, Q. Lin, S. Lepillet, M. Billet, J.-F. Lampin, S. Pirotta, R. Colombelli, W. Wan, J. C. Cao, H. Li, E. Peytavit, S. Barbieri, *ACS Photonics* **8**, 464 (2021)
- [4] B. Levine, *Journal of applied physics* **74**, R1 (1993).
- [5] L. Gendron, M. Carras, A. Huynh, V. Ortiz, C. Koeniguer, and V. Berger, *Appl. Phys. Lett.* **85**, 2824 (2004).
- [6] H. Dely, T. Bonazzi, O. Spitz, E. Rodriguez, D. Gacemi, Y. Todorov, K. Pantzas, G. Beaudoin, I. Sagnes, L. Li, A. G. Davies, E. H. Linfield, F. Grillot, A. Vasanelli, and C. Sirtori, *Laser & Photonics Reviews* **16**, 2100414 (2022).
- [7] J. Faist, F. Capasso, D. L. Sivco, C. Sirtori, A. L. Hutchinson, and A. Y. Cho, *Science* **264**, 553 (1994).
- [8] T. Bonazzi, H. Dely, P. Didier, D. Gacemi, B. Fix, M. Beck, J. Faist, A. Harouri, I. Sagnes, F. Grillot, A. Vasanelli, and C. Sirtori, *APL Photonics* (in press)
- [9] D. Palaferri, Y. Todorov, A. Bigioli, A. Mottaghizadeh, D. Gacemi, A. Calabrese, A. Vasanelli, L. Li, A. G. Davies, E. H. Linfield, et al., *Nature* **556**, 85 (2018).
- [10] A. Bigioli, G. Armaroli, A. Vasanelli, D. Gacemi, Y. Todorov, D. Palaferri, L. Li, A. G. Davies, E. H. Linfield, C. Sirtori, *Appl. Phys. Lett.* **116**, 161101 (2020).
- [11] H. Dely, M. Joharifar, L. Durupt, A. Ostrovskis, R. Schatz, T. Bonazzi, G. Maisons, D. Gacemi, T. Salgals, L. Zhang, S. Spolitis, Y.-T. Sun, V. Bobrovs, X. Yu, I. Sagnes, K. Pantzas, A. Vasanelli, O. Ozolins, X. Pang, and C. Sirtori, *Nature Communications* **15**, 8040 (2024)

INTERFACE ENGINEERING FOR STABLE PEROVSKITE SOLAR CELLS

Philip Schulz¹¹ Institut Photovoltaïque d'Île-de-France (IPVF), UMR 9006, CNRS, Ecole Polytechnique - IP Paris, Chimie Paristech - PSL, Palaiseau, 91120, France

* E-mail: philip.schulz@cnrs.fr

RESUME

Hybrid organic inorganic metal halide perovskites (MHPs) denote a family of compound semiconductors, which established a novel class of optoelectronics, most prominently known for the perovskite solar cell. While the power conversion efficiency of these photovoltaic devices saw a steep rise in the past decade, tailoring the interfaces between the MHP film and charge transport layer became the major control lever to enhance performance and stability.¹ The goal of my talk is to give general insights into the interface and interlayer design of perovskite solar cells (PSC), as well as an overview of our recent results concerning the analytical approach to derive design guidelines for the cell architecture.

The use of classical interface characterization tools, i.e. photoemission spectroscopy to analyze the chemical and electronic properties of these interfaces, has been challenging due to many possible chemical reactions at the buried interfaces.^{2,3} For instance, it has been well documented that the optoelectronic properties of the MHP can be altered by the substrate (or selective contact) underneath,⁴ however so far, we do not dispose of any conclusive picture explaining this effect. We hence fabricated a functional lateral heterojunction device, which consists of a substrate with two laterally arranged selective contacts, onto which we deposited MHP films. We then used a series of photoemission measurements along with complementary experiments such as X-ray absorption spectroscopy, Kelvin probe force microscopy, and hyperspectral imaging, to measure how substrate selectivity is affecting the optoelectronic properties at the perovskite surface. We find evidence suggesting that the contact selectivity is inducing a carrier concentration gradient in the perovskite layer across the junction connected to the functionality of the lateral device opening an avenue for fundamental materials studies in *operando* approaches but also new device architectures including buried cells terminals.^{5,6}

Furthermore, I will present synchrotron- and lab-based hard X-ray photoelectron spectroscopy (HAXPES) experiments to address the particular chemistry of MHPs and oxide overlayers grown by atomic layer deposition on top. We find evidence for the formation of new chemical species (PbO, N and halide-containing compounds) and changes in the energy level alignment at the MHP/oxide interface.⁷

Eventually, I will give a general account on precautions that should be considered for the presented measurement

methodology along with our experience on data acquisition. This approach also enables the assessment of transient chemistry in MHP films as well as the observation of potentially defect-tolerant properties or self-healing capabilities.^{8,9}

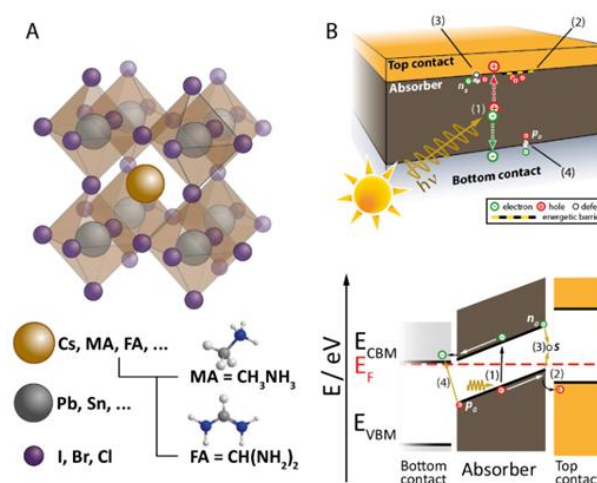


Figure 1 : Figure 1 – A) MHP chemical structure ABX₃, with (organic) cation on the A-site, metal cation on the B site and halide on the X-site. B) PSC device architecture (top) and energy diagram (bottom), with demonstration of interface-related loss mechanisms after (1) photoexcitation: (2) energy barriers, (3) defect recombination, and (4) back-recombination.

REFERENCES

1. J. Christians, P. Schulz et al. *Nature Energy* **2018**, 3, 68
2. S. Béchu, M. Ralaiarisoa, A. Etcheberry, P. Schulz, *Adv. Energy Mater.* **2020**, 201904007
3. P. Schulz, D. Cahen, A. Kahn, *Chem. Rev.* **2019**, 119, 3349
4. P. Schulz, L.L. Whittaker-Brooks, B. A. MacLeod, D. C. Olson, Y.-L. Loo, A. Kahn. *Adv. Mater. Interfaces* **2015**, 2, 1400532
5. S. Dunfield, A. Bojar, et al., *Cell Rep. Phys. Sci.* **2021**, 2, 100520
6. D. Regalado, A. Bojar, et al., *Prog. Photovolt.: Res. Appl.* **2021**, 30, 994
7. N. Mallik et al., *Nano Energy* **2024**, 126, 109582
8. M. Ralaiarisoa et al., *Small Methods* **2023**, 2300458
9. V. Milotti et al., *Small Methods* **2023**, 2300222

MATERIAUX OXYDES POUR LES FILTRES OPTIQUES EN COUCHES MINCES

Antonin Moreau^{*}, Cihan Koc, Olivier Hector, Fabien Lemarchand, Frédéric Lemarquis, Aude Lereu et Julien Lumeau

Aix-Marseille Université, CNRS, Centrale Marseille, Institut Fresnel, UMR 7249, 13013 Marseille, France

* antonin.moreau@fresnel.fr

RESUME

Nous présentons dans ce papier un résumé des principales propriétés de couches minces optiques à base d'oxydes (indice de réfraction, bandgap, propriétés mécaniques et optiques), ainsi que des avantages de celles-ci. Puis dans un second temps, nous présentons les applications de ces couches pour la réalisation d'empilements multicouches complexes dont les performances sont proches de celles théoriques.

1. PROPRIETES DES MATERIAUX OXYDES

Les filtres optiques interférentiels ou filtres en couches minces optiques sont des composants classiquement utilisés dans des systèmes optiques car ils permettent de contrôler les propriétés spectrales de la lumière. Du miroir à l'antireflet, ils permettent d'ajuster continuellement le facteur de réflexion (mais également de transmission) de différentes longueurs d'ondes ou bandes spectrales. Suivant le domaine spectral, différentes classes de matériaux existent. On peut citer principalement les fluorures et les métaux pour le domaine de l'ultraviolet, les fluorures, sulfures ou les chalcogénures pour l'infrarouge moyen et lointain. Ce mêmes matériaux peuvent également être utilisés dans le domaine visible et proche infrarouge mais ils ne sont que peu utilisés car ils présentent des propriétés mécaniques limitées et une faible tenue en environnement. Les matériaux oxydes quand à eux sont les matériaux de choix pour les applications proches UV, visible et proche infrarouge. Le tableau 1 présente un résumé des principaux matériaux oxydes utilisés dans la communauté avec leurs indices de réfraction et bandgap.

Tableau 1 : Indices de refraction et bandgaps de matériaux oxydes classiques déposés par évaporation assistée par plasma (PIAD) pulvérisation cathodique magnétron assistée par plasma (PARMS).

Material	SiO ₂	Al ₂ O ₃	HfO ₂	ZrO ₂	Ta ₂ O ₅	Nb ₂ O ₅	TiO ₂
n-PARMS	1.477	-	2.019	-	2.105	2.270	2.383
n-PIAD	1.475	1.615	1.982	2.033	2.102	2.206	2.250
Bandgap	7.5eV	6.5eV	5.5eV	4.6eV	4.2eV	3.5eV	-

La valeur exacte de ces propriétés dépend bien évidemment de la technologie de dépôt utilisée (évaporation ou pulvérisation).

Pour la réalisation de filtres complexes dans la bande 400-2500 nm, le couple Nb₂O₅/SiO₂ est le couple de choix car il permet de garantir un contraste d'indice le plus fort et des pertes faibles. Le couple Ta₂O₅/SiO₂ est quand à lui utilisé pour des applications de lasers de puissance continus infrarouges (1 ou 1.5 microns) car il permet de développer des composants à très faible absorption (inférieure à 1 ppm pour un miroir à fort coefficient de réflexion déposé par pulvérisation ionique). Enfin, le couple HfO₂/SiO₂ est généralement utilisé dès lors que les lasers utilisés sont impulsionnels ou que les applications sont dans le proche UV (300-400 nm).

Un des autres avantages principaux des couches à base d'oxydes sont leur stabilité. D'une part la stabilité de leur propriétés optiques. Nous avons illustré sur la Figure 1 la dispersion d'indice d'une couche de Nb₂O₅ déposée par pulvérisation cathodique magnétron au cours d'une dizaine d'années. On observe que les variations sont très inférieures à 0,01 et donc comparables aux erreurs liées à la détermination d'indice.

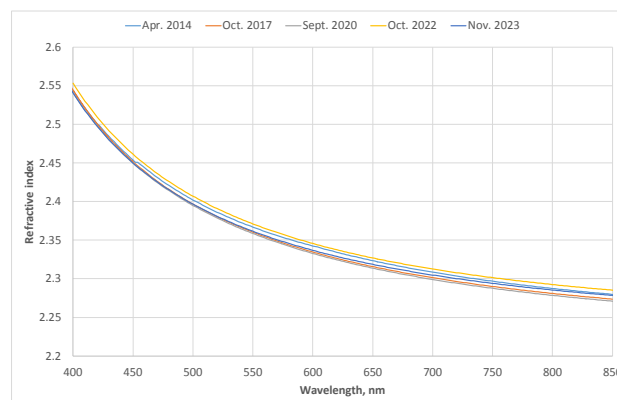


Figure 1 : Evolution temporelle de la dispersion d'indice de refraction de couches de Nb₂O₅ déposées par pulvérisation cathodique magnétron assistée par plasma.

Nous avons également démontré [1] il y a quelques années que les propriétés mécaniques des couches oxydes sont également stables et prévisibles. En effet, il est possible de caractériser les contraintes mécaniques induites dans ces couches avec une très grande précision de l'ordre de 5 MPa. Cette stabilité et capacité à

modéliser les déformations induites par ces contraintes a été mise à profit dans le projet ELI-NP pour fabriquer des miroirs [2] de diamètre jusqu'à 75 mm et ayant une planéité après dépôt meilleure que 15 nm (peak-to-valley). En effet, de telles performances ont été possibles par dépôt sur la face arrière d'un autre miroir ou d'une autre fonction optique dont les contraintes cumulées permettent de compenser la déformation induite sur la face avant.

Un dernier avantage de ces matériaux est leur tenue en environnement. En effet, des cyclages thermiques, en atmosphère humide ou sous vide n'affectent en aucun cas les couches ou composants réalisés à partir de ces matériaux, ce qui les rend compatibles notamment avec des applications spatiales.

2. EXEMPLE DE FILTRES EN COUCHES MINCES OPTIQUES

La stabilité, la répétabilité et la capacité à prédire les propriétés optiques de structures multicouches permet ainsi de réaliser des filtres complexes [2]. En effet, la combinaison de techniques de dépôt physique en phase vapeur stables telles que l'évaporation ou la pulvérisation ionique ou cathodique magnétron avec des méthodes de contrôles optiques in-situ, permettent à ce jour de réaliser des composants à base de couches oxydes à très forte complexité, c'est-à-dire dont le nombre de couches peut atteindre plusieurs centaines et avec des erreurs aléatoires équivalentes sur l'épaisseur de chacune des couches n'excédant pas quelques dixième de pourcent dès lors que les stratégies de contrôle optique sont adaptées à l'empilement. Pour illustrer cette remarque, nous avons représenté sur la Figure 2 un filtre dont chacune des faces ont été traités avec respectivement 170 et 92 couches.

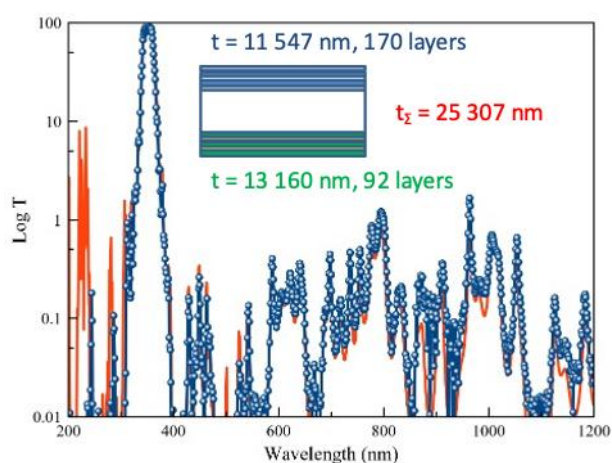


Figure 2 : Exemple de filtres optiques en couches minces complexe à base d'oxydes.

La transmission spectrale est représentée en échelle log et le désaccord théorie expérience n'excède pas quelques pourcents ce qui justifie la capacité à réaliser des fonctions optiques à performances ultimes.

3. CONCLUSIONS

Les couches minces optiques à base d'oxydes présentent un ensemble de propriétés optiques et une stabilité incomparables qui offrent de opportunités uniques pour la réalisation de filtres optiques interférentiels complexes. Ce sont ces matériaux qui sont utilisés dans des applications spatiales, semi-conducteurs... nécessitant un contrôles des propriétés spectrales dans les domaines proche-UV, visible et proche-IR.

4. REFERENCES

- [1] T. Begou and J. Lumeau, "Accurate analysis of mechanical stress in dielectric multilayers", *Optics Letters* 42(16), 3217–3220 (2017).
- [2] T. Begou, F. Lemarchand, F. Lemarquais, A. Moreau and J. Lumeau, "High performance thin-film components with stress compensation", *JOSA A* 36(11), C113–C121 (2019).

**HEXAGONAL BORON NITRIDE :
A LAMELLAR SEMICONDUCTOR WITH UNIQUE OPTICAL PROPERTIES**

Guillaume CASSABOIS ^{1,2}

¹ *Laboratoire Charles Coulomb, UMR 5221, CNRS-Université de Montpellier, 34095 Montpellier, France*

² *Institut Universitaire de France, 75231 Paris, France*

*E-mail: guillaume.cassabois@umontpellier.fr

Hexagonal boron nitride (hBN) is an ultrawide bandgap semiconductor with a large range of basic applications relying on its low dielectric constant, high thermal conductivity, and chemical inertness. The growth of high-quality crystals in 2004 has completely renewed interest in hBN. In the context of 2D materials research, hBN is used as an ideal 2D insulator, an excellent substrate for graphene and the best barrier material in van der Waals heterostructures. hBN is also emerging as an exciting material in its own right, offering novel material properties that enable a broad range of optical, electro-optical and quantum optics functionalities in various spectral domains. It is a natural hyperbolic material in the mid-infrared range, it hosts defects that can be engineered for single-photon emission and quantum sensing in the visible domain, and it exhibits exceptional performances in the deep-ultraviolet for a new generation of emitters and detectors in the UV-C.

In this talk, I will review the original optical properties of hBN in relation with its lamellar structure, with an emphasis on its unusual optical response in the UV-C range.

VAN DER WAALS EPITAXY OF TWO-DIMENSIONAL TRANSITION METAL DICHALCOGENIDES FOR SPINTRONIC APPLICATIONS

C. Jeco¹, K. Abd McKayumov¹, Q. Guillet¹, Martin Micica², S. Massabeau³, D. Dosenovic⁴, L. Vojacek¹, F. Ibrahim¹, C. Vergnaud¹, A. Marty¹, I. de Moraes¹, F. Bonell¹, J.-Y. Veuillen⁵, P. Mallet⁵, D. Jalabert⁴, H. Okuno⁴, J.-M. George³, H. Jaffrès³, M. Chshiev¹, S. Dhillon², M. Jamet¹

¹ *Université Grenoble Alpes, CEA, CNRS, G-INP, IRIG-Spintec, 38000 Grenoble, France*

² *Laboratoire de Physique de l'Ecole Normale Supérieure, ENS, Université PSL, CNRS, Sorbonne Université, Université de Paris, Paris, France*

³ *Laboratoire Albert Fert, CNRS, Thales, Université Paris-Saclay, 91767, Palaiseau, France*

⁴ *Université Grenoble Alpes, CEA, IRIG-MEM, 38000 Grenoble, France*

⁵ *Université Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, Institut NEEL, 38000 Grenoble, France*

* E-mail: matthieu.jamet@cea.fr

ABSTRACT

2D materials like transition metal dichalcogenides (TMDs) hold great promises for high performance and ultra-compact electronic, optoelectronic and spintronic devices. To date, most studies of TMDs have been performed on mechanically exfoliated flakes of micron size and their growth on wafer scale remains a challenge for the scientific community. Here, we demonstrate that molecular beam epitaxy (MBE) in the van der Waals regime allows for the growth on wafer-scale of single crystalline TMDs with large spin-orbit coupling (PtSe₂) and ferromagnetic properties for spin-orbitronic and spintronic applications.

1. INTRODUCTION

Transition metal dichalcogenides (TMDs) constitute a class of quantum materials that have gathered a tremendous interest from the solid-state physics community focusing on two-dimensional (2D) materials. They are considered for numerous applications in photonics and electronics [1] owing to their large exciton binding energies, transition from an indirect to a direct band gap in the monolayer limit [2] and high carrier mobility [3]. They also exhibit a strong spin-orbit coupling and a large variety of crystal symmetries, which are promising for spintronic applications [4]. Until recently, most studies on TMDs have been performed on micrometer-sized flakes mechanically exfoliated from bulk samples [5]. Extensive efforts are beginning to enable the growth of wafer-scale TMD single-crystal films [6]. The absence of lattice matched substrates and the high reactivity of chalcogen atoms prevent the epitaxial growth of monolayers using molecular beam epitaxy (MBE) on usual substrates (Si, Ge, GaAs...).

2. RESULTS

In this presentation, I will discuss our strategy to achieve the growth of single crystalline TMD monolayers by

vdW epitaxy [7]. In this regime, the substrate exhibits a van der Waals surface like graphene, mica or Se-passivated GaAs to limit the substrate-epilayer interaction. In a second part, I will present the vdW epitaxy of high spin-orbit coupling PtSe₂ on graphene for THz emission by spin to charge conversion [8]. Finally, I will demonstrate the clear advantages of MBE and vdW epitaxy to grow well-controlled 2D ferromagnets: Fe₃GeTe₂ with high Curie temperature close to room temperature [9] and Cr_{1+x}Te₂ with tunable magnetic properties by strain and by adjusting the stoichiometry [10,11].

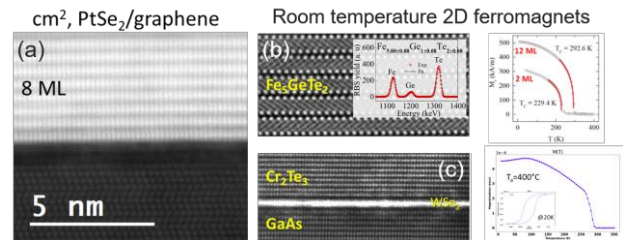


Figure 1: (a) Cross section scanning transmission electron microscopy (STEM) image of 8 ML of PtSe₂ epitaxially grown on graphene/SiC. (b) Cross section STEM image 5 ML of epitaxial Fe₃GeTe₂ (inset: RBS composition spectrum) and zero-field temperature dependence of magnetization for two different thicknesses. (c) Cross section STEM image of Cr₂Te₃ epitaxially grown on Se-passivated GaAs(111) and zero-field temperature dependence of magnetization after annealing at 400°C (inset: magnetization curve recorded at 20 K).

3. REFERENCES

- [1] S. Manzeli et al., *Nat. Rev. Mater.* **2**, 1 (2017).
- [2] K. F. Mak et al., *Phys. Rev. Lett.* **105**, 136805 (2010).
- [3] A. K. Geim and K. S. Novoselov, *Nat. Mater.* **6**, 183 (2007).
- [4] D. Xiao et al., *Phys. Rev. Lett.* **108**, 196802 (2012).
- [5] K. S. Novoselov, *Rev. Mod. Phys.* **83**, 837 (2011).
- [6] M. T. Dau et al., *ACS Nano* **12**, 2319 (2018).

- [7] C. Vergnaud et al., *Nanotechnology* **31**, 255602 (2020).
- [8] K. Abdukayumov et al., *Adv. Mater.* 2024, 36, 2304243.
- [9] M. Ribeiro et al., *npj 2D Mater. & Appl.* 6, 10 (2022).
- [10] Q. Guillet et al. *Phys. Rev. Mater.* 7, 054005 (2023).
- [11] Q. Guillet et al., *Appl. Phys. Lett.* 124, 202402 (2024).

Posters :

**Caractérisation structurale, optique et
électrique des semiconducteurs**

Caractérisation électrique de diodes Schottky à base d'oxydes LSMO/Nb:STO

Fallou Gning¹, Jeremy Blond¹, Victor Pierron¹, Laurence Méchin¹, Bruno Guillet¹

¹ Université Caen Normandie, ENSICAEN, CNRS, Normandie Univ., GREYC, UMR6072, F-14000 Caen, France.

fallou.gning@unicaen.fr, bruno.guillet@unicaen.fr

RESUME

Cette étude porte sur les hétérostructures à base de manganite de lanthane dopée au strontium $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ (LSMO) associée à du titanate de strontium dopé au niobium Nb:SrTiO_3 . Elle présente l'impact de la concentration en dopants Nb et de l'épaisseur de l'anode LSMO sur les caractéristiques de ces jonctions dont le comportement électrique s'apparente à celui d'une diode Schottky. Expérimentalement, la hauteur de barrière augmente lorsque la température augmente ou lorsque la concentration en Nb du substrat ou bien quand l'épaisseur de LSMO diminue. En revanche, le facteur d'idéalité reste proche de 1, signe d'une émission thermoionique dominante. Par rapport à la littérature existante, cette étude pointe l'effet de l'épaisseur de l'anode en LSMO sur les propriétés électriques de la jonction. Ces premiers résultats ouvrent la voie pour une exploration plus approfondie des mécanismes de conduction électrique dans ce type d'hétérostructures pour la conception de photodétecteur tout oxyde performant.

1. INTRODUCTION

Les hétérostructures à base d'oxydes constituent un système intéressant pour étudier les phénomènes physiques fondamentaux à l'interface des jonctions pour leurs propriétés électroniques uniques et leurs multiples applications [1]. L'objectif est de mieux comprendre ces hétérostructures afin d'explorer de nouvelles perspectives pour la conception d'un photodétecteur dans le spectre UV (largeur de bande interdite $E_{g(\text{Nb:STO})} = 3.25 \text{ eV}$ [2]) et proche infrarouge (hauteur de barrière Schottky $\Phi_{\text{Bn}(\text{LSMO/Nb:STO})} = 0.92 \text{ eV}$ [3]). Ce travail s'intéresse à l'analyse des paramètres des jonctions LSMO/Nb:STO. Il présente l'étude de l'impact du niveau de dopage en Nb du substrat Nb:STO et de l'épaisseur de la couche de LSMO sur les caractéristiques de ces jonctions en fonction de la température.

2. DESCRIPTION DE L'ETUDE

Le Nb:STO, un semi-conducteur monocristallin de type n, est utilisé comme substrat. Sur ce dernier, une couche mince de $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ (LSMO), connu pour être demi-métallique [1], est épitaxiée par ablation laser pulsée (PLD) à 730 °C. Une couche d'or (Au) d'environ 130 nm est ensuite déposée sur ce LSMO à l'aide d'un canon à ions à température ambiante.

Les quatre échantillons décrits dans le Tableau 1 ont été fabriqués grâce à des variations de l'épaisseur de LSMO et de la concentration de Nb dans le substrat. Avec des techniques de photolithographie UV laser et de gravures chimique et ionique, différentes jonctions ont été réalisées sur chaque échantillon. La couche d'or a été utilisée pour la reprise de contact sur l'anode de LSMO et une plaque de cuivre a servi à la reprise de contact cathodique en face arrière du substrat de Nb:STO avec collage à la laque d'argent comme illustré sur la figure 1(a). Ces jonctions présentent des géométries circulaires compactes ou ouvertes selon la différence entre le diamètre de LSMO (200 à 1660 μm) et celui d'or (160 et 1620 μm), visibles sur la figure 1(b).

Tableau 1 : Synthèse des échantillons réalisés

Nom	Substrat (Cathode)	LSMO (Anode)
A	Nb:STO 0.05%m	10 nm
B		20 nm
C	Nb:STO 0.01%m	10 nm
D		20 nm

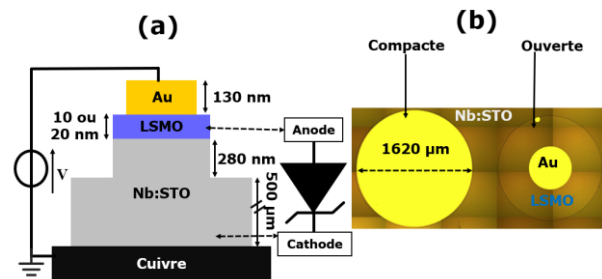


Figure 1 : (a) Schéma en coupe latérale de la jonction LSMO/Nb:STO avec son schéma électrique équivalent. (b) Exemples de différentes géométries des jonctions

3. RESULTATS ET DISCUSSION

Les caractéristiques courant-tension des hétérostructures LSMO/Nb:STO ont été mesurées sous pointes dans l'obscurité, pour des températures allant de 300 K à 380 K, à l'aide de l'analyseur paramétrique HP4156B. Pour comparer les densités surfaciques de courant J en fonction de la tension de polarisation V, ces mesures ont été normalisées par la surface effective de conduction de l'anode. Sur la figure 2(a), la même caractéristique J-V a été observée en polarisation inverse et à faible polarisation en direct sur différentes jonctions de l'échantillon B à 300 K. A partir de 0.2 V en polarisation

directe, le courant est fixé par la résistance électrique série [2,4] et ne dépend plus de cette surface effective. Cette surface correspond à la surface de LSMO pour l'échantillon B alors qu'elle correspond à la surface d'or pour les autres échantillons. Les caractéristiques présentées dans la figure 2(b), révèlent quant à elles i) un comportement redresseur, ii) une dépendance linéaire du logarithme de $|J|$ à faible polarisation directe et iii) une augmentation du courant de saturation inverse avec la température due à l'activation thermique des électrons. Ces observations, cohérentes sur tous les échantillons, confirment le comportement électrique de diode [2,4].

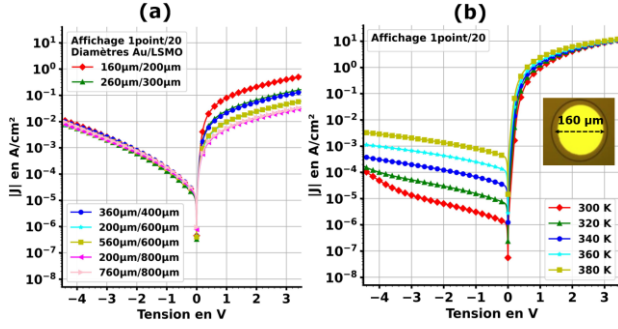


Figure 2: (a) Courbes J-V de différentes jonctions de l'échantillon B à 300 K. (b) J-V-T pour une diode de 160 μm/200 μm (diamètres Au/LSMO) sur l'échantillon D.

Les modèles théoriques, les plus adaptés pour décrire les caractéristiques typiques des diodes Schottky reposent sur l'émission thermoionique [3]. Les équations de ce modèle extraites de [2,4] ont été normalisées de sorte à extraire les paramètres Φ_{Bn} (hauteur de barrière) et η (facteur d'idéalité) par un simple ajustement linéaire, tel qu'illustré sur la figure 3(a). Dans ces équations, J_D (J_R) et V_D (V_R) sont respectivement la densité de courant surfacique et la tension de polarisation directe (inverse), k_B ($J.K^{-1}$) est la constante de Boltzmann, q (C) est la charge élémentaire, A^* est la constante de Richardson qui est supposée égale à 156 $A.cm^{-2}.K^{-2}$ pour du Nb:STO [3] et T (K) est la température. Ces paramètres Φ_{Bn} et η ont été extraits autour de 0 V, minimisant ainsi l'effet de force image dû au champ électrique appliqué. En prenant l'exemple de la diode de la figure 2(b), le facteur d'idéalité extrait proche de 1 suggère que la conduction thermoionique prédomine [1,2]. Alors que la même valeur $\Phi_{Bn} = 0.78$ eV a été obtenue en polarisation directe et inverse avec une incertitude en polarisation directe de ± 0.01 eV à 300 K. Cette valeur est comparable à la valeur publiée 0.92 eV pour une jonction LSMO/Nb:STO avec 0.01% de Nb à température ambiante [3].

$$\ln \left[\frac{J_D}{A^* T^2} \right] = -\frac{q\Phi_{Bn}}{k_B T} + \frac{qV_D}{\eta k_B T} \quad (\text{eq.1})$$

$$\ln \left[\frac{J_R}{A^* T^2 \left[1 - \exp \left(-\frac{qV_R}{k_B T} \right) \right]} \right] = -\frac{q\Phi_{Bn}}{k_B T} + \frac{qV_R}{k_B T} \quad (\text{eq.2})$$

La figure 3(b) illustre l'augmentation des hauteurs de barrière extraites en fonction de la température pour une jonction de géométrie compacte sur chacun des quatre

échantillons. Cette dépendance a été déjà observé à plus basses températures (100 K à 300 K) pour des jonctions LSMO/Nb:STO [3]. Les incertitudes calculées à partir de l'écart-type de la régression linéaire varient avec la température et sont plus faibles pour les échantillons A et C avec des couches de LSMO de 10 nm. Cette comparaison indique qu'un dopage plus faible est associée à une hauteur de barrière Φ_{Bn} plus élevée pour une même épaisseur de LSMO. En effet, un dopage faible signifie moins de porteurs libres dans le substrat et une zone de charge d'espace plus étendue ce qui augmente l'énergie nécessaire aux électrons pour traverser la jonction [1]. A dopage identique, Φ_{Bn} est légèrement au-dessus pour la plus fine couche de LSMO. Obtenir une hauteur de barrière Schottky plus élevée en réduisant l'épaisseur de l'anode en LSMO, diminuant ainsi le courant de saturation par émission thermoionique, est notamment intéressant dans le cadre du développement d'un photodétecteur utilisant un éclairage par la face avant, côté anode.

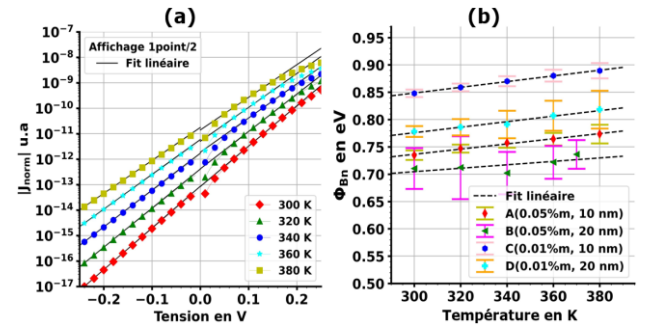


Figure 3 : (a) Courbes $|J|$ -V-T en échelle logarithmique normalisées avec eq.1 et eq.2 pour une diode de 160 μm/200 μm (diamètres Au/LSMO) sur de l'échantillon D, (b) Comparaison des barrières extraites en fonction de la température en polarisation directe.

4. CONCLUSIONS

Quatre échantillons comportant des hétérostructures ont été fabriqués à partir d'une couche mince de LSMO épitaxiée sur un substrat Nb:STO. La caractérisation électrique de ces jonctions de type diode Schottky a permis d'évaluer l'impact de la température, de la concentration en dopants Nb du substrat et de l'épaisseur de l'anode en LSMO. Une augmentation de la hauteur de barrière Φ_{Bn} avec la température ainsi qu'avec la diminution de la concentration en Nb du substrat ou de l'épaisseur de l'anode en LSMO a été observé alors que le facteur d'idéalité η reste proche de 1. Ces résultats ouvrent des perspectives pour une analyse quantitative approfondie des mécanismes de transport à l'interface de ces hétérostructures, en vue du développement d'une photodiode tout oxyde.

5. REFERENCES

- [1] F. M. Postma, *et al.*, *JAP*, 95,11 (2004)
- [2] S. Ramanathan, *Thin film Metal-Oxides*, Chap. 5 (2010)
- [3] K. G. Rana, *et al.*, *Sci., Rep.* 3, 1274 (2013)
- [4] S. M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*, Ed. 3 (2007)

IDENTIFICATION BY SIMULATION OF DARK CURRENT REGIMES IN GA-FREE T2SL INFRARED DETECTOR

Hassen Mezouar, Alain Michez, Matthias Tornay, Clara Bataillon and Philippe Christol

Institut d'Electronique et des Systèmes (IES)

*Université de Montpellier (UM), Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS),
Montpellier, 34095 France.*

* E-mail: hassen.mezouar@umontpellier.fr

ABSTRACT

This paper identifies the different dark current regimes at reverse voltage of Ga-free InAs/InAsSb type-II superlattice (T2SL) mid-wave infrared barrier photodetectors. Two cases are investigated using TCAD simulations. The dark currents are extracted and identified, first from the device unperturbed, then from the detector irradiated under a proton fluence of up to 8×10^{11} H⁺/cm². The differences between them are analyzed.

1. INTRODUCTION

The Ga-free InAs/InAsSb type-2 superlattice (T2SL) detector is a new high-performance cooled MWIR quantum detector that can be an alternative to the well-established current MWIR technologies (InSb and MCT). High-performance infrared (IR) detectors are required for many space applications, particularly those operating in mid-wave infrared (MWIR, 3-5 μ m) suitable for Earth observation from space. However, for space applications, the effect of radiation on the performance of these detectors must be evaluated. Indeed, space radiation is composed of different high-energy particles that can degrade the performance of the detector, and among these particles, protons are of significant concern, with energies potentially exceeding 100 MeV [1].

In this paper, TCAD simulations are performed to analyze the dark current behavior of Ga-free MWIR T2SL detectors, exhibiting a full cut-off wavelength of 5.5 μ m at 150K. First, simulations were carried out to compare the dark current density-voltage (J-V) measurement results obtained on a detector without irradiation. Then, the simulations allow to fit J-V curves of photodetector under proton irradiation of 60 MeV, with a fluence of 8×10^{11} H⁺/cm². For each case, the different dark current regimes of the devices are identified using the ECORCE software and the results are compared and discussed.

2. T2SL DETECTOR STRUCTURES

A T2SL structure is a stack of periodic layers with thicknesses in the order of a few nanometers. It is an artificial quantum structure composed of coupled InAs/InAsSb multi-quantum wells [2]. Carriers (electrons and holes) are then confined into energy minibands and optical absorption occurs between minibands.

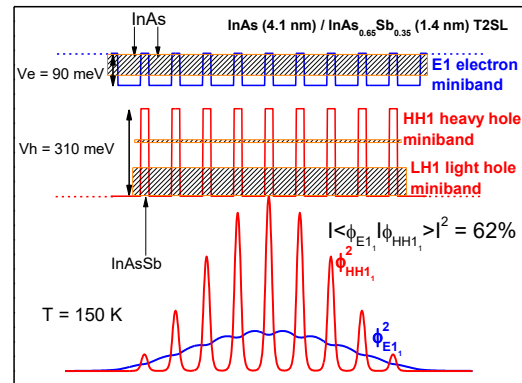


Fig. 1. InAs/InAs_{0.65}Sb_{0.35} T2SL structure with a period $p = 5.5$ nm : schematic type-II band alignment at $k_z = 0$. On the lower part, fundamental electron (E_1) and heavy hole (HH_1) presence probability densities associated to the first electron and heavy hole minibands are reported, showing a wavefunction overlap equal to 62%.

Figure 1 shows the band diagram of T2SL structure. We see electron (E_1) and hole (HH_1 and LH_1) minibands. We plotted the presence probability densities at $k=0$ using the envelope function approximation. We see that HH_1 heavy hole carriers are strongly confined in InAsSb quantum well. Contrary to E_1 electrons, which are delocalized all over the structure with a 3D dimensional behavior. Because of this configuration, we have an envelope wavefunction overlap of 62%. This parameter is important because it affects the absorption of T2SL materials and therefore the signal-to-noise ratio.

The T2SL is the absorbing zone of the photodetector that presents a barrier structure design (also called XBn or bariode [3]). In an ideal barrier structure, the dark current is limited only by diffusion. This is the main advantage of the barrier structure over the classical PN junction photodiode. Therefore, compared to the photodiode, the operating temperature of the bariode (XBn) is higher if it is correctly designed.

The XBn structure was grown by molecular beam epitaxy (MBE) on a GaSb substrate. The stacking is displayed in Fig. 2. It consists, from top to bottom, of a 100 nm InAs/InAs_{0.65}Sb_{0.35} T2SL top contact layer (TCL), a 200 nm AlAs_{0.09}Sb_{0.91} barrier layer (BL), a 3000 nm InAs/InAs_{0.65}Sb_{0.35} T2SL absorber layer (AL) and a 100 nm n-doped (Te) bottom contact layer (BCL) having the same composition as the AL. The 3 μ m thickness of AL is composed of 545 periods of InAs (4.1 nm) / InAsSb (1.4 nm) T2SL. The AL, TCL and BL are non-intentionally doped (nid) and the residual doping is

expected to be n-type for the two first layers and p-type for the third one, $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ and $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, respectively [4].

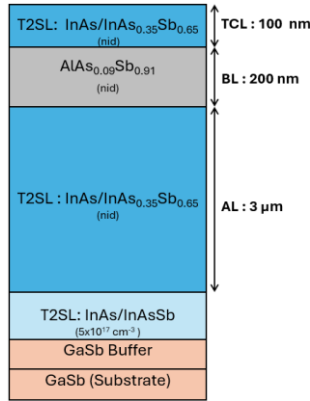


Fig. 2. Stacking of the XBn InAs/InAsSb T2SL structure on GaSb substrate TCL, BL and AL mean top contact layer, barrier layer and absorber layer, respectively

Figure 3 shows the normalized photoresponse spectrum recorded at 150K, where a full cut-off wavelength equal to $5.5 \mu\text{m}$ was extracted.

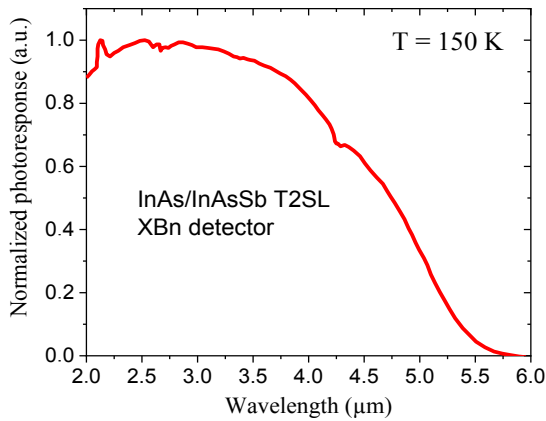


Fig. 3. Normalized photoresponse spectrum at $T = 150 \text{ K}$.

3. RESULTS

Figure 4 displays that the pre-irradiation dark current density at 150 K is composed of the diffusion current and the GR (generation-recombination) current.

Figure 5 shows the simulation results considering proton irradiation with a fluence of $8 \times 10^{11} \text{ H}^+/\text{cm}^2$. When protons pass through our components, traps in the TCL, BL and AL are generated, inducing FN (Fowler-Nordheim) and TAT (Trap Assisted Tunneling) currents. Therefore, final current is a combination of diffusion, GR, TAT and FN currents.

To fit the experimental curve after irradiation, the carrier lifetime is divided by a factor of 2. The doping concentration in AL increases and reaches $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$. In the barrier, we got hole traps with a trap density of $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ and a trap energy level of $E_t = 1.5 \text{ eV}$. For TCL and AL, traps near the barrier interfaces are considered. The presence of traps in the barrier and at its interfaces is therefore essential to understand the post-irradiation behavior of our components.

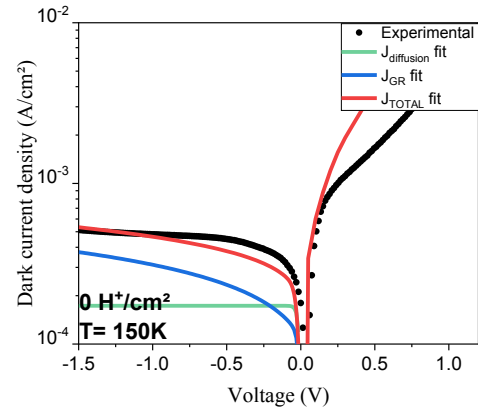


Fig. 4. Dark current density-voltage (J - V) characteristics measured at 150 K without irradiation : experimental data (black dots), diffusion current (green line), in blue line GR and in red line diffusion+GR.

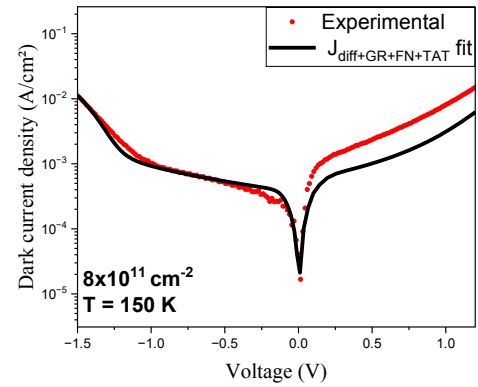


Fig. 5. Reverse dark current density voltage (J - V) characteristics at 150 K just after irradiation under $8 \times 10^{11} \text{ H}^+/\text{cm}^2$ (in red dot) and the current total after irradiation diffusion+GR+TAT+FN (black line).

4. CONCLUSIONS

In this communication, we performed a dark current simulation of Ga-Free T2SL infrared barrier detector without and with irradiation by using the TCAD tool ECORCE. The results revealed that the dark current due to proton irradiation, in addition to diffusion and GR currents, is mainly composed of FN and TAT currents with traps localized in the AlAsSb barrier and its interfaces.

4. REFERENCES

- [1] R.C. Claeys and E. Simoen, Radiation Effects in Advanced Semiconductor Materials and Devices (Springer Science & Business Media, 2013), Vol. 57. ISBN : 978-3-642-07778-4
- [2] G.A. Sai-Halasz, R. Tsu, and L. Esaki. "A new semiconductor superlattice", Appl. Phys. Lett., vol. 30, no. 651, April 1977, DOI. 10.1063/1.89273.
- [3] P. Klipstein, O. Klin, S. Grossman, N. Snapi, I. Lukomsky, D. Aronov, M. Yassen, A. Glozman, T. Fishman, E. Berkowicz, O. Magen, I. Shtrichman, E. Weiss, "XBn barrier photodetectors based on InAsSb with high operating temperatures", Optic. Engin., vol 50, no. 6 (June 2011), DOI. 10.1117/1.3572149.
- [4] U. Zavala-Moran, M. Bouschet, J.P. Perez, R. Alchaar, S. Bernhardt, I. Ribet-Mohamed, F. de Anda-Salazar, P. Christol "Structural, optical and electrical characterization of midwave infrared Ga-free InAs/InAsSb superlattice barrier photodetector", Photonics, vol. 7, no. 76 (Sept 2020), DOI. 10.3390/photonics7030076.

LE PHOSPHURE DE GALLIUM POUR L'OPTIQUE NONLINEAIRE INTEGREE

B. Le Corre¹, A. Marceau^{1,2}, A. Lemoine³, L. Morice³, G. Beaudoin¹, A. Harouri¹, L. Le Gratiet¹, B. Gérard⁴, A. Grisard², S. Combrié², R. Braive¹, Y. Léger³, G. Patriarche¹, I. Sagnes¹ et K. Pantzas^{1,*}

¹ Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies CNRS - Université Paris-Saclay, 91120, Palaiseau, France

² Thales Research and Technology, 91767 Palaiseau, France

³ Univ Rennes, INSA, CNRS, Institut FOTON - UMR 6082, F-35000 Rennes, France

⁴ III-V Lab, 91767 Palaiseau, France

* E-mail: konstantinos.pantzas@c2n.upsaclay.fr

RESUME

Nous présentons une nouvelle plateforme matériau pour l'optique non-linéaire intégrée : le phosphure de gallium à orientation structurée (OP-GaP). Les premières démonstrations de génération de seconde harmonique (SHG) dans des guides suspendus de type shallow ridge fabriqués à partir de ce matériau ont un rendement record de $200\%W^{-1}cm^{-2}$, malgré des pertes encore élevées. Ces membranes ont aussi été utilisées avec succès pour des premières expériences de génération paramétrique spontanée (SPDC). De nouveaux guides sont en cours de fabrication avec un OP-GaP dont la période de quasi-accord de phase est chirpée afin d'augmenter la bande passante de conversion et convertir la bande C télécom vers le visible. Enfin, nous discuterons des premiers essais d'intégration sur plateforme Si par la technique de micro-transfer printing.

1. INTRODUCTION

La photonique sur silicium a intégré de nombreuses fonctions optoélectroniques – tant passives que actives. Le dernier maillon manquant à cette plateforme est l'optique non-linéaire, dont l'intégration permettra le développement de nombreuses nouvelles applications. Un bon nombre de ces applications repose sur les non-linéarités d'ordre deux. Or, le silicium est centrosymétrique. De ce fait, l'intégration de fonctions non-linéaires du deuxième ordre ne peut se faire efficacement qu'à travers l'intégration hétérogène de matériaux non-centrosymétriques.

Depuis quelques années, la course est ouverte avec plusieurs matériaux candidats potentiels, tels que les semi-conducteurs III-V (GaAs, AlGaAs) ou le PPLN. Malgré un coefficient non-linéaire dix fois inférieur aux III-V et un indice optique faible, le PPLN est à l'état de l'art en photonique non-linéaire intégrée, notamment en couche mince transférée sur Si. Cette place à l'état de l'art s'explique par la facilité avec laquelle on obtient un quasi-accord de phase, condition *sine qua non* pour réaliser des circuits photoniques non-linéaires efficaces. Cependant un matériau III-V concurrent à la plateforme PPLN reste un objectif hautement désirable.

Dans la présente contribution nous présentons un tel candidat : le phosphure de gallium à structuration d'orientation (Orientation-Patterned Gallium Phosphide – OP-GaP). Nous discuterons du procédé de fabrication de ce matériau, de ses performances et premières applications et, enfin, d'intégration sur Si par la technique de micro-transfer printing.

2. FABRICATION DE L'OP-GAP

Contrairement au PPLN, où l'application d'un champ électrique suffit à localement inverser l'orientation cristalline, le procédé de structuration d'orientation dans le GaP requiert un certain nombre d'étapes de fabrication. D'abord, des membranes de 100 nm de GaP sont épitaxiées sur substrat sacrificiel en GaAs par épitaxie en phase vapeur aux organométalliques (MOVPE). Ces membranes sont ensuite collées par collage moléculaire direct. À cette étape la membrane du bas a une orientation 001, alors que celle du haut a une orientation 00-1. Après retrait du substrat GaAs supérieur, la période de quasi-accord de phase – choisie pour compenser la dispersion entre les ondes impliquées dans le procédé non-linéaire considéré – est inscrite dans le GaP par lithographie électronique et gravure ICP. Une deuxième étape de MOVPE permet d'obtenir un cristal d'OP-GaP de l'épaisseur désirée. Des guides de type shallow-ridge à membrane suspendue sont ensuite fabriqués à partir de ce cristal d'OP-GaP. Le ridge fait 1.6 μm de haut et 4.5 μm de large et la longueur totale du guide est de 1 mm. L'épaisseur totale de la membrane suspendue est de 3 μm .

3. GENERATION DE SECONDE HARMONIQUE

La performance des guides d'OP-GaP a été évaluée par des expériences de SHG, procédé étalon pour les cristaux d'optique non-linéaire. Un rendement de conversion de $200\%W^{-1}cm^{-2}$ a été observé pour la conversion d'une pompe à 1596 nm vers 798 nm [1]. Ce rendement est 500 fois supérieur à celui dans le GaP sans structuration d'orientation [2], mais reste inférieur à l'état de l'art dans le PPLN [3], en raison des fortes pertes mesurées dans les guides d'OP-GaP : $30\text{ dB}\cdot\text{cm}^{-1}$, contre $0,1\text{ dB}\cdot\text{cm}^{-1}$ dans le

PPLN. Cependant, des pertes diminuées à moins de 10 dB.cm^{-1} nous permettront de surpasser les performances du PPLN.

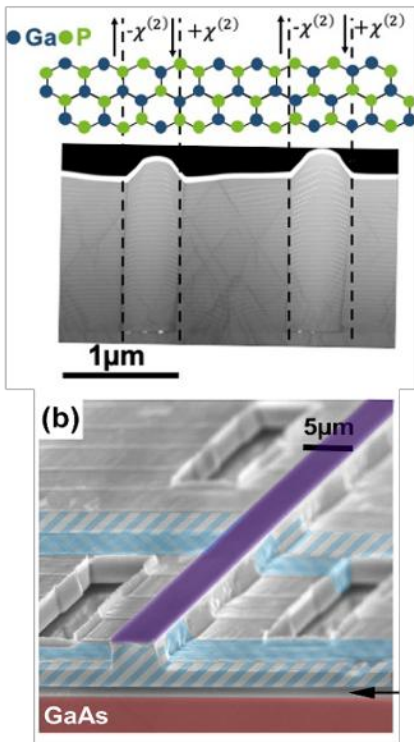


Figure : (a) Image HAADF-STEM d'une vue en coupe de l'OP-GaP présentant une alternance de domaines d'orientation 001 et 00-1 selon $\langle 110 \rangle$; (b) Image MEB d'un guide d'OP-GaP ; (c) Rendement de conversion SHG des guides OP-GaP pour une longueur d'onde de pompe de 1596 nm, présentant un rendement de $200 \text{ \%}/\text{Wcm}^2$.

4. AUTRES APPLICATIONS ET INTEGRATION

Les guides OP-GaP présentés ci-dessus ont été utilisés avec succès pour la génération paramétrique spontanée du visible vers la bande C télécom. Nous avons démontré que les paires de photons étaient corrélées et menons actuellement des expériences de mesure d'intrication [4]. Nous avons aussi proposé de nouveaux designs de guides OP-GaP qui incorporent un chirp de la période de quasi-accord de phase en faisant varier la largeur de domaines de quelques nanomètres à chaque période, afin de moduler la réponse spectrale de la SHG et d'en

maximiser la bande passante. Ces guides serviront à la translation de peignes de fréquences télécom. Enfin, nous avons commencé à travailler sur l'intégration de ces guides par micro-transfer printing sur la plateforme photonique silicium [5]. Pour l'instant nous avons réussi le transfert de membranes de GaP sans structuration et procéderons par la suite au transfert de guides d'OP-GaP.

4. CONCLUSIONS

Nous avons présenté l'OP-GaP, une nouvelle plateforme matériau pour la photonique non linéaire intégrée. Cette plateforme est prometteuse pour de nombreuses applications dans les télécommunications, l'optique quantique et la génération de peignes dans le moyen infrarouge. Les dispositifs choisis, des guides à membrane suspendue, sont compatibles avec l'intégration photonique par micro-transfer printing et nous avons commencé les premiers essais de transfert.

5. REMERCIEMENTS

Le présent travail est soutenu par le réseau français Renatech, le projet OFCOC du PEPR Électronique (ANR-22-PEEL-0005) et l'Union Européenne (ERC-COG-2022, PANDORA, 101088331).

6. REFERENCES

- [1] K. Pantzas *et al.*, "Continuous-Wave Second-Harmonic Generation in Orientation-Patterned Gallium Phosphide Waveguides at Telecom Wavelengths," *ACS Photonics*, vol. 9, no. 6, pp. 2032–2039, Jun. 2022, doi: 10.1021/acsp Photonics.2c00156.
- [2] A. P. Anthur *et al.*, "Second harmonic generation in gallium phosphide nano-waveguides," *Opt. Express, OE*, vol. 29, no. 7, pp. 10307–10320, Mar. 2021, doi: 10.1364/OE.409758.
- [3] C. Wang *et al.*, "Ultrahigh-efficiency wavelength conversion in nanophotonic periodically poled lithium niobate waveguides," *Optica*, vol. 5, no. 11, pp. 1438–1441, 2018.
- [4] A. Marceau *et al.*, "Spontaneous Parametric Down Conversion in Orientation-Patterned Gallium Phosphide Waveguides at Telecom Wavelength," in *2023 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC)*, Jun. 2023, pp. 1–1. doi: 10.1109/CLEO/Europe-EQEC57999.2023.10231458.
- [5] M. Billet *et al.*, "Gallium phosphide-on-insulator integrated photonic structures fabricated using micro-transfer printing," *Opt. Mater. Express*, vol. 12, no. 9, p. 3731, Sep. 2022, doi: 10.1364/OME.461146.

Harmke van Dijk ^{1*}, Matthieu Paillet ¹, Océane Février ¹, Sandrine Juillaguet ¹,
Sylvie Contreras ¹, Hervé Peyre ¹, Marcin Zielinski ², Olivier Briot ¹

¹ *Laboratoire Charles Coulomb, UM, CNRS UMR 5221, Montpellier 34095, France*

² *NOVASIC, Savoie Technolac, 73375 Le Bourget du Lac cedex, France*

* E-mail: harmke.van-dijk01@etu.umontpellier.fr

SUMMARY

For a series of thin-film epitaxial 4H-SiC samples with varying rates of a vanadium precursor introduced during layer growth, the effects of this rate on growth processes and sample quality are investigated through Scanning Electron Microscopy, micro-Raman spectroscopy, and X-ray diffraction. Furthermore, Photoluminescence (PL) measurements of the V^{4+} charge state in 4H-SiC attain the resolution of all four α peaks originating in d-d transitions of the vanadium atom. These methods are then combined to give a first estimate of the variation of PL intensity with the vanadium precursor rate during growth. Challenges and potential solutions are identified with regard to the estimation of vanadium concentration from PL data. Additionally, a temperature study of V^{4+} photo-luminescence reveals trapping behaviour.

1. INTRODUCTION

Silicon carbide (SiC) is a large-gap semiconductor which exists in a variety of polytypes, of which the polytype 4H-SiC is favoured for high-power and high-temperature applications [1]. A challenge in the development of 4H-SiC electronic devices is a reliable way to render the SiC semi-insulating. This can be achieved by introducing vanadium as a dopant, since the V^{4+} 0/- energy level is placed very close to mid-gap [2].

Vanadium substitutes Si when incorporated in SiC. The photoluminescence of V^{4+} in 4H-SiC, which originates in the lifting of the d orbital degeneracy through the effect of the crystal field and of spin-orbit coupling, therefore has two characteristic lines corresponding to the two Si sites of different symmetry in this polytype. This work will focus on the α line (1280 nm), associated with the hexagonal site [2] (see also Figure 1). This line has a theoretical splitting into four lines α_1 through α_4 , which have been resolved before by FTIR methods [3], but not to our knowledge with non-Fourier spectroscopy.

2. METHODS

The samples studied in this work consist of a thin CVD epitaxial layer of 4H-SiC:V grown on an n-doped on-axis 4H-SiC substrate. One series of samples was created under growth conditions of 1800 °C and with 12:4 $SiH_4:CH_4$ ratio. The flow rate of $H_2:VCl_4$ at vapour pressure at 5°C (in sccm, ‘flux of VCl_4 ’ in the figure legends) was varied per sample. Temperature-varying photoluminescence (PL) measurements were done on an

earlier sample, grown on the same substrate at 1750°C and with a lower VCl_4 flow rate.

Measurements done on these samples include X-ray diffraction (θ - 2θ and ω -scan), confocal micro-Raman spectroscopy, and PL under excitation with a 244 nm continuous UV laser, as well as Scanning Electron Spectroscopy imaging of the sample surface and Energy Dispersive X-ray analysis of surface precipitates, which are not presented in this abstract.

3. RESULTS

As shown in Figure 1, PL measurements on these samples have allowed the resolution of the four alpha peaks, due to both the high quality of these samples and refinements in our experimental setup.

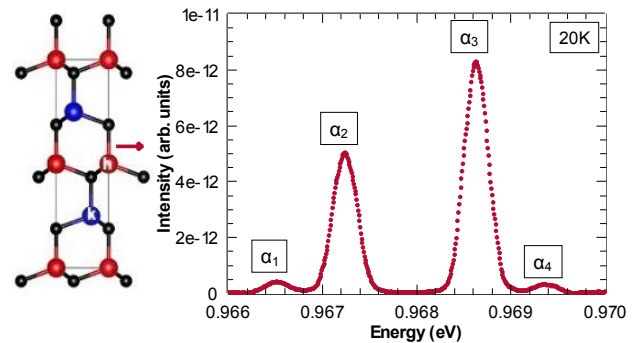


Figure 1: Observed splitting at 20K of the α Photo-luminescence emission line associated with intra-d-orbital transitions of V^{4+} located at the hexagonal site in 4H-SiC.

X-ray diffraction and Raman spectroscopy measurements have demonstrated the presence of 3C-SiC (cubic polytype) inclusions in all samples. They have also allowed calculation of the thickness of the epitaxial layer (Figure 2). A micro-Raman spectroscopy depth scan allows the determination of the epitaxial layer thickness through the tracing of the presence of 3C-specific modes. The X-ray diffraction peak width was analysed through an application of the Debye-Scherrer formula, neglecting strain and regarding the epitaxial layer as one single domain. Both X-ray diffraction and Raman spectroscopy data display an unexpected decrease in epitaxial layer thickness with a larger VCl_4 flow rate.

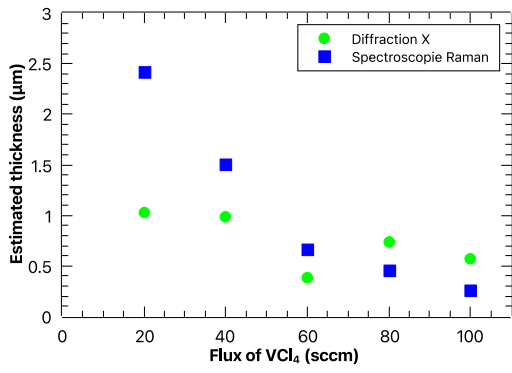


Figure 2: Values for the thickness of the epitaxial layer as a function of VCl_4 flow rate, obtained through confocal Raman spectroscopy and X-ray diffraction.

We present here the average of PL measurements at a number of points on the same sample, at 20K. SiC is an indirect-gap semiconductor and therefore the penetration depth of the 244 nm exciting laser is considerable; for this wavelength the absorption coefficient α is of the order of 2.10^4 cm^{-1} [4] and luminescence will occur all through the deposited epilayer. It is therefore necessary to account for the varying epilayer thickness, as obtained through X-ray diffraction and Raman spectroscopy data, in the analysis of the PL data. In Figure 3 this has been done by dividing the ‘raw’ PL intensity by the average of the Raman and X-ray diffraction thickness. Additionally, measurements taken at different laser intensities were corrected by a linear factor. A tendency towards more luminescence given higher VCl_4 flow rate can be noted, although the uncertainties involved in these estimates are considerable.

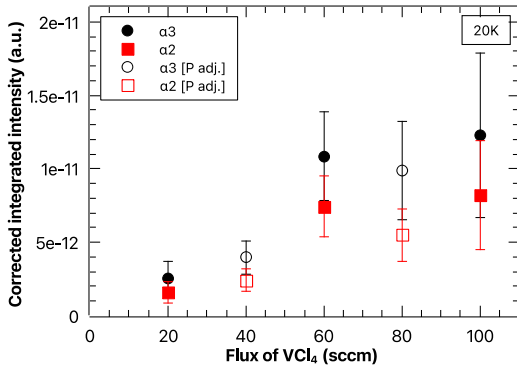


Figure 3: Corrected values for the integrated intensity of the α_2 and α_3 peaks, averaged over different points on the same sample, for different flow rates of VCl_4 during epitaxial growth.

A first value for the free carrier level in the epitaxial layer relative to the (n-doped) substrate has also been obtained through Raman spectroscopy analysis of a 4H coupled phonon-plasmon mode, following Nakashima [5]. The results of this indicate that at a VCl_4 flow rate of 20 sccm, almost all carriers are compensated, but that at higher VCl_4 flow rates the level of free carrier electrons once again increases.

A study of the variation in photoluminescence intensity with temperature shows an unexpected maximum in PL intensity at 40 K (Figure 4). The standard expectation is

that the intensity decreases with temperature as non-radiative relaxation pathways become more available. That the $SiC:V^{4+}$ does not show this trend at low temperatures seems to indicate a trapping mechanism is present.

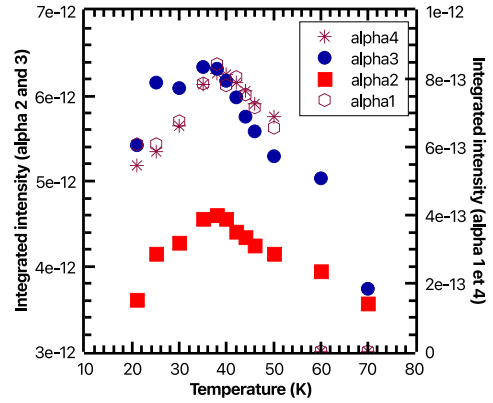


Figure 4: The development of Photoluminescence intensity of the αV^{4+} transitions in SiC with temperature. A maximum is observed at 40 K.

4. CONCLUSIONS

VCl_4 presence is shown to have a strong effect on the epitaxial growth rate, which determines the thickness of the epitaxial layer. The process for this effect is not yet known at this time. PL results cautiously indicate that when corrected for thickness, PL intensity increases with increasing VCl_4 flow rate; however, these results should be interpreted as preliminary. Raman values for the electronic doping level show a contrary tendency, leading to the hypothesis that very high vanadium incorporation causes defects in the crystal matrix that then contribute carrier electrons. For semi-insulating purposes, a 20 sccm flow rate of VCl_4 seems therefore to be optimal.

The trapping behaviour shown by the temperature study might be explained by a shift in the relative V^{3+}/V^{4+} concentrations in the sample with temperature; we propose to test this by measuring V^{3+} luminescence directly in the near future. This behaviour is consistent with the long spin relaxation times of V^{4+} noted in Hendriks [6].

With thanks to Thomas Cohen (mechanical conception) and Jean-Roch Huntzinger (theoretical calculations and discussion) at Montpellier, and to Marc Bussel and Thierry Bourgoin (growth experiments) at NovaSiC. We acknowledge funding from the ANR VanaSiC.

5. REFERENCES

- [1] M.-L. Locatelli and D. Planson, 2009 (ISBN : 978-1-84821-064-6)
- [2] Baur et al., Phys. Stat. Sol. (a) 162, 153 (1997)
- [3] Magnusson et al. Materials Science Forum, Vols. 338-343., s. 631-634 (2000)
- [4] extended from Sridhara et al., Mat. Sci. Eng. B61-62 (1999)
- [5] Nakashima et al., Physical Review B 76, 245208 (1997)
- [6] Hendriks et al., ArXiv preprint 2210.09942v1 (2022)

UN MODELE SEMI-EMPIRIQUE POUR LES SUPERRESEAUX EPITAXIES

K. Pantzas^{1,*}, V. Trinite², A. Vasanelli³, G. Beaudoin¹, C. Sirtori³ et G. Patriarche¹

¹ Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies CNRS - Université Paris-Saclay, 91120, Palaiseau, France

² III-V Lab, 91120, Palaiseau, France

³ Laboratoire de Physique de l'École Normale Supérieure, ENS, Université, PSL, CNRS, Sorbonne Université, Université de Paris, F-75005 Paris, France

* E-mail: konstantinos.pantzas@c2n.upsaclay.fr

RESUME

Nous présentons un modèle semi-empirique pour décrire la composition et la structure des superréseaux d'alliages semiconducteurs dans les simulations de structure de bande. Ce modèle, construit sur des observations HAADF-STEM des superréseaux, rend compte des gradients présents aux interfaces et permet d'en modéliser l'impact sur les énergies de transition et, de manière plus générale, l'opération et les performances de composants utilisant ces superréseaux. Le modèle est illustré sur une structure de puits asymétrique couplés, réalisés en alliages (In,Al,Ga)As accordés sur InP. Les énergies de transition mesurées et celles modélisées ne diffèrent que de quelques meV démontrant l'utilité de tels modèles pour le développement de composants optoélectronique dans le moyen et lointain infrarouge.

1. INTRODUCTION

Des nombreuses applications dans le moyen infrarouge reposent sur des composants dont les hétérostructures comportent des superréseaux complexes d'alliages de semiconducteurs : lasers et détecteurs à cascade quantique (QCLs, QCDs), photodétecteurs à puits quantiques (QWIPs) et lasers interbandes à cascade (ICLs) ont tous des régions actives composées de nombreux puits et barrières dont certains ne sont épaisses que d'une ou deux monocouches atomiques.

La conception, le développement et l'optimisation de telles hétérostructures est un processus long et fastidieux, fait de plusieurs cycles d'épitaxie, fabrication et caractérisation. Au cœur de cette complexité réside la compréhension, modélisation et maîtrise des interfaces entre les différents puits et barrières de l'hétérostructure. En effet, dans l'épaisseur des couches constitutives de ces hétérostructure est comparable, voir inférieure à la largeur des interfaces observées dans les cristaux d'alliages semiconducteurs. Dès lors, les gradients aux interfaces ou leur rugosité prend le dessus sur les propriétés de l'hétérostructure.

Un certain nombre de modèles ont été proposés ces dernières années afin de mieux décrire ces interfaces et en modéliser les effets à l'aide d'outils de simulation numériques [1], [2]. Cependant, ces modèles n'ont été

appliqués que pour des puits ou barrières relativement épaisses (>3nm) et pour des interfaces entre deux binaires, ou un binaire et un ternaire.

Dans la présente contribution, nous généralisons ces modèles pour décrire des composition et structure d'hétérostructures comportant un nombre arbitraire d'éléments et de couches. Ce modèle semi-empirique, repose sur des observations en HAADF-STEM qui nous permettent d'extraire des cartographies de composition et de déformation des hétérostructures à l'échelle atomique [3]. La démarche et ses applications est démontrée sur une structure de puits couplés asymétriques en (In,Al,Ga)As accordées sur InP et fabriqués en InP.

2. MODÈLE

Nous proposons de décrire la composition $C_{m,n}$ de l'élément n en tout point d'une hétérostructure comportant N couches et composée d'alliages de M éléments avec l'équation suivante :

$$C_{m,n}(z) = c_{m,0} + c_{m,N} + \sum_{n=1}^N \frac{c_{m,n+1} - c_{m,n}}{1 + e^{(z-z_n)/L_n}}$$

Dans cette équation, z est l'ordonnée dans l'axe de croissance de l'hétérostructure, z_n l'abscisse de l'interface entre les couches n et $n+1$, $c_{m,n}$ la composition nominale visée, et L_n la largeur caractéristique d'interface. La dérivée de cette fonction atteint un extremum aux coordonnées des interfaces $z = z_n$. La pente à l' i ème coordonnées est :

$$\frac{dC_{m,n}}{dz}(z = z_i) = - \sum_{i=1}^N \frac{(c_{m,n+1} - c_{m,n})e^{\frac{(z-z_n)}{L_n}}}{L_n \left(1 + e^{\frac{(z_i-z_n)}{L_n}}\right)^2}$$

Le plus grand terme de cette somme est celui pour $i = n$ et sa valeur absolue vaut :

$$\frac{c_{m,n+1} - c_{m,n}}{4L_n}$$

De cette dernière expression il apparaît que les compositions nominales, liées au mélange des précurseurs d'épitaxie, permettent aussi d'ajuster la raideur d'interface, technique employée par les auteurs dans la Référence [4].

3. APPLICATION AUX PUIITS ASYMETRIQUES

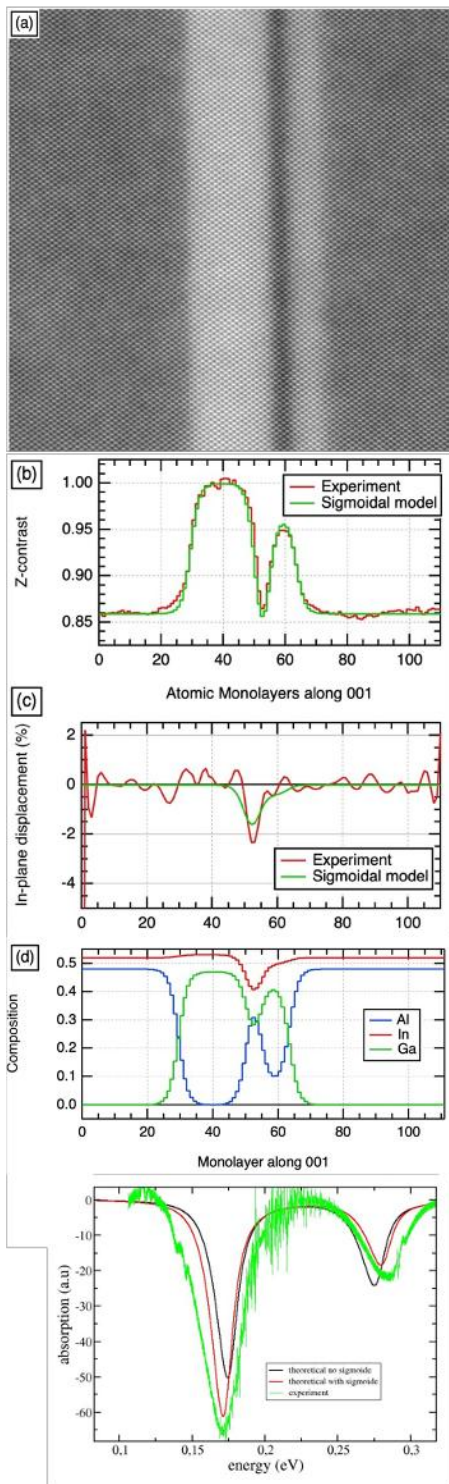


Figure : (a) Image HAADF-STEM de puits asymétriques couplés InGaAs séparés par une fine barrière d’InAlAs ; (b,c) profils de contraste de composition et de déformation issues de l’algorithme présenté en [3] et modélisés avec l’équation sigmoïde (d) compositions d’indium, aluminium et gallium donnant le meilleur fit aux données expérimentales. ; (e) absorption expérimentale (vert) des puits et modèles avec sigmoïde (rouge) ou avec puits carrés (noir). La simulation avec la sigmoïde ne diffère des résultats expérimentaux que de 1eV.

Le modèle précédent a été appliqué pour modéliser la composition des puits asymétriques couplés. La structure épitaxiée est la suivante : deux puits d’InGaAs de 5.4 nm et de 2.4 nm sont séparés d’une barrière d’InAlAs de 1.4nm. Les compositions sont celles à l’accord sur InP pour les puits. Pour la barrière, les flux de précurseurs ont été ajustés suivant le schéma de modulation présenté dans la Référence [4]. La structure a été obtenue par épitaxie en phase vapeur aux organométalliques. Elle a été observée en HAADF-STEM et la composition et déformation par monocouche a été extraite à l’aide de l’algorithme présenté dans la Référence [3]. Ces compositions et déformations ont été fitées à l’aide du modèle présenté ci-dessous. Le meilleur fit a été obtenu pour une largeur d’interface de 1.5 monocouches atomiques. Ces profils ont été utilisés afin de modéliser l’absorption de ces structures. L’écart entre les énergies de transition observées et simulées est de 1meV.

4. CONCLUSIONS

Un modèle semi-empirique a été proposé pour modéliser les superréseaux de semiconducteurs épitaxiaux. Ce modèle repose sur la fonction logistique et a été calibré sur des cartographies atomiques de composition, obtenues par traitement des images HAADF-STEM. Appliqué à des simulations de puits asymétriques couplés (In, Al,Ga)As accordées sur InP, ce modèle permet de prédire les positions spectrales des raies d’absorption de la structure à 1meV près.

5. REMERCIEMENTS

Le présent travail a été soutenu par le réseau français Renatech, le projet ANR EQUIPEX TEMPOS (ANR-10-EQPX-0050) et le projet ANR LIGNEDEMIR (ANR-18-CE-09-0035).

6. REFERENCES

- [1] E. Luna, Á. Guzmán, A. Trampert, and G. Álvarez, “Critical Role of Two-Dimensional Island-Mediated Growth on the Formation of Semiconductor Heterointerfaces,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 109, no. 12, p. 126101, Sep. 2012, doi: 10.1103/PhysRevLett.109.126101.
- [2] T. Grange *et al.*, “Atomic-Scale Insights into Semiconductor Heterostructures: From Experimental Three-Dimensional Analysis of the Interface to a Generalized Theory of Interfacial Roughness Scattering,” *Phys. Rev. Appl.*, vol. 13, no. 4, p. 044062, Apr. 2020, doi: 10.1103/PhysRevApplied.13.044062.
- [3] K. Pantzas and G. Patriarche, “Experimental quantification of atomically-resolved HAADF-STEM images using EDX,” *Ultramicroscopy*, vol. 220, p. 113152, 2021.
- [4] K. Pantzas *et al.*, “Sub-nanometrically resolved chemical mappings of quantum-cascade laser active regions,” *Semiconductor Science and Technology*, vol. 31, no. 5, 2016.

Posters :

**Caractérisation structurale, optique et
électrique des semiconducteurs,
Composants photoniques, intégration
photonique et optoélectronique**

MESURES IN-SITU COMBINÉES EN ÉPITAXIE PAR JET MOLECULAIRE : CAS DE L' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ A TEMPERATURE DE CROISSANCE

P. Gavras, K. Ben Saddik, L. Bourdon, Q. Gravelier, A. Arnoult, G. Almuneau

LAAS-CNRS, Université de Toulouse, INSA, CNRS, Toulouse, France

* E-mail: pierre.gavras@laas.fr, almuneau@laas.fr

RESUME

La mesure *in-situ* et en temps réel des vitesses de croissance et des propriétés optique, électronique et structurale des matériaux semi-conducteurs est un élément clé pour contrôler plus précisément l'épithaxie de structures multicouches complexes, tels que les lasers à cavité verticales (VCSEL) ou les cellules solaires à multi-jonction (MJSC). Cependant, aucun outil générique et efficace n'a été mis en œuvre à ce jour pour contrôler ces épithaxies d'hétérostructures en temps réel [1–3].

1. INTRODUCTION

Dans ce travail en cours, nous développons une méthodologie pour extraire les vitesses de croissance et les constantes optiques à haute température (500-600°C) à partir des mesures de réflectance spectrale *in-situ* dans le cas d'une couche mince réalisée par épithaxie par jets moléculaires (EJM). La réflectance est mesurée sur une large bande spectrale (390 - 1700 nm), permettant la mesure d'une grande variété de matériaux avec différentes propriétés optiques, tels que les alliages épithaxiés sur GaAs comme l' AlGaAs ou l' InGaAsN .

2. DESCRIPTION DE L'ETUDE

En comparant un modèle optique analytique à la mesure de réflectance au cours du temps, nous pouvons déduire la vitesse de croissance de la couche en temps réel. Afin d'améliorer la précision et la reproductibilité, il est nécessaire de mesurer simultanément la température et la composition, respectivement via la mesure de l'énergie de bande interdite [4] et l'évolution de la courbure du substrat [5]. Par ailleurs, pour pouvoir déterminer la vitesse de croissance, il est impératif d'avoir un modèle d'indice de réfraction optique précis aux températures de croissance.

3. RESULTATS

Afin de confirmer l'exactitude de la méthode, les indices de réfraction complexes pour différentes compositions d' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ seront déduits à partir des mesures de réflectance *in-situ*, illustré figure 1, en les combinant aux mesures *ex-situ* de diffraction des rayons X. Les épaisseurs pourront être confirmés par l'analyse au microscope électronique à balayage.

Par la suite, nous nous baserons sur cette base de données des indices optiques pour différentes compositions de

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ pour contrôler en temps réel la croissance d'hétérostructures complexes comme celles des VCSELS.

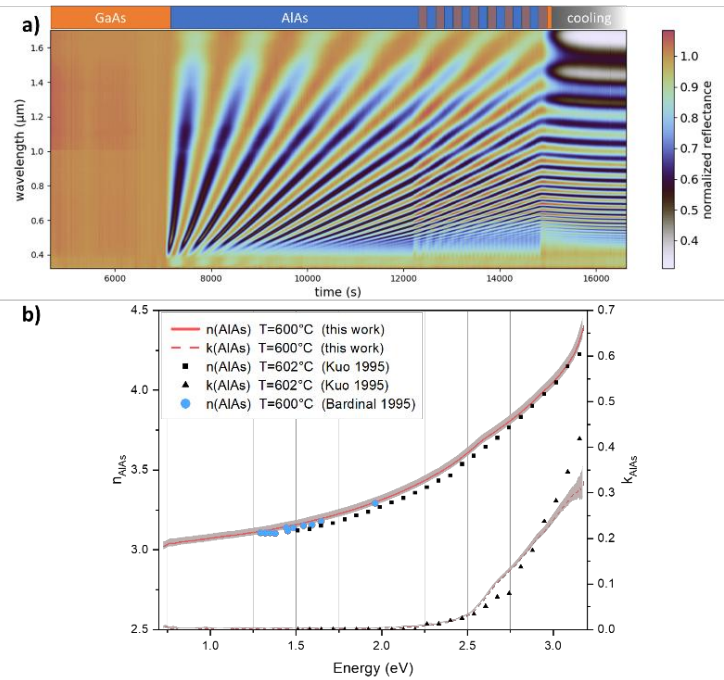


Figure 1 : a) Mesure de réflectance spectrale *in-situ* durant la croissance, b) Dispersion spectrale de n et k de l' AlAs à 600°C déduite de la figure 1a) et comparaison avec les données de la littérature [3][6].

REMERCIEMENTS

Cette étude a bénéficié du soutien technique de la plateforme technologique du LAAS-CNRS, centrale du réseau RENATECH. Ce projet est réalisé et financé dans le cadre du laboratoire commun EPICENTRE entre RIBER et le LAAS-CNRS.

4. REFERENCES

- [1] J.H. Neave, B.A. Joyce, P.J. Dobson, N. Norton, Appl. Phys. A, 31 (1), 1–8, 1983 doi.org/10.1007/BF00617180
- [2] W.G. Breiland, K.P. Killen, J. Appl. Phys, 78 (11), 6726–6736. 1995 doi.org/10.1063/1.360496
- [3] V. Bardinal, Thèse de Doctorat, INSA de Toulouse, 1995. theses.hal.science/tel-00147274
- [4] S. Johnson, C.-H. Kuo, M. Boonzaayer, W. Braun, U. Koelle, Y.-H. Zhang, J. Roth, J. Vac. Sci. Technol. B 16 (3), 1502–1506, 1998 doi.org/10.1116/1.589975
- [5] A. Arnoult et J. Colin, Sci Rep, 11 (1), 2021, doi: 10.1038/s41598-021-88722-6.

[6] C. H. Kuo, S. Anand, H. Fathollahnejad, R. Ramamurti, R. Droopad, et G. N. Maracas, *J. Vac. Sci. Technol. B*, 13, (2), p. 681-684, 1995, doi: [10.1116/1.587941](https://doi.org/10.1116/1.587941).

Posters :
Composants et technologies THz

DEVELOPPEMENT DES DIODES SCHOTTKY THZ POUR L'ASTROPHYSIQUE ET L'ASTRONOMIE

J.-B. Cuvellier^{1,2}, L. Gatilova^{1,2}, J. Treuttel¹, A. Cavanna², L. Couraud², Y. Jin², M. Wiedner¹, J. Puech³

¹ LERMA-Observatoire de Paris, 61 Avenue de l'Observatoire, 75014, Paris, France

² C2N-CNRS, 10 Thomas Gobert, Palaiseau, France

³ CNES, 18 Avenue Edouard Belin, Toulouse, France

* E-mail: jean-baptiste.cuvellier@obspm.fr

RESUME

Parmi les différentes technologies disponibles pour fabriquer des récepteurs hétérodynes pour la radioastronomie, les diodes Schottky en GaAs jouent un rôle crucial. Cette technologie permet notamment de réaliser des mélangeurs de fréquences à faible bruit, fonctionnant à des températures ambiantes ou cryogéniques et capables d'atteindre la région THz. Néanmoins, la réduction de la taille d'anode en dessous de $0,1 \mu\text{m}^2$ est nécessaire pour convertir les signaux de la gamme haute THz (2 – 5 THz). Afin d'étudier les effets parasites engendrés par la diminution de la taille d'anode et d'optimiser la technologie de fabrication, les différentes configurations des diodes Schottky sont étudiées ici.

1. INTRODUCTION

Le LERMA-Observatoire de Paris, en collaboration avec le Centre de Nanoscience et de Nanotechnologies (C2N) a développé un procédé de fabrication de diodes Schottky en GaAs permettant de réaliser des multiplicateurs et des mélangeurs de fréquences ayant des performances au niveau de l'état de l'art à 300 GHz, 600 GHz et 1,2 THz. Récemment, ces composants électroniques ont été intégrés dans un récepteur hétérodyne Submillimeter Wave Instrument (SWI) et embarqués sur la sonde spatiale JUICE pour étudier l'atmosphère de Jupiter et de ses lunes glacées [1].

Le travail mené actuellement par le LERMA-C2N a pour but de repousser les limites de technologie et de développer des composants Schottky robustes et intégrables fonctionnant aux fréquences 2-5 THz. Dans l'étude présentée ici, l'influence de la diminution de la taille d'anode sur les caractéristiques électriques de diodes est étudié. Nous allons présenter les différentes étapes de fabrication de diodes Schottky planaires submicroniques sur GaAs, ainsi que les premiers résultats de leur caractérisation en DC.

2. DESCRIPTION DE L'ETUDE

La fabrication des diodes Schottky est réalisée dans la salle blanche de C2N qui dispose de tout l'équipement nécessaire à la fabrication complète des diodes Schottky.

La croissance des couches GaAs dopées Si ($n = 5.10^{17} \text{cm}^{-3}$ et $n^+ = 5.10^{18} \text{cm}^{-3}$) est réalisée par la technique d'épitaxie par jet moléculaire (MBE). La lithographie électronique est utilisée à chaque étape de fabrication, ce qui permet d'obtenir une grande résolution sur les structures submicroniques (taille de l'anode inférieure à $0,1 \mu\text{m}^2$). La gravure des mesas est réalisée par plasma inductif (ICP) dans le mélange gazeux $\text{BCl}_3/\text{Cl}_2/\text{Ar}$. Un contact ohmique de type NiAuGe est ensuite évaporé puis recuit sous argon hydrogéné (ArH_2) dans un four de recuit rapide. Le contact Schottky est réalisé avec la succession de couches métalliques Ti/Pt/Au. La surface d'anode varie de 0.1 à $4 \mu\text{m}^2$. La distance entre contact Ohmique et Schottky varie de $0.3 \mu\text{m}$ à $2 \mu\text{m}$. L'anode et la cathode sont ensuite connectés par des pont-à-air sur les plots de mesure (Fig. 1). Chaque diode est caractérisée en direct et en inverse sous pointes. Les paramètres des diodes tels que le facteur d'idéalité, la résistance série et le courant de saturation sont calculés à partir des courbes I(V) obtenues.

3. RESULTATS

La Figure 1 représente les caractéristiques I(V) en direct pour les différentes tailles d'anodes et la distance entre contact ohmique et Schottky fixée à $2 \mu\text{m}$.

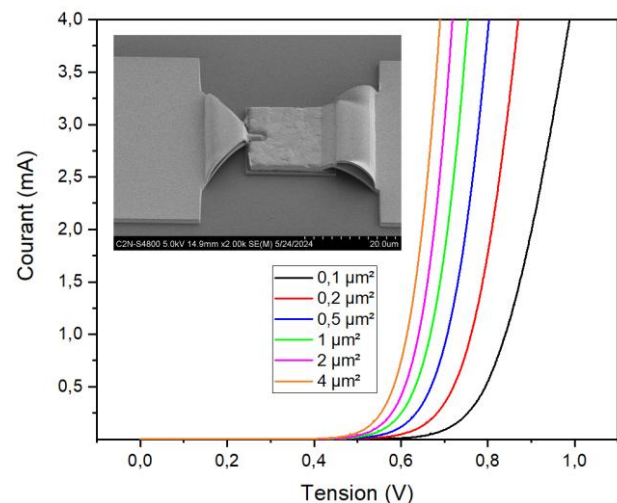


Figure 1 : Série de courbes I-V mesurées avec différentes surface d'anode, reportées dans l'encadré. Le cliché de microscopie électronique à balayage représente une diode contactée par des ponts à air métalliques.

En insertion sur la Fig.1, la diode planaire (au centre) est connectée à l'extérieur par des ponts à air métalliques reliant son contact Schottky (à gauche) et son contact ohmique (à droite).

Les paramètres électriques des diodes ont été calculés à partir des courbes I(V) en supposant que le principal mécanisme de transport du courant est l'émission thermionique :

$$I(V)=I_s(\exp(V/V_0)-1) \quad (1)$$

où I_s représente le courant de saturation, $V_0= \eta kT/q$. η est le facteur d'idéalité de la diode, $\eta=1$ pour un mécanisme de conduction purement thermionique, tandis que des valeurs plus élevées impliquent d'autres mécanismes parasites.

Le Tableau 1 synthétise les paramètres électriques de ces diodes. Ces premiers résultats seront par la suite comparés avec d'autres épitaxies d'intérêts pour optimiser les caractéristiques des épilayers afin de produire des mélangeurs et des multiplicateurs de fréquence stables et efficaces.

Surface d'anode (μm^2)	Résistance série (Ω)	I_s (A)	η
0,1	26,69	4,07E-11	1,882
0,2	18,98	1,12E-10	1,82
0,5	11,71	1,686E-10	1,752
1	10,66	1,172E-10	1,616
2	10,14	5,56E-11	1,479
4	8,50	1,128E-10	1,486

Tableau 1 : Propriétés électroniques des diodes Schottky planaires.

4. CONCLUSIONS

La fabrication et la mesure de diodes Schottky possédant des surfaces d'anodes submicroniques a été présentée. Etant donné la difficulté rencontrée pour contacter les diodes de surface $0,1 \mu\text{m}^2$, une vigilance particulière doit être apportée lors de la formation des ponts à air métalliques, ainsi qu'à la qualité de l'interface Schottky. Ces développements en cours d'étude permettraient de repousser les limites de fonctionnement des diodes et d'accéder à la gamme THz visée.

5. REFERENCES

[1] L. Gatilova, A. Maestrini, J. Treuttel, T. Vacelet, Y. Jin, A. Cavanna, L. Coureaud, A. Féret, G. Gay, S. Caroopen, J. Valentin, S. Mignoni, J.-M. Krieg, C. Golstein. "Recent Progress In The Development Of French THz Schottky Diodes For Astrophysics, Planetology And Atmospheric Study". IRRMW-THz, Paris, 1-6 Sep. (2019).

[2] J. Treuttel, L. Gatilova *et al.*, "1200 GHz High Spectral Resolution Receiver Front-End of Submillimeter Wave Instrument for Jupiter ICy Moon Explorer: Part I - RF Performance Optimization for Cryogenic Operation," in *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 13, no. 4, pp. 324-336, July (2023), doi: 10.1109/TTHZ.2023.3263623.

Posters :

**Composants photoniques, intégration
photonique et optoélectronique**

Intégration de source ICL sur plateforme SiGe par micro transfer-printing

Yannis Billiet^{* 1,2}, Céline Chevalier¹, Xavier Letartre¹, Jean-Louis Leclercq¹, Pierre Cremillieu¹, Radoslaw Mazurczyk¹, Christian Grillet¹, Eric Tournié², Maxime Lepage³, Badhise Ben Bakir³, Vincent Reboud³, Nicolas Bresson³, Jean-Michel Hartmann³, Laurent Cerutti², Christian Seassal¹

¹ INL, Ecole Centrale de Lyon, INSA Lyon, CNRS, 69130 Ecully, France

² IES, Université de Montpellier, CNRS, 34000 Montpellier, France

³CEA-LETI, Minatec, 38054 Grenoble, France

* yannis.billiet@ec-lyon.fr

RESUME

Nous présentons les résultats préliminaires pour l'intégration d'une source ICL émettant à 4 μm sur une plateforme SiGe par la méthode du micro transfert printing. Des simulations du couplage du laser avec le guide SiGe accompagnent les premières avancées technologiques concernant l'intégration d'une structure émettrice en matériaux antimoniures au sein du circuit intégré SiGe.

1. INTRODUCTION

La génération de peignes de fréquences optiques (combs) dans la gamme du moyen infrarouge (MIR) qui couvre les longueurs d'onde de 3 à 15 μm , offre des perspectives intéressantes pour le développement d'applications variées telles que la spectroscopie, l'environnement, la médecine et la défense. Toutefois, les coûts élevés et la complexité des équipements nécessaires pour mettre en œuvre ces combs limitent actuellement leur utilisation aux laboratoires. Bien que la démonstration de peigne de fréquences sur puce ait récemment relancé l'intérêt pour cette technologie [1], la taille des dispositifs reste importante en raison de l'utilisation de composants discrets (notamment le laser de pompe) fonctionnant en espace libre. Par conséquent, l'intégration d'une source laser sur un circuit optique, au sein duquel l'effet Kerr provoque la génération de nouvelles fréquences optiques, permettrait de réduire considérablement la taille et la consommation des systèmes de production de combs. Dans la gamme de longueurs d'onde de 3 à 6 μm , la technologie ICL (Interband Cascade Lasers) est la plus prometteuse. Ces sources basées sur des recombinaisons interbandes dans des puits quantiques de type-II InAs/GaInSb mis en cascade permettent de réduire considérablement la consommation électrique par rapport aux lasers intrabandes à cascade quantique (QCL)[2]. Après avoir décrit l'enchaînement technologique permettant l'intégration d'une source ICL dans un circuit photonique SiGe/Si, nous présenterons les avancées technologiques réalisées jusqu'ici. Dans une deuxième partie, les simulations électromagnétiques démontrant le

couplage entre ce laser et les guides d'onde intégrés seront exposées.

2. INTEGRATION PAR MICRO-TRANSFER PRINTING DE LA SOURCE ICL

Parmi les différentes approches permettant d'intégrer des sources laser semiconductrices à des dispositifs photoniques de la filière SiGe/Si, l'intégration hétérogène d'hétérostructures actives par collage adhésif (via une couche de BCB) ou moléculaire (SiO₂/SiO₂ en particulier) a atteint un stade de maturité [3]. Dans ce contexte, le report de coupons d'hétérostructures laser par micro-transfer printing (μTP) constitue une variante qui présente des avantages uniques, avec notamment le fait de pouvoir procéder à la réalisation des premières étapes de fabrication des lasers sur leur substrat de départ. L'enchaînement technologique développé pour la réalisation d'ICL sur SiGe/Si par MTP est présenté figure 1.

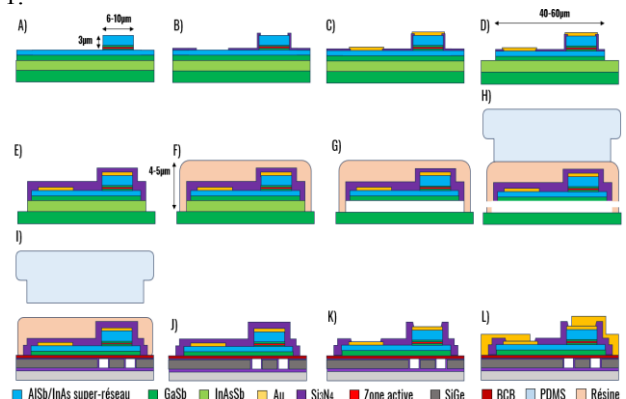


Figure 1 : Procédé d'intégration développé

Il s'agit dans un premier temps de préparer des coupons intégrant un guide d'onde de 6 à 10 μm de large, incluant la zone de gain optique, mais aussi les contacts d'injection électriques supérieur et inférieur (A-D). Les coupons sont protégés latéralement et séparés de leur substrat natif par sous-gravure chimique sélective (E-G). Ils sont ensuite collectés par une « poignée » (H) puis reportés sur le circuit photonique SiGe/Si, en assurant un alignement entre guide émissif et guide SiGe (I). Ces étapes sont réalisées en utilisant un système initialement

dédié au report de puce par flip-chip, et permettant un alignement meilleur que $1\mu\text{m}$. Enfin, les contacts électriques sont reportés latéralement à l'aide de procédés classiques (J-L). La sous-gravure (étape G) et le report (H-I) constituent les étapes critiques de cet enchaînement, et font l'objet d'un développement spécifique. L'étape de sous-gravure (G) a pu être validée par l'utilisation d'une paire de matériaux InAsSb (couche sacrificielle) / GaSb (couche d'arrêt).

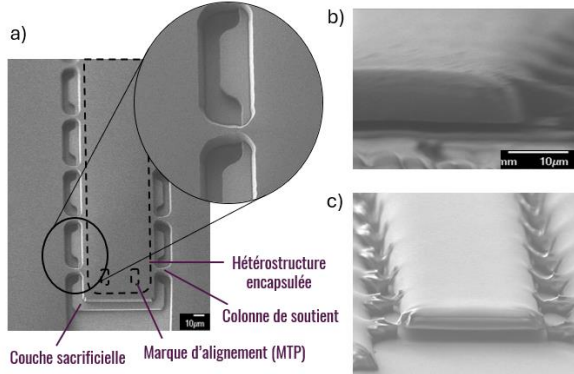


Figure 2 : Image MEB de profil de l'hétérostructure GaSb/InAsSb sous-gravée (b), image MEB du coupon préparé pour MTP dans le système modèle Si/SiO₂ (a,c).

La figure 2b présente un coupon d'hétérostructure ICL suspendu, obtenu après 3h de gravure par une solution à base d'acide citrique et de peroxyde d'hydrogène. La sélectivité s'avère suffisante pour libérer des membranes de quelques dizaines de micromètres de large. La sous-gravure, mais aussi le MTP nécessitent la réalisation de colonnes de maintien destinées à être brisées lors du retrait du coupon (étape H). Afin de concevoir les géométries de colonnes, mais aussi de valider les étapes de MTP, une étude préliminaire a été menée sur un empilement simplifié Si/SiO₂, ce dernier milieu simulant la couche sacrificielle. Les figures 2a et 2c présentent un exemple de coupon, retenu latéralement par 6 colonnes de maintien, lors des étapes H et G.

Le moulage du tampon en PDMS nécessaire à la prise du coupon (étape H) est réalisé par injection en force afin d'assurer sa planéité. Ce dernier est structuré pour permettre une plus grande résilience selon l'axe z pendant les différentes étapes du transfert. La figure 3a montre un mesa sur le tampon, de dimension égale à celle des coupons visés. Les premiers transferts de coupon en silicium ont pu être démontrés, sur une cible de silicium recouverte d'une couche de 150nm de résine à bonding (figure 3b). La précision d'alignement lors du transfert est en cours de quantification.

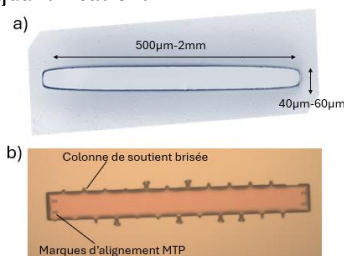


Figure 3 : Vue au microscope optique d'un mesa du tampon de transfert en PDMS (a), coupon test en silicium transféré sur une couche de 150nm de HT10-11 Brewer (b).

3. STRATEGIE DE COUPLAGE DE LA SOURCE ICL A UN CIRCUIT INTEGRE PHOTONIQUE

Le principe du couplage, issu d'une stratégie qui a fait ses preuves pour l'intégration de lasers InP/Si [4], est décrit sur la figure 3a. Le laser est en couplage évanescent vertical avec le guide SiGe (40% de Germanium) [5]. Au centre de la structure l'essentiel du champ électromagnétique se trouve dans la zone de gain afin de maximiser son interaction avec le mode laser. Dans la zone de couplage un taper est formé afin de tendre vers l'accord de phase entre les 2 structures guidantes et permettre le couplage adiabatique dans le guide SiGe. Des miroirs de Bragg sont structurés dans le guide afin de permettre la contre-réaction. Le compromis entre le gain effectif du laser et l'efficacité de couplage au guide sera discuté. La forme et la longueur du taper ont été étudiées via des simulations de propagations de modes. Une transmission de 90% dans le guide SiGe est anticipée théoriquement pour un taper linéaire de $80\mu\text{m}$ (figure 3b et 3c).

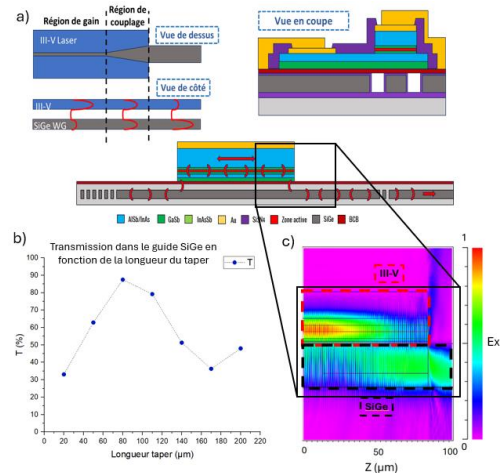


Figure 4 : Principe du couplage entre un ICL et un guide d'onde SiGe (a). Transmission simulée dans le guide en fonction de la longueur du taper (b). Cartographie montrant la répartition de l'intensité dans la structure (pour une largeur de guide allant de $3.3\mu\text{m}$ à $12\mu\text{m}$) (c)

REMERCIEMENTS

Ce travail a bénéficié d'une aide de l'Etat gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre de France 2030 portant la référence ANR-22-PEEL-0015 dans le cadre du projet ciblé OFCOC. Il a bénéficié des réseaux de plateformes technologiques Renatech et Renatech+.

REFERENCES

- [1] Griffith, A. G. et al. "Silicon-chip mid-infrared frequency comb generation". Nat. Commun. 6:6299 (2015). DOI: 10.1038/ncomms7299
- [2] E.Tournié, L.Cerutti. "Mid-Infrared Optoelectronics: Materials, Devices, and Applications". Duxford Cambridge: Woodhead publishing (2020). DOI: 10.1016/B978-0-08-102709-7.00003-6
- [3] H. Duan et al., "Hybrid III-V on Silicon Lasers for Photonic Integrated Circuits on Silicon," IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 20, no. 4, pp. 158-170 (2014). DOI: 10.1109/JSTQE.2013.2296752
- [4] B. Ben Bakir et al., "Electrically driven hybrid Si/III-V Fabry-Pérot lasers based on adiabatic mode transformers," Optics Express, vol. 19, pp. 10317-10325 (2011). DOI: 10.1364/OE.19.010317
- [5] R. Armand, M. Perestjuk et al; "Mid-infrared integrated silicon-germanium ring resonator with high Q-factor". APL Photonics (2023). DOI: 10.1063/5.0149324

LASERS FABRY-PEROT A BASE D'ALLIAGE DE GESN POMPES ELECTRIQUEMENT

C. Cardoux^{1*}, P. Goulain^{2,1}, J. Chrétien¹, E. Kroemer¹, N. Pauc², V. Calvo², N. Coudurier¹, P. Rodriguez¹, J. Widiez¹, O. Gravrand¹, J.M. Hartmann¹, A. Chelnokov¹, V. Reboud¹

¹ Univ. Grenoble Alpes, CEA, LETI, 38054 Grenoble, France

² Univ. Grenoble Alpes, CEA, Grenoble INP, IRIG, PHELIQS, 38000 Grenoble, France

* E-mail: clement.cardoux@cea.fr

RESUME

La caractérisation à basse température de lasers Fabry-Perot en GeSn pompés électriquement est présentée ici. Ces structures laser épitaxiées monolithiquement sur silicium sont fabriquées avec des technologies standard de la microélectronique. Des émissions lasers sont observées à basse température en fonction de différentes largeurs d'impulsion en atteignant 77 K sous injection électrique avec des impulsions de 150 ns.

1. INTRODUCTION

Les sources lumineuses intégrées monolithiquement sur silicium (Si) constituent un objectif vivement recherché en photonique sur silicium. Cependant le silicium n'étant pas un émetteur de lumière efficace, la recherche autour des matériaux du groupe-IV s'est concentrée sur l'ingénierie de contrainte du germanium [1] et de ses alliages à base de GeSn [2]. Des progrès récents ont permis d'atteindre, à température ambiante, l'émission laser en pompage optique de cavités GeSn à partir de couches de GeSn à haute teneur en Sn [3,4] ou en mettant en tension le matériau actif contenant une quantité plus modérée de Sn [5]. Cependant, obtenir des lasers GeSn par pompage électrique est une tâche beaucoup plus complexe, car elle nécessite un empilement de couches plus élaboré ainsi que des solutions adaptées pour des contacts électriques de haute qualité. Dans ce travail, nous présentons nos premiers lasers Fabry-Perot GeSn pompés électriquement émettant à une longueur d'onde de 2.55 μm et fonctionnant sous différentes largeurs d'impulsion électrique permettant d'atteindre un fonctionnement laser jusqu'à 77K.

2. EPITAXIE DES STRUCTURES GESN ET FABRICATION DES CAVITES LASERS

Des structures p-i-n verticales avec des couches actives en $\text{Ge}_{0.86}\text{Sn}_{0.14}$ ont été épitaxiées sur des substrats de silicium (001) de 200 mm dopés p+ par dépôt chimique en phase vapeur à pression réduite (RP-CVD). Des conditions de croissance hors équilibre thermodynamique à basse température, basse pression et avec des vitesses de croissance rapides ont été nécessaires pour faire croître au-dessus d'un germanium de 2.5 μm les couches électriques et la couche active en GeSn (Figure 1a). La couche active de $\text{Ge}_{0.86}\text{Sn}_{0.14}$ a été

épitaxiée ensuite à 325°C avec du Ge_2H_6 et du SnCl_4 comme précurseurs.

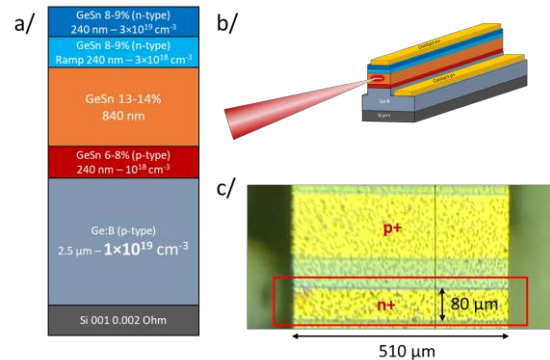


Figure 1: (a) Schéma en coupe de l'empilement de GeSn épitaxié en RP-CVD sur wafer silicium 200 mm dopée au p+, (b) Schéma du laser Fabry-Perot pompé électriquement, (c) Image optique en vue de dessus du laser à guide d'ondes Fabry-Perot de 510 μm de longueur et 80 μm de largeur.

Des guides d'onde de largeurs de 80 μm ont été fabriqués en utilisant des étapes de microfabrication conventionnelles. Après un traitement de surface à l'Ar, des contacts électriques ont été formés via une germaniuration avec un alliage de $\text{Ni}_{0.9}\text{Pt}_{0.1}$ de 10 nm recouvert de 7 nm de TiN [6]. Les contacts électriques ont été épaissis par évaporation de 10 nm de Ti et 400 nm d'au. Après la gravure et la métallisation, les échantillons ont été clivés pour former des cavités Fabry-Perot de 510 μm de long (Figure 1b). Les facettes ont été laissées sans revêtement haute réflexion (Figure 1c). Les dispositifs ont été connectés par micro-soudage de fils Au à un support de puce en céramique.

3. EFFETS LASERS EN POMPAGE ELECTRIQUE

3.1 Effet laser jusqu'à 60 K

Les dispositifs fabriqués ont été ensuite pompés à l'aide d'une source de tension pulsée. Les mesures des spectres et de la lumière sortant du guide d'onde en fonction du courant d'injection ont d'abord été réalisées avec une fréquence de répétition de 10 kHz et une largeur d'impulsion de 700 ns. Le signal d'émission d'électroluminescence a été collecté à travers un spectromètre FTIR. La mesure spectrale a été effectuée en mode Step-Scan avec une résolution de 5 cm^{-1} . La Figure 2a présente les spectres à 10 K du guide d'onde présenté Figure 1c à différents niveaux de courant d'injection. Comme attendu, la largeur totale à mi-hauteur du pic d'émission diminue au seuil laser (Figure 2a). La largeur de raie est définie par la résolution relativement

grossière du spectromètre. À 10 K, le pic d'émission laser prédominant apparaît autour de 2550 nm et se décale vers le rouge avec l'augmentation de la densité de courant injecté. Les courbes Light-in/Light-out ont été mesurées de 10 à 75 K (Figure 2b). Les seuils augmentent avec la température et, pour les courants de pompage disponibles, l'effet laser disparaît au-delà de 65 K.

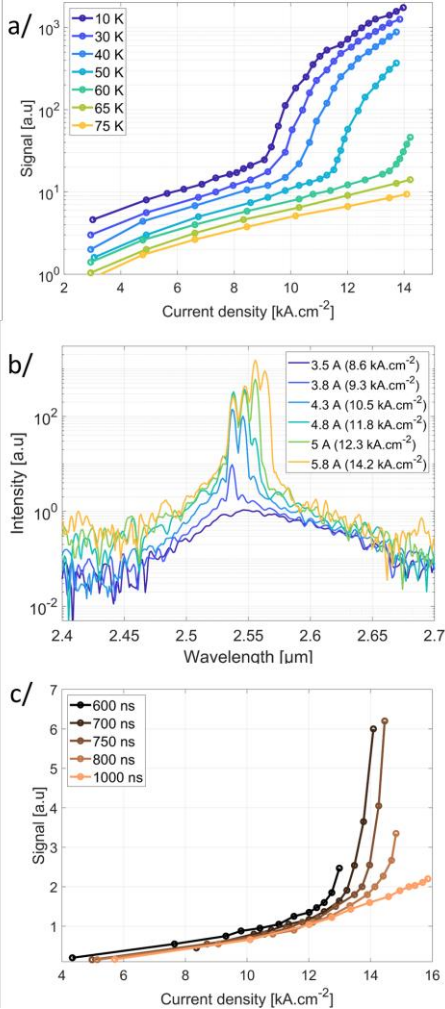


Figure 2: a/ Spectres d'émission à différents niveaux d'injection à 10 K pour des guides d'ondes et des impulsions de courant de 700 ns, b/ Courbes Light-in/Light-out en fonction de la température sous impulsions de 700 ns, c/ Courbes Light-in/Light-out en fonction de la température sous impulsions variant de 600 ns à 1 µs à 60 K.

Les largeurs d'impulsion électrique ont été variées de 600 ns à 1 µs à 60 K (Figure 2c). La diminution de la durée d'impulsion permet d'abaisser le seuil laser en réduisant l'échauffement. Cependant, en raison de l'inductance des fils de connexion dans le cryostat, le courant maximal pouvant être injecté diminue lorsque la durée d'impulsion est raccourcie. Dans cette configuration, une durée d'impulsion optimale a été trouvée à 700 ns (Figure 2c).

3.2 Optimisation des conditions de pompage : effet laser à 77 K

L'échantillon a ensuite été placé dans un second cryostat avec des fils de connexion plus courts. Dans ce cas, l'inductance des fils est plus faible pour passer au-dessus du seuil laser avec des durées d'impulsion plus courtes

que 700 ns. Pour les mêmes raisons qu'observées à 60 K, la durée d'impulsion optimale se trouve être cette fois-ci de 150 ns (Figure 3). En dessous de celle-ci, le courant est trop faible pour atteindre le seuil. Au-dessus de 150 ns, le composant est limité par la dissipation thermique et l'effet laser est perdu à 200 ns.

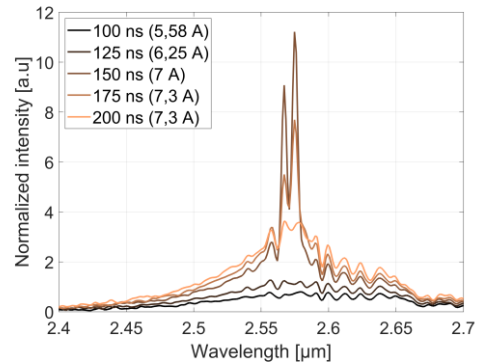


Figure 3: Spectres d'émission à 77 K pour des guides d'ondes de 80 µm de largeur sous une longueur d'impulsion de courant variant de 100 ns à 200 ns.

4. CONCLUSION

Nous présentons des lasers Fabry-Perot pompés électriquement avec une couche active de Ge_{0,86}Sn_{0,14} épitaxiée sur silicium. Un effet laser a été observé jusqu'à 60 K avec des impulsions de 700 ns et un effet laser a été ensuite obtenu jusqu'à 77 K avec une plus petite largeur d'impulsion de pompage de 150 ns. Plusieurs améliorations sont actuellement envisagées pour augmenter le fonctionnement en température des lasers : (i) en optimisant la géométrie et la dimension des contacts électriques, (ii) en améliorant de la structure épitaxiale avec des barrières SiGeSn, et (iii) en contrôlant les contraintes mécaniques de la structure laser. Ces résultats montrent l'avenir prometteur des sources laser GeSn comme éléments clés pour réaliser des systèmes photoniques intégrés basés sur la technologie CMOS.

Remerciement : Ce travail a été soutenu par le projet LASTSTEP de l'Union Européenne Horizon 2020 sous l'accord de subvention ID : 101070208, le projet EDEN Carnot et le projet Phare de la CEA DRF-DRT. Nous remercions chaleureusement le personnel de la salle blanche de LETI et IRIG pour leur soutien technique.

REFERENCES

- [1] V. Reboud *et al.*, Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials, **2017**, 63(2), pp. 1–24.
- [2] V. Reboud *et al.*, Photonics and Nanostructures Fundamentals and Applications, **2024**, 58, 101233
- [3] J. Chrétien *et al.*, Room temperature optically pumped GeSn microdisk lasers, Appl. Phys. Lett. **2022**, 120, 051107.
- [4] A. Bjelajac *et al.*, Up to 300 K lasing with GeSn-On-Insulator microdisk resonators **2022**, 30, 3, 3954-3961.
- [5] D. Buca, *et al.*, Room Temperature Lasing in GeSn Microdisks Enabled by Strain Engineering, Advanced Optical Materials, **2022**, 10(22), 2201024.
- [6] A. Quintero, *et al.*, Ni-based metallization of GeSn layers: A review and recent advances, Microelectron. Eng., **2023**, 269, 111919.

SiGe ring resonators for mid-IR spectrometers on Si photonic circuits

Andres Remis¹, Victor Turpaud¹, Hamza Dely¹, Thi-Hao-Nhi Nguyen¹, Stefano Calcaterra², Davide Impelluso², Jacopo Frigerio², Jean-René Coudeville¹, Etienne Herth¹, Samson Edmond¹, Giovanni Isella² and Delphine Marris-Morini¹

¹Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies, CNRS, Université Paris-Saclay, 91120 Palaiseau, France

²L-NESS, Dipartimento di Fisica, Politecnico di Milano, 22100 Como, Italy

The mid-infrared spectral range contains the so-called fingerprint region (6-15 μm) in which biological and chemical species have vibrational and rotational resonances. There is, therefore, a soaring demand for compact and portable mid-infrared spectrometers for a variety of applications including defence, industrial monitoring or security, among others. The use of Silicon (Si) photonics for the miniaturization of these sensors is the most promising approach thanks to the mature Si industry, the large Si wafer size and the optical properties of Si and related materials. In particular, graded-index silicon germanium (SiGe) is considered a promising platform for sensing applications in the mid-IR thanks to the wide transparency window of Ge (2-14 μm) and the good light confinement in Ge-rich SiGe layer.¹ A variety of devices has been demonstrated using this platform.²⁻⁵ However, high Q resonators are still at their infancy.

We demonstrate in this work the realization of SiGe ring resonators using 6 μm -thick graded SiGe layer (Figure 1.a). Using our experimental set-up, the wavelength sweep of the laser used to characterize the ring resonators is limited by the minimum tuning step size of the laser, which means the spectral resolution of the measurement is limited, which prevent accurate measurement of narrow resonance features. To circumvent this limitation, a phase shifter is implemented in the resonator, by fabricating thermal heaters near the ring, enabling thermal dissipation, thus, a variation in the effective refractive index (Figure 1.a and b). The characterization of the devices is under process and results will be reported.

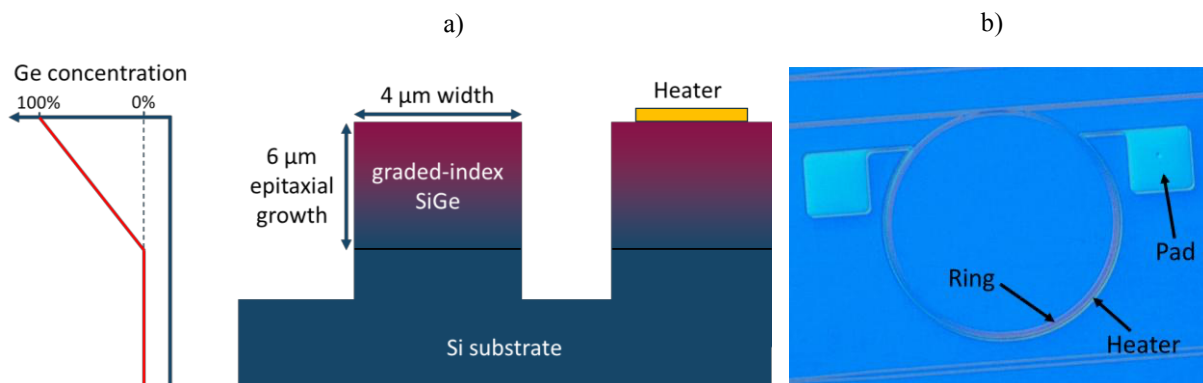


Fig. 1 a) Structure of the graded-index SiGe epitaxial growth for the ring resonators. b) Optical image taken from the top of the ring resonators.

This work was supported by the EU pathfinder open UNISON project and the French RENATECH network.

References

- (1) Soref, R. Mid-Infrared Photonics in Silicon and Germanium. *Nature Photon* **2010**, *4* (8), 495–497. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2010.171>.
- (2) Turpaud, V.; Nguyen, T.-H.-N.; Koompai, N.; Peltier, J.; Frigerio, J.; Calcaterra, S.; Coudeville, J.-R.; Bouville, D.; Alonso-Ramos, C.; Vivien, L.; Isella, G.; Marris-Morini, D. Tunable On-Chip Electro-Optic Frequency-Comb Generation at 8 μm Wavelength. arXiv February 12, 2024. <http://arxiv.org/abs/2402.07646> (accessed 2024-05-30).
- (3) Koompai, N.; Nguyen, T. H. N.; Turpaud, V.; Frigerio, J.; Falcone, V.; Calcaterra, S.; Lucia, L.; Bousseksou, A.; Colombelli, R.; Coudeville, J.-R.; Bouville, D.; Alonso-Ramos, C.; Vivien, L.; Isella, G.; Marris-Morini, D. Long-Wave Infrared Integrated Resonators in the 7.5–9 μm Wavelength Range. *Applied Physics Letters* **2023**, *123* (3), 031109. <https://doi.org/10.1063/5.0157177>.
- (4) Nguyen, T. H. N.; Turpaud, V.; Koompai, N.; Peltier, J.; Calcaterra, S.; Isella, G.; Coudeville, J.-R.; Alonso-Ramos, C.; Vivien, L.; Frigerio, J.; Marris-Morini, D. Integrated PIN Modulator and Photodetector Operating in the Mid-Infrared Range from 5.5 μm to 10 μm . *Nanophotonics* **2024**, *13* (10), 1803–1813. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2023-0692>.
- (5) Montesinos-Ballester, M.; Vakarin, V.; Liu, Q.; Le Roux, X.; Frigerio, J.; Ballabio, A.; Barzagli, A.; Alonso-Ramos, C.; Vivien, L.; Isella, G.; Marris-Morini, D. Ge-Rich Graded SiGe Waveguides and Interferometers from 5 to 11 μm Wavelength Range. *Opt. Express* **2020**, *28* (9), 12771. <https://doi.org/10.1364/OE.391464>.

Type-I and type-II interband cascade lasers emitting around 2.7 μm

M. Fagot¹, D.A. Diaz-Thomas¹, Y. Rouillard¹, J.B. Rodriguez¹, E. Tournié^{1,2}, and L. Cerutti¹

¹ IES, University of Montpellier, CNRS, F-34000 Montpellier, France

² Institut Universitaire de France (IUF), F-75005 Paris, France

* E-mail: maeva.fagot@umontpellier.fr

ABSTRACT

We compared the performance of ICLs with different active zone designs (type-I or type-II QW). The type-I ICL showed higher performance than the conventional design, with lower threshold currents and higher operating temperature. These results are promising for improving laser performance at short wavelengths.

1. INTRODUCTION

In recent decades, interband cascade lasers (ICLs) have emerged as the leading mid-infrared source, with a performance sweet spot between 3 and 4 μm . Extensive studies have been carried out to extend their operating wavelength range [1]. In contrast, little work has been done at shorter wavelengths, where most applications use type-I laser diodes. However, their performance degrades significantly above 2.5 μm [2]. In this case, developing ICLs in this range could improve laser performance and cover the 2.5 – 3 μm range.

2. STUDY DESCRIPTION

In this work, we compare the performance of ICLs using type-I and type-II QWs. Both lasers are designed to emit at 2.7 μm , the first one with a GaInAsSb QW and the second with a conventional W-QW. The structures are grown by molecular beam epitaxy on GaSb substrates and consist of a 5-stage active zone, comprised between two n-doped InAs/AlSb superlattice claddings and two n-doped GaSb separate confinement heterostructures. The lasers are then processed into 100 μm x 2 mm and 8 μm x 2 mm Fabry-Perot cavities using standard photolithography and etching techniques.

3. RESULTS

The type-I and type-II ICLs were studied in the pulsed regime at 20°C and showed threshold current densities of 100 A/cm² and 360 A/cm², respectively (Figure 1). In CW operation, both structures share a common characteristic temperature of 44 K, but the type-I ICL operates at less than half the threshold current of the type-II ICL. In addition, the maximum operating temperature was of 70°C, whereas the type-II ICL does not exceed 55°C (Figure 2). A study as a function of the

cavity length showed that the internal losses were the same for both structures (7 cm⁻¹), but the internal quantum efficiency was much better in the type-I ICL (208%) than in the type-II structure (116%). This result was expected as the recombination probability is higher in a type-I QW due to the better wavefunction overlap.

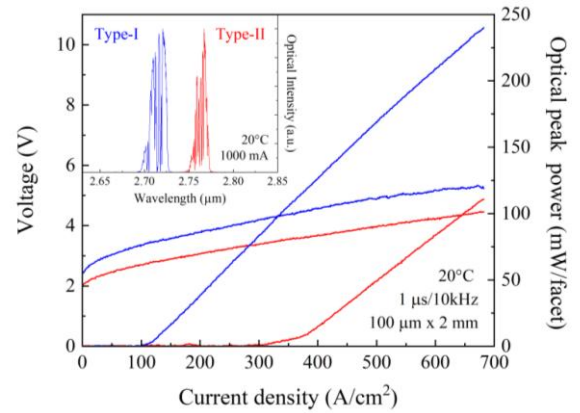


Figure 1: L-I-V curves of broad area type-I and type-II ICLs measured in pulsed regime at 20°C. Insert: Spectra in pulsed regime, at 20 °C for an injection current of 1 A.

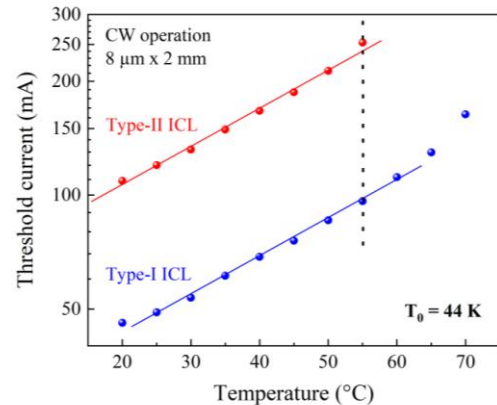


Figure 2: Threshold current vs operating temperature for type-I and type-II ICLs.

4. CONCLUSION

These initial results show that while the performance of the conventional ICL design is limited below 3 μm ,

type-I ICLs open the way to high-performance lasers in the 2.5 – 3 μm range.

This work was partially supported by the French program “Investments for the Future” (EquipEx EXTRA and HYBAT, ANR-11-EQPX0016, ANR-21-ESRE-0026), the French Occitanie Region (LASIDO project), the French Agency for Defense and Innovation (AID-DGA) and the BPI (HyQuality Project DOS0188007/00).

REFERENCES

- [1] J. Nauschütz *et al.*, *Laser Photonics Rev.*, vol. 17, no. 4, p. 2200587, 2023.
- [2] K. S. Gadedjisso-Tossou *et al.*, *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 28, p. 015015, 2012.

Posters :

**Composants photoniques, intégration
photonique et optoélectronique,
Composants et technologies THz**

SOURCE THZ COHERENTE ACCORDABLE BASEE SUR DES TECHNOLOGIES III-V

M. NADRANI¹, A. BARTOLO¹, B. CHOMET¹, J.-P. GUILLET², P.-K. LU³, M. JARRAHI³,
G. BEAUDOIN⁴, K. PANTZAS⁴, I. SAGNES⁴, S. BLIN¹, A. GARNACHE¹

¹Institut d'Electronique et des Systèmes, Université de Montpellier, CNRS UMR 5214, 34090, Montpellier, France,

²Laboratoire de l'Intégration du Matériau au Système, Université de Bordeaux, CNRS UMR 5218, 33400, Talence, France,

³Electrical and Computer Engineering Department, University of California, Los Angeles, CA 90095, USA,

⁴Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies, Université Paris-Saclay, CNRS UMR 9001, 91120 Palaiseau, France,

* mohamed.nadrani@umontpellier.fr

RESUME

Nous présentons une source THz structurée, continue à base des technologies GaAs, accordable par photomélangement à température ambiante, basée sur un laser VECSEL bifréquence, cohérent à 1 μm et des antennes photoconductrices plasmoniques comme photomélangeur.

1. INTRODUCTION

La bande TéraHertz (THz) est comprise entre les micro-ondes et l'infrarouge (la bande de fréquences allant de 100 GHz à 10 THz) dans le spectre des ondes électromagnétiques. Ces ondes sont bien connues par leur capacité à traverser plusieurs matériaux diélectriques comme les vêtements, le bois, le plastique avec peu de perturbations (atténuation et/ou réflexion), ce qui les rend idéales pour des applications dans différents domaines comme les télécommunications sans fil à très haut débit [1], l'imagerie, la spectroscopie et la sécurité [2,3].

Cependant l'un des verrous fondamentaux pour la réalisation d'un système THz attractif est la disponibilité de sources et détecteurs adéquates d'où la proposition de développement d'un émetteur THz continu, puissant, cohérent, accordable, à base de semiconducteurs III-V en combinant un laser VECSEL bifréquence (pour Vertical External Cavity Surface Emitting Laser) et une antenne photoconductrice (PC) aux électrodes plasmoniques pour la génération d'une onde THz par photo-mélange.

Dans cette approche, il est envisageable d'avoir deux modes transverses de la famille Laguerre-Gauss, le fondamental et un mode d'ordre supérieur à deux fréquences différentes f_1 et f_2 pour les mêmes paramètres du système. Ces modes étant issus de la même cavité, la majeure partie de leur bruit de fréquence est corrélée, permettant ainsi de générer via l'antenne PC une onde THz cohérente à une fréquence Δf où $\Delta f = |f_2 - f_1|$. La figure 1 a) est un schéma du VECSEL pompé

optiquement et montrant la technologie des masques en Chrome (Cr) déposés à la surface de la structure semiconductrice et permettant la sélection des deux modes transverses par les pertes.

Les antennes PC aux électrodes plasmoniques proposent un meilleur rendement en comparaison aux photodiodes UTC "Uni-Traveling Carrier Diode" [4] mais sont limitées à une puissance maximale de -30 dBm pour un pompage à 1 μm [5].

Les antennes PC sont basées sur la photo-absorption de deux faisceaux lasers incidents à une certaine fréquence optique (f_1 et f_2) et la génération d'électrons à la différence de fréquence des deux lasers (Δf). Les porteurs photo-excités seront ensuite accélérés vers les électrodes afin de commander l'antenne et générer un rayonnement THz comme illustré sur la figure 1 b).

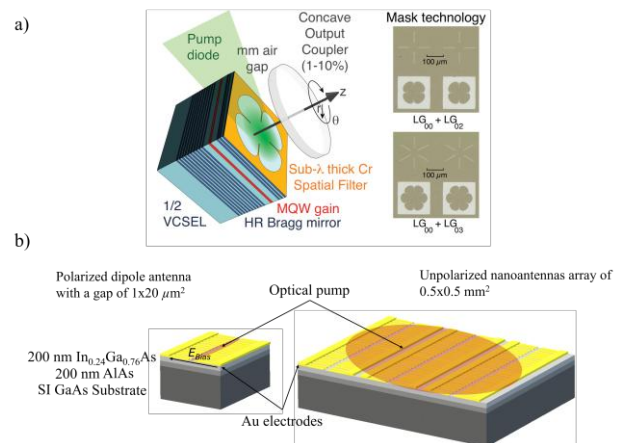


Figure 1 : a) Schéma expérimental du VECSEL bifréquence. b) Schéma des antennes PC plasmoniques.

L'intégration des électrodes plasmoniques améliore le rendement de conversion optique en THz grâce à l'excitation des plasmons, des oscillations collectives du nuage d'électrons à certaines fréquences à l'interface métal-semiconducteur [3].

2. DESCRIPTION DE L'ETUDE

Nous caractériserons la source laser bifréquence (la puissance optique et l'accordabilité) ainsi que l'émission THz obtenue avec deux différentes antennes PC, une antenne dipôle polarisée excitée sur une surface de $1 \times 20 \mu\text{m}^2$ et un réseau de $0,5 \times 0,5 \text{ mm}^2$ de nano-antennes auto-polarisées. Nous allons discuter les limitations physiques des antennes photoconductrices utilisées et analyser les effets de saturation observés sur la figure 2.

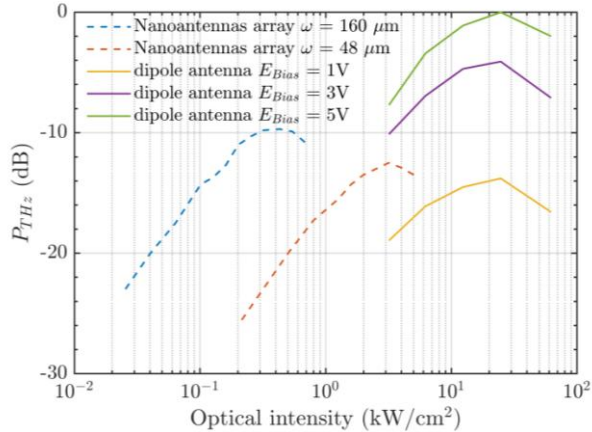


Figure 2 : Puissance THz émise en fonction de la puissance optique à 300 GHz pour différentes antennes.

3. CONCLUSIONS

Nous avons démontré un émetteur THz continu, structuré, cohérent à température ambiante, basé sur des technologies III-V et atteignant une puissance maximale de -38 dBm à 300-GHz utilisant des antennes PC plasmoniques et un VECSEL bifréquence accordable.

4. FINANCEMENTS

Ce travail a été financé par l'ANR PEPR Electronique, l'ANR SPATIOTERA, le programme d'excellence I-SITE MUSE AAP2021, la région d'Occitanie / Pyrénées-Méditerranée et le fonds européen de développement régional (via la plateforme HERMES).

5. REFERENCES

- [1] ZHANG, Hongqi, ZHANG, Lu, WANG, Shiwei, et al. Tbit/s multi-dimensional multiplexing THz-over-fiber for 6G wireless communication. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, vol. 39, no 18, p. 5783-5790.
- [2] Kemp, M. C., Taday, P. F., Cole, B. E., Cluff, J. A., Fitzgerald, A. J., & Tribe, W. R. (2003, July). Security applications of terahertz technology. In *Terahertz for military and security applications* (Vol. 5070, pp. 44-52). SPIE.
- [3] JEPSEN, P. Uhd, COOKE, David G., et KOCH, Martin. Terahertz spectroscopy and imaging—Modern techniques and applications. *Laser & Photonics Reviews*, 2011, vol. 5, no 1, p. 124-166
- [4] BERRY, Christopher W., WANG, N., HASHEMI, Mohammad R., et al. Significant performance enhancement in photoconductive terahertz optoelectronics by incorporating

plasmonic contact electrodes. *Nature communications*, 2013, vol. 4, no 1, p. 1622.

[5] Blin, S., Paquet, R., Myara, M., Chomet, B., Le Gratiot, L., Sellahi, M., Beaudoin, G., Sagnes, I., Ducourneau, G., Latzel, P., et al. (2017). Coherent and tunable thz emission driven by an integrated iii-v semiconductor laser. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 23(4):1–11.

Posters :
Matériaux et nanostructures

DES NANOFILS AUX MICRODOMAINES : UNE NOUVELLE VOIE DE SYNTHÈSE POUR LE NITRURE DE GALLIUM

Arthur Sauvagnat¹, Elias Semlali¹, Geoffrey Avit¹, Yamina André¹, Evelyne Gil¹, Dyhia Tamsaout², Jean-Christophe Harmand², Maria Tchernycheva², Ludovic Largeau² and Agnès Trassoudaine¹

¹Université Clermont Auvergne, CNRS, SIGMA Clermont, Institut Pascal, 63000 Clermont-Ferrand, France

²Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies, CNRS UMR 9001, Univ. Paris-Saclay, 91120 Palaiseau, France.

* E-mail : Arthur.SAUVAGNAT@uca.fr

RESUME

Depuis plusieurs années, des diodes électroluminescentes (LEDs) flexibles sous forme de nanofils (NFs) à base de multi-puits quantiques core-shell InGaN/GaN émettant dans le bleu et le vert ont été développées [1]. Par rapport à la technologie OLED (LED organique) actuellement commercialisée, ces LEDs à base de NFs devraient offrir une meilleure luminance, une efficacité quantique externe plus élevée et une durée de vie plus longue. Afin de produire ces LEDs flexibles, une voie prometteuse consiste à produire des micro-domaines pouvant être facilement exfoliés et utilisés comme micro-substrats. Notre méthode de synthèse novatrice implique une croissance en deux étapes : croissance de NFs de GaN sur graphène par épitaxie par jets moléculaires (MBE), suivie d'un élargissement par épitaxie en phase vapeur par la méthode aux hydrures (HVPE). Les propriétés cristallines et optiques des structures obtenues sont caractérisées par microscopie électronique à transmission (STEM) et cathodoluminescence (CL).

1. INTRODUCTION

Les LEDs flexibles représentent une avancée significative par rapport aux technologies actuelles telles que les OLEDs. En utilisant des NFs InGaN/GaN, il est possible d'atteindre de meilleures performances en termes de luminance, d'efficacité quantique externe et de durabilité. La fabrication de ces LEDs flexibles nécessite une approche innovante pour créer des micro-domaines pouvant servir de micro-substrats exfoliables.

2. DESCRIPTION DE L'ETUDE

La synthèse des micro-domaines se déroule en deux étapes distinctes. Tout d'abord, nous épitaxions par MBE des NFs de 100 nm de longueur sur un substrat de graphène déposé sur SiO₂/Si(111) [2]. Ces NFs servent de germes initiaux pour l'étape suivante. Les NFs de GaN sont ensuite élargis à une échelle micrométrique par

HVPE. Cette technique utilise des éléments chlorés (précurseurs d'élément III) et de l'ammoniac (précurseur d'élément V) dans un réacteur à mur chaud sous pression atmosphérique. La HVPE présente des avantages considérables, notamment des taux de croissance pouvant atteindre plusieurs dizaines de $\mu\text{m}/\text{h}$ [3] et une grande sélectivité sur des substrats masqués.

3. RESULTATS

Nous démontrons la recroissance par HVPE de micro-domaines de GaN sur des NFs de GaN auto-organisés épitaxiés par MBE sur un substrat de graphène déposé sur SiO₂/Si(111). L'influence de la composition du gaz vecteur pendant la phase de recroissance sur la morphologie des structures est étudiée par microscopie électronique à balayage (MEB) (Figure 1).

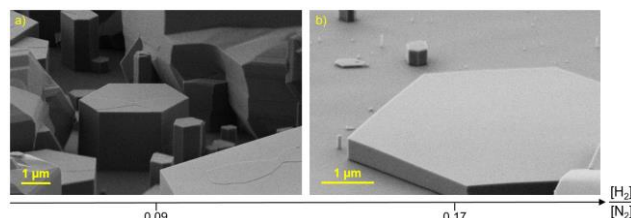


Figure 1 : Influence de la fraction d'H₂ dans le gaz vecteur N₂ sur la morphologie des micro-domaines GaN. a) Image MEB de la morphologie des micro-domaines avec une fraction de H₂ de 0,09. b) Image MEB de la morphologie des micro-domaines avec une fraction de H₂ de 0,17.

L'excellente qualité cristalline de ces structures est mise en évidence par des caractérisations STEM (Figure 2). Les propriétés optiques sont analysées par des mesures de CL. Afin d'améliorer l'homogénéité des structures, nous avons également réalisé une recroissance HVPE sur des nanofils de GaN sur un substrat patterné de graphène déposé sur SiO₂/Si(111) (Figure 3).

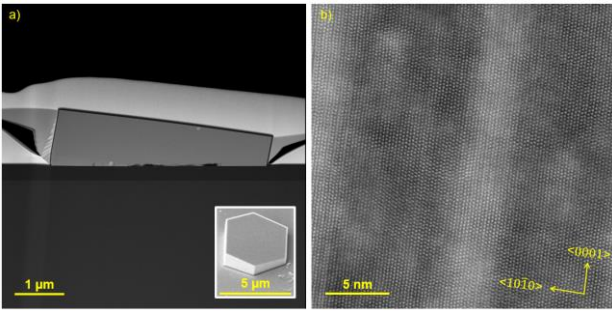


Figure 2 : Caractérisations STEM (images HAADF) de micro-domaines de GaN élargis par HVPE sur des NFs de GaN auto-organisés, épitaxiés par MBE sur un substrat de graphène déposé sur $\text{SiO}_2/\text{Si}(111)$. a) Image HAADF en champs lointain du micro-domaine. b) Image HAADF en champ proche du micro-domaine.

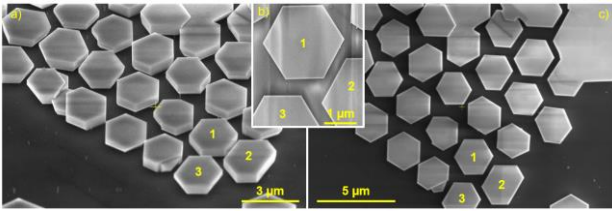


Figure 3 : Images MEB de micro-domaines de GaN élargis par HVPE sur des NFs de GaN organisés, épitaxiés par MBE sur un substrat patterné de graphène déposé sur $\text{SiO}_2/\text{Si}(111)$. a) Vue inclinée en champ lointain. b) Vue de dessus en champ proche. c) Vue du dessus en champ lointain.

4. CONCLUSIONS

Les micro-domaines obtenus par cette méthode de synthèse en deux étapes pourraient servir de substrats de haute qualité pour la réalisation d'applications optoélectroniques. Les résultats sont également prometteurs pour la production de micro-domaines InGaN par HVPE, ouvrant la voie à la fabrication de pixels RGB à base de nitrures.

4. REFERENCES

- [1] Tian, P. et al. (2016). Fabrication, characterization and applications of flexible vertical InGaN micro-light emitting diode arrays. *Optics express*, 24(1), 699-707.
- [2] Morassi, M. et al. (2019). Selective area growth of GaN nanowires on graphene nanodots. *Crystal Growth & Design*, 20(2), 552-559.
- [3] Andre, Y. et al. (2007). Low dislocation density high-quality thick hydride vapour phase epitaxy (HVPE) GaN layers. *Journal of crystal growth*, 306(1), 86-93.

CROISSANCE SELECTIVE DE NANOFILS INGAN POUR LA FABRICATION DE MICRO-SUBSTRATS : UNE VOIE PROMETTEUSE POUR UNE EMISSION ROUGE EFFICACE A BASE DE NITRURES

Arthur Sauvagnat^{1*}, Elias Semlali¹, Geoffrey Avit¹, Yamina André¹, Evelyne Gil¹, Catherine Bougerol², V. G. Dubrovskii³, Philip Shields⁴, Névine Rochat⁵, Eric Tournié⁶, Thierry Taliercio⁶ and Agnès Trassoudaine¹

¹ Université. Clermont Auvergne, CNRS, SIGMA Clermont, Institut Pascal, F-63000 Clermont-Ferrand, France

² CNRS, Institut Néel, F-38042 Grenoble, France

³ Faculty of Physics, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

⁴ Department of Electronic & Electrical Engineering, University of Bath, England

⁵ Univ. Grenoble Alpes, CEA, Leti, F-38000 Grenoble, France

⁶ IES, UMR CNRS 5214, CC067, Université Montpellier 2, Place Eugène Bataillon, 34095 Montpellier Cedex 05, France

* E-mail : Arthur.SAUVAGNAT@uca.fr

RESUME

Le matériau InGaN est largement étudié pour les dispositifs optoélectroniques à base de nitrures en raison de sa bande interdite modulable de l'infrarouge à l'ultraviolet en variant la fraction molaire d'InN dans l'alliage. Cependant, la croissance des couches d'InGaN sur des substrats à faible coût à base de Silicium ou de GaN présente des défis considérables en raison de forts désaccords de maille, de phénomènes de ségrégation et d'instabilité thermique. Cette étude explore la croissance sélective d'InGaN sous forme de nanofils (NFs) en utilisant l'épitaxie en phase vapeur par la méthode aux hydrures (HVPE) pour améliorer l'émission rouge à base de nitrure. Nous proposons également un modèle phénoménologique décrivant la croissance du plan c d'un NF et permettant de déterminer l'évolution de la composition de la phase solide en fonction de la composition de la phase vapeur.

1. INTRODUCTION

L'InGaN est reconnu pour ses propriétés optoélectroniques exceptionnelles, mais la croissance de ce matériau sur des substrats bon marché à base de Silicium ou de GaN est entravée par des problèmes tels que la contrainte en compression, la ségrégation des éléments et l'instabilité de l'indium à haute température. Ces obstacles réduisent l'efficacité quantique externe, particulièrement pour les longueurs d'onde rouges.

2. DESCRIPTION DE L'ETUDE

Pour surmonter ces limitations, l'utilisation de NF d'InGaN est proposée, permettant une croissance avec une densité de défauts réduite grâce à la propagation latérale de la contrainte. La croissance de ces NFs est

effectuée par HVPE sur des substrats GaN polarité Ga sur Saphir avec un masque SiN patterné. Les ouvertures du masque sont de 200 nm. La HVPE utilise des éléments chlorés (précurseurs d'élément III) et de l'ammoniac (précurseur d'élément V) dans un réacteur à mur chaud sous pression atmosphérique. Cette technique présente des avantages considérables, notamment des taux de croissance pouvant atteindre plusieurs dizaines de $\mu\text{m}/\text{h}$, une grande sélectivité sur des substrats masqués et un contrôle de la fraction molaire d'InN allant de 0 à 100% sans problèmes de miscibilité [1, 2].

3. RESULTATS

Nous démontrons la croissance sélective par HVPE et le contrôle de la composition de réseaux de NFs InGaN bien ordonnés en contrôlant les pressions partielles des éléments III (InCl_3 et GaCl). Des mesures de photoluminescence (PL) ont été réalisées pour étudier les propriétés optiques et la composition des NFs (Figure 1).

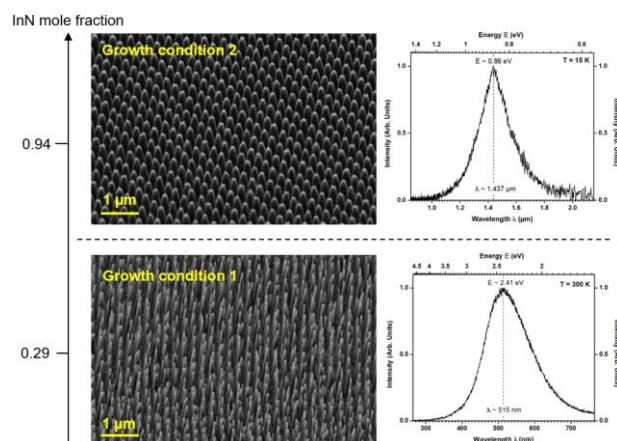


Figure 1 : Images MEB en vue inclinée et spectres PL de NFs InGaN épitaxiés par HVPE sur des substrats de GaN polarité Ga sur Saphir avec un masque SiN et des ouvertures de 200 nm.

Les résultats expérimentaux sont soutenus par un modèle phénoménologique de la croissance du plan c des NFs InGaN. Les mécanismes de croissance et les processus cinétiques d'adsorption, de diffusion des éléments III et de désorption du chlore ont été pris en compte. La modélisation cinétique de l'In a été réalisée en utilisant la théorie d'Eyring. L'ajustement des points expérimentaux permet de déterminer l'évolution de la composition de la phase solide en fonction de la composition de la phase vapeur pour différentes températures de croissance (Figure 2).

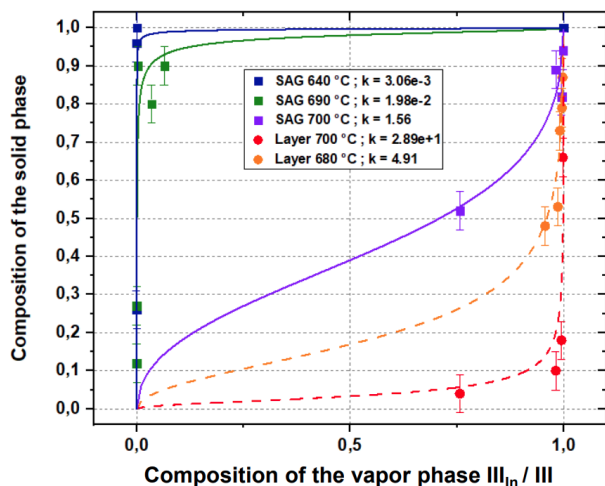


Figure 2 : Ajustement théorique de la composition de la phase solide d'un NF d'InGaN en fonction de la composition de la phase vapeur. Les compositions expérimentales de la phase solide sont déterminées par des mesures EDX

4. CONCLUSIONS

Ces résultats sont prometteurs pour la production de micro-domaines InGaN et la réalisation de LED RGB à base de nitride. La HVPE offre des vitesses de croissance élevés, une forte sélectivité et un contrôle de la composition des NF InGaN, ouvrant la voie à une nouvelle génération de dispositifs optoélectroniques efficaces.

4. REFERENCES

- [1] Zeghouane, M., Avit, G., André, Y., Bougerol, C., Robin, Y., Ferret, P., ... & Trassoudaine, A. (2018). Compositional control of homogeneous InGaN nanowires with the In content up to 90%. *Nanotechnology*, 30(4), 044001.
- [2] Roche, E., Andre, Y., Avit, G., Bougerol, C., Castelluci, D., Réveret, F., ... & Trassoudaine, A. (2018). Circumventing the miscibility gap in InGaN nanowires emitting from blue to red. *Nanotechnology*, 29(46), 465602.

DESIGN AND FABRICATION OF ORGANIC SOLAR CELLS DEDICATED FOR A USE AT HIGH TEMPERATURES FOR APPLICATION IN A HYBRID PV-CSP SYSTEMS

Vladyslava Lunova^{1,2}, Stéphanie Parola¹, Sébastien Richeter², Philippe Gerbier², Sébastien Clément² and Yvan Cuminal¹

¹ IES, Univ. Montpellier, CNRS, UMR5214, Montpellier, France

² ICGM, Univ. Montpellier, CNRS, ENSCM, Montpellier, France

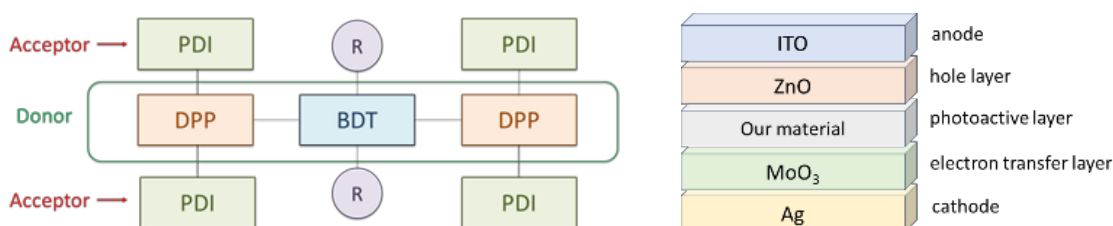
vladyslava.lunova@umontpellier.fr

INTRODUCTION

Hybrid solar photovoltaic/thermal power systems offer the possibility of dispatchable, low-cost, efficient and reliable solar electricity production. However, the main part of the collected solar radiation is converted into heat, increasing PV-cell temperature and, therefore, reducing PV-cell efficiency. Another distinctive feature of this application is its dependence on the available solar spectrum, primarily focusing on the UV-Visible part of the solar spectrum for the PV component. Due to this specification, organic solar cells (OSCs) can be considered as interesting PV system to explore in combination with CSP. While photovoltaic conversion efficiencies of around 18% have been achieved for these types of devices, their morphology is generally thermodynamically unstable (phase segregation), which is detrimental to exciton dissociation, resulting in a rapid degradation of photoconversion efficiency. In recent years, an elegant approach to overcome this instability involves the development of OSCs composed of a single component (SCOSCs).

DESCRIPTION OF STUDY

We decide to exploit the SCOSCs approach in the development of PV system π combining: 1) high stability at high temperature for compatibility with CSP system and 2) absorption in the UV-Visible region of solar spectrum. These SCOSCs will be developed from molecular architecture combining donor and acceptor moieties which are chemically linked together in the same molecule and can self-organize into ordered structures that enables efficient charge transport and low charge recombination. For the first material, we follow the concept of combination of PDI (perylene diimide) as an acceptor with DPP (diketopyrrolopyrrole) and BDT (benzodithiophene) as a donor based on the reported superior electron-transporting properties. The project couples 2 parts: 1) Design, synthesis and characterization of two types of organic material for PV solar cells: small molecules and polymers and 2) Fabrication and characterization of PV solar cells. Herein, we will describe the synthesis, the thermal, optical properties and preliminary photovoltaic properties of our material.



Key Words: Organic solar cells (OSCs), photovoltaic, single component organic solar cells (SCOSCs), π -conjugated materials

DEVELOPMENT OF NANOPILLAR ARRAYS WITH NANOIMPRINT LITHOGRAPHY FOR FREESTANDING GAN-BASED μ LEDS

Nabil Labchir^{1,2}, Maya Wehbe², Sebastien Labau¹, Jerome Reche², Camille Petit-Etienne¹, Marie Panabière¹, Pierre-Marie Coulon³, Blandine Alloing³, Jesus Zuniga-Perez³, Matthew Charles², Cécile Gourgon¹

1 Université Grenoble Alpes, CNRS, CEA/LETI-Minatec, Grenoble INP, LTM, 17 Rue des Martyrs, Grenoble 38054, France

2 Université Grenoble Alpes, CEA-LETI, 17 Rue des Martyrs, Grenoble 38054, France

3 Université Cote d'Azur, CRHEA-CNRS, Rue Bernard Gregory, Valbonne 06560, France

E-mail: nabil.labchir@cea.fr

RESUME

The mass production of μ LEDs requires an upscaling approach on 200 mm wafers, which implies the deployment of a technology that achieves zero defectivity. In this report, Nanoimprint lithography (NIL) processing has been successfully optimized for nanostructuring GaN-based Silicon-On-Insulator (SOI) substrates. The etching of GaN/AlN on SOI layers using different plasmas is conducted and multi-layer 200 nm nanopillars have been fabricated. This approach generates zero-defect arrays of pillars, which is particularly advantageous for the growth process. As a result, high quality GaN microplatelets and μ LEDs were grown via a bottom-up approach based on pendeoepitaxy using metal organic vapor phase epitaxy (MOVPE). The fabricated μ LEDs have been transferred to Si substrate using an adhesive tape and metal-metal bonding. The reported findings in this study are highly encouraging and offer exciting new insights into the development of the next generation of high-performance displays.

1. INTRODUCTION

Over the last twenty years, displays have seen a profound evolution and have faced a number of technological issues, including the efficient and independent addressability of individual pixels, the reduction in emitting-region thickness, the increase of display size as well as improving image quality. Today, the issue of energy consumption could lead to the emergence of a new high performance LED-based display technology. In this context, nanoimprint lithography (NIL) processing can be used to successfully optimize the nanostructuring of GaN-based on SOI substrates. Such approach will generate zero-defect arrays of nanopillars, which can be used to fabricate μ LEDs via a bottom-up approach based on pendeoepitaxy.

2. DESCRIPTION DE L'ETUDE

The fabrication of nanopillars using the NIL and plasma etching approach is a highly successful path for achieving very homogenous nanostructured surface. We introduce in the present research a new approach that

does not employ liftoff at any stage, which renders it compatible with 200mm Si production lines. With the newly fabricated nanopillars via nanoimprint lithography and plasma etching, we will implement pendeoepitaxy of high-quality GaN platelets on SOI substrates, as discussed in references [1,2] and thereafter the growth of complete GaN-based μ LEDs. The size of the platelets has been defined so that each one constitutes an individual μ LED. These μ LEDs will be finally transferred in parallel to a carrier substrate, highlighting the scalability of the whole fabrication/growth/transfer process.

3. RESULTATS

The first phase consisted in fabricating a Si master with the targeted pillar dimensions as illustrated in Fig. 1(a). Subsequently, as shown in Fig. 1(b), PDMS composite is deposited on the Si master in order to reproduce the inversed patterns in a flexible mold after the demolding process.

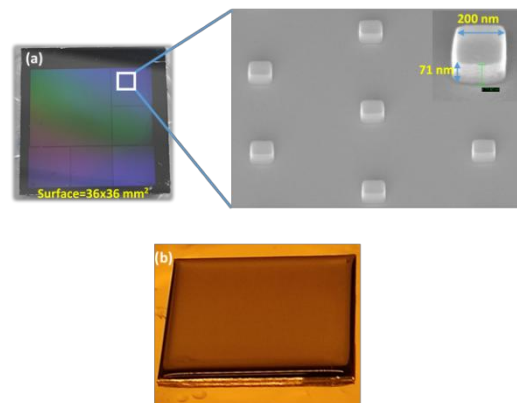


Figure 1 : Etched nanopillar arrays with no missing or mis-aligned pillar on 200 mm wafer.

The fabrication of the nanopillars from the multilayered GaN on SOI structure requires the deposition of two hard SiO_2 and Cr etching masks as displayed in Fig. 2(a). The second phase of the process focuses on the nanopatterning via nanoimprint lithography (NIL) at a pressure of 1 bar and a temperature of 75 °C using the PDMS mold in order to transfer the pillar patterns to the

NIL mr6000 resist (Fig. 2(b)). After the NIL and the demolding, we etch the residual thickness and the two hard masks down until the GaN surface (Figs. 2(c,d,e)). Then, we fabricate the nanopillars from the GaN structure with different plasma gases (CF₄, Cl₂, ...).

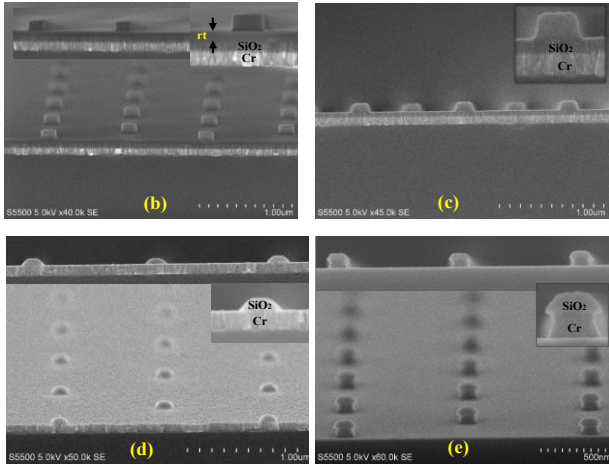
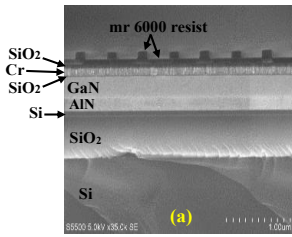


Figure 2 : Etching steps of the mr6000 residual thickness (rt) and hard masks (SiO₂, Cr): (a) typical image of the entire substrate stack with the formed mr6000 pillars on the top after NIL, (b) zoomed view on the rt of the mr6000, (c) after etching of the rt, (d) SiO₂ and (e) Cr.

Figure 3 shows a surface area containing several nanopillar arrays. Each array measures 30x40 µm² and contains pillars measuring 200 nm in diameter. The array is clearly complete, with no missing pillars (zero defect).

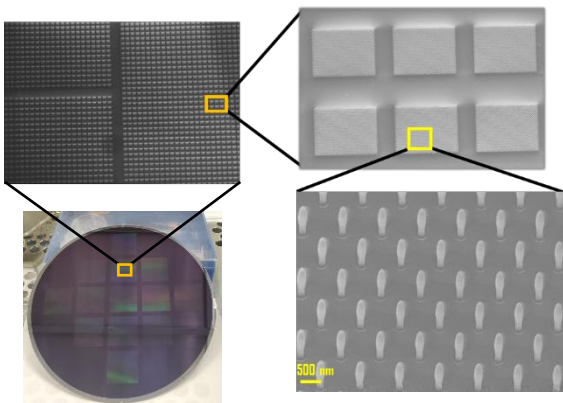


Figure 3 : Etched nanopillar arrays with no missing or mis-aligned pillar on 200 mm wafer.

The fabricated nanopillar arrays are used for GaN and µLED structure growth. Figure 4 illustrates the

pendeopitaxy growth of the µLED on top of GaN-based nanopillars with a SEM top view image.

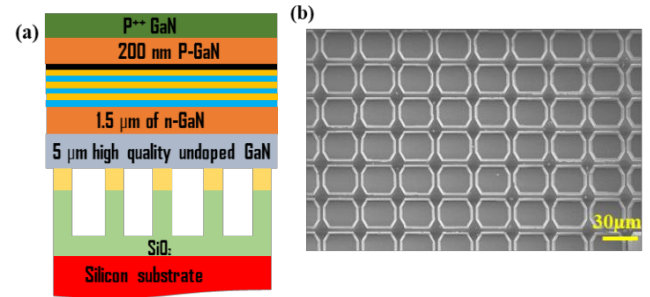


Figure 4 : Epitaxial growth of µLEDs; (a) schematic illustration of the deposited µLED structure on nanopillars, (b) SEM top view of GaN-based µLEDs.

Moreover, we have successfully develop a transfer strategy based on the combination of adhesive tape and metal-metal double bonding in order to enhance the transfer efficiency of µLEDs. Figure 5 shows µLEDs that are collected, transferred and bonded to a new Si substrate [1].

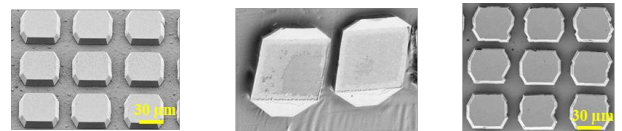


Figure 5 : Transfer of µLEDs; (a) as-deposited µLEDs, (b) after partial transfer of µLEDs, (c) after transfer of µLEDs to Si substrate.

4. CONCLUSIONS

A nanopatterning and transfer protocol have been optimized onto GaN on SOI substrates via NIL. Afterwards, the established approach was applied to fabricate zero-defect GaN/AlN/Si/SiO₂/Si nanopillar arrays by plasma etching. As a result, freestanding µLEDs were successfully formed on top of nanopillars using a bottom-up approach. The µLEDs were easily transferred onto a Si substrate by combining adhesive tape and metal-metal bonding strategies.

4. REFERENCES

[1] N. Labchir, S. Hammami, K. Baril, M. Wehbe, S. Labau, J. Reche, C. Petit-Etienne, M. Panabi re, P-M. Coulon, B. Alloing, D. P. Munoz, J. Zuniga-Perez, P. Gergaud, M. Charles, C. Gourgon. Adv. Mater. Technol, 2400166 (2024)
 [2] K. Baril, P. M. Coulon, M. Mrad, N. Labchir, G. Feuillet, M. Charles, B. Alloing, J. Appl. Phys. 133, 245702 (2023).
 [3] N. Labchir, C. Masclaux, S. Labau, C. Petit-Etienne, M. Panabi re, J. Reche, M. Charles, C. Gourgon. Under review, Adv. Eng. Mater. adem.202400466R1.

KINETIC MONTE CARLO SIMULATION OF GaAs GROWTH ON (001) SILICON

M. Silvestre,^{1,2*} A. Gilbert,¹ J.-B. Rodriguez,¹ and E. Tournié^{2,3}

¹IES, University of Montpellier, CNRS, F – 34000 Montpellier, France

²RIBER SA, F – 95870 Bezons, France

³Institut Universitaire de France (IUF), F-75005 Paris, France

*E-mail: milan.silvestre@umontpellier.fr

SUMMARY

We studied antiphase boundaries (APB) suppression during the growth of GaAs on Si (001) substrates. The kinetics of anisotropic growth is described by Kinetic Monte-Carlo (KMC) simulations that reveal atomic details of the growth.

1. INTRODUCTION

The direct growth of III-V semiconductors on silicon substrates is of major interest for integrated photonics. However, it is plagued by various crystal defects. In particular, antiphase domains (APDs) are delineated by antiphase boundaries (APBs), 2D defects that act as shorts when they reach electrically active regions of devices [1]. Recently, Gilbert *et al.* demonstrated a growth strategy for APB suppression by APD burying during GaAs growth on (001) Si substrates [2].

In this work, we simulate the growth of GaAs on Si using the Kinetic Monte-Carlo (KMC) method, to better understand the APD burying mechanism.

2. KMC MODEL

We have developed an out-of-equilibrium model of GaAs growth on Si. KMC describes stochastic events such as adatom arrival and diffusion on a growing surface. The growth dynamics is analyzed via a Monte-Carlo solid-on-solid model where the process rates depend on nearest neighbor interactions and main crystallographic directions. First, the Si and GaAs surface energies are chosen to reproduce a 3D Volmer-Weber growth mode of GaAs on Si. Then, the anisotropy of the diffusion and incorporation events [3] is taken into account by considering different energetic barriers depending on the main crystallographic directions.

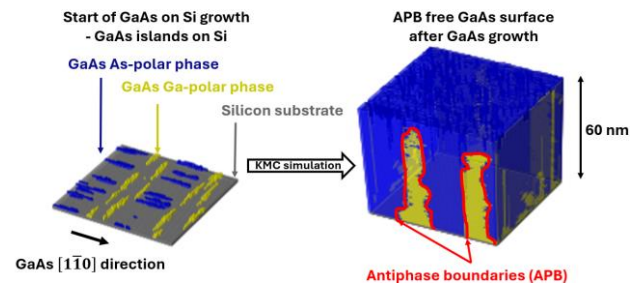


Figure 1 GaAs on Si APB burying by KMC simulation

3. RESULTS

Our simulations show that small differences between the diffusion energy barriers between $[110]$ and $[1\bar{1}0]$ GaAs directions impact the domain growth. KMC simulations show that the As-polar phase slowly buries the Ga-polar phase during the growth, eventually resulting in an APB-free surface as shown in [2]. This work confirms that APD burying is due to the anisotropic diffusion and incorporation of Ga atoms on the GaAs surface, which leads to preferential growth directions depending on the GaAs phase.

4. ACKNOWLEDGMENTS

Part of this work was sponsored by "France 2030" (Equipex EXTRA, ANR-11-EQPX-0016, Equipex+ HYBAT, ANR-21-ESRE-0026).

5. REFERENCES

- [1] H. Kroemer, J. Cryst. Growth **81**, 193 (1987).
- [2] A. Gilbert, M. Ramonda, L. Cerutti, C. Cornet, G. Patriarche, É. Tournié, and J. Rodriguez, Adv. Opt. Mat. **11**, 2203050 (2023).
- [3] K. Ohta, T. Kojima, and T. Nakagawa, J. Cryst. Growth **95**, 71 (1989).

DIRECT GROWTH OF GASB ON GE, GE-ON-SI AND SIGE-ON-SI PLATFORMS FOR INTEGRATED MID INFRA-RED PHOTONICS

M. Silvestre^{1,2}, A. Gilbert,¹ S. Calcaterra³, G. Isella³, J-B. Rodriguez¹, and E. Tournié^{1,4*}

¹IES, University of Montpellier, CNRS, F – 34000 Montpellier, France

²RIBER SA, F – 95870 Bezons, France

³L-NESS, Politecnico di Milano Dipartimento di Fisica, I - 22100 Como Italy

⁴Institut Universitaire de France (IUF), F-75005 Paris, France

* E-mail: milan.silvestre@umontpellier.fr

SUMMARY

We study the growth of GaSb on germanium-based platforms for mid-infrared photonics. Anti-phase domain are buried in a 500 nm GaSb buffer layer on Ge and Ge-on-Si templates thanks to slightly miscut substrates or chemically-mechanically polished surfaces.

1. INTRODUCTION

Integrated mid-infrared (MIR) photonics is of major interest for free-space communications, bio-sensing, etc. III-V antimony-based lasers are efficient MIR light sources that can be grown on passive Si photonic circuits. However, most Si-based materials absorb a large part of the MIR spectrum above 8 μm , in contrast to germanium which has a wide MIR transparency window [1]. The direct growth of III-Sb materials on Ge substrates or Ge-on-Si templates would allow the development of integrated photonic circuits operating at long wavelengths (up to 14 μm). Still, III-V heteroepitaxy on group-IV substrates is plagued by various crystal defects. In particular, anti-phase boundaries (APBs) are 2D defects delineating antiphase domains (APDs). They are particularly detrimental to devices because they act as short circuits. In this work, we investigated the growth of GaSb on Ge substrates and on Ge-on-Si templates grown by low-energy plasma-enhanced CVD (LEPECVD) [2].

2. ANTIPHASE DOMAINS BURYING

Recently, a growth strategy has been developed to bury APDs and thus suppress emerging APBs during the MBE growth of GaSb on (001) Si substrates [3,4]. It consists in using the residual miscut angle of the substrate ($<0.5^\circ$) to organize the Si surface and to grow GaSb in the step-flow mode. The anisotropic incorporation rate in III-V growth results in the Sb-polar phase progressively overgrowing the Ga-polar phase, resulting in APD burying (Fig. 1) [4]. In this work, we have adapted this strategy to the growth of APB-free GaSb layers on germanium substrates and Ge-on-Si templates.

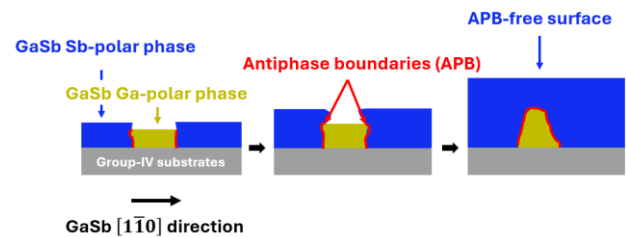


Figure 1 APB burying mechanism during GaSb growth on group-IV elements

3. RESULTS

The starting surface preparation is critical for growing APB-free GaSb films on group-IV substrates [4]. We found that APB-free GaSb layers can be achieved only when the Ge substrates are prepared by UHV annealing in a narrow temperature window. The Ge-on-Si and SiGe/Si templates, however, exhibit cross hatch patterns arising from strain relaxation during template growth, which prevents proper surface organization prior and during III-V growth. This, in turn, precludes APB annihilation. We found that this effect can be alleviated either by using slightly miscut ($1^\circ - 2^\circ$) Si substrates, or by smoothing the starting surface of on-axis Ge-on-Si templates by chemical-mechanical polishing. Under these conditions, APB-free GaSb layers can be achieved after 500 nm growth. They exhibit a rms roughness of 1.0 nm.

4. ACKNOWLEDGMENTS

Part of this work was sponsored by "France 2030" (Equipex EXTRA, ANR-11-EQPX-0016, Equipex+HYBAT, ANR-21-ESRE-0026) and the ANR-LightUp project (ANR-19-CE24-0002).

5. REFERENCES

- [1] R. Soref, Nature Photon **4**, 495 (2010).
- [2] G. Isella *et al.*, Solid-State Electron. **48**, 1317 (2004).
- [3] C. Cornet *et al.*, Phys. Rev. Mat. **4**, 053401 (2020).
- [4] M. Rio Calvo *et al.*, Adv. Electron. Mat. **8**, 2100777 (2022).

PRINTED BYPASS DIODE FOR ORGANIC SOLAR MODULES

Ayoub El Masry¹, Gilles H. Roche¹, Corinne Alonso², Lionel Hirsch¹

¹ Univ. Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, IMS, UMR 5218, F-33400 Talence, France

² CNRS, LAAS, UPR8001, F-31400 Toulouse, France

* E-mail: ayoub.el-masry@u-bordeaux.fr

ABSTRACT

The development of the next generation of printed solar photovoltaic modules requires extended research to improve the efficiency and the lifetime of the solar cells but also of the printed electrodes, bus bars and bypass diodes. These latter prevent the destruction of the solar cells in case of partial shading due to hotspots [1], the aim of this work is to fabricate a printed bypass diode.

1. INTRODUCTION

Printed organic solar panels represent a new technology necessitating the introduction of a printed bypass diode in the panel. Our objective is to print bypass diodes using abundant and nontoxic materials. Additionally, a high current density (*i.e.*, 1 to 10 A/cm²) is necessary to allow the current of multiple strings of cells flow effectively. Bypass diodes require a low reverse current and should not generate photocurrent. Metal oxide semiconductors have been selected because they fulfill the requirements. They are not toxic, abundant with large bandgap (they don't absorb visible light, and can be printed). Several materials have been selected and tested in a different configuration such as Schottky diode or p-n heterojunction.

2. DESCRIPTION OF THE STUDY

Tin dioxide "SnO₂" is the major material that will be presented. It is a naturally n-type semiconductor with a work function of 4.58 eV (measured by Kelvin probe). It can form a Schottky contact with a conductor with greater work function or a p-n heterojunction with a p-type semiconductor.

Schottky diode has been chosen due to its simple architecture, a commercialized SnO₂ nanoparticles 15% in H₂O colloidal dispersion by Alfa Aesar is spin coated on top of an ITO/Glass substrate at 1500 RPM for 1min forming a thickness of 150 nm measured by mechanical profilometer. After annealing for 1hr at 120°C PEDOT:PSS is spin coated on top of SnO₂ at 4000RPM for 1 min with a thickness of 50nm (profilometer), then 70 nm of silver 'Ag' evaporated to serve as the top electrode.

Schottky contact is expected between n-type SnO₂ and heavy doped p-type PEDOT:PSS with a work function of 4.94 eV (KP)

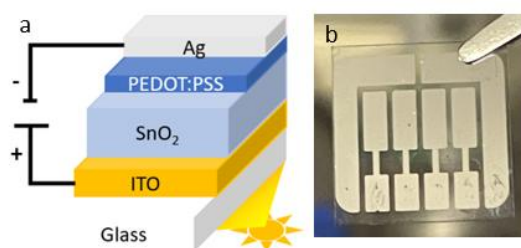


Figure 1: Device architecture (a) and sample photograph (b) (15x15 mm²) each device has an area of 10.3 mm² (4 devices in each sample)

3. RESULTATS

The I-V curve of the device showed a clear rectifying behavior in dark and under illumination with a difference between reverse and forward current of 2 orders of magnitude, more than 60 devices showed the same characteristics

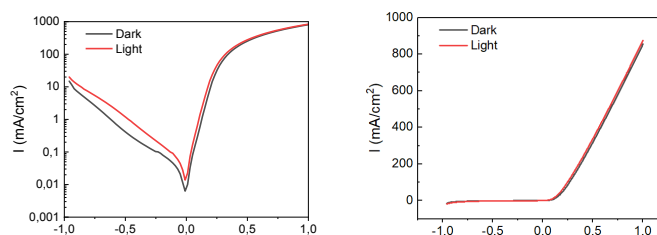


Figure 2: I-V curve in semilogarithmic scale (Linear in the inset)

4. CONCLUSIONS

A printed Schottky diode has been fabricated using n-type SnO₂ and an organic heavily doped PEDOT: PSS that acts as a conductor. The device showed a rectifying behavior with no photocurrent which can be promising for bypass diode application.

4. REFERENCES

[1] Vieira, R. G., de Araújo, F. M. U., Dhimish, M., & Guerra, M. I. S. (2020). A comprehensive review on bypass diode application on photovoltaic modules. In *Energies* (Vol. 13, Issue 10). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/en13102472>

PtSe₂: A PROMISING 2D MATERIAL FOR OPTOELECTRONICS

P. Legagneux, E. Desgué, D. Pommier, D. Jussey, L. Gangloff

THALES Research & Technology, 1. Av. Augustin Fresnel, Palaiseau, France

* pierre.legagneux@thalesgroup.com

RESUME

Two-dimensional PtSe₂ exhibits outstanding intrinsic properties (high carrier mobility, tunable bandgap, broadband absorption, air stability) particularly adapted for optoelectronics. We optimized the synthesis of semimetallic 12-16 ML PtSe₂ by molecular beam epitaxy on sapphire substrates. We show that the study of both the width of the E_g and A_{1g} Raman peaks allows to efficiently monitor the in-plane and out-of-plane crystalline quality of the samples. In-depth structural analysis reveals the strong impact of the crystalline arrangement on the electrical conductivity. A new figure of merit is proposed demonstrating that the thinner the width of both the E_g and A_{1g} peaks, the higher the film conductivity. Finally, coplanar waveguides integrating a PtSe₂ channel are fabricated on a 2-inch sapphire substrate to demonstrate optoelectronic devices operating at 1.55 μm: photodetectors with a record bandwidth of 60 GHz and the first PtSe₂-based optoelectronic mixer with a bandwidth above 30 GHz.

1. INTRODUCTION

PtSe₂ exhibits high carrier mobility and infrared absorption [1] which are particularly suitable for high frequency optoelectronics at the 1.55 μm telecom wavelength. However, achieving high quality films is still challenging. We have studied PtSe₂ films grown by molecular beam epitaxy (MBE) to demonstrate high-frequency photodetectors and mixers. Optoelectronic mixers can mix high-frequency optical and electrical signals, enabling innovative applications such as radio-over-fiber communication systems, wideband radio frequency transceivers for radar systems, satellite payload.

2. DESCRIPTION DE L'ETUDE

We first measured the optical absorption at 1.55 μm and the conductivity of PtSe₂ films as a function of the number of monolayers (ML) and focused our studies on thick (12-16 MLs) semimetallic films that exhibit both good IR absorption and high conductivity. These are key parameters for demonstrating highly efficient optoelectronic mixers [2]. To this end, we have carried out in-depth studies on the growth of PtSe₂ on sapphire by MBE. To assess the crystalline quality of PtSe₂, we measure not only the width of the commonly used E_g peak, but also the width of the A_{1g} peak.

Furthermore, we performed X-ray diffraction and advanced transmission electron microscopy techniques [3] to study the crystalline structure of the different films.

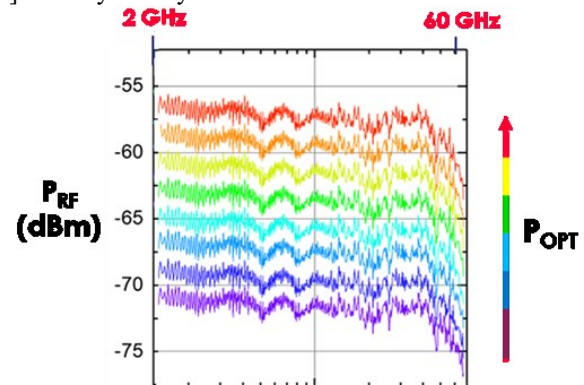


Figure 1: 60 GHz bandwidth photodetection with a PtSe₂ based coplanar waveguide fabricated on a sapphire wafer.

3. RESULTATS

We demonstrated PtSe₂ films with exceptionally low values of E_g peak width (3.6 cm⁻¹) as well as A_{1g} peak width (3.5 cm⁻¹) and with a record conductivity of 1.6 mS. Using X-ray diffraction and advanced transmission electron microscopy techniques, we have identified how the crystalline structure of the PtSe₂ films impact the Raman peak widths as well as their electrical conductivity. Based on these studies, we propose a new figure of merit showing that smaller are the E_g and A_{1g} peak widths, higher are the crystalline quality and the conductivity. A14ML PtSe₂ film was grown on a 2-inch sapphire wafer and we fabricated PtSe₂ based coplanar waveguides to demonstrate photodetectors at 1.55 μm with a record bandwidth of 60 GHz (Fig. 1) and the first PtSe₂-based optoelectronic mixer with 30GHz-bandwidth.

4. CONCLUSIONS

PtSe₂ is a highly promising 2D material for high frequency optoelectronics. Based on high crystalline quality films obtained by MBE, we demonstrated 1.55 μm 60 GHz bandwidth photodetectors and optoelectronic mixers with a bandwidth above 30 GHz.

4. REFERENCES

- [1] M. Tharrault et al. <https://arxiv.org/abs/2311.01847>
- [2] M. Tharrault et al., Adv. Electron. Mater., 2300260 (2023).
- [3] D. Dosenovic et al, 2D Mater. 10 045024 (2023)

VERS LA LOCALISATION BAS COUT D'HETEROEPITAXIE DE GAAS SUR SI

L. Dentz^{*1}, F. Hamouda¹, G. Hallais¹, L. Vincent¹, E. Herth¹, T. Baptiste¹, L. Leroy¹, L. Largeau¹,
D. Bouchier¹, C. Renard¹

¹ C2N Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies, CNRS, Université Paris-Saclay, Palaiseau, France

* laurie.dentz@c2n.upsaclay.fr

RESUME

Le travail présenté s'inscrit dans le cadre plus général d'un projet consistant à réaliser un démonstrateur de cellule tandem photovoltaïque à haute rendement de (Al)GaAs directement intégré sur un substrat de Si. Le (Al)GaAs correspondant au haut gap et le Si au bas gap de la cellule. L'objectif est aujourd'hui de proposer une technologie bas cout pour localiser la croissance des micro-cristaux de matériaux III-V afin d'atteindre une quasi-surface de III-V sur Si.

1. INTRODUCTION

L'intégration monolithique de (Al)GaAs sur silicium, et plus généralement de semi-conducteurs III-V, serait une voie très prometteuse pour la production de dispositifs multi-jonctions à haut rendement, adaptés aux applications photovoltaïques. Cependant, le fort désaccord de paramètres de maille entre le GaAs et le silicium entraîne des dislocations et des domaines d'antiphase. Dans des travaux précédents, nous avons démontré l'intégration parfaite de cristaux de GaAs de taille micrométrique sur silicium, sans défauts structuraux ni contraintes, en utilisant la méthode de croissance épitaxiale latérale sur oxyde tunnel à partir de nano-ouvertures (ELTON) [1], dont le principe est illustré dans la Figure 1 et les résultats dans la Figure 2.

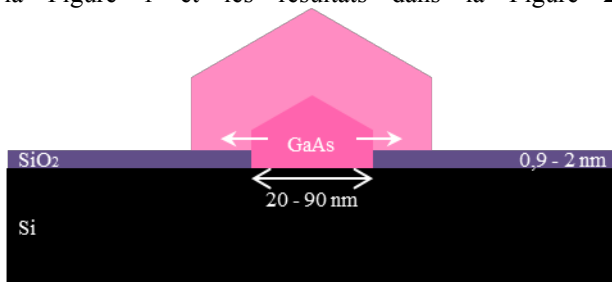


Figure 1 : Méthode de croissance ELTON.

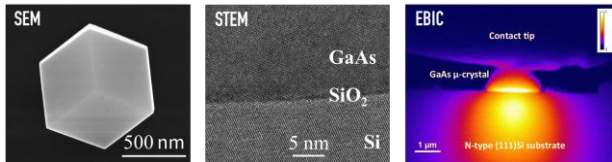


Figure 2 : Image par SEM : Cristaux de GaAs sur Si(111) résultants de croissance par méthode ELTON; image STEM : Substrat Si(111), SiO₂ ultrafine, et GaAs sans défaut cristallin ; image EBIC montrant le passage du courant sous toute la surface du cristal de GaAs [1].

2. LOCALISATION DE LA CROISSANCE EPITAXIALE DE GAAS SUR SI

Les premiers résultats ont consisté à ouvrir thermiquement une couche ultrafine de silice (<2nm) afin d'obtenir des ouvertures de Si (<50nm) aléatoirement dispersés sur la surface avant l'épitéaxie du GaAs par CBE. Cependant, afin de produire un démonstrateur de cellule tandem photovoltaïque d'une surface significative, un objectif important est désormais d'étendre cette méthode épitaxiale à la structuration de surface pour intégrer les cristaux de manière régulière afin d'obtenir une couverture quasi-complète du substrat de Si, sans coalescence des microcristaux de GaAs afin de maintenir leurs très bonnes qualités cristallines et leurs propriétés électroniques.

Les micro-cristaux de GaAs adoptant une forme hexagonale sur la silice, notre objectif sera de les organiser en un réseau hexagonal afin d'optimiser la surface de matériaux III-V et ainsi maximiser le rendement des cellules solaires proposées. Pour ce faire deux méthodes de localisation sont explorées : La lithographie UV par nano-impression de timbre souple (Soft UV-NIL, cf. Figure 3a) et la lithographie par nanosphères (NSL, cf. Figure 3b).

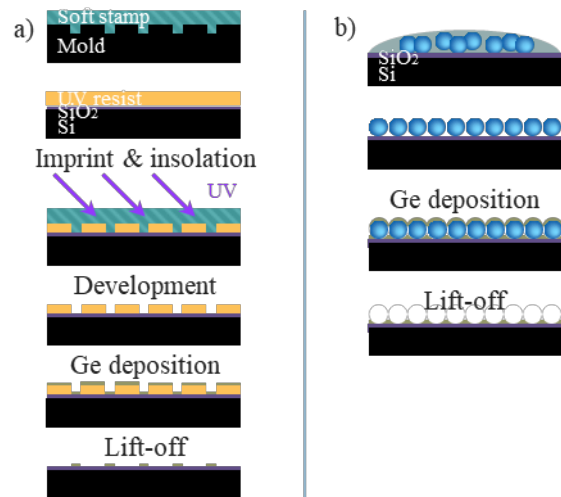


Figure 3 : a) Lithographie UV par nano-impression de timbre souple ; b) Lithographie par nanosphères.

3. RESULTATS INITIAUX

Les premiers résultats montrent que les deux méthodes de lithographie permettent une organisation contrôlée des cristaux de GaAs sur la surface de Si. Avec la méthode de lithographie UV par nano-impression de timbre souple (Soft UV-NIL), nous avons réussi à obtenir une distribution en réseau carré de la croissance des micro-cristaux de GaAs sur silicium (Figure 4c).

La lithographie par nanosphères (NSL) a également montré des résultats prometteurs (Figure 5c). Cette méthode, utilisant des nanosphères qui s'auto-organisent en réseau hexagonal permet d'obtenir une croissance de GaAs principalement sélective.

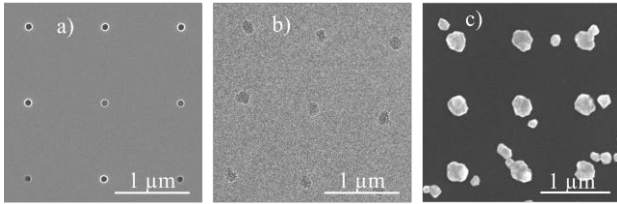


Figure 4 : a) Moule pour la fabrication de timbre souple ; b) Impression de Ge ; c) Croissance de GaAs par méthode Soft UV-NIL.

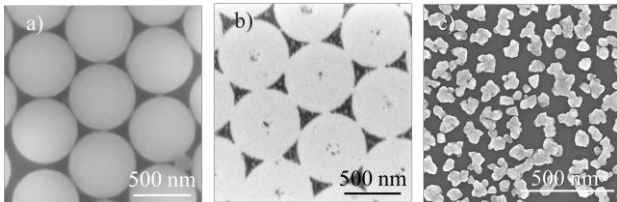


Figure 4 : a) Dépôt de nanosphères de polystyrene sur Si ; b) Impression de Ge ; c) Croissance de GaAs par méthode NSL.

Cependant, nos deux méthodes présentent des défauts de croissance, nécessitant des optimisations supplémentaires pour améliorer l'intégration des cristaux de GaAs au silicium ainsi que leur qualité. En dehors des zones d'impression, une croissance aléatoire s'est également produite, suggérant que la méthode utilisée pour ouvrir la silice localement a accidentellement créé des ouvertures non souhaitées.

Ces résultats préliminaires démontrent la faisabilité de ces méthodes pour la localisation de la croissance des cristaux de GaAs, ouvrant la voie à la réalisation de cellules tandem GaAs/Si efficaces. Cependant, un travail important reste encore à réaliser pour garantir une uniformité et une qualité optimale des μ -cristaux, réduisant ainsi les imperfections et maximisant les performances des dispositifs photovoltaïques.

4. CONCLUSIONS

Les avancées réalisées dans ce projet montrent que la méthode de croissance ELTO, combinée à des techniques de lithographie alternative à bas coût, est une approche prometteuse pour l'intégration monolithique de GaAs sur Si. Les deux méthodes de lithographie explorées, Soft UV-NIL et NSL sont de bons candidats pour localiser de manière efficace les cristaux de GaAs en

réseau hexagonal, maximisant ainsi le recouvrement de la surface de GaAs.

Le défi à venir est l'optimisation de la méthode d'ouverture de la silice par lithographie pour réduire les défauts de croissance et améliorer la qualité cristalline. De plus, il sera crucial de tester ces approches sur des surfaces plus grandes pour valider leur applicabilité à une échelle industrielle.

En conclusion, ces travaux représentent une étape significative vers la réalisation de cellules tandem AlGaAs/Si à haut rendement pour des applications photovoltaïques, offrant une alternative compétitive et durable aux technologies actuelles.

5. REMERCIEMENTS

Cette étude est financée par l'ANR dans le cadre du projet « HELLO-PV », et les étapes technologiques ont été réalisées dans le réseau RENATECH.

6. REFERENCES

- [1] Renard, C., Molière, T., Cherkashin, N., Alvarez, J., Vincent, L., Jaffré, A., Hallais, G., Connolly, J. P., Mencaraglia, D., & Bouchier, D. (2016). High current density GaAs/Si rectifying heterojunction by defect free Epitaxial Lateral overgrowth on Tunnel Oxide from nano-seed. *Scientific Reports*, 6(1). <https://doi.org/10.1038/srep25328>

Posters :

**Matériaux et nanostructures,
Caractérisation structurale, optique et
électrique des semiconducteurs**

FINE DESCRIPTION OF GA-FREE TYPE-II SUPERLATTICE FOR INFRARED DETECTOR THROUGH COMBINED STRUCTURAL AND SIMULATION ANALYSIS

Matthias Tornay^{1,2,*}, Jean-Philippe Perez¹, Konstantinos Pantzas³,
Gilles Patriarche³, Nicolas Péré-Laperne², Philippe Christol¹

¹ IES, Université de Montpellier, CNRS, Montpellier, France

² LYNRED, BP 21, Veurey-Voroize, France

³ C2N, Université Paris-Saclay, CNRS, Palaiseau, France

* E-mail : matthias.tornay@umontpellier.fr

ABSTRACT

In recent years, “Ga-free” InAs/InAsSb Type-II Superlattices (*T2SL*) have become a commonly used material to build the absorption zone of high-performance and high-temperature infrared photodetector arrays. Fabricated by molecular beam epitaxy on GaSb substrate, they can be designed to achieved mid-wave infrared to very-long wave infrared cut-off wavelengths. However, they optoelectronics properties, and especially the transport mechanisms of the carriers is yet to be fully understood. In this work, we present the advanced structural characterizations of several structures and attempt to model them finely by taking into account the wide alloy disorder observed experimentally through transmission electron microscopy (*TEM*) methods.

1. INTRODUCTION

High performance cooled photodetectors operating in the mid-wave infrared (*MWIR*, 3-5 μm) and in the long-wave infrared (*LWIR*, 8-14 μm) atmospheric spectral window are used in a wide variety of applications in imaging and sensing. To keep high signal to noise ratio, it is necessary

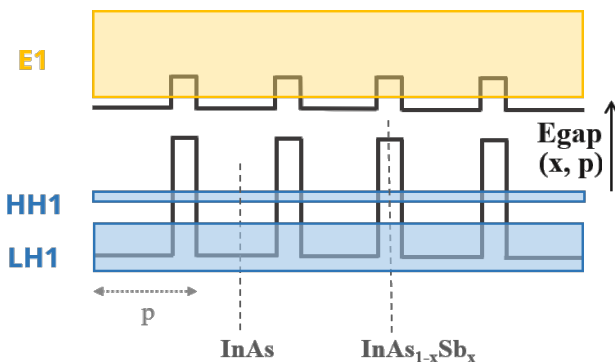


Figure 1 : Schematic example of the energy band diagram obtain for an InAs/InAs_(1-x)Sb_(x) superlattice. The band alignment is a type-IIb. Here, the first miniband of the electrons (E1), the heavy-holes (HH1) and the light-holes (LH1) are shown. The optical bandgap is almost solely dependent on the Sb content (x) and the period length (p).

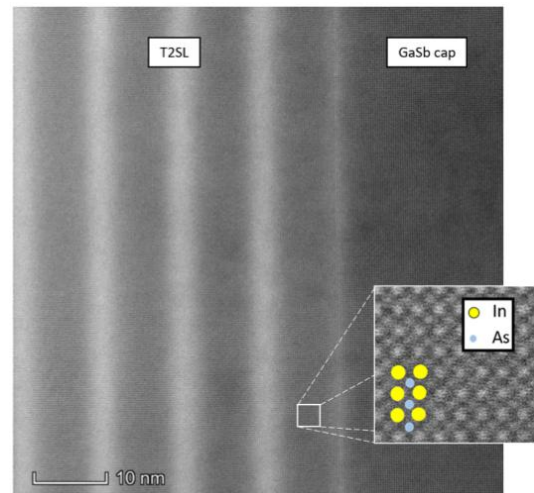


Figure 2 : Example of a high-resolution [100] HAADF image obtained on a long-period sample. The inset shows a focus on an InAs layer.

to reduce the operating temperature of the IR detector system to cryogenic temperatures. Enhancing this operation temperature without penalizing the electro-optical and electrical performances of detectors is currently one of the main being challenges investigated by the IR detector community.

The InAs/InAsSb T2SL is a very peculiar periodic quantum wells structure in which the layers are coupled and lead to the formation of quasi-minibands of energies for the electrons and the degenerated holes, as shown in Figure 1. It is predicted to have a type-IIb band alignment and a very strong confinement of holes in the growth direction [1]. This transport anisotropy is expected to reduce the overall quantum efficiency and impeded the carrier transport. It has also been identified that the antimony of the InAsSb layer has the tendency to segregate into the InAs layer and to blue-shift the optical bandgap. Surprisingly, state-of-the-art T2SL MWIR detector devices are now reporting diffusion lengths of several microns and quantum efficiencies over than 50 % (with no antireflection coating and single pass) [2, 3]. However, to go further in improving performance, there is a need to better understand the material properties of this T2SL quantum structure used for IR detection.

2. METHODS

In this work, we report on the growing by molecular beam epitaxy (MBE) and the structural characterization of several “Ga-free” InAs/InAsSb T2SL structures, with different targeted antimony content and period lengths. The samples are grown and lattice-matched on 2-inch N-type (Te) GaSb (100) substrates and characterized through standard atomic force microscopy (AFM) and high-resolution X-ray diffraction (HR-XRD). Finally, a complete scanning-TEM analysis workflow is performed to assess the broadening of the InAsSb interfaces, the antimony distribution along the structure and the strain profiles. An example of High-angle annular dark-field (HAADF) image obtained is shown in Figure 2.

The experimental data are then injected in numerical simulations to compute as realistically as possible the x-ray diffraction patterns and the superlattices bandgaps. These results are then discussed against the ideal InAs/InAsSb profiles in terms of absorption coefficient, wave function overlaps and valence band offsets.

3. RESULTS

Figure 3 shows an example of the antimony segregation profiles that were obtained through energy dispersive spectroscopy (EDX) mappings and linear scanings, for two long-period samples (namely, LP1 and LP2). The composition profiles differ greatly from the ideal InAs/InAs_(1-x)Sb_(x) that were targeted during the growth and that fitted the XRD simulations, as shown in Figure 4 for sample LP1.

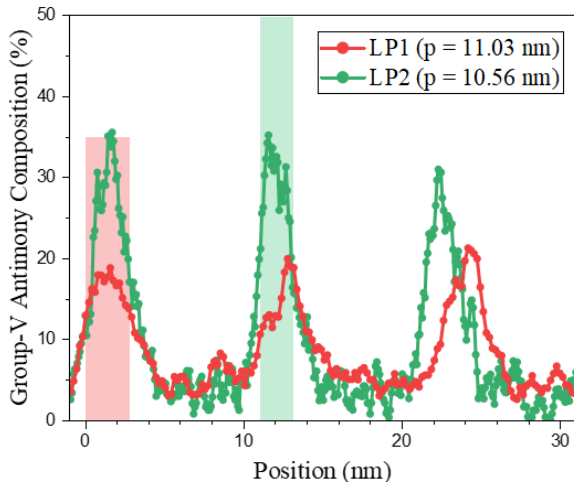


Figure 3 : Example of two antimony segregation profiles obtained with long-period samples. The red and green rectangles respectively represent the targeted width and geometry content of the InAsSb layers for LP1 and LP2.

The mismatch is close to 0 ppm and it appears by simulation that even for large interface broadenings, the satellite peaks do not widen, which implies a pseudo-compensation of the strain along each period. Every

samples show a similar rate/decay behavior, despite their difference in period lengths, antimony composition or even short growth stops.

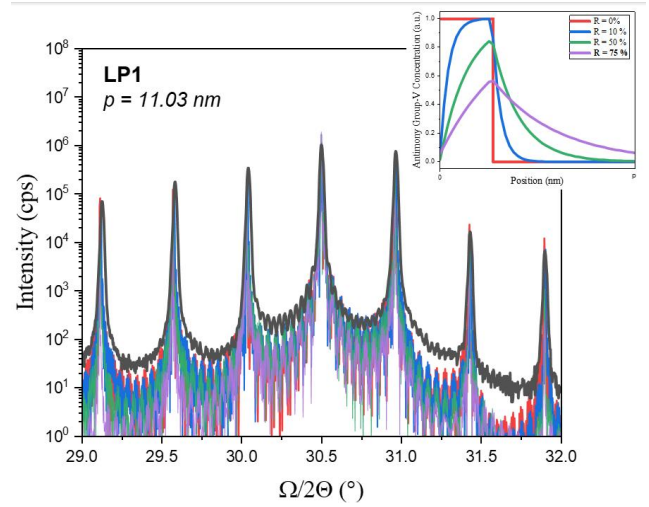


Figure 4 : Comparison between the XRD experimental data for a long-period sample (black) and the simulation of several antimony segregation profile: red (no segregation) to purple.

In such material systems, we observe that the interfaces are almost fully graded and that the triple-axis XRD measurements can then not be considered a suitable solution to determine the InAsSb antimony composition profile.

4. CONCLUSIONS

Although being widely used to deduce the composition of the InAsSb layer and then the InAs/InAsSb band edge profiles, the triple-axis XRD measurements appear to not be suitable enough to describe the distribution of Sb along the period. The obtained composition profiles show that these superlattices have to be considered as fully graded structures. We will discuss the considerable modifications of the band offsets, carrier confinement and miniband widths that it suggests in this material, as it paves the way to designs that can use the segregation mechanisms as a feature to tune the properties of superlattice-based optoelectronic devices.

4. REFERENCES

- [1] D. Lackner et al. J. Appl. Phys. 111, 034507 (2012)
- [2] D. Z. Ting et al. Appl. Phys. Lett. 113, 021101 (2018)
- [3] M. Bouschet et al. Appl. Sci. 12, 10358 (2022)

SONOCHEMICALLY SYNTHESIZED OF ZINC SILICATE CERAMIC NANOPARTICLES FOR ELECTRONIC DEVICES

Bouatrous Mehieddine *¹, Boukhessaim Salim¹, Fekrache Abdelhak², Ferhat Bouzerara³, Quentin Bizot⁴

¹ *Laboratoire d'Anticorrosion, Matériaux et Environnement et Structure ; Université 20 Aout 1955 Skikda ; Algérie*

² *Laboratoire d'ingénierie des matériaux et énergie ; Université 20 Aout 1955 Skikda ; Algérie*

³ *Laboratory of Condensed Matter Physics and Nanomaterials, M-S-B University, Jijel, Algeria*

⁴ *Laboratory of Inorganic Materials Chemistry (CMI), University of Namur, 5000 Namur, Belgium*

* E-mail: m.bouatrous@univ-skikda.dz

RESUME

Willemite, an inorganic semiconductor material[1], is widely used in optoelectronic and electronic devices due to its unique properties[4]. It has attracted significant attention as a promising candidate for optoelectronic devices and gas sensor applications[2]. This research aims to develop a sonochemical synthesis technique to produce high-purity zinc silicate (willemite) nanopowders. Using a modified sonochemistry approach, zinc silicate hydrate nanoparticles were synthesized from zinc salts and waterglass under controlled pH conditions (pH 11–11.5) and Argon gas flow[3]. The resulting precipitate underwent heat treatment at various temperatures. Advanced characterization techniques, including TGA/DSC, X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), transmission electron microscopy (TEM), dispersive X-ray spectrometry (EDX), and N₂ gas adsorption, were employed to analyze phase transformations, morphological attributes, microstructures, and chemical composition.

The findings revealed the formation of a well-crystalline willemite monophase at 890 °C, as confirmed by XRD analysis. The synthesized material exhibited high homogeneity and exceptional purity, as evidenced by EDX elemental mapping. Microscopic evaluations (SEM, TEM) validated its nanoscale characteristics. Importantly, this synthesis technique employs moderate temperatures, enhancing its cost-effectiveness for large-scale production. The resultant zinc silicate nanopowders hold potential for various industrial applications, including ceramics, paints, plastics, biomaterials, and composites, due to their high purity and homogeneity.

Although willemite is not conventionally used as a semiconductor material like silicon or gallium arsenide, its luminescent properties and potential for optoelectronic applications [2] position it as a material of interest in niche areas of electronics and photonics.

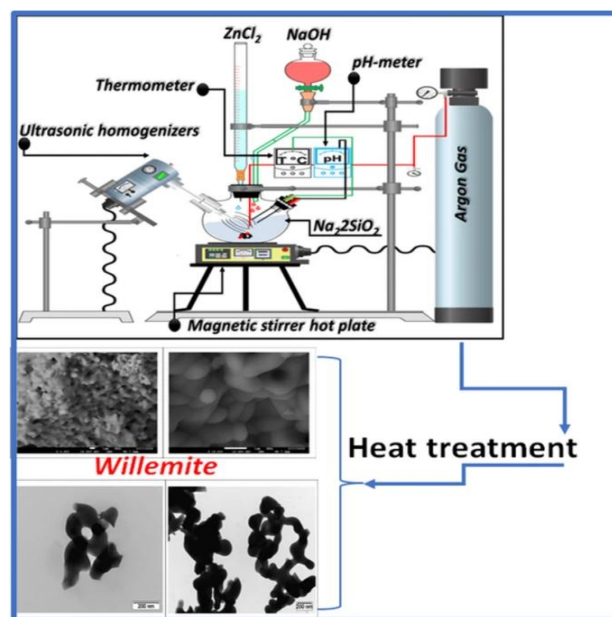


Figure 1 : Graphical abstract

REFERENCES

- [1] Alibe, I.M., Matori, K.A., Sidek, H.A.A. et al. Effects of polyvinylpyrrolidone on structural and optical properties of willemite semiconductor nanoparticles by polymer thermal treatment method. *J Therm Anal Calorim* 136, 2249–2268 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7874-7>
- [2] Romanov SG, Fokin AV, De La Rue RM. Eu³⁺ emission in an anisotropic photonic band gap environment. *Appl Phys Lett*. 2000;76:1656–8.
- [3] Bouatrous, M., Bouzerara, F. & Bizot, Q. Sonochemistry Synthesis of Zinc Silicate Ceramic Nanoparticles and Their Characterization. *J Inorg Organomet Polym* 34, 1931–1943 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10904-023-02938-9>
- [4] Zaid MH, Matori KA, Ab Aziz SH, Kamari HM, Wahab ZA, Effendy N, Alibe IM. Comprehensive study on compositional dependence of optical band gap in zinc soda lime silica glass system for optoelectronic applications. *J Non Cryst Solids*. 2016;449:107–12.

PHOTOCONDUCTIVE GAIN CHARACTERIZATION OF STRIPE ANTENNA INFRARED DETECTORS FROM NOISE MEASUREMENTS

Zixin Li¹, Jihye Baik¹, Richard Pateau¹, Djamel Gacemi¹, Angela Vasanelli¹, Carlo Sirtori¹

¹ *Laboratoire de physique de l'Ecole Normale Supérieure, ENS, Université PSL, CNRS, Sorbonne Université, Université Paris Cité, 75005 Paris, France*

* E-mail: zixin.li@ens.fr

ABSTRACT

Quantum Well Infrared Photodetectors (QWIP) coupled with metamaterial resonators have been shown to operate up to room temperature with a high responsivity. Recently, InP-based QWIP devices with responsivity exceeding 1 A/W were fabricated. In order to explain the high responsivity, we conducted noise measurements to measure the photoconductive gain of our device.

1. INTRODUCTION

Quantum Well Infrared Photodetectors are the detectors that convert photons into conducting electrons by intersubband transition (ISB) [1]. QWIPs coupled with metamaterial resonators enabled a responsivity close to 0.2 A/W at room temperature [2], which made them a promising candidate for infrared detection. The high responsivity of metamaterial QWIPs is partly due to their optical cavity modes, which are coupled with the intersubband transitions, resulting in high absorption quantum efficiency. Mesa devices are usually employed as references to infer the impact of the coupling between the intersubband transition and the cavity mode in the QWIP characteristics. Recently, InP QWIPs embedded in arrays of stripe resonators were fabricated [3]. They showed a room temperature responsivity of up to 1.5 A/W, two orders of magnitude higher than the responsivity obtained from a mesa device with the same absorbing region. In order to explain the high responsivity observed in metamaterial devices, it is necessary to concisely separate the contribution of the photoconductive gain and the absorption quantum efficiency. This can be achieved by noise measurements from which the gain value can be extracted [4].

2. DESCRIPTION OF THE EXPERIMENT

The main contributions to dark current noise in QWIPs are Johnson noise and shot noise. The two types of noise could be unified by a model which considers the thermal noise as a shot noise induced by diffusion currents [5][6]. Since these two noises are white noises, it is possible to separate them from other noises that are dependent on frequency, such as the 1/f noise. The power spectral density (PSD) of the shot noise is modelled as

$$S_I = 4eg|I|$$

where e is the electron charge, g is the gain, and I is the dark current. The aim of our experiment is to extract the value of the gain from the measurement of the power spectral density.

In our experiment, the QWIP devices are cryogenically cooled at 80K. The devices in the cryostats are connected to the trans-impedance amplifier femto DLPCA-200. The amplified noises are measured by a signal analyzer, HP 89441A.

3. RESULTATS

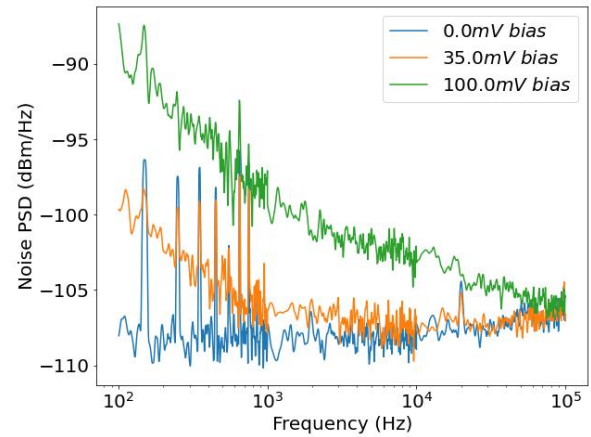


Figure 1 : Power density spectrum of the noises. The temperature is 140K. Amplifier gain is set to be 10MΩ.

The measured PSD is shown in Figure 1. When there is no bias applied to the QWIP, in the high frequency range (at frequencies higher than 10 kHz), there are noises induced by the BNC cable. In the other range of frequency, the spectrum is flat and the PSD amplitude corresponds to the one obtained by using the analytical model of the Johnson noise. If a large bias (100mV) is applied, the spectrum is overwhelmed by 1/f noise. If the applied bias is sufficiently low, it is possible to maintain a flat plateau in the spectrum, as shown by the spectrum with 35mV bias, where a plateau is found in the 1kHz to 10 kHz range. The increased amplitude of the plateau compared with 0V corresponds to the shot noise. By changing the temperature and bias, we can extract the value of the photoconductive gain at different temperatures.

4. CONCLUSIONS

We conducted noise measurements of InP-based QWIP devices and demonstrated the possibility of extracting the photoconductive gain value. Using the measured responsivity, we can extract the absorption quantum efficiency and separate the different contributions to the high responsivity of the InP-based QWIPs coupled with metamaterial resonators. Our results provide a deepened understanding of the high responsivity, which could be useful to the future design of high-performance infrared detectors.

4. REFERENCES

- [1] Levine, B. F., et al. "A new 10 μm infrared detector using intersubband absorption in resonant tunneling GaAlAs superlattices." *Picosecond Electronics and Optoelectronics*. Optica Publishing Group, 1987.
- [2] Palaferri, Daniele, et al. "Room-temperature nine- μm -wavelength photodetectors and GHz-frequency heterodyne receivers." *Nature* 556.7699 (2018): 85-88.
- [3] Baik, Jihye, et al. Paper in preparation.
- [4] Palaferri, Daniele, et al. "Noise characterization of patch antenna THz photodetectors." *Applied physics letters* 113.16 (2018).
- [5] Delga, A., et al. "Johnson and shot noises in intersubband detectors." *Applied Physics Letters* 102.16 (2013).
- [6] Van der Ziel, Aldert. "Noise. Sources, characterization, measurement." *Prentice-Hall Information and System Sciences Series* (1970).

Posters :

**Micro et nanophotonique, cristaux
photoniques, métamatériaux,
plasmonique**

Micro-fabrication Additive 3D de Structures Métalliques pour Dispositifs sub-Terahertz avec Résolution Micronique

Cyril GUINES, Hiba LAHLIMI ALAMI, Nicolas DELHOTE, Aurélien PERIGAUD

XLIM UMR 7252, Université de Limoges/CNRS, 123 Avenue Albert Thomas, 87060 Limoges, France

cyril.guines@xlim.fr

RESUME

Cet article présente les développements technologiques en cours au laboratoire XLIM basés sur le procédé de micro-impression métallique 3D électrolytique et la machine CERES de la société Exaddon. En effet, nous présentons cet équipement et ses avantages clés en termes de précision, de dimensions et de capacité à imprimer des formes complexes volumiques. Nos premières expériences avec la machine nous ont permis de réaliser différents motifs tels que des piliers, des murs, des ponts et des boîtes dont le processus d'impression se base sur l'empilement structuré en 3D de voxels (pixels 3D) de cuivre ouvrant des perspectives intéressantes pour les technologies très hautes fréquences, les interconnexions ou encore de nouvelles approches de micro-packaging.

1. INTRODUCTION

L'évolution constante du panorama technologique amène les nouveaux systèmes RF à s'ouvrir vers des fréquences de plus en plus élevées pouvant dépasser les 200 GHz. En effet ces nouvelles bandes de fréquences jouent un rôle clé dans le déploiement de technologies de communication avancées telles que la 5G et la 6G, supportant des transferts de données volumineux.

Pour répondre aux défis de la montée en fréquence, la miniaturisation des chaînes de communication est une des voies explorées, et les techniques de fabrication additive ont une carte à jouer.

La technologie de micro-impression 3D métallique mise en œuvre dans cette étude s'avère être une solution technologique pertinente pour proposer des solutions et répondre à certaines exigences.

Cette communication dans sa première partie se concentre sur la présentation de la machine CERES, décrivant le principe d'opération et mettant en avant les points forts de cette technologie.

Ensuite des premières réalisations de structures seront illustrées mettant en valeur les premiers procédés en développement et diverses structures telles que des piliers, des ponts (filaires) suspendus, des murs ou encore des micro boîtiers.

2. LE SYSTEME D'IMPRESSION CERES :

2.a. Présentation de la machine CERES :

La machine d'impression 3D CERES commercialisée par la société Exaddon, permet la fabrication de structures

métalliques très complexes avec une résolution sub-micrométrique [1].

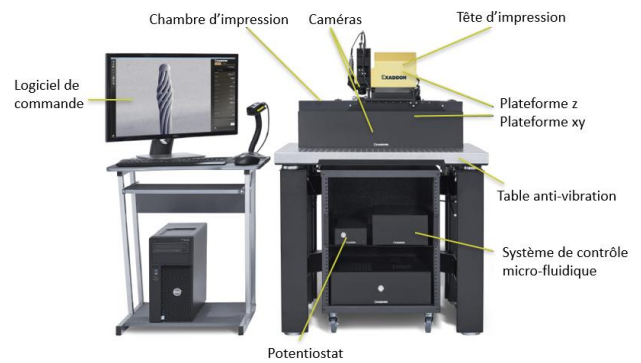
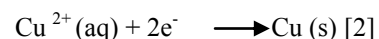


Figure 1. Le système d'impression 3D CERES

La figure 1 illustre l'équipement CERES, avec son contrôleur qui pilote le système et gère l'impression. Il est basé sur une pointe AFM ionique équipée d'un canal microfluidique permettant à la fois le dépôt métallique et la cartographie de surface. Cette dernière opère et se déplace dans la chambre d'impression grâce à des mécanismes micro mécaniques précis. Un système de gestion de flux micro-fluidique ajuste finement le flux d'encre métallique électrolytique, facilitant l'électrodéposition précisément à l'endroit souhaité pour créer des objets métalliques détaillés à l'échelle microscopique. En termes de matériau structurel, le cuivre est ici privilégié pour sa compatibilité avec les applications électroniques visées au laboratoire, mais d'autres matériaux conducteurs comme l'or, le nickel, l'argent, et le platine sont imprimables avec cet équipement. Cette polyvalence permet à la machine de s'adapter à une large gamme d'applications, en particulier dans le domaine des hyperfréquences, en offrant à la fois la précision nécessaire pour le dépôt de matériaux en 3D.

2.b. Principe de fonctionnement

Le processus d'impression repose sur la formation de voxels, pixels volumiques métalliques empilés les uns avec les autres pour former une géométrie souhaitée, sans nécessiter de supports supplémentaires. Ces voxels sont formés à partir d'une solution ionique, solution de sulfate de cuivre (CuSO_4) dans un mélange d'acide ($\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{HCL}$), dont les ions sont agglomérés sous forme de métal solide (Figure 2) par procédé électrolytique sous l'effet d'un potentiel appliqué dans la chambre d'impression grâce à une électrode immergée dédiée. La réaction chimique ainsi induite est la suivante :



L'injection de l'encre ionique à l'intérieur d'un micro-canal implémentée sur la pointe AFM d'impression est contrôlée par un système microfluidique, régulant la pression avec une précision inférieure à 1 mbar, permettant un flux précis de l'encre à un débit inférieur à un picolitre par seconde. Le contrôle en temps réel de l'impression est basé sur la détection de la bonne impression du voxel par retour de force sur la pointe AFM au moyen d'un signal laser détecté par une photodiode comme l'illustre la figure 2.

Cependant, l'équipement possède certaines limites (capacité du réservoir de l'encre, nombre de voxels imprimables, dépôt secondaire) qui demande une expertise approfondie pour concevoir toutes les stratégies d'impression.

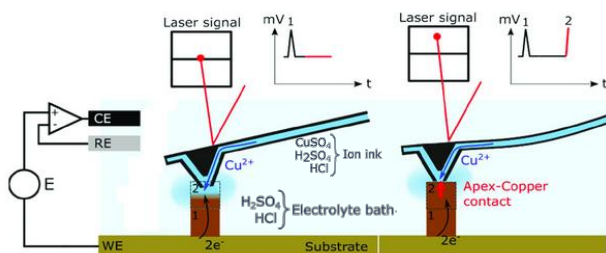


Figure 2. Représentation schématique du processus d'impression des voxels. [3]

3. PROCÉDES EN DEVELOPPEMENT ET PREMIERES REALISATIONS DE STRUCTURES 3D

3.a. Les piliers :

Pour maîtriser les mécanismes et les paramètres d'impression à la micro-impression 3D, différentes structures de base ont été réalisées. En effet, des campagnes d'impressions de piliers doivent être réalisées afin de juger de l'impact de la pression et de la hauteur sur leurs dimensions. L'analyse au microscope électronique à balayage permet de mettre ici en évidence la qualité de surface et la précision dimensionnelles des structures (figure 3) et de confirmer les rapports dimensionnels attendus.

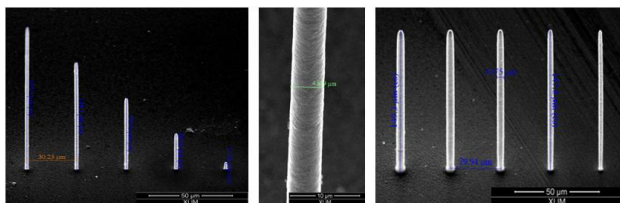


Figure 3. Impressions de piliers en fonction des paramètres imposés

3.b. Micro boîtiers et Micro connectiques :

D'autres motifs ont été testés pour mettre en évidence la faisabilité de réalisations de structures de micro-packaging (micro boîtiers creux) (figure 4) ou d'interconnexions (connectiques filaires suspendues, ponts...) (figure 5) et appréhender les paramètres

d'impression à optimiser pour leur construction. L'équipement permet également d'imprimer des structures sur des motifs existants en utilisant un mode d'alignement par pseudo mapping AFM (résolution < 1µm) et ou encore l'alignement optique (résolution 4µm).

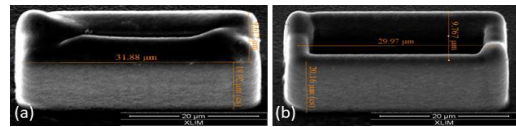


Figure 4. Micro boîtier vide (a) et décapoté (b)

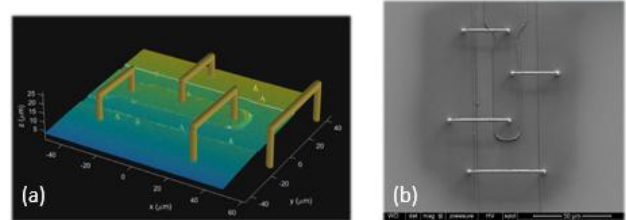


Figure 5. (a) Visualisation logicielle du fichier de mapping pour le positionnement des structures à imprimer sur motifs existants, (b) Résultat d'impression observée au MEB

4. CONCLUSION

Ces travaux de développement technologique montre le potentiel de cette imprimante de micro-fabrication additive métallique pour imprimer des microstructures 3D avec des très hautes résolutions. Ils ouvrent des perspectives intéressantes dans divers domaines et notamment pour les technologies hautes fréquences. Néanmoins, ces nouvelles technologies exigent une expertise importante pour définir les stratégies d'impression les plus pertinentes et efficaces qui nécessitent encore un développement approfondi en cours à XLIM.

5. REMERCIEMENTS

Ce travail a bénéficié d'une aide de l'État, gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du Programme d'Investissements d'Avenir portant la référence ANR-21-ESRE-0012, et de région Nouvelle Aquitaine (AAPPF202-2021-1727610). Les expériences ont été réalisées dans le cadre de la plateforme PLATINOM soutenue par la fondation européenne de développement régional et le gouvernement français avec la région Nouvelle Aquitaine (FEDER-PILIM 2015-2020).

4. REFERENCES

- [1] <https://www.exaddon.com/>
- [2] Ercolano, G. ; van Nisselroy, C. ; Merle, T. ; Vörös, J. ; Momotenko, D. ; Koelmans, W. ; Zambelli, T. « Additive Manufacturing of Sub-Micron to Sub-mm Metal Structures with Hollow AFM Cantilevers » 2019
- [3] Giorgio Ercolano, Tomaso Zambelli, Cathelijn van Nisselroy, Dmitry Momotenko, János Vörös, Thibaut Merle, and Wabe W. Koelmans « Multiscale Additive Manufacturing of Metal Microstructures » Adv. Eng. Mater. 2019

Multisubband plasmons in a doped single InAs/GaSb quantum well

S. HAJJI^{1*}, W. J. PASEK², S. HURAND³, L. CERUTTI¹, F. GONZALEZ-POSADA¹,
T. TALIERCIO¹

¹IES, Univ Montpellier, CNRS, Montpellier, France

²Institute of Applied Physics, Mohammed VI Polytechnic University, Lot 660, Hay Moulay Rachid Ben Guerir 43150, Morocco

³Institut Pprime, Université de Poitiers 11 Boulevard Marie et Pierre Curie, Chasseneuil du Poitou 86360, France

* E-mail: soufiane.hajji@umontpellier.fr

SUMMARY

In this work, we demonstrate experimentally and theoretically that in the case of a doped single InAs/GaSb quantum well, electrons behave collectively, giving rise to a multisubband plasmons.

1. INTRODUCTION

In highly doped quantum wells (QWs), electrons are distributed between several energy states from different subbands. This leads to the possibility of multiple simultaneous intersub-band transitions (ISBTs) [1]. In the presence of Coulomb coupling between these ISBTs, all individual transitions are grouped and concentrated into a single collective excitation: the multi-sub-band plasmon (MSP). Collective effect of electrons has already been demonstrated in type I and II QW heterostructures [2,3]. In this work, we propose to investigate the collective effect in the highly doped type III InAs/GaSb quantum well using semiclassical model, ellipsometry and attenuated total reflection (ATR).

2. Theoretical description

We consider a single quantum well of InAs/GaSb grown by solid source molecular beam epitaxy on a GaSb substrate. The doping level of the InAs is $1.02 \cdot 10^{19} \text{cm}^{-3}$ and the thicknesses is 9 nm, measured using X-ray. The nonlocal susceptibility tensor of the QW can be calculated in the context of the effective mass [4,5]. We suppose the z axis oriented along the growth direction. the z component of the nonlocal susceptibility tensor reads as

$$\chi_{zz}(w, q, z, z') = \sum_{\alpha} \chi_{\alpha}(w, q, z, z') \xi_{\alpha}(z) \xi_{\alpha}(z')$$

Where α indicates the intersubband transition between subbands n and m. χ_{α} is the single particle

susceptibility for transition α . The current distribution $\xi_{\alpha}(z)$ is defined as

$$\xi_{\alpha}(z) = \psi_n(z) \partial_z \psi_m(z) - \partial_z \psi_n(z) \psi_m(z)$$

Where $\psi_n(z)$ are the quantum states obtained by solving the Schrödinger-Poisson equation. The susceptibility $\chi_{zz}(z)$ can be written in the following form [3]

$$\chi_{zz}(\omega) = \sum_j \frac{\beta_j^2}{\omega^2 - (\Omega_j^2 - \frac{t\gamma_j}{2})^2}$$

Where β_j^2 and Ω_j^2 are defined in terms of eigenvectors and eigenvalues of coupling matrix M

$$M_{\alpha\alpha'} = \omega_{\alpha}^2 \delta_{\alpha\alpha'} + \omega_{p,\alpha} \omega_{p,\alpha'} \frac{I_{\alpha\alpha'}}{\sqrt{I_{\alpha\alpha'} I_{\alpha'\alpha'}}$$

Figures (1) show the dielectric function of the sample.

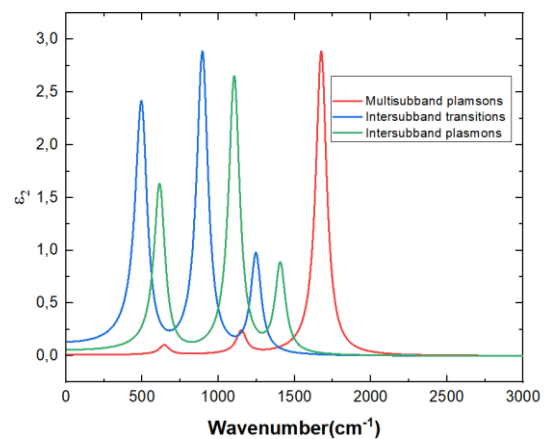


Figure 1: Imaginary part of the dielectric function with and without electrons interaction.

The blue curve shows the optical response in the absence of interactions between electrons $I_{\alpha\alpha'} = 0$. We observe that there are three peaks corresponding to the three possible intersubband transitions. When

considering only the interaction between electrons within the same band, we obtain what is known as an intersubband plasmon, as shown by the blue curve. When considering the interaction between electrons that are in different bands $I_{\alpha\alpha'} \neq 0$, we observe that there is a single dominant peak that encompasses all the system's energy, known as the multisubband plasmon, as illustrated by the red curve.

3. EXPERIMENTAL RESULTS

To validate the theoretical model, we characterize the sample using two techniques. The first is ellipsometry [6], which allows us to calculate the optical functions from measurements of polarization changes. We have modeled the data using the Lorentz model, and the obtained results are illustrated in Figure (2). The green curve represents the refractive index, while the red curve represents the extinction coefficient, which is proportional to the imaginary part of the dielectric constant. We can conclude that the model and ellipsometry provide equivalent spectral response, with a 5% uncertainty due to inaccuracies of the QW's width and carriers density.

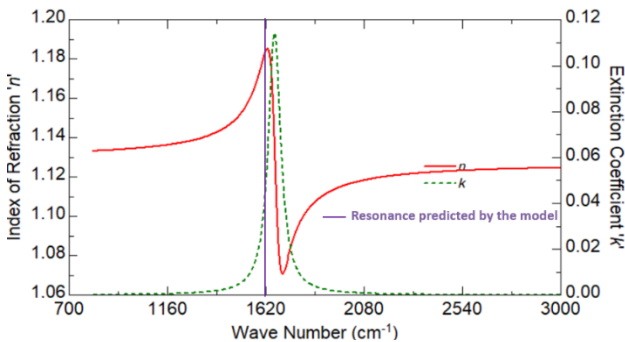


Figure 2: Index of Refraction and Extinction coefficient measured using ellipsometry.

The second method used to validate the model is attenuated total reflection (ATR) [7]. The advantage of this method is that it provides direct access to the spectral response without the need for modeling, unlike ellipsometry. Figure (3) shows the reflectance

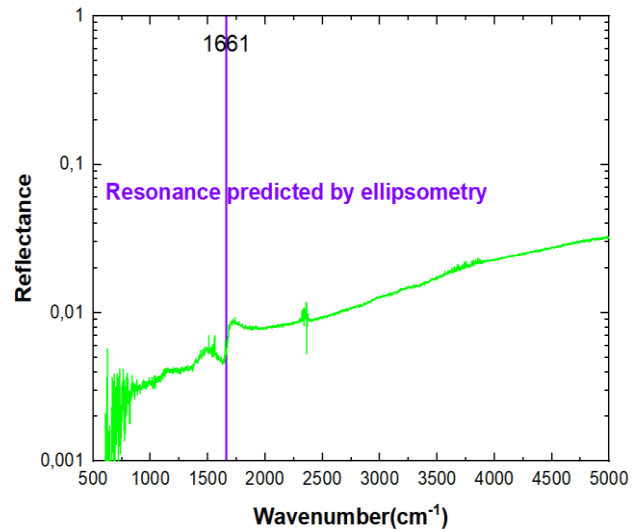


Figure 3: Attenuated Total Reflection spectrum of the sample.

The ATR proves the presence of the MSP at 1661cm^{-1} , which had been confirmed by ellipsometry.

4. CONCLUSION

In this work, we modeled the optical response of a doped single InAs/GaSb quantum well taking into account the coulomb coupling between electrons, which leads to the formation of multisubband plasmons. The theoretical results were verified and confirmed by ellipsometry and ATR experiments.

REFERENCES

- [1] Li, S. S., & Su, Y. K. (Eds.). (2013). *Intersubband Transitions in Quantum Wells: Physics and Devices*. Springer Science & Business Media
- [2] Montes Bajo, M., Chauveau, J. M., Vasanelli, A., Delteil, A., Todorov, Y., Sirtori, C., & Hierro, A. (2023). Perspectives and opportunities with multisubband plasmonics. *Journal of Applied Physics*, 134(1)
- [3] Alpeggiani, F., & Andreani, L. C. (2014). Semiclassical theory multisubband plasmons: Nonlocal electrodynamics and radiative effects. *Physical Review B*, 90(11), 115311
- [4] Wendler, L., & Kändler, E. (1993). Intra- and Intersubband Plasmon-Polaritons in Semiconductor Quantum Wells. *physica status solidi (b)*, 177(1),967.
- [5] Feibelman, P. J. (1975). Microscopic calculation of electromagnetic fields in refraction at a jellium-vacuum interface. *Physical Review B*, 12(4), 1319.
- [6] Fujiwara, H. (2007). *Spectroscopic ellipsometry: principles and applications*. John Wiley & Sons.
- [7] Ramer, G., & Lendl, B. (2006). Attenuated Total Reflection Fourier Transform Infrared Spectroscopy. *Encyclopedia of Analytical chemistry: applications, theory and instrumentation*.

Posters :
Micro-nano-technologies et systèmes

ETUDE DE LA FORME DE LA CAVITE SUR LES PARAMETRES DES ACCELEROMETRES THERMIQUES

Toulmé Valentin ¹, Ben-Salk Soukaina², Faucher Marc³, Combette Philippe⁴, Giani Alain⁵

¹ IES, Montpellier 34000, France .

² IEMN, 59652 Villeneuve d'Ascq

* E-mail : valentin.toulme@umontpellier.fr

RESUME

Les accéléromètres thermiques à convection (ATC) sont développés dans l'objectif de réaliser des mesures à haute intensité, ce que ne peuvent pas faire les accéléromètres classiques du fait de la présence de masse sismique dans leur conception. Le sujet présenté ici porte sur l'étude de l'impact de la forme de la cavité sur les paramètres des ATC (plage de mesure et temps de réponse). Il y est présenté les différentes simulation CFD réalisées ainsi que les résultats obtenus.

1. INTRODUCTION

Depuis plusieurs années, différentes technologies d'accéléromètres ont été développées pour la mesure de vibration et de choc. Ces capteurs sont grandement utilisés dans l'aviation, l'industrie ou encore l'automobile, comme par exemple dans le cas des airbag, des crash-tests ou pour des applications de défense [1]. Les principes de fonctionnement les plus utilisés sont basés sur les effets piézoélectriques, ou piézorésistifs, ou encore, sur les changements capacitifs. Cependant, la présence de masse sismique dans ces technologies présentent quelques désavantages, comme une plage de mesure réduite du fait de leur fragilité, et des coûts de fabrication important. Les accéléromètres thermiques, développé depuis plusieurs années, sont une bonne alternative pour résoudre les problèmes précédemment cités. La technologie de ces capteurs est basée sur la convection thermique libre, l'absence de masse sismique leur permet d'avoir une grande plage de mesure de choc, allant jusqu'à des dizaines ou des milliers de g.

Ces capteurs sont basés sur la convection thermique libre dans une cavité remplie de gaz. Ils sont composés d'un fil chauffant, entouré de part et d'autre de deux fils permettant de mesurer la température, le tout dans une cavité fermée (figure 1a). Lorsque le fil chauffant est alimenté, celui-ci va créer un gradient thermique symétrique autour de lui (Figure 1b). Sous l'effet d'une accélération Γ , le gradient de thermique va se déformer et ainsi crée une différence de température δT entre les deux détecteurs, proportionnel à l'accélération subit. Ainsi, la sensibilité du capteur équivaut à $S = \delta T / \Gamma$ (°C/g) [1].

2. DESCRIPTION DE L'ETUDE

Afin de déterminer la plage de sensibilité des capteurs nous avons réalisé des simulations CFD avec le logiciel Fluent®. Les simulations ont été réalisées pour

quatre modèles. Le premier est le plus simple des quatre, il est composé de deux cercles concentriques qui représentent le fil chaud ainsi que la cavité. Les modèles 2 et 3 sont composés d'une cavité hexagonale (forme réel de la cavité), l'un avec la présence des détecteurs (modèle 2), et l'autre sans les détecteurs (modèle 3) (Figure 1c). Ainsi, il est possible avec ces deux derniers modèles, de voir l'influence des détecteurs sur la sensibilité des capteurs. Le quatrième modèle est une modélisation 3D de la cavité avec les fils de détection.

Des simulations CFD sur le modèles cercles concentrique ont déjà été réalisées dans une précédente thèse [2]. La plage d'accélération était de 1g à 100 000g et les tailles de cavité entre 1600 et 200 μm . De nouvelles simulations ont été faites avec des accélérations allant jusqu'à 1 000 000g et des tailles de cavité inférieures à 75 μm .

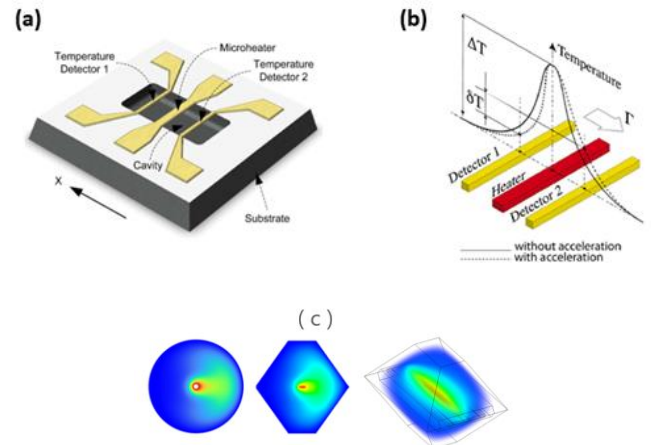


Figure 1 : (a) Structure d'un accéléromètre thermique à convection. (b) Gradient thermique avec et sans accélération. (c) Modélisation des deux formes utilisées, cercles concentriques et forme hexagonale (2D), ainsi que la modélisation 3D de la cavité.

3. RESULTATS

Le graphique 2 montre les résultats issus des simulations de la sensibilité en fonction de l'accélération. Dans la zone où la sensibilité reste constante, nous avons une réponse linéaire du capteur, ce qui peut être considéré comme la plage de mesure du capteur.

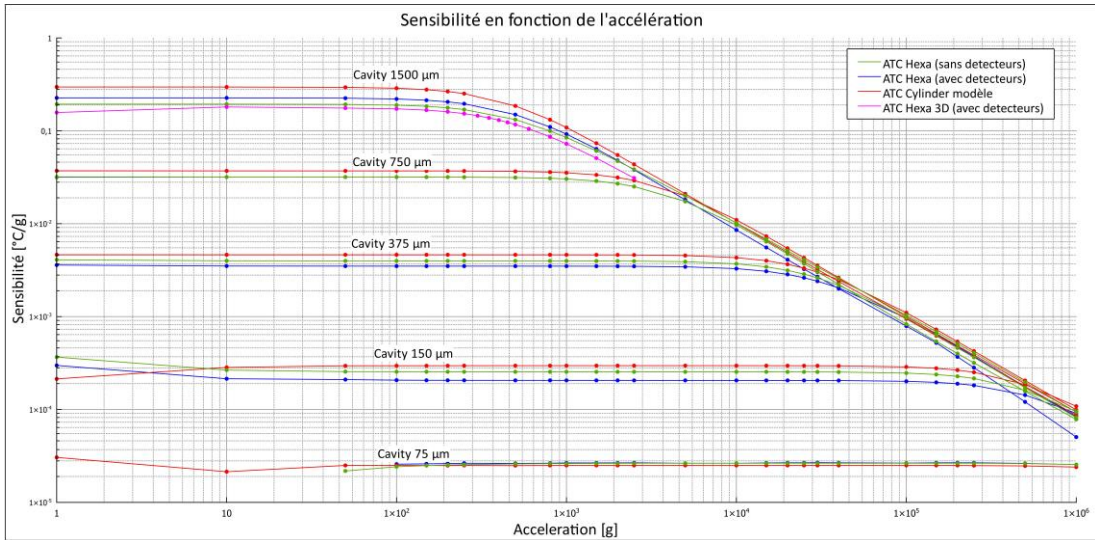


Figure 2 : Graphique de l'évolution de la sensibilité en fonction de l'accélération pour les quatre modèles

Nous pouvons aussi voir qu'il y a une légère différence entre les modèles. Cependant, la principale différence est due à la forme de la cavité. Pour ce qui concerne le modèle 3D, il y a une différence entre le modèle hexa avec détecteur en 2D et celui en 3D, cependant, la aussi l'ordre de grandeur reste le même (écart de 0.048°C/g).

4. CONCLUSIONS

Comme nous l'avons vu, la sensibilité d'un capteur est principalement influencé par la forme de la cavité. Nous pouvons donc tracer l'évolution de la sensibilité en fonction de la taille de la cavité (diamètre dans le cas du premier modèle, et largeur pour les trois autres). Dans le graphique log-log (figure 3) on trouve une pente pour la courbe égale à 3, ce qui correspond au terme cubique de l'équation de la sensibilité [1], [3], terme caractérisant les dimensions de la cavité.

Nous pouvons conclure que pour les simulations en régime permanent, la forme de la cavité ou la présence des détecteurs n'influence que très peu la réponse des capteurs. L'utilisation d'un modèle simplifié pour les simulations CFD permet de réduire le temps de calcul tout en ayant les mêmes résultats qu'avec un modèle plus complexe.

La différence entre les simulations 2D et 3D reste faible, elle est principalement due au fait qu'en 3D, le gradient thermique le long du fil de chauffe est pris en compte, contrairement au modèle 2D.

Les résultats étant très proche, il n'est pas nécessaire de réaliser systématiquement les simulations en 3D, même si celles-ci restent plus précises.

Nous allons aussi réaliser des simulations (2D et 3D) en mode transitoire afin de déterminer l'influence des détecteurs sur le temps de réponse et la bande passante des capteurs.

5. REFERENCES

- [1] A. Garraud, « Amélioration des performances et nouveau concept de détecteurs de capteurs inertiels à détection thermique », Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 2011.
- [2] A. Garraud, P. Combette, J. M. Gosalbes, B. Charlot, et A. Giani, « First high-g measurement by thermal accelerometers », in *2011 16th International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference*, Beijing, China: IEEE, juin 2011, p. 84-87. doi: 10.1109/TRANSDUCERS.2011.5969142.
- [3] A. Garraud, P. Combette, F. Pichot, J. Courteaud, B. Charlot, et A. Giani, « Frequency response analysis of an accelerometer based on thermal convection », *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 21, n° 3, p. 035017, mars 2011, doi: 10.1088/0960-1317/21/3/035017.

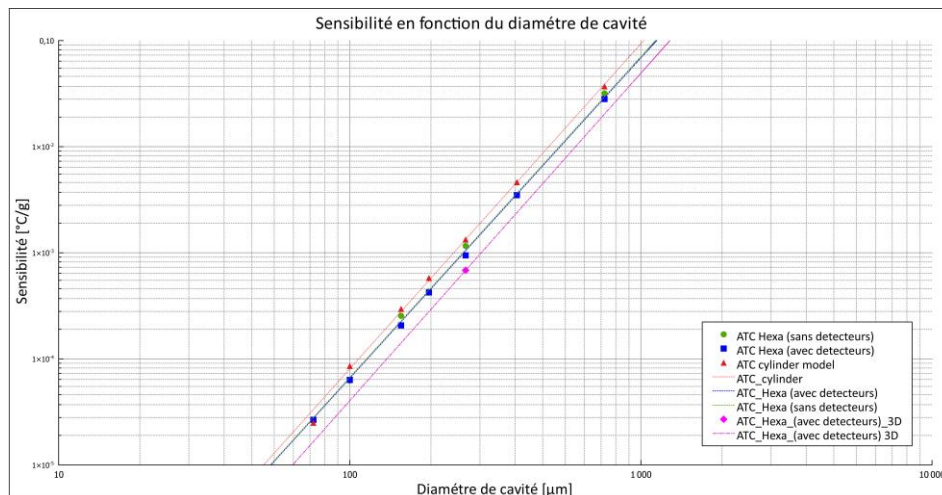


Figure 3 : Evolution de la sensibilité en fonction de la taille de cavité

INVESTIGATION OF THERMAL GRADIENT GENERATED BY A MICRO-HOT WIRE FOR SIMULTANEOUS VELOCITY AND TEMPERATURE MEASUREMENT

Khaled Ahmad^a, Baptiste Baradel^a, Olivier léon^b, Thibaut Dupuy^b, Philippe Combette^a, Léo Chamard^a, Alain Giani^a

^a IES, Université de Montpellier, 34000, Montpellier, France

^b DMPE, ONERA, Université de Toulouse, 31000, Toulouse, France

E-mail: khaled.ahmad@etu.umontpellier.fr

SUMMARY

This study focuses on advancing thermal fluid dynamics research by simultaneously measuring velocity and temperature fluctuations in small-scale turbulent flows. The complex dynamics of turbulent flows necessitate understanding spatiotemporal correlations between these fluctuations for studying turbulent flow, heat transfer and energy exchange mechanisms. Thermal anemometry, particularly using a micro-sensor approach, shows promise due to its ability to integrate temperature and velocity measurements. Challenges include spatial filtering effects and potential interference between measurement wires. Previous research has addressed these challenges through micro-sensor development, enhancing velocity measurement accuracy. Current work aims to develop a dual-wire micro-sensor for simultaneous velocity and temperature measurement, optimizing wire spacing to minimize interference while ensuring accurate readings. Computational simulations and experimental validations highlight promising results, though further investigation into turbulence-induced effects is ongoing.

1. INTRODUCTION

The simultaneous measurement of velocity and temperature fluctuations in small-scale turbulent flows is crucial for advancing thermal fluid dynamics research. Understanding the spatiotemporal correlation between these fluctuations is essential due to the complex dynamics of turbulent flows, characterized by increased vorticity, higher dissipation rates, and amplified thermal gradients. Accurate measurements are imperative to study turbulent heat transfer phenomena and thermal energy exchange mechanisms [1].

2. DESCRIPTION OF THE STUDY

However, simultaneously measuring velocity and temperature fluctuations in turbulent flow using a single sensor poses significant challenges. Among the available measurement techniques, thermal anemometry offers the most promising advantages for achieving this simultaneous acquisition [2]. This approach involves employing a sensor comprising two wires: a cold wire for

temperature measurement and a hot wire for velocity measurement. Unfortunately, this strategy presents two main issues. Firstly, it is constrained by the limitations of thermal anemometry, which stem from the elongated dimensions of their sensitive elements, introducing spatial and temporal filtering effects. Secondly, employing two wires introduces the risk of interaction between them, potentially disrupting their respective measurements.

To address this first issue, previous research efforts resulted in the development of a micro-sensor featuring reduced sensing element dimensions [3]. The thermoresistive micro-sensor is composed by a thin platinum wire, measuring 60 μm in length, 0.2 μm in thickness, and 1.5 μm in width, serving as the sensing element. Positioned at the midpoint of a 900 μm bridge Silicon Nitride structure, the wire is supported by a silicon framework (Fig.1). The micro-sensor has demonstrated significant enhancements in detecting velocity fluctuations during flow measurements, underscoring such sensors can be used for velocity measurements.

The present investigation aims to address the second issue of measuring simultaneously velocity and temperature. Building upon previous work on microsensor development for velocity measurement, the proposed sensor for simultaneous measurement will adopt a similar design, but with two wires: the first serving as the cold wire and the second as the hot wire (Fig.2). However, the heat generated by the hot wire may affect the measurements of the cold wire, particularly under static conditions and low-velocity flow. The key challenge here is to establish the minimum distance between these two wires to prevent any interference while ensuring that the distance does not exceed 500 μm to qualify as simultaneous. Computational simulations using ANSYS are conducted to model a 2D simulation studying the temperature distribution by a hot plate configured similarly to a micro hot wire. Additionally, temperature measurements are conducted to assess the validity of the simulation. This is done using sensors with differently spaced elements, and by placing two sensors with single wires close together at a specific distance.

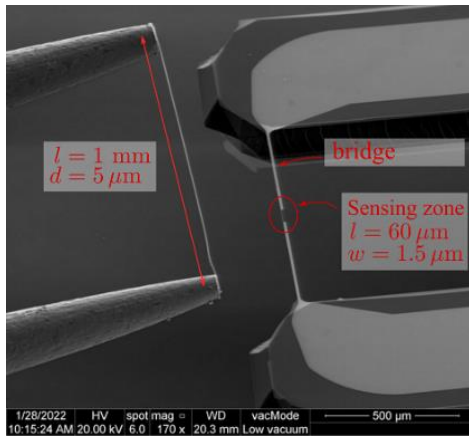


Figure 1. SEM Images: Microsensor with Conventional and Micro Hot Wires.

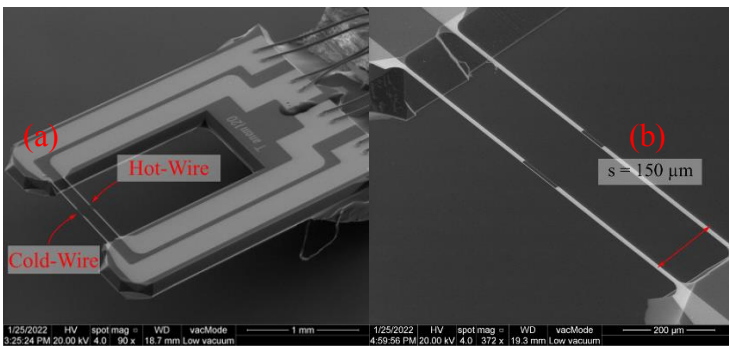


Figure 2. SEM Images: (a) Microsensor with Two Sensing Elements Spaced by $s = 150\mu\text{m}$, (b) Close-up View of Sensing Elements.

3. RESULTS

A good agreement between experimental data and simulations is observed (Fig.3). Additionally, simulations of forced convection were performed. The results indicate for a distance between the two wires of 400 to 500 μm , there is an effect when the hot wire operates at 200 $^{\circ}\text{C}$ with no flow or very low velocity (0.15 m/s). This suggests that at this temperature of hot wire, a correction is necessary for the cold wire or by reducing the temperature of the hot wire, although this may compromise sensitivity in velocity measurement. Beyond this velocity threshold, the effect dissipates allowing to use the sensors without corrections. However, further investigation is required to determine if turbulence-induced effect, like reverse flow, would impact the cold wire's measurements.

4. CONCLUSIONS

In conclusion, this study underscores the critical importance of advancing simultaneous velocity and temperature measurement capabilities in small-scale turbulent flows. Through the development and refinement of micro-sensor technology, significant strides have been made towards overcoming traditional measurement limitations. Challenges such as spatial filtering effects

and wire interaction have been addressed through innovative sensor designs and rigorous experimental validation. The integration of computational simulations has provided valuable insights into thermal distributions and interference effects, enhancing our understanding of turbulent heat transfer phenomena. Moving forward, continued research efforts will focus on further optimizing sensor designs and exploring the impact of turbulent dynamics on measurement accuracy, ultimately paving the way for more efficient thermal management and energy systems.

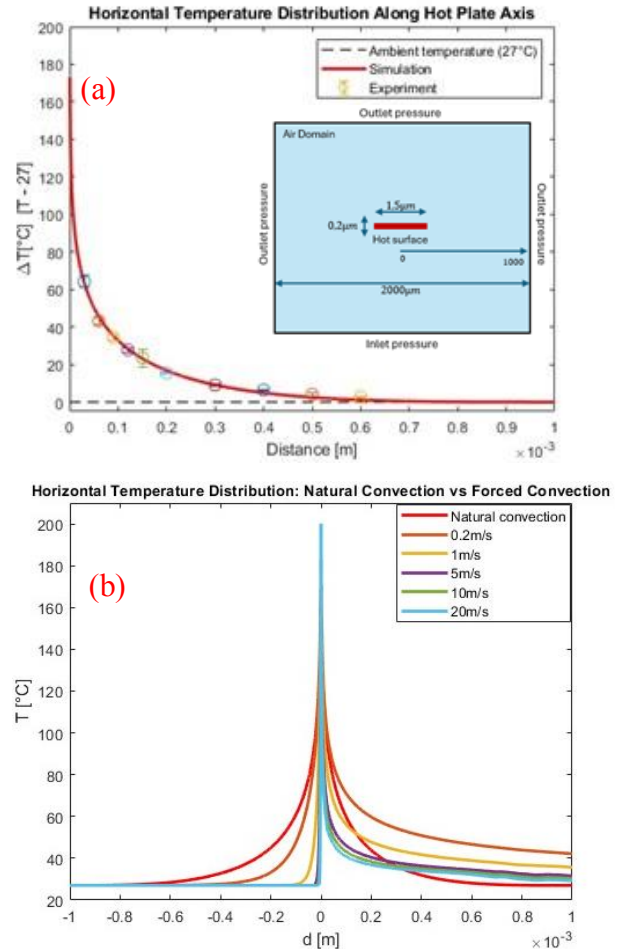


Figure 3. Thermal Gradient Induced by a Hot Plate (a) in Natural Convection: Experimental and ANSYS Simulation Study, (b) Natural convection vs Forced convection.

4. REFERENCES

[1] J. Zhang, Z. Zou, et C. Fu, « A Review of the Complex Flow and Heat Transfer Characteristics in Microchannels », *Micromachines*, vol. 14, n° 7, p. 1451, juill. 2023, doi: 10.3390/mi14071451.

[2] Petar V Vukoslavecvić et James M Wallace, « The simultaneous measurement of velocity and temperature in heated turbulent air flow using thermal anemometry », *Meas. Sci. Technol.*, vol. 13, p. 1615, sept. 2002, doi: 10.1088/0957-0233/13/10/315.

[3] B. Baradel, A. Giani, F. Méry, P. Combette, et O. Léon, « A micro-hot-wire anemometry probe with elongated stubs for turbulent boundary layer measurements ». 20mars 2024. doi: 10.21203/rs.3.rs-4109150/v1.

LE LASER À POLARITONS DE GUIDE D'ONDE : VERS UNE NOUVELLE GÉNÉRATION DE LASERS POUR LA PHOTONIQUE INTÉGRÉE

H. Souissi^{1,2*}, M. Gromovyi^{1,3}, E. Cambri¹, V. Develay², C. Brimont², L. Doyennette², T. Guillet²,
D. Solnyshkov^{4,5}, G. Malpuech⁴, B. Alloing³, J. Zuniga-Perez³, S. Bouchoule¹

¹ *Centre de Nanosciences et de technologies, CNRS, Université Paris-Saclay, France*

² *Laboratoire Charles Coulomb (L2C), Université de Montpellier, CNRS, France*

³ *UCA, CRHEA-CNRS, Rue Bernard Gregory, 06560 Valbonne, France*

⁴ *Université Clermont Auvergne, CNRS, Institut Pascal, Clermont-Ferrand, France*

⁵ *Institut Universitaire de France (IUF), 75231 Paris, France*

* hassen.souissi@c2n.upsaclay.fr

RÉSUMÉ

Le laser à polaritons en géométrie de guide d'onde intéresse de par ses propriétés uniques résultant du couplage fort exciton-photon. Cette étude se concentre sur une cavité GaN courte de 60 μm , où le fonctionnement en continu ou en régime de blocage de mode est observé. La dépendance de ces régimes est étroitement liée au spectre de gain, à la dispersion de vitesse de groupe et à la non-linéarité $\chi^{(3)}$ des polaritons.

1. INTRODUCTION

Les guides d'onde polaritoniques représentent une avancée majeure dans le domaine de l'optoélectronique et de l'optique intégrée, offrant des opportunités uniques pour le développement de nouveaux dispositifs photoniques. Ces guides exploitent le concept novateur de laser à polaritons, qui se distingue des lasers semiconducteurs conventionnels par son mode de fonctionnement basé sur la relaxation stimulée d'un réservoir d'excitons vers un état final polaritonique. Le laser à polaritons à base de GaN est particulièrement prometteur et constitue l'objet central de notre étude. Nous présentons ici une analyse approfondie de son mode de fonctionnement original, qu'il soit en régime continu ou impulsionnel à blocage de modes, contrôlé par la longueur de pompage optique et la température de fonctionnement.

2. DESCRIPTION DE L'ÉTUDE

Le GaN est un matériau semiconducteur à large bande interdite qui, comme le ZnO, possède des excitons particulièrement robustes et dotés d'une forte force d'oscillateur. Cela permet de maintenir un couplage fort exciton-photon jusqu'à température ambiante. Le premier laser à polaritons, et amplificateur, a été réalisé dans un guide d'onde ZnO, où les fissures présentes jouent le rôle de cavité optique [1]. Dans le présent travail, les structures laser sont réalisées via une méthode de

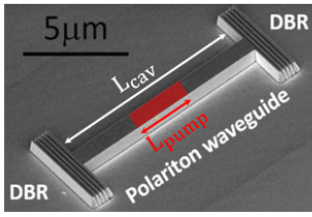
fabrication top-down, permettant une meilleure maîtrise des caractéristiques de la cavité et des modes optiques. Les cavités en forme de ruban sont définies par lithographie électronique et gravées dans une couche active de GaN, avec des réflecteurs de Bragg (DBR) placés aux extrémités (Figure 1(a)). À température ambiante, un fort couplage est attesté par un dédoublement de Rabi mesuré à 66 ± 10 meV [2]. Les cavités sont pompées optiquement, en résonance avec le réservoir d'excitons libres, avec un contrôle de la longueur de gain L_{pump} , en régime quasi-continu.

3. RESULTATS

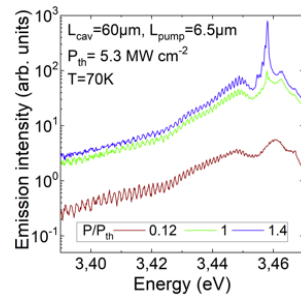
La Figure 1(b) montre une série de spectres de micro-photoluminescence (d'émission) en fonction de la puissance, enregistrés à la position du DBR à une température $T=70$ K. En dessous du seuil, plusieurs modes Fabry-Perot sont observés sur une large gamme spectrale à désaccord négatif. L'effet laser est démontré par la non-linéarité de l'intensité d'émission et l'affinement spectral du mode laser. En mesurant l'intervalle spectral libre (FSR) de la cavité, qui est proportionnel à la dispersion des modes polaritoniques dans le guide d'onde, nous démontrons que le laser fonctionne en régime de couplage fort exciton-photon. Il s'agit bien d'un laser polaritonique quasi-continu [3]. En étendant notre étude à $T=150$ K, nous constatons une transition vers un régime laser multimode, marqué par un FSR constant et une enveloppe sécante-hyperbolique (Figure 1(c, d)). Les interactions non-linéaires entre les polaritons, qui jouent un rôle crucial en compensant la dispersion de la vitesse de groupe, et le profil spectral de l'émission, sont deux signatures d'un blocage de modes qui donne lieu à une émission laser impulsionnelle, à la fréquence de répétition de la cavité (>100 GHz). Ces résultats expérimentaux trouvent un support probant dans nos simulations numériques basées sur l'équation de Gross-Pitaevskii [4]. C'est la formation de solitons de cavité, résultant du blocage de modes induit par la non-

linéarité $\chi^{(3)}$ des polaritons, qui est responsable de cette émission impulsionnelle.

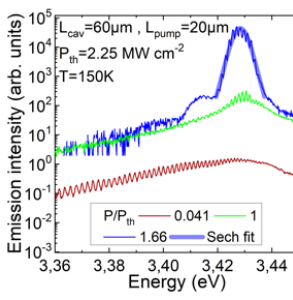
(a) Laser device (SEM)



(b) Monomode regime, T=70 K



(c) Mode-locked regime, T=150 K



(d) Mode-locked regime, T=150 K

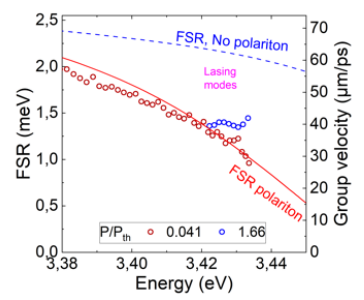


Figure 1 : (a) Structure laser (cavité de longueur $L_{cav}=10 \mu\text{m}$) et son pompage optique (en rouge) ; (b, c) Spectre d'émission d'un laser à polariton de longueur $L_{cav}=60 \mu\text{m}$ à $T=70$ et 150K ; (d) Intervalle spectral libre (FSR) mesuré (ronds) et modélisé d'après la dispersion des polaritons du guide d'onde GaN.

4. CONCLUSIONS

Le laser à polaritons fonctionne de manière originale en raison de la non-réciprocité entre l'absorption et l'émission stimulée dans la couche active. Il se distingue par un gain très élevé (jusqu'à 7000 cm^{-1}), une forte dispersion de la vitesse de groupe et une non-linéarité optique marquée. La relation entre ces trois paramètres détermine le mode d'émission du laser, qu'il soit continu ou impulsionnel avec blocage de modes.

4. REFERENCES

- [1] O. Jamadi et al. *Light : Science & Applications* 7, 82 (2018)
- [2] C. Brimont et al. *Phys. Rev. Appl.* 14, 054060 (2020)
- [3] H. Souissi et al. *Phys. Rev. Appl.* 18, 044029 (2022) ; arXiv:2201.04348 (2022)
- [4] H. Souissi et al. *Optica* Vol. 11, Issue 7, pp. 962-970 (2024) ; arXiv:2310.18661 (2023)

SINGLE MODE INTERBAND CASCADE LASER EMITTING AT 4.61 μm

L. Kacel^{1,2}, Z. Loghmari², M. Fagot¹, D.A. Diaz-Thomas¹, R. Teissier^{1,2} and L. Cerutti¹

¹ IES, Univ. Montpellier, CNRS, 34000 Montpellier, France

² MirSense, Orsay, France

*Lydia.Kacel@mirsense.com

ABSTRACT

We present the fabrication and study of single-mode interband cascade lasers (ICL) emitting at 4.61 μm for CO gas detection. The laser structure is grown on a GaSb substrate, and the distributed feedback devices (DFB) are based on a top surface periodic grating. Single-mode operation is demonstrated over a wide temperature and current range in pulsed operation.

1. INTRODUCTION

Interband cascade lasers (ICLs) are currently the most used semiconductor laser sources in the 3-6 μm wavelength range of the mid-infrared (MIR) [1]. They are essential in various fields, such as spectroscopy and gas detection [1]. These applications require single-mode lasers. Distributed feedback (DFB) technology is generally used to ensure spectral selectivity and single-mode emission. Lateral metal gratings [2] have been successfully used to fabricate single mode ICLs. In our work we present a solution with a grating on the top of the laser ridge. We aim to reduce power consumption and increase optical output power. To achieve this, mirSense company [3] is developing single mode lasers that operate in pulsed regime at high temperature.

2. DESCRIPTION

This study consists of three main phases: simulation, fabrication and experimental characterization. Initial simulations using COMSOL software allow us to determine the parameters needed to fabricate DFB ICLs targeting a wavelength of 4.61 μm for CO gas detection. The process then begins by implementing the periodic gratings on the surface using e-beam lithography and ICP dry etching. A periodic pattern of around 650 nm is defined to select the longitudinal single-mode emission. a ridge width

around 6 μm is designed using optical photolithography to ensure transversal single-mode emission. The next fabrication steps follow standard laser technology processes [4]. Experimental characterizations are initially performed in pulsed mode.

3. RESULTS

This section presents experimental results obtained in the pulsed regime with 310 ns pulses at a frequency of 12 kHz. The Figure 1 shows the typical PIV characteristics of an ICL DFB with a ridge width of 6 μm and a cavity length of 2 mm measured at different heatsink temperatures. The DFB technology didn't affect the laser performance as the threshold currents are similar to those of Fabry Perot lasers from the same wafer.

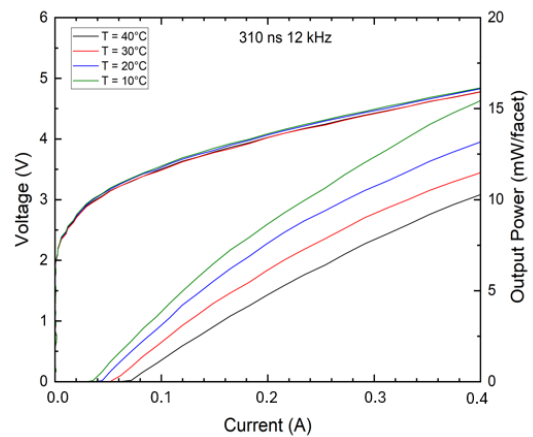


Figure 1: P-I-V of a pulsed 6 $\mu\text{m} \times 2$ mm DFB-ICL at different temperatures.

The Figure 2 shows the emission spectrum of the same laser at different temperatures under a driving current of 200 mA. It can be seen that the emission is single-mode from 10°C up to 40°C around the target wavelength of 4.61 μm .

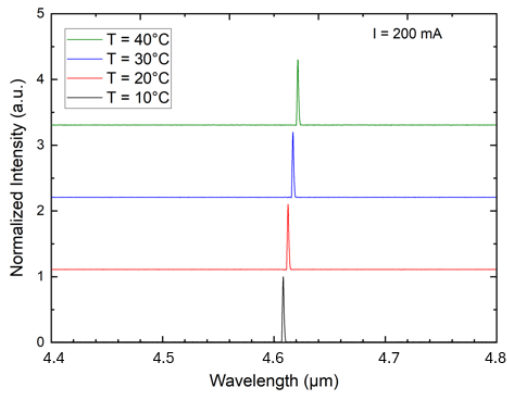


Figure 2: Emission spectrum of a pulsed $6\mu\text{m} \times 2\text{mm}$ ICL at various temperatures.

4. CONCLUSION

This study demonstrates the potential of ICLs using surface DFB gratings to achieve single-mode emission above room temperature. The emission wavelength of $4.61\ \mu\text{m}$ is suitable for the spectroscopy of carbon monoxide (CO). The results therefore open new prospects for DFB ICLs integrated into low power consumption gas sensor.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was partially supported by the French program “Investments for the Future” (EquipEx EXTRA and HYBAT, ANR-11-EQPX0016, ANR-21-ESRE-0026), the BPI (HyQuality Project DOS0188007/00).

REFERENCES

- [1] J. R. Meyer et al., Photonics, vol. 7, no 3, Art. no 3, sept. 2020.
- [2] J. Koeth et al., Proc. of SPIE Vol. 10403 1040308-3, Aug. 2017.
- [3] <https://mirsense.com>
- [4] D. A. Díaz Thomas et al. Optics Express, Vol;27, No 22/28, Oct. 2019.

Posters :

**Micro-nano-technologies et systèmes,
Composants photoniques, intégration
photonique et optoélectronique**

MATERIAUX NANOCOMPOSITES A TRANSITION DE SPIN POUR COMPOSANTS OPTIQUES ACTIFS

Jesukpego Anorld CAPO CHICHI ¹, Alejandro ENRIQUEZ CABRERA ²,
Gabor MOLNAR ², Lionel SALMON ², Karl RIDIER ², Azzedine BOUSSEKSOU ², Stéphane CALVEZ ¹

¹ LAAS-CNRS, UPS, CNRS, Toulouse

² LCC, UPS, CNRS, Toulouse

* E-mail: scalvez@laas.fr

RESUME

Pour faciliter la réalisation de composants photoniques actifs dans la gamme visible, on présente des avancées technologiques de mise en œuvre et mise en forme de résines chargées avec des nanoparticules de matériau à changement de phase. Des films thermiquement actifs d'épaisseur micrométrique et micro-structurés de SU-8 incorporant des nanoparticules de triazole borate de fer II avec des concentrations atteignant 15% en masse ont été obtenus. Ces résultats ouvrent une voie vers la réalisation d'éléments optiques diffractifs ajustables.

Dans cette contribution, on rapporte nos progrès sur la mise en œuvre de résines chargées en nanoparticules de matériau à SCO. Ces nanocomposites à SCO sont utilisés pour créer des films minces à SCO qui seront mis en forme pour fabriquer, dans un second temps, des démonstrateurs d'éléments optiques diffractifs ajustables. On note que cette approche est similaire à celle publiée très récemment par l'équipe de Bernhard Roth [10], qui utilise également des nanocomposites à SCO pour fabriquer des capteurs de température exploitant la modification de la propagation dans des guides d'onde optiques multimodes.

1. INTRODUCTION

Les matériaux à changement de phase (Phase Change Materials - PCM) sont des matériaux qui présentent une variation importante de leur indice complexe de réfraction lors de leur changement d'état [1], [2], [3]. De fait, ils font l'objet de nombreuses investigations visant à exploiter cette propriété pour réaliser des composants optiques actifs compacts tels que des fenêtres intelligentes [4], des modulateurs/commutateurs en optique intégrée ou non [2], [3], des mémoires optiques voire des circuits photoniques neuro-morphiques [5]. Bien que moins couramment étudiés que les chalcogénures ($\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ - GST), les matériaux à transition métal isolant (VO_2) ou encore les cristaux liquides (type E7), les complexes moléculaires à transition de spin (Spin CrossOver - SCO) constituent une famille intéressante de matériaux à changement de phase pour une utilisation au sein de dispositifs opérant dans la gamme visible [6], [7]. En effet, ces composés organométalliques peuvent transiter de manière réversible entre les conformations diamagnétique "bas spin" (Low Spin, LS) et paramagnétique "haut spin" (High Spin, HS) de leurs ions métalliques (typiquement Fe, Co, Mn, Cr), deux états solides de bande interdite située dans l'(ultra)-violet et dont la séparation en indice de réfraction est d'environ 0.05.

A ce jour, cette réponse optique des composés SCO a été plutôt utilisée comme un moyen de sonder le changement d'état [8] plutôt que comme une méthode pour activer des dispositifs (photoniques). Les travaux dédiés à la réalisation de composants sont donc peu nombreux et se sont concentrés sur l'exploitation de films minces de matériaux SCO au sein d'afficheurs de chiffres thermo-chromiques [9] ou de modulateurs optiques de type Fabry-Pérot avec couplage optique direct [6] ou médié par prisme [7].

2. PREPARATION

Le complexe SCO sélectionné pour cette étude est le triazole borate de fer II, un composé prometteur notamment car il présente une large modulation de l'indice de réfraction avec une transition de phase abrupte à hystérésis (les températures de transition étant autour de 110 °C à l'échauffement et autour de 60 °C au refroidissement). La synthèse de ce complexe SCO est effectuée selon un protocole existant [8].

Cette élaboration conduit à l'obtention de nanoparticules de triazole tétrafluoroborate de fer II polydispersées (leur taille variant entre 60 et 100 nm). Pour fabriquer le nanocomposite à SCO, on introduit une quantité choisie (jusqu'à 15% en masse) de ces nanoparticules dans une résine époxy de type SU8-3005 (densité de 1.075 g/ml). On mélange cette résine chargée pendant 18h à l'aide d'une agitation magnétique pour l'homogénéiser au mieux.

La réalisation de couches minces d'épaisseur micrométriques (1-5 μm) sur des substrats (de verre) est effectuée par centrifugation (spin-coating) du nanocomposite à SCO créé ou par dépôt par spray d'une version diluée dans de l'acétone. Une image d'un échantillon (de $\sim 2 \times 2 \text{cm}^2$) est présentée dans l'insert de la Figure 2.

Pour aller vers la fabrication de composants micro-structurés, notre approche consiste à réaliser des moules en SU8 par lithographie optique standard puis à venir les remplir à l'aide du nanocomposite à SCO par centrifugation. On obtient ainsi des zones juxtaposées de SU8 et de SU8 chargée, comme l'attestent les images de la Figure 1.



Figure 1 : (a) Image au microscope optique d'un motif de lignes réalisé par lithographie dans un film de résine SU8-3008, (b) Image au microscope optique de la structure précédente dont les espaces en air ont été comblés par du nanocomposite à SCO par centrifugation.

2. CARACTERISATIONS

Les films et structures fabriqués ont été testés pour vérifier que le matériau SCO est toujours actif à l'issue des procédés de fabrication décrits ci-dessus. Pour cela, des mesures de transmission pour des températures allant de l'ambiante à 150°C ont été réalisées à l'aide d'un spectromètre commercial (PerkinElmer Lambda 950).

La Figure 2 montre une modification significative des spectres dans la gamme des ultra-violets (~320 nm), caractéristique du changement d'état du composé à SCO. Un résultat similaire a été obtenu avec un film structuré et rempli avec un nanocomposite chargé à 15%.

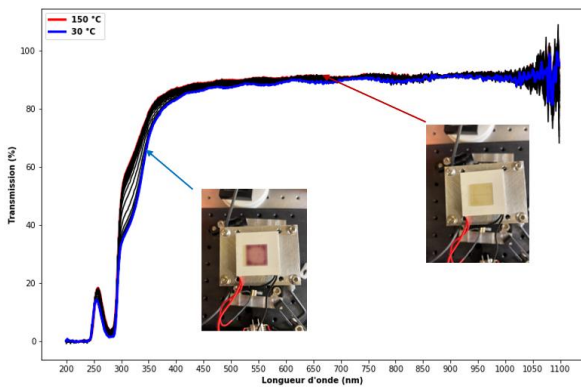


Figure 2 : Spectres de transmission d'un film de nanocomposite SCO chargé à 2.5% pour plusieurs températures de substrat. En insert, l'image de gauche (respectivement droite) montre une photo d'un échantillon recouvert d'un film planaire pour une température de substrat inférieure (respectivement supérieure) aux températures de transition.

4. CONCLUSIONS

Dans cette étude, des résines chargées en nanoparticules de matériau à transition de spin avec des teneurs massiques pouvant atteindre 15% ont été créées. Ces nanocomposites ont ensuite permis d'élaborer des couches minces et des motifs micrométriques de SU8 chargée en SCO. Les caractérisations optiques ont montré que le composé à SCO intégré est toujours actif. Ces premiers résultats technologiques ouvrent la voie vers la démonstration d'éléments optiques diffractifs ajustables ou de guides d'onde thermiquement commutables.

5. REMERCIEMENTS

Les travaux ont été financés en partie par Agence Nationale de la Recherche (projet SCOPOL, ANR-22-CE09-0019). Les travaux décrits ont été réalisés au sein de la centrale de micro-nanofabrication du LAAS-CNRS, membre du réseau national des plateformes technologiques RENATECH.

6. REFERENCES

- [1] J. Beeckman, « Liquid-crystal photonic applications », *Opt. Eng.*, vol. 50, n° 8, p. 081202, août 2011, doi: 10.1117/1.3565046.
- [2] M. Wuttig, H. Bhaskaran, et T. Taubner, « Phase-change materials for non-volatile photonic applications », *Nat. Photonics*, vol. 11, n° 8, p. 465- 476, août 2017, doi: 10.1038/nphoton.2017.126.
- [3] K. J. Miller, R. F. Haglund, et S. M. Weiss, « Optical phase change materials in integrated silicon photonic devices: review », *Opt. Mater. Express*, vol. 8, n° 8, p. 2415, août 2018, doi: 10.1364/OME.8.002415.
- [4] L. Long et H. Ye, « How to be smart and energy efficient: A general discussion on thermochromic windows », *Sci. Rep.*, vol. 4, n° 1, p. 6427, sept. 2014, doi: 10.1038/srep06427.
- [5] F. Brücknerhoff-Plückelmann, J. Feldmann, C. D. Wright, H. Bhaskaran, et W. H. P. Pernice, « Chalcogenide phase-change devices for neuromorphic photonic computing », *J. Appl. Phys.*, vol. 129, n° 15, p. 151103, avr. 2021, doi: 10.1063/5.0042549.
- [6] Y. Zhang *et al.*, « A molecular spin-crossover film allows for wavelength tuning of the resonance of a Fabry–Perot cavity », *J. Mater. Chem. C*, vol. 8, n° 24, p. 8007- 8011, 2020, doi: 10.1039/D0TC02094J.
- [7] L. Zhang *et al.*, « Thermo-Optical Switches Based on Spin-Crossover Molecules with Wideband Transparency », *Adv. Opt. Mater.*, p. 2303252, 2024, doi: 10.1002/adom.202303252.
- [8] G. Molnár, S. Rat, L. Salmon, W. Nicolazzi, et A. Bousseksou, « Spin Crossover Nanomaterials: From Fundamental Concepts to Devices », *Adv. Mater.*, vol. 30, n° 5, p. 1703862, févr. 2018, doi: 10.1002/adma.201703862.
- [9] O. Kahn et C. J. Martinez, « Spin-Transition Polymers: From Molecular Materials Toward Memory Devices », *Science*, vol. 279, n° 5347, p. 44- 48, janv. 1998, doi: 10.1126/science.279.5347.44.
- [10] A. Günther *et al.*, « Investigation of the molecular switching process between spin crossover states of triazole complexes as basis for optical sensing applications », *Sci. Rep.*, vol. 14, n° 1, p. 5897, mars 2024, doi: 10.1038/s41598-024-56427-1.

Micro-capteur à base de graphène pour la détection électrochimique de micropolluants

Aïda Bensebaa * 1,2

¹ Interfaces, Confinement, Matériaux et Nanostructures – Université d'Orléans, Centre National de la Recherche Scientifique – France

² Laboratoire Charles Coulomb – Centre National de la Recherche Scientifique, Université de Montpellier – France

Posters :

**Physique des structures de basse
dimensionnalité**

CROISSANCE IN SITU DE BOITES QUANTIQUES INAS SUR INP

K. Pantzas^{1,*}, G. Beaudoin¹, L. Couraud¹, L. Travers¹, A. Harouri¹, L. Le Gratiet¹, D. Mailly¹, I. Sagnes¹ et G. Patriarche¹

¹ *Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies CNRS - Université Paris-Saclay, 91120, Palaiseau, France*

* E-mail: konstantinos.pantzas@c2n.upsaclay.fr

RESUME

La croissance de boites quantiques InAs sur InP est observée pour la première fois in situ dans le microscope électronique NANOMAX. Cette observation a été rendue possible par le développement d'un procédé de transfert de membranes d'InP de 100 nm d'épaisseur sur des membranes chauffantes en SiC utilisées pour l'observation. Nous discuterons des mécanismes de croissance et montrerons que la forme (boîte ou bâtonnet) dépend des précurseurs des éléments V.

1. INTRODUCTION

Les sources de photons uniques émettant aux longueurs d'onde des télécommunications constituent un élément essentiel pour le développement de réseaux de communication quantique et des technologies pour l'informatique quantique. Parmi la grande variété de systèmes pouvant être utilisés pour fabriquer de telles sources, les lasers à boites quantiques (BQs) InAs sur InP font partie des plus prometteurs. En effet, on s'attend à ce que ces sources produisent des photons indiscernables de grande brillance, à l'instar des sources basées sur des BQs InAs sur GaAs émettant à des longueurs d'onde plus courtes [1]. Les BQs InAs sur InP ont de surcroît l'avantage d'émettre dans les fenêtres des télécoms optiques et peuvent être directement couplés aux réseaux de télécommunication à fibres optiques. Toute source à photon unique fabriquée sur InP pourrait donc immédiatement bénéficier de l'infrastructure de télécommunication existante [2].

Malgré près de trois décennies d'efforts de recherche, les sources basées sur des BQs InAs sur InP restent peu développées. Le plus grand défi réside dans la croissance des BQs elles-mêmes. Contrairement aux BQs InAs sur GaAs, le contrôle de la taille et de la densité des BQs InAs auto-assemblées sur InP émettant à 1,55 μm est extrêmement complexe. D'autres approches, comme notamment l'épitaxie sélective dans des nano-ouvertures [3] par MOVPE ou l'épitaxie par gouttelettes (droplet epitaxy) [4], n'ont guère été plus fructueuses jusqu'à présent. Seule une compréhension plus approfondie des mécanismes sous-jacents à la formation des boites quantiques permettra une percée dans ce domaine.

Les développements récents de la microscopie électronique à transmission ont donné naissance à des

microscopes qui servent également de chambres de réaction modèles et permettent d'observer la croissance de nanocristaux en temps réel. De tels microscopes ont été utilisés avec succès pour observer la croissance de nanofils [5] et de nanotubes de carbone. Cependant, la synthèse d'objets de dimension inférieure, tels que les boites quantiques, n'a pas encore été rapportée. Contrairement aux nanofils ou aux nanotubes de carbone, dont l'épitaxie peut s'effectuer à partir de catalyseurs métalliques dispersés sur une membrane chauffée dans le porte-échantillon du microscope, les boites quantiques nécessitent l'utilisation d'un nanosubstrat : c'est la différence de paramètre de maille entre ce nanosubstrat d'InP, et la couche de mouillage en InAs, qui entraînera la croissance de BQs d'InAs. À ce jour, aucun nanosubstrat de ce type n'a été fabriqué.

La présente contribution décrit la fabrication de nanosubstrats d'InP, leur transfert sur des membranes en SiC, et leur utilisation pour l'observation in situ de la croissance de boites quantiques et de bâtonnets quantiques d'InAs par épitaxie par jets moléculaires (MBE).

2. FABRICATION DE NANOSUBSTRATS

Les nanosubstrats InP ont été fabriqués selon les étapes décrites ci-après. Tout d'abord, une membrane d'InP de 100 nm d'épaisseur a été épitaxiée sur une couche d'arrêt en InGaAs sur substrat InP par épitaxie en phase vapeur aux organométalliques (MOVPE). Des cadres rectangulaires ont été définis sur ces échantillons par lithographie électronique. Les dimensions extérieures des cadres étaient de 25 μm par 50 μm , et les dimensions intérieures de 15 μm par 40 μm . Une gravure par plasma a été ensuite utilisée pour graver la membrane InP dans les fenêtres et exposer la couche d'arrêt en InGaAs. La membrane a été ensuite partiellement sous-gravée en chimie humide, suspendant une couronne d'InP sur un pilier central en InGaAs.

Les nanosubstrats sont ensuite découpés à l'aide d'un faisceau d'ions focalisés d'hélium (FIB-He). Le FIB-He a été préféré au FIB-gallium pour éviter l'implantation de gallium dans les nanosubstrats. En effet, l'hélium implanté dans le nanosubstrat sera éliminé lorsque le nanosubstrat est chauffé, alors que le gallium formerait des gouttes de gallium qui contamineraient l'ensemble du

nanosubstrat. Ces nanosubstrats ont été transférés et placés sur les ouvertures des membranes chauffantes en SiC, utilisées pour la croissance dans le microscope in situ NANOMAX. L'adhésion par Van der Waals suffit à maintenir le nanosubstrat sur la membrane et aucune brasure supplémentaire n'est nécessaire.

3. RESULTATS

L'épitaxie de QDs InAs par MBE sur nanosubstrat InP a pu être observée en temps réel dans le microscope électronique à transmission NANOMAX. A une température d'épitaxie de 410°C et sous flux moléculaires d'indium et d'arsenic nous avons d'abord observé la formation de bâtonnets quantiques (Fig.1a), i.e. de boîtes quantiques dont une des dimensions dans le plan est plus grande que l'autre. Ce n'est que par l'ajout d'un flux de phosphore que nous avons pu observer la croissance d'objets rectangulaires ou boîtes quantiques (Fig 1b). Ce flux de phosphore permet de stabiliser la surface du nanosubstrat et empêche une évaporation partielle de celui-ci préférentiellement selon les axes [110], qui conduit à la formation de bâtonnets quantiques.

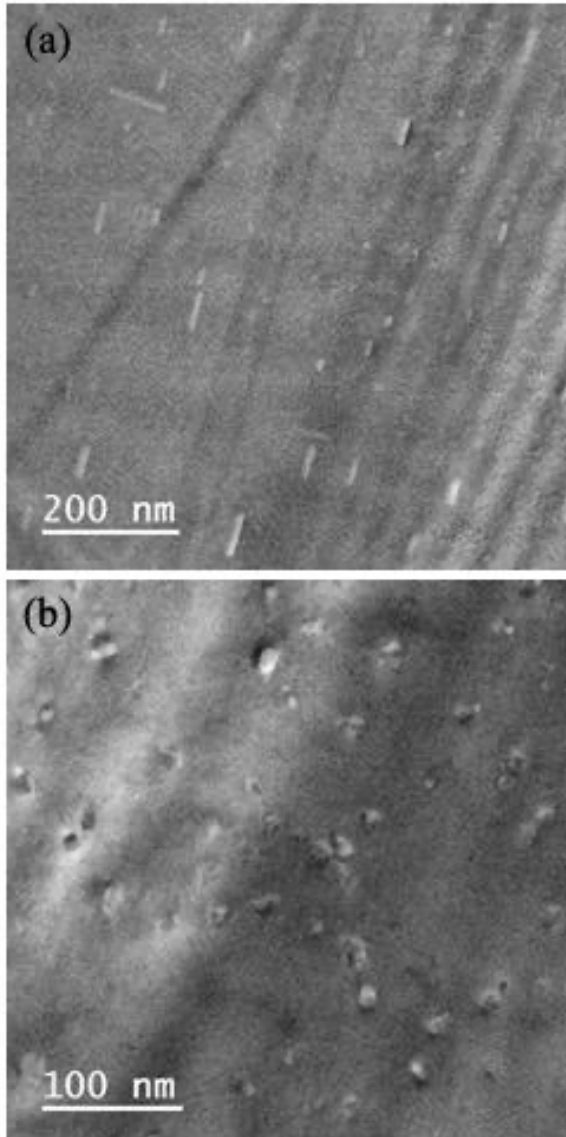


Fig.1 : Image TEM de bâtonnets quantiques (a) et boîtes quantiques (b) d'InAs observés in situ en axe de zone 001. On retiendra que des bâtonnets se forment sous flux moléculaires de gallium et d'arsenic; seul l'ajout d'un flux de phosphore permet l'observation de la croissance de boîtes quantiques.

4. CONCLUSIONS

Nous avons établi un procédé de fabrication de nanosubstrats d'InP de 100nm d'épaisseur et observé in situ la croissance de boîtes et bâtonnets quantiques d'InAs sur InP. Nous avons montré qu'il était crucial de maintenir une pression de phosphore afin d'éviter la formation de bâtonnets quantiques.

5. REMERCIEMENTS

Nous remercions le réseau RENATECH et l'Equipex TEMPOS pour leur soutien lors de la réalisation de cette étude.

6. REFERENCES

- [1] N. Somaschi *et al.*, "Near-optimal single-photon sources in the solid state," *Nature Photon*, vol. 10, no. 5, pp. 340–345, May 2016, doi: 10.1038/nphoton.2016.23.
- [2] F. Kaiser, B. Fedrici, A. Zavatta, V. D'Auria, and S. Tanzilli, "A fully guided-wave squeezing experiment for fiber quantum networks," *Optica, OPTICA*, vol. 3, no. 4, pp. 362–365, Apr. 2016, doi: 10.1364/OPTICA.3.000362.
- [3] N. Gogneau *et al.*, "One-step nano-selective area growth (nano-SAG) of localized InAs/InP quantum dots: First step towards single-photon source applications," *Journal of Crystal Growth*, vol. 310, no. 15, pp. 3413–3415, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2008.04.019>.
- [4] E. M. Sala, M. Godsland, Y. I. Na, A. Trapalis, and J. Heffernan, "Droplet epitaxy of InAs/InP quantum dots via MOVPE by using an InGaAs interlayer," *Nanotechnology*, vol. 33, no. 6, p. 065601, Nov. 2021, doi: 10.1088/1361-6528/ac3617.
- [5] J.-C. Harmand *et al.*, "Atomic Step Flow on a Nanofacet," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 121, no. 16, p. 166101, Oct. 2018, doi: 10.1103/PhysRevLett.121.166101.

FLUIDES QUANTIQUES D'EXCITONS INDIRECTS DANS DES PUIITS QUANTIQUES GAN/ALGAN : VERS UNE CONDENSATION DANS L'ETAT SOMBRE

T. Guillet¹, R. Aristegui¹, C. Brimont¹, B. Damilano², M. Vladimirova¹

¹ L2C, Université de Montpellier, CNRS, Montpellier, France

² CRHEA, Université Côte d'Azur, CNRS, Valbonne, France

* E-mail: thierry.guillet@umontpellier.fr

RESUME

Les fluides quantiques d'excitons indirects sont un système bosonique intéressant en tant qu'état collectif quantique de longue durée de vie. Nous présentons les progrès récents pour leur génération, leur refroidissement et leur piégeage dans des puits quantiques GaN/(Al,Ga)N, ainsi que les premières indications de condensation dans un état collectif de forte densité, dans l'état sombre de l'exciton.

1. INTRODUCTION

Les excitons indirects (IX) permettent de réaliser des fluides bosoniques dipolaires dans les puits quantiques semiconducteurs et dans les hétérostructures à base des TMDs. En effet, ces excitons sont constitués d'un électron et d'un trou séparés spatialement, ce qui leur confère une grande durée de vie (μs) et un dipôle électrique important. Ils peuvent se propager sur des distances macroscopiques supérieures à $100\mu\text{m}$, être contrôlés in situ par la lumière ou par des tensions appliquées sur des électrodes semi-transparentes, et être refroidis jusqu'à la température de dégénérescence quantique avant leur recombinaison radiative. Dans les puits quantiques GaN/(Al,Ga)N, les excitons sont naturellement indirects grâce au très fort champ électrique interne dans la direction de croissance qui sépare électrons et les trous en confinant chacun sur une face opposé du puits quantique.

Nos travaux antérieurs ont montré que nous pouvons façonner le potentiel de piégeage des excitons dans le plan de l'échantillon, par des électrodes, et générer des "lacs excitoniques" homogènes spatialement et thermalisés [1]. Le piégeage du fluide d'excitons peut être contrôlé par la nature des électrodes (NiAu ou graphène) et par le potentiel qui leur est appliqué [2,3]. La diffusion du fluide d'excitons dans le plan dépend en particulier du substrat utilisé et de la rugosité des interfaces de croissance [4].

2. IMPACT DU DIPOLE EXCITONIQUE

Dans cette étude, nous présentons d'une part les différentes procédures utilisées pour générer un fluide excitonique et l'étudier, en séparant soit spatialement, soit temporellement, la génération, le refroidissement et la mesure de l'état collectif d'excitons indirects (Figure 1a).

Nous détaillerons ensuite l'impact du dipôle excitonique sur la dynamique spatiale et temporelle de transport et de recombinaison des excitons indirects, sur une famille de puits quantiques de dipôle variant de 5nm à 8nm (Fig. 1b,c). Ces résultats sont analysés dans un modèle de drift-diffusion-recombinaison qui permet d'appréhender les interactions exciton-exciton dépendant du dipôle.

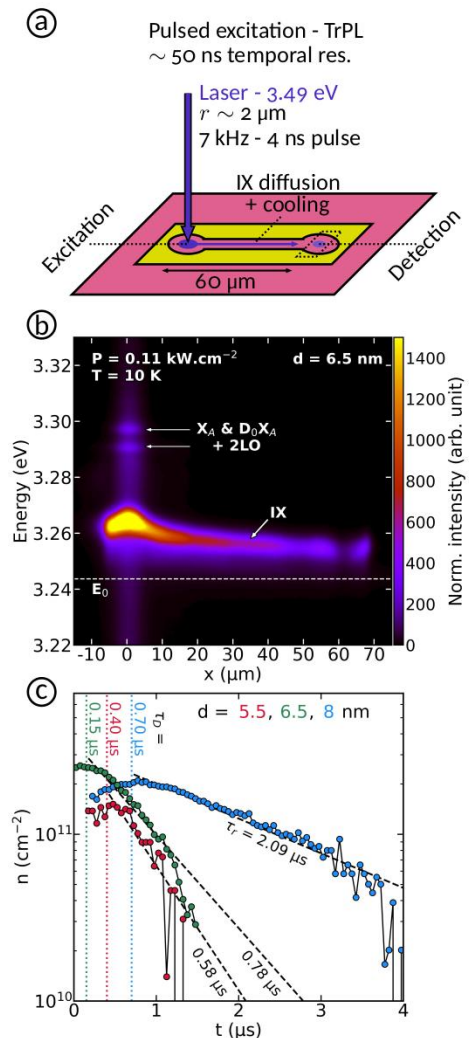


Figure 1 : (a) Schéma de la génération du fluide d'exciton dans le piège formé par une électrode (en jaune); (b) Émission résolue spatialement et spectralement (en fausse couleur) pour un puits quantique d'épaisseur $d=6,5\text{nm}$; (c) Signal résolu en temps détecté dans le piège à la position $x=60\mu\text{m}$ en fonction de l'épaisseur du puits quantique; τ_D indique le temps de transport diffusif des excitons entre la génération en $x=0$ et le piège.

3. VERS UN CONDENSAT SOMBRE D'EXCITONS INDIRECTS

Nous présenterons enfin des résultats préliminaires récents indiquant que dans certaines conditions d'excitation et de confinement dans le plan, pour des dipôles de 6.5 nm, une température de l'ordre de 10K et des densités de l'ordre de 10^{11} - 10^{12} cm⁻², le fluide excitonique condense vers un état sombre de spin ± 2 de longue durée de vie.

3. REFERENCES

- [1] F. Chiaruttini et al., Nano Letters **19**, 4911(2019)
- [2] R. Aristegui et al., Phys.Rev. B **106**, 035429 (2022)
- [3] R. Aristegui et al., Phys.Rev. B **108**, 125421 (2023)
- [4] B. Damilano et al., J. Appl. Phys. **135**, 095702 (2024)

Posters :
Technologies et Capteurs Quantiques

METAMATERIAL BASED QUANTUM WELL INFRARED PHOTODETECTORS WITH 1.5 A/W RESPONSIVITY AT ROOM TEMPERATURE IN THE LONG WAVE INFRARED

Jihye Baik¹, Thomas Bonazzi¹, Zixin Li¹, Isabelle Sagnes², Gregoire Beaudoin², Konstantinos Pantzas², Djamal Gacemi¹, Angela Vasanelli¹, Carlo Sirtori¹

¹ *Laboratoire de physique de l'Ecole Normale Supérieure, ENS, Université PSL, CNRS, Sorbonne Université, Université Paris Cité, 75005 Paris, France*

² *Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies (C2N), CNRS—Université Paris-Sud/Paris-Saclay, Palaiseau 91120, France*

* E-mail: jihye.baik@ens.fr

ABSTRACT

Quantum well infrared photodetectors (QWIPs) are unipolar devices exploiting photoexcited electrons in quantum-confined 2D electronic states. In this work, we report a QWIP operating at room temperature at 9.6 μm wavelength. The absorbing region is based on doped InGaAs quantum wells, lattice-matched on InP, separated by quaternary $(\text{InGaAs})_x(\text{InAlAs})_{1-x}$ barriers. The absorbing region is inserted into a metamaterial photonic structure. Thanks to the strong electromagnetic confinement induced by the metamaterial structure, we achieved high responsivity of 1.5 A/W at room temperature.

1. INTRODUCTION

The request for high responsivity and fast infrared photodetectors operating in the long wave infrared has gained momentum for various applications: high-speed free-space communications [1,2], LiDAR systems [3], and even IR imaging for astronomy [4].

Unipolar quantum devices based on intraband transitions in quantum wells are characterized by a fast response due to the very short lifetime of excited carriers, in the order of a few picoseconds. This property results in the demonstration of QWIPs exceeding 100 GHz [5] bandwidth. In addition, QWIPs show high optical saturation power (10^7 W/cm^2) [6], making them ideal receivers in coherent detection set-ups.

It has been recently demonstrated [7] that the performances of QWIPs can be highly improved by embedding the absorbing quantum wells into antenna coupled metallic resonators. Such metamaterial arrays increase the confinement of the light via the cavity effect. Moreover, thanks to the antenna effect, they reduce the electrical area that generates dark current, while maintaining the optical area that absorbs the light. Furthermore, they operate for normal incidence optical beams.

In this work, we present a metamaterial-based QWIP with peak responsivity of 1.5 A/W at 9.6 μm wavelength, based on InP material system, operating at room temperature.

2. DESCRIPTION OF THE DEVICE

The heterostructure has been grown by Metal Organic Chemical Vapor Deposition on an InP substrate. It consists of 13 periods of doped InGaAs quantum wells (8 nm thickness), separated by GaInAlAs barriers, lattice matched on InP. The composition of the quaternary material was chosen to be $(\text{InGaAs})_{0.5}(\text{InAlAs})_{0.5}$, in order to position the excited electronic state close to the barrier level. This facilitates the extraction of photoexcited carriers. The transition energy between the two confined states of the doped quantum well corresponds to 130 meV ($= 9.6 \mu\text{m}$).

We embedded this absorbing region into a metal(Au)-semiconductor-metal(Au) structure which defines optical cavity in the format of a stripe array, shown in Fig. 1. The stripe width s determines the cavity resonance, which is chosen to be close to the electronic transition energy for maximizing the absorbance of the structure. The period of the array, p , has an impact on the coupling with free space radiation.

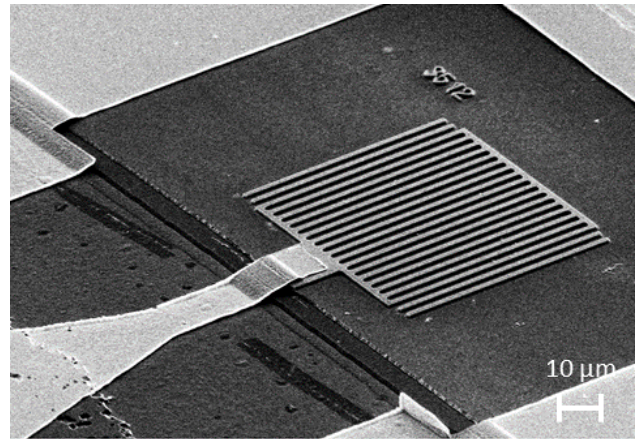


Figure 1: SEM image of the metamaterial QWIP. The stripes array is connected to a coplanar waveguide through an air-bridge.

After growing the heterostructure on InP substrate, we deposit gold on top and bond the wafer on a GaAs substrate through gold. After flipping it, we remove InP substrate, then we have the bottom Au layer. We pattern

the top metal layer with stripes and perform ICP etching. After etching the heterostructure, we connect the contact pad to a coplanar waveguide through an air-bridge which allows us to have high bandwidth, up to few GHz.

3. RESULTS

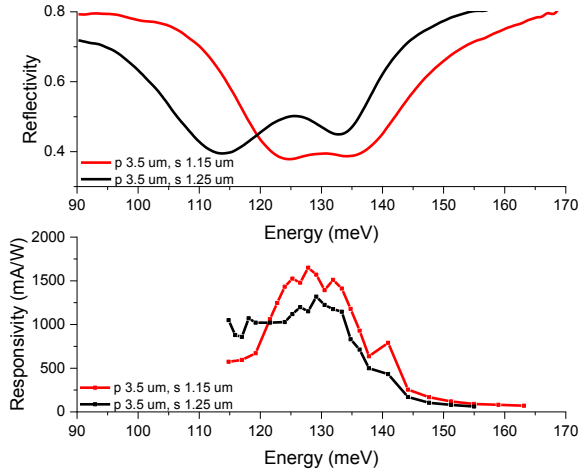


Figure 2 : Room temperature reflectivity (top panel) and responsivity (bottom panel) of QWIPs with different stripe size, s , and fixed periodicity, $p=3.5 \mu\text{m}$.

The devices were characterized by performing reflectivity experiments in a set-up with a Cassegrain microscope objective coupled to a Fourier Transform Infrared Spectrometer and a commercial Mercury Cadmium Telluride detector. The top panel of Fig. 2 shows the measured reflectivity spectra for two devices with different stripe size $s = 1.15 \mu\text{m}$ and $1.25 \mu\text{m}$, and same period $p = 3.5 \mu\text{m}$. There are two interesting points we can observe from reflectivity spectra. Firstly, as the cavity mode approaches to the electronic transition energy, stronger absorption is observed, indicating fine tunability of the absorption. Secondly, peak splitting is evident, indicating the strong coupling between the confined electromagnetic mode in the cavity and the matter excitation. The coupling generates new eigenstates of the system, cavity polaritons, which are hybrid light-matter quasiparticles.

Responsivity measurements have been performed at room temperature by using a tunable quantum cascade laser (MIRcat-QT Mid-IR Laser, DRS Daylight Solutions), operating between $7.4 \mu\text{m}$ and $11.5 \mu\text{m}$. The beam power impinging on the detector is 14 mW . The bottom panel of Fig. 2 presents the responsivity spectra measured for the same devices studied in reflectivity, under an applied bias of 1.2 V . Responsivity spectra show the same shape as observed in reflectivity, highlighting the important role played by the light-matter coupling in the device. Both devices show high peak responsivity exceeding 1 A/W at room temperature. With stripe size $1.15 \mu\text{m}$, the cavity mode is better aligned with the electronic transition and it shows higher responsivity.

4. CONCLUSIONS

We demonstrated a $9 \mu\text{m}$ QWIP on InP, with quaternary barriers, inserted into an array of metamaterial resonators. The room temperature responsivity of our device is at least 5 times higher than that obtained on a GaAs-based QWIP [7,8] at the same wavelength.

Our device could be implemented for applications that require high speed and high responsivity, such as free-space data transmission [9], heterodyne coherent detection [10] and LiDAR [11].

5. REFERENCES

- [1] R. Martini, C. Bethea, F. Capasso, C. Gmachl, R. Paiella, E. A. Whittaker, H. Y. Hwang, D. L. Sivco, J. N. Baillargeon, A. Y. Cho, *Electron. Lett.* 2002, 38, 181.
- [2] H. Dely, T. Bonazzi, O. Spitz, E. Rodriguez, D. Gacemi, Y. Todorov, K. Pantzas, G. Beaudoin, I. Sagnes, L. Li, A. Davies, E. Linfield, F. Grillot, A. Vasanelli, C. Sirtori, *Laser & Photonics Reviews* 2022, 16, 2100414.
- [3] A. Diaz, B. Thomas, P. Castillo, B. Gross, F. Moshary, *Appl. Phys. B* 2016, 122, 121.
- [4] P. Krötz, D. Stupar, J. Krieg, G. Sonnabend, M. Sornig, F. Giorgetta, E. Baumann, M. Giovannini, N. Hoyler, D. Hofstetter, R. Schieder, *Appl. Phys. B* 2008, 90, 187.
- [5] P. D. Grant, R. Dudek, M. Buchanan, and H. C. Liu, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, vol. 18, no. 21, pp. 2218–2220.
- [6] K. L. Vodopyanov, V. Chazapis, C. Phillips, B. Sung, J. Harris, *Sci. Technol* 1997, 12, 708-714.
- [7] D. Palaferri, Y. Todorov, A. Bigioli, A. Mottaghizadeh, D. Gacemi, A. Calabrese, A. Vasanelli, L. Li, A. G. Davies, E.H. Linfield, F. Kapsalidis, M. Beck, J. Faist, C. Sirtori, *Nature* 2018, 556, 85.
- [8] L. Wei-Wei, J. Xin-Yang, X. Rui, Y. Li, X. Hui, L. Ning, L. Zhi-Feng, L. Wei, and L. Tian-Xin, *Opt. Express* 2024, 32, 20669-20681.
- [9] H. Dely, M. Joharifar, L. Durupt, A. Ostrovskis, R. Schatz, T. Bonazzi, G. Maisons, D. Gacemi, L. Zhang, S. Spolitis, Y.T. Sun, V. Bobrovs, X. Yu, A. Vasanelli, O. Ozolins, X. Pang and C. Sirtori, *Nature Comm.* (to be published)
- [10] M. Saemian, L. Balzo, D. Gacemi, Y. Todorov, E. Rodriguez, O. Lopez, B. Darquié, L. Li, A. Davies, E. Linfield, A. Vasanelli, C. Sirtori, *Nanophotonics* 2024, vol. 13, no. 10, pp. 1765-1772.
- [11] L. Del Balzo et al. (in progress)

Sponsors JNMO 2024



Neyco

NEYCO, spécialiste depuis plus de 60 ans dans les domaines du Vide, des Matériaux Inorganiques et des Couches Minces, se positionne comme la passerelle "Vide et Matériaux" entre l'Industrie et la Recherche. Neyco est le spécialiste français des marchés du vide/ultra-vide et des matériaux inorganiques. Avec 70 ans d'expertise et une volonté rigoureuse d'amélioration, leur capacité de conseil et leur adaptabilité sont renforcées. Neyco, c'est avant tout une équipe d'experts à l'esprit d'initiative, centrée sur l'humain et la qualité des relations, soucieuse du bien-être et de l'épanouissement de ses collaborateurs et partenaires. Travaillant main dans la main avec l'Industrie et les laboratoires de recherche, c'est cette diversité qui leur permet d'être à la pointe des technologies haut de gamme, et de fournir des solutions "standard" ou "sur mesure" pour des produits techniques : Neyco, pont entre la Recherche et l'Industrie.

RENATECH

Renatech est le réseau académique français des équipements de pointe dans le domaine de la micro et nanotechnologie piloté par le CNRS. L'objectif de Renatech est de développer, maintenir et fournir une infrastructure propre et compétitive pour la recherche et la R&D en micro et nanofabrication en France. Renatech travaille avec des clients académiques et des industriels.

Azelis



Azelis is a leading innovation service provider in the specialty chemicals and food ingredients industry. Being a specialty distributor of chemicals and food ingredients, we're now a fully integrated and leading innovative service provider. With innovation and collaboration at our heart, we believe anything is possible. Azelis is your supplier for the highest purity metals and state of the art products for wafers, MBE, MOCVD, bonding and soldering technologies.

PEPR électronique

L'électronique est à la base des technologies et des services numériques qui sont omniprésents dans notre quotidien. On les trouve dans nos ordinateurs, nos téléphones, nos voitures, etc... De nouveaux marchés voient le jour avec la numérisation de l'industrie, les villes intelligentes, les voitures autonomes, le calcul haute performance (HPC), l'internet des objets (IoT), la défense et le spatial. Maîtriser la chaîne de valeur de l'électronique devient donc un enjeu majeur et stratégique pour l'économie et la société. C'est fort de ce constat que le gouvernement a fait de l'électronique un choix prioritaire dans sa stratégie nationale de recherche et de développement technologique et industriel. Il a notamment confié au CNRS et au CEA le pilotage du PEPR (Programmes et Equipements Prioritaires de Recherche) Électronique visant à générer des innovations pour accélérer la croissance et relocaliser certaines productions en France ou en Europe grâce à des solutions technologiques nouvelles et ce, de manière durable sur le plan économique comme sur le plan écologique.

Opton Laser International

Opton Laser International est un distributeur Français de produits de haute technologie opérant dans le domaine de la Photonique. Depuis plus de 30 ans, Opton Laser s'est imposé comme un fournisseur clé du marché de la photonique, offrant une riche sélection de produits innovants au sein d'une organisation totalement indépendante, flexible et réactive. Située en région parisienne, au cœur de « l'optics valley », Opton Laser a acquis une réputation internationale de compétence et de stabilité. Des partenariats à long terme avec des leaders du marché ont renforcé sa position sur le marché français, notamment dans les domaines des lasers, de la spectroscopie, de l'instrumentation laser, des composants optiques et opto-mécaniques et du micro-positionnement. Opton Laser propose une expérience client à 360°, de l'avant à l'après-vente.

MIPS: Pôle Mathématiques, Informatique, Physique, Systèmes (MIPS)

Le pôle MIPS constitue un lieu de mise en synergie des structures de recherche et de concertation scientifique en vue de développer des actions communes entre les membres de l'I-SITE de l'Université de Montpellier. Ce pôle est constitué à 85% des forces du département MIPS de l'Université de Montpellier, et pour 15% d'unités de recherche en lien avec des organismes de recherche avec l'Inria, Institut Agro, l'IRD, l'Inrae, le Cirad.

HEF Photonics

HEF PHOTONICS assure la réalisation de composants dédiés à l'optique photonique, sur tout le spectre de l'UV à l'IR, depuis la découpe et le polissage de substrats aux couches minces associées par dépôts PVD.



The RIBER logo consists of the word "RIBER" in a bold, white, sans-serif font, centered within a dark grey rectangular background.

RIBER

RIBER S.A. est le premier fournisseur mondial de produits d'épitaxie par faisceaux moléculaires (MBE) et de services connexes pour la recherche sur les semi-conducteurs composés et le secteur industriel. Les équipements MBE de Riber sont les outils les plus polyvalents et les plus précis pour déposer de très fines couches de matériaux sur des substrats avec un contrôle très élevé. La technologie MBE est utilisée pour concevoir et créer les structures de semi-conducteurs les plus avancées pour la fabrication d'une large gamme de nouveaux dispositifs, avec les meilleures performances. RIBER fournit des machines MBE dans le monde entier à de grandes universités, à des instituts de science des matériaux, à des fonderies de semi-conducteurs composés ou à des fournisseurs d'epiwafer. RIBER est incontestablement le leader mondial dans ce domaine. Expert dans la technologie de l'ultravide depuis sa création en 1964, RIBER s'est orienté vers l'épitaxie par faisceaux moléculaires en 1977, et a développé depuis une large gamme d'outils MBE de recherche ou de production, de composants MBE et de procédés, afin de répondre aux demandes croissantes dans différents domaines tels que les communications de données, les lasers, la 5G/6G, les VCSELs, la photonique, les capteurs, la détection 3D, les écrans,... La haute performance et la grande polyvalence des outils MBE de RIBER sont parfaitement adaptées à la créativité des chercheurs et des industriels qui travaillent chaque jour pour l'avenir et l'innovation. Notre seule limite est leur imagination.

MUSE

Labélisé en 2017 et pérennisé en 2022, le programme d'excellence I-SITE mobilise les forces de 16 institutions vers une ambition commune : le rayonnement à Montpellier d'une université thématique de recherche intensive, internationalement reconnue pour son impact sur les enjeux de société que sont la sécurité alimentaire, la protection de l'environnement, et la santé humaine. En 5 ans de période probatoire, des transformations importantes ont été enclenchées dans chacun des grands champs de la vie académique. Ces actions, jusqu'ici portées dans le cadre de la Fondation Montpellier Université d'excellence, sont désormais pleinement intégrées aux activités des directions et services de l'Université de Montpellier.

Laboratoire Charles Coulomb (L2C)

Laboratoire de Physique pluri-thématique ouvert aux interfaces, le L2C est l'Unité Mixte de Recherche (UMR) 5221 du CNRS et de l'Université Montpellier créé le 1er janvier 2011. Le L2C a l'Institut de Physique (INP) du CNRS comme Institut principal et l'Institut de Chimie (INC) comme institut secondaire. L'Unité rassemble plus d'une centaine de chercheurs en Physique, près de 50 personnels d'accompagnement et de soutien à la recherche, et environ 80 personnels non-permanents (émérites, doctorants, post-doctorants...). Le Laboratoire présente un large éventail de thématiques allant de la Physique théorique la plus mathématique à la Physico-Chimie et la Biophysique, avec un socle de recherches théoriques et expérimentales consacrées à la Matière Condensée et aux Nanosciences. Ses recherches se situent souvent aux interfaces avec la Chimie, les Sciences du Vivant et l'Électronique. Le L2C dispose d'un ensemble de techniques expérimentales de haut niveau, en particulier une plateforme de spectroscopies optiques, unique en termes de performances, dans le contexte national. Laboratoire de recherche fondamentale, le L2C est néanmoins au cœur de nombreux partenariats industriels et recherches à visées applicatives conduisant au dépôt de brevets, voire à la création de startups.





IES: Institut d'Electronique et Systèmes

L'IES a été créé le 1er janvier 2007, sa constitution résulte de la fusion de deux UMR CNRS-UM2 (le CEM2 et le LAIN) et d'une équipe associée de l'UM2 (le LEM). L'Institut d'Electronique et des Systèmes est reconnu aujourd'hui au niveau mondial pour son expertise dans 4 thématiques de recherche : Infrarouge, Fiabilité, Capteurs et TeraHertz. 220 collaborateurs travaillent à l'IES. L'institut est organisé en 3 départements de recherche et oriente sa stratégie essentiellement vers les évolutions scientifiques et techniques des composants et systèmes. Les recherches menées au sein de l'IES ont pour finalité le développement des solutions innovantes pour l'observation et l'analyse des phénomènes physiques qui nous entourent et de participer ainsi à la résolution des enjeux sociétaux actuels (énergie, eau, alimentation, santé, urbanisme, sécurité, évolution climatique, pollution, etc.)

UM: Université de Montpellier

L'Université de Montpellier est un établissement public expérimental (EPE), jouissant de la personnalité morale, de l'autonomie pédagogique, scientifique, administrative et financière. Dirigée par un président élu au sein de son Conseil d'Administration, elle est constituée d'organes de gouvernance, de composantes, de directions et de services centraux. L'Université détermine sa politique pédagogique et scientifique dans le cadre des règlements et de ses engagements contractuels. De l'exploration spatiale à la robotique en passant par l'ingénierie écologique ou les maladies chroniques, les chercheurs de l'UM inventent des solutions pour demain, au service de l'Homme et de son environnement. Une recherche dynamique, menée en étroite collaboration avec les organismes de recherche et bénéficiant de plateformes technologiques de haut niveau pour répondre aux besoins de la société du XXIème siècle. Une recherche de pointe, que l'UM s'attache à valoriser en tissant des liens étroits avec les industries implantées dans la région, notamment dans le secteur biomédical et des nouvelles technologies.

CNRS: Centre National de la Recherche Scientifique

La mission du Centre national de la recherche scientifique (CNRS) est de mobiliser toutes les sciences pour affronter les défis du monde contemporain: "Identifier, effectuer ou faire effectuer toutes les recherches présentant un intérêt pour la science ainsi que pour le progrès technologique, social et culturel du pays."

