

- Axe de GANEX : 7 (transverse Matériaux) et lien avec les axes 2, 6 (Photovoltaïque)
- Titre du sujet : **BN pour l'intégration de composants opto/électroniques**
- Nom et e-mail du porteur du projet : **A. Ougazzaden**
- Nature du post doc (*effacer les mentions inutiles*)
 - académique : laboratoire bénéficiaire : **UMI GT CNRS**
- Date souhaitée de démarrage : début Mai 2016
- Durée : demandé **18 mois**, accordé **12 mois**
- Lien avec un projet ANR ou H2020:
- Lien avec un autre partenaire de GANEX : **LPN, Institut Pascal**
- Sujet développé : (*jusqu'au bas de page, police 11-12*)

L'objectif du projet post-doctoral est d'optimiser et d'exploiter l'épitaxie MOCVD du nitrure de bore en couches minces pour la réalisation de composants opto/électroniques. En effet ce nouveau matériau pourrait permettre de dépasser certaines limitations actuelles pour la réalisation de dispositifs à base de semiconducteurs nitrures. Deux enjeux importants sont notamment : l'intégration hétérogène sur substrat hôte différent du substrat de croissance (LED, cellules PV) et la réalisation de réflecteurs de Bragg semiconducteurs dans l'UV de bonne qualité optique présentant un saut d'indice élevé.

Dans ce contexte, le travail post-doctoral s'intéressera à l'optimisation des couches BN épitaxiées par MOCVD pour :

- l'épitaxie d'hétérostructures nitrures sur couches sacrificielles ultraminces de h-BN, pour le report par « exfoliation » des structures sur substrat hôte.
- l'utilisation de BN en super-réseau BN/AlGaN pour la réalisation de réflecteurs de Bragg semiconducteurs à fort saut d'indice.

- Couches minces h-BN pour lift-off :

Il a été montré récemment que l'épitaxie MOCVD de couches nitrures 2D de bonne qualité morphologique et structurale pouvait être effectuée sur une couche mince de h-BN préalablement épitaxiée sur le substrat de croissance (c-Al₂O₃ (0001)), et que la couche h-BN pouvait ensuite être utilisée (comme le graphite ou le graphène), pour « exfolier » mécaniquement l'hétérostructure nitrure du substrat [1]. L'exfoliation est possible grâce à la relativement faible force des liaisons van der Waals entre deux couches de h-BN. La technique a été utilisée pour réaliser une LED GaN/InGaN reportée sur substrat flexible [2], ou un transistor HEMT GaN/AlGaN reporté sur substrat de cuivre [3]. La méthode mécanique de libération du substrat de croissance est en principe rapide et peu coûteuse, la surface libérée peut présenter une très faible rugosité de surface (de l'ordre de grandeur d'une monocouche h-BN), et le substrat de croissance peut être recyclé. Cette approche paraît donc très intéressante pour l'intégration hétérogène de composants actifs en GaN/AlGaN avec d'autres matériaux ou d'autres fonctions, dans le domaine de l'optoélectronique, de l'électronique, ou des capteurs. Cependant dans les premières réalisations, la surface libérée restait modérée (~ 10mm×10 mm), la densité de dislocations dans la structure LED GaN/InGaN élevée, ~10¹⁰ cm² (du même ordre que pour l'épitaxie réalisée sur template AlN-BT/c-Al₂O₃), et enfin la relaxation de la contrainte lors de la libération du substrat de croissance, modifie les caractéristiques de l'hétérostructure.

Récemment l'UMI-GT a obtenu par épitaxie MOCVD des couches 2D h-BN 2D de bonne qualité sur substrat de saphir (0001) [4], et a confirmé par la « technique du scotch » que des couches GaN ou des hétérostructures à puits quantiques InGaN/GaN épitaxiés sur une couche mince sacrificielle de h-BN (épaisseur < 5 nm) sur substrat de saphir, pouvaient être libérées par « exfoliation » du substrat de croissance, sur de grandes surfaces (~jusqu'à 2 pouces) [5]. Partant de ces résultats, l'objectif principal du travail post-doctoral sera de poursuivre et approfondir l'étude dans le but de démontrer l'épitaxie sur couche mince sacrificielle h-BN d'hétérostructures GaN/AlN de bonne qualité optique et structurale pour la fabrication de composants opto/électroniques par report sur substrat hôte.

Le travail post-doctoral concernera principalement :

- 1/ L'épitaxie sur substrat de saphir de couches ultra-minces h-BN,
- 2/ l'épitaxie sur couche sacrificielle h-BN d'hétérostructures de type « LED » GaN/InGaN, en vue de leur intégration sur substrat transparent

3/ l'épitaxie sur couche sacrificielle h-BN d'hétérostructures à puits quantiques AlN/AlGaN pour l'émission dans le domaine UV, dans le but d'optimiser la qualité optique des structures (densité de dislocations, temps de vie des porteurs minoritaires en collaboration avec le LPN et l'Institut Pascal)

4/ l'exploration de stratégies de croissance / de report pour l'intégration ultérieure des structures sur substrat hôte, soit sur grande surface, soit de manière localisée, en partenariat avec le LPN (pour les émetteurs).

Sur les 18 mois demandés, le post-doctorant sera amené à effectuer une mission longue au LPN.

- Super-réseaux AlN/BN pour réflecteurs de Bragg à fort saut d'indice :

Les émetteurs en microcavités à base de semiconducteurs nitrures utilisent généralement des DBR en matériaux diélectriques (VCSEL hybrides), compte tenu de la difficulté à intégrer la couche active et des DBR semiconducteurs. Les matériaux diélectriques présentent pourtant des limitations bien connues : mauvaise conductivité thermique (matériaux amorphes), pertes résiduelles par absorption difficiles à éliminer totalement, rugosité ultime des interfaces dépendant de la technique de dépôt, technique d'intégration complexe (report), etc.. Différentes voies sont explorées pour aboutir à des solutions « tout-semiconducteur ». Le système de matériaux AlN/Al_xGa_{1-x}N est adapté au domaine UV ($\lambda \sim 300\text{nm}$) avec, typiquement, $x > 70\%$ pour éviter les pertes par absorption dans le gap et proche du gap. Mais le saut d'indice Δn est alors relativement faible.

L'UMI GT CNRS a proposé de remplacer AlN par le ternaire BAlN. Un faible % de B (typiquement quelques %) permet en principe d'augmenter le saut d'indice [6, 7]. De plus la contrainte en tension dans BAlN, compense partiellement la contrainte en compression dans AlGaIn. Les études de l'UMI GT CNRS ont confirmé que l'indice du matériau BAlN est bien plus faible que celui de l'AlN, cependant l'ajout de quelques % de bore dans l'AlN conduit à une croissance nanocristalline de la couche BAlN et des couches suivantes [8]. La rugosité des interfaces est inévitablement dégradée ($\sigma_{\text{rms}} > 10 \text{ nm}$), ainsi que la réflectivité du DBR. L'obtention de couches minces 2D de BN monocristallines, et d'empilement BN/AlGaIn de bonne qualité structurale par épitaxie MOCVD sur substrat de saphir, ouvre une nouvelle voie : la réalisation d'un pseudo-alliage « BAlGaIn » avec un super-réseau AlGaIn/BN. Dans la suite des étapes 1/ et 4/ ci-dessus, cette voie sera explorée pour la réalisation de DBR à fort saut d'indice.

*** Personnes impliquées :**

UMI GT CNRS : Xin Li, S. Sundaram, P. Voss, J.P. Salvestrini A. Ougazzaden

LPN : S. Bouchoule, G. Patriarche, L. Largeau, X. Lafosse

Institut Pascal : Joel Leymarie

REFERENCES :

- [1] Chung, K., Lee, C.-H., and Yi, G.-C., *Transferable GaN layers grown on ZnO-coated graphene layers for optoelectronic devices*, Science 330, 655 (2010).
- [2] Y. Kobayashi, K. Kumakura, T. Akasaka, and T. Makimoto, *Layered boron nitride as a release layer for mechanical transfer of GaN-based devices*, Nature 484, 223 (2012)
- [3] T. Makimoto *et al.*, *A Vertical InGaIn/GaN Light-Emitting Diode Fabricated on a Flexible Substrate by a Mechanical Transfer Method Using BN*, Appl. Phys. Exp. 5, 072102 (2012).
- [4] Xin Li *et al.*, *2D-layered hexagonal BN grown on sapphire by MOVPE*, soumis à Appl. Phys. Lett (Décembre 2015).
- [5] T. Ayari *et al.*, *Wafer-scale controlled exfoliation of MOVPE grown InGaIn/GaN MQW structures using low-tack 2D layered h-BN*, Soumis à Appl. Phys. Lett (Janvier 2016).
- [6] M. Abid *et al.*, *“Blue-violet boron-based Distributed Bragg Reflectors for VCSEL application,”* Journal of Crystal Growth 315, 283 (2011).
- [7] M. Abid *et al.*, *“Distributed Bragg reflectors based on diluted boron-based BAlN alloys for deep ultraviolet optoelectronic applications,”* Applied Physics Letters 100, 051101 (2012).
- [8] X. Li *et al.*, *“BAlN thin layers for deep UV applications”*, Phys. Status Solidi A-Appl. Mat. 212, 745 (2015).