

Sujet de thèse
École doctorale EEA de Lyon

Merci de compléter l'ensemble des rubriques et de lire les notes de bas de page.

Etablissement d'inscription : INSA Lyon ¹
École doctorale : ED 160 EEA de Lyon dirigée par Mr Delachartre Philippe
Intitulé du doctorat : Electronique, Micro et Nano-électronique, Optique et Laser ²
Sujet de la thèse : Caractérisation multi-physique de composants GaN verticaux
Unité de recherche : Ampère ³ , dirigée par Christian Vollaire
Directeur/trice de thèse : Mr PLANSON Dominique
Co-directeur/trice de thèse (le cas échéant)⁴ : Mr Machon Denis
Co-directeur/trice de thèse en entreprise (le cas échéant) :

¹ A impérativement choisir dans la liste suivante : Ecole Centrale de Lyon, INSA de Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1

² A impérativement choisir dans la liste suivante : Automatique // Electronique, Micro et Nano-électronique, Optique et Laser // Génie Electrique // Ingénierie pour le vivant Traitement du signal et de l'Image)

³ A impérativement choisir dans la liste suivante : Laboratoire Ampère, CITI, CREATIS, INL, LAGEP, LGEF

⁴ Un/une co-encadrant-e n'est pas nécessairement co-directeur/trice de thèse puisque pour remplir ce rôle, il est nécessaire d'être habilité à diriger des recherches (pour plus de précision, voir le règlement intérieur de l'ED EEA, section 3.

Collaboration(s)/partenariat(s) extérieur(s) éventuels⁵ :

LN2 Sherbrooke contrat fléché UMI

Domaine et contexte scientifiques :

La production et la gestion durable de l'énergie sont des enjeux sociétaux de prime importance. Aujourd'hui, le développement des énergies renouvelables (éolienne, photovoltaïque...) ou encore le déploiement des véhicules électriques favorisent une distribution en courant continu de l'énergie, d'où la demande croissante pour des convertisseurs haute tension (HV) et/ou haute température. Dans le contexte du transport de l'électricité sous la forme d'un courant continu, la montée en tension des composants actifs est primordiale afin de diminuer le nombre de composants et par conséquent de limiter les pertes. Les semi-conducteurs à grands gaps, notamment les nitrures de gallium (GaN), présentent l'intérêt de résister à la fois à de très hautes tensions, de très hautes températures et peut opérer relativement en haute fréquences. Des composants électroniques GaN sont donc très intéressants pour des applications en électronique de puissance et, en particulier, pour la réalisation de convertisseurs HV pouvant fonctionner jusqu'à plusieurs dizaines de kV.

Mots-clefs : GaN, composants de puissance verticaux, spectroscopie micro-Raman, OBIC, caractérisation physique

Objectifs de la thèse :

Alors que les carbures de silicium présentent l'intérêt de pouvoir atteindre de très haute tension (diode de 3,3kV déjà commercialisée), ils présentent aussi une mobilité électronique faible par rapport au GaN, induisant des pertes relativement importantes lors des commutations. La technologie GaN HEMT (Horizontally-configured High Electron Mobility Transistors) actuelle permet d'atteindre des tensions maximales de 650V mais avec des pertes en commutation plus faibles et avec une vitesse de commutation plus rapide que pour le SiC. Cependant, cette architecture horizontale présente certaines limitations dues, en particulier, à l'utilisation d'un substrat porteur autre que le GaN. En effet dans le cas des HEMT, les capacités électriques et thermiques du matériaux GaN sont limitées par la croissance des couches de GaN sur substrat « étranger » (en silicium par exemple) moyennant une couche tampon. La mauvaise qualité cristalline de cette dernière a un impact majeur sur les caractéristiques électriques et thermiques du composant. Ces limitations peuvent cependant être réduites en utilisant un substrat GaN et une croissance homoépitaxiale de GaN sur substrat GaN afin de réaliser des composants GaN de type verticaux.

⁵ Hors contrats doctoraux fléchés UMI par l'établissement, les sujets de thèse en cotutelle ne sont pas acceptés.

L'objectif principal de cette thèse comprend deux grandes parties 1) développer des méthodes de caractérisation des composants GaN verticaux par couplage de méthodes de caractérisation physique : micro-Raman, photoluminescence (PL) et micro-OBIC (Optical Induced Current). 2) trouver un lien entre les caractéristiques électriques du transistor et les caractéristiques physiques des couches en utilisant des véhicules de test qu'on intégrera dans tous nos masques de fabrication.

Un second objectif de cette thèse est de faire perdurer et de développer les collaborations entre le laboratoire Ampère (Insa de Lyon) et le LN2 (Université de Sherbrooke) concernant les composants de puissance GaN verticaux. Dans ce contexte, les deux laboratoires collaborent déjà sur plusieurs projets. En effet, ce présent projet s'appuie sur des collaborations déjà existantes (ANR C-Pi-GaN, Labex Ganext, projet ANR ELEGANT, Pack ambition région OptiGaN, séjour de deux ans d'Hassan Maher en tant que professeur invité au laboratoire Ampère...) au sein desquels les deux laboratoires sont déjà impliqués autour du développement de composants GaN verticaux. Le Pack ambition région OptiGaN permettra de financer les frais de déplacement entre le laboratoire Ampère et le LN2.

Verrous scientifiques :

La technologie de composants GaN verticaux n'est pas encore mature au niveau européen mais des projets français ont émergé ces dernières années. Des substrats GaN sont proposés en France par la société Saint Gobain Lumilog qui collaborent avec le laboratoire Ampère et le LN2. Des composants GaN verticaux peuvent théoriquement prétendre opérer à des tensions supérieures au kV mais des verrous technologiques comme, par exemple, l'effondrement du courant (current collapse) ou encore la compréhension des mécanismes de claquages dans le GaN sont encore à surmonter avant d'atteindre de telles tension. Afin d'optimiser de tels convertisseurs verticaux GaN, que ce soit en tenue en tension, en commutation ou encore en robustesse, une caractérisation physique de ces composants est nécessaire afin de valider chaque étape de leur fabrication puis de leur fonctionnement.

Contributions originales attendues :

L'objectif principal de cette thèse est de développer des méthodes de caractérisation des composants GaN verticaux par couplage micro-Raman, photoluminescence (PL) et micro-OBIC (Optical Beam Induced Current). Des caractérisations électriques bien spécifiques seront développées dans le cadre de cette thèse pour évaluer la qualité les différentes

couches épitaxiales du transistor. Ces différentes méthodes de caractérisations permettront, entre autres, de caractériser les défauts structuraux, de faire des mesures de température locale, par exemple d'échauffement pour des composants en opération, de déterminer les taux de dopages des différentes couches, de mesurer les contraintes mécaniques locales, mais aussi de déterminer le champ électrique périphérique grâce à l'OBIC et le potentiel de surface le long des flancs du transistors

A plus grande échelle, ce projet permettra de caractériser des composants GaN verticaux afin de mieux comprendre les mécanismes à l'origine des limitations électriques dans le but final de les améliorer que ce soit d'un point de vue de la tenue en tension, de l'effondrement du courant ou encore de leur robustesse. Un exemple concret serait l'utilisation de la Spectroscopie Raman afin d'identifier les défauts qui pourraient être structuraux ou électrique (de dopages, par exemple) et seraient à l'origine de l'effondrement du courant (current collapse) observé lors des caractérisations électriques des composants GaN.

Programme de recherche et démarche scientifique proposée :

Les caractérisations physiques couplées seront d'abord réalisées sur substrat GaN, sur des couches de GaN épitaxiées puis sur des composants finis sur plaquette. L'objectif final étant de réaliser ces caractérisations sur des composants en opération c'est à dire soumis à des hautes tensions. La partie réalisation design assisté par des simulations et fabrication des composants GaN verticaux sera réalisée au LN2 et la partie caractérisation physique (micro-Raman, micro-OBIC et PL) et électrique au laboratoire Ampère et au LN2.

Les deux laboratoires Ampère et LN2 collaborent déjà sur plusieurs projets concernant les composants de puissance GaN verticaux. En effet, cette thèse s'appuie sur des projets déjà existants (ANR C-Pi-GaN, Labex Ganext, projet déposé ANR ELEGANT, Pack ambition région OptiGaN) au sein desquels les deux laboratoires sont déjà impliqués autour du développement de composants GaN verticaux. Ces différentes collaborations existantes permettront par exemple de fournir différents échantillons de GaN épitaxié puis des composants verticaux afin de, par la suite, réaliser leur caractérisation par les différentes méthodes proposées.

Encadrement scientifique :

- **Description du comité d'encadrement :** [à compléter avec le rôle dans l'encadrement scientifique (en termes de compétences scientifiques, etc.) et le pourcentage d'implication du directeur de thèse ⁶ et des autres membres du comité⁷]

Nom Prénom	Labo / Equipe	Compétences scientifiques	Taux d'encadrement %
Mr PLANSON Dominique	Ampère Energie Electrique	physique des composants, semi-conducteur grand gap, OBIC, simulations TCAD, mesures électriques	15
Mme Sonnevile Camille	Energie Electrique	physique des composants, semi-conducteur grand gap, OBIC, spectroscopies PL et RAMAN	35
Mr Machon Denis	LN2	Semiconducteur, spectroscopie Raman, matériaux, caractérisation physique des matériaux	35
Mr Maher Hassan	LN2	Physique du composant, procédé de fabrication des composants, circuit III-V	15

- Le comité d'évaluation de l'HCERES ayant demandé à l'école doctorale de limiter la taille du comité d'encadrement à deux membres (directeur de thèse compris), il est impératif de ne proposer des comités d'encadrement

⁶ Le directeur de thèse doit être un HdR rattaché à l'ED EEA ou en passe de le devenir avant juin de l'année en cours ou bénéficier d'une dérogation du Conseil Scientifique lors du dépôt du sujet de thèse.

⁷ Dans le cas d'un comité d'encadrement réparti sur plusieurs établissements, la plus grande partie de l'encadrement est effectuée par des membres de l'établissement. Si l'encadrement de la thèse implique des membres hors de l'ED EEA, la part de l'encadrement des membres ED doit être très supérieure à 50%.

de taille plus importante que si cela est absolument nécessaire⁸ et **de le justifier soigneusement.**

Il s'agit d'une thèse en co-tutelle avec le LN2 et il y aura donc un directeur coté Ampère et un co-directeur coté LN2. Camille Sonnevillle et Hassan Maher seront co-encadrants.

- **Intégration au sein du (ou des) laboratoire(s)** (Département/Equipe(s) impliquée(s)) (**pourcentage du temps travail au sein de ce ou ces laboratoire(s)**) :

Laboratoire Ampère (50%), LN2 (50%)

⁸ Un certain nombre de commissions type CNU ne reconnaissent un co-encadrement qu'au-delà d'un certain pourcentage. Souvent l'encadrement est considéré comme effectif si > 30%.

Financement de la thèse : Contrat doctoral de l'établissement d'inscription

Profil du candidat recherché (prérequis) :

Le candidat recherché doit être titulaire d'un master 2 de recherche et/ou un diplôme d'ingénieur et avoir de bonnes bases en physique du solide et des semi-conducteurs. Il doit être très motivé par la recherche appliquée. Des connaissances en techniques de caractérisation spectroscopique (Raman, luminescence...) et en optique seraient un plus. Il doit être autonome, avoir un esprit critique et pouvoir travailler en équipe.

Objectifs de valorisation des travaux de recherche :

- Rédaction d'articles scientifiques dans des revues à comité de lecture et à haut facteur d'impact, comme par exemple : IEEE Electrons Device Letters, IEEE Transaction on Electron Devices, Journal of Applied Physics, Application Physics Letters...).
- Participation à des conférences et colloques internationaux et nationaux
- Implication directe dans deux projets ANR dans lesquels participent le CEA LETI et Saint-Gobain Lumilog.

Compétences qui seront développées au cours du doctorat :

Ce sujet de thèse de doctorat associe des aspects liés à caractérisations électriques et optiques des composants GaN. Une montée en compétence du candidat en optique, en physique des semi-conducteurs et en techniques de caractérisation spectroscopique et électriques des composants de puissance à grand gap est attendue à l'issue du doctorat.

Perspectives professionnelles après le doctorat :

Ces compétences lui permettront de poursuivre une carrière académique ou de travailler dans l'industrie des semi-conducteurs et plus particulièrement dans le domaine de l'électronique de puissance qui est un sujet d'actualité. Son implication dans deux projets avec deux grands industriels que sont le CEA et Saint Gobain lui ouvrira certainement des voies de recrutement pour travailler sur des thématiques qui peuvent s'inscrire dans la continuité de sa thèse.

Références bibliographiques sur le sujet de thèse :

[i] D. Shibata, R. Kajitani, M. Ogawa, K. Tanaka, S. Tamura, T. Hatsuda, M. Ishida, T. Ueda, "1.7 kV/1.0 mohm.cm² normally-off vertical GaN transistor on GaN substrate with regrown p-GaN/AlGaN/GaN semipolar gate structure," IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), pp10.1.1-10.1.4, (2016).

- [ii] T. Kitamura, S. Nakashima, N. Nakamura, K. Furuta, H. Okumura, “Raman scattering analysis of GaN with various dislocation densities”, *phys. stat. sol. (c)* 5, No. 6, 1789–1791 (2008)
- [iii] O.J. Glembocki, J.D. Caldwell, J.A. Mittereder, J.P. Calame and S.C. Binari, “Measurement of local temperatures using u-Raman of SiC and AlGaIn-GaN/SiC power and RF devices”, *Mat. Sci. Forum*, 600-603, 1111 (2009)
- [iv] H. Harima, H. Sakashita, T. Ilnoue, S-I Nakashima, “Electronic properties in doped GaN studied by Raman scattering”, *Journal of Crystal Growth*, 189-190, 672-676 (1998)
- [v] C. Röder, F. Lipski, F. Habel, G. Leibiger, M. Abendroth, C. Himcinschi, and J. Kortus, “Raman spectroscopic characterization of epitaxially grown GaN on sapphire”, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 46, 285302 (2013)
- [vi] C. Sonnevile, D. Planson, L. V. Phung, P. Bevilacqua, B. Asllani, " Interest of using a micrometer spatial resolution to study SiC semi-conductor devices by Optical Beam Induced Current (OBIC)" *Materials Science Forum*,1004, p.290 (2020)