

Sujet de thèse

École doctorale EEA de Lyon/ *ED Matériau*

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 Matériaux dirigée par Stéphane BENAYOUN
Intitulé du doctorat : [spécialité] ² Nouveau matériau pour l'énergie
Sujet de la thèse : Etude des défauts électroniques dans les technologies avancées à base de Ga ₂ O ₃ pour la conversion de puissance.
Unité de recherche : INL dirigée par Bruno Massenelli
Directeur/trice de thèse : M. Jean-Marie BLUET
Co-directeur/trice de thèse (le cas échéant) ³ : M. Georges BREMOND
Co-directeur/trice de thèse en entreprise (le cas échéant) : [civilité, nom, prénom]

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 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) éventuels⁴ :

Partenaires des Laboratoires du projet ANR GOPOWER : GEMaC, INSP, IC2N Barcelone, Espagne, Université de Swansea, UK.

Partenaire des laboratoires du projet PEPR émergent en soumission : GEMaC, INSP, IEMN, AMPERE.

ST Microelectronics TOURS pour une future collaboration sur Ga₂O₃

Domaine et contexte scientifiques :

Les composants électroniques à base de matériaux semi-conducteurs à grand gap (SiC, GaN) connaissent un essor considérable pour les applications en électronique de moyenne puissance (1 kV / 10 A) comme par exemple le secteur des automobiles hybrides/électriques. Au-delà de cette gamme de puissance, les enjeux d'une électronique permettant d'augmenter la densité de puissance et l'**efficacité de commutation/conversion** sont considérables du point de vue des **enjeux énergétiques** et de la **réduction des émissions de CO₂** avec des applications notamment dans le domaine de la distribution du courant (smart grid) et des transports (ferroviaire). Pour répondre à ces exigences de puissance, il faut se tourner vers des matériaux dits à **ultra grand gaps** (UWBG) présentant des énergies de bande interdite (>4 eV) et des champs de claquage (>10 MV.cm⁻¹) appropriés comme le diamant, l'AlGa_N ou le Ga₂O₃. Ce dernier, présente l'avantage unique de la disponibilité de substrats commerciaux de 150 mm de diamètre à coût raisonnable (3 fois moins cher que SiC). Un très fort challenge à relever pour les matériaux UWBG est le dopage. Ici encore Ga₂O₃ présente un grand intérêt étant donné que le dopage n peut être facilement réalisé sur des plages de valeurs larges [1-3]. Des dispositifs de puissance unipolaire ont été démontrés avec un fonctionnement normally-on [4-6]. La brique technologique manquante pour des dispositifs de puissance normally-off est le **dopage de type p** pour la réalisation de dispositifs bipolaires. Le développement d'une filière technologique innovante de dispositifs à base de Ga₂O₃ et le contrôle du dopage de type p nécessite **l'étude des niveaux électroniques induit par des pièges ou défauts** dans le matériau. Ces défauts peuvent aussi être induits par les procédés technologiques (implantations, gravures, contamination métalliques). C'est sur cet axe primordial au développement d'une technologie bipolaire que le sujet portera. En effet, le laboratoire INL et l'équipe « Matériaux Fonctionnels » possèdent une véritable expertise originale sur les techniques électriques et électro-optiques d'étude des niveaux électroniques induits par les pièges et les défauts dans les semi-conducteurs à grand gap.

Mots-clefs : Ga₂O₃, Dopage p, Centres profonds, Spectroscopies de défauts, Composants de puissance, conversion/commutation de puissance.

Objectifs de la thèse :

⁴ Hors contrats doctoraux fléchés UMI par l'établissement, les sujets de thèse en cotutelle ne sont pas acceptés.

L'objectif global est de caractériser les propriétés de défauts électriquement actifs dans les épitaxies de Ga₂O₃. Ces études seront menées dans un premier temps en support du laboratoire GeMaC chargé de la croissance du matériau de type p puis sur des structures verticales de type diodes pin afin d'améliorer la croissance et la technologie dans cette filière. On s'attachera plus particulièrement à **identifier l'origine des défauts** pour discerner les défauts dus à la croissance de ceux induits par les procédés technologiques. L'étude aura également pour but de **corrélés les données de spectroscopie des défauts à des dysfonctionnements éventuels des dispositifs** observés sur leurs caractéristiques électriques. La caractérisation des centres de type génération-recombinaison sera complétée par des mesures électro-optiques comme la durée de vie des porteurs minoritaires en photo-courant et l'électroluminescence sur les structures pin. Enfin les signatures des pièges (énergie d'activation section efficace de capture) déterminées pourront servir de paramètres injectables pour la modélisation des composants.

Importance du sujet dans le contexte stratégique de la recherche sur les matériaux pour l'énergie du futur

Ce sujet s'inscrit dans le cadre d'un **projet de recherche financé par l'ANR, le projet GOPOWER** regroupant le GEMAC pour la partie croissance, l'INL et l'Université de Swansea pour la technologie et l'ensemble des partenaires pour les caractérisations allant du structural aux analyses fines des défauts par DLTS (Deep Level Transient Spectroscopy), DLOS (Deep Level Optical Spectroscopy) et RPE (Résonance Paramagnétique Electronique). Ce projet fait partie de l'Axe 2.1 « Basic science for Energy ». Deux développements distincts sont nécessaires pour garantir un approvisionnement énergétique stable dans un avenir proche : la recherche de sources d'énergie durables alternatives aux énergies fossiles et l'utilisation efficace de l'énergie (transport, stockage, conversion, commutation). Une voie concrète pour réduire les pertes énergétiques lors de la conversion et la commutation est d'utiliser des composants électroniques de puissance dans une gamme allant jusqu'à la centaine de kV en inverse et la dizaine d'ampères en sens passant. Les applications sont variées et présentent un fort volume : transport en continu du courant (HVDC), distribution et conversion de l'électricité, circuits de commande pour la traction (automobile, ferroviaire), aéronautique et spatial ... D'après le cabinet de consulting Yole spécialisé en partie dans les semiconducteurs : "L'augmentation de la densité de puissance et l'optimisation de la conversion de puissance pour la réduction des émissions de CO₂ sont essentielles".

L'oxyde de gallium, grâce à ses propriétés intrinsèques et la disponibilité de substrats massifs, est envisagé comme le matériau de choix pour les dispositifs haute puissance de prochaine génération adaptés aux environnements difficiles. Le projet GOPOWER, unique en France, vise à accélérer la démonstration du potentiel exceptionnel de l'oxyde de gallium par une percée dans la technologie des matériaux de type p, permettant ainsi à la France de rester très compétitive au niveau international compte tenu des efforts de recherche considérables déployés aux États-Unis et au Japon.

Ce sujet s'inscrit donc dans la thématique matériau pour l'énergie du futur, en lien avec les thématiques prioritaires de l'INSA – De plus le matériau Ga₂O₃ est considéré comme filière potentielle émergente pour 2023 pour l'action « Programmes et équipements prioritaires de recherche » (PEPR) du quatrième programme d'investissements d'avenir (PIA4) qui vise à construire un leadership français dans des domaines scientifiques considérés comme prioritaires aux niveaux national ou européen et liés à une transformation de grande ampleur, qu'elle soit technologique, économique, sociétale, sanitaire, environnementale. Un

projet PEPR émergent pour des composants de puissance en Ga₂O₃ pour les très hautes tensions est en cours de soumission. Des contacts de collaboration avec ST Microelectronics Tours, pour un développement de filière de composants sur Ga₂O₃, ont été formalisés.

Verrous scientifiques : De nombreuses problématiques scientifiques restent à éclaircir :

- Comprendre les **mécanismes du dopage p** dans le Ga₂O₃ et les défauts associés.
- **Interpréter la caractérisation fine des défauts** (nature, structure) corrélée aux mesures de RPE à l'INSP.
- Mettre en place des techniques de caractérisation des défauts sur un matériau à très grande bande interdite (4.9 eV). En effet, la technique classique DLTS sera ici avantageusement **complétée par des techniques optiques ou électro-optiques comme l'ODLTS (DLTS optique) et la DLOS** permettant l'activation et l'observation de défauts très profonds grâce la photo-ionisation des porteurs libres. Mesures de DLTS capacitive sous fort champ inverse sur les dispositifs pin.

Contributions originales attendues :

L'obtention du **dopage p** dans le Ga₂O₃ sera une avancée majeure pour le développement de cette filière. La caractérisation de ce matériau sera un élément clé de son obtention.

La corrélation attendue entre la **caractérisation fine des défauts** et les caractéristiques électriques des composants est également un défi original dans ce projet.

L'ensemble de ces avancées sont des **briques indispensables** pour le développement d'une **filière électronique de forte puissance** à base de dispositifs **bipolaires Ga₂O₃**.

Programme de recherche et démarche scientifique proposée :

Le travail de thèse commencera par l'étude en DLTS des épitaxies de type n afin de caractériser les défauts de ce matériau puis à l'implémentation des extensions optiques (DLOS, ODLTS) nécessaires à l'étude du matériau UWBG. Cette partie sera développée en support du projet PEPR pour la réalisation de diode Schottky de puissance sur type n.

On appliquera ensuite ces techniques à l'étude du matériau de type p.

Le travail de deuxième année et début de troisième année consistera à étudier les structures pin avec comme objectif de corréler les défauts aux caractéristiques électriques (facteur idéalité par exemple) et de sérier les problèmes liés à la technologie et ceux liés au matériau. Ces résultats seront complétés par les mesures de photo-courant et d'électroluminescence spécifiques.

Encadrement scientifique :

Cette thèse s'inscrit dans le cadre du **projet de recherche GOPOWER financé par l'ANR** regroupant le GEMAC pour la partie croissance, l'INL et l'Université de Swansea pour la technologie et l'ensemble des partenaires pour toutes les caractérisations allant du structurel aux analyses fines des défauts DLTS, EPR.

▪ **Description du comité d'encadrement :**

Nom Prénom	Labo / Equipe	Compétences scientifiques	Taux d'encadrement %
------------	---------------	---------------------------	----------------------

J.M Bluet	INL Matériaux INSA	Spectroscopie électro- optique (photo-courant, electrolum, DLTS)	60%
G Brémond	INL Matériaux INSA	Spectroscopie des défauts (DLTS et dérivés optiques)	40%

Les professeurs Bluet et Brémond sont tous les deux spécialistes des techniques de caractérisation de défauts par exploration de la zone de charge d'espace (DLTS capacitive, DLOS, DLTS courant, dispersion en fréquence des conductances de sortie).

Jean-Marie Bluet a une expérience approfondie des matériaux à grand gaps (SiC, GaN) sur lesquels il travaille depuis plus de vingt ans. Il a déjà encadré des thèses sur la caractérisation des défauts dans les composants à base de semi-conducteurs à grand gap (MESFTEs SiC, HEMTs GaN).

Georges Brémond a une grande expertise de la caractérisation des défauts électriquement actifs dans les semi-conducteurs acquise au cours d'études sur différentes filières de matériaux (TBH Si, SiGe, HEMTs III-V, GaN).

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

Profil du candidat recherché (prérequis) :

Mastère avec une spécialisation en physique des matériaux semi-conducteurs.

Volonté de s'impliquer dans un projet collaboratif entre partenaires académiques.

Objectifs de valorisation des travaux de recherche :

Publications dans les revues associées au domaine c'est à dire soit des journaux généralistes de physique appliquée de type APL, soit des journaux plus spécialisés sur les composants électroniques de type IEEE TED.

Présentation des travaux à des conférences généralistes sur les semi-conducteurs et les défauts (ICPS, ICDS, EXMATEC) et spécialisées dans le domaine (IWGO).

Extraction de signatures de pièges pouvant être utilisées dans les modèles compacts de composants.

Compétences qui seront développées au cours du doctorat :

Sur le plan académique : maîtrise de la physique des composants électroniques élémentaires et de leurs caractérisations. Caractérisations électro-optiques des défauts dans les semi-conducteurs.

- Méthodologie scientifique
- Gestion d'un projet de recherche
- Collaborations extérieures ...

Perspectives professionnelles après le doctorat : Le doctorat pourra ouvrir aussi bien à la poursuite d'une activité de recherche dans le monde académique qu'à une insertion dans l'industrie. Les filières industrielles pour l'électronique de puissance (SiC, GaN) se développent en effet très rapidement au niveau industriel par exemple à ST-Tours au niveau national.

Références bibliographiques sur le sujet de thèse :

- [1] M. Orita et al., *Appl. Phys. Lett.* **77** (2000) 4166
- [2] N. Ueda et al., *Appl. Phys. Lett.* **70** (1997) 3561
- [3] E. Chikoidze, et al, *J. Appl. Phys.* **120** (2016) 025109.
- [4] J. Yang et al., *ECS J. Solid State Sci. Technol.* **7**, (2018)
- [5] S. J. Pearton, et al., *J. Appl. Phys.* **124** (2018) 220901
- [6] K. Tetzner e., *IEEE Electron Dev. Lett.* **40** (2019) 1503