

Ecole Doctorale des Sciences Fondamentales

SUJET DE THESE

Titre de la thèse : Gain et non-linéarités optiques dans des guides d'onde à base de GaN

Directeur de thèse : DISSEIX Pierre
Unité de rattachement : Institut Pascal, axe PHOTON
Equipe : Spectroscopie Optique des Solides
Etablissement de rattachement : UCA
Courriel et téléphone : pierre.disseix@uca.fr
Co-encadrant : François Médard MCF non HDR
Unité de rattachement : Institut Pascal, axe PHOTON
Etablissement de rattachement : UCA

Au sein d'un consortium national de laboratoires de recherche et dans le cadre de projets successifs labellisés par l'ANR, l'équipe Spectroscopie Optique des Solides (OSS) a développé une expertise reconnue internationalement dans le domaine des propriétés optiques des exciton-polaritons. Ces quasi-particules bosoniques résultent du couplage fort lumière matière que l'on peut observer jusqu'à température ambiante dans les hétérostructures à base de semiconducteurs à large bande interdite tels que ZnO ou GaN. L'équipe a mis au point au fil du temps un plateau expérimental diversifié regroupant des dispositifs complémentaires. Un banc de spectroscopie continue ou quasi-continue permet l'imagerie de micro-photoluminescence résolue spatialement et angulairement. Une chaîne laser femtoseconde associée à une streak camera permet d'étudier la dynamique des exciton-polaritons à l'échelle de la picoseconde. Toutes ces expériences sont réalisables à des températures allant de 3 à 300K grâce à un cryostat à circulation fermée d'hélium.

La recherche sur les lasers est axée désormais sur la miniaturisation des composants et la réduction de la puissance consommée. Des réductions du volume de la zone de gain et du courant seuil ont notamment été rendues possibles par l'avènement des VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser). Cependant leur architecture complexe et leur émission verticale rendent difficile leur intégration dans un circuit photonique. Une approche alternative consiste à utiliser les guides d'onde polaritoniques avec deux avantages principaux : (i) une réduction encore plus importante des dimensions car la taille de la zone de gain est décorrélée de la longueur de cavité et (ii) une simplicité de la structure qui notamment ne nécessite pas de miroirs de Bragg multicouches et se prête bien à l'injection électrique.

Dans ce contexte local et international, le sujet de thèse proposé porte sur l'étude par spectroscopie optique des propriétés physiques de guides d'onde polaritoniques à base de nitrure de gallium (GaN) en vue de la réalisation d'un laser injecté électriquement. Les structures étudiées seront élaborées au sein d'un consortium de quatre laboratoires regroupés dans le cadre du projet ANR NEWAVE qui vient de débiter en janvier 2022 pour une durée de 4 ans. Parmi ces structures, certaines seront élaborées pour une injection optique des polaritons et d'autres seront conçues pour supporter l'injection électrique de porteurs de charges.

Dans un premier temps, la dispersion des modes polaritoniques guidés sera mesurée expérimentalement grâce à un montage de spectroscopie en champ lointain et à la présence de réseaux d'extraction déposés sur la couche supérieure du guide. Une modélisation de cette dispersion sera obtenue par la résolution numérique des équations des modes guidés et viendra appuyer les résultats expérimentaux. Il sera alors important d'étudier et d'analyser l'évolution de la courbe de dispersion du mode polaritonique en fonction de l'intensité d'excitation en partant d'une faible excitation et en allant au delà du seuil laser.

Ecole Doctorale des Sciences Fondamentales

La seconde étape consistera à déterminer la densité de particules injectées en fonction de l'intensité d'excitation. Il s'agira là de combiner les résultats de micro-photoluminescence en fonction de l'intensité d'excitation optique avec des résultats de photoluminescence résolue en temps (TRPL) donnant accès au temps de vie des porteurs. Ces mesures complémentaires permettront notamment d'obtenir la densité de porteurs au seuil laser qui pourra être comparée avec les valeurs de la littérature pour des structures commerciales de type VCSEL.

La combinaison de l'ensemble de ces résultats permettra la détermination de la nature du gain (basé sur les polaritons, les excitons, le plasma électrons-trous, les paires de Cooper...) dans ces guides d'onde en fonction de la température et de la densité de porteurs. Cette information sera très utile à la communauté scientifique pour l'élaboration de lasers à base de nitrures avec les seuils les plus faibles. Une modélisation de la réponse diélectrique non linéaire du matériau sous forte excitation sera développée afin de conforter l'analyse des résultats expérimentaux.

Un dernier volet du travail de thèse consistera à mettre en œuvre des expériences de TRPL avancées afin de mieux comprendre les phénomènes de relaxation stimulée des polaritons le long de la courbe de dispersion du mode guidé. Sur des guides avec réseaux d'extraction, il s'agira d'imager le plan de Fourier sur l'entrée de la caméra à balayage de fente (streak camera) afin de mesurer pour chaque vecteur d'onde du mode le temps de déclin des polaritons. Cette étude approfondie de la dynamique temporelle de la relaxation des polaritons et du réservoir excitonique, permettra de déterminer quantitativement les processus de stimulation au seuil. Ces mesures seront réalisées en fonction de la température et de la densité de porteurs afin de pouvoir décrire le mécanisme de stimulation (basé sur les polaritons ou les photons) et quantifier l'écrantage du potentiel Coulombien induit par l'augmentation de la densité de porteurs aux fortes excitations.

Pour résumer, l'objectif principal de ce travail de thèse est une compréhension approfondie des mécanismes de gain optique dans les guides polaritoniques à base de GaN en fonction des conditions (température et densité de porteurs). La majorité des expériences seront effectuées sous injection optique mais le travail doit déboucher sur l'injection électrique des porteurs dans des structures à un fort potentiel applicatif - diode PIN incluant un guide polaritonique - afin de démontrer l'effet laser par électroluminescence.

Le ou la candidat(e) devra démontrer de solides connaissances en physique du solide, en électromagnétisme et en spectroscopie optique. Il ou elle sera amené(e) au cours de son travail de thèse à devenir autonome sur le plateau de spectroscopies continue et résolue en temps pour effectuer des campagnes de mesures suivies de périodes de dépouillement et d'analyses des données expérimentales. Elle ou il devra donc faire preuve d'autonomie, d'initiative et de sens physique pour orienter ses expériences en fonction des résultats obtenus.

Ce sujet de recherche s'inscrit dans le cadre du projet ANR NEWAVE (2022-2025) et du LabeX national GaNeXT.

Références importantes sur le sujet :

- *Brimont C. et al – Strong Coupling of Exciton-Polaritons in a bulk GaN Planar Waveguide – Phys. Rev. Applied 14 - 054060 (2020)*
- *Di Paola DM. et al – Ultrafast-nonlinear ultraviolet pulse modulation in an AlInGaN polariton waveguide operating up to room temperature – Nature Communication 12 – 3504 (2021)*
- *H. Souissi et al – Ridge polariton laser: different from a semiconductor edge-emitting laser – arXiv:2201.04348 (2022)*
- *O. Jamadi et al, Edge-Emitting Polariton Laser and Amplifier Based on a ZnO Waveguide – Light Sci. Appl. 7, 82 (2018).*