

# GENERATION DE POLARITONS DANS DES GUIDES D'ONDES BI-DIMENSIONNELS A BASE DE MATERIAUX A LARGE BANDE INTERDITE

M. Gromovyi<sup>1,4</sup>, M. Leroux<sup>1</sup>, B. Alloing<sup>1</sup>, S. Rennesson<sup>1</sup>, C. Deparis<sup>1</sup>, F. Semond<sup>1</sup>, J. Zuniga-Perez<sup>1</sup>, G. Kreyder<sup>2</sup>, F. Réveret<sup>2</sup>, P. Disseix<sup>2</sup>, F. Médard<sup>2</sup>, J. Leymarie<sup>2</sup>,  
L. Doyennette<sup>3</sup>, C. Brimont<sup>3</sup>, T. Guillet<sup>3</sup>,  
E. Cambril<sup>4</sup>, S. Bouchoule<sup>4</sup>

<sup>1</sup> CRHEA, CNRS, UCA, Rue Bernard Gregory, 06560 Valbonne, France

<sup>2</sup> Institut Pascal, Université Clermont-Auvergne, CNRS, 63000 Clermont-Ferrand, France

<sup>3</sup> L2C, Université de Montpellier, CNRS, Montpellier, France

<sup>4</sup> C2N, CNRS, Université Paris-Sud, Université Paris-Saclay, France

[maksym.gromovyi@u-psud.fr](mailto:maksym.gromovyi@u-psud.fr)

## RÉSUMÉ

Nous démontrons la génération de polaritons propagatifs dans une géométrie de guide d'onde de T=5K à 300K. La condensation des polaritons -ou effet laser à polaritons- est obtenue dans des cavités de type Fabry-Perot en ZnO pompées optiquement. Des guides d'onde bidimensionnels en GaN sont réalisés pour atteindre un effet laser à polaritons sous injection électrique.

**MOTS-CLEFS :** *couplage fort, polaritons propagatifs, laser à polaritons à émission par la tranche, semiconducteurs à grand gap GaN, ZnO.*

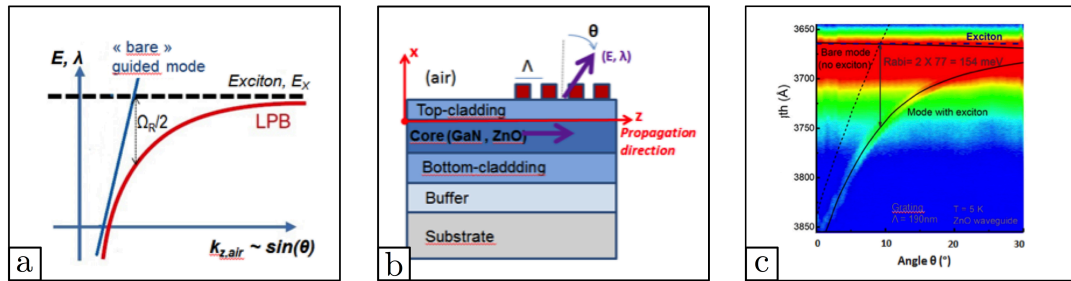
## 1. INTRODUCTION

Le laser à polaritons résulte de la condensation dans un même état quantique de polaritons, des quasi-particules bosoniques générées par le couplage fort entre un mode optique et une résonance excitonique dans un matériau semiconducteur. Le mécanisme de condensation des polaritons ne requiert pas l'inversion de population électrons-trous comme dans une diode laser « conventionnelle » mais intervient à des plus faibles concentrations d'excitons, ce qui permet une forte réduction du seuil laser [1]. Le laser à polaritons a été d'abord démontré dans des microcavités verticales semiconductrices. Ainsi, en réalisant des microcavités à base de matériaux semiconducteurs grand gap, qui présentent des excitons stables à 300K, nous avons obtenu l'effet laser en régime de couplage fort à température ambiante sous pompage optique, aussi bien en utilisant du ZnO que du GaN [2, 3]. Cependant cette approche nécessite de réaliser des microcavités verticales à fort facteur de qualité, ce qui représente une difficulté avec les matériaux semiconducteurs grand gap, en particulier en vue de l'injection électrique. Dans ce contexte, la géométrie de guide d'onde plan exploitant le couplage fort entre excitons et modes de propagation guidés a été récemment proposée [4,5].

Dans cette contribution nous présentons les premiers résultats obtenus pour des hétérostructures GaN/AlGaIn et ZnO/ZnMgO dans une géométrie de guide d'onde planaire. Après avoir démontré la génération de polaritons guidés dans ces structures [6, 7], nous présenterons la fabrication et la caractérisation de guides d'onde bidimensionnels en ZnO/ZnMgO en vue de démontrer des composants « polaritoniques » intégrés. Comme première brique de base, nous démontrons l'effet laser en régime de couplage fort dans une cavité de type « Fabry-Perot » horizontale en ZnO/ZnMgO pompée optiquement. En parallèle, nous concevons des guides d'onde et cavités Fabry-Pérot horizontales à base d'hétérostructures GaN/AlGaIn dopées pour introduire le pompage électrique.

## 2. MISE EN EVIDENCE DE LA GENERATION DE POLARITONS GUIDES

La **figure 1(a)** schématise la dispersion des polaritons dans un guide d'onde planaire. Le guide d'onde (**figure 1(b)**) est supposé monomode pour simplifier la figure. La branche polaritonique à basse énergie (LPB) –par rapport à l'énergie de l'exciton,  $E_X$ – résulte de l'anti-croisement entre l'exciton et le mode guidé « nu », c'est-à-dire, celui qui existerait sans la contribution excitonique du matériau actif. Aux faibles énergies, la courbe de dispersion du polariton guidé se rapproche de celle du mode guidé nu, tandis qu'elle présente une forte courbure à l'approche de l'énergie  $E_X$ . La force du couplage entre l'exciton et le mode guidé « nu » est caractérisée par l'éclatement de Rabi  $\Omega_R$  au point d'anti-croisement. Pour accéder expérimentalement aux courbes de dispersion nous avons réalisé à la surface du guide d'onde un réseau d'extraction du premier ordre. La période  $\Lambda$  du réseau est calculée pour permettre la collection du signal émis ( $E \leq E_X$ ) dans un cône angulaire de  $\pm 20^\circ$ , ce qui correspond à des valeurs de  $\Lambda$  variant entre  $\sim 140$  nm et  $200$  nm pour les guides d'onde ZnO/ZnMgO ou GaN/AlGaN étudiés. Les réseaux de taille  $\sim 100 \times 100 \mu\text{m}^2$  sont réalisés en  $\text{SiO}_2$  par lithographie électronique.



**Figure 1 :** (a) représentation schématique de la courbe de dispersion des polaritons guidés (X, exciton d'énergie  $E_X$  ; LPB, branche polaritonique basse). (b) : schéma en coupe de la structure guide d'onde avec le réseau d'extraction à la surface du guide. (c) : courbe de dispersion mesurée à  $T=5\text{K}$  sous pompage optique ( $P_{\text{moyenne}} \approx 0.15 \text{ W/cm}^2$ ), et courbes de dispersion théoriques (trait plein/pointillé noir)

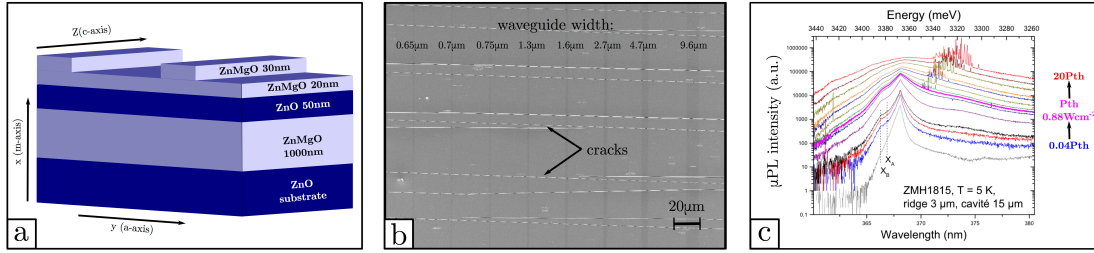
Les courbes de dispersion mesurées de  $T = 5 \text{ K}$  à  $300 \text{ K}$  sous pompage optique démontrent la génération de polaritons guidés. Le résultat obtenu pour une structure  $\text{ZnO}/\text{Zn}_{0.71}\text{Mg}_{0.29}\text{O}$  épitaxiée sur substrat ZnO avec une couche active d'épaisseur  $50 \text{ nm}$  est illustré sur la **figure 1(c)** à  $T=5 \text{ K}$ . L'éclatement de Rabi est déduit en calculant la constante de propagation du mode polaritonique, et celle du mode guidé « nu », en retranchant pour ce dernier la contribution excitonique à l'indice complexe du matériau actif.  $\Omega_R$  est proche de  $150 \text{ meV}$  à  $T=5 \text{ K}$  et varie peu avec la température ( $\Omega_R > 100 \text{ meV}$  à  $T=300 \text{ K}$ ).

L'émission en régime de couplage fort a aussi été démontrée de  $T = 5 \text{ K}$  à  $300 \text{ K}$  suivant la même méthode dans des guides d'onde bidimensionnels en GaN [8]. A cause de la plus faible force d'oscillateur, l'éclatement de Rabi diminue aussi ( $\Omega_R \leq 80 \text{ meV}$  à  $T=300\text{K}$ ). Ces résultats indiquent que les deux systèmes de matériaux sont des candidats potentiels pour la réalisation d'un « laser à polaritons » en onde guidée à température ambiante.

## 3. GENERATION DE POLARITONS DANS DES GUIDES D'ONDES BIDIMENSIONNELS EN ZNO

Le seuil de condensation de polaritons à température ambiante a été atteint récemment à partir de guides planaires unidimensionnels en ZnO sous pompage optique pulsé [6]. Pour réaliser des composants polaritoniques compacts et minimiser le seuil du laser à polaritons, des guides d'onde bidimensionnels (2D) de type « shallow ridge » ont été fabriqués comme illustré sur la **figure 2(a-b)**. Les guides sont orientés perpendiculairement au réseau de fissures générées en cours d'épitaxie par la contrainte induite par les couches de confinement épaisses en ZnMgO, qui forment des cavités Fabry-Pérot (F-P) « naturelles » de longueur  $L_{\text{cav}} \approx 4\mu\text{m} - 40 \mu\text{m}$  [6]. L'effet laser a été obtenu sous pompage optique pulsé pour des largeurs de guides variant entre  $\sim 0.6\mu\text{m}$  et  $10 \mu\text{m}$ , comme illustré sur le **fig. 2(c)**. La puissance moyenne de pompe mesurée au seuil laser ( $P_{\text{moyenne}} < 1 \text{ W.cm}^2$ ) est plus faible que dans le cas des guides bidimensionnels, cependant le seuil tend à

augmenter pour les guides monomodes  $TE_{0,0}$  ( $w < 0.7 \mu\text{m}$ ) probablement à cause des rugosités de bords de guide.



**Figure 2 :** (a) schéma en coupe du guide « shallow ridge » réalisé par gravure (b) : vue de dessus au microscope électronique. (c) : spectre de l'émission d'une cavité F-P ( $L_{\text{cav}} = 15 \mu\text{m}$ ) collectée au-dessus d'une fissure sous pompage optique pulsé, pour un ridge de largeur  $w=3 \mu\text{m}$ . Le seuil laser est atteint pour une puissance moyenne  $P \sim 0.88 \text{ W/cm}^2$ .

#### 4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES POUR LA REDUCTION DU SEUIL ET L'INJECTION ELECTRIQUE DE POLARITONS

Nous avons démontré l'effet laser en régime de couplage fort dans des guides d'ondes 2D en ZnO. Les premiers laser ont été testés à basse température mais devraient pouvoir fonctionner à la température ambiante étant donné l'éclatement de Rabi obtenu pour ce type de structures.

La réduction du seuil laser passe par un meilleur contrôle de la longueur de la cavité F-P et de la réflectivité des facettes. Dans ce but des cavités F-P horizontales à faces gravées ont été fabriquées à partir d'hétérostructures ZnO/ZnMgO non fissurées et sont en cours de caractérisation optique.

De plus la réalisation de composants « polaritoniques » intégrés nécessite une injection électrique des excitons, ce qui est possible dans des hétérostructures GaN/AlGaN dopées. La fabrication de guides « shallow ridge » de taille micrométrique injectés électriquement et présentant des faces gravées est en cours à partir de telles hétérostructures.

#### REMERCIEMENTS

Ce travail est réalisé dans le cadre du projet ANR “Plug and Bose” (ANR-16-CE24-0021). Le C2N est membre du réseau RENATECH (CNRS) des centrales de micro-nanotechnologies.

#### REFERENCES

- [1] D. Bajoni et al. “Photon lasing in GaAs microcavity: Similarities with a polariton condensate”, Phys. Rev. B 76, 201305, 2007.
- [2] F. Li et al. “From excitonic to photonic polariton condensate in a ZnO-based microcavity”, Phys. Rev. Lett. 110, 196406, 2013.
- [3] J. Zuniga-Perez et al. Appl. Phys. Lett. 104, 241113, 2014.
- [4] P. M. Walker et al. “Ultra-low-power hybrid light-matter solitons”, Nat. Commun. 6, 8317, 2015.
- [5] D. Solnyshkov et al. “Optical amplifier based on guided polaritons in GaN and ZnO”, Appl. Phys. Lett. 105, 231102, 2014.
- [6] O. Jamadi et al. “Edge-emitting polariton laser and amplifier based on a ZnO waveguide”, Light Sci. Appl. 7, 82, 2018.
- [7] T. Guillet et al. “Guided polaritons in a GaN planar waveguide”, ICPS 2018, Montpellier, France, 2018.
- [8] L. Doyennette et al., “Modeling the dispersion of waveguide polaritons in GaN”, ICNS 2019, Seattle, USA, 2019.