

N° d'ordre: 42045

TRAVAUX SCIENTIFIQUES

présentés à

L'UNIVERSITE DE LILLE 1 - SCIENCES ET TECHNOLOGIES

pour obtenir le

Diplôme d'Habilitation à Diriger des Recherches
en Microondes et Microtechnologies

par

Ali SOLTANI

**Contribution au développement de composants et de
dispositifs électroniques à base de semiconducteurs à
large bande interdite III-N et diamant**

devant la commission d'examen prévue le 10 juin 2016

Membres du jury :

M.	D. PAVLIDIS	Rapporteur, Pr. Université de Boston, Etats-Unis
	D. BOUCHIER	Rapporteur Dr, DR IEF, France
	P. GAMAND	Rapporteur Dr. HDR, Consultant RF / Consulting PG, France
	P. FRIJLINK	Examineur, Dr. Ing. OMMIC France
	G. DAMBRINE	Président, Pr. Université de Lille - Sciences et Technologies
	A. OUGAZZADEN,	Examineur, Pr. Georgia-Tech Lorraine/Atlanta, Etats-Unis
	H. MAHER	Examineur, Pr. Université de Sherbrooke, Canada
	P. EUDELIN	Examineur, Ingénieur Thalès Air Systems, France
	J-C. DE JAEGER	Garant, Pr. Université de Lille - Sciences et Technologies

Sommaire

Remerciements	3
Préambule	4
Introduction	5
Récapitulatifs des projets acceptés et des thèses encadrés	6
Description des thèmes de recherche	11
Thème n°1 : Le transistor à haute mobilité HEMT GaN	20
Section 1 : le contact ohmique	
Section 2 : le contact de grille	
Thème n°2: Transistor diamant delta-dopé au bore	62
Thème n°3 : Diodes à effet tunnel résonnant Al(Ga)N/GaN/Al(Ga)N	70
Thème n°4 : Capteur optique : photodétecteurs X-UV à base de matériaux SC à LBI	84
Thème n°5 : Résonateur acoustique : SAW à base de AlN	105
Projets de recherche en cours et en Perspective	112
Projet n°1 : Etude du transport dans le GaN : les applications à venir	
Thème 1 : 3C-SiC/Si(111) : couche de nucléation pour Buffer GaN	
Thème 2 : Etude du transport dans le GaN sous fort champ électrique	
Thème 3 : Etude du transport dans des nanostructures quasi-1D	
Projet n°2 : Circuits MMICs à base de HEMT GaN pour des applications en électronique de puissance	
Projet n°3 : Capteurs de gaz antipollution à base de HEMT GaN et MSM B GaN/GaN	
Projet n°4 : Résonateur acoustique à base de AlN pour l'électronique de puissance	
Projet n°5 : Détecteurs à neutrons à base de ¹⁰BN	

Remerciements

L'ensemble des travaux décrit dans ce mémoire ont été menés à l'institut d'électronique, de microélectronique et de nanotechnologie (IEMN) de l'Université de Lille Sciences et Technologies et couvre la période septembre 2002 à septembre 2015.

Je tiens à remercier Monsieur Lionel Buchailot, actuel directeur du laboratoire pour m'avoir encouragé à soutenir cette habilitation.

Je tiens également à remercier Monsieur Gilles Dambrine pour avoir accepté de présider la commission d'examen de ces travaux.

Je tiens à remercier Messieurs les rapporteurs, Monsieur Dimitri Pavlidis, Professeur à l'Université de Boston (USA), Daniel Bouchier, Directeur de Recherche à l'IEF (Fr), ainsi que Monsieur Patrice Gamand, Docteur HDR à Consulting PG (ancien Directeur NXP France), d'avoir accepté de juger ce travail et d'en être les rapporteurs.

Je tiens également à remercier particulièrement Hassan Maher, professeur à l'Université de Sherbrooke pour ses qualités humaines, pour toutes les discussions scientifiques que nous avons pu échanger mais aussi pour son soutien impeccable et particulièrement dans les moments les plus difficiles. Qu'il trouve ici ma profonde gratitude et mon profond respect.

Je remercie également Monsieur Abdallah Ougazzaden d'avoir accepté de participer à ce jury, pour le plaisir que j'ai à travailler avec lui, pour ses conseils avisés et aussi pour sa disponibilité (pas toujours évidente) qu'il a pu m'accorder quelque fois.

Je veux également adresser ces remerciements à mes collègues de l'équipe « Composants et dispositifs microondes de puissance », Messieurs Nour-Eddine Bourzgui, Nicolas Defrance, Michel Rousseau pour leurs sympathie et les très nombreux échanges scientifiques et sociétaux, ainsi que ma collègue, Madame Marie LESECQ pour son franc parlé, sa sincérité et pour les échanges que nous avons pu avoir sur les procédés technologiques. J'adresse mes remerciements particulièrement à l'équipe Sylphide : François Dessenne, Jean-Luc Thobel, Laurent Baudry, pour les échanges scientifiques concernant leur code Monte Carlo que nous avons utilisés, pour leur sympathie et tout simplement en tant qu'ami.

Je remercie également mes chers amis Ali BenMoussa, Nour-Eddine Bourzgui, Kamel Haddadi, Abdelkrim TALBI, Katir Ziouche pour leurs qualités humaines et scientifiques.

J'adresse également mes sincères remerciements à tous les étudiants thésards avec lesquels j'ai eu le plaisir de travailler, en particulier Jean-Claude Gerbedoen, Brahim Benbakhti, Maghnia Mattalah, Hassan Ali Barkad, Mohammed Boucherta, Florain Michoneau, Hassanne Ouazzani, mais aussi Mohamed Boucherit, Xiao Tang, et tous les autres stagiaires de master recherche, de Licence ou de DUT que je ne peux citer ici.

Enfin, je tiens à remercier Monsieur J-C De Jaeger pour avoir supervisé avec intérêt ces travaux et pour m'avoir encouragé tout au long de ces années.

Je ne peux clore ces remerciements sans évoquer le soutien impeccable de mes proches tout au long de toutes ces années. Merci à mes enfants, ma douce Elissa et mes fils Adel et Ismael, lesquels constituent une source d'énergie qui me permet de me dépasser. Enfin, un grand merci à ma chère épouse Radia.

Préambule

Après ma nomination en tant que maître de conférences à l'Université des Sciences et de technologies de Lille en 2002, j'avais qu'une hâte, commencer une carrière dans un environnement renouvelé, un laboratoire avec des moyens techniques conséquents et des projets plein la tête. Mon arrivée a coïncidé avec un renouveau dans l'équipe d'accueil dans le sens où l'activité scientifique autour du nitrure de gallium prenait un essor extrêmement rapide. En effet, à la fin des années 90 et au tout début des années 2000, l'équipe « Composants et Dispositifs Microondes de Puissance » s'est orientée vers ce nouveau matériau et les premiers tests réalisés sur les quelques couches de GaN disponibles à l'époque ont été particulièrement encourageants. Par contre, les premiers échantillons test composés d'hétérostructures GaN nous arrivaient au compte-goutte et très peu montraient un effet transistor digne de ce nom dont on pouvait alors déjà percevoir les performances dans la littérature. C'est certain, la tâche allait être ardue et il fallait la relever. Une nouvelle vie commençait. Après une formation express en salle blanche, mon implication dans mes premiers contrats de recherche, ma participation au laboratoire commun IEMN-Thalès III-V Lab tout juste naissant, m'ont permis de confronter la recherche académique où l'on prenait son temps à la réflexion et la recherche privée où le stress est rythmé par les « deadlines » à respecter et les contraintes d'une « recette » qui marche mais qu'on ne comprend pas. Depuis mon enfance, mon père m'a donné le goût de l'étonnement, de l'observation face aux choses qui nous entourent. Ma formation de base en physique et mon goût pour l'Histoire m'ont appris à être méfiant envers les axiomes et les « certitudes » établies. De celles que l'on admet sans les avoir vérifiées ou démontrées au prétexte qu'elles sont assénées par des gens ou organismes faisant « autorité » car, au fil des avancées et des découvertes, nombre de ces choses établies se sont révélées fausses ou incomplètes. C'est ce dilemme que la recherche académique se doit de surmonter, trouver le bon compromis entre le temps de se poser pour comprendre les phénomènes observés et les nécessités d'une recherche à financer.

Introduction

La clé de la technologie moderne réside dans la maîtrise de la production de matériaux nouveaux, plus ou moins « révolutionnaires » mais permettant de repousser toujours davantage les limites des composants électroniques actuels. C'est pourquoi, j'ai réalisé mon doctorat sur l'élaboration et la caractérisation d'un matériau aux propriétés exceptionnelles de la famille des nitrures. Cette thèse m'a permis de m'introduire dans un challenge international très innovant, ainsi que de me former aux différentes techniques de conception, de réalisation technologique et de caractérisations électrique et optique des couches que j'élaborais. J'ai pu aussi, au cours de ces années, m'investir dans l'enseignement supérieur et m'impliquer dans diverses manifestations internationales. L'ensemble de ces activités m'a permis d'être nommé Maître de Conférences et de poursuivre une recherche novatrice à l'IEMN dans la technologie microélectronique des transistors d'aujourd'hui et de demain.

Ce manuscrit constitue un document de synthèse des travaux de recherche visant essentiellement au développement de composants électroniques pour la réalisation de composants et de dispositifs de fréquence de fonctionnement de quelques MégaHertz au TeraHertz mais aussi de capteurs. Ce travail s'étale sur une période d'environ treize années et a été réalisé à l'Institut d'Electronique, de Microélectronique et de Nanotechnologie. Le début de cette période correspond à ma nomination en tant qu'enseignant-chercheur, ainsi qu'à la naissance du laboratoire commun IEMN-Thalès TRT III-V Lab appelé TIGER (Thales Iemn Gallium arsenide Electronic Research). Mes activités de recherche sont en partie orientées vers les la technologie des composants et la physique des semiconducteurs ainsi que les procédés matériaux.

L'objectif est l'exploration de solutions plus ou moins originales pour la synthèse de nouveaux composants à base de matériaux semiconducteurs nitrures à large bande interdite et de diamant. Bien que le choix final d'un composant répond à de nombreux critères (paramètres électriques, fiabilité, coût...), nous nous sommes concentrés essentiellement sur les potentialités que pouvaient offrir ces « nouveaux » matériaux semiconducteurs nitrures d'éléments III à large bande interdite ainsi que le diamant.

Récapitulatif des différentes actions de recherche développées depuis la thèse

Mon activité principale a consisté depuis 2002 à développer des filières technologiques de transistors à effet de champ pour des applications en amplification de puissance hyperfréquence. L'une d'elles est de déterminer les potentialités du HEMT AlGa_N/Ga_N sur substrat de silicium en vue de développer à terme des amplificateurs de puissance hybrides ou intégrés. Les épitaxies sont réalisées par des laboratoires partenaires dans le cadre de différentes études mises en œuvre (CHREA, PICOGIGA, Thalès III-V Lab). Ces travaux ont été réalisés dans le cadre d'un projet national DGA Nitrures (2002→2005), dans le cadre du Réseau National de Recherche en Technologie (2003→2006), d'un projet européen KORRIGAN (2004→2008). Les caractéristiques étudiées ont été et sont encore, la montée en fréquence, la linéarité, les fortes puissances et la tenue en température, l'objectif étant d'améliorer, d'analyser et de maîtriser une technologie stable à haute température. L'origine physique des caractéristiques d'un transistor réside notamment dans le procédé d'élaboration, le type de contact ohmique et Schottky utilisé et les états de surface ou d'interface. Depuis 2007, cette activité s'est orientée sur des substrats à bas coût comme le Si(100) et le Si(110) au lieu du Si(111) et la détermination de performances en puissance hyperfréquence et en bruit RF. Enfin, une dernière innovation en perspective consiste à utiliser une couche de 3C-SiC en interface sur substrat Silicium (111) 8 pouces avant croissance du Ga_N et de la couche active du transistor. Ces activités ont été soutenues par trois thèses de doctorat que j'ai co-dirigées.

En 2006, j'ai initié, en partenariat avec GTL, une nouvelle filière de composants très prometteuse à base d'hétérojonctions nitrures borés de type Al(Ga,B)N/Ga_N/(Al,B)Ga_N/Ga_N. En effet, nous avons envisagé d'améliorer les propriétés de transport dans nos transistors en y incorporant à ces structures un élément nouveau : le bore. Parmi les études développées en relation avec la mise au point de substrats adaptés en paramètre de maille avec Ga_N, y figure la back-barrière B Ga_N laquelle constitue une voie originale permettant de réaliser ce challenge. L'incorporation de bore dans les binaires AlN et Ga_N permet d'éliminer le désaccord de paramètre de réseau. Ainsi, quelques monocouches de B Ga_N placées sous le canal Ga_N suffisent pour faire barrière aux dislocations traversantes et réduire d'un ordre de grandeur ce taux de dislocations en surface. Enfin, il est très probable que l'incorporation du bore dans la couche tampon Ga_N peut permettre de réduire le dopage résiduel en consommant/passivant l'oxygène résiduel présent dans la couche tampon. Ce travail réalisé en collaboration avec GeorgiaTech Lorraine entre dans le cadre du projet ANR GABORE (2008→2011) et a fait l'objet d'une partie de thèse.

Toujours pour réaliser des transistors mais avec un autre matériau encore plus remarquable que ne sont les matériaux nitrures d'éléments III, nous avons voulu explorer ce que pourrait donner le matériau diamant avec la maturité qu'on lui connaissait en 2009. En effet, le savoir faire de l'Institut Néel ainsi que du CEA-LIST dans la fabrication de substrats de diamant monocristallin synthétique et la croissance épitaxiale de couches enterrées ultra-fines delta-dopées et quasi-métallique, présageait toutes les conditions nécessaires pour la synthèse d'un transistor à effet de champ à haute mobilité. Nous avons alors développé une nouvelle technologie sur diamant, éclairci certains points conceptuels et phénomènes mis en jeu. Ce travail entre dans le cadre du projet ANR DELTADIAM (2009→2012) et a été soutenu par un post-doc.

Une autre thématique de recherche consiste à réaliser des nano-composants quantiques dans la filière des matériaux semiconducteurs AlN/Ga_N afin d'en étudier le comportement électrique. Nous avons entrepris de réaliser des Diodes à Effet Tunnel Résonant (DETR) à partir d'hétérostructures élaborées soit au CHREA, soit au CEA. L'originalité de cette étude est de diminuer autant que possible la taille de ces objets pour en faire des nanocomposants sur substrat Silicium « insensibles » aux défauts structuraux. Ce projet avait pour ambition de développer une nouvelle thématique qui vise à

contrôler à l'échelle nanométrique la croissance cristalline au-delà de ce qui peut être fait dans les systèmes auto-organisés et être compatible avec la filière HEMT GaN. Ce travail a débuté en novembre 2006 dans le cadre de l'ANR TRANSNIT et a été soutenu par une thèse de doctorat qui a débuté en octobre 2007. Le projet s'est terminé en janvier 2012 avec des résultats à l'état de l'art.

En partenariat avec l'Observatoire Royal de Belgique, j'ai développé une nouvelle thématique de recherche sur les photodétecteurs X-UV. Actuellement, des efforts remarquables ont été faits pour produire de nouveaux semi-conducteurs pour des applications spécifiques. Parmi eux, il y a d'une part le diamant qui est un candidat exceptionnel pour ses propriétés physiques et chimiques du point de vue de la recherche fondamentale et des applications technologiques et d'autre part, similaires à ce matériau, de nouveaux semiconducteurs de types nitrures à très grand gap qui ont été élaborés avec succès et permettent d'entrevoir des applications extrêmement innovantes. Ces photodétecteurs MSM (Métal-SC-Métal) et PiN ont été réalisés au laboratoire IEMN sur ces nouveaux matériaux. Ce travail entre dans le cadre de deux projets européens LYRA (2003→2007) et BOLD (2007→2011).

J'ai initié puis développé une nouvelle filière de capteurs à base de matériaux à large bande interdite laquelle est destinée pour 2 applications phares :

→ Les composants à ondes acoustiques de surface (SAW) à base de matériaux à LBI (AlN, diamant) pour la réalisation de capteurs et de filtres HF pouvant supporter de forte puissance. Cette activité s'inscrit dans le cadre du projet ANR HiPPoP dont l'objectif était d'élaborer des films minces de nitrure d'aluminium, de caractériser et d'optimiser ce matériau pour en faire des capteurs à ondes acoustiques de surface (Ondes de Lamb). Ces films ont été couplés à des films minces de diamant (ultra-) nanocristallin pour améliorer la robustesse de la structure et les performances des composants réalisés.

-Par ailleurs, ces films minces d'AlN ont également été utilisé comme couche tampon dans des hétérostructures à transistor HEMT GaN, comme couche de passivation ou encore comme radiateur pour ces mêmes applications.

→ Les transistors HEMTs GaN dont la grille est fonctionnalisée pour être la plus sensible possible aux gaz d'échappement des véhicules automobiles. Le capteur est fixé à la sortie du filtre à particules et est capable de détecter avec une très grande sensibilité les gaz NO_x , NO_2 et NO . Ce projet a donné lieu à l'ANR CLEANING en étroite collaboration avec le groupe recherche et développement de PSA et de GTL. Ce projet ANR a débuté en novembre 2015.

Les collaborations avec des partenaires académiques et industriels ont vu le jour tout au long de ces années au travers de nombreux contrats à la fois dans les domaines civils et militaires. La liste des différents contrats auxquels j'ai participé est donnée chronologiquement :

La Figure 1 résume les différents projets où j'ai été et où je suis impliqué tout au long des 14 dernières années. Les activités relatives aux transistors/diodes (sur III-N & diamant) sont séparées par des pointillés des activités capteurs (Phodétecteurs nitrures III-N & diamant, et matériau AlN). En gras (hachuré), les projets européens. Leur description est donnée comme suit :

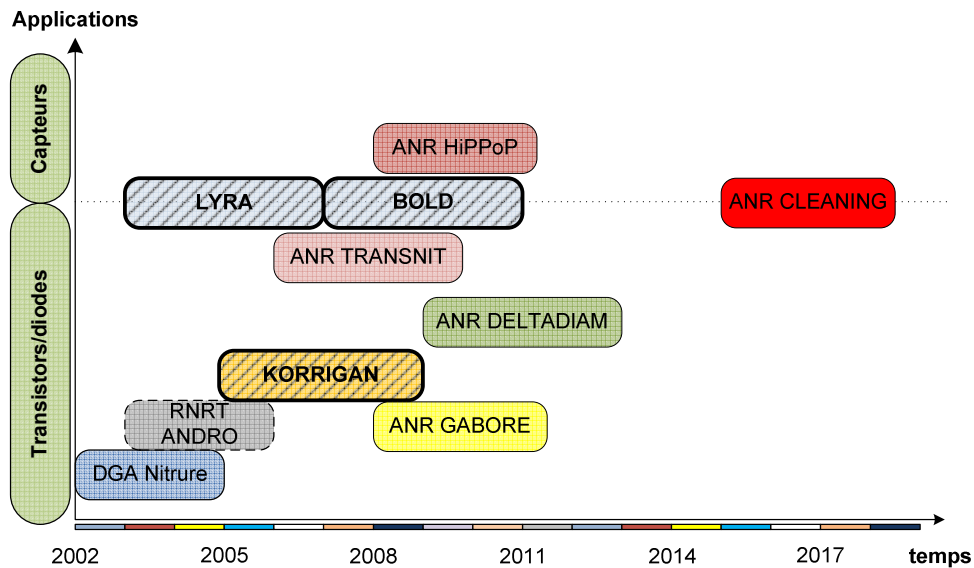


Figure 1 : Récapitulatif des projets auxquels j'ai contribué soit en tant que membre actif, soit en tant que responsable scientifique. Les thématiques de recherche traitées concernent les transistors/diodes et les capteurs.

Contrat DGA Nitrure

Le thème était « Amplificateurs HEMT AlGa_N/Ga_N de forte puissance hyperfréquence ». Cette action a été soutenue par la DGA (Contrat n° 01.34.050). Le projet a démarré en 2002 et s'est terminé en 2005. Pour les amplificateurs, les performances visées étaient 20W en bande X, 100W en bande S et 5 W dans la bande 6-18 GHz. Les partenaires étaient UMS, FBH, DAIMLER, CRHEA, EADS, TRT et le LETI (cf. Thème 1).

Contrat RNRT ANDRO (gAN Dispositif pour préamplificateurs et Oscillateurs)

Ce contrat a démarré en 2003 et s'est terminé en 2006. Les partenaires étaient PICOGIGA, TRT, ALCATEL SPACE, LAAS, CRHEA et CNRS Meudon. Le sujet était « Application des composants HEMT à base de nitrure de gallium pour des applications faible bruit pour les télécommunications » (cf. Thème 1).

Mon activité dans le cadre de les deux contrats cité précédemment a été d'optimiser des étapes technologique du procédé de fabrication des transistors et de les caractériser.

Action exploratoire QPlus

Le thème de recherche concerne la réactivité et la dynamique en surface et interfaces de HEMTs AlGa_N/Ga_N. Ce projet soumis à la DGA en 2003, proposait l'utilisation de la technologie des ions lents multichargés pour la préparation de surface de HEMTs Ga_N. Cette technologie a été breveté par une start-up QPlus pour le contrôle des états de surface d'un semiconducteur et/ou pour fabriquer des couches d'oxyde à la monocouche atomique près. Cette étude, prélude à d'autres travaux, a permis d'observer le transport électronique dans une tranche d'un transistor HEMT Ga_N par la méthode STEBIC (collaboration avec P. Laval de l'ESPCI). Malgré les résultats prometteurs obtenus, cette action n'a pas eu de soutien financier mais a permis d'initier d'autres projets de recherche. Les partenaires de ce projet étaient IMN, ESPCI, QPlus, ILV-UVSQ et IEMN.

Implication personnelle : Responsable scientifique, développement du procédé technologique caractérisations et analyse (cf. Thème 1).

Contrat européen KORRIGAN (Key Organisation for Research on Integrated Circuits in GaN technology)

Ce contrat n°102.052 a démarré en 2005 pour une durée de 4 ans. Ce projet scientifique financé par l'agence européenne de défense a réuni 7 nations différentes: France, Italie, Allemagne, Pays Bas, Suisse, Espagne et Angleterre. La DGA était le leader de ce projet (contrat DGA TASFR00266364). Il s'agissait d'un des contrats les plus importants pour la recherche sur les composants de puissance à base de GaN au niveau européen. L'objectif de ce contrat était l'optimisation de la technologie des composants à base de GaN afin de fabriquer des circuits intégrés à base de nitrure de gallium (puissance, faible bruit et commutateurs) (cf. Thème 1).

Implication personnelle : Développement du procédé technologique, caractérisations et analyse.

Contrat européen ESA LYRA (LYman-Alpha RAdiometer)

Ce contrat ESA n° proba/3901/2002/ss a commencé en 2003 et s'est terminé en 2007. LYRA est un radiomètre Lyman-Alpha qui effectue des observations dans quatre bandes du spectre ultraviolet très étendu (200-220 nm, 121,6 nm, 17-70 nm, 1-20 nm). Ces bandes intéressent la physique solaire, la « météo spatiale » et l'aéronomie (science des constituants de l'atmosphère). IMOMECA (filiale d'IMEC à Diepenbeek) et l'IEMN ont fait œuvre de pionnier dans la conception et la fabrication de détecteurs X-UV à base de diamant (cf. Thème 4).

Implication personnelle: Responsable de tâches, conception, développement du procédé technologique, caractérisations, simulation et analyse.

Contrat européen ESA BOLD (Blind to the Optical Light Detectors)

Ce projet ESA n° 19947/06/NL/PM a commencé en 2007 et s'est terminé en 2011, il implique des partenaires franco-belges (IMEC, CRHEA, ROB, ESA et IEMN). Il constitue la poursuite du projet européen LYRA avec les mêmes objectifs scientifiques, mais à partir de matériaux semiconducteurs nitrures à large bande interdite (cf. Thème 4). L'objectif de ce contrat était de démontrer la pertinence de la technologie de détecteur à large bande interdite à base de nitrure pour la mission Solar Orbiter afin d'avoir un détecteur de ligne de base solide pour ses instruments EUV. À cette fin, un démonstrateur de technologie de pointe comme un hybride entièrement intégré tableau / 2-D de grande dimension ($\geq 256 \times 256$) avec une pixellisation de 10 μm a été fabriqué et caractérisé par IMEC (cf. Thème 4).

Implication personnelle : Responsable de sous-tâches, développement du procédé technologique, caractérisation, simulation et analyse.

ANR TRANSNIT (Ingénierie quantique du transport électronique dans des hétérostructures nitrures)

Ce projet ANR BLANC n° 06-3-156349 a débuté en 2006 et s'est terminé en 2010.

Ce projet exploratoire concerne l'ingénierie quantique du transport électronique dans les hétérostructures nitrures à LBI. L'objectif de ce projet a été de développer une nouvelle filière technologique reposant sur le transport vertical des électrons dans les semiconducteurs GaN/(Al,Ga)N. Nous avons proposé pour cela de manipuler le transport perpendiculaire et le confinement quantique des électrons à l'échelle nanométrique dans des couches ultraminces de GaN/(Al,Ga)N au moyen de stratégies innovantes de croissance, et de nanofabrication. Il a associé l'IEMN, l'INAC/CEA, le CRHEA et l'IEF (cf. Thème 3).

Implication personnelle : Responsable scientifique pour l'IEMN, développement du procédé technologique caractérisations, simulation et analyses.

ANR GABORE (Epitaxie de composés semiconducteurs borés (III-B)-N pour applications de puissance hyperfréquence et optoélectronique)

Ce projet ANR n° 07-BLANC-0355 a débuté en 2008 et s'est terminé en 2012.

Ce projet exploratoire avait pour objectif d'étudier l'impact de l'ajout de l'élément bore dans une hétérostructure HEMT GaN en vue d'améliorer les propriétés de transport des électrons dans un puits AlGaIn/GaN et/ou les performances associées. Les possibles impacts sont : quasi-accord en paramètre avec SiC pour les matériaux BGaIn et BAlIn, passivation des dopants, couche back-barrière BGaIn, couche barrière BAlIn à LBI etc... (cf. Thème 1).

Implication personnelle : Responsable scientifique pour l'IEMN, développement du procédé technologique caractérisations et analyses.

ANR HiPPoP (High Power Pulsed Optimized Plasma Process for the deposition of highly insulating large band gap nitrides (AlN, BN))

Ce projet ANR BLANC n° 07-BLAN-0357 a débuté en 2008 et s'est terminé en 2011.

HiPPoP est un projet de recherche et développement avec des aspects tant fondamentaux qu'appliqués. Le coordinateur du projet est l'IMN et les partenaires sont IEMN/Lille et le LPGP Paris XI.

L'objectif de ce projet a été de montrer la faisabilité de la synthèse à basse température de films d'AlN épais ayant une qualité cristalline de grade électronique, une orientation contrôlée et une faible contrainte. La technique utilisée dans ce projet est la pulvérisation magnétron pulsée à forte puissance. Les couches élaborées ont été utilisées pour diverses applications : guide d'onde optique, dispositifs SAW à onde de Lamb, couche de passivation et couche tampon pour les transistors HEMT GaN (cf. Thème 5).

Implication personnelle : Responsable scientifique pour l'IEMN, développement du procédé technologique, caractérisations et analyses.

ANR DELTADIAM (Fabrication par homoépitaxie et étude de couches de diamant monocristallin ultramines et très fortement dopées au bore (« delta-dopées »)).

Ce projet ANR BLANC 08-BLAN-0195 a débuté en 2009 et s'est terminé en 2012.

Le projet Deltadiam est un projet de recherche fondamental coordonné par l'Institut Néel. Il associe quatre laboratoires, deux du CNRS (Institut Néel à Grenoble et IEMN à Villeneuve d'Ascq), un du CEA (LIST à Saclay) et l'ESRF (à Grenoble). Le projet a commencé en janvier 2009 et a duré 48 mois. Il a bénéficié d'une aide de 500 000 € pour un coût total de 1 312 010 €.

Les avancées dans la fabrication des substrats de diamant monocristallin synthétique ont ouvert la voie à la croissance épitaxiale de toutes les couches nécessaires à l'élaboration de dispositifs électroniques. En particulier, la possibilité de doper de façon contrôlée au bore une concentration proche du ppb à plus du % atomique offre une occasion d'obtenir toutes les fonctions permises aux technologies unipolaires à partir du seul diamant. Ce projet a pour objectif la synthèse de couche de diamant delta-dopées au bore quasi-métallique enterrées pour la fabrication de transistor de puissance en haute fréquence. Le contrôle de la conductivité du canal est réalisé par un champ électrique perpendiculaire d'intensité suffisante à l'aide d'une grille située au dessus de la couche de diamant (cf. Thème 2).

Implication personnelle : Responsable scientifique pour l'IEMN, développement du procédé technologique caractérisations et analyses.

ANR CLEANING (Capteurs de gaz multifonctions anti-pollution à base de nitrure de gallium pour application automobile)

Le projet a commencé en novembre 2015 pour une durée de 52 mois. L'objet de ce projet est la conception, la fabrication et l'optimisation d'un capteur pouvant simultanément et sélectivement détecter avec une haute sensibilité les gaz toxiques NO, NO_x, NO₂ et NH₃ tel que imposés par la norme Euro 7. Ce capteur est sensé fonctionner à des températures comprises entre 600 et 1000°C

et doit présenter des temps de réponse très courts. Deux approches sont envisagées pour y parvenir : des dispositifs MSM B GaN/GaN en multicouches et des transistors HEMTs GaN/Si avec une grille oxydée fonctionnalisée. Ce capteur, fixé sur le filtre à particules, est destiné à mieux contrôler les gaz d'échappements des véhicules automobiles afin de réduire les gaz nocifs et améliorer la combustion des moteurs. Les partenaires de ce projet sont GTL, LN2 et l'industriel PSA (cf. Projet 4).

Implication personnelle : Responsable scientifique pour l'IEMN, développement du procédé technologique, caractérisations, modélisation, traitement de données et analyses.

Présentation des différentes thématiques développées par les étudiants en thèse, master et post-doc que j'ai (co)-encadrés

La Figure 2 résume les étudiants en thèse et les post-doctorants encadrés au cours des 12 dernières années et qui ont travaillé sur l'ensemble des projets cités à précédemment.

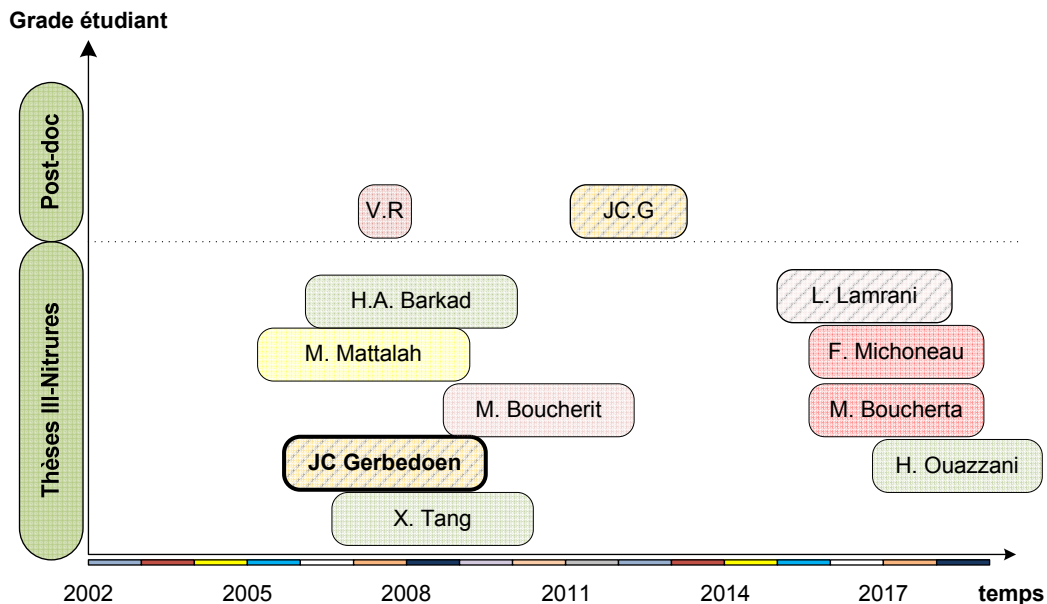


Figure 2 : Récapitulatif des étudiants encadrés depuis ma titularisation en 2003 en tant que MCF.

Hassane OUAZZANI CHADI (2016→2019) : thèse de doctorat (encadrement à 50%) (IEMN/LN2)

Conception, réalisation et caractérisation de capteurs de gaz anti-pollution à base de HEMT GaN et de MSM B GaN/GaN pour application automobile

Cette thèse de doctorat a pour objectif la conception, la fabrication en salle blanche et la caractérisation de capteurs de gaz NH_3 et NO_x (NO , NO_2 , N_2O) en accord avec les besoins industriels en terme de sensibilité, de sélectivité et de fiabilité. Cette nouvelle génération de capteurs (à base de HEMT GaN et de MSM B GaN/GaN) devrait aider à réduire la pollution urbaine liée à l'automobile. Ce travail entre dans le cadre du projet CLEANING qui a pour vocation l'élaboration d'un nez électronique fiable, robuste, à moindre coût et directement opérationnel dans son environnement réel qu'est le filtre à particules d'un véhicule automobile. Le consortium est constitué de quatre partenaires expérimentés et complémentaires : Georgia-Tech CNRS-UMI, Peugeot PSA, IEMN-CNRS et LN2-UMI.

Lamye Lamrani (2014→2017) : thèse de doctorat (encadrement à 50%) (LN2/IEMN)

Conception, réalisation et caractérisation de HEMTs GaN pour la synthèse de circuit MMIC en bande V et W.

Cette thèse consiste à utiliser tout le savoir faire acquis sur la fabrication de transistors HEMT GaN/Si(111) à grille ultra-courte pour la montée en fréquence et le choix optimum d'une hétérostructure pour la tenue en tension. L'objectif étant de réaliser un transistor HEMT GaN délivrant 1.5 W/mm à 94 GHz. Une fois ce travail réalisé, il s'agira d'utiliser le savoir faire acquis au LN2 sur la fabrication des éléments passifs pour réaliser un kit de circuit MMIC pouvant réaliser une fonction électronique donnée.

Florian Michoneau (2015→) : thèse de doctorat (encadrement à 33%) (IEMN/IEF/CRHEA)

Etude du transport électronique dans le GaN sous fort champ (Gunn, avalanche).

Le matériau GaN est un semiconducteur à large bande interdite devenu très attractif avec le développement des diodes électroluminescentes. La portée de cette révolution technologique a d'ailleurs été saluée en 2014 par le comité Nobel. De plus, les propriétés électroniques du GaN sont telles que des composants électroniques déjà très performants sont désormais en phase de développement. Cependant, les phénomènes liés au transport des électrons sous fort champ électrique sont encore relativement mal connus alors que la maîtrise de ces effets est essentielle pour optimiser et même développer de nouveaux composants. Ainsi, l'ionisation par choc et la chute de mobilité des électrons à haute énergie sont des phénomènes qui peuvent limiter les performances des composants ou, dans certains cas, être exploités (diodes à avalanche, diodes à effet Gunn...).

Le principal objectif de cette étude qui a débuté en octobre 2015 est donc d'étudier des structures épitaxiales à base de GaN en vue de la compréhension de ces phénomènes et de la quantification de leurs paramètres (énergies, temps de relaxation etc...). C'est dans un contexte de transport électronique vertical que se situera l'étude avec pour commencer des diodes fabriquées à partir de matériau GaN dopé $n^+ n^- n^+$ puis des hétérostructures avec par exemple, un émetteur AlGaIn. Ces structures seront réalisées au CRHEA. Des modélisations seront également menées par le partenaire à l'IEF et porteront sur les structures électroniques, l'ionisation par choc et les temps de relaxation. A l'IEMN, les modélisations porteront sur l'influence des effets thermiques sur l'apparition d'un domaine de propagation, l'influence des dimensions des diodes Gunn sur les performances électriques (statique et en hyperfréquence). Dans un second temps, au-delà des optimisations, des structures de type HET (hot electron transistor) pourront être définies en fonction des paramètres extraits des mesures et des modélisations. Cette thèse est proposée dans le cadre du laboratoire d'excellence en réseau GaNex du plan d'Investissements d'Avenir (ANR-11-LABX-0014).

Mohammed Boucherta (2015→) : thèse de doctorat (encadrement à 33%) (IEMN/GTL)

Les SC III-V de la filière nitrure de gallium et en particulier les HEMTs AlGaIn/GaN sont étudiés intensivement en mode de déplétion pour des applications de puissance en hyperfréquence depuis plus d'une décennie. Parmi les méthodes permettant de faire fonctionner ces composants en mode d'accumulation, celles qui sont les moins étudiées consistent à mettre à profit les effets électrostatiques en 3D à l'échelle nanométrique. Dans le cadre de ce sujet de thèse, nous proposons de démontrer que, en combinant des épitaxies de HEMTs classiques (In,Ga)AlN/GaN associées à une technologie top-down ou bottom-up pour la réalisation de nanorubans, une utilisation de ces composants innovants est possible à la fois en mode d'enrichissement et en mode de déplétion. Ces nanorubans associés à des designs spécifiques seront fabriqués par lithographie électronique. Il est alors possible d'intégrer l'ensemble de ces dispositifs actifs sur un même wafer afin d'envisager une intégration sur silicium de ces composants pour une électronique logique qui apparaît très attractive pour un fonctionnement à haute température. Certaines structures à transport 1D pourront être utilisées pour la réalisation de transistors de puissance à haute fréquence.

Le sujet de thèse proposé consiste à optimiser la géométrie de ces dispositifs permettant la pixellisation d'un wafer pour des opérations en électronique numérique à haute température de manière à permettre d'accumuler les performances de chacun des nano-rubans réalisés. L'objectif étant d'améliorer la commande des grilles et la collecte des charges par la réduction des résistances d'accès des contacts ohmiques. Il en résultera une nette amélioration de la commande des petites grilles et des résistances d'accès ultra-stables même lorsque la structure est soumise à un fort champ électrique. La résultante en est une linéarité du transistor nettement améliorée. Cette thèse implique un autre laboratoire reconnu dans la synthèse d'hétérostructures à base de GaN (GeorgiaTech Lorraine et le laboratoire matériaux optronique à propriétés spécifiques de Metz - LMOPS).

Mohamed Boucherit (2008-2012) - thèse de doctorat (encadrement à 50%) (IEMN)

Conception et réalisation de nano-diodes à effet tunnel résonant de la filière des matériaux semiconducteurs AlN/GaN.

L'objectif de cette thèse a été de réaliser des nano-composants quantiques dans la filière des matériaux semiconducteurs AlN/GaN afin d'en étudier le comportement électrique. Nous avons réalisé des Diodes à Effet Tunnel Résonant (DETR) à partir d'hétérostructures AlN/GaN élaborées soit au CHREA, soit au CEA. Plusieurs approches mariant épitaxie et technologie ont été envisagées. L'originalité de cette étude a été de diminuer autant que possible la taille de ces objets et de mettre à profit les potentialités des matériaux AlN et GaN. La réduction de la taille de ces diodes et de leurs zones d'accès devrait permettre d'amplifier le phénomène d'effet tunnel résonant générant des rapports de courants $I_{pic}/I_{vallée}$ nettement plus importants que ceux obtenus avec les semiconducteurs III-V classiques. L'objectif de cette étude consiste à dépasser les rapports de courants typiques de 10:1, jusqu'ici reportés dans les DETR AlN/GaN et ce pour des tensions inférieures à 3V. La texturation des substrats à l'échelle nanométrique, la réalisation des composants ainsi que la caractérisation électrique des composants ont été développées dans le cadre de cette thèse à l'IEMN. Ce projet avait pour ambition de développer une nouvelle thématique qui vise à contrôler à l'échelle nanométrique la croissance cristalline au-delà de ce qui peut être fait dans les systèmes auto-organisés et ce en vue de réaliser des dispositifs plus performants qu'ils soient électroniques ou optoélectroniques. De nombreuses applications peuvent tirer avantage des propriétés des DETR.

Ce travail de thèse comprend la réalisation technologique de ces DETR en salle blanche, puis dans un deuxième temps, la caractérisation électrique de ces nanoobjets soit en régime continu à l'aide de mesure C-AFM, soit en hyperfréquence jusqu'à 20 GHz. Le comportement électrique de ces structures a fait l'objet d'analyses physiques détaillées.

Jean-Claude Gerbedoen - thèse de doctorat (2005-2009) (encadrement à 50%) (IEMN)

Optimisation et réalisation de transistors HEMTs AlGaIn/GaN par champ plat modulé.

Cette thèse a consisté à optimiser les performances des transistors élaborés par l'ajout d'une plaque de champ sur l'hétérostructure AlGaIn/GaN (Field-Plate FP-MIS/HEMT) pour faciliter la montée en puissance et en fréquence. Pour y parvenir, différentes études ont permis de relever ce challenge :

- ♣ Réalisation et optimisation d'un nouveau contact ohmique avec recess sur des épitaxies nitrures contenant une couche d'exclusion AlN.
- ♣ Elaboration et impact d'une plaque de champ (*fieldplate*) sur les performances en puissance des transistors : Pour cela, plusieurs topologies ont été envisagées et réalisées.
- ♣ Analyse de différents prétraitements de surface sur les transistors HEMT AlGaIn/GaN.
- ♣ Réalisation de grilles ultra-courtes de 40nm pour la montée en fréquence. Mise en évidence de la contrainte du métal de grille sur la formation du contact redresseur réalisé par pulvérisation.

Une autre voie a été étudiée afin de faciliter l'obtention d'un fossé de grille. Elle consiste à élaborer un nouveau type de transistor à base de GaN pour la montée en fréquence et en puissance à l'aide d'une barrière mixte ZnO/AlGaN. L'épitaxie ZnO/GaN ayant été démontrée et de part les propriétés exceptionnelles de cet oxyde (piézoélectrique, texturation à basse température, grand gap $E_g=3.34\text{eV}$, nid et très facile à graver). Cette étude laisse entrevoir un recess de grille aisé. D'autres transistors de type MISHEMT ont également été réalisés en utilisant d'autres isolant de grille à haute permittivité pouvant fonctionner à haute température (ZrO_2 , BN).

Maghnia Mattalah - thèse de doctorat (2004-2008) (encadrement à 50%) (IEMN)

Analyse des surfaces et interfaces de semiconducteurs III-V par des méthodes de photoluminescence et de photoacoustique.

Cette thèse a consisté à étudier les propriétés électriques de transistors à effet de champ à base de semiconducteurs III-V à grand gap de la famille des nitrures (AlN, GaN, BN et leurs ternaires associés). Une étude du potentiel de surface et de la vitesse de recombinaison en surface de structures passivées ou non-passivées avec des oxydes à haute permittivité (ZrO_2 , ZnO, TiO_2) a été réalisée. Pour cela, des méthodes analytiques déterministes ont été mises au point et permettent d'analyser et de quantifier l'influence des pièges en surface et interfaces des composants. Ces composants (MISFET, HEMT et FPHEMT) ont été élaborés au laboratoire central de l'IEMN. Les modes opératoires de caractérisation sont soit des méthodes optiques avec la photoluminescence sous polarisation électrique en régime de déplétion ou hors polarisation mais à flux variable ; soit des mesures électriques de type capacitives (C-V, I-V, G-V- ω en fonction de la température). Les densités des états d'interface des structures MIS sur InP, GaN et AlGaN ont été déterminées. Ces structures permettent d'étudier l'effet des traitements de surface et des traitements thermiques sur la densité d'états d'interface sous la commande de grille ou en surface du semiconducteur. Cette étude a montré être très instructive afin d'optimiser les différentes étapes technologiques.

Une deuxième technique non destructrice a été explorée et consiste à mettre au point une méthode d'analyse des défauts dans les semiconducteurs par la technique de (photo)acoustique. Elle a été appliquée au silicium et pour la première fois à l'InP. Elle est actuellement étendue aux semiconducteurs à grand gap AlN, GaN et BN.

Hassan Ali Barkad - thèse de doctorat (2006-2009) (encadrement à 50%) (IEMN)

Réalisation et simulation de photodétecteurs à grand gap de la filière nitrure et diamant.

Cette thèse consiste à élaborer des photodétecteurs opérables dans la gamme X-UV pour des applications *solar-blind* et résistants aux environnements hostiles. Les premières structures ont été réalisées sur diamant et sur de nouveaux semiconducteurs (cBN et wAlN).

L'étude des phénomènes physiques mis en jeu, la prise en compte de l'influence de la thermique et l'optimisation de différents types de photoconducteurs et de photodiodes sont réalisées à partir de modèles développés dans le groupe :

- Certains modèles sont basés sur les équations des semiconducteurs discrétisées suivant la méthode des différences finies.
- D'autres modèles sont basés sur le traitement des équations utilisant le logiciel COMSOL. Dans ce cas, une discrétisation basée sur les éléments finis permet des investigations nouvelles avec des temps calculs plus courts. Ainsi, l'optimisation de la topologie technologique de ces structures est effectuée à partir d'une simulation multiphysique. Le modèle macroscopique des semiconducteurs a été implémenté avec succès et le terme correspondant à l'absorption de la lumière (génération et recombinaison des deux types de porteurs) a été implémenté.

Xiao Tang : thèse de doctorat (2006-2010) (encadrement à 30%) (IEMN)

Analyse thermique et électrique pour l'optimisation de composants de la filière nitrure de gallium.

Il s'agit dans cette thèse d'améliorer dans un premier temps un modèle physico-thermique développé dans l'équipe dans le but d'être capable de simuler des transistors de puissance de type AlGa_x/Ga_{1-x}N. Cet outil est très utile pour la compréhension des effets thermique sur les performances attendues en termes de puissance. L'objectif du travail a consisté également en la caractérisation des composants associés à une analyse basée sur la modélisation physique. Dans ce but, un travail sur des contacts Schottky sur GaN et AlGa_xN a été entrepris.

Vanessa Raballand : post-doc (2009) (encadrement à 100%) (IEMN)

Mise au point d'une technique de gravure extrêmement fine de semiconducteurs Al_xGa_{1-x}N au moyen d'un plasma de haute densité obtenu par ICP (Inductively Coupled Plasma) à partir de gaz chlorés. Ce travail de post-doctorat a abouti aux premiers tests concluants effectués sur des épitaxies reportées sur substrat hybride Si(mono)/SiC(poly) utilisant le procédé Smartcut. L'objectif a consisté à optimiser les conditions de gravure pour la réalisation des contacts ohmiques. Les résultats bien que difficile à reproduire ont mené à la conception des premiers transistors sur ce type de substrat.

Jean-Claude Gerbedoen : post-doc (2011-2013) (encadrement à 100%) (IEMN)

Dans le cadre de l'ANR DELTADIAM, j'ai encadré Jean-Claude Gerbedoen dans le cadre de la synthèse des designs de transistor tout diamant à dopage delta, de leur réalisation en salle blanche et de leur caractérisation électrique.

Récapitulatif des co-encadrements et co-directions de thèses soutenues avant 2016 (5)

Maghnia MATTALAH (50%)

Thèse en cotutelle, soutenue le 03/07/2008 à l'Université Djillali Liabès de Sidi Bel Abbès, Faculté des sciences de l'ingénieur (Algérie).

Titre : *Analyse de défauts en surfaces et interfaces de semi-conducteurs III-N à large bande interdite appliqués à la micro et l'optoélectronique.*

Jean-Claude GERBEDOEN (50%)

Thèse soutenue le 17/03/2009 à l'IEMN (Université de Lille1).

Titre : *Conception, réalisation technologique et analyse de transistors de la filière HEMTs AlGaIn/GaN sur substrat silicium pour l'amplification de puissance hyperfréquence.*

Hassan Ali BARKAD (50%)

Thèse soutenue le 18/12/2009 à l'IEMN (Université de Lille1).

Titre : *Conception, simulation et réalisation de photodétecteurs X-UV à base de matériaux à large bande interdite destinés à des applications spatiales.*

Xiao TANG (30%)

Thèse soutenue le 22/01/2010 à l'IEMN (Université de Lille1).

Titre : *Analyse thermique et électrique pour l'optimisation de composants de la filière nitrure de gallium.*

Mohamed BOUCHERIT (50%)

Thèse soutenue le 22/01/2012 à l'IEMN (Université de Lille1).

Titre : *Conception et réalisation de nano-diodes à effet tunnel résonant de la filière des matériaux semiconducteurs AlN/GaN.*

Masters Recherche encadrés (9)

Hassane Ouazzani CHADI (2015/16) (encadré à 100%):

Conception et réalisation technologique de capteur de gaz anti-pollution MSM B_{0.5}GaN/GaN et HEMT GaN pour la détection de NO_x et NH₃ pour l'automobile.

Mohammed BOUCHERTA (2014/15) (encadré à 100%):

Mise en évidence de l'effet des polaritons de surface sur des films minces de AlN déposés ou épitaxiés sur différents substrats.

Neila Abdelwahid (2013/2014) (encadré à 100%):

Etude par spectroscopie d'impédance des défauts profonds dans des transistors HEMTs GaN.

Yannick Douvry (2008/09) (encadré à 50%):

Etude du transport vertical au travers d'hétérostructures à double barrière Al(Ga)N/GaN/Al(Ga)N au moyen d'une description mésoscopique basée sur l'utilisation des fonctions de Green hors équilibre.

Anouar Benali (2007/08) (encadré à 50%):

Etude du transport vertical au travers d'hétérostructures à double barrière Al(Ga)N/GaN/Al(Ga)N au moyen d'une description mésoscopique basée sur l'utilisation des fonctions de Green hors équilibre.

Ania Ali Yahia (2006/07) (encadré à 100%):

Conception et réalisation de nouveaux dispositifs SAW à base de matériaux à large bande interdite (AlN, ZnO) sur nanodiamant sur substrat saphir ou silicium

Ali Tahrini (2005/06) (encadré à 100%):

Développement et amélioration des processus informatiques et programmation semi-analytiques en lithographie par faisceau d'électrons. Application à l'écriture des grilles en Té sub-100nm bi-couches et tri-couches.

Jean-Claude Gerbedoen (2004/05) (encadré à 100%):

Elaboration de transistors MISHEMT $\text{SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4/\text{AlGaIn}$ et de motifs de Hall. Analyse des propriétés de transport de transistors HEMT polarisées à basse température.

Fernand Nzamba (2003/04) (encadré à 100%):

Propriétés électrique et optique d'alliages ternaires $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}/(\text{Si}, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{SiC})$. Caractérisation par spectrométrie microRaman. Impact du procédé technologique sur la non linéarité des contacts ohmiques.

Encadrement de stagiaires en Licence

Nouidei Jihad Hakima (2005/06) 3^{ème} année Polytech'Lille

Caractérisations électriques I(V), C(V), G(V, ω ,T) de transistors HEMT $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}/\text{Si}$.

Ilham Tahir (2007/08) 4^{ème} année Polytech'Lille

Simulation des effets électro-thermique sous COMSOL®

Maxime Damour (04/04/2011 - 17/06/2011) - 2^{ème} année IUTA -Lille1

Développement d'un banc de spectroscopie des niveaux profonds appliqué à des dispositifs semi-conducteurs

Participation régulière aux jurys de Master Recherche MiNT à Lille1

Examineur pour des thèses de doctorat nationales (en dehors de Lille) & internationales (5)

Bassam Abdallah

Dépôt de couches minces de nitrures par pulvérisation magnétron en phase vapeur: Etude de la structure et de la contrainte des films

Université de Nantes (France), le 4 décembre 2008

Boumédiène BenMoussa

Hexagonal Boron Nitride Nanowalls: Physical Vapour Deposition, structural and optical properties

le 14 Décembre 2011, Universiteit Hasselt (Belgium)

Hussein Srour

Design, construction and electrical characterization of "Solar-blind" ultraviolet photodetectors based on new BAInGaIn alloys

le 16 mai 2012, Université de Lorraine (France)

Vinod Ravindran

Design and Fabrication of Boron-containing III-Nitrides based High Electron Mobility Transistors
School of Electrical and Computer Engineering of Atlanta & Université de Lorraine
February 19, 2013 (USA), le 11 décembre 2012 (France)

Oswaldo Arenas

Development of a new electrothermal method to characterize of gallium nitride transistors
February 29, 2015 Sherbrooke (Canada)

Animations scientifiques

- **Responsable scientifique** pour l'IEMN de différentes **ANR** en micro et nanotechnologie: TRANSNIT (2006→2009), GABORE (2008→2011), HiPPOP (2008→2011), DELTADIAM (2009→2012).
- **Implication dans des contrats européens** : KORRIGAN (2004-2008), DGA Nitrides(2001-2004), LYRA (2003-2007), BOLD (2007-2011).
- Coordination de l'activité "technologie des transistors millimétriques" dans le laboratoire commun TIGER (2003→2007).
- Depuis 2007 → : Responsable et animateur de l'activité Matériaux & Dispositifs actifs à base de matériaux semiconducteurs à Large Bande Interdite innovants au sein du groupe Composants et Dispositifs Microondes de Puissance à l'IEMN.

Activités administratives

- Directeur des études de la licence EEA à l'Université des Sciences et Technologies de Lille (sept. 2002→déc. 2004).
- Membre de la commission de spécialistes 63^{ème} section à l'Université des Sciences et Technologies de Lille (2006→2008, 2011→2014,). Membre du vivier (2015→2016)
- Membre de la commission de sélection 63^{ème} section à l'Université Paris13 (2008→).
- Expert pour l'Agence Nationale pour la Recherche : Reviewer for Government through the National Research Council for evaluate project édition 2011, 2013 and 2016
- Editorial Board Member (International Journal of Advanced Applied Physics Research: 2014→mai 2015).
- Responsable d'un Programme de Recherche et Formation Doctorale Franco-Algérien CMEP (2010-2014) entre l'IEMN et Université Djillali LIABES de Sidi Bel Abbès sur la thématique: "Conception, réalisation et caractérisation de nano-composants à base de semiconducteurs III-N pour des applications de puissance en hyperfréquence".
- Accueil d'étudiants et de chercheurs dans le cadre du Programme de Recherche et Formation Doctorale Franco-Algérien CMEP (2010-2014) entre l'IEMN et l'Université Djillali LIABES de Sidi Bel Abbès.

Reuves de vulgarisation scientifique

Revue Semiconductor- Compound, une revue internationale pour promouvoir la science entre la recherche académique et les industriels (2 papiers cités ci-dessous).

New orientation for gallium nitride on silicon transistors

Soltani, A; Gerbedoen, J-C; Cordier, Y; Ducatteau, D; Rousseau, M; Chmielowska, M; Ramdani, M; DeJaeger, J-C.

Semiconductor-Today Compounds & Advanced Silicon

http://www.semiconductor-today.com/news_items/2013/MAR/IEMN_210313.html

Valorisation

1. Brevet d'invention (pour la France) N° 10-01523, déposé le 12 Avril 2010

“Capteur à fil chaud de taille submillimétrique et procédé de réalisation associé”

L. GIMENO, A. TALBI, P. PERNOD, A. MERLEN, R. VIARD, V. MORTET, **A. SOLTANI**, V. PREOBRAZHENSKY

Ref. dossier CNRS/ORES : V.Réf. 03084-01 - N.Réf EPR YR/pg - F0644CAS271

2. Brevet d'invention N° 808997, déposé le 20 janvier 2011

“Rôle double des couches B GaN pour les transistors HEMT AlGaIn/GaN”

A. Ougazzaden, M-A Poisson, V. Ravindran, **A. Soltani**, J-C De Jaeger

Intellectual Property & Standards (IP&S) – Thalè (FR)s, CNRS(FR), Alcatel-Lucent(FR), USTL(FR), GTA (USA)

Extension du brevet à l'international n° WO 2012/140271 A1 le 18 Octobre 2012 sous l'intitulé :

“HEMT transistors consisting of (III-B)-N wide band gap semiconductors comprising boron”

Bilan de la production scientifique (au 1 février 2016)

Nombre de publications de rang A :

- Dans des revues internationales avec comité de lecture : 60
- Dans des revues nationales avec comité de lecture : 13
- A combien de publications ont donné lieu les co-directions déjà effectuées : 19

Nombre d'actes de congrès à comité de lecture : 13

Nombre de conférences invitées : 7

Nombre de communications avec actes : 39

- Orales : 23
- Affiches : 17

La partie suivante décrit les principaux thèmes développés depuis 2003 en lien direct avec des étudiants. Mes quelques autres activités de recherche ne sont pas mentionnées dans ce qui suit.

Thème n° 1

Le transistor à haute mobilité électronique à base de nitrure de gallium

Sommaire

Introduction

I. Petit historique sur la synthèse du GaN

II. Facteur de mérite, VBr vs FT

III. Pourquoi tant d'engouement pour le nitrure de gallium ?

IV. Propriétés matériaux en volume et en couche mince

V. Potentialités du GaN, applications

VI. Disponibilités des substrats, bilan

VII. Défauts matériaux, dispersion autoéchauffement et traps

VIII. Procédé technologique : solutions matériau, solution technologique

IX. Pourquoi GaN/Si, comparaison avec SiC

X. GaN sur substrats Si(111) Si(100) et Si(110), comparaison des propriétés de transport

XI. Bilan des performances en puissance hyperfréquence

XII. GaN/3C-SiC/Si(111) : une nouvelle voie pour la filière GaN

XIII. Conclusions

introduction

Dès les années 1960, il a été reconnu que l'utilisation de semiconducteurs à large bande interdite pouvait apporter un gain considérable au niveau des performances globales des transistors pour les applications en amplification de puissance hyperfréquence. Il a fallu plus de quarante ans pour que ces semiconducteurs, depuis la cristalllogénèse et la synthèse en films minces, jusqu'à celle des procédés technologiques, atteigne un niveau de maturité suffisant pour que l'on puisse réaliser des démonstrateurs fiables. Aujourd'hui, ce matériau poursuit son évolution de la recherche académique vers un développement industriel qui devrait atteindre son apogée dans les décennies à venir pour finalement atteindre sa pleine maturité et prendre la place qui lui revient.

Historiquement, le premier domaine d'applications de ces semiconducteurs à large bande interdite au niveau industriel a été celui des composants électroluminescents pour la production de lumière pouvant balayer tout le domaine du visible jusqu'au proche UV. Aussi, l'usage exponentiel des hyperfréquences dans le domaine des télécommunications au niveau grand public, les besoins dans le domaine militaire et en électronique de puissance n'ont qu'accentué la demande pour ce type de matériaux. La disponibilité de ces semiconducteurs à large bande interdite constitue en fait une véritable rupture technologique avec les autres filières de semiconducteurs développées auparavant d'autant plus que la plupart des résultats obtenus sur des transistors fabriqués avec ces matériaux sous-estiment les potentialités de ces composés III-N. Les nitrures à large bande interdite offrent donc des possibilités technologiques considérables dans le domaine des applications micro et optoélectronique, ce qui explique leur engouement pour la recherche académique et évidemment du point de vue industriel.

Tout au long des quinze dernières années (2000-2015), nous nous sommes attelés à comprendre ces nouveaux concepts et à développer de nouveaux transistors HEMTs à base de GaN. Depuis le début 2015, nous nous sommes intéressés à intégrer ces composants dans des circuits monolithiques de puissance en haute fréquence ou en gamme d'ondes millimétriques et submillimétriques bas coût pour satisfaire à de nouvelles applications dans les communications, la radiométrie, l'imagerie passive, l'observation de la terre ou du soleil, les communications Hertiennes ou optoélectroniques, en biologie, dans des systèmes de sécurité (détection d'explosifs, de gaz, d'incendie de forêt, de missiles...) etc... et dernièrement comme capteur de gaz pour l'automobile.

I. Petit historique sur la synthèse du GaN

Le matériau semiconducteur nitrure de gallium (GaN) a été synthétisé pour la première fois par Juza et Hahn dans les années 1930 en faisant passer de l'ammoniac au-dessus d'une surface de gallium liquide à des températures élevées [R. Juza and H. Hahn, "Über die kristallstrukturen von Cu₃N, GaN und InN metallamide und metallnitride," Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie, vol. 239, pp. 282–287, Oct.1938]. Ce procédé s'est soldé par la formation d'une poudre constituée de petites aiguilles et de plaquettes et a permis d'étudier pour la première fois la cristallinité du GaN. En 1968, Maruska et Tietjen étaient les premiers à essayer l'approche épitaxiale en phase vapeur d'hydrures sur substrat saphir. Les premiers films de GaN monocristallin sont obtenus par HVPE à 850°C en 1969 par Maruska [H. P. Maruska and J. J. Tietjen, "The preparation and properties of vapor-deposited singlecrystalline GaN," Appl. Phys. Lett., vol. 15, pp. 327–329, Nov. 1969]. La qualité des films a encore été améliorée en augmentant la température à 950 ° C. Tous les films de GaN crus à cette époque ont montré des concentrations très élevées en électrons (10^{20} cm^{-3}) sans dopage intentionnel. L'origine controversée du dopage résiduel de type N a été longtemps attribuée aux lacunes d'azote (V_N), mais l'oxygène en site substitutionnel de l'azote a finalement été présenté comme seul donneur responsable [W. Seifert, R. Franzheld, E. Butter, H. Subotta, and V. Riede, "On the origin of free carriers in high-conducting n-GaN," Crystal Res. and Technol., vol. 18, p. 383, 1983]. Dans les années 1970, la recherche sur GaN a quasiment cessé presque partout dans le monde en raison des difficultés rencontrées pour l'obtention de films de haute qualité nécessaires à un possible développement composant. Les principaux problèmes étaient alors le choix du substrat pour l'adaptation en paramètre de maille, le dopage non intentionnel de type N et les difficultés pour doper le type P. En 1986, une rupture technologique est franchie par Amano et al. [H. Amano, N. Sawaki, I. Akasaki, and Y. Toyoda, "Metalorganic vapor phase epitaxial growth of a high quality GaN film using AlN buffer layer," Appl. Phys. Lett., vol. 48, pp. 353-355, Feb.1986.] lesquels synthétisent des films de GaN avec des propriétés optiques, électriques et de morphologie de surface hautement améliorées. Ce succès est à faire valoir à la technique de dépôt chimique en phase vapeur d'organométalliques sur substrat saphir. Dans ce cas, une couche de nucléation de nitrure d'aluminium réalisée à basse température (600°C) y est préalablement déposée alors que la croissance du GaN est effectuée à 1050°C. En 1991, Shuji Nakamura de la société japonaise Nichia Chemical Industries Ltd (maintenant Nichia Corp.) étend ce concept à l'introduction d'une couche de nucléation GaN basse température (450-600 °C) pour minimiser la génération de défauts structuraux [S. Nakamura, "In situ monitoring of GaN growth using interference effects," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 30, no. 8, pp. 1620–1627, Aug. 1991].

Bien que des résultats marquants aient été obtenus par épitaxie par jet moléculaire (MBE), il convient de dire qu'à l'heure actuelle, la MOCVD s'est avérée être la technique « maîtresse » pour la

réalisation d'hétérostructures à base de GaN de qualités structurale et électrique « supérieures » nécessaires à la fiabilité d'autant plus qu'elle constitue la technique de choix pour la production industrielle avec des réacteurs pouvant traiter plusieurs substrats de taille jusqu'à 12 pouces à la fois.

En 1991, Khan et *al.* rapportent la première preuve de l'existence d'un gaz d'électrons bidimensionnel à l'interface AlGaIn/GaN sur substrat saphir suivi du premier effet transistor à haute mobilité en 1994 [M. Khan, J. van Hoven, J. Kuznia, and D. Olson, "High electron mobility GaN/AlGaIn heterostructures grown by low-pressure metalorganic chemical vapor deposition," Appl. Phys. Lett., vol. 58, no. 21, pp. 2408–2410, 1991][M. Khan, J. N. Kuznia, D. T. Olson, W. Schaff, J. Burm, and M. Shur, "Microwave performance of a 0.25 μm gate AlGaIn/GaN heterostructure field effect transistor," Appl. Phys. Lett., vol. 65, no. 9, pp. 1121–1123, 1994].

Depuis l'évolution exponentielle côté matériau et le développement de nouveaux concepts de composants électroniques, le développement, la recherche et les activités pour la commercialisation du GaN gagnent en intérêt toujours croissant. Après le stade de la commercialisation des applications en optique avec les leds bleues puis blanches et enfin UV, c'est au tour des applications en électronique de puissance en gamme microondes et en ondes millimétriques ainsi qu'en électronique de puissance de faire leur percée commerciale. Bien que certains composants à base de GaN soient déjà disponibles sur le marché, il reste encore à franchir les étapes de reproductibilité, de fiabilité des procédés technologiques, des procédés matériaux et de productivité pour beaucoup d'autres dispositifs.

II. Facteur de mérite

Pour pouvoir mieux évaluer les performances en puissance, en fréquence et en rendement des différents matériaux semi-conducteurs disponibles, plusieurs facteurs de mérite ont été proposés selon les applications visées (haute température, haute puissance et/ou haute fréquence). Ils ne dépendent que des propriétés physiques intrinsèques des matériaux et ne prennent pas en compte l'état d'avancement de la technologie. Parmi ceux-ci, nous pouvons citer : Le facteur de mérite de Johnson tient compte de la tension de claquage, de la vitesse de dérive des électrons à saturation et définit la capacité du SC à fonctionner à haute fréquence. Ce facteur est pour le GaN près de 730 fois plus élevé que celui du silicium, plus de 90 fois celui du GaAs et est évalué à deux fois celui du SiC. Le facteur de mérite de Keyes permet d'estimer les limitations thermiques lors de processus en commutation) et ceux de Baliga (applications de commutation de puissance à basse fréquence et Baliga HF pour les hautes fréquences) sont calculés à partir de la permittivité relative, de la mobilité électronique et du champ de claquage électrique permettant de déterminer la capacité du matériau

SC à supporter de fortes puissances. Ce facteur est pour le GaN environ 133 fois supérieur à celui du Si, 11 fois celui du GaAs et trois fois supérieur au SiC.

Ainsi, ces facteurs sont toujours donnés en termes de «gain» par rapport au silicium et, puisqu'ils ne prennent jamais en compte l'état réel de la technologie, ils sont toujours à l'avantage des matériaux à large bande interdite. Il est évident que ceci constitue un artefact certain. En effet, bien qu'en pratique le diamant sorte grand vainqueur de cette comparaison, l'obtention des hautes valeurs de facteurs de mérite reste dans ce cas précis très limitée par la technologie qui est malheureusement loin d'être maîtrisée pour certains de ces matériaux SC à LBI. Ce n'est plus le cas des filières GaN et SiC qui se partagent aujourd'hui le marché de l'électronique de puissance et des hautes fréquences. Comme nous le verrons, le GaN devrait à terme apparaître majoritairement dans les applications «haute fréquence & haute puissance» alors que SiC dominerait les applications nécessitant de fortes puissances à haute température.

III. Pourquoi tant d'engouement pour le nitrure de gallium ?

Comment situer les technologies les plus matures entre elles. Les semiconducteurs monocristallins les plus utilisés sont : Si, SiGe, GaAs, InP, SiC, GaN et à une moindre échelle le diamant. Pour des applications dans le génie électrique ou en électronique RF lesquelles nécessitent à la fois des tenues en tension maximale et des temps de commutation les plus courts possibles, les propriétés du GaN sont bien supérieures à celles du Si ou de GaAs. En effet, quel que soit le polytype de GaN, son champ de claquage est au moins dix fois supérieur à ses congénaires à petit gap, et sa vitesse de saturation électronique est aussi nettement supérieure. La mobilité des électrons en bande de conduction est similaire à celle du silicium. Pour autant, ces valeurs sont comparables à celles du polytype 4H du carbure de silicium qui est donc son concurrent direct pour la réalisation de composants pour l'électronique de puissance. Tout comme pour le 4H-SiC, la forte énergie de bande interdite (trois fois celle du silicium) autorise en principe des températures maximales absolues en fonctionnement à peu près trois fois supérieures, soit environ 1200 K au lieu de 400 K pour le silicium.

Par rapport aux semiconducteurs III-V à bande interdite moyenne, le GaN, comme le 4H-SiC, est affecté par une mobilité électronique nettement inférieure. A 300K, pour un matériau GaAs faiblement dopé de type N (vers 10^{15} cm^{-3}) et peu compensé, la mobilité électronique se situe vers $8500 \text{ cm}^2/\text{V.s}$, alors qu'elle n'est que d'environ $1000 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ dans GaN pour le même niveau de dopage, soit à peu près équivalente à celle dans le silicium. A basse fréquence (< 10 MHz), cette relative faible mobilité affecte surtout la chute de tension à l'état passant dans les redresseurs et les commutateurs, mais elle est plus que compensée par la contraction possible des zones de transit électronique et l'augmentation rendue possible des niveaux de dopage.

A haute fréquence, les designs de composants adoptés étant plus compacts pour minimiser les éléments passifs parasites, cette faible mobilité pénalise les résistances d'accès aux électrodes. C'est la raison pour laquelle les matériaux InP et GaAs restent encore aujourd'hui ceux de base pour les composants destinés aux fréquences supérieures à 10 GHz.

Ce qui fait le succès du GaN, tant pour les applications opto-électroniques que pour les transistors hyperfréquences, c'est évidemment le champ supplémentaire qu'ouvre la possibilité d'utiliser des hétérojonctions telles que AlGaN/GaN, AlInN/GaN, AlN/GaN dès à présent, et probablement plus tard wBAlN/GaN combiné à InN. Leur spécificité réside dans le fait que le canal est constitué d'un gaz bidimensionnel de porteurs lequel apparaît lorsque le semiconducteur est dégénéré. Dans ces hétérostructures, les mobilités électroniques atteignent des valeurs de 1500-2200 cm²/V.s @300K, ainsi que des vitesses de saturation de 2.5×10^7 m/s, alors même que l'utilisation des effets piezoélectriques permet de faire monter les densités électroniques 2D jusque quelques 10¹³ cm⁻² soit environ 5 à 10 fois celles des structures de transistors à effet de champ à base de silicium (LD-MOS, par exemple) ou de GaAs (MESFET GaAs ou HEMT pseudomorphique AlGaAs/InGaAs ou InAlAs/InGaAs). On obtient ainsi des densités de courant par unité de développement comparables entre les meilleurs HEMT sur GaAs et ceux à base de GaN, mais avec une tenue en tension à peu près 10 fois supérieure pour les structures sur GaN, donc une densité de puissance environ 10 fois supérieure à même géométrie, accompagnée d'un gain considérable sur l'impédance de sortie des amplificateurs élémentaires, autorisant une simplification des circuits d'adaptation en impédance et ouvrant la voie à des possibilités inédites en amplification large bande.

La conductivité thermique d'un matériau semiconducteur est extrêmement importante puisqu'elle constitue le paramètre qui quantifie la facilité avec laquelle la puissance dissipée peut être extraite du dispositif. Une mauvaise conductivité thermique conduit à des propriétés de transport dégradées à haute température. En général, les semiconducteurs classiques sont de mauvais conducteurs thermiques, en particulier les matériaux GaAs et InP. Par opposition, le SiC et le carbone diamant sont d'excellents conducteurs thermiques. Le GaN et le Si sont comparables. Notons que le silicium, qui reste de très loin la technologie dominante, est toujours limité à 125°C voire 150°C de température maximale de jonction alors que le SiC affiche des possibilités thermiques inégalées de plusieurs centaines de degrés et des tenues en tension de 15kV voire plus.

La permittivité relative d'un matériau SC est un autre paramètre clé. Ce dernier permet d'estimer la charge capacitive d'un transistor laquelle affecte les impédances des appareils terminaux. Les valeurs de la permittivité des matériaux semi-conducteurs à LBI sont considérablement plus faibles que

celles de ses congénères classiques. Dans le cas de GaN et SiC, les valeurs de la permittivité diélectrique sont environ 20% plus faibles que pour le silicium et environ 55% inférieure pour le diamant. Ceci permet, par exemple, à un dispositif GaN d'être environ 20% plus grand en surface pour une impédance donnée. En conséquence, cette augmentation de la surface active permet de générer plus de courant et donc une puissance de sortie plus élevée. Finalement, et à titre indicatif, nous noterons des tentatives de développement de transistors bipolaires à hétérojonction basés sur une technologie mixte GaN/SiC.

Outre les transistors GaN à haute mobilité, il existe un large éventail de technologies à l'état solide pour la génération de puissance en gamme micro-ondes, y compris le Silicium bipolaire, le Si sur isolant (LDMOS), MESFET GaAs et HFETs pseudomorphiques, HFET AlGaAs/InGaAs, GaAs, InP, InGaP, les transistors bipolaires HBT à hétérojonction SiGe ainsi que les transistors MESFET SiC. Les MESFETs SiC et GaN HFETs offrent des performances en puissance micro-ondes supérieure à celles fabriquées à partir de Si ou GaAs, en particulier à des températures élevées (respectivement 4-7 W/mm et 10-12 W/mm. Le GaAs souffre du coût élevé du substrat, d'une faible conductivité thermique et d'un champ électrique de claquage très inférieur en comparaison aux SC à LBI. Les MESFETs SiC bénéficient d'une excellente conductivité thermique mais l'absence d'une hétérojonction possible ne permet pas d'obtenir des mobilités des électrons comparables aux HFETs GaN. Le HBT SiGe HBT a été utilisé dans de nombreuses applications en microondes et comme mélangeurs à haute performance, rentables, et non-disponibles auparavant sur une plate-forme Si. Cependant, la structure HBT SiGe reste une configuration relativement faible puissance (mais qui monte en fréquence). Leurs performances à hautes fréquences résultent en grande partie du temps de transit des porteurs minoritaires au travers de la couche de base et de la réduction de la résistance de base. Pour rendre cette structure adaptée aux applications de forte puissance, la couche de collecteur devrait être aussi épaisse que les avantages apportés par le temps de transit réduit au niveau de la base seraient éliminés en raison d'un temps de collecte beaucoup plus grand. Par conséquent, le HBT SiGe est un candidat peu probable pour des applications haute puissance / haute fréquence.

Aux fréquences microondes, les transistors Si LDMOS sont actuellement les mieux placés pour réaliser des amplificateurs de puissance aux fréquences microondes pour les stations de base en téléphonie, et ceci est possible grâce à leur excellent rapport prix-performance par rapport aux autres technologies disponibles dans le commerce tels que HFETs GaAs et les transistors bipolaire à jonctions Si. Notons cependant que leur température de fonctionnement ne peut excéder les 225°C ce qui n'est pas le cas du GaN.

Comme les HFETs GaN montrent une linéarité beaucoup plus élevée que les LDMOS Si, il pourrait être possible au niveau système de réduire la complexité du circuit de linéarisation nécessaire aux systèmes sans fil large bande. Comme la technologie LDMOS est capable de fournir uniquement une densité de puissance modérée, il est nécessaire d'utiliser des transistors à grand développement de grille, donc à impédance moindre nécessaire à l'obtention de composants de puissance. En conséquence, la bande passante du circuit d'adaptation est réduite. Les fabricants de transistors HFET GaAs sont en face d'une tâche encore plus ardue que leurs homologues du Si : comme les tensions de fonctionnement (12-15 V) sont plus faibles, les courants de fonctionnement sont plus élevés alors que la conductivité thermique est inférieure au Si.

Toutes ces questions peuvent être contournées en utilisant une technologie qui présente des densités de puissance supérieures ce qui est le cas des HFETs à base de GaN. De cette manière, une même taille de dispositif peut gérer des puissances supérieures qui entraînent des coûts plus bas par watt de puissance équivalent et des coûts de systèmes inférieurs. Les niveaux d'impédance plus élevés de ces petits composants facilitent considérablement l'adaptation en impédance et la conception d'un circuit à large bande passante.

La Figure 1.1 présente un récapitulatif de la tenue en tension de fonctionnement en fonction de la fréquence des différentes technologies citées précédemment (III-V et Si) et disponibles actuellement.

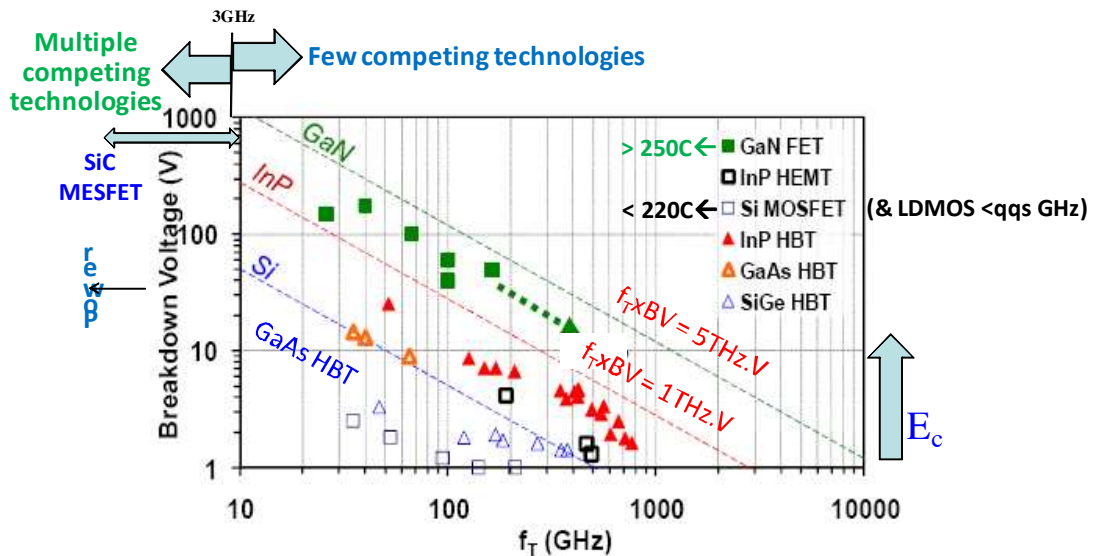


Figure 1.1 : Evolution des tensions de claquage en fonction de la fréquence de fonctionnement des principales technologies dominantes en comparaison avec les potentialités qu'offrent les « nouveaux semiconducteurs » à LBI comme le SiC et le nitride de gallium.

IV. Propriétés matériaux en volume et en couche mince

Le nitrure de gallium est un composé binaire de la famille des nitrures d'éléments III, au même titre que les nitrures d'aluminium et d'indium (AlN et InN) qui ont un état d'hybridation sp^3 . Les III-N n'existent pas à l'état naturel, il est possible de les synthétiser sous forme cubique blende de zinc dans des conditions hors équilibre. L'autre forme la plus communément répandue et surtout la plus stable thermodynamiquement est la phase wurtzite. Celle-ci est constituée de deux sous réseaux hexagonaux, dont la somme des moments dipolaires au sein de chaque tétraèdre est non nulle, et le moment dipolaire résultant est dirigé selon l'axe c. Il en découle un champ de polarisation spontanée. Une autre propriété remarquable de ces nitrures d'éléments III est leur caractère piézoélectrique, c'est-à-dire que la déformation du matériau par rapport à son état initial induit un champ de polarisation et donc un champ électrique orienté de la charge la moins électronégative (ici l'élément III) vers la charge la plus électronégative (ici l'azote), soit par convention, suivant l'orientation [0001].

V. Potentialités du GaN et applications

La Figure 1.2 montre un aperçu des applications en micro-, opto-, électro-, mécanique à base de GaN. La particularité de synthétiser du GaN sur substrat silicium offre d'amples applications possibles.

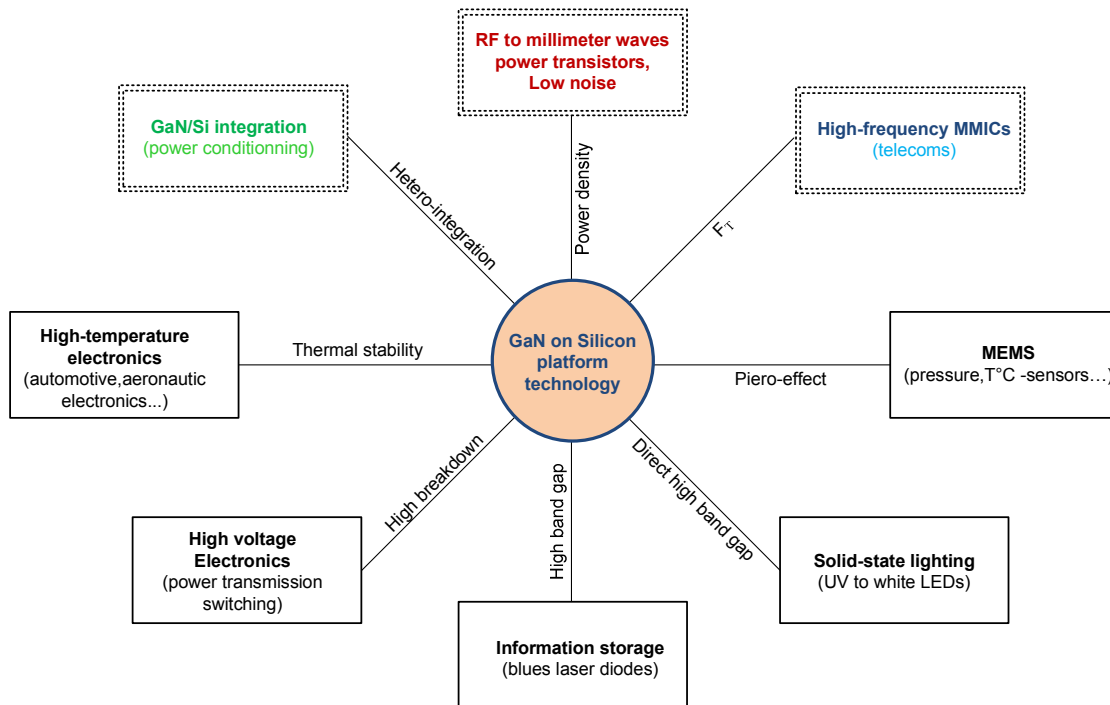


Figure 1.2 : Description des domaines d'applications faisant usage du nitrure de gallium. L'accent est donné au GaN sur substrat Silicium pour sa co-intégration avec la technologie dominante.

VI. Disponibilités des substrats pour la croissance de GaN

Une des principales limitations rencontrées pour le développement du marché des composés III-N est liée à la difficulté d'élaboration de ces matériaux. Les performances, la fiabilité et la reproductibilité dans l'élaboration de dispositifs à base de composés III-N sont aujourd'hui principalement conditionnées par l'absence de substrat GaN ou AlN wurtzite disponible avec des qualités et des coûts compatibles avec la production à l'échelle industrielle. Ceci a pour conséquence le recours à l'hétéroépitaxie de GaN sur des substrats de nature différente tels que le saphir (Al_2O_3), le carbure de silicium (SiC), le silicium (Si) ou autres supports. D'ici quelques années, des progrès significatifs seront sans doute réalisés dans la synthèse à l'échelle industrielle de pseudo-substrats GaN (GaN autosupporté de 4 pouces) compatibles avec la réalisation de dispositifs hyperfréquences. Mais le prix de tels pseudo-substrats reste encore très élevé (30 à 100 fois supérieur à celui du silicium) et n'est pas prévu dans les prévisions pour les 20 ans à venir.

Notons cependant que, pour des applications de puissance, le substrat doit présenter une bonne conductivité thermique. Les substrats de GaN ou de AlN disponibles sont actuellement chers, ont un dopage résiduel très élevé (sauf quand il est compensé) et sont inférieurs à 2 pouces. Les substrats de SiC S.I., lesquels présentent un désaccord en paramètre de maille de moins de 3%, sont chers, font 4 pouces ou moins et comportent beaucoup de défauts. Etant donné sa mauvaise conductivité thermique, le substrat de saphir ne sert que de support de test ou pour élaborer du GaN autosupporté (free-standing) avec ou sans procédé ELOG. Dans ce dernier cas, le taux de dislocations varie de quelques 10^7 à 10^9 cm^{-2} . Une action a été menée dans l'équipe sur des substrats composites avec le procédé SMART-Cut qui consiste à coller une couche de Si ou SiC monocristallin de $1 \mu\text{m}$ d'épaisseur sur du SiC polycristallin lié via une couche d'oxyde de silicium. Cette dernière couche s'est avéré être une barrière thermique qui n'a pas permis d'atteindre les performances désirées. D'autres tentatives ont tout autant échoué comme la reprise de croissance de GaN sur diamant mono- ou polycristallin, ou encore sur d'autres oxydes (quartz, verre....).

La stratégie de l'équipe « Composants et Dispositifs Microondes de Puissance » à l'IEMN était simple. Développer dans le cadre du laboratoire commun TIGER (Thalès III-V Lab/IEMN), les activités technologiques sur substrat SiC et répondre aux besoins de la DGA. Mais aussi développer une activité phare sur substrat silicium dès 2002 car nous avons deux atouts : le faible coût du substrat de silicium, donc un intérêt certain de la communauté scientifique internationale et le soutien inédit de deux épitaxieurs reconnus : PICOGIGA et le CRHEA. Vu le désaccord en paramètre de maille (33% amené à 16-17%), le challenge était audacieux et les années passées nous ont confortées dans notre choix.

VII. Défauts matériaux, dispersion, autoéchauffement et impact des pièges

La quasi-absence de substrat issus de germe de nitrure de gallium nécessite d'avoir recours à la croissance hétéroépitaxiale. L'épitaxie de GaN sur un substrat de nature différente débute par la formation d'îlots de quelques dizaines à quelques centaines de nanomètres de diamètre. Ce type de croissance (hétéroépitaxie) est dit colonnaire en raison de la longueur de cohérence élevée des grains suivant l'axe de croissance [0001] et réduite dans le plan de croissance (assimilée à la taille moyenne des grains cristallographiques). Ces îlots coalescent rapidement, mais les désorientations relatives de leurs axes de croissance [0001] (appelées tilt) et leurs désorientations dans le plan (appelées twist) sont responsables de la formation de dislocations traversantes aux joints de grains. Les dislocations traversantes de type a sont présentes aux joints de grains et permettent d'accommoder le twist entre les grains cristallographiques (croissance colonnaire des nitrures), tandis que les dislocations traversantes de type c se forment durant la croissance, à la jonction de deux marches atomiques, et accommodent le tilt entre les grains. Lorsqu'une couche de GaN est hétéroépitaxiée sur un matériau de paramètre de maille différent, la croissance peut être initialement pseudomorphique : le GaN adopte le paramètre de maille du substrat, faisant apparaître une contrainte biaxiale. Celle-ci induit une déformation de la couche de GaN de manière réversible : on parle de déformation élastique. Au-delà d'une certaine épaisseur critique de GaN, les contraintes sont si importantes que le film relaxe l'énergie emmagasinée en créant des défauts cristallins. La croissance du film se poursuit avec son propre paramètre de maille (croissance métamorphique). Enfin, lorsque les contraintes ne peuvent être relaxées par l'introduction ou le glissement de dislocations, par exemple lors du refroidissement post-croissance à température ambiante, le film de GaN peut alors se trouver fissuré.

En conséquence, lors de la croissance du GaN, trois types de dislocations traversantes peuvent se propager de l'interface substrat/nitrure vers la surface à travers le film : les dislocations coin (type a), les dislocations vis (type c) et les dislocations mixtes (type a+c). Les dislocations traversantes de type a sont présentes aux joints de grains et permettent d'accommoder le twist entre les grains cristallographiques (croissance colonnaire des nitrures), tandis que les dislocations traversantes de type c se forment durant la croissance, à la jonction de deux marches atomiques, et accommodent le tilt entre les grains (cf. Figure 1.3).

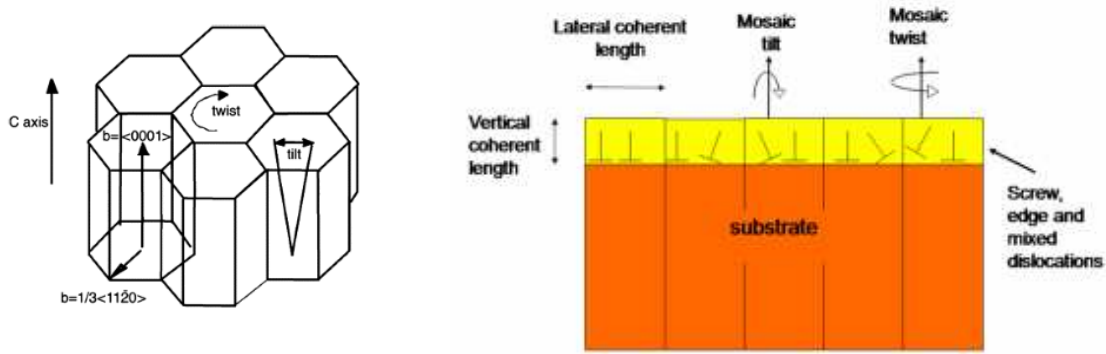


Figure 1.3 : Description de la croissance de GaN sur Si et des défauts structuraux associés.

Plusieurs équipes ont rapporté l'activité électrique des dislocations traversantes dans le GaN wurtzite. Elle est reliée à leur structure atomique et est principalement dominée par la nature des liaisons atomiques présentes au cœur des dislocations. Théorie et expérience semblent s'accorder autour du fait que les dislocations traversantes vis (type c) semblent avoir une activité électrique plus importante [NOR01] que les dislocations traversantes coin (type a) [LEE00]. Par conséquent, les dislocations traversantes de type c semblent contribuer davantage au courant de fuite que les dislocations coin. Par ailleurs, les dislocations traversantes coin génèrent des défauts de type accepteurs qui vont capturer des électrons de la bande de conduction dans des semiconducteurs de type N [LOR04]. Il est admis que le GaN est non intentionnellement dopé et possède un dopage résiduel de type N. Les dislocations traversantes de type accepteur présentes dans le GaN, induisent une compensation à ce dopage résiduel et entraînent la diffusion des électrons libres. Ce comportement se traduit par une dégradation drastique de la mobilité électronique avec le taux de dislocations traversantes [SAF13]. La solution apportée pour pallier à ce problème a été soit d'augmenter l'épaisseur des couches de GaN, soit d'utiliser le procédé de croissance latérale (ELOG). Dans ces deux cas, plus l'épaisseur de GaN est élevée, plus le taux de dislocations diminue (2 μm de GaN donne 10^9cm^{-2} dislocations et 1mm de GaN donne 10^6cm^{-2} dislocations). Notons que les temps de croissance sont très longs et que cette solution n'est appréciée ni des épitaxieurs, ni des technologues à cause du coût et de la facilité à réaliser le process technologique. Aussi, plusieurs impuretés de compensation ont été ajoutées au GaN pour réduire le dopage résiduel de type N. Le carbone en site substitutionnel du Ga est semble-t-il une solution efficace en régime DC mais il forme un niveau profond dans la bande interdite.

Un accent particulier a été mis sur l'ingénierie de contrainte de la couche de nucléation pour réduire ce taux de dislocations. Nous traiterons de ce thème dans la section X.

VIII. Pourquoi GaN/Si, comparaison avec GaN/SiC

Pour rivaliser, voire surpasser les performances des solutions technologiques existantes (MOS de silicium, IGBT, diodes, et dispositifs SiC), il faut que les HEMTs GaN soient très performant et évidemment pas cher à la production. Ce qui n'est pas une tâche facile quand on connaît les difficultés pour faire croître du GaN sur un substrat étranger.

De tous les substrats disponibles et dont la technologie est suffisamment mature, deux seulement sortent du lot : le SiC évidemment et le Silicium.

Le silicium présente un attrait important de par son prix très compétitif, la taille des substrats disponibles (jusqu'à 12") et une conductivité thermique « raisonnable » (comparable au GaN en film mince) qui en font un candidat de choix pour les composants de puissance. Il est disponible sous différentes orientations cristallographiques comme la plus commune (100) mais existe aussi sous les orientations (111) et (110). Notons que l'orientation privilégiée dans la filière silicium est la (001) et non pas la (111) couramment utilisée. Un autre avantage est sa compatibilité avec la technologie silicium (MOSFETs) ou le fait de pouvoir transférer la couche active sur un support hôte (diamant polycristallin, support flexible...). Cependant, la croissance des nitrures d'élément III sur substrat silicium est particulièrement délicate car les difficultés liées aux différences de paramètres de maille et de coefficients d'expansion thermique sont encore plus critiques que sur substrat saphir ou SiC. Ces difficultés peuvent être à l'origine de phénomènes de courbures excessives voire de fissurations des films déposés. Le taux de dislocations y est très élevé d'où la présence d'un grand nombre de défauts cristallins et des interfaces rugueuses. Les contraintes résiduelles et leur distribution dans le matériau peuvent, s'ils ne sont pas maîtrisées, dégrader fortement les performances des dispositifs électroniques. Comme mentionné dans le paragraphe VII, ces défauts structuraux, principalement des dislocations (souvent liées à des impuretés), peuvent se comporter comme des pièges pour les électrons limitant ainsi les propriétés de transport (mobilité, vitesse) et in-homogénéiser le potentiel de surface et donc nuire au bon fonctionnement du composant.

IX. les substrats d'accueil du GaN : Si(111), Si(100) et Si(110), comparaison des propriétés

Comme mentionné auparavant, la croissance de GaN sur substrat silicium est difficile en raison de la forte réactivité en surface entre le silicium et le gallium, mais aussi en raison du fort désaccord en paramètre de maille et des écarts dans les coefficients de dilatation thermique. Ceux-ci sont responsables de l'énorme densité de dislocations et de la contrainte résiduelle à l'origine de la fissuration des couches.

Plusieurs paradigmes ont été trouvés pour maîtriser ces difficultés :

- La réduction du taux de dislocations et le contrôle de la contrainte résiduelle de la couche tampon de GaN au moyen d'empilements de couches à base de AlN, GaN et AlGaIn, permet de synthétiser des couches de GaN épaisses (plusieurs micromètres d'épaisseur) et hautement résistives.

- La composition de la couche active (couche de cap, épaisseur de la barrière et composition) dépend de l'application visée. Par exemple, les exigences nécessaires aux HEMT GaN pour la puissance en hyperfréquence nécessitent des couches barrières fines dont l'épaisseur fait varier la tension seuil. Autre exemple, pour maîtriser la stabilité de l'alliage AlGaIn de la couche barrière pour de forts taux d'aluminium, beaucoup d'épitaxieurs ont recours à une couche de cap en SiN qui modifie la contrainte résiduelle de la dite couche barrière qui elle-même fait évoluer la tension seuil du transistor. Ajoutons à cela que la contrainte induite par la couche de passivation influe aussi la couche barrière, sur la densité des états de surface et sur la hauteur de barrière de la grille, de ce fait, la tension seuil s'en trouve encore modulée. L'ensemble de ces effets montre qu'il est impératif de trouver un compromis entre un ensemble de paramètres afin de définir la composition précise d'une hétérostructure pour une application spécifique donnée.

Propriétés structurales des différentes épitaxies de GaN sur substrat silicium orienté (100), (111) and (110)

Le silicium HR (>20k Ω .cm) offre l'avantage d'une vaste disponibilité en taille et en orientation cristallographique. L'orientation (111), privilégiée des épitaxieurs, présente un fort désaccord en paramètre de maille de près de 17% et permet la croissance de la phase wurtzite de la couche de nucléation AlN (Figure 1.4) avec une qualité cristallographique « moyenne ».

Toujours dans l'objectif de réaliser une technologie très bas coût, des épitaxies sur Si(001) HR (>10k Ω .cm) ont été testées dans le cadre du laboratoire commun entre ST-Microelectronics et le CHREA. L'inconvénient de l'orientation (100) est que la maille élémentaire de l'AlN est désorientée de 30° vis-à-vis de celle du Silicium (cf. Figure 1.4). La différence des coefficients de dilatation thermique entre AlN et Si(100) est si élevée que la couche de nucléation AlN présente alors davantage de défauts structuraux que sur Si(111). Bien que le choix technologique soit pertinent, la croissance de GaN monocristallin sur Si (001) est plus difficile parce que la surface (001) présente deux domaines désalignés de 6° (présence de deux types de terrasses avec une reconstruction en surface 2x1 et 1x2 alternée par une rotation de 90°). C'est pourquoi la croissance monocristalline de GaN ne peut excéder les 1 μ m sans présenter de fissures. La couche présente néanmoins un taux de dislocations de 4 à 20 fois plus élevé que sur Si(111).

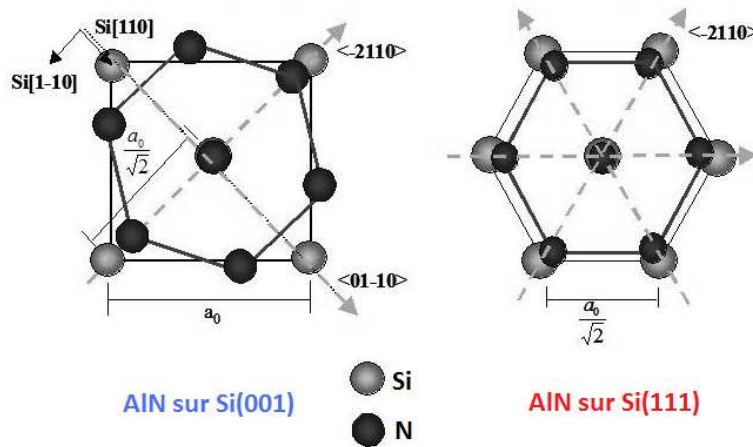


Figure 1.4 : Relation d'épitaxie entre l'AlN et le Silicium (001) et (111) dans l'orientation prise lors de la croissance [GER09-T][GER10].

Pour palier à cet inconvénient, des études sur la synthèse d'hétérostructures à nitrures III-N sur Si(110), ont été réalisées et constituent une première puisque cette face du silicium n'avait pas été explorée avant 2006. L'orientation [100] n'est pas isotrope, elle offre une unique orientation dans le plan en quasi-accord en paramètre de maille avec AlN dans une direction du plan. La rugosité et la morphologie de surface sont très similaires aux couches épitaxiées sur Si(111). De ce fait, elle permet une croissance de couches d'AlN similaires au Si(111) et est plus adaptée pour une intégration avec des dispositifs MOS Si (mobilité des trous plus importante suivant la direction (110))[GER10].

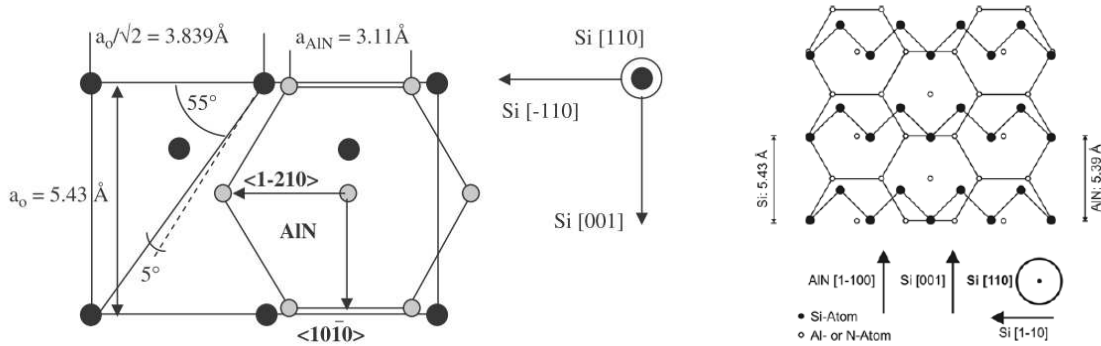


Figure 1.5 : Vue de dessus du réseau w-AlN et Si (110) dans la direction de croissance [COR09].

Notre tâche a été d'évaluer les potentialités des hétérostructures AlGaN/GaN sur ces différents substrats. L'étude conjointe entre l'IEMN et le CRHEA sur les propriétés matériau GaN cru sur les différents substrats de silicium d'orientation (001), (111) et (110) [COR09].montre que l'état de contrainte pour les orientations (110) et (111) sont similaires. Une étude prévue sur des HEMTs GaN sous fort champ électrique pourrait nous montrer une différence sur les propriétés de transport dans le plan du gaz 2D.

Le Tableau 1 résume l'état de l'art des propriétés de transport en régime de faible injection de HEMTs AlGaIn/GaN obtenus sur les différents substrats de silicium (sous ma direction)

HEMT	R ($\Omega/$)	μ_n ($\text{cm}^2/\text{V.s}$)	n_s ($\times 10^{12} \text{cm}^{-2}$)
Si(100)	440/352*	1800/1718*	8/10.4*
Si(110)	340/245*	2150/2045*	8.5/12.1*
Si(111)	355/300*	2160/2000*	9/10.6*

Tableau 1 : Récapitulatif des propriétés de transport obtenues à faible champ sur des hétérostructures types réalisées sur les 3 orientations cristallines qu'offre le substrat de silicium. Les étoiles indiquent les résultats obtenus sur les mêmes plaques après passivation et recuit.

X. Procédé technologique : solutions matériau, solution technologique

Les différentes étapes d'un procédé technologique pour la réalisation d'un transistor de puissance en hyperfréquence comportent principalement les niveaux :

0. Nettoyage des plaques (élimination des poussières, déchets organiques et autres impuretés dans plusieurs bains d'acides). A ce niveau, certains composants nécessitent une désoxydation suivie d'une pré-passivation par un diélectrique de protection.

1. Dépôt des marques d'alignement en lithographie optique ou en électronique. Une attention particulière est donnée à sa tenue mécanique et à son contraste en lithographie électronique.

2. Dépôts d'un multicouche métallique pour former les contacts ohmiques après recuit. Les particularités liées à cette étape critique pour le bon fonctionnement du transistor sont développées en Section 1 (formation, adhérence, rugosité, recess, avec ou sans plots d'or, re-croissance des contacts ohmiques GaN n^{++} ...).

3. Isolation des composants par mesa ou par implantation ionique (He^+ ou N^+)

(3'. Prétraitement de surface puis dépôt du diélectrique isolant de grille (SiO_2 , SiN , Al_2O_3 , $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, ZrO_2 , ZnO , BN ...) si fabrication d'un MIS- ou MOS-HEMT)

4. Lithographie et dépôt métallique du contact de grille (grille en Té ou grille gamma). Cette étape peut être faite avec un procédé comportant un bi-couches ou un tri-couches avec ou sans recess de grille.

(4'. Prétraitement de surface puis passivation (SiO_2 , SiN , $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$...))

Notons que le prétraitement de surface est un autre point critique côté process technologique. Une attention particulière est donnée Section 2.

5. Dépôt d'une plaque de champ (Field-plate) si nécessaire

6. Dépôt des plots d'épaissement (Ti/Au)

7. Réalisation des ponts (niveau BCB ou ponts à air)

La Figure 1.6 illustre ces différentes étapes :

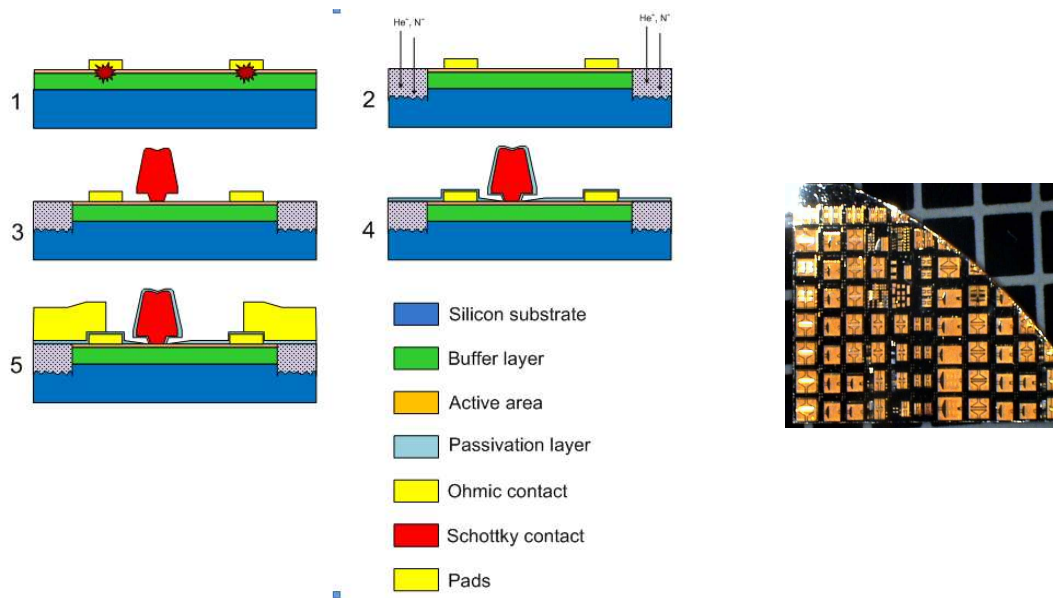


Figure 1.6 : Représentation schématique du procédé de fabrication de base d'un transistor HEMT GaN. Les étapes critiques sont les contacts ohmiques, la grille et le prétraitement de la surface avant passivation. Photo d'une plaque processée sur substrat silicium où il est possible de distinguer les transistors multi-doigts.

Plusieurs actions peuvent être menées pour améliorer les performances du transistor côté montée en fréquence et côté montée en puissance. Les grandes lignes (liste non exhaustive) qui détaillent ces actions sont décrites ci-dessous :

Performances fréquentielles

Les actions sur le profil de grille, sur la barrière et sur les couches tampon/nucléation sont étroitement liées à la charge électrique et à sa distribution dans l'hétérostructure.

Ingénierie de la grille

La montée en fréquence est limitée par les effets de canaux courts. Pour repousser cette limite, le rapport L_g/a (longueur de grille sur épaisseur de la couche barrière jusqu'au 2DEG) doit être supérieur à 15 (au lieu de 5 pour les SC à petite bande interdite) [JEN07]. Il faut par conséquent, quand la couche barrière est trop épaisse, réduire l'épaisseur sous le contact de grille. Dans les procédés technologiques sur les matériaux semiconducteurs III-V à petit gap, il est souvent réalisé un simple ou un double fossé de grille (ou recess) via une couche d'arrêt. Cela permet d'améliorer notamment la commande de grille (transconductance g_m). Dans le cas des matériaux semiconducteurs polaires comme les matériaux III-N à structure wurtzite, le recess génère des états de surface qui dégradent fortement les performances du transistor. Les gravures à base de plasmas sont donc à proscrire à chaque fois que nécessaire à l'exception du digital etching (N cycles de gravure chimique d'une

monocouche oxydée (de la barrière) sous plasma d'oxygène). Dans ce cas, la densité d'états de surface est toujours supérieure à $3 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ (valeur déterminée par PLS3 à partir du modèle DIGS). La seconde solution pour ne pas limiter la montée en fréquence est d'utiliser une technologie à grille sub-100nm, à résistance réduite (c'est-à-dire une forte épaisseur de métallisation. Celle-ci doit, en plus, être éloignée de la surface pour réduire les capacités parasites C_{GS} et C_{GD}), présenter une excellente adhérence (pour la tenue mécanique) et un travail de sortie élevé (pour former un contact redresseur type Shottky). Une grille (ultra-)courte permet aussi de réduire le temps de transit des porteurs sous la grille et par conséquent d'espérer maximaliser les fréquences de travail possible (F_c , F_{max}). Deux technologies possibles ont été testées : la grille en Té et la grille Gamma, associées à des design de transistor de tailles réduites (distance source-drain) afin de réduire les résistances d'accès (de source R_s et de drain R_d).

Ingénierie de la couche de nucléation

Depuis plus de deux décennies, la croissance d'une couche de nucléation AlN est restée la meilleure solution pour éviter la gravure du silicium par le gallium. Cependant, cette couche joue un rôle majeur dans la qualité structurale de l'interface avec le substrat, laquelle va conditionner l'isolation électrique du transistor. De part sa nature polaire, la structure wurtzite de l'AlN induit des charges à l'interface avec le silicium lesquelles génèrent des courants de fuite et par conséquent un claquage préaturé de la structure à champ modéré. Aussi, le substrat de silicium peut se trouver dopé sous la surface par des atomes d'aluminium (et parfois même de gallium en fonction du complexe formé), la couche de nucléation AlN elle-même peut se trouver dopée avec des dopants Si diffusant du substrat. L'ensemble de ces dopages involontaires augmente les courants de fuites en régime DC. Dans le cas où la couche de nucléation ne fuit pas, elle présente une capacité parasite induite par l'interface enterrée conductrice, laquelle augmente les fuites de courant en RF. Ceci a été partiellement résolu par l'épitaxie d'une couche AlN basse température qui réduit la réaction avec le substrat de silicium mais qui dégrade la qualité cristalline de la couche. Là encore, un compromis doit être trouvé pour maximaliser les performances du transistor, en commençant la croissance à basse température puis en augmentant rapidement la température de croissance. Dans ce cas, la coalescence des grains de AlN nucléés à basse température induit une contrainte résiduelle très élevée dans la première dizaine de nanomètre de l'interface Si/AlN, lesquelles génèrent des dislocations pour relaxer la couche. Ces mêmes défauts (dislocations vis, diffusion de Ga) génèrent des fuites conséquentes. Une alternative pour répondre à ce problème (décrit en Projet 1 – Thème 1) est d'introduire une couche de 3C-SiC à l'interface par CVD et de poursuivre la croissance avec AlN à haute température.

Ingénierie de la couche tampon (Al,Ga)N

La couche tampon la plus simple est constituée d'une couche de GaN épaisse cru directement sur la couche de nucléation. Pour éviter de faire fissurer la couche de GaN lors du refroidissement de la couche après croissance, il faut y introduire une couche de GaN en compression laquelle est obtenue par une ingénierie en température.

Cependant, comme le niveau de dopage résiduel de type N dans ce-dernier reste encore relativement élevé, la compensation avec le carbone, le fer et béryllium est souvent nécessaire pour fabriquer des dispositifs avec les performances requises. Mais là encore, le dopage intentionnel par ces éléments modifie la contrainte résiduelle. Une autre solution pour réduire le taux de dislocations est le procédé ELOG qui consiste à déposer un masque de SiN structuré pour filtrer les dislocations traversantes. Cependant, le silicium est un donneur et la croissance en trois dimensions améliore l'incorporation d'autres impuretés qui agissent comme donneurs résiduels tels que l'oxygène.

En outre, toutes ces méthodes favorisent la relaxation des contraintes mais nécessitent la combinaison de plusieurs stratégies d'atténuation de la contrainte.

Pour réduire encore le taux de dislocations traversantes, la contrainte résiduelle et augmenter la résistivité électrique, plusieurs solutions ont été testées :

- La première consiste à déposer des couches intermédiaires AlGaN en sandwich entre deux couches de GaN. La couche d'AlGaN peut être homogène (en taux d'aluminium) ou comporter un taux d'aluminium graduel (du plus faible au plus fortes valeurs d'aluminium). Cela permet d'accommoder le paramètre de maille soit en continu soit progressivement de manière à annihiler une partie des dislocations. Le deuxième intérêt réside dans la polarisation négative induite par ce graduel de contrainte qui repousse les électrons libres de cette région et améliore le caractère résistif de la couche de façon à avoir des tensions de claquage de plus de 600V.

- Une autre solution consiste à multiplier les empilements de couches AlN/(Al,Ga)N ou GaN/(Al,Ga)N suffisamment épaisses, de façon à ce que chaque interface réduise la contrainte d'interface, ce qui permet d'atteindre des épaisseurs d'AlGaN de $3\mu\text{m}$ d'épaisseur associée à des pertes aussi faible que 0.4 dB/mm @ 50GHz.

- Pour éviter la fissuration de la couche tampon de GaN, une couche d'AlN basse-température est introduite (LT-AlN) pour induire un processus de détente rapide du film sur GaN non-pseudomorphique, sans générer de dislocations traversantes supplémentaires. Dans ce cas, le GaN cru présente une contrainte en compression laquelle permet sous certaines conditions et en fonction des couches sous-jacentes la croissance de couches de GaN épaisses jusqu'à $4\mu\text{m}$ d'épaisseur nécessaire pour augmenter la tension de claquage de la couche tampon. Cependant, ce procédé contenant de multiples interfaces présente néanmoins ses limites ($BV < 2\text{kV}$) et ne permet pas

d'atteindre le champ de claquage théorique en raison d'un courant de fuite toujours trop conséquent.

Enfin, cette couche tampon de GaN laquelle présente un dopage non intentionnel peut être compensée par les éléments Fe ou C. Cela permet de réduire les courants de fuite et les capacités parasites associées. Il est très facile de l'observer lorsque l'on quantifie les fuites de courant d'un transistor HEMT GaN (gate lag & drain lag ou retard à l'établissement du courant de drain après application d'un court stimulus de la tension V_{ds} , quand il est lié à des pièges dans les couches enterrées respectivement sous la grille et sous la grille côté drain).

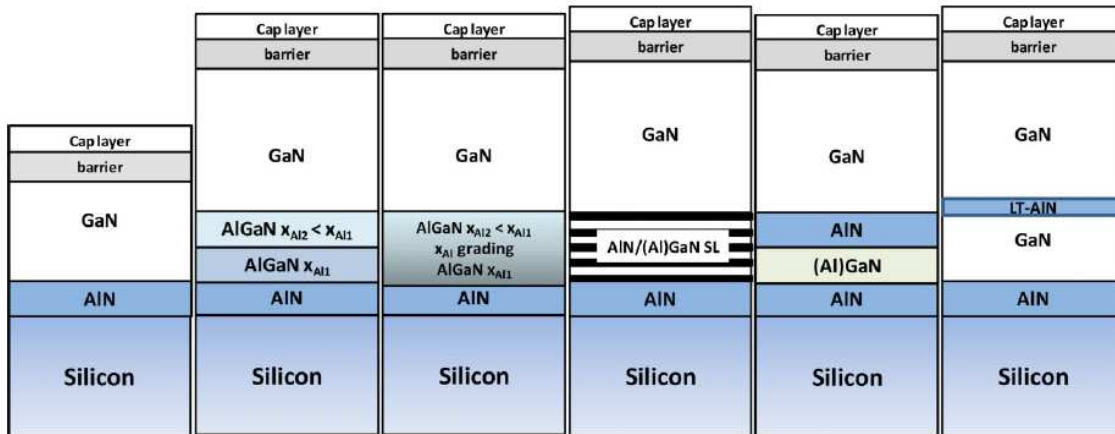


Figure 1.7 : Vue en coupe des différentes hétérostructures HEMT crues sur substrat Silicium pour synthétiser une couche de GaN épaisse à moindre dislocations tendant vers la relaxation. De gauche à droite, on y trouve la couche tampon classique GaN, la couche tampon de GaN sur des couches de AlGaN à taux d'aluminium fixe pour chaque couche, une couche tampon de GaN sur une couche AlGaN à taux d'aluminium graduel, celle composée d'un super-réseau à mono-couches AlN/(Al), celle comportant une intercouche (Al)GaN épaisse entre 2 couches de AlN et la dernière comportant une intercouche AlN basse température.

Ingénierie de la back-barrière

Une couche (Al,B,In)GaN (cf. paragraphe suivant : « Transistor HEMT à base de GaN boré ») peut être utilisée comme couche barrière électrostatique face arrière de la zone active de l'hétérostructure DH-HEMT (back-barrier). Cela permet notamment d'améliorer le confinement des porteurs dans le puits à 2 dimensions à l'hétérointerface entre le canal GaN et la couche barrière. Dans le cas de l'AlGaIn, le taux d'aluminium ne doit pas être trop élevé au risque d'augmenter la contrainte et le taux de défauts structuraux dans la couche. Elle est fixée à 8-10% pour des applications de puissance hyperfréquence et à 18-22% pour des couches destinées à l'électronique de puissance en commutation. Cela se traduit par une augmentation de la résistance carrée de la couche (n_s diminue) laquelle peut être compensée par une augmentation du taux d'aluminium dans la couche barrière. Je n'ai pas eu l'opportunité d'étudier le cas InGaIn mais nous avons fait pour B GaN (contrat GABORE). Dans ce cas, le meilleur compromis a été trouvé pour des taux de bore ne devant pas excéder les 1% atomique placée en amont de la couche canal GaN. Dans le cas d'une couche d'arrêt,

l'épaisseur de la couche de B_xGa_{1-x}N ne doit pas excéder 2 monocouches pour des taux de bore inférieur à 2%.

Transistor HEMT GaN boré

L'intérêt pratique des SC III-V est encore considérablement renforcé par la possibilité de réaliser des alliages par substitution partielle de l'un des éléments par un autre de la même colonne. On sait par exemple obtenir des alliages ternaires du type (B,Al)GaN. La Figure 1.8 représente les variations de la largeur de bande interdite des alliages possibles à base de nitrures X-N en fonction du paramètre cristallin ainsi que la position des SC à phase cubique comme le BN et le diamant [VIN12].

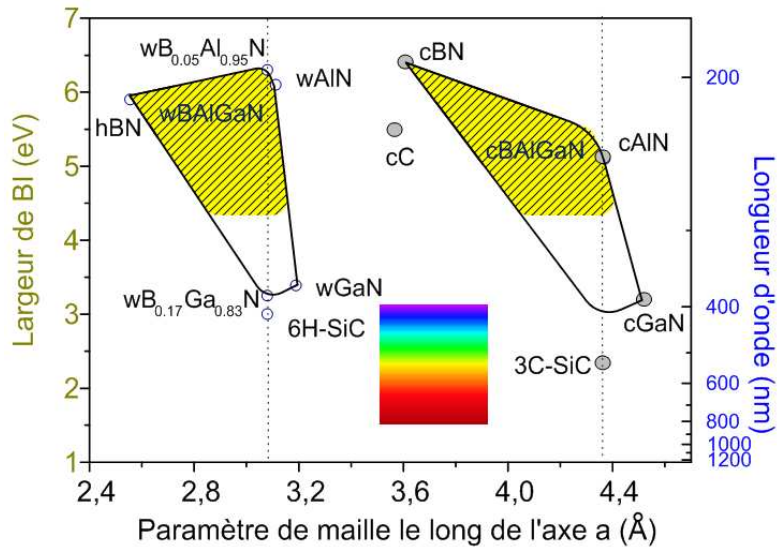


Figure 1.8: Largeur de bande interdite en fonction du paramètre cristallin pour les alliages III-V à base de nitrures X-N et diamant.

Ingénierie de la barrière : de la barrière AlGaN à la barrière AlN

La densité de porteur d'un HEMT GaN est principalement déterminée par le taux d'aluminium dans la couche barrière (cf. Figure 1.9). Pendant la croissance, la contrainte en tension de la couche barrière s'ajoute à celle de la déformation de la couche tampon. Ainsi, l'augmentation de la teneur en aluminium de la couche fait augmenter l'énergie élastique stockée dans la couche barrière et rend la dite couche métastable. C'est pourquoi cette dernière va se relaxer partiellement à partir de 38 % d'aluminium et totalement après 67 % d'aluminium. Ceci induit une dégradation de la densité de porteurs ainsi que la mobilité électronique dans le 2DEG. En outre, à la fin de la croissance, la déformation thermique associée au refroidissement se combine avec la contrainte en tension et rend le risque de fissuration plus probable [GER09]. L'obtention de transistors Normally-ON ou Normally-OFF (pour la puissance en hyperfréquence ou pour l'électronique de puissance en commutation) nécessite alors de réduire l'épaisseur de la couche barrière lorsque le taux d'aluminium augmente.

Cependant, cette réduction dégrade les propriétés de transport (R_{\square} du 2DEG augmente, n_s diminue), c'est pourquoi il est nécessaire de trouver un compromis. Pour limiter ces compromis, un recess de grille (et/ou de contact ohmique) est nécessaire [GER09].

D'autres auteurs préfèrent utiliser une couche barrière InAlN avec un taux d'indium de 18% pour être en accord en paramètre de maille avec GaN. La discontinuité de bandes à l'hétérointerface avec GaN s'en trouve augmentée ce qui permet de réduire l'épaisseur de la couche barrière pour une densité d'électrons supérieure à quelques 10^{13} électrons/cm² (évitant ainsi de réaliser un éventuel recess). C'est une solution théorique qui en pratique donne de moins bons résultats qu'espérés. Le désordre d'alliage y est très important tout comme la rugosité géométrique et électrique à l'hétérointerface avec le canal GaN. Nous reviendrons sur ce point en Section 2. Un autre inconvénient majeur souvent négligé par la communauté est que l'effet d'autoéchauffement est plus marqué lorsque la densité de porteurs et plus élevée d'où une dégradation plus rapide des propriétés de transport.

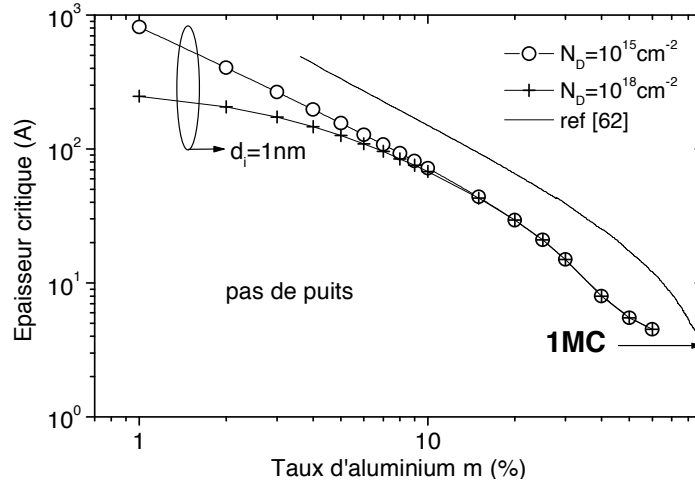


Figure I.9 : Epaisseur minimale de barrière $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ en fonction du taux d'aluminium (pour une structure nid et une seconde dopée à 10^{18} cm^{-3}) permettant d'obtenir un gaz d'électrons bidimensionnelle (ici $x=m$) [GER09-T].

Couche d'exclusion AlN (appelée quelquefois couche espaceur)

La présence de cette couche intermédiaire entre la couche barrière et le canal GaN modifie la distribution des charges de polarisation de manière à repousser les électrons vers le canal. Le confinement des électrons s'en trouve amélioré et les propriétés de transport aussi. Généralement, elle présente une épaisseur de 1nm lorsqu'elle est associée à des couches barrières de type ternaires ou quaternaires (AlGaInN/AlN, InAlN/AlN, AlGaInN/AlN ou AlGaInN/GaN/AlN) et est inhérente aux couches barrières composées d'un super-réseau $n \times (\text{AlN}/\text{GaN})$. dans ce dernier cas, le taux d'aluminium est fixé par l'épaisseur des couches d'AlN et de GaN. Le gradient de polarisation peut être fixé ou graduel en fonction de l'application envisagée à la dite couche. Enfin, selon le procédé de croissance utilisé, la couche barrière et la couche d'exclusion ne font plus qu'une et unique couche

AlN dont l'épaisseur doit être suffisamment élevée pour former un puits et l'alimenter en électrons via les donneurs de surface mais inférieure à l'épaisseur critique pour éviter toute fissuration. L'épaisseur théorique pour cette épaisseur critique donne une valeur autour de 3 à 5 nm selon les paramètres utilisés. L'utilisation d'une couche barrière d'AlN semble donc un atout pour réduire l'épaisseur de la couche barrière et améliorer les propriétés de transport d'un HEMT GaN. Cependant, à ce stade de l'hétéroépitaxie, un point critique apparaît pour la réalisation des contacts ohmiques. Il est impératif pour un bon fonctionnement du transistor de réduire les résistances d'accès. Cependant, plus le taux d'aluminium est élevé et lorsque la couche barrière contient une couche d'exclusion, la conduction électrique au travers de ces couches barrières se trouve nettement dégradée. En effet, une partie de la résistance d'accès est la résistance de contact entre les contacts ohmiques et le gaz d'électrons. Le coefficient de transmission calculé pour les électrons par effet tunnel dans ce dernier cas prédit que, même que pour une épaisseur de quelques nanomètres, l'effet tunnel à travers l'AlN reste faible. L'émission thermionique est aussi sensiblement atténuée en raison de l'augmentation de la hauteur de la barrière de AlN. Une première conséquence est qu'en absence de défauts (cas supposé d'une couche d'AlN de « qualité » électronique), les fuites de courant assisté par effet tunnel via des pièges est limité dans le HEMT AlN/GaN. Cependant, elle constitue un avantage pour les contacts ohmiques mais pas pour le contact de grille car l'amincissement de la couche barrière favorise les fuites de courant par effet tunnel au travers de la dite couche barrière via des pièges profonds. Elle constitue par conséquent un bon indicateur de la qualité cristalline de la couche barrière. Ceci peut être résolu malgré la dégradation de la commande de grille par son isolation via une couche diélectrique (MISHEMT). La seconde conséquence est que pour obtenir de faible résistance au niveau des contacts ohmiques, il sera nécessaire de réaliser une gravure partielle de la couche barrière. Dans ce cas, une gravure ionique est préférable à une gravure par digital etching beaucoup plus longue et fastidieuse.

Ingénierie de la couche de passivation

La relaxation de la couche barrière peut être totalement ou partiellement inhibée en finissant la croissance par une couche de cap GaN ou SiN in-situ de quelques nanomètres d'épaisseur. La couche barrière peut être encore plus stabilisée par une passivation ex-situ dont la contrainte interne peut compenser celle de la couche barrière en surface de l'hétérostructure de manière à annuler l'énergie élastique à l'interface couche de passivation/HEMT. Certains auteurs utilisent un empilement de couches diélectriques en fonction de leur permittivité diélectrique laquelle permet de mieux confiner le champ électrique en surface, éloigner la surface de l'hétérostructure de l'extérieur et limiter le claquage de surface.

Ingénierie des contacts ohmiques

Plusieurs méthodes permettent d'avoir un contact ohmique dont les performances sont fonction de l'application envisagée. Le multicouche le plus couramment utilisé est basé sur le bicouche Ti/Al (cf. Section 1). Les couches métalliques finissant le contact sont composées d'une couche barrière (Ni,Mo,...) plutôt réfractaire et l'or pour la reprises des plots d'épaissement. Il se forme un eutectique conducteur entre le contact métallique et le gaz d'électrons après un recuit flash à haute température (<900°C). Lorsque la couche barrière comporte un fort taux d'aluminium (ou une couche graduelle en aluminium) ou une couche d'exclusion AlN, un recess y est nécessaire pour favoriser le passage du courant par effet tunnel. Nous avons aussi essayé l'implantation avec des atomes de silicium mais la température d'activation y est si élevée (1250°C) qu'une grande partie des dopants ne s'ionise pas, formant ainsi des défauts en site interstitiel lesquels peuvent diffuser jusque sous la grille. Aujourd'hui, de plus en plus de technologues ont recours à la reprise de croissance épitaxiale de $n^{++}\text{GaN}$ afin de réduire les résistances d'accès nécessaires aux fréquences de travail désirées. Dans ce dernier cas, le recuit se fait à basse température, permettant de la même manière de réduire la rugosité de surface (point crucial pour la réalisation de MMICs reproductibles) (cf. Section 1 / Thème 1).

Performances en puissance

Les performances en puissance d'un transistor HEMT GaN sont conditionnées par le choix de l'hétérostructure (vu précédemment) mais le profil du champ électrique côté drain et des phénomènes mettant en jeu la surface conditionne le champ électrique qu'il est possible d'appliquer. En effet, sous polarisation électrique, le champ électrique se trouve confiné juste en sortie de grille de façon à induire une contrainte mécanique jusqu'à la rupture du réseau cristallin (générant ainsi des fuites de courant de grille irréversibles). Pour y remédier et pour pouvoir convertir la tension appliquée en DC vers un maximum de puissance en RF, il est nécessaire d'appliquer des tensions en DC les plus élevées possibles à la limite du champ critique de claquage (cette étude a été réalisée en prenant en compte de l'effet piézoélectrique inverse [GER09-T]). Pour y parvenir, plusieurs solutions sont possibles :

L'Ingénierie du champ électrique entre la grille et le drain permet d'augmenter la tension de claquage (en sortie de grille) en étalant le champ électrique au-delà de la grille et en réduisant par la même occasion le pic de champ électrique côté drain. Pour y parvenir, deux voies ont été testées : le simple et le double recess (usage à limiter) de grille et la plaque de champ (*field plate*, cf. Figure 1.10). Ce procédé, emprunté à la technologie silicium, est un avantage pour des applications telles que les commutateurs à haute tension et les amplificateurs à haute puissance. Ce contrôle effectif du champ

dans la structure et en particulier dans le canal conducteur, au-delà de la grille, améliore également la linéarité du composant. La contrepartie de cette approche est l'augmentation de la capacité parasite grille-drain qui limite les performances fréquentielles mais permet néanmoins d'être très efficace pour des transistors avec des distances source-drain de plus de 5 μm et pour des fréquences de travail de quelques dizaines de GHz. Certains auteurs ont utilisé de multiples field-plates pour repousser toujours davantage les limites du composant. Nos calculs analytiques (pour nos design de HEMTs dont la distance source-drain est inférieure à 4.5 μm), corroborés par nos simulations électro-thermique sous COMSOL[®] montrent que l'extension du « chapeau » de grille (>600nm) est suffisante pour réaliser cette fonction [KAD13][BEN11].

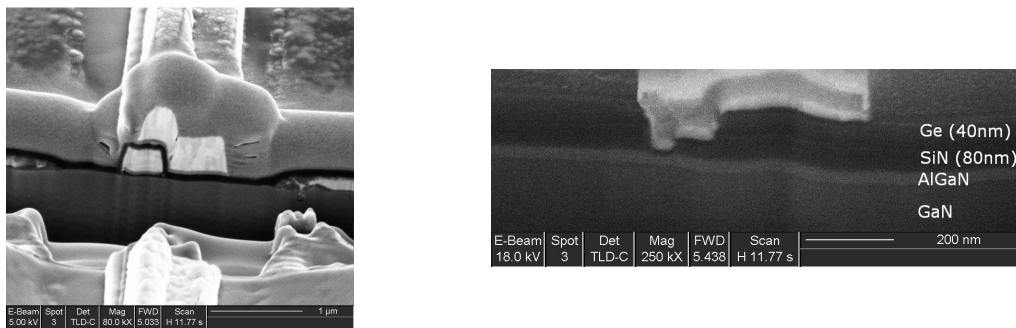


Figure I.10 : Exemple de photos de transistors réalisés avec plaque de champ (FP-HEMT) côté drain réalisés pour une topologie donnée sur 18 possibles [GER09-T].

Ingénierie de la surface

Les HEMTs AlGaIn/GaN souffrent d'une dispersion en DC et en RF entre la puissance de sortie prédite en fonctionnement statique (DC) par le réseau de caractéristiques $I_{ds}(V_{ds}, V_{gs})$ et la puissance de sortie réellement mesurée en régime dynamique (RF). Cet effet appelé compression peut trouver son origine dans un retard à l'établissement de la commande de grille (gate lag). Cette dispersion DC-RF qui limite les performances en puissance du HEMT, est souvent attribuée aux pièges en surface, en volume, ainsi qu'aux effets thermiques. La mise au point d'une couche de passivation pour encapsuler le transistor avec des diélectriques comme par exemple SiN_x, SiO₂, SiN_x/SiO₂ permet d'y remédier [MAG08-T]. Cependant, l'efficacité de la passivation dépend fortement du procédé utilisé et de la qualité des hétérostructures. Une autre solution pour régler le problème de dispersion DC-RF concerne l'épaississement de la couche de cap (Si,Ga)N, associé ou pas à un recess de grille afin d'éloigner le 2DEG des fluctuations du potentiel en surface.

Une solution très efficace avant passivation du transistor, consiste à réaliser un traitement de la surface par voie plasma. Plusieurs gaz réactif ont montré leur efficacité en DC (NH₃, CHF₃, SF₆) et en

RF (N_2O). Une étude par XPS nous a montré que dans le premier cas, le fluor pénètre sous la surface pour passiver certains donneurs liés à l'oxygène des couches, baisse le niveau de Fermi et augmente ainsi la résistivité de la couche barrière. Dans le second cas, il semblerait que l'on vienne neutraliser les lacunes d'azote (qui pourraient jouer là aussi le rôle de donneurs en surface du HEMT). Ces solutions sont d'autant plus efficaces que l'hétérostructure présente des défauts de surface.

Une autre solution efficace lorsque la couche barrière ne possède pas de couche de cap, consiste à oxyder la surface avec une nanocouche par plasma O_2 dilué (ou faire adsorber ou chimisorber la couche barrière par des ions lents multichargés).

D'autres auteurs ont déposé une couche de cap pGaN dont le rôle est double : passiver la surface et former une jonction PN afin de dépléter l'hétérointerface pour neutraliser les états de surface. C'est une solution à envisager à condition de pouvoir doper de type p le nitrure de gallium sans générer de pièges supplémentaires.

Autre solution : épaissement d'un cap (Al,Ga,Si)N, avec l'utilisation d'un recess de grille profond, pour éloigner le 2DEG des fluctuations du potentiel en surface.

Toutes ses études ont été réalisées dans deux thèses de doctorat [MAG08-T] [GER09-T]. La technique utilisée pour définir la signature et quantifier les états de surface/interface ou de volume est la spectroscopie de photoluminescence (PLS3) [MAT08][SEM10][MAT11][GAS13].

Autres innovations

Un des verrous à résoudre dans ce procédé technologique est la commande de grille. Pour réduire les courants de fuites de l'électrode de commande, la solution la plus utilisée pour réaliser des transistors Normally-Off est la grille isolée par un diélectrique isolant électrique et à l'échelle nanométrique. Il s'agit du MISHEMT (ou MOSHEMT). Nous avons testé différents diélectriques de grille comme ZnO, ZrO_2 ou hBN et ce dernier a été le plus performant [GER08][SOL05][THE06].

Enfin, il reste le HEMT GaN à polarité N. Dans ce cas, le canal GaN se situe en surface et par conséquent, les performances des contacts ohmiques sont optimales à moindre frais à condition de pouvoir réaliser l'hétérostructure adéquate. Les auteurs [SIN11] montrent que les courants de fuites de grille s'en trouvent réduits, et que les composants présente un meilleur confinement des électrons, une réduction de la dispersion DC-RF et des courant phénoménaux (>4 A/mm avec des transconducteurs de 2 S/mm). Nous n'avons pas disposé de ce type d'hétérostructure. Dans tous ces travaux, je n'ai eu à travailler qu'avec des structures à polarité Gallium.

Management de la température : étude la conductivité thermique

Cette étude [BEN06][BEN09-1][BEN09-2][TAN10][ROU12], menée conjointement avec Michel Rousseau, a été réalisée sous COMSOL® à partir des équations de transport en hydrodynamique et l'équation de Fourier pour la chaleur. Dans le cadre des thèses de Brahim BENKAKHTI et de Hassan Ali BARKAD [BAR10-T], nous avons montré que la saturation du courant des MESFETs GaN était due à la dégradation de la mobilité avec la température. Nous avons généralisé ce comportement en 2011 sur des structures HEMT GaN. Ces résultats montrent que la conductivité thermique des différents matériaux SC diminue avec la température de réseau (Figure I.11).

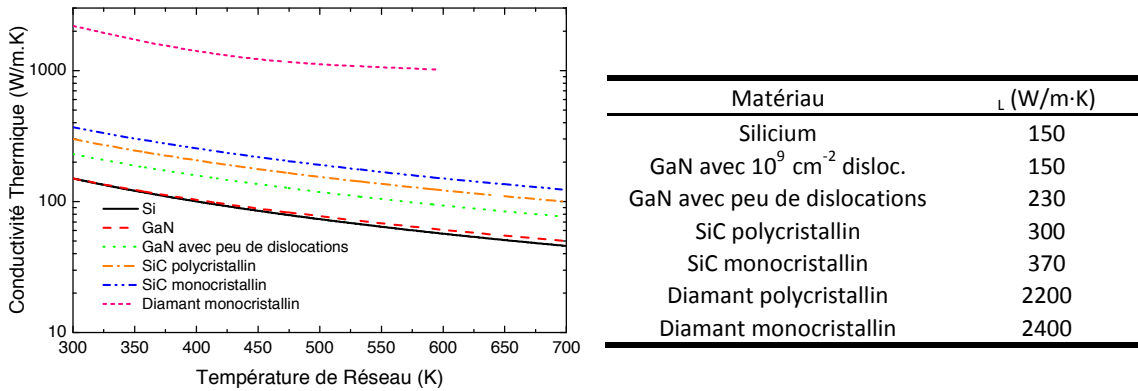


Figure I.11 : Evolution de la conductivité thermique avec la température de réseau des différents substrats utilisés pour la croissance de GaN à 300 K.

Les évolutions de la température maximale de réseau et de la résistance thermique en fonction de la densité de puissance dissipée sont montées sur la Figure I.12a. Ces deux évolutions sont cohérentes avec les caractéristiques $I(V)$. Sous polarisation électrique, plus le composant s'auto-échauffe, plus la densité de courant diminue et plus la résistance thermique augmente (Figure I.12b). Les mesures basées sur la méthode de coïncidence électrique ont été effectuées sur des épitaxies similaires sur les différents substrats par Nicolas Défrance. On peut noter que les valeurs R_{th2} sont plus proches que celles déduites par la méthode de coïncidence électrique. Parce que dans ce type de mesure, la résistance thermique est estimée à partir d'une température de réseau moyenne dans la zone active. Les valeurs de simulation apparaissent en accord avec les résultats expérimentaux.

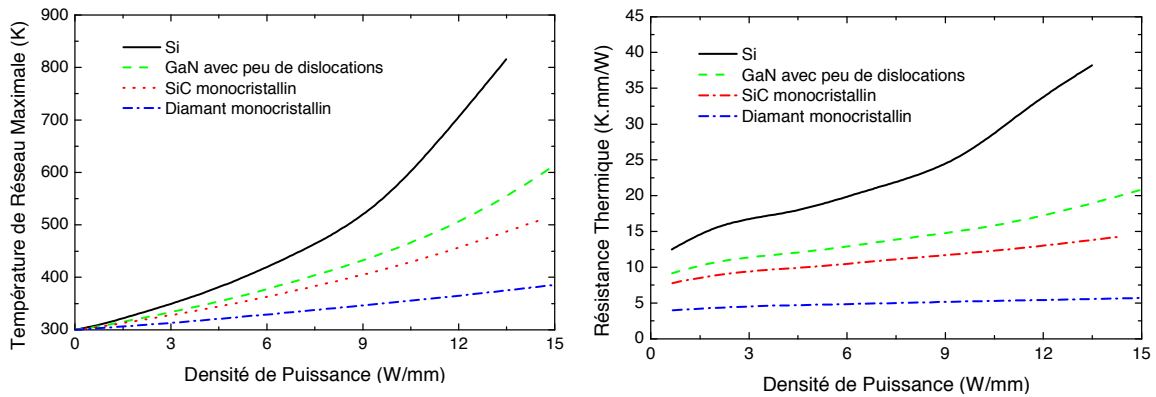


Figure I.12 : a. Evolution de la température du réseau en fonction de la densité de puissance dissipée par le transistor pour différents substrats d'accueil ; b. Evolution de la résistance thermique en fonction de la densité de puissance dissipée par le transistor pour les mêmes différents substrats d'accueil qu'en a. La température du socle est fixée 300K [DEF10].

A ce stade, il est important de noter une remarque sur le choix de la couche barrière. Avec une couche barrière InAlN ou AlN, la densité de porteurs n_s est bien plus élevée qu'avec une barrière AlGaIn. Cette étude montre à quel point il est absolument nécessaire de refroidir le composant d'autant plus que la densité de porteurs est grande, quitte à voir les propriétés de transport de l'hétérostructure se dégrader encore plus vite avec la température du réseau.

Par conséquent, les substrats de SiC et diamant monocristallins apparaissent comme les meilleurs candidats en terme de dissipation thermique. Le matériau GaN de type 'free standing' présentant moins de défauts est vraiment intéressant pour la fabrication de composants de puissance. L'augmentation de la température de socle dégrade les performances électriques et thermiques. Les composants avec les hétérostructures InAlN/GaN permettent d'obtenir des densités de courant très élevées, par contre, ils doivent être déposés sur des substrats ayant de très bonnes conductivités thermiques à défaut de ne pas bénéficier des potentialités de cette couche barrière [ROU11].

Cette étude montre à quel point la gestion thermique de ces composants est cruciale pour la viabilité économique de ces nouveaux composants.

XI. Etat de l'art des HEMTs GaN de puissance en ondes millimétriques sur substrat Silicium

L'état de l'art des performances des transistors HEMT AlGaIn/GaN de puissance en hyperfréquence les plus remarquables réalisés à ce jour sur substrat Si(111) sont 12W/mm à 2 GHz, 7W/mm @ 10GHz, 5.1W/mm* @ 18GHz, 2.7W/mm* @ 40GHz, 2.4W/mm @ 60GHz [PAN10], 2W/mm à 94 GHz. La dernière performance @ 94 GHz est issue d'une communication privée avec OMMIC et n'a pas encore fait l'objet d'une publication; Ceux-ci constituent aujourd'hui la référence sur les potentialités de cette technologie. L'une comme l'autre ont nécessité une recroissance des contacts ohmiques.

Nos transistors HEMTs réalisés sur substrat (100) présente néanmoins un record à 2.9 W/mm* @ 10 GHz et ceux sur substrat (110) donnent plus de 3.3 W/mm* @ 40GHz ($L_G= 60\text{nm}$, $g_{m,int}= 0.6 \text{ S/mm}$ associé à f_t / f_{max} de 108/167 GHz).

Les étoiles (*) indiquent les états de l'art obtenus dans le groupe « composant et dispositifs microondes de puissance » encore d'actualité (cf. Tableau 2).

HEMT	frequency	Gp (dB)	P _{1dB} (dBm)	Psat (dBm)	Psat (W/mm)	PAE (%)	V _{GS0} , V _{DS0} (V)	W (μm)	Measurement condition
On Si(100)	@ 4GHz	19.3	20.75	25.3	3.4	14.3	(-2,+25)	2×150	P _{out} _{max}
		22.8	18.3	25	3.15	22.9	(-2,+20)	2×150	PAE-P _{out}
	@10GHz	7.5	22.1	29.4	2.9	20.4	(-2,+30)	2×150	P _{out} _{max}
		14.9	23.2	29	2.65	22.2	(-2,+25)	2×150	PAE-P _{out}
On Si(110)	@18GHz	15.6	20.3	23.4	3.76	33	(-3,+15)	2×30	P _{out} _{max}
		20.3	14.2	21.6	2.4	40	(-3,+10)	2×30	PAE-P _{out}
	@ 40GHz	10.6	18.4	23	3.3	20.1	(-3.3,+15)	2×30	-
On Si(111)	@18GHz	9.1	24	27.1	5.1	20	(-4,+35)	2×50	-
	@ 40GHz	9	17.8	21	2.7	18	(-1.6,+15)	2×25	-

Tableau 2 : Récapitulatif des performances en puissance obtenues en hyperfréquence pour des HEMTs que nous avons optimisés sur substrat silicium orienté (100), (110) et (111) [SOL13-1][SOL13-2][MIN04].

La Figure I.11 donne un aperçu des performances de HEMTs GaN de puissance à l'état de l'art obtenues sur substrat Silicium (toutes orientations confondues), sur substrat de carbure de silicium et sur GaN auto-supporté.

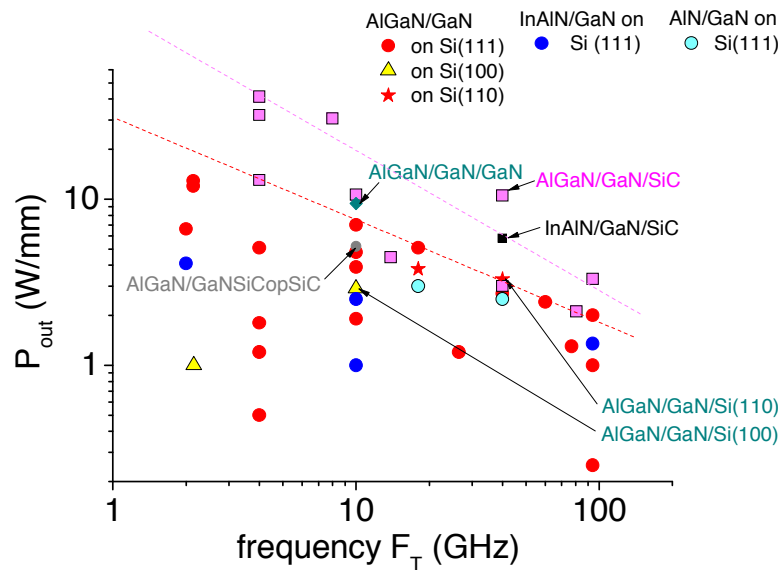


Figure I.13 : Graphique représentant l'état de l'art en puissance de sortie de HEMT GaN sur silicium toutes orientations confondues en comparaison avec ceux sur SiC, sur GaN auto-supporté. La couche barrière des HEMT peut être composée soit de AlN, InAlN ou AlGaIn.

Nous pouvons constater que sur substrat Silicium, nos résultats sont à l'état de l'art et l'équipe « Composants et Dispositifs de Puissance Microondes » reste à la pointe de cette technologie. Comme mentionné auparavant, il nous est possible de repousser nos limites et rester dans la course

(cf. feuille de route de l' « International Technology Roadmap for Semiconductors »). au moyen de 2 innovations : Remplacer la couche de nucléation AlN basse-température par une couche de 3C-SiC suivie d'une couche de nucléation AlN haute température, et réaliser des reprises de croissance des contacts ohmiques par des caissons GaN n⁺⁺ pour pouvoir monter en fréquence. Cette action pourrait être menée aussi bien sur substrat Si(111) que sur Si(110).

Galerie de photos de transistors élaborés sur substrat Si (110), Si (100) et Si(111)

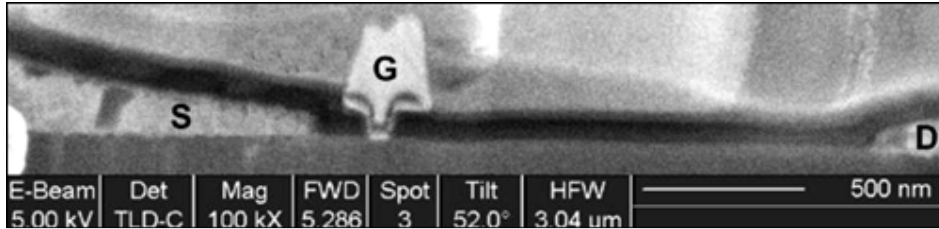


Figure 1.14 : Première démonstration de la fabrication de transistors de puissance en onde millimétrique de type HEMT AlGaIn/GaN sur substrat silicium (110) hautement résistif avec grille en Té de 60 nm [SOL13] mesuré à 40 GHz.

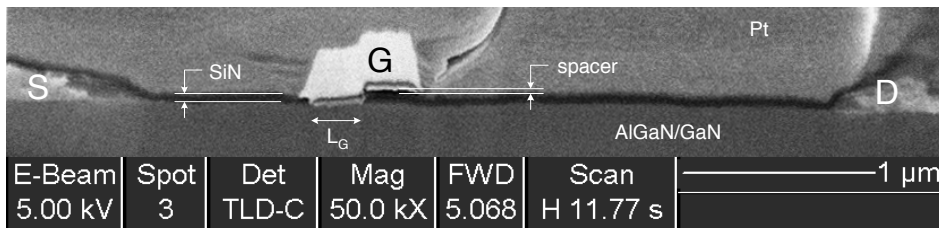


Figure 1.15: Image SEM d'une vue en coupe d'un transistor HEMT AlGaIn/GaN/Si(100) où il est possible de distinguer la grille nitrure Si₃N₄ en forme de Gamma (L_G=250 nm) avec couche espaceur (air) pour la réduction des capacités parasites [GER10].

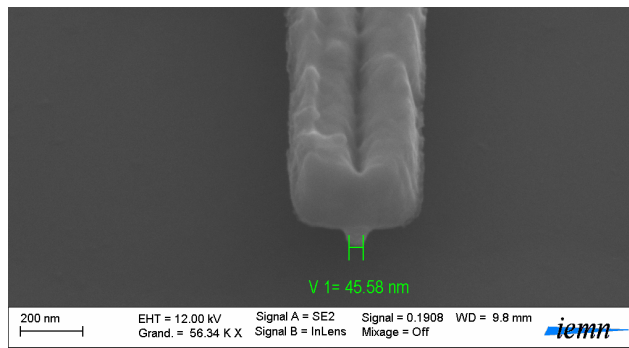


Figure 1.16: Image SEM d'une vue en perspective d'une grille en Té (L_G=45nm) d'un transistor HEMT AlGaIn/GaN/Si(111) [GER09-T].

Section 1 : Formation du contact ohmique sur GaN et sur HEMT AlGaIn/GaN

Nous disposons aujourd'hui d'outils adaptés à l'étude de la formation des contacts électriques de nos composants. La microdureté Vickers, la calorimétrie différentielle à balayage et la diffraction des rayons X sont largement utilisés pour étudier la structure cristalline des matériaux cristallins conjuguée à des observations locales (en microscopie optique, microscopie électronique à balayage, diffraction des électrons rétrodiffusés) des sites et des orientations des grains recristallisés permettent de mieux suivre la formation des textures de recristallisation des contacts électriques avant et après recuit.

L'arrangement atomique du cristal réel s'écarte localement de la structure du cristal idéal en raison de la présence de défauts et modifie de manière considérable les propriétés des matériaux. Un des aspects les plus importants auquel je me suis attaché, est de caractériser ces défauts, d'analyser leurs effets sur les propriétés électriques et définir les recettes technologiques permettant de les contrôler pour arriver à un comportement « optimal » du contact électrique.

Depuis les années 1990, la structure des contacts sur GaN a évolué vers un degré croissant de sophistication. D'une configuration initiale simpliste avec un seul métal, nous utilisons aujourd'hui des empilements hétérogènes de métallisations différentes. Chaque empilement présente des avantages et des inconvénients répondant aux exigences pour une fonction électrique donnée ou une application donnée.

Le recuit est obtenu par élévation de température du métal à des températures allant de 450 °C à 850 °C. La qualité du recuit exige un cycle de chauffe (temps de montée en température, temps de maintien) bien maîtrisé (il peut être lent ou rapide). Il est nécessaire de respecter certaines valeurs couplées de temps de maintien et de température de chauffe pour avoir une recristallisation complète. Le procédé de recuit (vitesse, température de chauffe et vitesse de refroidissement influence la taille des grains. Plus la descente est rapide, plus les grains restent petits.

Certains alliages d'aluminium présentent un durcissement par formation de précipités avec d'autres éléments d'alliage : Al₂Ti pour les alliages contenant du titane. Avec l'élévation de température, vers 500 °C, ces précipités se dissolvent. On constate que la croissance cristalline est en grande partie contrôlée par la nature de l'interface à l'échelle des atomes. Les transformations de phases, qui se produisent au cours de l'élaboration et de la mise en forme des matériaux, conditionnent en grande partie leurs propriétés technologiques. Les matériaux sont pratiquement toujours élaborés au départ

de l'état liquide. Leur microstructure finale se forme pendant les transformations de phases, qui interviennent dans les processus de traitement thermique.

Le paramètre moteur de ces transformations est la différence d'enthalpie libre entre la phase en formation et la phase transformée. La différence d'enthalpie libre entre ces deux phases dépend de l'écart entre la température où la transformation est effectuée et la température de transformation thermodynamique (ou équilibre thermodynamique) déterminée sur le diagramme d'équilibre de phases.

La vitesse de transformation augmente avec cet écart et passe par un maximum parce que le changement de phase ne peut se produire sans une certaine mobilité des atomes ou des molécules (diffusion) et que cette mobilité diminue considérablement avec l'abaissement de la température. En variant la température et le temps de traitement, on peut obtenir des microstructures différentes.

Les microstructures qui se développent durant ces traitements thermiques ne sont pratiquement jamais celles qui correspondraient à l'état thermodynamique le plus stable, mais bien celle qui se développent suivant la cinétique de transformation la plus rapide à la température utilisée. Aussi, il est à savoir que l'adjonction d'un second élément à un métal qui possède une ou plusieurs transformations allotropiques, modifie généralement les températures d'équilibre de celles-ci.

Alors, pourquoi le titane ?

Au dessus de 882°C et jusqu'à sa température de fusion (1670°C), le titane pur présente une structure stable à haute température (cubique centrée). En dessous de 882°C, il présente plutôt une phase hexagonale pseudo-compacte (alphagène). C'est pourquoi aux températures de recuit de nos contacts ohmiques (850-900°C), ces deux phases coexistent ensemble. Aussi, de faibles proportions d'aluminium (Ti-Al) ou d'impuretés d'oxygène (Ti-O) tendent à stabiliser la phase alphagène préférentiellement.

Pour des températures bien en deçà de 882°C, la phase Ti_3Al apparaît lors de maintiens prolongés comme l'aboutissement dans un domaine de température intermédiaire. Elle est hexagonale, extrêmement durcissante mais aussi très fragilisante. Son domaine de stabilité dépend fortement des teneurs en d'autres éléments comme l'oxygène [GER09-T].

Ayant un faible travail de sortie, le Titane et l'Aluminium, , permettent un contact ohmique de l'ambiante à quelques centaines de degrés Celsius mais ne donnent pas de bon contacts au-delà de 450°C car ils s'oxydent facilement. A plus haute température, il se forme une couche d'alumine ou d'oxynitride d'aluminium. Cela rend les contacts non reproductibles, pas stables et non homogène.

Les chercheurs ont donc opté pour un taux Al/Ti ≥ 3 recuit à des températures $> 450^\circ\text{C}$ (cf. diagramme de phase du binaire Ti-Al à la pression de recuit, c'est-à-dire un petit vide primaire) et inférieure à 800°C . Après recuit de type binaire Al_3Ti qui est plutôt réfractaire (stable thermiquement), dur, insensible à l'oxydation (jusqu'à 1400°C), conducteur thermique et électrique ($> 100\text{kS/cm}^2$) mais perd son caractère ohmique à partir de 700°C . Par conséquent, l'atmosphère de recuit ne joue qu'un rôle minime pour ces températures étant donnée la très forte réactivité entre Ti et Al.

De façon générale, les processus de formation des phases d'aluminiure de titane pendant le recuit (Al_2Ti et Al_3Ti) semblent respecter les tendances prédictibles à partir du diagramme de phase binaire Ti-Al à pression atmosphérique. Ces composés sont formés suite à une réaction solide-solide. Les images obtenues en microscopie électronique en transmission indiquent une réactivité entre le GaN et la couche métallique. Nous avons détecté à la fois l'AlN et le TiN. Ces données sont compatibles avec celles de la littérature, et la formation préférentielle de l'un ou de l'autre de ces composés dépend principalement de la concentration en titane du système. Ainsi, un système riche en titane donnera plus facilement TiN tandis qu'un système plus riche en aluminium donnera AlN non dopé. Dans le cas de l'AlN, cette couche ne peut être uniformément répartie sur la surface de GaN pour former un contact ohmique. Il se forme même à des températures en deçà de celle de la fusion de l'aluminium. Pour Al/Ti < 3 , il faut monter à des températures de recuits supérieures à 900°C pour former de bons contacts ohmiques mais inférieures à la température de synthèse du matériau (sinon, détérioration du matériau GaN). Dans ce second cas, le mécanisme est tout autre, un alliage ternaire de type Ti_2AlN se forme en contact avec GaN montrant que Ti réagit avec GaN pour former des lacunes d'azote responsables de l'augmentation du dopage à l'interface avec GaN. L'aluminiure de titane Ti_3Al se forme néanmoins à l'aplomb de ce ternaire. Donc le ratio Ti/Al est fondamental pour la formation du contact ohmique ainsi que le profil de recuit en température et la valeur de la température de stabilisation.

Pour limiter l'oxydation et améliorer la longévité du contact notamment sur l'AlGaIn, les chercheurs ont opté pour une couche de protection en or et pour éviter la réaction entre Au et Al (qui donne un contact friable connu sous le nom de peste pourpre), une fine couche de protection en métal réfractaire y est intercalée (Ni, Mo, TiN, TaN...). Aussi, Au présente un travail de sortie élevé et peut contribuer à augmenter la résistance de contact et rendre le contact encore plus inhomogène qu'il ne l'est déjà (d'où les fluctuations du potentiel). D'où l'intérêt de l'isoler. Ainsi, la résistance spécifique de contact est encore améliorée, c'est l'alliage qui reste communément admis aujourd'hui encore, même si cette barrière de diffusion métallique ne joue pas vraiment son rôle.

Sur GaN, le ratio Al/Ti est défini par rapport à la consommation de Ti à la température fixée. Plus il y a de Ti, plus la température de formation des contacts ohmiques sera élevée.

Aussi, lorsque la température de recuit excède les 750°C, des grains $Al_xTi_yN_z$ se forment et leur taille augmente avec la température rendant la surface du contact rugueuse et ce d'autant plus que la température est élevée. Sur GaN, la réaction est la même sauf que : l'enthalpie de formation de TiN étant plus élevée que celle de GaN, le Titane a tendance à se lier à l'azote du GaN laissant ainsi une lacune d'azote. C'est pourquoi, il se forme une couche de TiN à l'interface, qui de par son faible travail de sortie améliore encore le caractère ohmique des contacts électriques. La résistivité spécifique de contact est plus stable, plus homogène et plus petite. Le dopage interfacial est augmenté et l'effet tunnel est le mécanisme de conduction dominant. Des mesures expérimentales (réalisées sur des HEMTs AlGaIn/GaN) de la résistivité spécifique de contact en fonction de la température montrent que le mécanisme dominant est l'effet tunnel assisté de l'effet de champ via des niveaux profonds. En fait, toutes les études faites sur GaN prouvent que le dopage y est au moins modéré. C'est pourquoi l'effet tunnel pur ne peut se manifester que très rarement [SOL07].

A ce stade, il est important de mentionner une remarque. Des études ont montré que le GaN dopé type N à quelques 10^{18}cm^{-3} (avec du silicium) présente des états de contraintes. En conséquence, une étude rigoureuse consisterait à faire des mesures électriques sous pression pour déterminer l'origine des mécanismes responsables de la conduction dans GaN. Cela pourrait permettre de différencier les états de surface des contaminations ou des défauts structuraux en volume.

Le modèle de Werner et Gutler a été utilisé pour expliquer la dépendance de la hauteur de barrière $\phi_{B,eff}$ et du facteur d'idéalité η_{eff} avec la température à partir du modèle de la variation locale de la hauteur de barrière. En effet, nous avons observé certaines anomalies comme la fluctuation (croissance, puis décroissance) de la barrière de potentiel ainsi que du facteur d'idéalité lorsque la température augmente. Nous avons montré que la phase en contact avec le GaN assurant la conduction électrique dominante présente des fluctuations spatiales de la composition chimique qui pourraient être à l'origine d'une dispersion spatiale de la hauteur de barrière. Afin d'expliquer la faible évolution de la résistance spécifique de contact en fonction de la température, nous avons fait l'hypothèse que la hauteur de barrière effective augmente avec cette dernière. Les tendances non-monotones de l'évolution de la résistance de contact avec une augmentation de la température resulteraient alors d'une compensation entre deux phénomènes : le premier correspondrait à un franchissement thermoionique des électrons à haute température et le second à l'élévation de la barrière de potentiel en surface. A basse température et lorsque la température augmente, la

compensation conduirait à une baisse de la résistance spécifique jusqu'à une quasistabilité, alors qu'à haute température, l'effet de l'augmentation de la hauteur de barrière effective serait dominant.

Certains technologues (dont nous) ont pu remarquer une non-linéarité des contacts ohmiques avec la distance entre deux électrodes lorsque l'isolation des composants est réalisée via un méso. Nous avons montré que le contact ohmique était nullement mis en cause mais que la contrainte de la couche barrière change avec son volume après recuit à haute température (>800°C). Les propriétés de transport évoluent, donc la résistance de feuillet aussi. La couche devient inhomogène rendant le modèle TLM classique invalide [SOL07]. Ceci est bien évidemment résolu suite à une isolation par implantation. Un modèle TLM à 3 couches (TLTLM) a été établi pour tenir compte de la présence de cet eutectique entre le contact ohmique et le gaz d'électrons et a permis de caractériser rigoureusement les contacts ohmiques et quantifier les caractéristiques de chaque couche.

La lacune d'azote dans le GaN ou en surface de GaN considérée comme donneur est sujet à discussion dans le sens où cet état est théoriquement instable dans les conditions normales de température et de contrainte.

Au-delà de 750°C, il y a formation d'une couche de TiN dont l'épaisseur augmente avec l'augmentation des lacunes d'azote et l'exodiffusion de Ga vers la surface.

D'autres auteurs attribuent le dopage localisé sous les contacts ohmiques à un complexe formé par Ti et/ou Si (comme dans SiC), ou à la diffusion de Ti au travers des dislocations traversantes. Nous avons aussi observé sur des images HRTEM ce type de comportement sur des hétéro-épitaxies MOCVD mais cela mériterait une étude bien plus poussée.

Lorsque l'hétérostructure comporte une couche d'exclusion AlN entre le canal et la couche barrière (qui permet d'améliorer grandement les propriétés de transport de la couche), la formation du contact ohmique ne se fait quasiment plus. Seul le dopage localisé (implantation), un fossé de contact ohmique ou une reprise de croissance des caissons de contacts ohmiques dopé n^{++} permet de résoudre ce problème.

Section 2 : Le contact de grille

La méthode de dépôt du contact de grille conditionne la contrainte résiduelle de l'électrode et son interaction avec la couche sur laquelle elle est déposée. Pour des raisons de contaminations, la majorité des technologues préfère réaliser cette étape par évaporation. Il semble pourtant (d'après mon expérience) que les performances d'un contact redresseur soient meilleures lorsque le dépôt est réalisé par pulvérisation lorsqu'il s'agit de matériau semiconducteur grand gap (SiC, diamant, AlN). Nous savons que la contrainte des films métalliques déposés par évaporation augmente avec leur épaisseur et après quelques dizaines à quelques centaines de nanomètres selon le métal déposé, le film délamine. Nous avons montré (cf. Thème 6) que les dépôts réalisés par pulvérisation présentent une contrainte résiduelle qui augmente sur quelques dizaines de nanomètres, puis se relaxe au-delà, permettant de réaliser des dépôts épais (plusieurs micromètres). Cette évolution de la contrainte a une incidence sur les performances du contact de grille.

Tout comme le contact ohmique, le choix du séquentiel de grille a beaucoup évolué mais le principe reste le même. Comme la couche à base de GaN présente un dopage résiduel de type N, la première couche métallique doit présenter un travail de sortie élevé et une bonne adhérence.

Pour des grilles micrométriques, la hauteur de barrière optimale variait selon la qualité des épitaxies entre 1 et 1.15 eV associé à un facteur d'idéalité η compris entre 1.3 et 1.5. Avec les mêmes conditions de dépôt et pour des grilles sub-micrométriques, la hauteur de barrière se dégrade légèrement alors que le facteur d'idéalité s'améliore ($1.4 < \eta < 1.5$). Cette différence n'est plus observée lorsqu'on utilise la méthode de Wagner permettant de corrélérer le coefficient d'idéalité à la hauteur de barrière afin d'en déduire la hauteur de barrière (cela nous a donné 1.8 eV dans le meilleur des cas).

Ces résultats restent surprenants quand on connaît la densité de dislocations en surface. C'est certainement ce facteur qui explique pourquoi le prétraitement de surface sous la grille n'a que peu d'effet sur les performances de la grille.

Actuellement, nous déposons par évaporation une couche flash de Ni isolée du plot d'or par une couche de Molybdène (barrière réfractaire) si la couche barrière est un alliage réalisé par MOCVD. Dans le cas où la couche barrière est réalisée par MBE, l'étape « Nickel » n'est pas forcément réalisée). Cependant, nous utilisons une couche de TiN (réalisée par pulvérisation) si la couche barrière est un super-réseau $n \times (\text{AlN}/\text{GaN})$ suivi d'un recuit. La Figure 1.17 montre un exemple de résultat remarquable sur la caractéristiques $I_{GS}(V_{GS})$. Dans le second cas, la dispersion est bien moindre même si dans le premier cas, il reste parfaitement opérationnel. Les causes sont multiples : contaminations de la surface, défauts structuraux, contraintes locales (cf. Figure 1.18)[SOL14]. Deux

modèles (Werner et Guttler ou Tung) ont été utilisés pour tenir compte de l'inhomogénéité de la barrière Schottky et des anomalies observées (augmentation de la barrière de potentiel et diminution du facteur d'idéalité lorsque la température augmente, différence entre la constante de Richardson théorique/expérimentale). La fluctuation du potentiel en surface induit une non-uniformité de la barrière. Le modèle de Werner suppose une distribution Gaussienne de la hauteur de barrière de potentiel alors que celui de Tung considère des petites zones de faibles barrières de potentiel noyées dans une surface uniforme de plus forte hauteur de barrière. C'est le modèle le plus utilisé pour les diodes Schottky sur SiC.

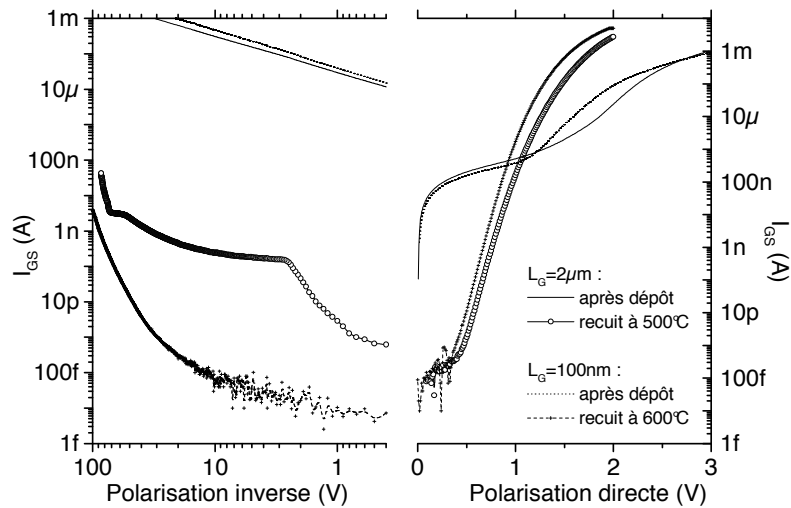
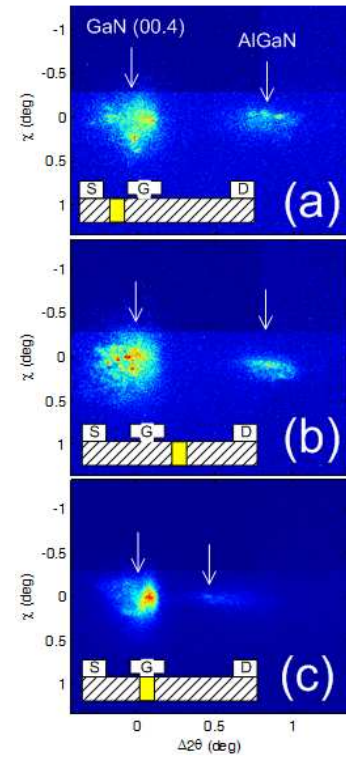
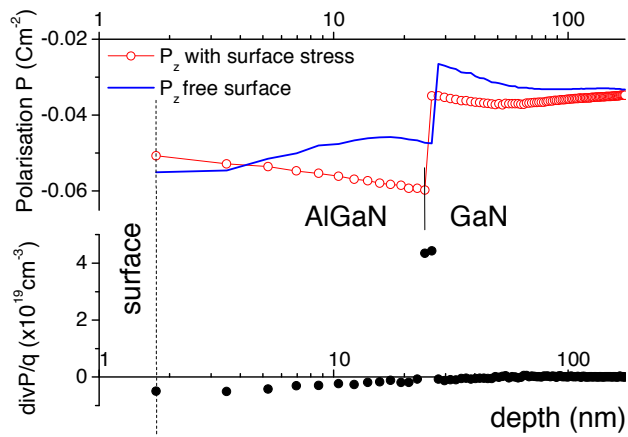


Figure 1.17: Mesure I_{GS} - V_{GS} après dépôt et après recuit d'un contact TiN/Au ($L_G=100\text{nm}$ et $L_G=2\mu\text{m}$, $L_{DS}=10\mu\text{m}$, $W=100\mu\text{m}$). Grille rectangulaire pour $L_G=2\mu\text{m}$ et grille en Té pour $L_G=100\text{nm}$.



(a) Evolution théorique du champ de polarisation dans la couche barrière AlGaIn lors de l'application d'une contrainte superficielle de 4,5 GPa et un potentiel de surface de 0,4 eV. L'insert montre la $\text{div}P/q$ qui indique la nature du pseudo-dopage induit par le gradient de contrainte dans la zone active du HEMT GaN ; (b) Graphe de nano-XRD réalisé au Synchrotron montrant clairement les réflexions (00.4) de GaN et celui de AlGaIn. L'axe horizontal correspond $\Delta 2\theta$ (axe q_z dans l'espace réciproque), et la distance entre les deux signaux le long de cet axe représente l'augmentation de la contrainte de AlGaIn en compression. La représentation graphique de la structure HEMT indique la localisation où chaque capture CCD a été réalisée [SOL14].

References

- [LEE00] S. M. Lee, M. A. Belkhir, X. Y. Zhu, Y. H. Lee, Y. G. Hwang, and T. Frauenheim, "Electronic structures of GaN, edge dislocations," *Physical Review B*, 61 (2000) 16033-16039.
- [NOR01] J. E. Northrup, "Screw dislocations in GaN: The Ga-filled core model," *Applied Physics Letters*, 78 (2001) 2288-2290.
- [LOR04] P. Lorenzini, "Caractérisations des hétérostructures AlGaN/GaN : des propriétés de transport aux transistors à haute mobilité HEMT.," Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Nice Sophia-Antipolis, Valbonne, 2004.
- [SAF13] N.V. Safriuk, *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, 16(3) (2013) 265-272.
- [COR09] Y. Cordier *et al.*, *Phys. Stat. Sol. C* 6 S2 (2009) S1020-S1023
- [JES07] G.H. Jessen, R. C. Fitch, J. K. Gillette, G. Via, A. Crespo, D. Langley, D. J. Denninghoff, M. Trejo, E.R. Heller, "Short-Channel Effect Limitations on High-Frequency Operation of AlGaIn/GaN HEMTs for T-Gate Devices", *IEEE TED*, (2007) 2589-2597.
- [SIN11] Uttam Singiseti, Man Hoi Wong, Sansaptak Dasgupta, Nidhi, Brian Swenson, Brian J. Thibeault, James S. Speck, and Umesh K. Mishra, "Enhancement-Mode N-Polar GaN MISFETs With Self-Aligned Source/Drain Regrowth", *IEEE EDL* 32(2) (2011) 137-139
- [PAN10] <http://news.panasonic.com/global/press/data/en100722-2/en100722-2.html>

Publications RICL

- [SOL14] High performance TiN gate contact on AlGaIn/GaN transistor using a mechanically strain induced P-doping
SOLTANI A., ROUSSEAU M., GERBEDOEN J.C., MATTALAH M., BONANNO P.L., TELIA A., BOURZGUI N., PATRIARCHE G., OUGAZZADEN A., BEN MOUSSA A.
Appl. Phys. Lett., 104, 23 (2014) 233506, 5 pages [doi: 10.1063/1.4882415](https://doi.org/10.1063/1.4882415)
- [SOL13] Assessment of transistors based on GaN on silicon substrate in view of integration with silicon technology
SOLTANI A., CORDIER Y., GERBEDOEN J.C., JOBLLOT S., OKADA E., CHMIELOWSKA M., RAMDANI M.R., DE JAEGER J.C.
Semicond. Sci. Technol., 28, 9 (2013) 094003, 6 pages [doi: 10.1088/0268-1242/28/9/094003](https://doi.org/10.1088/0268-1242/28/9/094003)
- [KAD13] Analytical modeling and analysis of Al_mGa_{1-m}N/GaN HEMTs employing both field-plate and high-k dielectric stack for high-voltage operation
KADDECHE M., TELIA A., SOLTANI A.
J. Comput. Electron., 12, 3 (2013) 501-510 [doi: 10.1007/s10825-013-0468-5](https://doi.org/10.1007/s10825-013-0468-5)
- [GAS13] Electron transport in passivated AlGaIn/GaN/Si HEMTs
GASSOUMI M., MOSBAHI H., SOLTANI A., SBRUGNERA-AVRAMOVIC V., ZAIDI M.A., GAQUIERE C., MEJRI H., MAAREF H.
Mater. Sci. Semicond. Process., 16, 6 (2013) 1775-1778 [doi: 10.1016/j.mssp.2013.06.025](https://doi.org/10.1016/j.mssp.2013.06.025)
- [SOL13] Power performance of AlGaIn/GaN high-electron-mobility transistors on (110) silicon substrate at 40 GHz
SOLTANI A., GERBEDOEN J.C., CORDIER Y., DUCATTEAU D., ROUSSEAU M., CHMIELOWSKA M., RAMDANI M., DE JAEGER J.C.
IEEE Electron Device Lett., 34, 4 (2013) 490-492 [doi: 10.1109/LED.2013.2244841](https://doi.org/10.1109/LED.2013.2244841)

- [RAV12] Dual-purpose BGaN layers on performance of nitride-based high electron mobility transistors
RAVINDRAN V., BOUCHERIT M., SOLTANI A., GAUTIER S., MOUDAKIR T., DICKERSON J., VOSS P.L., DI FORTE-POISSON M.A., DE JAEGER J.C., OUGAZZADEN A.
Appl. Phys. Lett., **100**, 24 (2012) 243503-1-4 [doi: 10.1063/1.4729154](https://doi.org/10.1063/1.4729154)
- [ROU12] Efficient physical-thermal model for thermal effects in AlGaIn/GaN high electron mobility transistors
ROUSSEAU M., SOLTANI A., DE JAEGER J.C.
Appl. Phys. Lett., **101**, 12 (2012) 122101-1-3 [doi: 10.1063/1.4753815](https://doi.org/10.1063/1.4753815)
- [MAT11] Analysis of the SiO₂/Si₃N₄ passivation bilayer thickness on the rectifier behavior of AlGaIn/GaN HEMTs on (111) silicon substrate
MATTALAH M., SOLTANI A., GERBEDOEN J.C., AHAITOUF A., DEFRANCE N., CORDIER Y., DE JAEGER J.C.
European Materials Research Society Spring Meeting, E-MRS Spring 2011, Symposium F : Group III nitrides and their heterostructures for electronics and photonics, Nice, France, may 9-13, 2011
Phys. Status Sol. C, Curr. Top. Solid State Phys. **9**, 3-4 (2012) 1083-1087 [doi: 10.1002/pssc.201100211](https://doi.org/10.1002/pssc.201100211)
- [GAU11] Deep structural analysis of novel BGaN material layers grown by MOVPE
GAUTIER S., PATRIARCHE G., MOUDAKIR T., ABID M., ORSAL G., PANTZAS K., TROADEC D., SOLTANI A., LARGEAU L., MAUGUIN O., OUGAZZADEN A.
15th International Conference on Metal Organic Vapor Phase Epitaxy, ICMOVPE-XV, Incline Village, NV, USA, may 23-28, 2010
J. Cryst. Growth **315**, 1 (2011) 288-291 [doi: 10.1016/j.jcrysgro.2010.08.042](https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2010.08.042)
- [BEN 11] Fabrication and DC characterizations of AlGaIn/GaN high electron mobility transistors with fieldplate over passivation layers
BENSEDDIK N., BENAMARA Z., MAZARI H., AMEUR K., SOLTANI A., BLUET J.M
Sens. Lett. **9**, 6 (2011) 2302-2304 [doi: 10.1166/sl.2011.1764](https://doi.org/10.1166/sl.2011.1764)
- [GER10] AlGaIn/GaN HEMTs on (001) silicon substrate with power density performance of 2.9 W/mm at 10 GHz
GERBEDOEN J.C., SOLTANI A., JOBLOT S., DE JAEGER J.C., GAQUIERE C., CORDIER Y., SEMOND F.
IEEE Trans. Electron Devices **57**, 7 (2010) 1497-1503 [doi: 10.1109/TED.2010.2048792](https://doi.org/10.1109/TED.2010.2048792)
- [TAN10] Thermal behavior analysis of GaN based epi-material on different substrates by means of a physical-thermal model
TANG X., ROUSSEAU M., DEFRANCE N., HOEL V., SOLTANI A., LANGER R., DE JAEGER J.C.
Phys. Status Solidi A-Appl. Mat. Sci. **207**, 8 (2010) 1820-1826 [doi: 10.1002/pssa.200925321](https://doi.org/10.1002/pssa.200925321)
- [DEF10] Thermal resistance of AlGaIn/GaN HEMTs on SopSiC composite substrate
DEFRANCE N., DOUVRY Y., HOEL V., GERBEDOEN J.C., SOLTANI A., ROUSSEAU M., DE JAEGER J.C., LANGER R., LAHRECHE H.
Electron. Lett. **46**, 13 (2010) 949-950 [doi: 10.1049/el.2010.0431](https://doi.org/10.1049/el.2010.0431)

[SEM10] Trap characterization in AlGa_N/Ga_N HEMT by analyzing frequency dispersion in capacitance and conductance

SEMRA L., TELIA A., SOLTANI A.

13th European Conference on Applications of Surface and Interface Analysis, ECASIA'09, Antalya, Turkey, October 18-23, 2009

Surf. Interface Anal. **42**, 6-7 (2010) 799-802 [doi: 10.1002/sia.3462](https://doi.org/10.1002/sia.3462)

[BENB09-1] Effects of self-heating on performance degradation in AlGa_N/Ga_N-based devices

BENBAKHTI B., SOLTANI A., KALNA K., ROUSSEAU M., DE JAEGER J.C.

IEEE Trans. Electron Devices **56**, 10 (2009) 2178-2185 [doi: 10.1109/TED.2009.2028400](https://doi.org/10.1109/TED.2009.2028400)

[BENB09-2] Electron transport properties of gallium nitride for microscopic power device modelling

BENBAKHTI B., ROUSSEAU M., SOLTANI A., DE JAEGER J.C.

16th International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures, Edison 16, Montpellier, France, August 24-28, 2009

J. Phys. : Conf. Ser. **193**, 1 (2009) 012005-1-4 [doi: 10.1088/1742-6596/193/1/012005](https://doi.org/10.1088/1742-6596/193/1/012005)

[GER10] AlGa_N/Ga_N HEMTs on (001) silicon substrate with power density performance of 2.9 W/mm² at 10 GHz

GERBEDOEN J.C., SOLTANI A., JOBLOT S., DE JAEGER J.C., GAQUIERE C., CORDIER Y., SEMOND F.

IEEE Trans. Electron Devices **57**(7) (2010) 1497-1503 [doi: 10.1109/TED.2010.2048792](https://doi.org/10.1109/TED.2010.2048792)

[GER09-T] Thèse de doctorat (2009) Université des Sciences et de Technologies de Lille1. « Optimisation et réalisation de transistors HEMTs AlGa_N/Ga_N par champ plat modulé ».

[GER08] AlGa_N/Ga_N MISHEMT with hBN as gate dielectric

GERBEDOEN J.C., SOLTANI A., MATTALAH M., MOREAU M., THEVENIN P., DE JAEGER J.C.

19th European Conference on Diamond, Diamond-Like Materials, Carbon Nanotubes, Nitrides and Silicon Carbide, Diamond 2008, Sitges, Spain, September 7-11, 2008

Diam. Relat. Mater. **18**, 5-8 (2009) 1039-1042 [doi: 10.1016/j.diamond.2009.02.018](https://doi.org/10.1016/j.diamond.2009.02.018)

[MAG08-T] Thèse de doctorat, Université Djillali Liabès (Algérie) : « Analyse de défauts en surfaces et interfaces de semi-conducteurs III-N à large bande interdite appliqués à la micro et l'optoélectronique ».

[MAT08] Study of the hBN/InP interface by deep level transient and photoluminescence spectroscopies

MATTALAH M., TELIA A., SOLTANI A., DE JAEGER J.C., THEVENIN P., BATH A., AKKAL B., ABID H.

Thin Solid Films **516**, 12 (2008) 4122-4127 [doi: 10.1016/j.tsf.2007.10.009](https://doi.org/10.1016/j.tsf.2007.10.009)

[SOLO7] Development and analysis of low resistance ohmic contact to n-AlGa_N/Ga_N HEMT

SOLTANI A., BENMOUSSA A., TOUATI S., HOEL V., DE JAEGER J.C., LAUREYNS J., CORDIER Y., MARHIC C., DJOUADI M.A., DUA C.

Diam. Relat. Mater. **16**, 2 (2007) 262-266 [doi: 10.1016/j.diamond.2006.06.022](https://doi.org/10.1016/j.diamond.2006.06.022)

[BENB06] Analysis of thermal effect influence in gallium-nitride-based TLM structures by means of a transport-thermal modeling

BENBAKHTI B., ROUSSEAU M., SOLTANI A., DE JAEGER J.C.

IEEE Trans. Electron Devices **53**, 9 (2006) 2237-2242 [doi: 10.1109/TED.2005.881014](https://doi.org/10.1109/TED.2005.881014)

[THE06] Influence of the deposition parameters on the texture of boron nitride thin films synthesized in a microwave plasma-enhanced reactor

THÉVENIN P., ELIAOUI M., AHAITOUF A., SOLTANI A., BATH A.

Surf. Coat. Technol. **200**, 22-23 (2006) 6444-6448 [doi: 10.1016/j.surfcoat.2005.11.096](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.11.096)

[SOL05] Humidity effects on the electrical properties of hexagonal boron nitride thin films

SOLTANI A., THÉVENIN P., BAKHTIAR H., BATH A.

Thin Solid Films **471**, 1-2 (2005) 277-286 [doi: 10.1016/j.tsf.2004.06.142](https://doi.org/10.1016/j.tsf.2004.06.142)

[MIN04] AlGaIn/GaN HEMTs on Si with power density performance of 1.9 W/mm at 10 GHz

MINKO A., HOEL V., MORVAN E., GRIMBERT B., SOLTANI A., DELOS E., DUCATTEAU D., GAQUIERE C., THERON D., DE JAEGER J.C., LAHRECHE H., WEDZIKOWSKI L., LANGER R., BOVE P.

IEEE Electron Device Lett. **25**, 7 (2004) 453-455 [doi: 10.1109/LED.2004.830272](https://doi.org/10.1109/LED.2004.830272)

Thème n°2

**Le transistor tout diamant
delta dopé au bore**

**Une solution au défi des transistors
en diamant ?**

Fabrication et étude de couches de diamant monocristallines ultraminces et très fortement dopées au bore (« delta-dopées »)

Afin de combiner la haute mobilité des trous et les forts champs de claquage du diamant sans pâtir de la forte énergie d'ionisation des accepteurs qui limite sévèrement le courant direct dans un transistor, nous avons proposé dans le cadre du projet ANR DELTADIAM de réaliser un canal comportant une couche « delta-dopée » au bore à la transition métallique et assez fine pour que les porteurs soient délocalisés de part et d'autre des interfaces. Les homoépitaxies ont été réalisées soit au CEA-LIST soit à l'Institut Néel.

Pour l'IEMN, l'enjeu était de vérifier la faisabilité de transistors à effet de champ qui bénéficieraient des qualités du diamant sans souffrir des inconvénients associés au faible taux d'ionisation des dopants, en introduisant une couche métallique (de type p+) ultra-fine (dopage en delta (δ)) dans un pseudo-canal. La suggestion remonte à 1994 et l'état de l'art en 2008 était détenu par deux groupes qui collaboraient sur le sujet : l'Université d'Ulm, contributeur historique et Element Six, acteur industriel plus récent. A Ulm, les couches de la structure delta-dopée croissaient alors en homoépitaxie selon (100) pendant des impulsions de quelques secondes de plasma en présence d'une tige de bore rétractable, ce qui donnait des pics de concentration en Bore proches de $1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ avec une largeur d'environ 1 nm, des interfaces larges d'environ 1 nm/décade mais sur une seule décade et un dopage résiduel de $4 \times 10^{18} \text{ trous/cm}^3$. Les deux groupes proposaient en outre de fabriquer des transistors delta à renforcement de grille, et des structures double-delta. Ils montraient les mêmes caractéristiques de transistors à simple delta et à température ambiante, sans pincement complet du canal. Ils spécifiaient qu'une concentration surfacique limite pouvait être contrôlée par une grille sans toutefois l'estimer. Ils obtenaient des courbes de capacité-tension mesurées à 1 kHz et déterminaient une fréquence de coupure de quelques GHz. Enfin, ils faisaient état d'une simulation non publiée selon laquelle, pour une épaisseur de la couche delta-dopée de 2 nm, 95% des trous se trouveraient délocalisés en dehors de la zone p+.

Après avoir simulé les épaisseurs et concentrations nécessaires, l'Institut Néel a, réduit la rugosité du substrat et réussi à changer la nature des gaz à proximité de la zone d'épitaxie pour obtenir des couches d'épaisseur nanométrique contenant plusieurs 10^{20} B/cm^3 entourées de couches où le dopage est inférieur à 10^{17} B/cm^3 . La réduction de l'épaisseur de la zone métallique et de la rugosité d'interface nous a amené à développer les outils de traitement des données comme les mesures de transport réalisées sur des structures obtenues par lithographie optique et électronique.

Pour fabriquer des couches d'épaisseur nanométrique avec des interfaces abruptes sur plusieurs décades de concentration, deux voies innovantes (sans interruption du plasma) ont été ouvertes en

parallèle par l'Institut Néel et le LIST. D'une part, le volume du réacteur a été réduit et un système de bascule ultra-rapide des mélanges de gaz a été mis au point, ainsi qu'un procédé de gravure in situ bien contrôlé. D'autre part, un injecteur a été approché mécaniquement de la surface pour enrichir soudainement le mélange gazeux en bore, et une étude comparative de deux précurseurs du bore (diborane et triméthylbore) a été menée à bien.

Nous avons alors conçu puis fabriqué des dispositifs sub-micrométriques pour l'étude des phénomènes de transport et dessiné des transistors à effet de champ pour l'électronique de puissance microonde. Ceci a nécessité tous les aspects liés à la conception puis à la mise au point du procédé de fabrication de ces composants mais aussi à leur caractérisation (contact ohmique, contact Schottky, traitement de surface par gravure ICP Ar/Cl₂ et Ar/O₂). Cette tâche nous incombait et a été réalisée avec succès avec le soutien d'un post-doc (Jean-Claude Gerbedoen) financé par l'ANR.

Les mesures de transport électronique entre 4K et 450K ont été déterminantes. Elles prouvent que malgré la finesse des couches delta, la mobilité Hall n'est pas augmentée : soit il n'y a pas d'effet de confinement, soit la délocalisation des trous n'atteint pas les zones p- à plus forte mobilité. D'une manière générale, la Figure 2.1 montre que la valeur de la mobilité varie très peu selon les échantillons, sauf peut-être pour les couches les plus fines pour lesquelles la conduction par sauts dans les zones de transition de dopage pourrait jouer un rôle. Nous pensons que le canal en parallèle entre le substrat et la couche delta explique l'augmentation de la mobilité observée à haute température et nous n'avons pas observé la contribution des états confinés d'ordre supérieur comme supposés au début du projet.

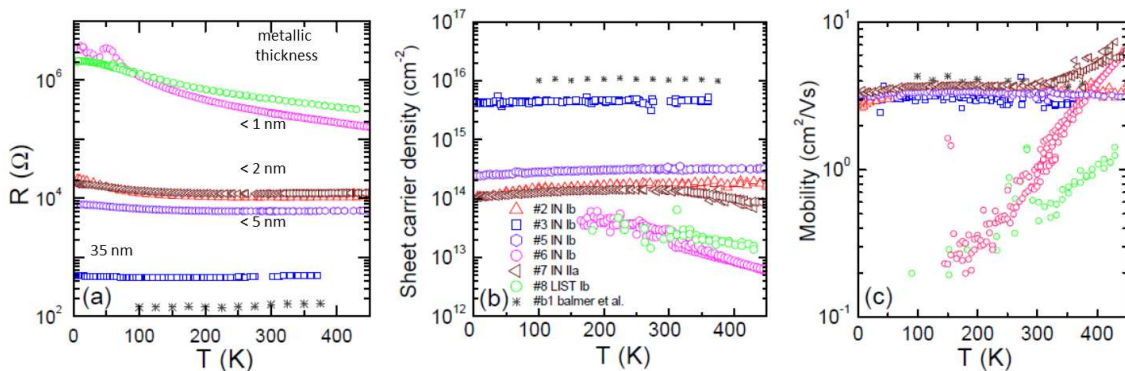


Figure 2.1 : Mesures de résistance et d'effet Hall pratiquées sur des barres de Hall fabriquées à l'IEMN à partir de structures de diamant delta-dopées au bore dont l'épitaxie a été faite par le LIST ou l'Institut Néel. Les épaisseurs reportées en (a) sont estimées à partir de la densité surfacique de porteurs déterminée par effet Hall.

Pour une épaisseur de la couche δ de 1 nm, aucune augmentation de la mobilité n'a été détectée dans le canal. Sur ces homostructures, des transistors ont été fabriqués sur lesquels la charge surfacique maximale modulable par la grille du transistor a été estimée (Figure 2.2).

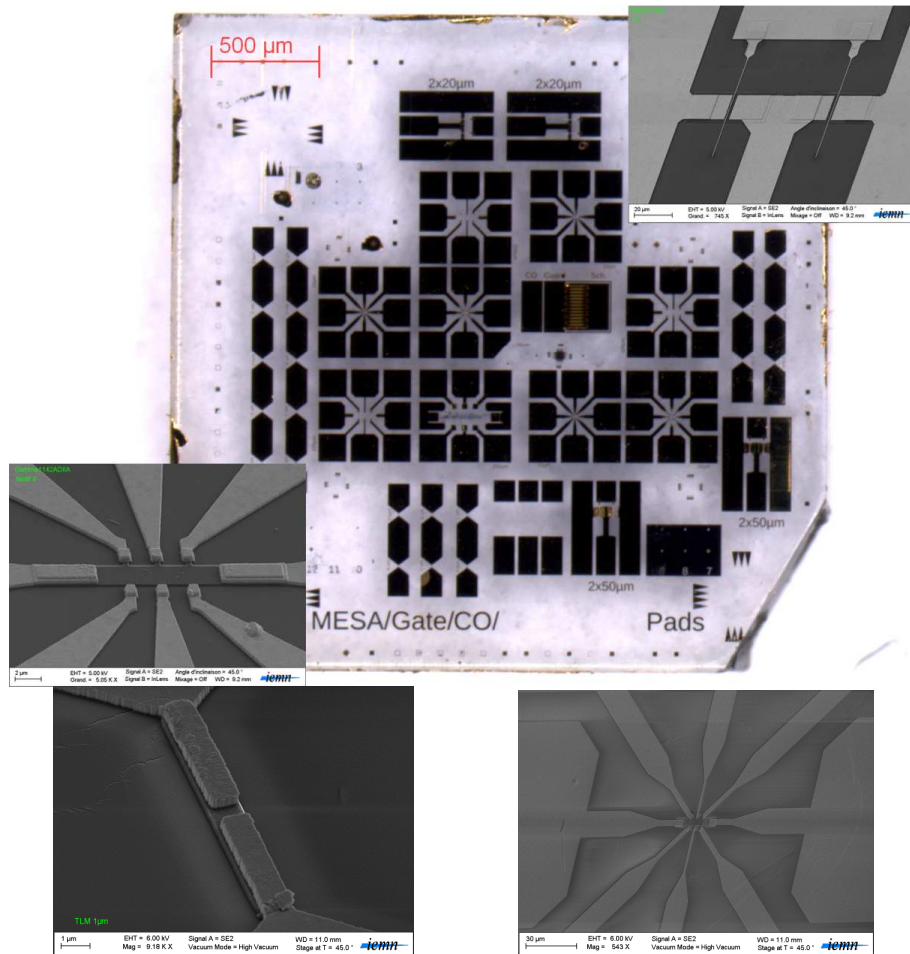


Figure 2.2 : Exemples de vues au microscope électronique d'une homostructure delta-dopée épitaxiée sur substrat diamant IIa (3×3mm) sur laquelle différents dispositifs ont été réalisés : Echelle TLM, composants de mesure de fuite de surface et en volume, barres de Hall (image en bas à gauche), transistors RF de puissance (image en haut à droite). Les plots de contacts ohmiques et Schottky, les structures mesa et le design du transistor bi-grille submicrométrique sont donnés à titre d'exemple parmi un ensemble de topologies réalisées. L'intégralité de cette technologie a été développée au cours du projet « Deltadiam ».

Malgré la rigueur du travail réalisé, la finesse des couches, l'absence de signatures de forte mobilité et de mesures électriques prouvant une quelconque modulation de la conductivité électrique, ce concept ne semblait pas réalisable. Finalement, grâce à un logiciel de simulation Nextnano3D utilisant le formalisme de la fonction enveloppe, l'Institut Néel a pu montrer que les paramètres cruciaux pour la délocalisation des porteurs étaient l'épaisseur de la couche delta, le taux de dopage, ainsi que la proximité de la zone à forte mobilité. Les résultats obtenus ont montré qu'il n'était pas physique de réaliser ce genre d'homostructure.

En conclusions, l'absence d'augmentation de la mobilité du canal delta-dopé pour de très faibles épaisseurs est un résultat négatif mais robuste puisqu'il a été obtenu sur des structures delta-dopées dont l'épaisseur était de l'ordre de 1nm et qui avaient été élaborées dans deux laboratoires français

différents et par des techniques de croissance différentes. Ce travail permet de mettre en exergue un résultat majeur pour la communauté du diamant pour l'électronique, qui rend illusoire l'application de telles structures aux transistors à effet de champ de type MESFET en diamant telle qu'elle était envisagée au début du projet. Même s'il a débouché sur un résultat négatif en ce qui concerne l'utilisation du diamant δ -dopé pour l'électronique RF, ce projet a permis aux partenaires de progresser et d'élargir notablement leurs connaissances et savoir-faire, ouvrant notamment la voie à la réalisation de nouvelles structures à modulation de dopage.

Autre étude réalisée sur des couches de diamant homoépitaxiées : Effet d'avalanche par ionisation par choc des impuretés profondes dans le diamant pour des applications électroniques

Dans un semi-conducteur dopé, à la température où les donneurs ou les accepteurs ne sont pas complètement ionisés (par exemple, à $T < 10$ K dans Ge) et pour un champ électrique critique, ces charges présentes dans le semi-conducteur acquièrent une énergie suffisante pour ioniser des atomes d'impuretés, mais pas les atomes du semi-conducteur, par collisions inélastiques et de produire de nouveaux porteurs de charges. Ce phénomène est appelé ionisation par impact des impuretés (III). Cet effet conduit à une augmentation de plusieurs ordres de grandeur de la densité de porteurs jusqu'à l'ionisation complète de toutes les impuretés dans un processus d'avalanche. Ce phénomène est également appelé avalanche par ionisation par impact d'impuretés ou (IIIA) (ce phénomène se produit à plus ou moins faible champ électrique) pour le distinguer du phénomène d'avalanche suite à l'ionisation par impact du réseau cristallin lequel se produit à des intensités de champ beaucoup plus élevées et provoque la formation de paires électrons-trous qui finit souvent par la destruction du semiconducteur. Cet effet reproductible et non destructif a été observé sur plusieurs semiconducteurs uniquement à la température cryogénique.

Nous l'avons observé sur des couches de diamant dopé au bore juste sous la transition métallique. Le phénomène a été observé à température ambiante car le bore est un niveau profond. Il pourrait constituer une base pour utiliser le principal inconvénient du diamant, à savoir ne pas posséder de dopant en bord de bande, pour en faire des oscillateurs de puissance. Cette action entre dans le cadre d'une collaboration avec l'institut de Physique de l'académie des sciences de Prague (Cf. Dr. Vincent Mortet) lequel fournit les homoépitaxies.

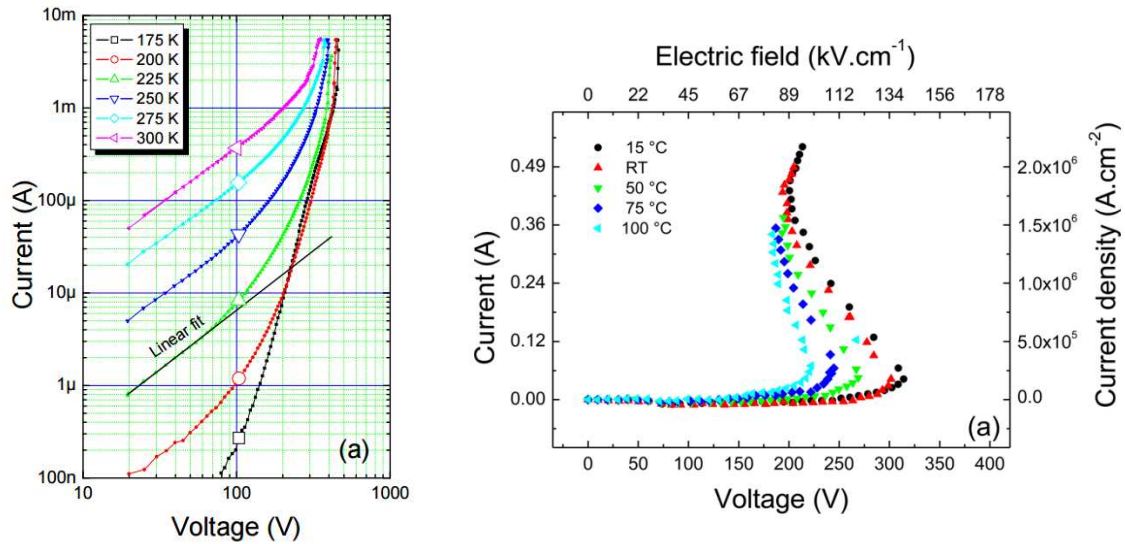


Figure 2.3 : Mesures quasi-statiques entre 2 électrodes distantes de 22 μ m à différentes températures où l'effet IIIA est observé.

Publications RICL et CICL

[MOR16] Peculiarities of high electric field conduction in p-type diamond
MORTET V., TREMOUILLES D., BULIR J., HUBIK P., HELLER L., BEDEL-PEREIRA E., SOLTANI A.
Appl. Phys. Lett., **108**, 15 (2016) 152106, doi: 10.1063/1.4946853

[MOR15] Properties of boron-doped epitaxial diamond layers grown on (110) oriented single crystal substrates
MORTET V., PERNOT J., JOMARD F., SOLTANI A., REMES Z., BARJON J., D'HAEN J., HAENEN K.
Diam. Relat. Mater. 53 (2015) 29-34, doi: 10.1016/j.diamond.2015.01.006

[CHI14] Electronic and physico-chemical properties of nanometric boron delta-doped diamond structures
CHICOT G., FIORI A., VOLPE P.N., TRAN THI T.N., GERBEDOEN J.C., BOUSQUET J., ALEGRE M.P., PIÑERO J.C., ARAUJO D., JOMARD F., SOLTANI A., DE JAEGER J.C., MORSE J., HÄRTWIG J., TRANCHANT N., MER-CALFATI C., ARNAULT J.C., DELAHAYE J., GRENET T., EON D., OMNES F., PERNOT J., BUSTARRET E.
J. Appl. Phys., **116**, 8 (2014) 083702 doi: 10.1063/1.4893186

[MOR11] Impurity impact ionization avalanche in p-type diamond
MORTET V., SOLTANI A.
Appl. Phys. Lett., **99**, 20 (2011) 202105-1-3 doi: 10.1063/1.3662403

[DEF08] Loss characteristics in coplanar propagation waveguides fabricated on Ila diamond substrates
DEFRANCE N., GERBEDOEN J.C., SOLTANI A., DE JAEGER J.C., MORSE J.
19th European Conference on Diamond, Diamond-Like Materials, Carbon Nanotubes, Nitrides and Silicon Carbide, Diamond 2008, Sitges, Spain, september 7-11, 2008
Diam. Relat. Mater. **18**, 5-8 (2009) 881-883 doi: 10.1016/j.diamond.2009.02.002

[VOL11-C1] Imaging techniques for direct defect analysis in SC diamonds: what scanning electron microscopy and cathodoluminescence can ultimately reveal?

P.N. Volpe, S. Saada, N. Tranchant, J.C. Arnault, A. Soltani, F. Donatini, and P. Bergonzo

Surface and bulk defects in CVD Diamond films XVI, Hasselt, Février 2011

[GER11-C1] UV-ozone treatment on single crystal diamond for very low losses coplanar waveguide

J-C.Gerbedoen, A.Soltani, P-N. Volpe, N. Defrance, J-C. De Jaeger

22nd European Conf. on Diamond and Related Materials, Garmisch-Partenkirchen, Septembre 2011

[MER12-C1] New insight into ultra-sharp boron interfaces for delta-doped diamond structures

C. Mer-Calfati, N. Tranchant, J.C. Gerbedoen, P.N. Volpe, F. Jomard, J. Pernot, J.C. Arnault, A. Soltani, M.Pomorski, S. Weber, P. Bergonzo

23rd European Conference on Diamond and Related Materials, Granada, Septembre 2012

[FIO-C1] Electrical properties and doping profiles of some delta-doped diamond structures

A. Fiori, G. Chicot, J. Bousquet, R. Fillon, J.C. Gerbedoen, A. Soltani, F. Omnès, J. Pernot, F. Jomard, E. Bustarret

Fall Meeting EE Symposium of the Materials Research Soc., Boston, USA, Novembre 2012

Thème n°3

Diodes à effet tunnel résonnant Al(Ga)N/GaN/Al(Ga)N

**Les semiconducteurs GaN/AlN sont-ils
condamnés à être des barrières
perméables pour les électrons ?**

Sommaire

I. Introduction

II. Enjeux et problématique, état de l'art

III. Approche scientifique et technique

IV. Conception et simulation

V. Technologie de fabrication en salle blanche

VI. Test et démonstration de dispositifs

VII. Résultats obtenus :

a. Diodes à simple barrière

b. DTR à double barrière

VIII. Publications

Le projet TRANSNIT est un projet de recherche expérimental et exploratoire coordonné par l'IEF d'Orsay. J'ai été associé côté IEMN pour tout les aspects simulation, conception, fabrication et caractérisation des diodes, l'INAC/CEA (Institut Nanosciences et Cryogénie) à Grenoble et le CRHEA à Sophia-Antipolis pour le côté épitaxies.

I. Introduction

Comme déjà mentionné, les techniques modernes d'élaboration de ces matériaux à LBI permettent la croissance de films minces de GaN, AlGaIn d'épaisseur nanométrique sur des substrats dont le paramètre de maille cristalline est très différent de celui des couches GaN ou AlN. Il s'ensuit la formation de dislocations dans les couches en densité gigantesque pouvant atteindre un milliard par centimètre. Ces dislocations traversantes constituent des pièges pour les électrons mais aussi des court-circuits à travers les couches. L'objet du projet TRANSNIT a été de relever le défi de la maîtrise du transport des électrons à travers des couches minces de GaN, AlGaIn.

Le prototype de base pour sonder le transport perpendiculaire des électrons est la diode tunnel résonnante dont le principe consiste en une double barrière en AlGaIn entourant un puits de potentiel en GaN d'épaisseur de l'ordre du nanomètre. Le confinement quantique donne lieu à un état d'énergie dans le puits. L'hétérostructure est transparente pour le transport des électrons lorsque les électrons incidents ont une énergie égale à celle du niveau confiné, ce qui est obtenu en jouant sur la tension appliquée au dispositif. Si la tension augmente, le courant diminue et on assiste au phénomène de résistance négative différentielle qui peut être mis à profit pour la réalisation d'oscillateurs aux fréquences THz. Le pré-requis est l'élaboration de couches minces d'épaisseur parfaitement contrôlée à la monocouche atomique près (0,25 nm) avec la technique la plus adaptée disponible à l'époque: l'épitaxie par jets moléculaires. Nous avons utilisé les nanotechnologies les plus avancées pour fabriquer des micro- et nano-dispositifs de taille allant de 100 nm à quelques dizaines de micromètres. Les composants ont subi une multitude de tests allant de la microscopie à force atomique pour analyser la conduction à l'échelle du nanomètre, aux mesures électriques ou optiques sous micro-pointes.

L'équipe du CEA a réussi à contrôler la croissance de couches minces d'AlN/GaN de deux monocouches atomiques (0,5 nm) d'épaisseur, ce qui constituait un nouvel état de l'art. Nous avons démontré l'effet tunnel entre deux puits quantiques et reproductible plus de 50 fois à température ambiante. Cet effet a été exploité par notre partenaire de l'IEF pour réaliser des composants performants pour la transmission de l'information par fibre optique: des modulateurs électro-optiques et des détecteurs ultra-rapides à cascade quantique.

II. Enjeux et problématique, état de l'art

Au démarrage du projet il n'existait pas de savoir-faire établi en termes d'élaboration, de simulation et de technologie des dispositifs unipolaires GaN/AlGaIn reposant sur le transport perpendiculaire. Les premières tentatives par le groupe de Kishino au Japon de fabriquer des DTRs ont donné lieu à des résultats controversés, notamment parce que l'effet de résistance négative différentielle observé sur des diodes à double barrière GaN/AlN n'était pas reproductible. Les expériences plus récentes (en 2006) menées par l'équipe du G. Strasser en Autriche ont montré que la présence de défauts est probablement à l'origine de ce manque de reproductibilité. Les dislocations traversantes se manifestent par la présence de pièges et niveaux profonds dans les barrières (caractéristiques I-V non reproductibles). Elles donnent aussi lieu à des canaux de conduction parasite (courant de fuites) ou des centres diffusants.

Le projet TRANSNIT proposait des approches innovantes pour pallier ces difficultés, le pré-requis étant l'utilisation de matériaux de haute qualité et la réalisation de dispositifs sans dislocations. Pour y parvenir, deux approches technologiques ont été testées, l'approche bottom-up et top-down.

III. Approches scientifique et technique

En termes d'élaboration de matériaux de haute qualité le projet TRANSNIT ciblait la technique épitaxiale la plus adéquate pour la croissance de couches ultra-minces avec des interfaces abruptes et un contrôle d'épaisseur à la monocouche atomique près. Il s'agit de l'épitaxie par jets moléculaires avec une source d'azote par plasma RF (CEA) ou obtenue par cracking de l'ammoniac (CRHEA). La stratégie pour réduire/contrôler la densité de dislocations reposait sur la réalisation de micro-dispositifs en suivant deux approches. La première dite « bottom-up » met en œuvre la technique d'épitaxie sélective sur des ouvertures de masque diélectrique déposé sur le substrat et conduit à la fabrication de micro-piliers GaN/Al(Ga)N sans défaut avec un diamètre de l'ordre de la centaine de nanomètres. La seconde approche dite « top-down » repose sur la réduction de taille des dispositifs et par voie de conséquence du nombre de dislocations présentes en leur sein ainsi que sur l'utilisation de substrat de haute qualité.

Au démarrage du projet nous avons ciblé deux types de composants modèles utilisant le transport vertical: 1) des diodes tunnels résonnantes sous forme soit de micro-piliers (bottom-up) soit de micro-mesas (top-down) ; 2) des photodétecteurs intersousbandes à multipuits quantiques pour le domaine spectral infrarouge. Cependant, l'IEMN n'était pas concerné pas ce second thème de recherche si ce n'est fournir une aide technologique pour faire gagner du temps au partenaire IEF dans leur salle blanche MINERVE.

Pour mener à bien la caractérisation des matériaux et des dispositifs, le consortium a mis en œuvre un ensemble de techniques à l'état de l'art : microscopie électronique en transmission à haute

résolution, microscopie à force atomique et à force électrique, caractérisations électriques sous micropointes (I-V, C-V), analyse fréquentielle et temporelle, spectroscopie optique de transmission et de photoconduction à transformée de Fourier...

IV. Conception et Simulation

Le premier aspect est la simulation de la structure de bande et du confinement quantique des dispositifs GaN/AlGaN. L'effort s'est porté sur une modélisation du transport au travers d'hétérostructures GaN/(Al)GaN à simple et double barrières, basées sur la résolution auto-cohérente des équations de Schrödinger-Poisson avec approximation de la masse effective à l'aide des fonctions de Green hors équilibre (cf. Figure 3.1). Pour concevoir ce nouvel outil, nous avons eu l'aide précieuse de deux collègues : Jean-Louis Farvaque et Michel Rousseau.

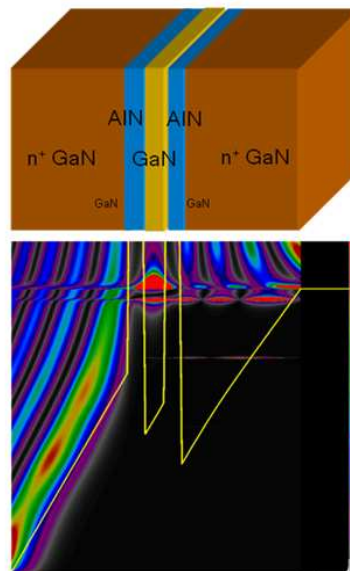


Figure 3.1 : Distribution des électrons dans une hétérostructure AlN/GaN à double barrière calculée par les fonctions de Green.

L'originalité de ce modèle réside sur le fait qu'en régime balistique, la densité d'états ne dépend que de la présence des contacts électriques et se décompose en différents termes associés respectivement à l'injection de porteurs via chacun des contacts. On peut supposer que les contacts sont à l'équilibre thermodynamique et qu'un état d'énergie E dans ces contacts soit caractérisé par les taux d'occupation suivant la statistique de Fermi-Dirac $f_1(E)$ et $f_2(E-eV)$ (où V est la tension appliquée entre les contacts). Ce concept est une idéalisation acceptable utilisée dans la plupart des approches quantiques pour décrire les propriétés de transport à l'échelle mésoscopique. Par conséquent, la zone active est considérée comme un système isolé n'échangeant ni énergie et ni

particules avec les contacts métalliques. Une procédure est proposée en fin de projet pour calculer ces mêmes grandeurs dans le cas d'interactions inélastiques. Aussi, la méconnaissance de la discontinuité de bande entre l'AlN et le GaN à l'échelle nanométrique nous a poussé à évaluer théoriquement cette valeur dont la disparité se répercutait directement sur les caractéristiques J-V simulées ($\Delta E_c = 1.75$ eV).

L'effort a porté sur la simulation de la distribution énergétique des électrons, de la probabilité de transition, de la caractéristique I-V et sur l'optimisation du rapport $I_{pic}/I_{vallée}$ en fonction de l'épaisseur et du dopage des couches (cf. Figure 3.2).

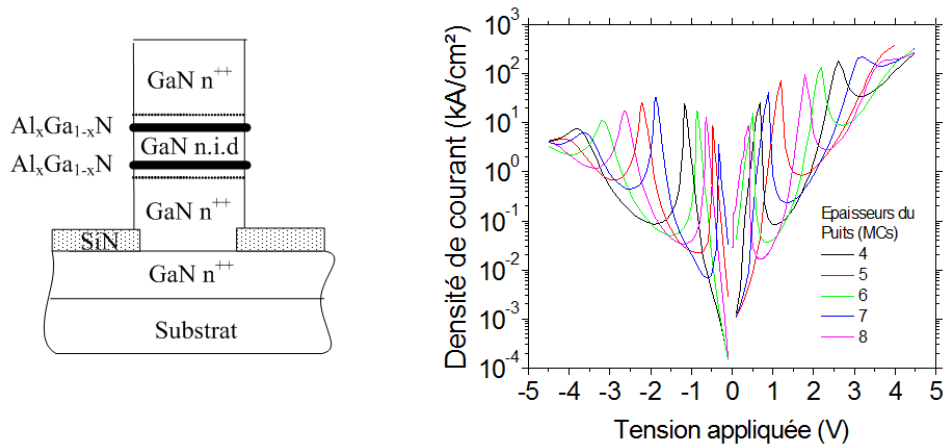


Figure 3.2: Schéma de principe d'une DB Al(GaN)/GaN/Al(GaN) et caractéristiques J-V simulées en fonction de la largeur du puits GaN (4MCs à 8MCs).

Les caractérisations optiques et structurales ont permis d'atteindre un degré de précision inégalé sur les paramètres matériaux encore mal connus au démarrage du projet (champs internes inhérents à la structure wurtzite, potentiel aux interfaces, non-parabolicité de la bande de conduction, ...). Ces modèles ont permis la conception de structures à simple et double barrières, à puits quantiques couplés ou à cascade quantique et les prédictions théoriques se sont révélées en accord avec les mesures expérimentales.

Les substrats utilisés sont le GaN sur saphir, l'AlN sur saphir mais aussi des substrats auto-supportés de GaN pour la réalisation de nano-diodes tunnels résonnantes. Les conditions de croissance (température, rapport des flux III-V riche en Gallium, ...) ont fait l'objet d'études approfondies de manière à minimiser la rugosité des couches, contrôler la qualité des interfaces à l'échelle de la monocouche atomique (0,25 nm) ainsi que le dopage des couches par le silicium. Les croissances ont pour la plupart été réalisées sur des substrats GaN sur saphir et ont montré une grande sensibilité aux conditions de préparation de ces substrats. Des défauts en forme de V apparaissent à la surface des échantillons. Le CRHEA s'est chargé de l'élaboration de structures bottom-up afin de limiter

l'effet de défauts liés à la gravure d'isolation et pour tenter de diminuer la densité de défauts structuraux. Des croissances sur des substrats préparés à l'IEMN avec des ouvertures de tailles variables dans des masques diélectriques (SiO_2 , SiN_x) ont été étudiées. Les analyses montrent que dans des conditions de croissance voisines de celles qui sont nécessaires à l'obtention d'un matériau GaN de qualité satisfaisante, d'importants effets de bord rendaient impossible la réalisation de colonnes compatibles avec l'intégration d'hétérostructures verticales. Une seconde approche basée sur la gravure de piliers dans des couches épaisses de GaN et la reprise de croissance a montré des résultats plus prometteurs. Des piliers avec des hauteurs pouvant dépasser le micromètre et des largeurs de quelques centaines de nm ont ainsi été réalisés à l'IEMN et ont servi de socle à la reprise de croissance par EJM au CRHEA d'hétérostructures DTR Al(Ga)N/GaN/Al(Ga)N et au CEA.

V. Technologie de fabrication en salle blanche

Les efforts ont porté sur la fabrication de micro-nano dispositifs éventuellement compatibles avec des mesures à haute fréquence, l'obtention de bons contacts ohmiques et la préparation de substrats nano-patternés.

L'un des verrous au démarrage du projet était la maîtrise de la gravure profonde du GaN et de l'AlGaN avec de forts rapports d'aspect (cf. Figure 3.2).

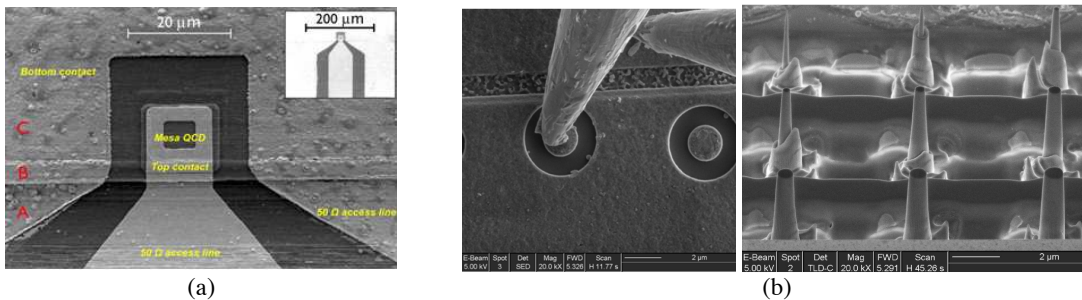


Figure 3.2: (a) Image SEM d'une DETR (réalisée en salle blanche) AlN/GaN avec ses plots d'accès RF ; (b) Image SEM d'une DETR AlN/GaN réalisé au moyen d'un FIB.

Après un sérieux travail d'optimisation, d'excellent résultats ont été obtenus par gravure sèche en milieu chloré type RIE (« reactive ion etching ») avec un ICP-RIE (« inductive coupled plasma RIE ») à l'IEMN. Cette étape a permis la réalisation de micro-mesas de tailles comprises entre $1\mu\text{m}$ et quelques dizaines de μm . Nous avons aussi mis en œuvre des techniques de gravure par faisceau d'ions focalisés (FIB) pour la fabrication de mesas de plus petite dimension (diamètre compris entre 100 nm et $3\mu\text{m}$). Les caractéristiques électriques de ces diodes ont pu être mesurées *in situ* à l'aide de micropointes au sein du bâti FIB. Un effort important a aussi porté sur l'obtention de bons contacts ohmiques sur GaN dopé n. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec une métallisation

Ti/Al/Ni/Au suivie d'un recuit flash à 750°C (résistivité de contact inférieure à $10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}^2$ et $R_c < 0.1 \Omega \cdot \text{mm}$).

La topologie des contacts a été optimisée pour permettre des mesures radiofréquences. Des lignes d'accès coplanaires adaptées en impédance ont été mises en œuvre pour le contactage supérieur et inférieur après deux étapes de gravure ICP-RIE, la première pour dégager le contact inférieur, la seconde pour enlever les couches semiconductrices sous les lignes d'accès. Cette technologie a été transférée à l'IEF pour la fabrication de détecteurs à cascade quantique ultrarapides basés sur le transport tunnel dans une structure à multi-puits quantiques GaN/AlGaIn.

VI. Test et démonstration de dispositifs

Plusieurs dispositifs ont été étudiés. Il s'agit de diodes à simple barrière, de diodes tunnels à double barrière, de modulateurs électro-optiques utilisant le transport tunnel entre deux puits quantiques couplés et de détecteurs à cascade quantique. Les échantillons ont été caractérisés par une multitude de techniques: AFM et AFM conducteur (CEA, CRHEA, IEF, IEMN), micro-Raman (IEMN), photoluminescence (CEA, CRHEA, IEF), micro-photoluminescence (IEMN, CEA, IEF), spectroscopie TFIR (IEF), mesures I-V sous pointes (IEMN, CEA, CRHEA, IEF), mesures C-V (IEMN), mesures électro-optiques RF (IEF),... Les résultats majeurs sont les suivants:

VII. Résultats obtenus

a) Diodes à simple barrière

Nous avons analysé les propriétés de conduction électronique de diodes GaN contenant une simple barrière en AlGaIn (épaisseur comprise entre 0,5 nm et 5 nm) (cf. Figure 3.2).

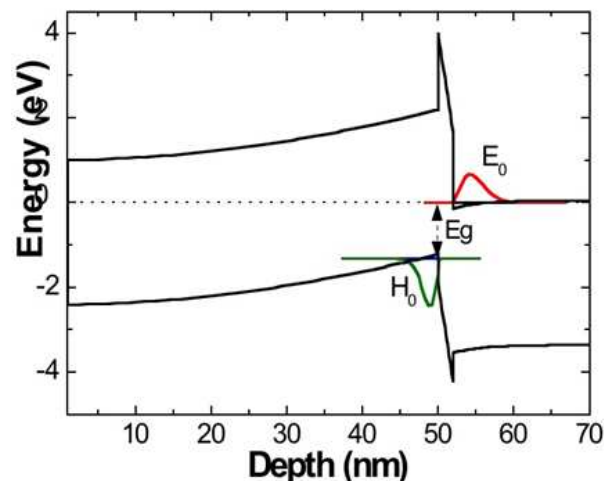


Figure 3.2: Profil de bandes d'une barrière de 2 nm en AlGaIn en sandwich entre deux couches GaN. E_0 et H_0 sont les états confinés pour les électrons et les trous de part et d'autre de la barrière.

Par des mesures capacitives, nous avons observé que la présence de la barrière induit un champ électrique dans la couche supérieure en GaN, qui modifie l'épaisseur effective de la barrière de potentiel vue par les électrons. Les résultats expérimentaux de photoluminescence et de caractérisations I-V sont en accord avec les simulations basées sur une résolution auto-cohérente des équations de Schrödinger-Poisson. Pour une épaisseur de barrière de 0,5 nm et 1 nm, nous avons identifié la raie de luminescence liée à la recombinaison des électrons et des trous confinés respectivement aux interfaces inférieure et supérieure (voir figure ci-contre). L'évolution de la luminescence avec la tension appliquée montre que la chute de tension a lieu principalement dans la couche supérieure de GaN.

Les propriétés de transport à l'échelle nanométrique ont été étudiées à l'aide d'un AFM conducteur. L'échantillon GaN de référence présente un comportement redresseur avec un seuil vers 1 V. Les inhomogénéités ont été attribuées à des variations locales du potentiel Schottky. Sous tension inverse, nous observons des points chauds de courant en densité $\sim 1 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$, valeur 50 fois plus faible que la densité totale de dislocations ($\sim 5 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$). Ces points chauds sont attribués à des dislocations vis pures.

Le même comportement redresseur a été observé avec une barrière AlN d'épaisseur 0,5 nm, mais le seuil a augmenté à plus de 1,5V. Pour des épaisseurs de barrière de 1 à 3 nm, nous n'observons que des points chauds liés aux dislocations, ce qui confirme le caractère bloquant de la barrière de potentiel. Enfin, pour une épaisseur de 5 nm, nous observons en polarisation inverse une forte densité de courant liée aux défauts introduits par le relâchement de la contrainte dans la couche d'AlN. Des analyses TEM confirment la relaxation partielle de la couche AlN pour une épaisseur supérieure à 3 nm.

Les conclusions sont similaires pour les échantillons fabriqués par EJM plasma (CEA) ou ammoniac (CRHEA). Dans ce dernier cas, la présence des défauts en forme de V est clairement identifiée comme étant source de court-circuit. Pour des diodes avec des rayons allant de 3 à 10 μm , les caractéristiques courant-tension des structures simple barrière Al(Ga)N/GaN montrent généralement la dissymétrie attendue en raison des effets de polarisation électrique dans les wurtzites épitaxiées selon l'axe polaire (axe c du GaN). Cet effet est cependant quasi-absent pour des barrières épaisses de 1 nm ce qui fixe ici l'épaisseur minimale de cette dernière en EJM ammoniac. Des courants de l'ordre de $10 \mu\text{A}/\mu\text{m}^2$ sont relevés à une tension de 1V pour des simples barrières épaisses de 2 et 3 nm, alors qu'une chute notable du courant est observée pour des barrières de 4 nm ($2 \mu\text{A}/\mu\text{m}^2$) et 5 nm ($< 1 \mu\text{A}/\mu\text{m}^2$).

b) DTR à double barrière

L'EJM ammoniac a été utilisée pour élaborer des structures à double barrières avec des épaisseurs de barrières de 2 nm et des puits GaN de 2 nm (structures 2/2/2 nm). Les caractéristiques courant-tension sont également dissymétriques et variables selon la qualité des couches (densités de défauts en V) et de la technologie (résistances des contacts notamment). Toutes ces structures montrent une saturation plus ou moins prononcée du courant dans la gamme $1-20\mu\text{A}/\mu\text{m}^2$ sous une polarisation directe de 1 V (électrons migrant vers la surface) avant une remontée du courant. Nous avons attribué cette saturation à la diminution attendue du transfert des électrons à travers les barrières une fois l'effet tunnel résonnant passé (les niveaux d'énergie dans le puits et les zones d'accès s'éloignant), l'effet de résistance différentielle négative étant en partie encore masqué par la présence de défauts jouant le rôle de court-circuit. L'absence de saturation avec des courants plus importants dans la direction opposée est également observée. La saturation du courant sous polarisation directe disparaît pour des structures identiques avec des barrières épaisses de 1.5 nm ce qui confirme l'analyse faite à partir des structures à simple barrière.

Les échantillons élaborés par EJM plasma contenaient des couches contacts en GaN dopé n, un puits quantique intentionnellement non dopé en GaN d'épaisseur de 0,5 à 2 nm entouré de double barrière en AlN d'épaisseur 0,5 nm (2 monocouches atomiques) et deux couches d'espacement en GaN non-dopé. Les échantillons ont été élaborés sur des substrats de $10\text{-}\mu\text{m}$ de GaN sur saphir. Les images de microscopie TEM ont confirmé l'excellente qualité structurale des échantillons. Les diodes ont été fabriquées sous forme de mésas de quelques μm de diamètre. En prenant en compte la densité de dislocations vis pure $\sim 10^7\text{ cm}^{-2}$, le nombre de points chauds (court-circuit) est en moyenne de 3 par mesa.

Tous les dispositifs montrent deux niveaux de courant lors de la caractérisation I-V. Les dispositifs présentant un fort courant ($\sim 10\text{ mA}$ à 3 V) sont instables et la valeur moyenne du courant ne dépend pas de l'épaisseur du puits GaN. Ceci est probablement lié à l'effet des dislocations vis pures. Les dispositifs présentant un faible courant ont une caractéristique I-V reproductible, le courant diminuant avec l'épaisseur des barrières. Néanmoins toutes les diodes avec une épaisseur de barrière en AlN de 3 monocouches ou plus ne montrent pas d'effet de résistance négative différentielle (NDR). Seules les diodes avec une épaisseur de barrière en AlN de 2 monocouches (0,5 nm) présentent un phénomène de NDR à tension positive appliquée. Le rapport pic/vallée est de l'ordre de 3,5 à température ambiante et constitue aujourd'hui encore un état de l'art. Cependant, ce comportement se révèle bi-stable suivant le sens de la polarisation, c'est à dire d'une tension négative à positive ou le contraire. Le basculement à tension positive est rapide, contrairement à celui observé à tension négative. Nous en avons conclu que le phénomène à l'origine de la NDR

observée n'était pas simplement l'effet tunnel résonant mais impliquait le piégeage/dépiégeage des électrons par des défauts profonds dans les barrières AlN. La solution adoptée pour écranter ces niveaux dans la bande interdite a été de réaliser ces mêmes mesures à l'azote liquide pour vider les pièges et de polariser la diode avec un cycle aller/retour $-10V \rightarrow +7V$ de manière à forcer les pièges en volume des barrières et aux interfaces à se vider au cours de la polarisation électrique (remplissage par voie thermique au cours de la polarisation électrique).

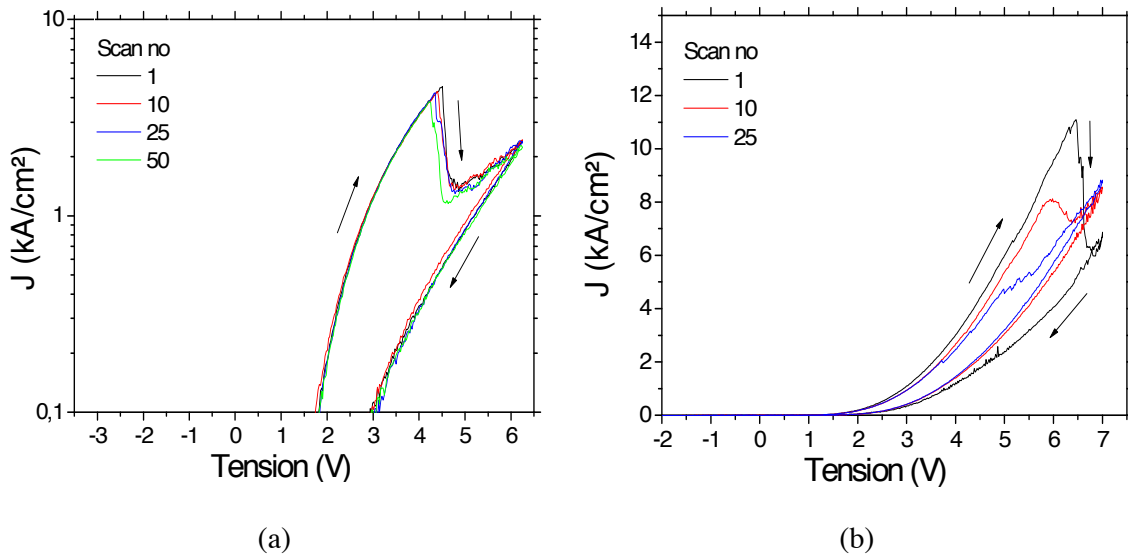


Figure 3.3: Caractéristiques $J(V)$ à 120K prises successivement sur des diodes de diamètres $2\mu\text{m}$ en commençant le balayage par -13V (a) et $3\mu\text{m}$ en commençant le balayage à -19V (b).

La Figure 3.3 montre un exemple de caractéristiques J-V où reproductibilité à été observée plus de 50 fois avec des diodes de 1 et $2\mu\text{m}$ de diamètre et cette reproductibilité diminuait avec la taille des mésas.

L'étude s'est poursuivie avec des échantillons comportant des barrières non plus en AlN mais en alliage AlGaIn avec une teneur en aluminium de 50 à 10% de façon à réduire l'influence des défauts profonds. Les caractérisations I-V menées sur certains mésas ont montré des phénomènes de NDR reproductibles en fonction du sens de la polarisation avec l'absence de bistabilité et ce dans les deux sens de polarisation (cf. Figure 2.3).

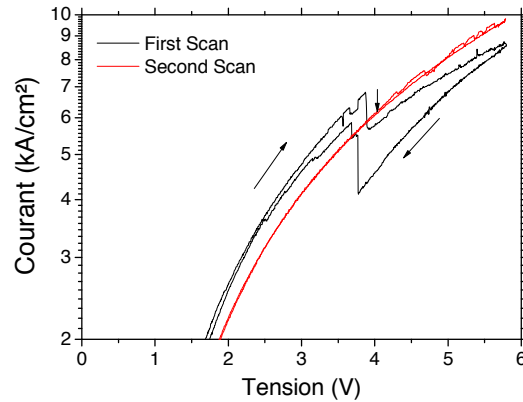


Figure 2.3 : Caractéristiques J(V) à 120K prises successivement sur la diode de diamètre 2 μ m après un traitement électrique de -6 V pendant 2min. Le balayage en tension s'effectue pour des valeurs positives en partant de l'équilibre (0V).

Ces résultats obtenus en 2011 constituaient une grande première au niveau international. Il s'agit de la première démonstration d'un effet de résistance négative différentielle reproductible dans les hétérostructures de GaN/AlN et ce dans un système modèle constitué de nano-mésas de nitrures.

En conséquence, le projet s'est traduit par un certain nombre d'avancées majeures en ce qui concerne :

- La conception des hétérostructures de nitrures d'éléments III et la simulation du transport électronique vertical dans les hétérostructures de nitrures, ce qui n'avait jamais été réalisé avec une approche aussi rigoureuse ;
- La croissance épitaxiale de couches de nitrures avec un contrôle de l'épaisseur à la monocouche atomique près. Les progrès réalisés au cours du projet ont contribué à établir un nouvel état de l'art pour l'élaboration de couches minces de GaN/AlGaN ;
- La technologie nitrures avec notamment la maîtrise de la fabrication de nano-dispositifs, établissant là encore un nouvel état de l'art ;
- La démonstration par l'IEF de modulateurs électro-optiques ou de détecteurs ultrarapides à cascade quantique utilisant le transport tunnel dans des hétérostructures de GaN/AlGaN ;
- ainsi que la démonstration de DTRs fonctionnelles dans l'approche bottom-up utilisant des nanomésas de GaN/AlN.

Les verrous restant à franchir sont la maîtrise du phénomène de résonance différentielle négative dans les hétérostructures bi-dimensionnelles. Les nombreux travaux menés dans le cadre du projet ont permis d'identifier les défauts responsables des court-circuits dans les structures. La contribution

des niveaux profonds dans les barrières AlGaN a elle aussi été identifiée. Une piste ouverte consiste à étudier le transport dans des hétérostructures à faible concentration en aluminium afin de limiter l'influence des défauts profonds et de réduire la contrainte dans les couches minces.

L'étude de DTR sur substrats GaN auto-supportés à faible taux de dislocation s'est révélée décevante malgré les nombreux efforts consacrés. Ceci tient à la qualité encore insuffisante des substrats disponibles sur le marché qui malgré leur coût exorbitant présentent des misorientations incompatibles avec la croissance de couches minces de haute qualité. La disponibilité de substrats GaN auto-supportés remédiant à ces défauts pourra dans un avenir plus ou moins proche de relancer le sujet.

La croissance de microstructures par l'approche bottom-up sur substrats patternés a dû être abandonnée en cours de projet au profit d'une approche alternative de recroissance sur micro-piliers car les phénomènes de recroissance latérale ne permettaient pas la réalisation de couches de haute qualité.

Au bilan, l'impact scientifique de ce projet s'est révélé excellent. Une des perspectives serait d'étudier la réalisation de lasers à cascade quantique en GaN/AlGaN à grandes longueurs d'onde. L'objectif est de bénéficier de l'énergie très élevée des phonons optiques LO pour réaliser des lasers fonctionnant à température non-cryogénique et à des longueurs d'onde inaccessibles aux semiconducteurs usuels type GaAs.

VIII. Production scientifique RICL

[BOU12] Effect of heterostructure design on current-voltage characteristics in $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ double-barriers resonant tunneling diode

BOUCHERIT M., SOLTANI A., ROUSSEAU M., FARVACQUE J.L., DE JAEGER J.C.

J. Appl. Phys., **112**, 11 (2012) 114305-1-5 [doi: 10.1063/1.4767382](https://doi.org/10.1063/1.4767382)

[BOU11] Investigation of the negative differential resistance reproducibility in AlN/GaN double barrier resonant tunneling diodes

M. Boucherit, A. Soltani, E. Monroy, M. Rousseau, D. Deresmes, M. Berthe, C. Durand and J.-C. De Jaeger

Appl. Phys. Lett., 99 182109 (2011); doi: 10.1063/1.3659468

[COR11] Growth of GaN based structures on focused ion beam patterned templates

Y. Cordier, O. Tottereau, L. Nguyen, M. Ramdani, A. Soltani, M. Boucherit, D. Troadec, F.-Y. Lo, Y. Y. Hu, A. Ludwig, and A. D. Wieck

Phys. Status Solidi C **8** (5) 1516-1519 (2011); doi: 10.1002/pssc.201000882

[GOH11] Structural and optical properties of nanodots, nanowires, and multi-quantum wells of III-nitride grown by MOVPE nano-selective area growth
GOH W.H., PATRIARCHE G., BONANNO P.L., GAUTIER S., MOUDAKIR T., ABID M., ORSAL G., SIRENKO A.A., CAI Z.H., MARTINEZ A., RAMDANE A., LE GRATIET L., TROADEC D., SOLTANI A., OUGAZZADEN A. 15th International Conference on Metal Organic Vapor Phase Epitaxy, ICMOVPE-XV, Incline Village, NV, USA, may 23-28, 2010
J. Cryst. Growth **315**, 1 (2011) 160-163 [doi: 10.1016/j.jcrysgro.2010.08.053](https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2010.08.053)

[COR08] Selective area growth of GaN-based structures by molecular beam epitaxy on micrometer and nanometer size patterns
CORDIER Y., SEMOND F., MORENO J.C., FRAYSSINET E., BENBAKHTI B., CAO Z., CHENOT S., NGUYEN L., TOTTEREAU O., SOLTANI A., BLARY K.
7th International Workshop on Epitaxial Semiconductors on Patterned Substrates and Novel Index Surfaces, 7th ESPS-NIS 2008, Marseille, France, april 21-24, 2008
Mater. Sci. Semicond. Process. **12**, 1-2 (2009) 16-20 [doi: 10.1016/j.mssp.2009.07.003](https://doi.org/10.1016/j.mssp.2009.07.003)

[MAR08] Residual stress relaxation in GaN/sapphire circular pillars measured by Raman scattering spectroscopy
MARGUERON S.H., BOURSON P., GAUTIER S., SOLTANI A., TROADEC D., DE JAEGER J.C., SIRENKO A.A., OUGAZZADEN A.
J. Cryst. Growth **310**, 24 (2008) 5321-5326 [doi: 10.1016/j.jcrysgro.2008.09.145](https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2008.09.145)

[BOU11-C1] Investigation of the negative differential resistance reproducibility in AlN/GaN double barrier resonant tunneling diodes in DC operation
M. Boucherit, A. Soltani, D. Deresmes, M. Berthe, E. Monroy, M. Rousseau, J-C. De Jaeger
Oral presentation, 9th International Conference on Nitride Semiconductors (10-15 July 2011), ICNS 2011 - Glasgow, and award young researcher.

[BOU11-C2] Optimization of AlN/GaN double-barrier resonant-tunnelling diode based on the non-equilibrium Green's function formalism
M. Boucherit, A. Soltani, M. Rousseau, J-L. Farvaque, J-C. De Jaeger
Oral presentation, 9th International Conference on Nitride Semiconductors (10-15 July 2011), ICNS 2011 - Glasgow.

Thème n°4

Photodétecteurs X-UV

**à base de matériaux semiconducteurs
nitrides d'éléments III à large bande interdite
et diamant**

Sommaire

- I. Historique, besoins et solutions existantes**
- II. Problématique pour les applications spatiales**
- II. Technologies des détecteurs UV**
- III. Solutions technologiques pour le spatial**
 - III.1 PiN & MSM diamant**
 - III.2 Photodiode MSM**
 - III.3 Photodiodes PiN**
- IV. Exploitation des photodétecteurs pour le spatial**
- V. Solutions technologiques à faible coût : les nitrures III-N à LBI**
 - V.1 Les photoconducteurs MSM $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$**
 - V.2 Photodiodes Métal-Semiconducteur-Métal**
- VI. Simulation**
- VII. Conclusion**
- VIII. Production scientifique**

I. Historique, besoins et solutions existantes

Dans le domaine énergétique des radiations électromagnétiques, les ultraviolets présentent un intérêt croissant pour la communauté scientifique. La détection du rayonnement électromagnétique implique une conversion d'énergie : le principe physique d'un détecteur consiste à absorber les photons d'une radiation optique et de fournir en échange un signal chimique, électrique ou thermique qui porte la signature de l'excitation. On distingue quatre mécanismes principaux de détection : les effets photochimiques, l'effet photoémissif, les effets photoélectriques internes (photoconducteur ou photovoltaïque) et l'effet thermique.

L'apparition des semiconducteurs dans les années 1950 a permis de mettre en œuvre les effets photoélectriques internes pour réaliser de nouveaux détecteurs. Ces derniers utilisent le changement d'état d'un électron du matériau photosensible par suite de l'absorption de l'énergie d'un photon incident. Ceux utilisant cet effet sont de deux types : les photodiodes et les photoconducteurs. Les dispositifs à transfert de charges (CCD) ont été inventés vers 1970 pour servir de lignes à retard analogiques. Il a fallu concevoir des structures adaptées à la détection pour un type de rayonnement donné, tel que le CCD à phase virtuelle (CCD amincis éclairés par l'arrière) lesquels ont eu pour intérêt initial d'offrir une efficacité de détection accrue dans l'ultraviolet. Par suite de leur intérêt comme photodétecteur et du fait de l'importance des marchés liés à la télévision, leur principal domaine d'application est toutefois rapidement devenu l'imagerie électronique. La technologie à cette époque (~1970) ne permettait de fabriquer que des capteurs de performances modestes. Les capteurs utilisés à des fins scientifiques étaient alors souvent les mêmes que ceux des caméras vidéo. Dans les années 1980, les progrès de la technologie ont conduit à une amélioration sensible de leurs performances. Compte tenu de besoins très différents, il s'est alors produit une dissociation entre capteurs destinés à la vidéo et capteurs scientifiques. Dans le premier domaine, on a privilégié la finesse de la résolution (pixelisation) par la réduction de la taille des capteurs mais aussi la réduction des coûts. Dans le second cas par contre, on a recherché une grande dynamique et un rendement quantique maximal. Cela s'est traduit par l'utilisation d'étages de sortie optimisés pour un bruit de lecture aussi faible que possible, les pixels restant relativement grands pour avoir une capacité de stockage de charges maximale, une surface photosensible de plus en plus grande avec l'apparition des capteurs "à image totale" (full frame").

Depuis, l'instrumentation dans le domaine X-UV s'est considérablement développée notamment sous l'impulsion des besoins de l'astrophysique, des études des plasmas créés par laser et de leurs applications à la fusion par confinement inertiel, des études d'émission X stimulée, du développement des lasers à excimères... En parallèle, sont apparus des systèmes d'imagerie mettant en œuvre des capteurs scientifiques de façon à en exploiter au mieux les performances et pouvoir ainsi analyser quantitativement et précisément le contenu d'une image. Les senseurs amincis de

qualité scientifique ont fait l'objet de développements durant les années 1980 et 1990. La sensibilité de ces capteurs est bien meilleure dans le domaine des X mous. Néanmoins, elle est plus faible que celle donnée par les prévisions basées sur l'analyse des constantes optiques du silicium et de la silice. Plusieurs modèles permettent d'expliquer ce phénomène et de quantifier cette perte de sensibilité. Ils confirment que, avec une bonne électronique de lecture, des signaux correspondant à quelques photons par pixel peuvent être détectés. A cette époque, certains semiconducteurs ont été testés et le sont encore avec plus ou moins de succès incluant les matériaux Ge, GaAs et SiC.

Ce n'est qu'à partir de la seconde moitié des années 1990 que sont apparus les matériaux SC III-N à large bande interdite à base de GaN. Il a fallu près de quarante ans pour que ces semiconducteurs, depuis la cristallogénèse et la synthèse en films minces, jusqu'à celle des procédés technologiques (dopages, gravures et métallisations), atteigne un niveau de maturité suffisant pour que l'on puisse réaliser des démonstrateurs fiables. La disponibilité de ces semiconducteurs à LBI constitue une véritable rupture technologique avec les autres filières. Historiquement, Le premier domaine d'applications de ces semiconducteurs à LBI au niveau industriel a été celui des composants électroluminescents pour la production de lumière pouvant balayer tout le domaine du visible jusqu'au proche UV (>220nm).

Depuis les années 2000, de nouveaux semiconducteur à LBI comme le diamant et les nitrures d'aluminium et de bore connaissent une amélioration de leur qualité cristalline similaire à celle du GaN à la fin des années 1990. Ces derniers présentent des caractéristiques physiques exceptionnelles en plus d'être davantage robustes aux applications spatiales envisagées et ayant en conséquence la stabilité indispensable aux conditions extrêmes. Ces matériaux nouveaux (avec le nitrure d'aluminium) constituaient à la fin des années 2000 un challenge technologique à relever afin d'élaborer de nouveaux photodétecteurs X-UV. Cette activité, soutenue par une thèse de doctorat (M. Hassan Ali BARKAD 2007-10), a débuté en 2006 et s'est terminée en 2013. Cette thèse était dédiée aux développements et aux tests de nouveaux détecteurs pour notamment l'observation du soleil dans le domaine XUV.

Ce thème de recherche a pour vocation une meilleure appréhension de ces nouveaux matériaux semiconducteurs à LBI (carbone diamant, nitrures d'aluminium, de gallium et de bore et leurs alliages associés) et des technologies associées afin de quantifier quelques paramètres physiques clés responsables des limitations observées. L'objectif de cette étude était de poser les bases nécessaires à terme à la réalisation d'une caméra XUV innovante susceptible de fonctionner dans des environnements hostiles sur terre et dans l'espace.

Ce activité a porté sur la conception, la réalisation, la caractérisation de démonstrateurs optroniques et l'étude physique de ces derniers par la simulation. La caractérisation spécifique dans le domaine

des X-mous et de l'extrême UV a pu être réalisée à PTB-Bessy (Berlin) en étroite collaboration avec l'Observatoire Royal de Bruxelles (ORB) et l'Institute for Materials Research (IMOMEC-Hasselt) pour les mesures dans le domaine des UV profonds.

II. Problématique pour les applications spatiales

Le soleil émet un rayonnement dont une grande partie est absorbée par la couche d'ozone. Seules les radiations dont la longueur d'onde est supérieure à 285nm parviennent sur terre. Les détecteurs de radiations UV produites sur terre, dits "solar blind", doivent détecter les radiations en dessous 285nm. La détection des rayonnements ultraviolets présente de nombreuses applications tant dans les domaines militaires que civils comme les dosimètres personnels pour environnements riches en UV, la détection d'incendies, l'identification des missiles par leur traînée ou encore le guidage de missiles. La plupart de ces applications nécessite des détecteurs sensibles au rayonnement UV mais en même temps insensibles aux rayonnements visibles (et infrarouges dans certains cas) qui constituent un fond important dans lequel se trouve la composante UV à détecter sélectivement. C'est le cas de la détection d'un signal X-UV en présence d'un important rayonnement solaire. Le rayonnement UV couvre un large domaine spectral qui s'étend de la limite du visible, soit 400nm jusqu'à la frontière des rayons X située à 10nm. Le rayonnement solaire est la source naturelle du rayonnement UV le plus important sur Terre (cf. Figure 4.1). Une des applications des détecteurs UV est liée à la mesure de la couronne solaire dans l'extrême UV (10-40nm), ainsi que la raie H.I Lyman- α (@121.6nm). Pour mieux comprendre la physique solaire et la météo spatiale, il est impératif d'améliorer les instruments d'observation et plus spécifiquement leur résolution spatiale et temporelle.

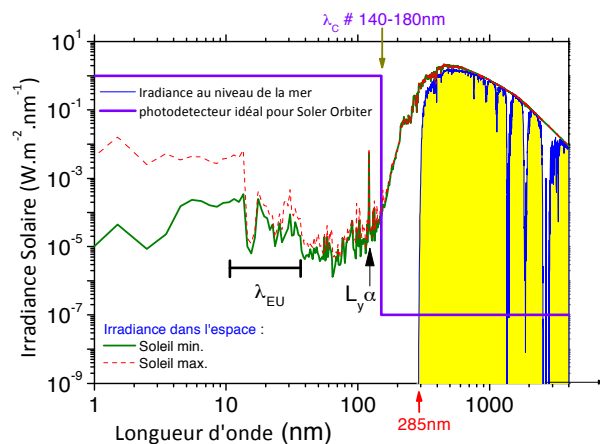


Figure 4.1: Spectre de l'irradiance solaire (min. et max.) dans l'espace et au niveau de la mer. La réponse spectrale du photodétecteur idéal est représentée en trait continu foncé. La mesure de l'irradiance solaire varie dans le temps (cycle solaire). C'est pourquoi les spectres présentés ont été enregistrés pour des activités solaires minimale et maximale (données ORB - février 2003).

La connaissance du climat solaire constitue en conséquence une nécessité pour une meilleure compréhension du climat terrestre. La gamme des UV lointain intervient de manière dominante dans la chimie de l'atmosphère moyenne (exemple : trou d'ozone). Aussi, la connaissance de l'évolution de l'émission de l'irradiance solaire est aussi déterminante pour la compréhension de notre étoile elle-même. Enfin, l'impact de l'UV lointain solaire se manifeste aussi par les perturbations et dégradations induites sur les hautes technologies : télécommunications, orbites satellitaires, GPS, etc...

Nous avons participé à deux projets européens nommé LYRA, pour « radiomètre VUV », et BOLD pour caméra APS aveugle au visible, dont l'objet est de combler en partie les lacunes citées précédemment en enregistrant le flux solaire avec une exactitude jusqu'alors inégalée dans quatre bandes UV. La technologie LYRA utilise des substrats de diamant monocristallin (5mm de diamètre) et celle de BOLD des matériaux nitrures à LBI. Deux bandes UV sont pertinentes pour l'aéronomie et la météo spatiale : H.I Lyman α (@121.6nm) et le continuum de Herzberg (dans la bande 200-220nm). Les deux autres gammes sont aussi observées pour leur intérêt en physique solaire (dans les bandes 6-20nm et 17-70nm). Cependant, la mesure absolue de l'irradiance solaire dans la gamme X-EUV-UV reste particulièrement difficile. Elle doit se faire depuis l'espace (pour s'affranchir du filtre que constitue l'atmosphère de la Terre) avec une méthodologie destinée à garantir les étalonnages successifs et leur pérennité. Ces mesures doivent être, si possible, absolues de manière à pouvoir les comparer dans le temps, condition nécessaire à leur dépouillement scientifique au long terme.

Dans cette action, nous avons en charge la conception, la réalisation et quelques caractérisations de ces nouveaux photodétecteurs XUV.

II. Technologies des détecteurs UV

Les technologies à base de tubes photomultiplicateurs ont dès l'origine assuré la fonction de détection des UV. Ces derniers offrent une sensibilité difficilement égalable par d'autres types de photodétecteurs mais présentent l'inconvénient d'être très fragiles, énergivore, encombrants et souvent chers.

L'approche alternative a été d'utiliser des photodiodes PIN ou Schottky au silicium. Leurs avantages sont ceux de tous les composants solides par rapport aux tubes à vide. Ils sont de petites tailles et nécessitent des faibles tensions d'alimentation. Leurs inconvénients sont essentiellement liés aux spécificités du silicium. Le silicium est un SC à gap indirect, de sorte que son rendement radiatif est faible, ce qui entraîne une faible sensibilité du détecteur. Mais surtout, le maximum de sensibilité du silicium se situe autour de 700nm le rendant très sensible au rayonnement solaire donc une sélectivité UV/Visible médiocre.

L'utilisation de ces détecteurs UV en présence du soleil nécessite donc l'adjonction de filtres bloquant

les composantes Visible et IR. Le dispositif devient alors à la fois complexe, volumineux et cher.

Une première alternative à ces dispositifs à tubes ont été les SC disponibles (à petite largeur de bande interdite) tels que le Si et certains III-V (GaP, GaAsP...). Ces matériaux présentent l'inconvénient d'être sensibles à la lumière visible ainsi qu'un vieillissement prématuré sous radiations UV. D'où la nécessité d'insérer des filtres optiques lesquels augmentent la taille et le poids du dispositif tout en réduisant le rendement quantique global du système.

Le détecteur idéal doit donc allier la compacité du détecteur solide et l'insensibilité au rayonnement solaire du photomulticateur. Les SC à LBI constituent dans ce domaine des matériaux de choix.

Les matériaux SC III-V sont formés à partir d'éléments de la 3^{ème} et de la 5^{ème} colonne de la classification périodique de Mendeleïev. Parmi tous les composés binaires possibles, tous n'ont pas le même intérêt potentiel pour l'électronique ou l'optoélectronique. L'étude de leurs propriétés et en particulier de la structure de bandes, montre que les éléments les plus légers donnent des composés à large bande interdite, dont les propriétés se rapprochent de celles des isolants. Cette caractéristique est particulièrement utilisée pour détecter des rayonnements fortement énergétiques. Tous les composés incluant du bore, de l'aluminium, de l'azote et du gallium entrent dans cette catégorie. Dans ce cadre et depuis près de vingt ans, ces nouveaux SC à LBI sont disponibles et ont permis de fabriquer une nouvelle génération de photodétecteurs UV. Ces SC de la filière nitrures B(Al,Ga)N, diamant et SiC constituent des matériaux de choix nécessaires à la détection sélective en UV, UV profond voire extrême UV sans qu'il soit nécessaire d'y ajouter des filtres bloquant le visible ou l'infrarouge. Ils répondent au cahier des charges nécessaire à l'élaboration de photodétecteurs opérants sous environnement hostile. En effet, ces matériaux présentent une certaine dureté mécanique et une bonne conduction thermique. Ces derniers sont inertes chimiquement, se dégradent lentement sous irradiations UV et sous bombardement particulaires. La plupart de ces SC présente un excellent taux de réjection UV-Visible de plusieurs ordres de grandeurs et conviennent parfaitement en particulier aux applications spatiales. Leur large bande interdite les dote de la spécificité d'être insensibles au spectre du continuum solaire au niveau de la mer.

Dans le domaine des composants optoélectroniques de courte longueur d'onde, certes la valeur de son gap fait de SiC un matériau relativement bien adapté, mais il est, par rapport aux nitrures, fortement pénalisé par toute une série de propriétés physiques évidentes. Il est à gap indirect donc à faible rendement. Les nitrures par contre ont un gap direct et par conséquent un bon rendement radiatif, leur coefficient d'absorption est de l'ordre de $4 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ pour les rayonnements de longueur d'onde inférieure à 360nm. En outre, la possibilité de réaliser des alliages ternaires ou quaternaires

élargit considérablement le champ d'application des nitrures. La simple modulation de la concentration d'aluminium permet d'ajuster la longueur d'onde de coupure de l'alliage AlGaN à une valeur comprise entre 360 nm et 200 nm. Enfin, les nitrures offrent plus de versatilité par la réalisation possible d'hétérojonctions et au-delà, d'hétérostructures notamment à confinement quantique.

Des films minces de diamant ($E_g=5,5\text{eV}$ - $\lambda=225\text{nm}$) et les nitrures d'éléments III présentent donc un fort intérêt pour la détection optique car le gap de ces matériaux peut varier entre 0.7eV (InN) et 6,4eV (180nm) et présentent en plus une stabilité en environnement chimique ou physique sévère. Plusieurs types de détecteurs UV, des plus simples, les photoconducteurs, aux plus complexes, les photodiodes (Schottky, PiN, MSM) ont été étudiés.

En conséquence, à partir des principes de base des détecteurs à SC, de nombreux raffinements technologiques permettent de faire des progrès considérables en termes de sensibilité, de bande passante et de gamme spectrale. L'utilisation d'un détecteur pour réaliser un instrument de mesure optique nécessite de prendre en compte de nombreux paramètres comme l'efficacité quantique, la sensibilité spectrale et les sources de bruit (bruit quantique, bruit thermique...).

Notre investigation repose sur les propriétés des SC à Large Bande Interdite (LBI), tels que le diamant ou les nitrures d'aluminium, de gallium et de bore. L'insensibilité au visible (solar-blindness) de ces nouveaux capteurs basés sur les matériaux grand gap est très avantageuse. Elle permet une plus grande sensibilité des instruments dans l'UV et par conséquent une résolution spatiale plus élevée ainsi qu'une plus haute résolution temporelle. Une technologie fondée sur ces matériaux innovants plutôt que sur le silicium autorise aussi une résistance accrue aux rayonnements ionisants (rad-hardness) et donc à une stabilité indispensable aux conditions extrêmes. L'objectif final étant de réaliser dans quelques années des caméras UV susceptibles de fonctionner dans ces environnements.

III. Solutions technologiques pour le spatial

Les substrats de diamant utilisés pour cette action sont désignés de "qualité électronique". Le substrat synthétique naturel (HPHT - 15GPa/3000K) fait 500 μm d'épaisseur et provient de deux fournisseurs : *Element Six*TM (E6TM, Ascot - de *DeBeers* - Angleterre) ou Sumitomo (Japon). Ces derniers ne contiennent pas plus de 5ppB de bore ou d'azote atomique en site substitutionnel en fonction du dopage résiduel. La couche superficielle dont l'épaisseur varie de 800nm à 3 μm d'épaisseur est élaboré par MW-PECVD puis polie avec un procédé mécano-chimique léger dans la direction (100) du cristal. L'ensemble de ces opérations est réalisé par le partenaire IMOMEC (Hasselt, Belgique). Les homoépitaxies PiN diamant ont été fournies par notre partenaire de l'ORB et ont été synthétisées

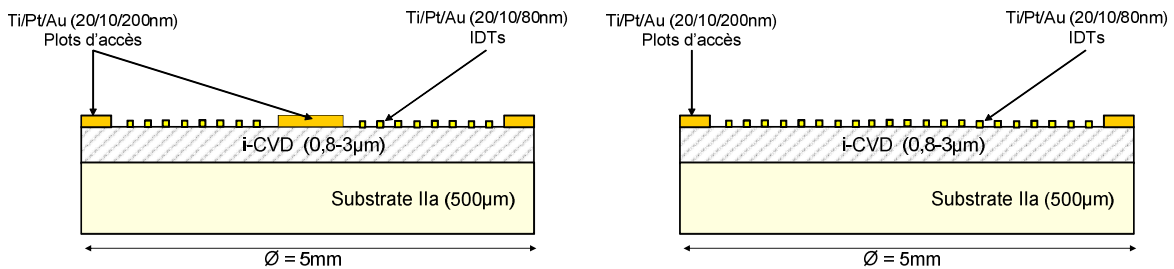
par KOIZUMI au Japon (un des seuls à savoir doper le diamant de type N) [KOI01]. Les échantillons sont de forme circulaires avec un diamètre variant de 1 à 5 mm.

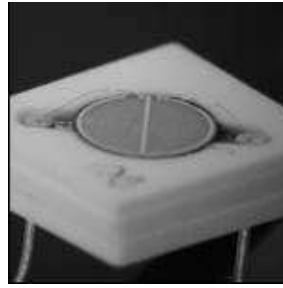
III.1 PIN & MSM diamant

Cette action a été menée au cours du projet européen LYRA (voir description des contrats) et, une fois n'est pas coutume, le coût n'a absolument pas été un critère à contrario d'autres spécifications imposées par l'ESA. L'objectif de ce projet consistait à développer des photodétecteurs destinés à être montés dans un satellite. Une description des objectifs est décrite en partie II de ce thème. Pour respecter les spécifications drastiques imposées par l'ESA, nous avons opté pour des substrats de diamant de part leurs propriétés physiques exceptionnelles et leur résistance accrue aux radiations ionisantes. Deux types d'homoépitaxies ont été élaborés pour deux types de photodétecteurs : les photodiodes MSM et les photodiodes PIN.

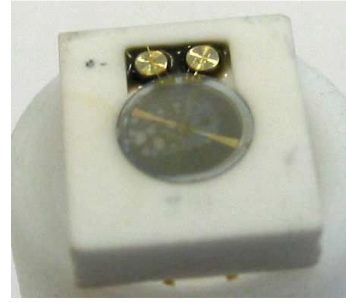
III.2 Photodiodes MSM

La première solution a consisté à fabriquer des photodiodes MSM planaires avec différentes topologies de doigts interdigités (rectiligne, circulaire). Comme la tension d'alimentation maximale ne peut excéder 5V sur le satellite, plusieurs distances de doigts interdigités ont été testées pour définir celles qui permettaient la plus grande détectivité à une longueur d'onde d'excitation donnée. La première approche a consisté à déposer des électrodes rectilignes avec une barre de collecte au centre et à la périphérie de l'échantillon (cf. Figure 4.2) et la seconde approche s'est faite avec des doigts interdigités circulaires avec 2 barres de collecte uniquement en périphérie. Cette dernière topologie a permis d'améliorer le facteur d'ombrage et l'homogénéité de la réponse du capteur optique comme on peut le visualiser Figure 4.2a.





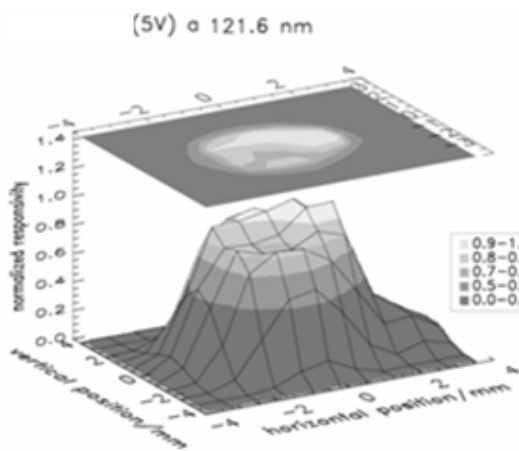
a



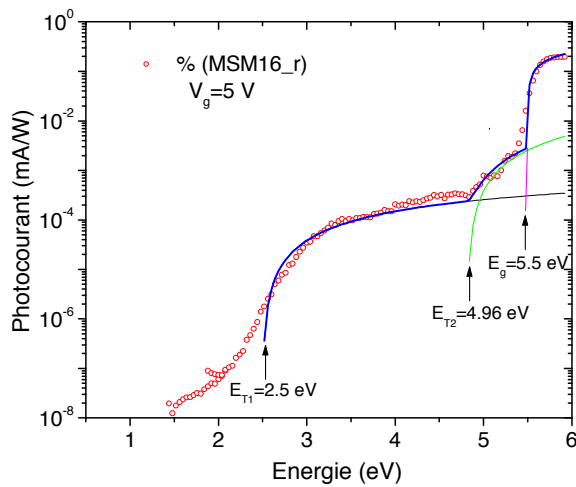
b

Figure 4.2 : (a) Vue de dessus de la première version de masque avec la cathode au centre (barre centrale) de MSM8-r diamant ; (b) Photographie de MSM8-r dans son logement en alumine; Vue de profil des IDTs. Photo du photodétecteur à base de diamant msm24-r circulaire dans son logement en alumine (les échantillons sont collés avec de la résine spéciale UV haute température en face arrière).

La technique de photocourant a été utilisée pour définir la signature des pièges dans ces homostructures (section efficace de capture, niveau des pièges dans la BI, nature des transitions optiques observées) et par conséquent, leurs possibles identifications. Certains de ces pièges dont la formation avait pour origine la préparation de la surface soit côté reprise de croissance, soit côté procédé technologique en salle blanche ont pu être considérablement réduits (hydrogène en surface, lacune de carbone ou autres complexes carbonés en surface). La Figure 4.3 montre le spectre de photocourant pour un échantillon de diamant optimisé avec 2 niveaux profonds dont l'un est attribué à de l'azote en site substitutionnel du carbone.



(a)



(b)

Figure 4.3 : (a) Homogénéité de la photoréponse du détecteurs MSM16-r excité à 121.6nm et polarisé à 5V, (b) Spectre de photocourant du même échantillon polarisé à 5V.

III.3 Photodiodes PiN

La seconde solution a consisté à réaliser des photodétecteurs photovoltaïques de type PIN. Le principe est simple, le champ interne dû à l'asymétrie de la structure permet de séparer les trous et les électrons, créant ainsi un courant photo-induit en absence d'une polarisation externe.

La Figure 4.4 donne la structure d'une photodiode PIN en diamant réalisée à l'IEMN (thèse de Hassan Ali Barkad) et composée d'une couche de diamant dopé au bore pour la partie P et une dopée au phosphore pour la partie N. La Figure 4.5.b présente la photoréponse de quelques photodiodes Schottky en fonction de la longueur d'onde source, et pour 2 types de zone active : l'une avec une anode planaire et la cathode enterrée, la seconde également planaire mais comportant une série de trous formant un maillage de diodes PIN (pilliers) reliées entre elles par des court-circuits. Ces fossés facilitent la formation de paires électrons-trous dans la zone intrinsèque, améliorant ainsi l'efficacité quantique, le rendement et la détectivité du détecteur notamment vers $\lambda \sim 150\text{nm}$ où l'absorption dans la zone N y est très forte. En fait, cette absorption n'en est pas une. Nous avons mis en évidence que cette effet est lié à la photo-émission du matériau SC pour des excitations sub-185nm mais aussi des métaux utilisés comme électrodes (pour $\lambda < 125\text{nm}$).

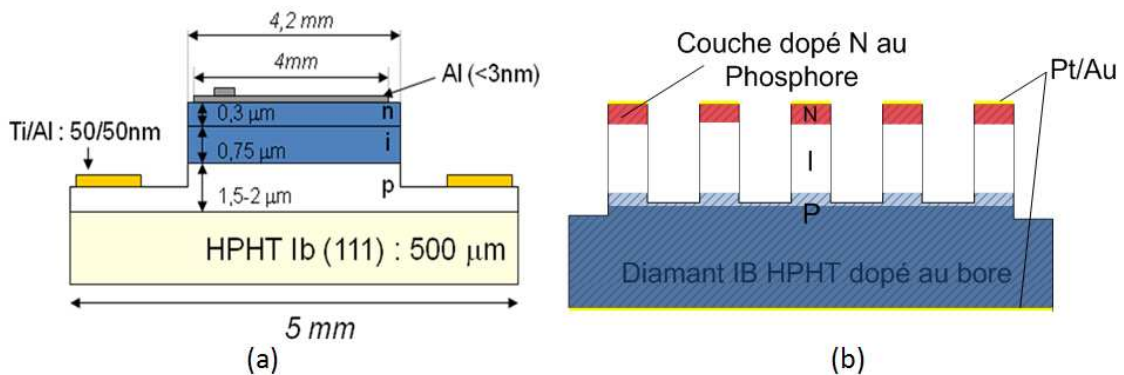
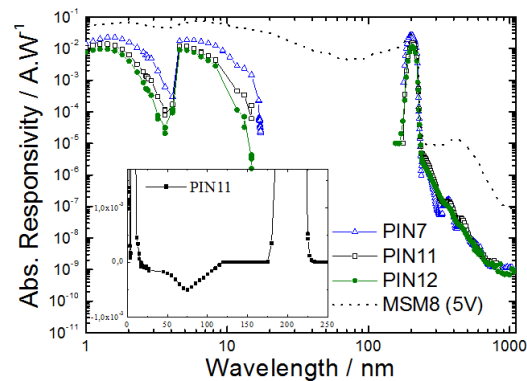


Figure 4.4 : Homosépitaxie d'une photodiode PIN circulaire (a) RUN1, pleine plaque et (b) RUN2 (micro-pilliers)



(a)



(b)

Figure 4.5 : (a) Structure d'une photodiode PIN (b) Réceptivité normalisée de photodiodes PIN diamant en fonction de la longueur d'onde. En comparaison, la réponse d'un MSM y est ajouté.

Les photodiodes p-i-n montrent le même comportement que les photodiodes Schottky, au niveau de la réceptivité, du contraste, de la linéarité, du temps de réponse, du bruit à basse fréquence. Un bon contraste UV/Visible supérieur à 100 est fréquemment obtenu, ainsi que des temps de réponse de l'ordre de 10ns. On remarque qu'au RUN2 (Figure 4.5.b), la réceptivité présente une diminution à des longueurs d'ondes proches du gap du carbone diamant. En effet, quand la longueur d'onde diminue, l'absorption des photons est plus superficielle, et un plus grand nombre de porteurs se recombinaient avant d'être collectés. Des détectivités et des NEP de l'ordre de $2,3 \text{ Hz}^{1/2} \text{ W}^{-1} \text{ cm}$ et $24 \cdot 10^{10} \text{ Hz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ sous une polarisation de 28V ont pu être mesurés. Ces dispositifs sont techniquement difficiles à réaliser à cause de la mise en œuvre du diamant de type n. Le maximum de sensibilité est de l'ordre 0.1A/W mais un taux de réjection inégalé de plus de 4 ordres de grandeurs a pu être obtenu. La linéarité (donné à titre d'exemple) de la photorésistance MSM24-c a été étudiée en fonction de la puissance des radiations incidentes. La Figure 4.6 montre les évolutions du photocourant mesurées aux longueurs d'ondes d'intérêt à 200nm et 121.6nm pour MSM24-c et MSM8-r, en fonction de la source d'excitation.

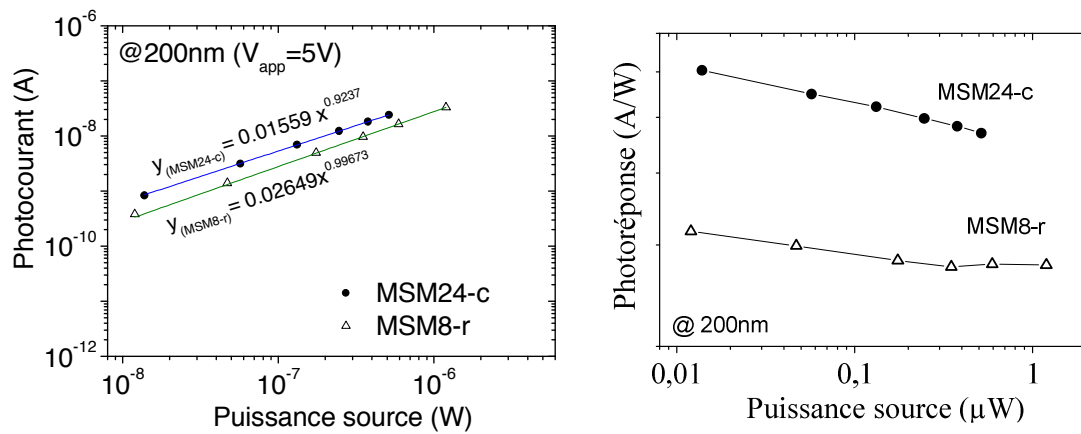


Figure 4.6: (a) Test de linéarité en fonction de la puissance : Photocourant mesuré pour MSM24-c à +5V en fonction de la puissance de la source de radiation à la longueur d'onde de 200nm. Le photocourant de MSM8-r est apposé à titre comparatif; (b) Test de stabilité : Photoréponse de MSM24-c associée en fonction de la puissance de la même source d'excitation et à la même longueur d'onde.

IV. Exploitation des photodétecteurs pour le spatial

LYRA est un radiomètre X/EUV/UV pour la physique solaire qui a été lancé avec succès le 2 novembre 2009 à bord d'un micro satellite PROBA-2 de l'ESA et dont l'une des missions est de mieux appréhender ces nouvelles technologies à base de diamant et de nitrure de bore. L'objectif de cet instrument, pionnier en son genre, est de surveiller l'irradiance solaire dans les bandes passantes pertinentes de la physique solaire, la météorologie spatiale et pour les besoins de l'aéronomie. Ce

satellite est actuellement en orbite polaire héliosynchrone permettant l'observation du soleil de manière quasi-permanente (<http://proba2.sidc.be/about/LYRA>, <http://proba2.sidc.be/data/LYRA>) Le "First Light" de l'expérience LYRA est survenu le 6 Janvier 2010 et mesure actuellement des éruptions solaires avec une haute résolution temporelle sans précédent de 0,5 sec. Les données que fournit LYRA permettent actuellement d'investiguer la recherche sur la météo solaire et par extension, celle de notre univers.

LYRA pèse 3,53 kg et mesure 315 mm × 92,5 mm × 222 mm. Son développement a été mené par une équipe de chercheur de l'Observatoire Royal de Belgique à Bruxelles, en étroite collaboration avec une équipe suisse de PMOD / WRC à Davos. La gestion du projet s'est faite avec le Centre Spatial de Liège et l'institut Max-Planck pour son étalonnage radiométrique en utilisant le synchrotron BESSY au Physikalisch-Technische Bundesanstalt à Berlin. D'autres collaborateurs en provenance du Japon, de France (IEMN), des Etats-Unis et de Russie ont également participé activement à la réussite de ce projet.

LYRA se compose de quatre grands canaux. Chaque canal observe le rayonnement du soleil derrière une feuille métallique mince ou derrière un filtre d'interférence. Les détecteurs sont des diodes silicium pour l'UV ou des détecteurs diamant, ce dernier ayant été spécialement conçu pour LYRA en Allemagne pour la première génération et à l'IEMN pour la seconde et troisième génération (LYRA, BOLD). La combinaison de la transmission spectrale des filtres et de la sensibilité des détecteurs rend les douze canaux de LYRA sensibles à des bandes de fréquences différentes allant des rayons X aux UV mous. Ces fréquences ont été choisies spécifiquement par des scientifiques en physique solaire, en aéronomie et en météo spatiale.

Les détecteurs diamants représentent une technologie UV innovante et totalement nouvelle qui jusqu'à présent a largement dépassée les performances des détecteurs à base de Si. Il est déjà clair que les détecteurs diamants souffrent beaucoup moins des particules ionisantes que leur congénaires au silicium.

Complété par le télescope SWAP EUV et d'autres instruments solaires, LYRA offre ses services en météorologie de l'espace avec des perspectives de découvertes très riches pour la science. LYRA ouvre la voie à des concepts instrumentaux qui permettront le suivi de l'irradiance spectrale du soleil au grand bénéfice de l'agence spatiale européenne et de la communauté scientifique mondiale.

PROBA signifie «PROject for Onboard Autonomy», PROBA2 accueille 17 nouveaux développements technologiques et 4 instruments scientifiques. PROBA2 se compose de deux principaux instruments solaires (SWAP et LYRA) et deux instruments pour observer l'environnement de l'espace dans le voisinage immédiat du soleil. Ces instruments permettent d'identifier et d'étudier tous les événements du Soleil qui pourraient avoir des implications sur le climat terrestre, à la fois grâce à

l'imagerie (SWAP) ainsi que par des mesures d'irradiance (LYRA). En particulier, l'objectif de la mission de PROBA2 est la genèse et l'évolution d'événements qui peuvent affecter la météo spatiale, comme les éjections de masse coronale, vagues de radiations EUV, dimmings EUV, et autres éruptions solaires.

Le satellite PROBA2 était initialement prévu pour être exploité pendant deux ans (soit fin octobre 2011). Toutefois, ne rencontrant pas de défaillance majeure côté technologique, sa mission s'est vu prolongée jusqu'en 2019.

V. Solutions technologiques à faible coût : les nitrures III-N à LBI

V.1 Les photoconducteurs MSM $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$

La structure des photoconducteurs est constituée d'une couche épitaxiée (Al,Ga)N non dopée ou très faiblement dopée (n.i.d), sur laquelle reposent deux électrodes (cf. Figure 4.7). De nombreux auteurs ont étudié ce type de détecteur UV étant donné la simplicité de leur réalisation.

L'absorption optique dans la couche semi-conductrice produit une paire électron-trou. L'application d'un courant de polarisation permet de séparer les trous et les électrons. Comme le montre la Figure 4.7, la composition en taux d'aluminium dans la couche active $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ fait varier la zone de longueur d'onde de détection (liée au gap du matériau SC). La réceptivité de ces photoconducteurs est très variable suivant les auteurs. Elle varie de 10^{-6}A.W^{-1} à 100A.W^{-1} pour une proportion en aluminium de 50%. Elle est plus élevée pour $x=0$, de l'ordre de 1kA.W^{-1} . Ces disparités semblent dues, d'une part à la différence de qualité cristalline des couches épitaxiées $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ (plus x augmente, plus le désordre d'alliage dégrade la qualité des couches); d'autre part, à la faible ohmicité entre les électrodes métalliques et la couche d'AlGaN. De plus, on remarque une absorption non négligeable à des longueurs d'ondes au dessus du gap, issue des effets de photoconductivité persistante (PPC). Ce phénomène semble lié à la création, par des défauts comme les dislocations, de zone de charges d'espace dans la couche.

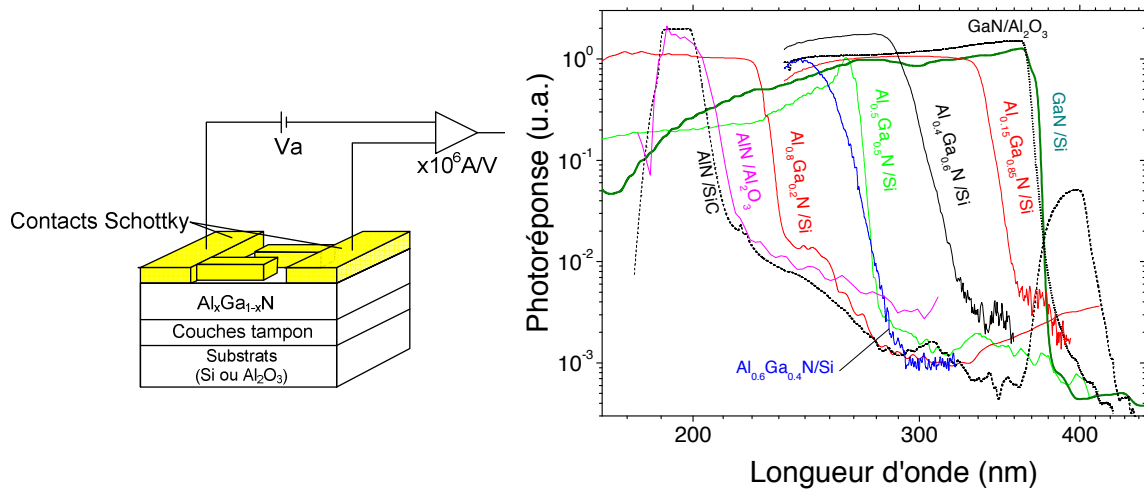


Figure 4.7 : Schéma représentatif d'une structure MSM AlGaIn et la photoréponse des dispositifs réalisés sur différents substrats pour un taux d'aluminium variant de $x=0$ (GaN) à $x=1$ (AlN).

La sélectivité, soit le contraste entre les domaines UV et visible (et/ou IR), est un facteur à prendre en compte dans les performances des photodétecteurs. Elle varie entre 10^3 et 10^4 suivant la qualité des couches pour $x=0$.

Cependant, il n'a pas encore été possible de réaliser de photodétecteurs UV "solar blind" avec ces photoconducteurs. Ces derniers présentent un inconvénient majeur, leur temps de réponse est de l'ordre de la ms. Ce temps de réponse beaucoup trop grand est attribué soit à une recombinaison très rapide des porteurs, qui ne participent ainsi pas au courant, soit à la présence de pièges en équilibre thermique avec les porteurs.

V.2 Photodiodes métal-semiconducteur-métal (MSM)

La structure d'une diode MSM est symétrique mais peut dans certains cas avoir un comportement comparable aux photodiodes PiN. Les contacts métalliques doivent être bloqués afin de prévenir toute injection de courant. Avec un espace entre électrodes assez petit, il n'y a pas de recombinaison entre les trous et les électrons avant leur collecte par les électrodes. En d'autres termes, nos photodiodes MSM sont constituées de deux diodes (type Schottky ou redresseur) tête bêche avec une seule couche active (wAlN, cBN, diamant). Les Figure 4.8 et 4.9 présentent des photodiodes MSM wAlN et cBN.

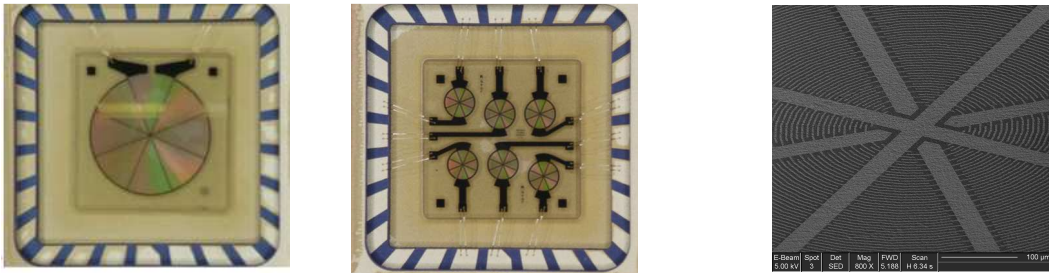


Figure 4.8: (a) Images prises au microscope optique de photodiodes MSM-AlN à design des doigts interdigités circulaires intégrés dans une cellule en céramique avec quartz de protection. MSM AlN de 4 mm de diamètre (à gauche), MSM AlN de 1mm de diamètre (au centre). A droite : Zoom sur le centre du design circulaire.

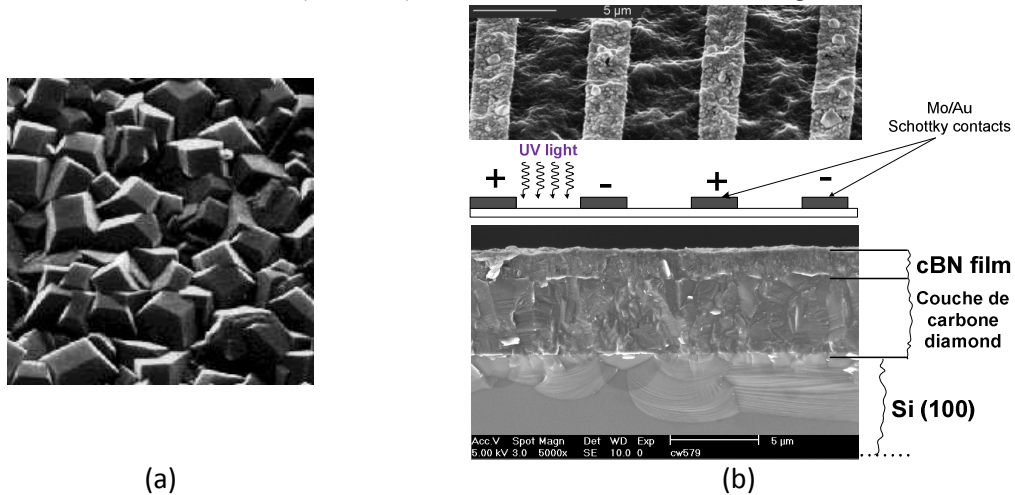


Figure 4.9 : (a) Photo MEB de la surface du poly-diamant sur Si(100) ; (b) Photo SEM-FIB d'une section de la couche cBN/poly-diamant/Si(100) et des IDTs de la photodiode Mo/Au.

Dans la gamme de longueurs d'onde d'intérêt, ces détecteurs sont raisonnablement sensibles et stables sous brève irradiation avec un faible courant d'obscurité ($3-6 \text{ pA/cm}^2$). Aucune dégradation significative de la performance des détecteurs MSM diamant a été observée après exposition à des protons de 14,4 MeV d'énergie, ce qui montre une bonne tolérance au rayonnement jusqu'à des fluences de protons de $10^{11}/\text{cm}^2$.

Les caractéristiques typiques obtenues avec cette technologie sont résumées dans le tableau suivant. Elles constituent toutes un état de l'art. Ces résultats sont certifiés après mesures de la photoréponse absolue à PTB-Berlin (cf. Figure 4.10).

Matériau	Courant d'obscurité	Photoréponse (mA/W)	Longueur d'onde de coupure λ_c	Taux de réjection
Diamond	1.1pA (+5V)	48 (210nm)	225 (5.5 eV)	1.6×10^4 (210/400nm)
AlN	13 fA (+30V)	4.5 (190nm)	203 (6.1 eV)	1.15×10^4 (200/360nm)
cBN	2pA (30V)	21 (180nm)	193 (6.4 eV)	1.05×10^4 (180/250nm)

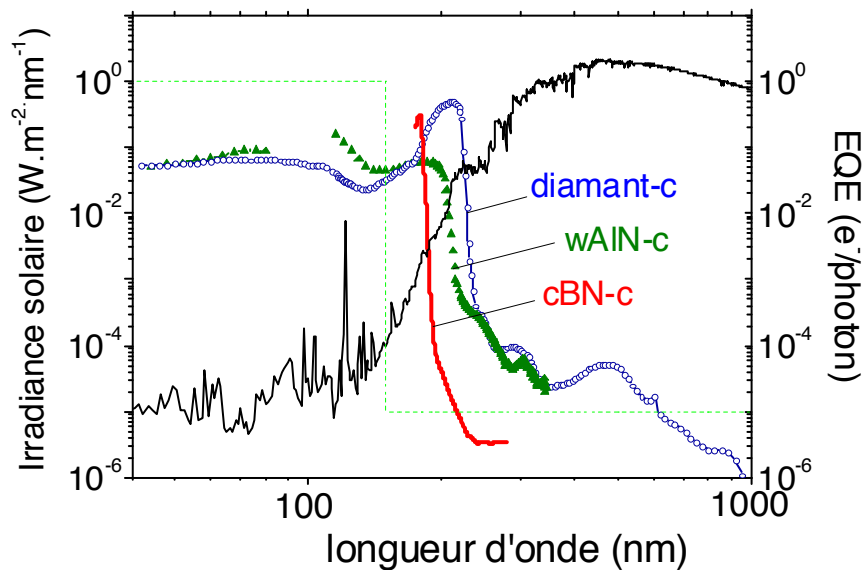


Figure 4.10: Spectre de l'irradiance solaire mesurée sur Terre (axe des ordonnées à gauche) par rapport à l'efficacité quantique (axe des ordonnées à droite); photoréponse d'un détecteur idéal (pointillés) en comparaison au détecteurs MSM wAlN, cBN et diamant.

VI. Simulation

Afin d'optimiser les structures et le dessin des masques des photodiodes $Al_xGa_{1-x}N$ ($x=0 \rightarrow 1$) et des MSM diamant, nous avons utilisé 2 approches. La première de type analytique et relativement simpliste permet de comprendre l'impact de l'épaisseur de la zone active, du facteur d'ombrage, de l'épaisseur de la couche morte sur la photoréponse du matériau et l'efficacité quantique externe. La deuxième approche est de type numérique sous COMSOL® et est traitée pour quantifier l'impact de la largeur des électrodes (micrométrique et/ou submicronique), de l'asymétrie des contacts électriques ainsi que celui d'enterrer ou non ces électrodes. Ce modèle est de type dérive-diffusion et ne tient pas compte des effets thermiques (à l'exception du GaN).

On peut constater que le courant d'obscurité se dégrade de plusieurs ordres de grandeurs d'autant plus que la distance inter-électrodes est submicronique. Une étude plus détaillée [3] montre que l'emballlement du courant est dû aux porteurs minoritaires (à l'occurrence dans notre cas, des trous). L'évolution de ce courant est fonction principalement de la hauteur de barrière des métaux utilisés, du matériau sur lequel ces derniers sont déposés et de l'espacement entre les électrodes.

Nous avons montré que pour les photoconducteurs GaN, l'autoéchauffement est d'autant plus élevé que la distance entre les doigts est petite. Cela se répercute sur le temps de réponse des capteurs surtout pour des distances interélectrodes de moins de 1 μm . Pour minimiser l'impact de ces effets thermiques, il a été proposé de travailler avec des couche active AlGaIn les moins épaisses possible.

Des simulations électro-thermique ont aussi été réalisé sur la photodiode AlN. Nous avons montré que le courant d'obscurité se dégrade avec la polarisation d'autant plus vite que la structure est sub-micrométrique. Aussi, le couplage du champ électrique inter-électrodes s'opère davantage en volume et sous les contacts électriques. Un fossé de contact ohmique est une solution pour obtenir une homogénéité de la distribution du champ électrique dans la zone active. Enfin, nous avons montré que l'effet d'ombrage est le facteur principal pénalisant la détectivité du capteur.

Remarque : Je n'ai pas mentionné de résultats particuliers de l'impact des pièges sur les performances des dispositifs réalisés. Une analyse détaillée est disponible dans la thèse de doctorat de Mme Maghnia MATTALAH [MAG08-T].

VII. Conclusion

Les photodétecteurs ultraviolets actuels à base de silicium montrent des limitations inhérentes à la technologie en dépit de leur continuelle amélioration depuis ces dernières décennies. En collaboration avec l'Observatoire Royal de Bruxelles dans le cadre du projet LYRA, nous avons démontré la maturité des semiconducteurs à large bande interdite (à base de nitrides III-N à large bande interdite et de diamant) pour des applications spécifiques dans les domaines spatiaux et physiques des hautes énergies.

La disponibilité de ces nouveaux matériaux permet de surpasser les technologies existantes. En effet, de part leurs propriétés physiques et chimiques exceptionnelles, le diamant par exemple, est un des candidats idéal du point de vue de la recherche fondamentale et des applications technologiques. Sa large bande interdite le rend insensible à la lumière visible et infrarouge (*solarblind*) et son excellente robustesse face aux radiations (notamment protons et rayons γ) rend ce matériau très attractif pour des applications spatiales. Parallèlement à ce matériau, de nouveaux

semiconducteurs nitrures à large bande interdite (AlN, BN) présentent des propriétés tout aussi remarquables et commencent à être élaborés avec succès.

Le but de ce travail a été de concevoir et de fabriquer de nouveaux photodétecteurs UV innovants à base de ces matériaux émergents et à fort potentiel.

Cette activité a débuté par la simulation des propriétés de transports des matériaux à structure wurtzite par des modèles de type Monte Carlo, puis d'optimiser les performances des composants à élaborer par éléments finis au moyen du logiciel COMSOL® en tenant compte du matériau, de la géométrie de la structure, du design technologique, de la nature des électrodes (taille, contacts ohmiques, Schottky...), du couplage électro-thermique dans certain cas ainsi que des radiations incidentes.

Différents capteurs UV ont ensuite été élaborés en salle blanche puis caractérisés sous rayonnement X-EUV d'une part et DUV-UV d'autre part. Les caractéristiques optoélectroniques (stabilité, fiabilité, sensibilité aux rayonnements UV, courant d'obscurité...) et les performances obtenues sont alors exposées pour chacun des matériaux étudiés.

L'ensemble de ce travail a permis d'établir plusieurs performances à l'état de l'art sur diamant (MSM, PiN), AlN et BN et a contribué au développement du premier radiomètre solaire LYRA dans le domaine EUV au moyen de ces photodiodes diamant destinées au satellite PROBA2.

References

[K0101] S. Koizumi, K. Watanabe, F. Hasegawa and H. Kanda, Science 292 (2001) 1899.

VIII. Production scientifique : RICL

[BEN15] Degradation assessment of LYRA after 5 years on orbit - Technology demonstration
BEN MOUSSA A., GIORDANENGO B., GISSOT S., DAMMASCH I.E., DOMINIQUE M., HOCHEDÉZ J.F., SOLTANI A., BOURZGUI N., SAITO T., SCHÜHLE U., GOTTWALD A., KROTH U., JONES A.R.
Exp. Astron. 39, 1 (2015) 29-43, doi: [10.1007/s10686-014-9437-7](https://doi.org/10.1007/s10686-014-9437-7)

[GIS14] Design and radiation hardness of next generation solar UV radiometers
GISSOT S., BEN MOUSSA A., GIORDANENGO B., SOLTANI A., SAITO T., SCHÜHLE U., KROTH U., GOTTWALD A.
Proceedings of 2014 IEEE Radiation Effects Data Workshop, REDW 2014, held in conjunction with 2014 IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference, NSREC 2014, Paris, France, July 14-18, 2014, paper W-24, 6 pages, ISBN 978-1-4799-5883-2 ; e-ISBN 978-1-4799-5884-9
doi: [10.1109/REDW.2014.7004563](https://doi.org/10.1109/REDW.2014.7004563)

[BEN13] Developments, characterization and proton irradiation damage tests of AlN detectors for VUV solar observations
BEN MOUSSA A., SOLTANI A., GERBEDOEN J.C., SAITO T., AVERIN S., GISSOT S., GIORDANENGO B., BERGER G., KROTH U., DE JAEGER J.C., GOTTWALD A.
Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B-Beam Interact. Mater. Atoms, **312** (2013) 48-53 doi: [10.1016/j.nimb.2013.05.091](https://doi.org/10.1016/j.nimb.2013.05.091)

[BAR10] Design, fabrication and physical analysis of TiN/AlN deep UV photodiodes
BARKAD H.A., SOLTANI A., MATTALAH M., GERBEDOEN J.C., ROUSSEAU M., DE JAEGER J.C.,
BENMOUSSA A., MORTET V., HAENEN K., BENBAKHTI B., MOREAU M., DUPUIS R., OUGAZZADEN A.
J. Phys. D-Appl. Phys. **43**, 46 (2010) 465104-1-5 [doi: 10.1088/0022-3727/43/46/465104](https://doi.org/10.1088/0022-3727/43/46/465104)

[RAH10] Epitaxial growth of ZnO thin films on AlN substrates deposited at low temperature by magnetron sputtering
RAHMANE S., ABDALLAH B., SOUSSOU A., GAUTRON E., JOUAN P.Y., LE BRIZOUAL L., BARREAU N., SOLTANI A., DJOUADI M.A.
European Materials Research Society Spring Meeting, E-MRS Spring 2009, Symposium F : Advances in transparent electronics : from materials to devices, Strasbourg, France, june 8-12, 2009
Phys. Status Solidi A-Appl. Mat. Sci. **207**, 7 (2010) 1604-1608 [doi: 10.1002/pssa.200983776](https://doi.org/10.1002/pssa.200983776)

[BEN08] Recent developments of wide-bandgap semiconductor based UV sensors
BEN MOUSSA A., SOLTANI A., SCHÜHLE U., HAENEN K., CHONG Y.M., ZHANG W.J., DAHAL R., LIN J.Y.,
JIANG H.X., BARKAD H.A., BEN MOUSSA B., BOLSEE D., HERMANS C., KROTH U., LAUBIS C., MORTET V.,
DE JAEGER J.C., GIORDANENGO B., RICHTER M., SCHOLZE F., HOCHEDÉZ J.F.
19th European Conference on Diamond, Diamond-Like Materials, Carbon Nanotubes, Nitrides and Silicon Carbide, Diamond 2008, Sitges, Spain, september 7-11, 2008
Diam. Relat. Mater. **18**, 5-8 (2009) 860-864 [doi: 10.1016/j.diamond.2008.11.013](https://doi.org/10.1016/j.diamond.2008.11.013)

[GIO08] Recent ROB developments on wide bandgap based UV sensors
GIORDANENGO B., BEN MOUSSA A., HOCHEDÉZ J.F., SOLTANI A., DE MOOR P., MINOGLU K.,
MALINOWSKI P., DUBOZ J.Y., CHONG Y.M., ZOU Y.S., ZHANG W.J., LEE S.T., DAHAL R., LI J., LIN J.Y.,
JIANG H.X.
Astrophysics Detector Workshop, Nice, France, november 17-20, 2008
EAS Publications Series **37** (2009) 199-205 [doi: 10.1051/eas/0937025](https://doi.org/10.1051/eas/0937025)

[SOL 08] 193 nm deep-ultraviolet solar-blind cubic boron nitride based photodetectors
SOLTANI A., BARKAD H.A., MATTALAH M., BENBAKHTI B., DE JAEGER J.C., CHONG Y.M., ZOU Y.S.,
ZHANG W.J., LEE S.T., BENMOUSSA A., GIORDANENGO B., HOCHEDÉZ J.F.
Appl. Phys. Lett. **92**, 5 (2008) 053501-1-3 [doi: 10.1063/1.2840178](https://doi.org/10.1063/1.2840178)

[BEN08] Characterization of AlN metal-semiconductor-metal diodes in the spectral range of 44-360 nm : photoemission assessments
BENMOUSSA A., HOCHEDÉZ J.F., DAHAL R., LI J., LIN J.Y., JIANG H.X., SOLTANI A., DE JAEGER J.C.,
KROTH U., RICHTER M.
Appl. Phys. Lett. **92**, 2 (2008) 022108-1-3 [doi: 10.1063/1.2834701](https://doi.org/10.1063/1.2834701)

[MAG08-T] Thèse de doctorat, Université Djillali Liabès (Algérie) : « Analyse de défauts en surfaces et interfaces de semi-conducteurs III-N à large bande interdite appliqués à la micro et l'optoélectronique.

[BEN06] Diamond detectors for LYRA, the solar VUV radiometer on board PROBA2
BENMOUSSA A., HOCHEDÉZ J.F., SCHÜHLE U., SCHMUTZ W., HAENEN K., STOCKMAN Y., SOLTANI A.,
SCHOLZE F., KROTH U., MORTET V., THEISSEN A., LAUBIS C., RICHTER M., KOLLER S., DEFISE J.M.,
KOIZUMI S.
Diam. Relat. Mater. **15**, 4-8 (2006) 802-806 [doi: 10.1016/j.diamond.2005.10.024](https://doi.org/10.1016/j.diamond.2005.10.024)

[BEN06] LYRA, a solar UV radiometer on Proba2
HOCHEDÉZ J.F., SCHMUTZ W., STOCKMAN Y., SCHÜHLE U., BENMOUSSA A., KOLLER S., HAENEN K.,

BERGHMANS D., DEFISE J.M., HALAIN J.P., THEISSEN A., DELOUILLE V., SLEMZIN V., GILLOTAY D., FUSSEN D., DOMINIQUE M., VANHELLEMONT F., MAC MULLIN D., KRETZSCHMAR M., MITROFANOV A., NICULA B., WAUTERS L., ROTH H., ROZANOV E., RUEDI I., WEHRLI C., SOLTANI A., AMANO H., VAN DER LINDEN R., ZHUKOV A., CLETTE F., KOIZUMI S., MORTET V., REMES Z., PETERSEN R., NESLADEK M., D'OLIESLAEGER M., ROGGEN J., ROCHUS P.
Adv. Space Res. **37**, 2 (2006) 303-312 [doi: 10.1016/j.asr.2005.10.041](https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.10.041)

[BEN06] Performance of diamond detectors for VUV applications
BENMOUSSA A., THEISSEN A., SCHOLZE F., HOCHEDÉZ J.F., SCHUHLE U., SCHMUTZ W., HAENEN K., STOCKMAN Y., SOLTANI A., MCMULLIN D., VEST R.E., KROTH U., LAUBIS C., RICHTER M., MORTET V., GISSOT S., DELOUILLE V., DOMINIQUE M., KOLLER S., HALAIN J.P., REMES Z., PETERSEN R., D'OLIESLAEGER M., DEFISE J.M.
Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A-Accel. Spectrom. Dect. Assoc. Equip. **568**, 1 (2006) 398-405
[doi: 10.1016/j.nima.2006.06.007](https://doi.org/10.1016/j.nima.2006.06.007)

[BEN08] New developments on diamond photodetector for VUV solar observations
BENMOUSSA A., SOLTANI A., HAENEN K., KROTH U., MORTET V., BARKAD H.A., BOLSEE D., HERMANS C., RICHTER M., DE JAEGER J.C., HOCHEDÉZ J.F.
Semicond. Sci. Technol. **23**, 3 (2008) 035026-1-7 [doi: 10.1088/0268-1242/23/3/035026](https://doi.org/10.1088/0268-1242/23/3/035026)

[SOL10-C invited] Diamond and cubic boron nitride : properties, growth and applications
SOLTANI A., TALBI A., GERBEDOEN J.C., DE JAEGER J.C., MORTET V., POBEDINSKAS P., HAENEN K., BENMOUSSA A., HOCHEDÉZ J.F., ZHANG W.J.
European Materials Research Society Spring Meeting, E-MRS Spring 2010, Symposium F : Wide bandgap cubic semiconductors : from growth to devices, Strasbourg, France, june 7-11, 2010

[BEN08-C] Recent developments on wide bandgap based UV sensors
BENMOUSSA A., GIORDANENGO B., HOCHEDÉZ J.F., SOLTANI A., BARKAD H.A., DE JAEGER J.C., HAENEN K., MORTET V., CHONG Y.M., ZOU Y.S., ZHANG W.J., LEE S.T., JOHN J., GERMAIN M., DUBOZ J.Y., SEMOND F., DAHAL R., LI J., LIN J.Y., JIANG H.X.
19th European Conference on Diamond, Diamond-Like Materials, Carbon Nanotubes, Nitrides and Silicon Carbide, Diamond 2008, Sitges, Spain, september 7-11, 2008

[BAR08-C] Modelling, fabrication and measurement of AlN based photodetectors
H.A. BARKAD, A. SOLTANI, M. ROUSSEAU, J.C. DE JAEGER
19th European Conference on Diamond, Diamond-Like Materials, Carbon Nanotubes, Nitrides and Silicon Carbide, Diamond 2008, Sitges, Spain, september 7-11 (2008)

Thème n°5

Résonateur acoustique à base de nitrure d'aluminium

Cette étude a débuté en 2006 et été soutenue à partir de 2008 par un projet ANR HiPPoP concernant un nouveau procédé PVD utilisant un plasma pulsé (HiPIMS) pour la synthèse de nitrures à large bande interdite AlN et BN. Cela a nécessité une forte interaction entre des laboratoires spécialistes des plasmas tant au niveau ingénierie que diagnostics ou modélisation car la physique de ce type de plasma impulsional est loin d'être connue et maîtrisée. Le projet a été déposé par l'Institut des matériaux de Nantes Jean-Rouxel et les laboratoires partenaires ont été l'IEMN et le LPGP (Saclay).

Côté procédé, l'alimentation plasma construite selon un procédé breveté par le CNRS a été adaptée pour assurer une stabilité du plasma permettant d'obtenir des conditions reproductibles et fiables. Des diagnostics plasma tels que la spectrométrie de masses, la spectroscopie optique d'émission et sonde de Langmuir ont été mises en œuvre(LPGP).

Le projet HiPPoP a eu pour objectif de montrer la faisabilité de la synthèse des films de nitrure d'aluminium de bonne qualité cristalline, une orientation contrôlée et une faible contrainte par pulvérisation magnétron pulsée à forte puissance (HPPMS). Les potentialités de cette technique ont été démontrées pour le dépôt des films métalliques et ont été dans ce projet explorées pour la synthèse de matériaux très isolants en plasma réactif d'azote. Ce procédé PVD est basé sur la pulvérisation d'une cible suite à des impulsions de très forte puissance qui lui sont appliquées. Pendant la durée de l'impulsion (quelques dizaines de μs), la densité de courant à la surface de la cible atteint des valeurs supérieures à 1 A/cm^2 et génère un plasma très dense près de la cible ce qui entraîne une très forte ionisation des espèces pulvérisées. Le LPGP, a développé une technique de contrôle de ce type de décharge permettant de s'affranchir des inconvénients majeurs du procédé qui sont le risque de passage en régime d'arc et de chute de la vitesse de dépôt. Leur solution consiste à maintenir la décharge dans un régime de préionisation durant la période off du pulse de puissance. Cette technique a permis une stabilisation des conditions de décharge avec des densités de courant élevées et un taux d'ionisation accru. Un autre avantage de ce procédé est la très large plage de pressions de fonctionnement de la décharge (3-300 mTorr). En assurant la thermalisation des particules énergiques par des collisions neutre-neutres et ion-neutres, ce procédé permet un contrôle aisé et précis de la puissance transférée au film pendant le dépôt.

Tous les composés III-V, par le fait qu'ils sont non-centrosymétriques, sont piézoélectriques. Mais en ce qui concerne les nitrures, cette piézoélectricité est très importante car la liaison III-N est fortement polarisée. Les constantes piézoélectriques des nitrures sont près de dix fois supérieures à celles des composés III-V ou II-VI conventionnels. L'AlN a les constantes piézoélectriques les plus élevées de tous les composés à liaisons tétraédriques. Elles sont seulement trois fois inférieures à

celles des pérovskites ferroélectriques. Cette forte piézoélectricité a été exploitée ici pour la réalisation de résonateurs acoustiques à ondes de Lamb. L'activité de l'IMN a donc consisté à développer des dispositifs à ondes acoustiques de surface à base d'AlN fonctionnant en hyperfréquence. Cela a été possible grâce à la mise en œuvre de techniques de salle blanche (lithographie, gravure, métallisation, pré-traitement de surface des échantillons, nature des substrats, des métaux...). Les caractérisations physico-chimiques des matériaux et des structures (contrainte résiduelle, nature et orientation cristalline, taille des grains, impuretés....) réalisées à l'IMN et à l'IEMN ont été corrélées aux performances des dispositifs réalisés et en liaison étroite avec les paramètres de dépôt. L'un des objectifs de cette étude a été la vérification de l'effet multi-échelle, cette hypothèse s'appuyant sur le fait qu'un événement survenant à l'échelle nanoscopique puisse se révéler macroscopiquement. Cela a permis de trouver des points de fonctionnement des bâtis de PVD à l'IMN et en particulier celui en HiPIMS.

Les dispositifs électroniques élaborés à partir de cette technique ont été testés à haute température (<500°C).

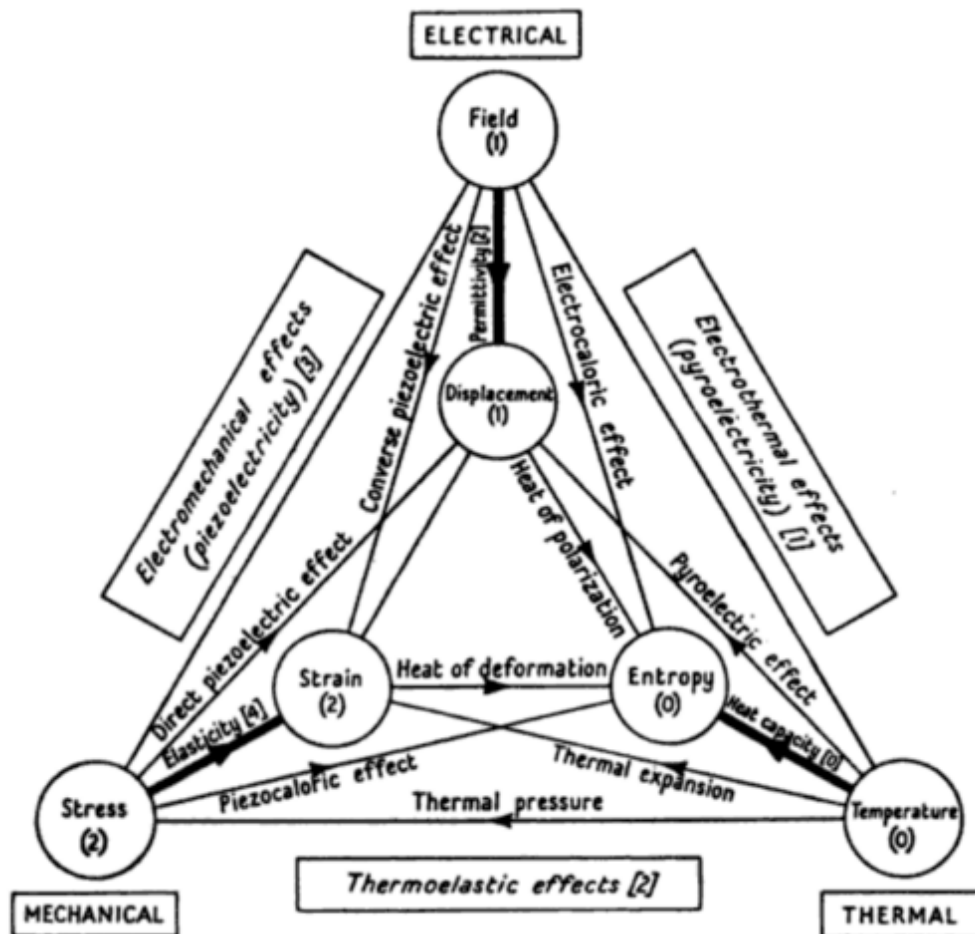


Figure 5.1 : Schéma représentatif de l'interdépendance des paramètres physiques macro/micro, intrinsèques/extrinsèques du nitrure d'aluminium [XX].

Le matériau AlN est un matériau fascinant. Mais, comme le montre la Figure 5.1, beaucoup de ses propriétés sont fortement liées. Lorsqu'une d'entre elles change, d'autres le sont aussi. La grande variété des performances que l'on a obtenu sur nos composants nous l'a clairement prouvé.

La qualité du matériau AlN a même été améliorée en comparaison avec la technique conventionnelle de magnétron DC. En effet, nous avons obtenu des films d'AlN à basse température ($< 400^{\circ}\text{C}$) avec des rocking curve de 0.9° alors que la meilleure performance en DC n'est que de 1.6° . La qualité du dépôt dépend évidemment beaucoup des premiers stades de la croissance et est plus adéquate lorsque le substrat d'accueil est orienté (111) pour l'orientation (0002) de AlN. Si les caractéristiques mécaniques, électriques et tribologiques exceptionnelles de ces dépôts sont désormais avérées, leurs origines sont encore mal définies.

Une étude systématique et plus approfondie a donc été adoptée concernant les dépôts de AlN (et de TiN) sur des substrats composites comme TiN/Si(100) ou TiN/NCD. La plupart de ces dépôts ont développé une structure colonnaire très texturés. Autrement dit, pendant leur élaboration, les atomes qui les constituent se sont empilés de manière à constituer un réseau cristallin orienté dans une direction donnée de l'espace. La texture étant fortement influencée par les conditions de dépôts (procédé d'élaboration, température, pression des gaz, tension de polarisation), nous avons privilégié l'orientation $\langle 111 \rangle$ du TiN pour la croissance de AlN (0002). La cause d'une orientation privilégiée a été interprétée sur la base d'une compétition entre énergie de surface et contraintes résiduelles.

Enfin, de très nombreux composants ont été réalisés sur des métaux, des semiconducteurs, des systèmes à multicouches et même sur un HEMT AlGaIn/GaN où la croissance s'est avérée en quasi-accord en paramètre de maille.

Nous avons pu montrer que plus le taux d'oxygène est élevé, moins les films d'AlN piézotent. Au-delà de 1%, il n'est quasiment plus possible de percevoir un quelconque effet. Aussi, le paramètre physique qui est considéré par la majorité des chercheurs comme le critère de choix pour définir la qualité cristalline des couches est le rocking curve. Nous avons montré qu'il n'en est rien. Il est possible d'avoir des films polycristallins avec des grains de plus de 90nm et un rocking curve de 1.1° qui ne piézotent pas. A contrario, des films de 3° de rocking curve associé à des grains de 20nm peuvent donner un coefficient d_{33} de 2.7 pm/V.

Exemple d'illustrations de dispositifs réalisés

Les figures ci-dessous montrent quelques exemples de réalisations de dispositifs à ondes acoustiques à ondes de Lamb : (a) AlN/TiN/diamant; (b) AlN/TiN.

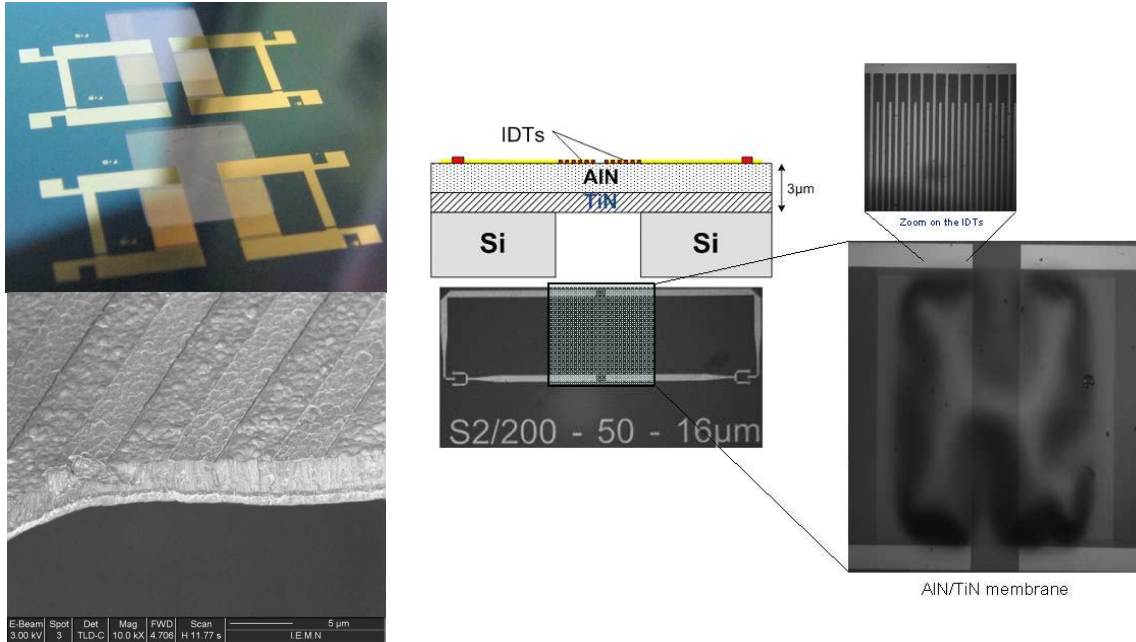


Figure 5.2 : A gauche : vue de dessus de dispositifs SAW AlN/TiN à ondes de Lamb sur une couche support NCD (diamant nanocristallin); à droite : idem avec une couche AlN/TiN auto-portée. La rigidité des membranes y est très différente. Parfaitement plane dans le premier cas et ondulée dans le second cas.

La Figure 5.2 montre les paramètres de transmissions (et la vitesse de phase théorique et expérimentale) d'une ligne à retard caractéristiques des SAW sur AlN à onde de Rayleigh ou à onde de Lamb. Le graphe de la Figure 5.3 montre la vitesse de phase du mode symétriques S_0 en accord avec les calculs théoriques réalisés à l'IEMN (collaboration avec Abdelkrim Talbi).

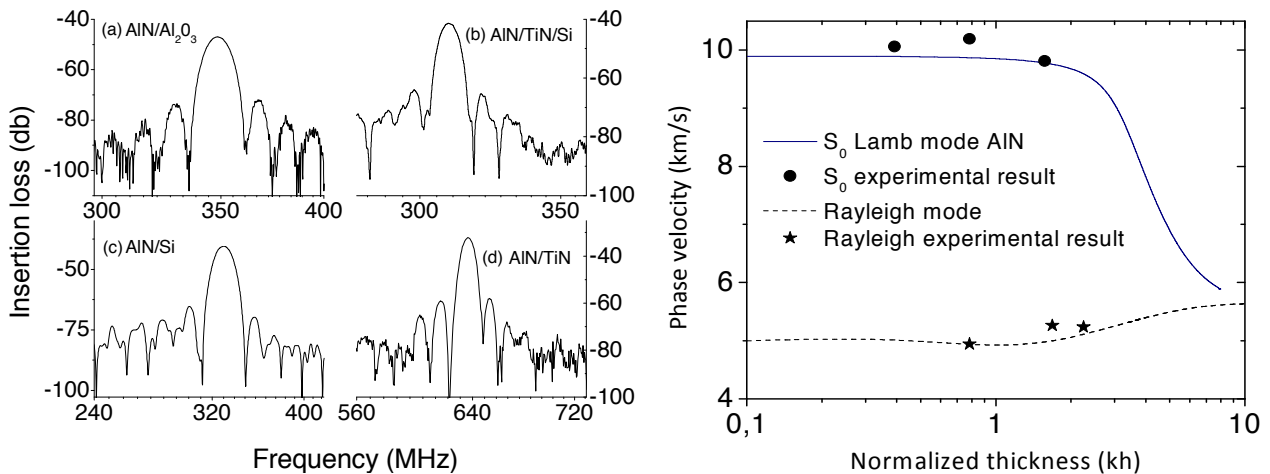


Figure 5.3 : A gauche : mesures des paramètres S_{ij} de dispositifs SAW : sur AlN-MOCVD sur substrat saphir, AlN/TiN PVD sur substrat Silicium, c. AlN sur substrat silicium (100) et AlN/TiN auto-porté. A droite : mesures expérimentales et calcul théoriques du mode de propagation symétrie S0 en fonction de l'épaisseur normalisée.

Exemple de résonateur à poutre AlN :

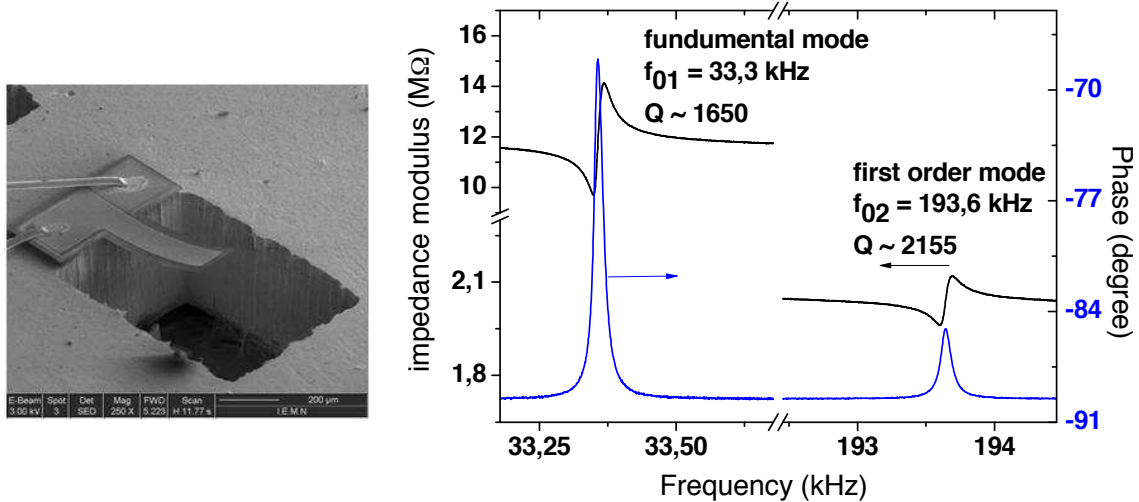


Figure 5.3 : Exemple de poutres AlN réalisé par PVD et leurs modes de propagation mesurés par spectroscopie d'impédance.

Références

[PEL91]] PELLEGGI J., ZEVIN L.Z., LUNGO S., CROITORU N. Reactive-sputter-deposited TiN films on glass substrates. *Thin Solid Films*, **197** (1991) 117-128.

Publications RICL

[RAH10] Epitaxial growth of ZnO thin films on AlN substrates deposited at low temperature by magnetron sputtering

S. Rahmane, B. Abdallah, A. Soussou, E. Gautron, P.Y. Jouan, L. Le Brizoual, N. Barreau, A. Soltani, M.A. Djouadi

Physica Status Solidi A - Applications and Materials Science **207**, 7 (2010), 1604

[TAL15] Simulations, fabrication, and characterization of diamond-coated Love wave-type surface acoustic wave sensors

TALBI A., SOLTANI A., RUMEAU A., TAYLOR A., DRBOHLAVOVA L., KLIMSA L., KOPECEK J., FEKETE L., KRECMAROVA M., MORTET V.

Phys. Status Solidi A-Appl. Mat. Sci. **212**, 11 (2015) 2606-2610.

[SOL14] Dispersion properties and low infrared optical losses in epitaxial AlN on sapphire substrate in the visible and infrared range

SOLTANI A., STOLZ A., CHARRIER J., MATTALAH M., GERBEDOEN J.C., BARKAD H.A., MORTET V., ROUSSEAU M., BOURZGUI N., BEN MOUSSA A., DE JAEGER J.C.

J. Appl. Phys., **115**, 16 (2014) 163515, 6 pages [doi: 10.1063/1.4873236](https://doi.org/10.1063/1.4873236)

[HEM14] Hypersonic band gap in an AlN-TiN bilayer phononic crystal slab
HEMON S., AKJOUJ A., SOLTANI A., PENNEC Y., EL HASSOUANI Y., TALBI A., MORTET V., DJAFARI-ROUHANI B.
Appl. Phys. Lett., **104**, 6 (2014) 063101, 5 pages [doi: 10.1063/1.4864310](https://doi.org/10.1063/1.4864310)

[STO13] Optical properties of aluminum nitride thin films grown by direct-current magnetron sputtering close to epitaxy
STOLZ A., SOLTANI A., ABDALLAH B., CHARRIER J., DERESMES D., JOUAN P.Y., DJOUADI M.A., DOGHECHE E., DE JAEGER J.C.
Thin Solid Films, 534 (2013) 442-445 [doi: 10.1016/j.tsf.2013.01.086](https://doi.org/10.1016/j.tsf.2013.01.086)

[MOR12] Grain size tuning of nanocrystalline chemical vapor deposited diamond by continuous electrical bias growth : experimental and theoretical study
MORTET V., ZHANG L., ECKERT M., D'HAEN J., SOLTANI A., MOREAU M., TROADEC D., NEYTS E., DE JAEGER J.C., VERBEECK J., BOGAERTS A., VAN TENDELOO G., HAENEN K., WAGNER P.
Phys. Status Solidi A-Appl. Mat. Sci., **209**, 9 (2012) 1675-1682 [doi: 10.1002/pssa.201200581](https://doi.org/10.1002/pssa.201200581)

[TAL12] Theoretical study of Lamb acoustic waves characteristics in a AlN/diamond composite membranes for super high frequency range operating devices
TALBI A., SOLTANI A., MORTET V., GERBEDOEN J.C., DE JAEGER J.C., PERNOD P.
Diam. Relat. Mater., **22** (2012) 66-69 [doi: 10.1016/j.diamond.2011.10.027](https://doi.org/10.1016/j.diamond.2011.10.027)

[TIE09] Thin film magnetoelectric composites near spin reorientation transition
TIERCELIN N., PREOBRAZHENSKY V., MORTET V., TALBI A., SOLTANI A., HAENEN K., PERNOD P.
European Materials Research Society Spring Meeting, E-MRS Spring 2008, Symposium F : Multiferroic and Magnetoelectric Materials, Strasbourg, France, may 26-30, 2008
J. Magn. Magn. Mater. **321**, 11 (2009) 1803-1807 [doi: 10.1016/j.jmmm.2009.02.026](https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2009.02.026)

[TIE08] Magnetoelectric effect near spin reorientation transition in giant magnetostrictive-aluminum nitride thin film structure
TIERCELIN N., TALBI A., PREOBRAZHENSKY V., PERNOD P., MORTET V., HAENEN K., SOLTANI A.
Appl. Phys. Lett. **93**, 16 (2008) 162902-1-3 [doi: 10.1063/1.3001601](https://doi.org/10.1063/1.3001601)

Projets en cours et Perspectives

Projet n°1 : Etude du transport dans le GaN : les applications à venir

1^{er} thème : Impact d'une couche de nucléation 3C-SiC/Si(111) pour la réalisation d'une couche tampon de GaN épaisse de haute qualité.

2nd thème : Etude du transport dans GaN sous fort champ électrique.

3^{ième} thème : Etude du transport dans des nanostructures quasi-1D.

Projet n°2 : Réalisation de circuits MMIC à base de composants HEMT AlGaIn/GaN et InAlN/GaN pour des applications en électronique de puissance.

Projet n°3 : Capteurs de gaz à base de HEMT GaN et MSM BGaIn/GaN

Projet n°4 : Résonateur acoustique à base d'AlN pour l'électronique de puissance

Projet n°5 : Détecteurs à neutrons à base de ¹⁰BN

Projet n°1

Etude du transport dans le GaN : les applications à venir

Ce projet de recherche en cours entre dans le cadre d'une collaboration qui a débuté avec le CHREA pour deux thèmes et avec GTL pour le troisième thème. Tous n'ont malheureusement toujours pas été soutenus par un contrat ANR mais heureusement ces sujets sont adossés à deux thèses de doctorat en cours.

1^{er} thème : Impact d'une couche de nucléation 3C-SiC/Si(111) pour la réalisation d'une couche tampon de GaN épaisse de haute qualité.

Il est prévu d'améliorer la qualité cristalline des couches épitaxiées et repousser davantage les limites des hétérostructures existantes en utilisant une épitaxie sur tremplin SiC cubique déposé sur Silicium que l'on pourra comparer avec celle comportant une couche de nucléation basse température (la technique choisie concerne la MBE, technique qui sert de référence au CHREA). Pour augmenter la fréquence de travail des transistors, la longueur de grille doit être diminuée de même que la distance séparant cette dernière du canal constitué par un gaz bidimensionnel d'électrons afin de limiter les effets de canal court. En retour ceci augmente les résistances d'accès. Pour compenser ces effets, des optimisations seront réalisées au niveau de l'épitaxie des zones actives avec des couches tampons capables d'améliorer le confinement et des barrières AlGaIn et InAlGaIn riches en aluminium à même de réduire la résistance du canal. Pour réduire les résistances d'accès dans les transistors, une voie complémentaire basée sur la reprise d'épitaxie localisée de GaN fortement dopée sera étudiée. Pour la réalisation des contacts ohmiques, cette solution basée sur la technique MBE permettra un contact électrique direct avec le canal sans nécessiter de recuit de diffusion. Ainsi, en l'absence de fluage des contacts métalliques, une meilleure définition de leurs bords permettra de rapprocher la grille au plus près de la source du transistor et ainsi minimiser la résistance d'accès. Afin de valider ces approches et leurs combinaisons, l'IEMN procédera aux mesures de pertes de propagation, à la fabrication des composants et à leurs caractérisations électriques du mode statique jusqu'aux mesures de puissance de sortie à 40 GHz et au-delà.

2nd thème : Etude du transport dans GaN sous fort champ électrique.

Les phénomènes liés au transport des électrons dans le GaN sous fort champ électrique sont encore relativement mal connus alors que la maîtrise de ces effets est essentielle pour optimiser et même développer de nouveaux composants. Ainsi, l'ionisation par chocs et la chute de la mobilité des électrons à haute énergie sont des phénomènes qui limitent les performances des composants et, dans certains cas, peuvent être exploités (diodes à avalanche, diodes à effet Gunn...).

Le principal objectif de cette étude est donc d'étudier des structures épitaxiales à base de GaN en vue de la compréhension de ces phénomènes et de la quantification de leurs paramètres (énergies, temps de relaxation etc...). C'est dans un contexte de transport électronique vertical que se situera l'étude avec pour commencer des diodes fabriquées à partir de matériau GaN dopé n+ n- n+ puis des hétérostructures avec par exemple, un émetteur AlGaIn. Ces structures seront réalisées au CHREA. Des diodes seront fabriquées en salle blanche et mesurées à l'IEMN (mesures I-V et C-V en fonction de la température) et l'IEF/IEMN réaliseront des caractérisations complémentaires (mesures de bruit, mesures d'électroluminescence). Des modélisations sont également menées à l'IEMN sous la responsabilité de Michel Rousseau et à l'IEF (avec Frédéric Aniel). A l'IEF, ces modélisations porteront sur les structures électroniques, l'ionisation par chocs, les temps de relaxation. A l'IEMN, les modélisations portent sur l'influence des effets thermiques sur l'apparition d'un domaine de propagation et l'influence des dimensions des diodes Gunn sur les performances électriques (statique et micro-ondes). (thèse de Florian Michoneau).

3^{ème} thème : Etude du transport dans des nanostructures quasi-1D.

Les SC III-V de la filière nitrure de gallium et en particulier les HEMTs (Ga,In)AlN/GaN sont étudiés intensivement en mode de déplétion pour des applications de puissance en hyperfréquence depuis plus de deux décennies. Parmi les méthodes permettant de faire fonctionner ces composants en mode d'accumulation, celles qui sont les moins étudiés consistent à mettre à profit les effets électrostatiques en 3D à l'échelle nanométrique. Récemment, l'approche bottom-up a été utilisée pour la réalisation d'un MISFET nano-fil à base de GaN en mode de déplétion lequel a montré des performances honorables et prometteuses. Toutefois, le traitement des nanofils isolés est technologiquement difficile. Ce thème de recherche propose de démontrer que, en combinant des épitaxies de HEMTs classiques (In)AlN/GaN associées à une technologie top-down ou bottom-up pour la réalisation de nanorubans, on devrait permettre à la fois l'utilisation de ces composants innovants en mode d'enrichissement et en mode de déplétion. Ces nanorubans seront fabriqués en lithographie électronique. Le contact de grille peut être réalisé soit directement pour obtenir un contact Schottky ou isolé par un diélectrique de type AlO_x ou hBN déposé par atomic layer deposition ou MOCVD. Il est alors possible d'intégrer l'ensemble de ces dispositifs actifs sur le même wafer afin d'envisager une intégration de ces composants pour une électronique logique qui apparaît très attractive pour un fonctionnement à haute température. Certaines structures à transport 1D pourront être utilisées pour la réalisation de transistors de puissance à haute fréquence (en fonction des caractéristiques non-linéaires obtenues). Il est prévu dans ce travail d'optimiser la géométrie de ces dispositifs permettant la pixellisation d'un wafer pour des opérations en électronique numérique à haute température de manière à permettre d'accumuler les performances de chaque nano-ruban. L'objectif étant d'améliorer la commande des grilles et la collecte des charges par la réduction des résistances d'accès des contacts ohmiques. L'étude physique sur le fonctionnement et le transport quasi-1D de ces dispositifs feront l'objet d'une étude physique par la simulation (thèse de Mohammed Boucherta).

Projet n°2

Réalisation de circuits MMIC à base de composants HEMT AlGaIn/GaN et InAlN/GaN pour des applications en électronique de puissance.

Ce thème auquel je m'implique davantage depuis 2014 correspond au développement de transistors de puissance GaN pour l'électronique de puissance. Les besoins des industriels se tournent actuellement vers la miniaturisation de convertisseurs DC-DC ou DC-AC nécessitant une intégration et donc la montée en fréquence des dispositifs permettant de réduire en particulier le volume des composants passifs (inductances et condensateurs). L'objectif de cette action, consiste donc à concevoir et fabriquer des dispositifs de puissance intégrés à base de ces matériaux III-N et plus particulièrement à base de Nitrure de Gallium. Ils sont basés sur des épitaxies sur substrat silicium pour des questions de coût évident et nécessitent le développement de composants de type HEMT normally-off lesquels devront délivrer des courants importants et supportant des tensions élevées. Cette action entre dans le cadre d'un projet ANR EDGAN soumis au second tour en avril 2016.

Il est prévu que l'utilisation de ces technologies dans le contrôle de machines électriques permettrait d'économiser jusqu'à 12% de la consommation totale d'énergie électrique en France. L'électronique de puissance est donc une des clés pour mieux maîtriser nos ressources d'énergie et notamment celles renouvelables de la future économie faible en carbone, laquelle est estimée à 30% de la production d'énergie en 2020.

Cette transition s'appuie notamment sur des circuits et systèmes de conversion d'énergie électrique qui nécessitent, eux-mêmes, de nouveaux composants électroniques, plus performants que les composants actuels, limités par les propriétés intrinsèques du Silicium. Aujourd'hui les nitrures d'éléments III sur Si constituent une des familles de matériaux les plus prometteuses, en termes de performance et de coût, pour remplacer le Si dans certaines applications. Les propriétés physiques du GaN doivent permettre d'augmenter l'efficacité et la compacité et de réduire les coûts des systèmes de conversion d'énergie. Les coûts mis en jeu sont colossaux et il nous faut agir pour développer cette prochaine génération de produits dans des secteurs manufacturiers à forte valeur ajoutée comme les industries de l'automobile, de l'aérospatiale, l'électronique grand public, l'éclairage, la défense, la santé et l'énergie. Effectivement, bien que l'essentiel de la production est située en Asie, l'Europe reste un acteur majeur dans le domaine de la production électronique pour les marchés (industriel médical, aérospatiale, sécurité, automobile...). Ces marchés professionnels vont connaître les plus fortes croissances d'ici à 2020 notamment en ce qui concerne les semi-conducteurs à LBI.

Le panorama complet de la chaîne de valeur de l'électronique de puissance au travers des principales applications, défis, critères de performances et d'opportunités montre une activité intense pour le GaN en R&D mais une production encore très limitée car de nombreux problèmes restent à être résolus comme le packaging des composants pour la gestion de la thermique lié à la compacité des composants et des convertisseurs, les modules d'interface, les structures de conversions DC/DC, DC/AC, les systèmes de commande, le dimensionnement, la compatibilité électromagnétique, la conception des drivers...

Au cours de ces dernières années, la taille, le poids et le coût des convertisseurs n'ont fait que diminuer, en grande partie grâce aux progrès faits dans le domaine des interrupteurs électroniques. C'est une électronique de commutation qui en théorie ne présente quasiment pas de perte. Lorsqu'il est associé à des éléments de filtrage passifs et purement réactifs, il permet de modifier la tension et/ou le courant sans perte en conservant l'énergie. Ce but est atteint en découpant la tension et/ou le courant à très haute fréquence et en lissant le résultat obtenu pour en extraire la valeur moyenne. En pratique on doit s'attendre à des pertes de l'ordre de 2 à 10 % dues à l'imperfection des éléments physiques qui le constituent. Cela justifie l'essor de ce type d'électronique dans les systèmes à haute

puissance puisque les pertes raisonnables permettent une évacuation de la chaleur générée sans recourir à des moyens extrêmes et coûteux.

Mais au fil du temps, l'électronique de puissance s'est imposée dans toutes les applications traditionnelles où les pertes doivent rester faibles pour limiter l'échauffement (traction électrique, entraînements industriels, gestion du réseau de distribution, électroménager) et en particulier dans le domaine de l'automobile pour laquelle elle constitue un très gros marché au moment du passage vers les véhicules hybrides et électrique et vers l'énergie photovoltaïque.

Les nitrures d'éléments III constituent une des familles de matériaux les plus prometteuses en termes de performance et de coût. Le nitrure de gallium fait ses premiers pas dans la production industrielle en 2010 avec des caractéristiques très prometteuses d'un point de vue coût, rendement, compacité, modularité d'utilisation, vitesse de commutation des systèmes de conversion d'énergie, faibles R_{on} ... Il n'y a pas encore de marché industriel concret utilisant cette technologie mais des tensions de 600V à 1600V et des temps de commutation extrêmement faibles devraient en faire un composant de choix pour les marchés grands publics comme l'automobile. En effet, les transistors HEMTs de puissance basés sur l'hétérostructure AlGaN/GaN ont démontré des performances nettement supérieures à celles des composants Si.

Cependant, le HEMT GaN est un transistor à appauvrissement alors qu'un transistor à enrichissement est préférable pour les circuits de puissance (pour la simplicité des architectures et la sécurité notamment). Différentes approches ont été étudiées pour le transistor à enrichissement (gravure de la couche barrière, incorporation de charges dans la zone de grille par épitaxie ou implantation ionique, combinaison d'un transistor GaN à appauvrissement avec un transistor Si à enrichissement en configuration cascode...). Chacune de ces solutions présente des avantages et des inconvénients mais aucune n'est clairement établie et un gros effort reste à faire pour identifier la meilleure approche et en proposer de nouvelles.

Dans le cadre de cette étude, j'intégrerai un projet en cours au LN2 dont les objectifs concernent la maîtrise des circuits et des transistors de puissance à base de matériaux GaN. N'ayant pas de connaissance au préalable sur la synthèse et la fabrication de circuits monolithiques, ce projet me permettra de combler un manque stratégique dans mes domaines de compétences pour le développement de modules électroniques complets.

J'ai eu l'opportunité de travailler depuis quelques années en collaboration avec Hassan MAHER du LN2 (Pr à l'UdS) et en particulier sur les transistors à enrichissement à base de GaN. Ces résultats fructueux m'ont inspiré pour proposer de nouveaux design d'hétérostructures innovantes qui pourraient être synthétisées au LN2 puis réaliser de nouveaux transistors Normally-ON et Normally-OFF et les éléments passifs associés tout en intégrant les problématiques de packaging dans ces circuits.

Projet n°3

Capteurs de gaz à base de HEMT GaN et MSM B GaN/GaN

La prise en compte de la protection de l'environnement, en particulier la lutte contre la pollution atmosphérique, est un enjeu sociétal majeur qui date des années 1970. Outre l'effet de serre et la destruction de la couche d'ozone, la pollution atmosphérique a un effet néfaste sur la santé des êtres vivants mais aussi sur la végétation, les ouvrages d'art et les constructions traditionnelles (béton...). Certains engagements gouvernementaux ont permis la réduction de certains polluants tels que le dioxyde de soufre lesquels proviennent principalement de combustions mais aussi d'autres gaz tels que les oxydes de carbone, l'ozone, le sulfure d'hydrogène, l'ammoniac, les composés organiques volatils, les particules fines etc... Mais l'ensemble de ces actions reste encore insuffisant au regard d'une pollution liée à une activité humaine croissante. Les principales sources d'émission des polluants proviennent de la combustion des carburants fossiles dans l'industrie, les transports et autres sources anthropiques (ménages, agriculture...). Les transports constituent la principale source d'émission de polluants atmosphérique en ville. Des progrès technologiques ont permis d'améliorer le parc des voitures (pots catalytiques, réduction de la consommation...), mais l'augmentation du trafic neutralise en partie ces bénéfices. L'apparition récente du filtre à particules est une autre avancée majeure dans l'amélioration des systèmes de dépollution et de la combustion dans les moteurs thermiques. Cette dernière innovation a permis de réduire significativement les émissions de polluants contribuant ainsi à la qualité de l'air, à l'atténuation de leurs effets sur le climat ainsi qu'à la santé des populations. Une réglementation stricte a aussi été imposée par l'UE sur les émissions automobiles en Europe ainsi que dans d'autres pays développés. Le respect de cette réglementation passe par des capteurs innovants, performants et robustes permettant d'améliorer le rendement des systèmes de dépollution et des moteurs. A l'heure actuelle, la technologie utilisée pour fabriquer ces capteurs est parfaitement mature mais ces derniers ne sont pas capables de discriminer plusieurs gaz simultanément. Ces capteurs sont chers, présentent un temps de réponse élevé et une faible sélectivité. Ils ne répondent plus au besoin actuel d'innovation, de performances et de robustesse nécessaire pour répondre pleinement aux challenges actuel et aux normes à venir. Pour améliorer les systèmes de dépollution, il est nécessaire d'améliorer les performances de ces capteurs et en particulier leur sélectivité.

Dans ce cadre évolutif des besoins sociétaux, j'ai soumis cette année avec 4 partenaires le projet ANR CLEANING (accepté en juillet 2015) dont l'objectif est la fabrication de micro-capteurs intégrés pour la détection simultanée des gaz d'échappement NH_3 et NO_x (NO , NO_2 , N_2O) en utilisant notamment un semiconducteur à large bande interdite pouvant fonctionner sous environnement sévère (et particulièrement à haute température). Après plusieurs dizaines d'années de développement, le nitrure de gallium est à ce jour un matériau suffisamment mature pour satisfaire à ces nouvelles exigences. Son caractère robuste et son inertie chimique ne sont plus à démontrer. Grâce à son engineering de bandes, une hétérostructure de type HEMT présente une densité de porteurs modulables par des variations infinitésimales du potentiel de surface. Cet effet est ici mis à profit pour améliorer la sensibilité de détection des gaz d'échappement. La sélectivité de ces gaz est obtenue via un traitement de surface et/ou par l'adjonction d'un métal catalyseur spécifique aux gaz à détecter. Cette sélectivité peut aussi être obtenue avec plus de précision via un traitement numérique des mesures expérimentales obtenues au moyen de ces nez électroniques innovants. Un nez électronique est constitué d'une matrice de capteurs, associée à des méthodes d'analyse de données en vue de l'identification et de la quantification des composants d'une atmosphère gazeuse complexe. Ces nouveaux dispositifs de détection gazeuse constituent actuellement une alternative pouvant répondre à l'ensemble des critères techniques imposés par les normes H2020 tout en rendant disponible des capteurs plus abordables financièrement que ceux existant actuellement à base de céramiques.

Le consortium de ce projet est constitué de quatre partenaires expérimentés et complémentaires : l'UMI-GTL Georgia-Tech Lorraine est en charge de tout les aspects matériaux SC à base

d'hétérostructures GaN et la qualification et la sélection des micro-capteurs sous gaz à haute température, l'IEMN-Université de Lille pour l'essentiel de la fabrication en salle blanche, l'UMI-LN2 est en charge de certains aspects technologiques du procédé technologique hautement sensibles (passivation...) ainsi que le packaging quant à la gestion thermique des puces et le partenaire industriel Peugeot PSA a pour charge de caractériser les micro-capteurs sélectionnés dans des conditions réelles d'utilisation dans un véhicule automobile.

Ce projet constitue une poursuite d'études que j'ai unifié préalablement avec l'équipe de GTL en 2014 et 2015 (cf. Figure P1). Les composants que nous avons fabriqués ont montré leur efficacité pour la détection de chacun des gaz cités précédemment et nos résultats préliminaires montrent une sensibilité inégalée au niveau mondial. Cela permettra ainsi d'anticiper l'évolution future de la norme EURO7. Ces résultats ont donné lieu à un brevet en soumission et deux publications internationales communes.

Dans le cadre de ce projet, mon action interviendra dans la co-direction d'une thèse en cotutelle entre l'IEMN et le LN2 sur les aspects physique des semiconducteurs, design et fabrication en salle blanche des capteurs. La disponibilité des salles blanches côté IEMN et côté LN2 est un atout quant à l'encadrement de cette thèse et facilitera ainsi le rétro-engineering entre design et savoir-faire technologique des deux laboratoires (IEMN et LN2). Connaissant parfaitement les activités, les équipements et les savoirs-faire du partenaire GTL, mon activité interviendra aussi dans le co-encadrement d'un post-doc côté LN2 sur le packaging des capteurs en parfaite concordance avec le cahier des charges fourni par les partenaires GTL et PSA et dont une partie des tâches prévues se feront à GTL. La thèse et le post-doc sont tout deux financés par le projet CLEANING.

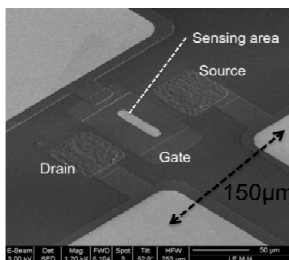


Figure P1 : Photo MEB (vue de dessus) d'un capteur de gaz à base de HEMT GaN [HAL16].

[HAL16] Investigation of the performance of HEMT-based NO, NO₂ and NH₃ exhaust gas sensors for automotive antipollution systems

HALFAYA Y., BISHOP C., SOLTANI A., SUNDARAM S., AUBRY V., VOSS P.L., SALVESTRINI J.P., OUGAZZADEN A. , *Sensors* **16**, 3 (2016) 273 [doi: 10.3390/s16030273](https://doi.org/10.3390/s16030273))

Projet n°4

Résonateur acoustique à base de nitrure d'aluminium destiné à l'électronique de puissance

Ce projet traite de la conception et de la réalisation de dispositifs à ondes de Lamb à base de nitrure d'aluminium pour la synthèse de filtres de puissance en gamme microondes.

La plupart des dispositifs à ondes acoustique de surface (SAW) sont fait sur des matériaux piézoélectriques tels que le quartz monocristallin, le niobate de lithium ou le tantalate de lithium. Toutefois, depuis une décennie, les industriels (notamment ceux des télécommunications entre autres) montrent un intérêt croissant sur le développement de composants pouvant absorber de forte puissance électrique, pouvant fonctionner à haute température et sous environnement hostile. Pour atteindre ces objectifs, l'utilisation de nouveaux matériaux s'avère nécessaire, tels que le nitrure d'aluminium (AlN), le nitrure de gallium (GaN) ainsi que leurs alliages. L'AlN a déjà été choisi comme matériau piézoélectrique pour la fabrication de capteurs SAW fonctionnant en haute fréquence (GHz). Ce matériau présente un état de l'art avec des films polycristallins fabriqués par pulvérisation cathodique ou magnétron sur substrat silicium de manière à être compatibles avec les procédés technologiques de la microélectronique industrielle.

Dans ce travail, j'envisage de réaliser au LN2 des filtres SAW à ondes de Lamb à base de nitrure d'aluminium. Ce travail pourrait consituer la poursuite d'une étude collaborative antérieure que nous avons menée en 2015 avec des SAW en ondes de Rayleigh. Le matériau AlN sur substrat Silicium a été épitaxié par CBE côté LN2 par l'équipe du Pr. Richard Arès et j'ai pris en charge la réalisation des composants côté IEMN. Les résultats obtenus sont très encourageants puisque non seulement, nous avons obtenus l'état de l'art mais aussi une qualité matériau AlN sur substrat Silicium similaire aux couches commerciales d'AlN sur substrat saphir épitaxiées par MOCVD. L'UMI-LN2 s'est rapproché de Teledyne Dalsa (un industriel, 3^{ième} leader mondial dans le domaine) pour réaliser prochainement un autre démonstrateur et tenter de satisfaire aux exigences techniques définies par le cahier des charges. En effet, les dispositifs SAW sont sujets à un phénomène appelé acousto-migration. Il s'agit d'une dégradation des électrodes sous l'effet de la densité de puissance électro-acoustique à transmettre. Il se produit une ségrégation du métal, avec formation de trous et d'agrégats. Or, plus la surface acoustique est petite, plus la tenue à la puissance est difficile. De même, les dimensions d'un filtre étant inversement proportionnelles à la fréquence, la tenue en puissance est d'autant plus critique que la fréquence est élevée. Un dernier point à noter et non des moindres, est que ce phénomène s'accélère avec la température. Actuellement, on définit la puissance maximale admissible comme la puissance jusqu'à laquelle on n'observe pas de dégradations notables du fonctionnement du dispositif au-delà d'un temps opératoire donné (~50 000 h) et à une certaine température (50°C). Un filtre en échelle fonctionnant à 1 GHz en technologie standard est susceptible de tenir 30 dBm. Au-delà de cette puissance, Il est difficile de donner les limites de manière générale parce que celles-ci dépendent de beaucoup de paramètres : technologie des électrodes, structure du filtre, fréquence, présence d'une couche de passivation, architecture thermique du composant...

L'ensemble de ce contexte explique les challenges à relever lors de la miniaturisation de nos filtres.

Dans le cadre de cette étude, la première tâche consistera à optimiser côté LN2, le design des SAW (dessins des doigts interdigités, longueur d'onde, réflecteurs etc...), de définir les techniques de gravure pour libérer les résonateurs, de choisir la nature des électrodes (pour supporter les fortes puissances) notamment avec des technologies de métallisation spécifiques ou de semi-conducteurs dégénérés (métaux réfractaires, alliages spéciaux, multicouches).

L'ensemble de ces travaux sera soutenu par des simulations par éléments finis électro-thermoacoustique à l'aide d'un outil commercial disponible aussi bien à l'IEMN qu'au LN2. Une fois

cette étape terminée, il est envisagé d'utiliser le savoir-faire de l'équipe du Pr. H. MAHER quant à la co-intégration monolithique des composants SAW réalisés avec des éléments passifs en vue d'obtenir un module complet opérationnel à insérer dans une chaîne d'émission/réception RF pour la future technologie 5G. Cette tâche se fera à l'Université de Sherbrooke (LN2) avec la fabrication des éléments passifs des différents circuits MMIC.

Projet n°5

Détecteurs à neutrons à base de ^{10}BN

Le nitrure de bore et ses alliages réapparaissent comme une classe de matériaux multifonctionnels de choix depuis leur synthèse par MOVPE avec notamment l'épitaxie de nitrure de bore hexagonal sur substrats saphir et sur silicium. Ce matériau, similaire au graphène côté cristallographique mais complémentaire côté électrique (le premier étant un excellent isolant électrique tandis que le second est conducteur électrique). Ces matériaux 2D ouvrent de nouvelles possibilités pour des dispositifs nano et mésoscopique notamment dans le domaine de la photonique, de l'optoélectronique et des capteurs (y compris le contrôle de l'environnement, le diagnostic de maladie et la détection de pathogènes non-invasives).

Un projet sur ce thème, appelé REBORN, a été soumis au second tour de l'appel à projet ANR2016. Les deux principaux partenaires de ce projet (IEMN et GTL) ont déjà démontré, en utilisant des alliages à base de bore, la réalisation de sources et détecteurs UV performants, mais aussi de transistors (BGaN comme barrière arrière d'un HEMT GaN).

Ce projet est une première phase qui devrait permettre (s'il est accepté) d'établir les propriétés électrique et thermique de couches minces de hBN de qualité monocristalline « intrinsèque » et concevoir des détecteur (hautement sensibles) à neutrons (de faibles énergies) et de photons XUV (10 - 290 nm). La seconde phase de ce projet consiste à définir les dopants (n et p) et les conditions pour la réalisation d'une jonction PN.

Notons qu'à l'heure actuelle, plusieurs programmes de recherche sur ce matériau ont été financé par des agences de recherche au niveau international (Darpa, DoD, NSF).