



HAL
open science

LA TECHNOLOGIE GAN ET SES APPLICATIONS POUR L'ELECTRONIQUE ROBUSTE, HAUTE FREQUENCE ET DE PUISSANCE

Jean-Guy Tartarin

► **To cite this version:**

Jean-Guy Tartarin. LA TECHNOLOGIE GAN ET SES APPLICATIONS POUR L'ELECTRONIQUE ROBUSTE, HAUTE FREQUENCE ET DE PUISSANCE. 2008. hal-00341009

HAL Id: hal-00341009

<https://hal.science/hal-00341009>

Submitted on 24 Nov 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

LA TECHNOLOGIE GAN ET SES APPLICATIONS POUR L'ELECTRONIQUE ROBUSTE, HAUTE FREQUENCE ET DE PUISSANCE

Jean-Guy TARTARIN

Depuis le début des années 90, une nouvelle catégorie de filières dites à large bande interdite est venue compléter l'éventail déjà large des technologies utilisées pour les capteurs, pour l'optique, pour l'électronique de puissance et pour l'électronique des hautes fréquences. Les technologies carbure de silicium (SiC) et nitrure de gallium (GaN) possèdent des qualités intrinsèques remarquables, et représentent ainsi une véritable rupture technologique avec les technologies GaAs et Si/SiGe. Leur développement offre de nouvelles opportunités en terme de conception de circuits, voire d'architecture de systèmes (réseau de transpondeurs des applications radar, gestion de l'énergie des systèmes embarqués, ...) en panachant les différentes technologies disponibles pour des applications en optique, en opto-électronique et en électronique.

► La structure de bande interdite directe est mise à profit pour la réalisation de dispositifs optiques (GaN et alliages InP, Al, P), ce qui autorise un spectre d'applications du visible aux ultraviolets, en émission et en détection : le matériau GaN est le seul qui puisse prétendre à des applications opto-électroniques aux courtes longueurs d'onde (bleu, ultraviolet, blanc). De nombreux composants électro-optiques (Light Emitting Diodes LED, Laser Diodes LD) ou détecteurs en environnement hostile (Metal-Semiconductor-Metal MSM, ...) sont d'ores et déjà disponibles, et constituent encore un axe fort de recherche.

► L'électronique de puissance est de plus en plus présente dans les systèmes embarqués :

-le secteur automobile prospecte également sur l'énergie électrique pour limiter ses émissions de CO₂ : l'amélioration des véhicules hybrides et électriques est ainsi liée à l'utilisation de matériaux tels que le GaN qui peuvent drainer de forts courants (plusieurs ampères) à des températures élevées (plus de 300°C) [1].

-L'aéronautique a également besoin de convertisseurs de puissance de grande compacité et de faible masse soumis à des cycles thermiques (faibles/fortes températures). Les dispositifs à grande bande interdite se positionnent très favorablement sur les aspects thermiques, de masse et de volume. De plus, l'immunité aux agressions radiatives permet de réduire l'utilisation de boîtiers protections et ainsi de diminuer la masse du système.

► L'électronique des hautes fréquences tire pour sa part un bénéfice des caractéristiques exceptionnelles de la grande bande interdite pour des applications de forte puissance. Des travaux sur matériau SiC ont déjà été publiés, mais le GaN reste largement majoritaire pour les applications de puissance à haute fréquence. Si la technologie autorise désormais la conception de dispositifs bipolaires, les transistors HEMT (et MESFET) sont les dispositifs les plus répandus pour les applications à haute fréquence telles que la conception de systèmes Radar (large bande jusqu'en bande X), les pylônes de relais de téléphonie mobile [2],...

I.) LA TECHNOLOGIE GAN

Parmi les quelques matériaux à grande bande interdite disponibles, le GaN est le plus largement employé pour concevoir les dispositifs actifs : les autres matériaux sont essentiellement utilisés comme substrat d'épitaxie. Les structures de transistors bipolaires à jonction ou à hétérojonction (resp. BJT et HBT) ne sont apparues que tardivement pour des raisons de difficultés de doper le GaN type 'p', ou à cause de la mobilité médiocre des trous. Des réalisations de transistors AlGaN/GaN [3][4], ou mixtes GaN/SiC (Emetteur GaN et base,

collecteur SiC)[5], ou encore SiC/SiC:Ge sont très encourageantes pour l'émergence de ces composants [6]. L'article s'articulera essentiellement sur des dispositifs GaN à effet de champ de type MESFET et HEMT (Metal Semiconductor Field Effect Transistor et High Electron Mobility Transistor).

I.1) Les avantages des matériaux à grande bande interdite :

La technologie GaN bénéficie d'une combinaison remarquable des caractéristiques des matériaux à large bande interdite qui la prédestine naturellement à des applications de forte puissance :

-un champ de claquage élevé (tableau 1) associé à un faible taux d'ionisation par impact, permet d'obtenir des puissances de sortie élevées (8x supérieur aux technologies III-V GaAs)

-la forte conductivité thermique du GaN ($1.3 \text{ W.cm}^{-1}.\text{K}^{-1}$ contre $0.5 \text{ W.cm}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour le GaAs) et de certains substrats (diamant $>9 \text{ W.cm}^{-1}.\text{K}^{-1}$, SiC @ $5 \text{ W.cm}^{-1}.\text{K}^{-1}$) est avantageuse pour l'évacuation des calories.

-des densités d'électrons supérieures à 10^{13} cm^{-2} (gaz d'électrons à 2 dimensions '2DEG' avec hétérostructure AlGaIn) grâce à de fortes polarisations spontanée et piézoélectrique sans dopage intentionnel, sont un atout pour l'amplification des signaux.

-la forte bande interdite rend les dispositifs plus immunes aux agressions de type électromagnétiques.

-des vitesses de saturation relativement importantes (3.10^7 cm/s) favorisent les applications à haute fréquence

Les principales propriétés et applications associées sont reportées dans le tableau 1.

	Si	GaAs	GaN	6H-SiC	
Bandgap (eV) @ 300°C	1.1 indirect	1.4 direct	3.4 direct	2.9 indirect	→ Hautes températures → Fortes tensions
Mobilité des électons ($\text{cm}^2/\text{V.S}$)	1400	8500	1000 (bulk) 2000 (2DEG)	600	→ Hautes fréquences
Mobilité des trous ($\text{cm}^2/\text{V.s}$)	600	400	30	40	
Vitesse de saturation des électons (10^7 cm/s)	1	2	2.5	2	→ Hautes fréquences
Champ de claquage (10^6 V/cm)	0.3	0.4	>5	4	→ Fortes tensions

tableau 1 : propriétés physiques et applications des hétérostructures à grande bande interdite GaN et 6H-SiC, comparées au Si et GaAs [7].

Pour évaluer le potentiel des semiconducteurs selon les applications visées, des facteurs de mérite sont disponibles parmi lesquels nous pouvons citer :

- ▶ JFM : 'Johnson's figure of merit' pour dispositifs haute fréquence, $(EbVs/2\pi)^2$
- ▶ KFM : 'Key's figure of merit' en considérant les limitations thermiques, $\kappa(EbVs/4\pi\epsilon)^2$

- ▶ BFM : ‘Baliga’s figure of merit’ pour la commutation de puissance, mEg^3
- ▶ BHFM : ‘Baliga’s figure of merit ’ pour la commutation rapide de puissance, μEb^2

Les différents facteurs de mérite précédents sont normalisés par rapport au facteur de mérite du silicium dans le tableau 2 ci-dessous.

	Si	GaAs	GaN	4H-SiC
JFM	1	11	790	410
KFM	1	0.45	1.8	5.1
BFM	1	28	910	290
BHFM	1	16	100	34

tableau 2 : différents facteurs de mérite des matériaux Si, GaAs, GaN, SiC [8], normalisés par rapport au silicium.

Pour les structures à effet de champ, les facteurs de mérite peuvent varier largement d’un article sur un autre dans la littérature selon le choix de l’axe cristallin, ou encore selon la mobilité des porteurs (notamment les trous dans le GaN)[9]... Il ressort que les valeurs normalisées par rapport aux facteurs de mérite du silicium sont largement à l’avantage des matériaux à grande bande interdite, pour des applications de puissance, à haute fréquence, ou encore pour des applications en commutation rapide et de puissance [10].

D’autres facteurs de mérite tels que BSFM (bipolar switching speed figure of merit), BPFM (bipolar power handling capacity figure of merit) et BTFM (bipolar power switching product) sont également disponibles pour les structures bipolaires, et sont systématiquement à l’avantage des structures à grande bande interdite dans un rapport de quelques dizaines à plusieurs centaines en comparaison avec le silicium et le GaAs.

I.2) Les acteurs du marché du GaN

Durant la dernière décennie, des progrès considérables et rapides ont été réalisés tant sur les matériaux GaN que sur les procédés technologiques et dispositifs à base de GaN : les précurseurs du domaine sont les USA et le Japon. L’Europe a engagé ses premières études quelques années après les USA : un des intérêts majeur du GaN étant d’ordre militaire, l’Europe se devait de se doter d’une source technologique indépendante. De nombreux groupes de recherche travaillent sur les techniques et procédés d’épitaxie, les mesures, la conception de circuits et la fiabilité.

Les USA possèdent trois principales filières commerciales :

- ▶ Cree développe à la fois une filière SiC et GaN : à température ambiante le SiC possède une conductivité thermique meilleure que les métaux, ce qui l’autorise à travailler à des niveaux de puissance extrêmement élevés (et aux hautes fréquences)[11]. La filière MESFET développée par Cree vise un marché de puissance large bande (amplificateurs de bande passante multi-octave à décade). Cree développe également des substrats GaN par technique HVPE (Hybrid Vapor Phase Epitaxy). Les HEMT GaN démontrent quant à eux des rendements en puissance ajoutée largement supérieures aux rendements issus des technologies traditionnelles, du fait de la bonne linéarité et de la possibilité de concevoir des topologies classe E que ne peuvent pas rendre possible les technologies Si et GaAs aux fréquences élevées.

► Nitronex développe notamment des transistors GaN HEMT sur des substrats Si de large dimension et à faible coût [12]. Les marchés visés sont les stations de base des liaisons sans fil du 2.5G, 3G, WiMAX, ...

► RF Micro Devices se positionne également sur le marché commercial de grand volume et sur les applications militaires de défense [13].

Le Japon adresse un marché plus mature avec une technologie GaN HEMT très fiable en utilisant un cristal de grande qualité (ce qui minimise les courants de fuite).

► Fujitsu vise également le marché des télécommunications (applications 3G, satellite VSAT, WiMAX et autres infrastructures de communications rapides sans fil) avec des transistors HEMT qui possèdent des rendements de drain supérieurs à 40%, des puissances de sortie de 174 W en continu sous alimentation 63V. Fujitsu a particulièrement travaillé sur la robustesse de sa filière : les transistors HEMT sont sensés pouvoir fonctionner sous température 200°C pendant plus de 100 ans (grille pincée, sous tension de drain 50 V), ce qui représente un record de cycle de vie pour cette technologie [14].

De nombreuses actions à l'initiative de l'ESA et de ses divers MoD (Ministry of defense), ont permis à l'Europe de récupérer son retard sur la filière GaN.

► TIGER (IEMN-Thales Research Technology), Picogiga et le CRHEA (France), QinetiQ (Angleterre), Daimler-Chrysler, FBH, Université d'Ulm et IAF (Allemagne), TNO (Pays-Bas), Chalmers et Université de Linköping (Suède), sont autant de structures industrielles ou universitaires qui travaillent sur ces filières GaN HEMT. Okmetic (suède) est la seule filière européenne qui développe et produit des substrats SiC semi-isolants. Lumilog travaille sur le développement de substrats GaN semi-isolants [15][16].

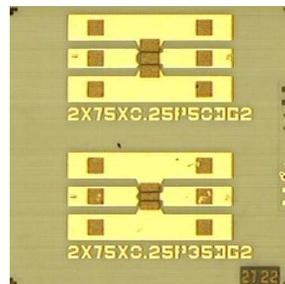


Figure 1 : composant HEMT AlGaIn/GaN développé par TIGER (Thales Research Technology & IEMN). $2 \times 75 \times 0.25 \mu\text{m}^2$ de développement de grille, sur substrat SiC.

La croissance des composants peut être réalisée sur différents substrats de coûts variables, qui impactent les performances des dispositifs : les substrats saphir et silicium offrent un coût modéré, tandis que le carbure de silicium et le GaN natif, plus onéreux, procurent de meilleures performances. Les composants HEMT ou MESFET peuvent ensuite être réalisés par diverses techniques : les solutions MOCVD (Metal Organic Chemical Vapour Deposition) et MBE (Molecular Beam Epitaxy) permettent de réaliser des couches fines, et les performances des composants réalisés par ces deux techniques sont comparables.

I.3) Les performances des transistors HEMT

Les performances en puissance de sortie et en rendement de puissance ajoutée des transistors à effet de champ MESFET et HEMT sont publiées de manière abondante depuis ces dernières années. Des records de puissance de sortie peuvent ainsi être relevés pour les différentes fréquences relatives aux différents marchés entre 1 GHz et 40 GHz.

► Caractéristiques dynamiques : les transistors HEMT proposent des rendements en puissance ajoutée de PAE=60% pour une puissance de sortie de 7.3 W/mm @ 10 GHz [17]. En bande Ka, une densité de puissance a été mesurée à 10.7 W/mm @ 10 GHz (pour une PAE=40%) [18]. En parallèle avec les études sur des matériaux, un des enjeux les plus significatifs sur l'amélioration des performances et de la fiabilité des transistors concerne les techniques de passivation (notamment Si_xN) qui permettent de réduire les pièges de surface (et donc la dispersion DC-RF). De plus, l'utilisation d'une électrode déportée connectée à la grille ou à la source [19] ('field-plate' connecté G ou S) réduit de manière significative le pic et le profil de la tension grille-source : malgré une réduction de la fréquence de transition f_T et fréquence maximale d'oscillation f_{max} par effet capacitif, cette électrode diminue les effets de piégeage et permet d'augmenter les tensions d'avalanche. Par ailleurs, les Japonais ont proposé un HFET (avec utilisation du 'field-plate') de puissance de sortie de 230 W en mode d'opération CW à une fréquence de 2 GHz (pour une PAE=67%), ou encore une puissance de sortie de 5.8 W en mode CW à une fréquence de 30 GHz (gain linéaire 9.2 dB) [20]. Le laboratoire TIGER-IEMN-TRT a obtenu des puissances de sortie de 5 W/mm à 4 GHz sur substrat saphir (gain linéaire 10 dB et PAE=39%) [21] et 1.9 W/mm à 10 GHz sur substrat silicium (gain linéaire 16 dB et PAE=18%) [22]. Des transistors HEMT sur substrat GaN ont été mesurés avec des puissances de 9.4 W/mm à 10 GHz (gain linéaire 11.6 dB et PAE=40%) [23]. Théron a recensé dans les figure 2 et figure 3 ci-dessous l'évolution des fréquences de transition f_T au cours des années, et les puissances de sortie (en W/mm) en fonction de la fréquence d'utilisation pour différents substrats, jusqu'en 2004 [15].

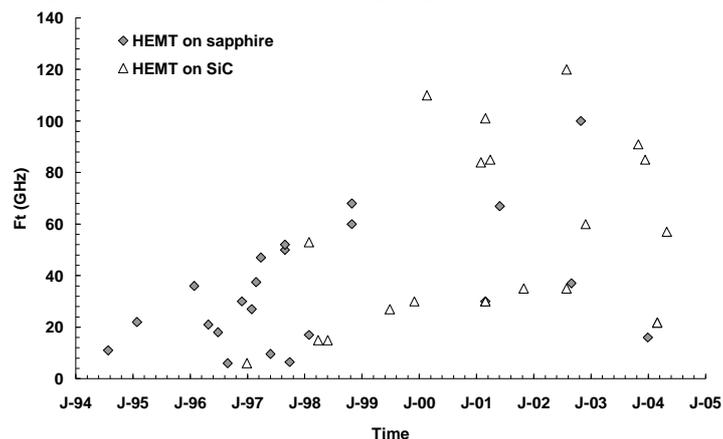


Figure 2 : évolution de la fréquence de transition de transistors HEMT AlGaIn/GaN en fonction du temps.

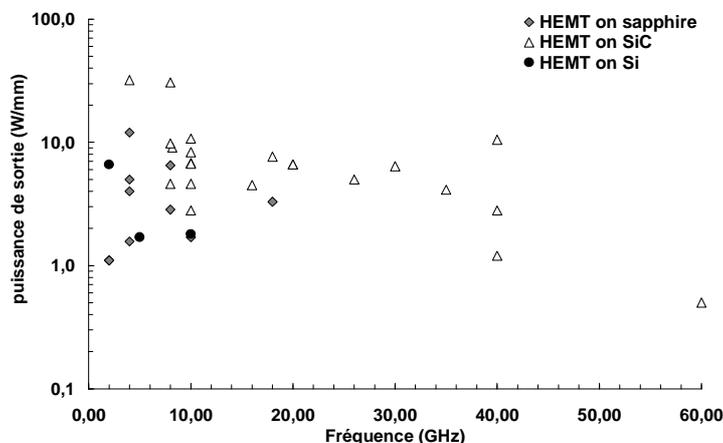


Figure 2 : évolution de la densité de puissance de sortie de transistors HEMT AlGaIn/GaN en fonction du temps. Remerciements à D. Théron (TIGER-IEMN) pour la mise à disposition gracieuse des figure 2 et figure 3 [15].

► caractéristiques en bruit HF : les performances en bruit linéaire HF révèlent également le fort potentiel de la technologie GaN pour développer des amplificateurs faible bruit (LNA : low noise amplifier). Des transistors ont été mesurés avec des facteurs de bruit minimum F_{\min} à 1.02 dB @ 12 GHz (développement de grille $0.25 \times 100 \mu\text{m}^2$) [24]. Une performance remarquable de $F_{\min}=0.98$ dB pour un gain associé de 9 dB à une fréquence de 18 GHz ($F_{\min}=0.6$ dB @ 10 GHz) a été mesurée pour des composants HEMT AlGaIn/GaN sur substrat SiC [25]. La filière TIGER se positionne avantageusement avec des facteurs de bruit minimum $F_{\min}=1.1$ dB @ 10 GHz sur des composants de développement de grille $2 \times 50 \times 0.17 \mu\text{m}^2$, sur substrat Si (pour un gain associé de 12 dB) [26]. D'autres composants TIGER de développements de grille $2 \times 75 \times 0.25$ sur substrat SiC présentent un facteur de bruit $F_{\min}=0.8$ dB et un gain associé $G_a=14$ dB à une fréquence de 8 GHz (figure 4) [27].

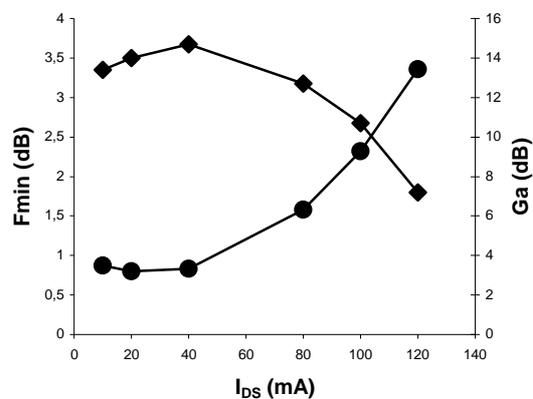


Figure 4 : facteur de bruit minimum et gain associé d'un transistor TIGER $2 \times 75 \times 0.25 \mu\text{m}^2$ en fonction de I_{DS} (@ $V_{DS}=10\text{V}$ et @ 8GHz) [27].

Un contrat national RNRT (ANDRO, terminé en 2007) axé sur la filière TIGER-TRT-IEMN a démontré le potentiel faible bruit des transistors HEMT AlGaIn/GaN d'une filière de puissance : les caractérisations et modélisation du bruit HF ont été réalisées par l'IEMN, et l'étude et la modélisation du bruit BF et du bruit de phase ont été menés par le LAAS. Les principaux résultats de facteurs de bruit publiés (@ 12 GHz) sont recensés par Dambrine sur la figure 5, en fonction du développement de grille. Les deux tendances sur F_{\min} qui se dégagent sont liées à des variantes technologiques qui privilégient le facteur de bruit à la puissance (tendance basse de TRW ou Université d'Illinois @ 41mA/mm). La tendance haute représente des filières de plus forte puissance (TIGER ou Université d'Illinois @ 115mA/mm).

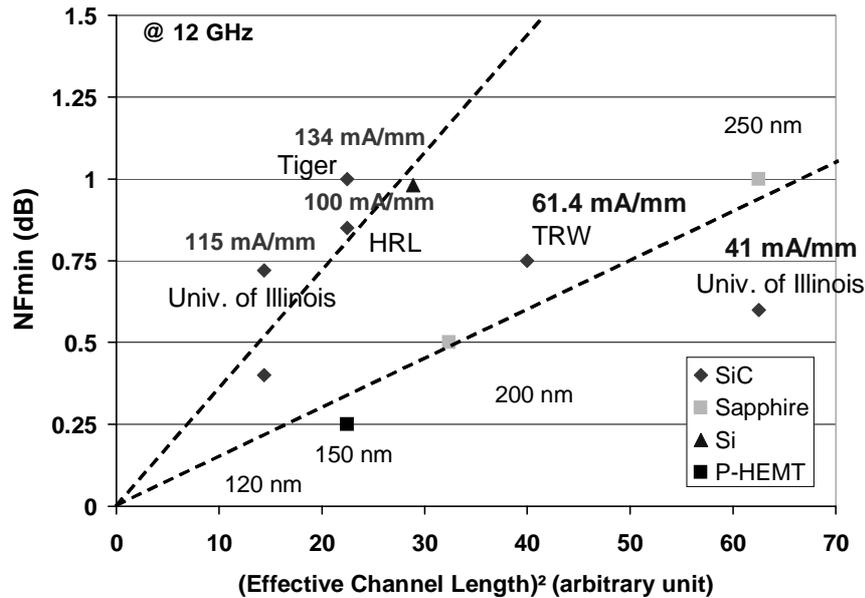


Figure 5 : facteur de bruit minimum F_{\min} en fonction du développement de grille, sur différents substrats d'épitaxie. Remerciements à G. Dambrine (TIGER-IEMN) pour la mise à disposition du graphe.

► caractéristiques en bruit non-linéaire : le bruit basse fréquence (BF) et le bruit de phase résiduel sont des caractéristiques des dispositifs actifs qui permettent d'évaluer le potentiel faible bruit de phase des oscillateurs à haute pureté spectrale. Le bruit BF est également utilisé pour localiser et modéliser les défauts structuraux des transistors HEMT AlGaIn/GaN [28][29]. Les défauts ont été révélés à la fois par des mesures de bruit BF (figure 6) et par des caractérisations SIMS (Secondary Ion Mass Spectroscopy, mesures réalisées par le laboratoire GEMaC-CNRS, Meudon, figure 7) à l'interface AlGaIn/GaN et dans le volume du gaz 2DEG.

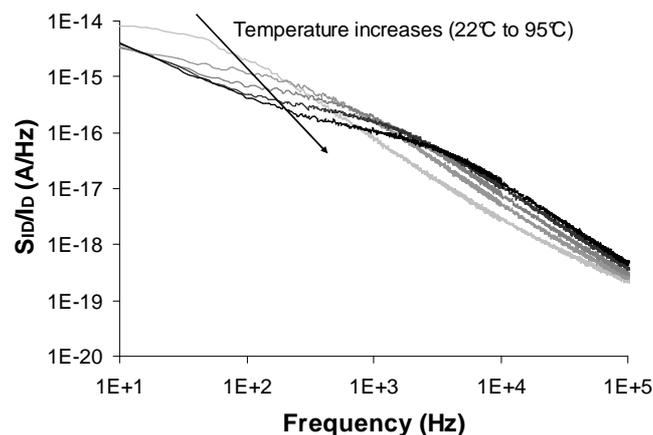


Figure 6 : évolution des spectres de bruit BF avec la température ambiante (HEMT AlGaIn/GaN sur SiC, $2 \times 75 \times 0.25 \mu\text{m}^2$, polarisation $V_{GS}=0$ V, $V_{DS}=6$ V).

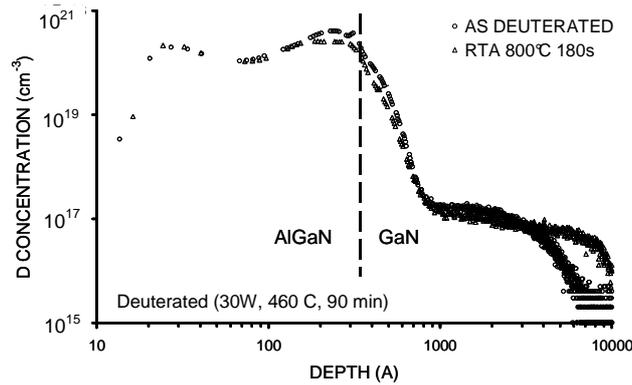


Figure 7 : mesure SIMS de la diffusion du deutérium dans une couche AlGaIn/GaN sous plasma RF (30 W) à haute température (460°C) pendant 90mn. Etude du GEMaC-CNRS, Meudon (remerciements à J. Chevallier, J.Mimila-Arroyo)

Sur la figure 7, le deutérium est utilisé en diffusion comme marqueur afin de révéler la concentration de défauts dans la couche AlGaIn, à l'interface AlGaIn/GaN et dans le gaz 2DEG. La forte concentration en deutérium à l'interface AlGaIn/GaN et dans le volume du 2DEG vient confirmer les analyses de spectres de bruit BF [30]. De plus, les spectres de bruit BF de la figure 6 voient les centres de génération-recombinaison (GR) évoluer avec la température (en régime linéaire et saturé de polarisation). Chaque spectre est constitué de deux centres de GR, donc on peut extraire les énergies d'activation respectivement à 0.38 eV (attribué à un centre donneur $Mg_{Ga}-V_N$ dans le gaz 2DEG) et 0.21 eV (attribué à une lacune d'azote V_N) (figure 8) [30].

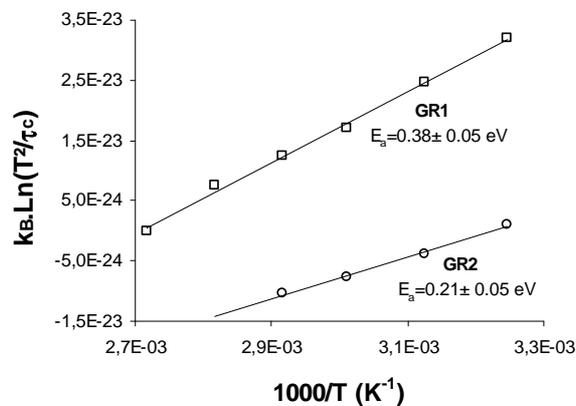


Figure 8 : tracés d'Arrhenius issus des spectres de bruit BF (HEMT AlGaIn/GaN sur SiC, $2 \times 75 \times 0.25 \mu m^2$, polarisation $V_{GS}=0V$, $V_{DS}=6V$).

De plus, des caractérisations en bruit de phase résiduel ont été réalisées et confrontées aux spectres de bruit BF [27]. Nous retrouvons les mêmes sources de bruit (1/f converti, centres GR). Il apparaît également sur la figure 9 que le bruit de phase résiduel s'améliore lorsque le composant est comprimé ($P_{in}=+7dBm$). Ce phénomène peut être mis à profit en vue de l'amélioration du bruit de phase d'un oscillateur, mais peut porter préjudice à la fiabilité du dispositif soumis à des contraintes RF plus importantes.

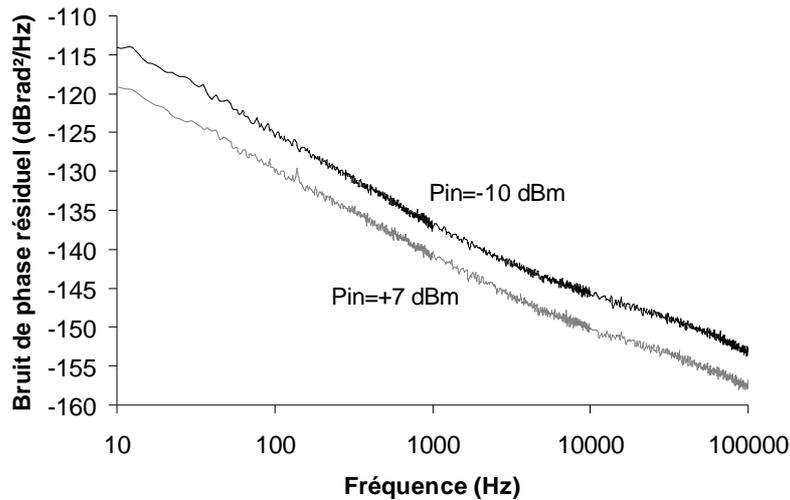


Figure 9 : spectres de bruit de phase résiduel d'un transistor HEMT (AlGaIn/GaN sur SiC, polarisé sous $V_{GS}=-3$ V et $V_{DS}=10$ V, sous contrainte $P_{in}=-10$ dBm et $P_{in}=+7$ dBm à la fréquence de 10 GHz) [27].

Les performances dynamiques et en bruit des transistors HEMT AlGaIn/GaN permettent de proposer des nouvelles architectures de systèmes complexes (Radar, liaisons hertziennes, systèmes opto-électroniques, ...). Les circuits de l'électronique analogique qui présentent le plus d'intérêt sont les amplificateurs (PA : power amplifier, et LNA : low noise amplifier) et les oscillateurs.

II.) LES CIRCUITS GAN

L'amélioration des performances des émetteurs-récepteurs (resp. augmentation de la puissance de sortie P_{out} , réduction du facteur de bruit NF) demeure un enjeu majeur dans la course à l'intégration, en induisant une diminution de la taille des antennes d'émission et de réception.

Les transistors MESFET et HEMT GaN largement évoqués dans la littérature font état des caractéristiques de forte puissance dédiés à la réalisation d'amplificateurs à état solide (solid state power amplifier SSPA), en vue de leur substitution aux traditionnelles solutions d'amplificateurs à tubes à ondes progressives ATOP (travelling wave tube amplifiers TWTA).

Si le nitrure de gallium possède des aptitudes indéniables pour l'amplification de puissance à haute fréquence, ses propriétés faible bruit peuvent également être mises à profit pour concevoir des récepteurs robustes (LNA, low noise amplifier) : il n'est plus nécessaire alors de disposer de limiteur de puissance en entrée du LNA, qui dégrade le facteur de bruit global.

De plus, le faible niveau de bruit basse-fréquence des dispositifs GaN peut favoriser la synthèse de fréquence à faible bruit de phase, tout en bénéficiant de fortes puissances de sortie (élimination des amplificateurs tampons en sortie des oscillateurs HF).

Nous présentons par la suite quelques résultats de circuits amplificateurs et oscillateurs relevés dans la littérature. La plupart des circuits GaN sont encore réalisés en technologie hybride, mais quelques fondeurs proposent des circuits monolithiques MMIC.

► les amplificateurs de puissance (PA) : du fait de la plus grande proximité des impédances de sortie à l'impédance 50Ω , l'adaptation de sortie de transistors à grand développement en technologie AlGaIn/GaN est plus facile que pour les technologies Si et III-V à faible bande interdite. De plus, la forte densité de puissance se traduit par une capacité

parasite plus faible par Watt de puissance de sortie (e_r étant par ailleurs plus faible que pour le silicium ou l'arséniure de gallium). Des amplificateurs MMIC ont été réalisés en technologie coplanaire et microruban (avec trous métallisés). Un amplificateur de puissance MMIC de 11W de puissance de sortie à 34 GHz a été réalisé par [31]. Daimler (Allemagne) a conçu un amplificateur coplanaire MMIC sur substrat SiC de puissance de sortie 3.7 W à 10 GHz, pour un rendement PAE=26% [32]. TNO et IAF ont réalisé un amplificateur monolithique de puissance de sortie 2.6 W à 27 GHz [33], prouvant ainsi le potentiel pour l'amplification de puissance large bande de cette technologie (voir également [34]). La technologie coplanaire ne nécessite pas de phase de process face arrière (trous métallisés et amincissement de plaque). La technologie microruban offre pour sa part de plus grands degrés de liberté sur les connections des sources notamment (contre-réaction série) : cet avantage est contrarié par une évacuation thermique moindre dans le substrat SiC aminci, ce qui pénalise le bilan thermique des dispositifs (élévation de la température de canal et réduction de la fiabilité).

► les amplificateurs faible bruit (LNA) : les premiers résultats de circuits LNA hybrides [35] ou MMIC [36] sont encourageants. Les réalisations MMIC offrent des facteurs de bruit de NF=5 dB en large bande (8-18 GHz, gain petit signal 20 dB [37]) ou encore NF=1.8 dB à 10 GHz (gain linéaire 18 dB [36]) sur une bande plus étroite. Ces amplificateurs GaN devraient à terme permettre d'obtenir une gamme de produits robustes aux agressions électromagnétiques sans l'aide de circuit de protection. Pour cela, les tests de fiabilité et de robustesse sont en cours de réalisation pour tirer le plein potentiel des composants.

► les oscillateurs : les oscillateurs GaN bénéficient d'un faible bruit BF qui se convertit autour de la porteuse, associé à une forte puissance de sortie. La source de fréquence GaN peut donc fournir des niveaux de puissance élevés sans utilisation d'étage tampon. Une telle source peut être appliquée à un mélangeur de fréquence pour améliorer son gain de conversion, ou peut être utilisé comme simple source dans les applications Radar. Les oscillateurs peuvent être à fréquence fixe ou contrôlés en tension (VCO : voltage controlled oscillator). La photographie de la figure 10 représente un oscillateur hybride de puissance de sortie 20 dBm à 10 GHz, possédant un bruit de phase de -105 dBc/Hz à une distance de 100 kHz de la porteuse (figure 11) [38]. Ce résultat se situe à l'état de l'art sur la figure 12.

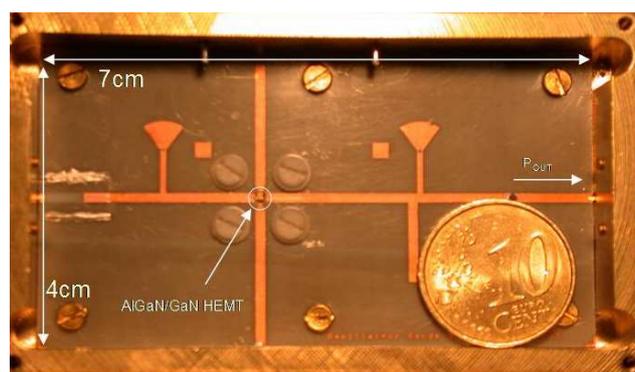


Figure 10 : photographie de l'oscillateur hybride 10 GHz en réflexion, utilisant un transistor TIGER $2 \times 75 \times 0.25 \mu\text{m}^2$ [38].

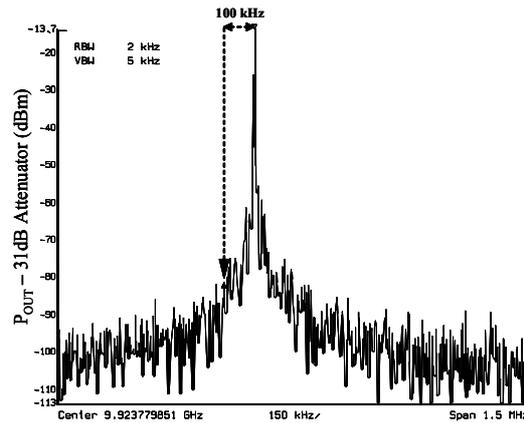


Figure 11 : bruit de phase de l'oscillateur 10 GHz, $L(100 \text{ kHz}) = -105 \text{ dBc/Hz}$ et $P_{\text{out}} = 20 \text{ dBm}$ [38].

Une version 'contrôlée' par tension de grille (MMIC) a été réalisée à 40 GHz (contrôle sur 1 GHz de bande), avec un bruit de phase de -92 dBc/Hz à une distance de 100 kHz de la porteuse [39], offrant une puissance de sortie de 25 dBm (Northrop Grumman sur la figure 12).

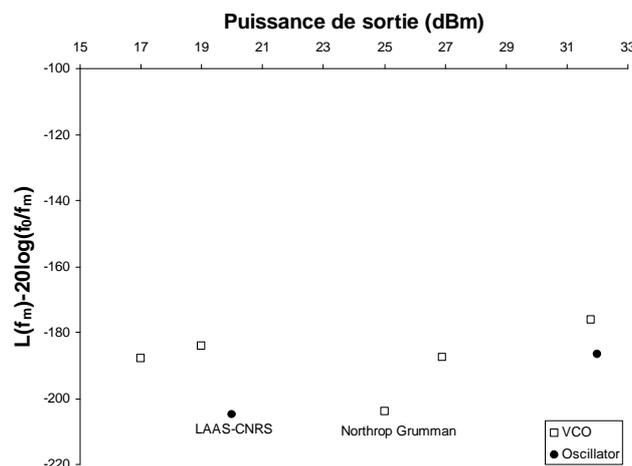


Figure 12 : état de l'art des VCO, selon l'utilisation de la formule de Leeson modifiée $L(f_m) - 20 \log(f_0/f_m)$ (f_0 : fréquence de la porteuse ; f_m : distance à la porteuse).

Les forts niveaux de puissance de sortie associés à des bruit de phase comparables, voire meilleurs que les technologies SiGe ou encore GaAs, permettent d'envisager des applications commerciales et militaires à hautes performances jusqu'en bande millimétrique.

Une qualité intrinsèque du GaN concerne sa robustesse aux forts champs électriques et champs électromagnétiques. La fiabilité des technologies GaN reste un challenge important : des investigations au niveau des matériaux et des dispositifs visent ainsi à améliorer les rendements en puissance sous contrainte thermique élevée, et éviter les défaillances prématurées des systèmes.

III.) LA FIABILITE ET LA ROBUSTESSE

La robustesse des systèmes électriques peut être envisagée sous deux aspects : il est possible de définir des architectures de systèmes de protection pour éviter qu'un composant/circuit ne soit exposé à certaines contraintes (systèmes de protections ESD par exemple). Avec l'avènement des technologies à grande bande interdite, la robustesse devient

une qualité intrinsèque du composant utilisé pour une application électrique. Il en résulte une meilleure intégration et une réduction des coûts par rapport à une approche conventionnelle (objectif de rentabilité : plaquettes de 100mm de diamètre, ou plus). Un des derniers obstacles à franchir pour la commercialisation de masse de la technologie GaN concerne la fiabilité des composants.

De nombreux mécanismes de défaillance ont été répertoriés sur les technologies HEMT : les progrès sur les techniques sur les matériaux (réduction de la densité de défauts des substrats et couches d'épitaxie), sur les techniques de passivation (amélioration des états de surface et réduction des courants de fuite), sur la qualité et la robustesse des contacts de grille et Ohmiques, la conception de dispositifs 'field plate' ou 'recess' de grille (réduction des pics électriques entre grille et drain) sont autant de voies qui permettent d'améliorer la fiabilité des composants. L'amélioration de la fiabilité des transistors HEMT GaN est surtout fortement liée à la réduction ou l'élimination des courants de fuite sous contraintes thermique et électrique élevées (création de défauts qui évoluent avec le temps). Des résultats de durée de vie supérieure au million d'heures ont déjà été publiés [40] pour des composants ($V_{DS}=28$ V), et plus de 10 000 heures pour un amplificateur GaN MMIC (polarisé sous 28 V, à 3dB de compression).

Les études sur la fiabilité font appel à des mesures sur les matériaux (DLTS : Deep Level Transient Spectroscopy ; SIMS : Secondary Ion Mass Spectroscopy), ou des mesures statiques, dynamiques [41] et en bruit BF [42]. Le bruit BF est un révélateur de défauts, et le suivi de l'évolution des sources de bruit peut être un indicateur de défaillance précoce des composants [43].

Enfin, certaines techniques permettent de désactiver les pièges : les défauts de transistors HEMT sur substrat saphir, Si et SiC sont essentiellement localisés à l'interface AlGaIn/GaN et dans le 2DEG sous la grille [44][45]. Une diffusion de Deutérium est appliquée à des structures AlGaIn/GaN avant gravure de la grille. Une moitié de plaquette a subi l'étape de deutération, tandis que l'autre moitié n'a pas été deutérée (procédé standard). Après avoir finalisé les transistors (gravure de la grille, passivation, recuit), des tests de robustesse en température sont réalisés sur les lots de composants deutérés et non-deutérés de la même plaquette (2x8 composants portés à 500°C pendant 20 mn). Le résultat le plus significatif est obtenu sur les spectres de bruit en courant de drain BF (S_{ID}) de la figure 13.a (transistor deutéré) et de la figure 13.b (transistor non-deutéré). Ces composants deutérés voient leur spectre de bruit BF s'améliorer dans un premier temps (T1 : 5mn à 500°C), dû à un déverminage ou à une meilleure diffusion du deutérium (amélioration des états d'interface AlGaIn/GaN). Le spectre n'évolue plus pendant l'application de la contrainte (T2 : 15 mn à 500°C). D'autre part, les composants n'ayant pas subi de deutération à l'interface AlGaIn/GaN (et gaz 2DEG) bénéficient également pour certains de l'effet de déverminage dans un premier temps (T1), puis le spectre se dégrade fortement dans la seconde phase (T2), avec l'apparition quasi-systématique de centres de génération-recombinaison vraisemblablement liés au piège activé à l'interface AlGaIn/GaN [30]. La deutération est une piste d'investigation intéressante en vue de l'amélioration de la fiabilité des transistors fonctionnant sous forte contrainte thermique. D'autres expériences sont en cours pour explorer les effets du deutérium sur les caractéristiques statiques, dynamiques et en bruit des matériaux et des composants.

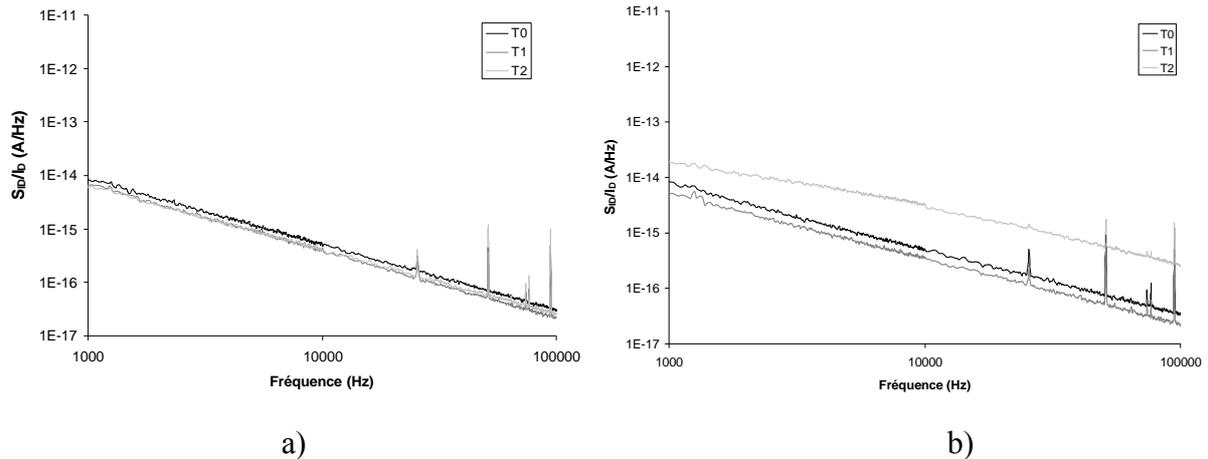


Figure 13 : robustesse des transistors HEMT AlGaIn/GaN $2 \times 75 \times 0.25 \mu\text{m}^2$: évolution des spectres de bruit BF en courant de drain S_{ID} de transistors soumis à une deutération du canal 2DEG a), et non soumis à une deutération du canal 2DEG b)

Des tests de robustesse ont également été réalisés sur des circuits amplificateurs (PA MMIC, plus de 10 000 heures sans défaillance), ou encore oscillateur [46]. Sur la figure 14, nous remarquons l'excellente tenue des caractéristiques dynamiques ($P_{\text{out}}=20$ dBm) de l'oscillateur à 10 GHz de la figure 10 pendant les 500 heures de fonctionnement ($P_{\text{in}}=14$ dBm sur la grille). Cependant, le bruit de phase de l'oscillateur se dégrade de 15 dB dans les 100 premières heures de fonctionnement. Des études sur des composants soumis à des contraintes DC et RF sont en cours pour identifier le mécanisme responsable de cette dégradation du bruit de phase.

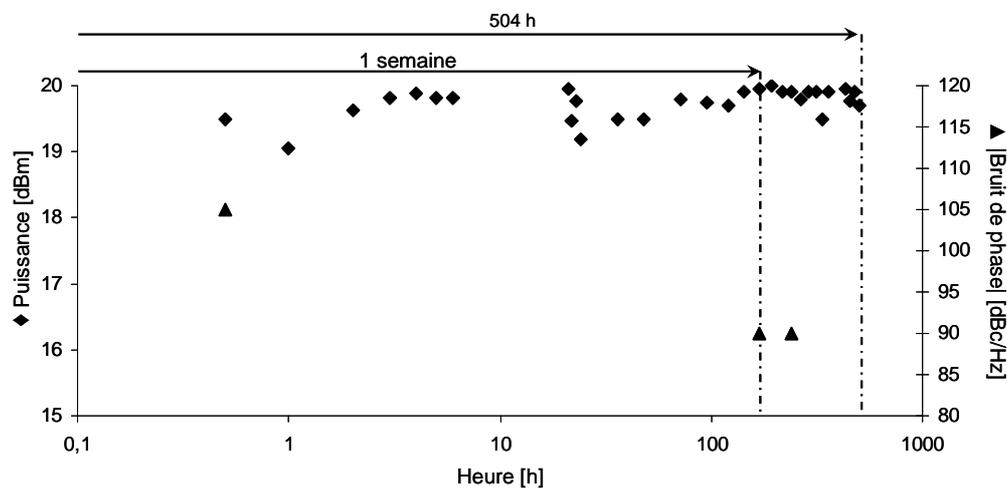


Figure 14 : test d'endurance d'un oscillateur en bande X (cf. Oscillateur de la figure 10) [46].

CONCLUSIONS

Les technologies à grande bande interdite, et notamment la technologie GaN, introduisent de nouvelles potentialités dans le paysage de l'électronique de puissance et des hyperfréquences grâce à des qualités intrinsèques largement supérieures aux technologies silicium et III-V conventionnelles. L'évolution rapide de cette technologie sur la dernière décennie est due aux progrès considérables réalisés sur les techniques de croissance, les améliorations des matériaux, les conceptions de nouvelles architectures de composants et

également les conceptions de circuits MMIC. La technologie GaN possède des atouts indéniables pour des applications de forte puissance, à fréquence élevée, mais également pour les applications faible bruit linéaire et non-linéaire. Les transferts de laboratoires de recherche vers les fondeurs commerciaux sont d'ores et déjà engagés, mais le marché du GaN ne dévoilera son véritable potentiel que lorsque les coûts de production seront réduits (i.e. production de plaquettes de diamètre large, supérieur à 100mm), et lorsque la technologie sera parfaitement fiabilisée pour des applications à forte puissance et haute température. La filière GaN deviendra alors un acteur majeur de l'électronique en offrant de nouvelles solutions, et en révolutionnant les architectures traditionnelles.

REFERENCES :

- [1] M. Sugimoto et al., 'Wide-bandgap semiconductor devices for automotive applications', *International Journal of High Speed Electronics and Systems*, Vol. 17, No. 1 (2007) pp.3-9.
- [2] G. Fisher, 'Next-generation base station radio frequency architecture', *Bell Labs technical journal* 12 (2), 3-18 (2007), pp. 3-18.
- [3] B.S. Shelton et al., 'AlGaIn/GaN heterojunction bipolar transistor grown by metal organic chemical vapour deposition', *Electronics Letters*, 6th january 2000, Vol. 36, No.1, pp. 80-81.
- [4] L.S McCarthy et al., 'GaIn HBT : toward an RF device', *IEEE Transaction on Electron Devices*, Vol. 48, No. 3, March 2001, pp. 543-551.
- [5] J.T. Torvik et al., 'GaIn/SiC heterojunction bipolar transistors', *Solid-State Electronics* 44 (2000), pp. 1229-1233.
- [6] K.J. Roe et al., 'Silicon carbide and silicon carbide:germanium heterostructure bipolar transistors', *Applied Physics Letters*, Vol. 78, No. 14, 2 april 2001, pp. 2073-2075.
- [7] Y. Cordier et al., 'Filière HEMT AlGaIn/GaN sur silicium', *Journées Nationales Microélectronique et Optoélectronique*, Aussois 4-7 avril 2006.
- [8] H. Ueda et al., 'Wide-bandgap semiconductor devices for automotive applications', *CS MANTECH Conference*, April 24-27, 2006, Vancouver, Canada, pp. 37-40.
- [9] B. Ozpineci et al., 'Comparison of wide-bandgap semiconductors for power electronic applications', *Oak Ridge National Laboratory ORNL/TM-2003/257*, 26 pages.
- [10] T. Hussain et al., 'GaIn HFET digital circuit technology for harsh environments', *Electronics Letters*, 27th novemver 2003, Vol. 39, No. 24.
- [11] http://www.cree.com/products/sic_sub_prop.asp
- [12] <http://www.nitronex.com/ganoverview.html>
- [13] <http://www.rfmd.com/GalliumNitride.asp>
- [14] Y. Inoue et al., 'Degradation-mode analysis for highly reliable GaIn-HEMT', *IEEE MTT Symposium*, 2007, pp. 639-642.
- [15] D. Théron et al., 'Recent developments and trends in GaIn HFETs', *12th GAAS Symposium*, Amsterdam, The Netherlands, 2004, pp. 547-550.
- [16] G. Gauthier et al., 'KORRIGAN : development of GaIn HEMT technology in Europe', *CS MANTECH Conference*, April 24-27, 2006, Vancouver, Canada, pp. 49-51.
- [17] J. Moon et al., 'Deep submicron gate-recessed and field plated AlGaIn/GaN HFET for millimeter applications', *proceedings MRS fall meeting*, December 2004, Vol. E6-1, p.119.
- [18] V. Tilak et al., 'Influence of barrier thickness on the high-power performance of AlGaIn/GaN HEMTs', *IEEE Electron Device Letters*, Vol. 22, No. 11, November 2001, pp. 504-506.

- [19] W. Saito et al., 'High breakdown voltage AlGaIn/GaN-GaN power HEMT design and high current density switching behavior', IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 50, No. 12, december 2003, pp. 2528-2531.
- [20] Y. Nanishi et al., 'Development of AlGaIn/GaN high power and high frequency HFETs under NEDO's Japanese National Project', CS MANTECH Conference, April 24-27, 2006, Vancouver, Canada, pp. 45-48.
- [21] M. Werquin et al., 'High power and linearity performances of gallium nitride HEMT devices on sapphire substrate', Electronics Letters, 6th january 2005, Vol. 41, No.1, 2p.
- [22] A. Minko et al., 'AlGaIn/GaN-GaN HEMTs on Si with power density performance of 1.9 W/mm at 10 GHz', IEEE Electron Device Letters, Vol. 25, No. 7, July 2004, pp. 453-455.
- [23] K.K. Chu et al., '9.4 W/mm power density AlGaIn/GaN-GaN HEMTs on free-standing GaN substrates', IEEE Electron Device Letters, Vol. 25, No. 9, September 2004, pp. 596-598.
- [24] W. Lu et al., 'DC, RF, and microwave noise performance of AlGaIn-GaN field effect transistors dependence of aluminium concentration', IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 50, No. 4, April 2003, pp. 1069-1074.
- [25] J.W. Lee et al., 'Microwave noise characteristics of AlGaIn/GaN HEMTs on SiC substrates for broad-band low-noise amplifiers', IEEE Microwave and Wireless Components Letters, Vol. 14, No. 6, June 2004, pp. 259-261.
- [26] A. Minko et al., 'High microwave and noise performance of 0.17 μm AlGaIn-GaN HEMTs on high-resistivity silicon substrates', IEEE Electron Device Letters, Vol. 25, No. 4, April 2004, pp. 167-169.
- [27] J.G. Tartarin et al., 'Low Frequency and linear high frequency noise performances of AlGaIn/GaN HEMTs grown on SiC substrate', 13th GAAS Symposium, Paris, 2005, pp. 277-280.
- [28] J.G. Tartarin et al., 'Low frequency noise of AlGaIn/GaN HEMT grown on Al₂O₃, Si and SiC substrates', 18th International Conference on Noise and Fluctuations (ICNF'2005), Salamanca (Spain), 19-23 September 2005, AIP Conference Proceedings 780, ISBN 0-7354-0267-1, pp. 299-302.
- [29] M. Fakir et al., 'Characterization and analysis of trap-related effects in AlGaIn-GaN HEMTs', Microelectronics reliability 47 (2007), Elsevier, pp. 1639-1642.
- [30] J.G. Tartarin et al., 'Generation-recombination defects in AlGaIn/GaN HEMT on SiC substrate, evidenced by low-frequency noise measurements and SIMS characterization', 19th International Conference on Noise and Fluctuations (ICNF'2007), Tokyo (Japan), 9-14 September 2007, AIP Conference Proceedings 922, pp. 163-166.
- [31] D.C. Streit et al., 'The future of compound semiconductors for aerospace and defense applications', Compound semiconductor Integrated Circuit Symposium CSIC405, October 2005, 4p.
- [32] R. Behtash et al., 'MMIC power amplifier based on AlGaIn/GaN HEMTs at 10 GHz', Electronics Letters, Vol. 40, No. 9, pp. 564-565.
- [33] M. Van Heijningen et al., 'Design and analysis of a 34 dBm Ka-band GaN high power amplifier', Proc. of the 1st European Microwave Integrated Circuits Conference, September 2006, Manchester (U.K), pp. 75-78.
- [34] P. Shuh et al., 'Linear broadband GaN MMICs for Ku-band applications', IEEE MTT symposium 2006, San-Francisco (U.S.A), pp. 1324-1326.
- [35] T. Quach et al., 'Low noise – high power GaN HEMT technology for mixed mode applications', GAAS MANTECH, proceedings 2004, 4p.
- [36] D. Krausse et al., 'Robust GaN HEMT low-noise amplifier MMICs for X-band applications', 12th GAAS Symposium, Amsterdam (the Netherlands), pp. 71-74.
- [37] S. Seo et al., 'A wideband balanced AlGaIn/GaN HEMT MMIC low noise amplifier for transceiver front-ends', 13th GAAS Symposium, Paris, 2005, pp. 225-228.

- [38] G. Soubercaze-Pun et al., 'Design of X-band GaN oscillator: from the low frequency noise device characterization and large signal modeling to circuit design', IEEE MTT Symposium 2006, San Francisco (U.S.A), pp.747-750.
- [39] X. Lan et al., 'A Q-band low phase noise monolithic AlGaIn/GaN HEMT VCO', IEEE Microwave and Wireless Components Letters, Vol. 16, No. 7, July 2006, pp. 425-427.
- [40] 'High power developments emphasize semiconductor materials', High Frequency Electronics, August 2007, pp. 30-32.
- [41] D.C. Dumka et al., 'RF reliability performance of AlGaIn/GaN HEMT on Si substrate at 10 GHz', Electronics Letters, 25th November 2004, Vol. 40, No. 24, 2p.
- [42] D. Pavlidis et al., 'AlGaIn/GaN high electron mobility transistor (HEMT) reliability', 13th GAAS symposium, Paris, 2005, pp. 265-268.
- [43] A. Sozza et al., 'Evidence of traps creation in GaN/AlGaIn/GaN HEMTs after a 3000 hour on-state and off-state hot-electron stress', Electron Devices Meeting IEDM 2005, technical digest, 4p.
- [44] J.G. Tartarin et al., 'Using low frequency noise characterization of AlGaIn/GaN HEMT as a tool for technology assessment and failure prediction', Fluctuation And Noise, Las Palmas, Spain, May 2004, Noise in Devices and Circuits II, proceedings of SPIE, Vol. 5470, ISBN 0-8194-5396-X, pp.296-306.
- [45] L. Bary et al., 'Low frequency noise behaviour in GaN HEMT's on silicon substrate', Fluctuation And Noise, Las Palmas, Spain, May 2004, Noise in Devices and Circuits II, proceedings of SPIE, Vol. 5470, ISBN 0-8194-5396-X, pp.286-295.
- [46] G. Soubercaze-Pun, 'De l'Etude en Bruit Basse Fréquence à la Conception d'un Oscillateur en Bande-X à partir de transistors AlGaIn/GaN HEMT', thèse des Universités de Toulouse, Université Paul Sabatier et LAAS-CNRS, soutenue le 26 janvier 2007.