

# **Fiabilité de transistors industriels HEMTs de puissance basés sur la technologie AlGaN/GaN**

Ing. J. Bartholomeus  
ECAM - Bruxelles

*Cet article fait l'étude de la fiabilité de transistors industriels HEMTs basés sur la technologie AlGaN/GaN. Afin d'évaluer cette fiabilité, une analyse des pièges au sein du transistor a été effectuée. Le premier test, en double Pulsed IV, permet de déterminer la présence de ces pièges. Le second, en courant transitoire, d'en établir les caractéristiques. Les tests ont été effectués sur des transistors GIT produits par GaN System.*

*Mots-clefs: Gallium nitride (GaN), High Electron Mobility Transistor (HEMT)*

*This article investigates the reliability of GaN-based high-electron mobility transistors (HEMTs) designed by semiconductor industry. To evaluate this reliability, traps tests were performed in double pulse IV and current transient. The first one detects the presence of the traps, the second evaluates their characteristics. The tests were done on GIT devices produced by GaN System.*

*Keywords: Gallium nitride (GaN), High Electron Mobility Transistor (HEMT)*

## 1. Introduction

Durant les dernières décennies, le marché a demandé une constante amélioration des dispositifs électroniques. Ces derniers se doivent d'être toujours plus rapides, plus performants et plus économes en termes de consommation d'énergie. Depuis les panneaux solaires jusqu'aux téléphones portables et en passant par les voitures électriques, aucun de nos outils n'échappe à cette tendance. Afin d'en assurer la qualité, il est primordial de faire des tests de fiabilité sur ces dispositifs. Ces tests permettant également de déterminer où se situent les points à améliorer afin d'obtenir des appareils de plus en plus optimisés.

Quels pourraient être les bénéfices de telles démarches ? Prenons le cas d'un transistor de puissance assurant le transfert d'énergie depuis la batterie vers le moteur d'une voiture électrique. Si ce transistor commutait plus rapidement et/ou possédait une résistance interne plus petite, alors il dissiperait moins de chaleur. Par conséquent, le système de refroidissement nécessaire pourrait être plus restreint, ce qui diminuerait ainsi la masse totale de la voiture et donc, la quantité d'énergie pour la déplacer. Au final, le véhicule disposerait ainsi d'une plus grande autonomie, d'où l'intérêt d'améliorer ces technologies.

Afin de répondre aux critères en termes de hautes fréquences et de hautes puissances, la recherche de nouveaux matériaux s'est avérée nécessaire à cause des limites atteintes par les dispositifs à base de silicium. Les qualités intrinsèques et les charges fixes induites par dopage en font des candidats peu performants pour des applications en hautes puissances et fréquences. Les travaux effectués au cours des dernières années ont permis l'élaboration de nouveaux transistors afin d'arriver finalement aux transistors HEMTs (High Electron Mobility Transistors), d'abord à base d'Arséniure de Gallium (GaAs) et ensuite à base de Nitrure de Gallium (GaN). Ceux-ci sont à présent suffisamment performants pour être utilisés dans des applications de puissance. Votre téléphone et votre ordinateur en comportent probablement déjà.

Cependant, malgré tous les avantages promis par la technologie au Nitrure de Gallium, celle-ci possède aussi ses propres limites. Cet article présente quelques exemples de phénomènes restreignant les performances des transistors HEMTs à base de GaN.

## 2. Propriétés du nitrure de Gallium

Comme le montre la Figure 1, l'intérêt du GaN réside dans ses qualités intrinsèques supérieures par rapport à d'autres semi-conducteurs. Le GaN est un matériau avec un fort espacement entre sa bande conductrice et sa bande de valence ; dit '*band gap*'. Ce band gap permet de travailler à haute température, d'avoir une tension de claquage ainsi qu'une densité de porteurs élevée et permet également de fournir une résistance au rayonnement alpha. Une tension de claquage élevée permet la miniaturisation des composants tandis que la résistance au rayonnement alpha en fait un matériau de choix pour les applications spatiales. Le GaN possède également une très bonne conductivité thermique lui permettant de dissiper la chaleur et d'éviter ainsi l'auto-échauffement. Il présente aussi de bonnes caractéristiques en termes de mobilité et de vitesse de saturation des porteurs [1]. La structure du cristal de GaN la plus utilisée est la structure hexagonale dite '*Wurzite*'. Ce cristal, selon l'axe d'orientation avec lequel il a grandi, présente une polarisation spontanée et piézoélectrique. L'effet de ces polarisations est la présence de charges à la surface du cristal. Le choix des charges présentes d'un côté et de l'autre du cristal dépend de la polarisation. Le cristal peut également être dopé négativement avec du silicium, germanium ou oxygène jusqu'à  $10^{19} \text{cm}^{-3}$  positivement avec du magnésium jusqu'à un taux de concentration de  $10^{18} \text{cm}^{-3}$ . Le dopage positif est cependant très difficile et nécessite une 'activation' des atomes de magnésium, ceux-ci formant des liaisons avec l'hydrogène à l'intérieur du cristal. [2].

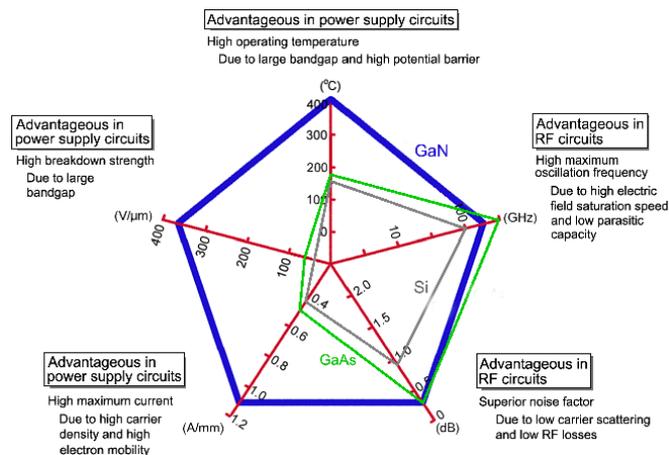


Figure 1 : Avantages du GaN par rapport à d'autres semi-conducteurs

## 3. Hétérostructure et Transistors HEMTs AlGaIn/GaN

Lors de la mise en conduction de transistors traditionnels au silicium, les charges fixes, issues des dopages, induisent des interactions de Coulomb avec les porteurs

majoritaires et en réduisent la mobilité. Cependant, le dopage est nécessaire afin de créer les porteurs libres.

Dans le cas des transistors HEMTs, la structure principale est formée par la jonction de deux couches, appelée hétérojonction. Le principe est le suivant : une couche assure la densité des porteurs libres tandis que l'autre leur permet de circuler sans entraver leur mobilité. La juxtaposition de deux matériaux présentant un band gap et des propriétés différentes 'plie' les bandes d'énergie au niveau de la jonction et forme un puit de potentiel. Ce puit de potentiel permet aux électrons d'y circuler dans deux directions, tel un canal. On appelle ce canal 2-deg pour 'Two Dimensional Electron Gaz'. [3].

Afin de limiter les dislocations et les défauts, il est nécessaire d'employer des matériaux avec des propriétés similaires. Dans le cas des transistors HEMTs à base de GaN, on utilise une hétérojonction formée par une couche combinant un alliage d'aluminium et de GaN (AlGaN) et une couche de GaN. L'hétérojonction ainsi formée est dite jonction AlGaN/GaN. Il existe d'autres types d'hétérojonctions, comme GaAsP/GaAs ou encore AlGaAs/GaAs. [3].

Suite à l'ajout d'aluminium, l'alliage AlGaN possède un paramètre de maille différent du cristal de GaN pure. Placé sur une couche GaN suffisamment grande, il se retrouve contraint en tension tandis que la couche GaN peut être considérée comme relaxée. Cette contrainte augmente la polarisation piézoélectrique et par conséquent, la densité de charge présente à la jonction des deux couches. Durant la jonction, les niveaux de Fermi des deux matériaux s'alignent. [2].

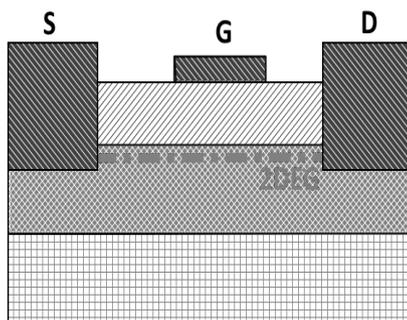


Figure 2 : couches basiques d'un transistor AlGaN/GaN.

Ce phénomène, couplé à la présence des charges fixes et des différents band gap induit la formation d'un canal bidimensionnel dans la couche GaN.

Pour réaliser cette hétérojonction, on procède par épitaxie en faisant grandir les cristaux sur un substrat (□□). La difficulté technique et le coût de la procédure ne permettent pas d'avoir des substrats en nitrure de gallium suffisamment grands et suffisamment abordables pour envisager une production industrielle. On utilise à la place des substrats tels que le saphir ou encore le silicium. [4].

Le choix du substrat dépend entre autres du coût, de la conductivité thermique du matériau et de son paramètre de maille. Une fois l'hétérojonction construite (AlGaN : ▨▨ ; GaN : ▩▩) sur substrat, en rajoutant des contacts ohmiques (▨▨▨)

pour le drain et la source et un contact Schottky pour la grille, nous obtenons un transistor HEMT comme montré à la Figure 2.

Le transistor ainsi formé est théoriquement fonctionnel mais présente la particularité d'être naturellement passant.

#### **4. Pièges dans les transistors HEMTs AlGaIn/GaN**

Les pièges sont un des effets parasites que l'on peut rencontrer avec les transistors HEMTs AlGaIn/GaN. Ils sont capables à la fois d'émettre des électrons et d'en capturer. Ces pièges sont dus à la présence d'impuretés dans les matériaux, des dislocations, des défauts dans les cristaux, des états de surface, etc. [3] [4].

Les pièges créent des états énergétiques dans la bande interdite du matériau et augmentent le taux de recombinaison électrons-trous ou sont occupés par des électrons durant un laps de temps dépendant de la nature du piège. L'activation de ces pièges se fait par un apport thermique, lumineux électrique ou autre. Ils sont classés en deux catégories, les donneurs et les accepteurs. Les donneurs, positivement ionisés, émettent un trou ou capturent un électron afin de retourner à un état neutre. Ils peuvent ensuite retourner à un état ionisé. Les accepteurs, négativement ionisés, en font de même avec les trous. [3].

On distingue les pièges encore en deux catégories, les pièges de surface et les pièges de substrat. Les pièges de surface sont responsables de l'effet appelé 'grille virtuelle' correspondant au gate-lag. Les pièges de substrat sont eux responsables du drain-lag. L'effet des pièges est la baisse de performance. Ils peuvent être en partie responsables de l'effondrement du courant et avoir un impact significatif sur l'augmentation de la résistance du transistor en régime linéaire. [3] [4].

En plus des pièges, on retrouve aussi l'effet de la température sur la mobilité, la vitesse de saturation et la densité des porteurs ou encore d'autres phénomènes tels que la distance grille-canal et les éléments passifs comme les capacités et inductances. Ces éléments parasites contribuent eux aussi à la perte de performances du transistor. [4]. Afin de les limiter, les industriels ont incorporé au transistor de base des couches supplémentaires comme montré à la Figure 3.

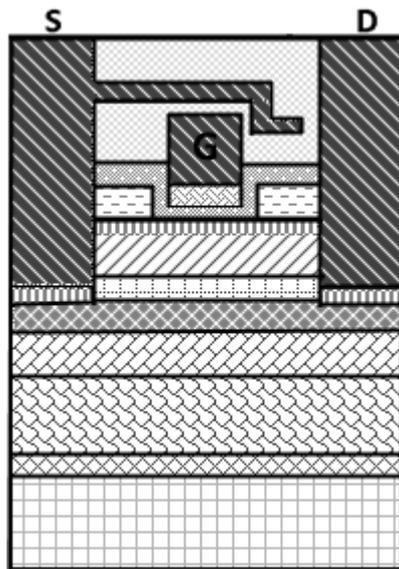


Figure 3 : Couches communément rencontrées dans un HEMT AlGaIn/GaN

De bas en haut :

- (▣) Le substrat.
- (⊗) La couche de nucléation, cette couche permet de réduire les défauts issus de la différence de maille entre le substrat et la couche GaN. Un exemple de couche de nucléation est une alternance de couches AlN et GaN.
- (⊗) La couche de GaN 'Buffer' dopée. Elle permet de réduire les courants de fuite à travers le substrat.
- (⊗) La couche AlGaIn back-barrière, alternative à la couche précédente.
- (⊗) La couche GaN précédemment décrite.
- (⊗) La couche espaceur, réduisant l'effet de Coulomb entre les charges fixe de la couche AlGaIn et les électrons du canal 2-deg.
- (//) La couche AlGaIn précédemment décrite elle aussi.
- (■) Les couches 'CAP'. Ces couches améliorent les contacts ohmiques et le contact Schottky.

(- -) La couche de passivation, réduisant les effets des pièges de surfaces. Elle permet également de modifier les lignes de champs électriques et par conséquent, la tension de claquage. Elle modifie aussi la densité des porteurs dans le canal de par son effet sur la tension exercée sur la couche AlGaIn.

(⊗) La couche de passivation de grille, a le même effet que la précédente si ce n'est qu'elle se rencontre aussi sous la grille. Elle augmente la tension de seuil du transistor et peut être utilisée pour créer/améliorer un transistor naturellement bloqué.

(⊗) La couche P-GaN généralement utilisée pour obtenir lesdits transistors naturellement bloqués.

(⊗) La couche d'isolation, semblable à la couche de passivation.

(⊗) Connecté à la source, au-dessus de la grille, les barrettes de champs. Les barrettes permettent de réduire les pics des champs électriques autour de la grille.

[3].

## 5. Détection et caractérisation des pièges dans les transistors HEMTs AlGaIn/GaN

### 5.1 Détection des pièges par mesure en double impulsif



Figure 4 : Série GS66508P

L'objectif de cette mesure consiste à mesurer le comportement du transistor dans un régime dynamique. Le transistor se retrouve plusieurs fois à l'état passant et à l'état bloqué. Durant la période où le transistor est bloqué, on applique une tension entre le drain et la source afin d'activer les pièges. Une fois ceux-ci activés, on mesure le comportement du transistor en conduction.

Une variation dans les résultats permet de déterminer la présence de pièges dans le transistor ainsi que l'amplitude de leur impact sur le courant.

Pour ces mesures, un transistor en provenance de GaN System des séries GS66508P représenté à la Figure 4 a été testé.

Les mesures ont été effectuées à l'aide de l'appareil de test 'MC<sup>2</sup>' de MC2 Technologies. Le transistor a été monté sur un PCB afin de faciliter les mesures et a ensuite été fixé sur un Peltier. Le contact avec le Peltier est assuré par une fine feuille de carbone afin d'obtenir une répartition homogène de la température. Les paramètres, des multiples de 10ns, encodés pour le type d'impulsion sont pour la grille de 10000, 20000 et 2000000. Ces valeurs correspondent respectivement au retard, au temps et à la période d'impulsion. Pour le drain, dans le même ordre, 5000, 30000 et 2000000. Pour les mesures prises durant les impulsions, 100 et 2 pour le pas et la moyenne. 500 et 1.500 pour le début et la fin de la mesure de la tension en mode bloquant. 25000 et 27000 pour le début et fin de la mesure instantanée.

La tension d'off-state appliquée est pour la grille de 0V. Pour le drain, elle va de 0V à 300V par pas de 100V puis de 300V à 550V par pas de 50V. La dernière mesure est effectuée à 595V étant donné que le dispositif a pour limite 600V, 5A et 3300W de sécurité. Les températures appliquées vont de 30°C à 90°C par pas de 10°C.

Pour la mise du transistor en mode passant, le drain est fixé à 1V tandis que la tension de grille varie de 0V à 7V par pas de 0,2V. Le transistor est également protégé et se voit limité à une puissance de 40W, un courant de grille entre 80mA et -80mA et un courant de drain entre -500mA et 10000mA.

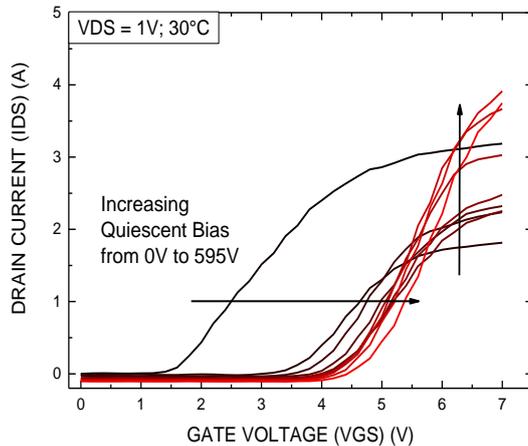


Figure 5 : Test en 'IDVG'

de seuil à 0V. Il apparait très clairement que la tension de seuil est plus sensible à la tension qu'à la température. Quelle que soit la valeur de cette dernière durant les tests, on observe un comportement semblable pour toutes les courbes. Une distinction est à faire pour les courbes au-delà de 60°C et de 450V où un effet combiné de la température et de la tension induit une variation d'autant plus grande de la tension de seuil.

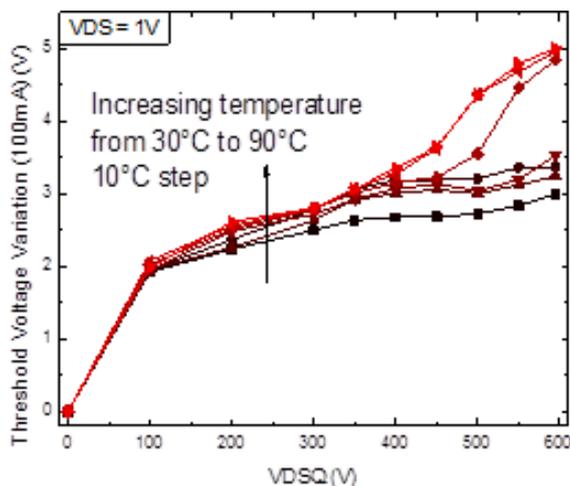


Figure 6: Variation de la tension de seuil du transistor de la série GS66508P

A la Figure 5, le test à 30°C montre que la tension de seuil subit un déplacement en lien avec la tension VDS appliquée. Pour une valeur de 0V à 100V, celle-ci se déplace de 2V. La pente de la courbe en IDVG, c'est-à-dire la transconductance, augmente avec la tension VDS en mode bloqué.

La Figure 6 reprend la variation de la tension de seuil à différentes températures et pour différentes tensions VDS appliquées en mode bloquant. Les variations sont indiquées par rapport à la tension

L'effet des pièges a ainsi eu un impact sur plusieurs caractéristiques du transistor. Une variation de la tension de seuil et de la transconductance implique la présence de ceux-ci sous la grille, mais aussi dans la région entre la grille et le drain ainsi qu'entre la grille et la source.

En conclusion, la présence des pièges dans le transistor a clairement été démontrée au travers des différents résultats.

L'objectif du prochain test sera de déterminer les caractéristiques des pièges au moyen de l'analyse du courant transitoire.

## 5.2 Caractérisation des pièges par mesure du courant transitoire.

Le principe de la mesure du courant transitoire consiste à échantillonner dans un délai spécifique les variations de courant d'un dispositif sous tension. Pour la mesure des pièges, celle-ci peut être effectuée en mettant sous tension et à différentes températures la grille ou le drain selon les pièges à caractériser. Il est également possible de polariser le substrat, afin de mettre en évidence les pièges de substrat. Les mesures peuvent aussi être effectuées sans mise sous tension, permettant de mesurer la désactivation des pièges.

Une fois les échantillons collectés, des fonctions exponentielles peuvent être utilisées pour en établir les courbes approximatives selon la formule (1) [5].

$$I_{DS}(t) = I_{DS,\infty} - \sum A_i e^{-\left(\frac{\tau_i}{t}\right)^{\beta_i}} \quad (1)$$

Avec  $I_{DS}(t)$ , le courant transitoire;  $I_{DS,\infty}$ , le courant final ou initial selon la référence utilisée;  $A_i$ , le coefficient;  $\tau_i$ , la constante de temps;  $t$ , le temps et  $\beta_i$ , le degré. Les minima et maxima de ces fonctions représentent un piège capturant ou libérant des électrons. A des températures différentes, ces phénomènes apparaissent plus ou moins rapidement avec la même constante de temps. Ces constantes de temps permettent de définir les énergies d'activations  $E_a$  selon l'équation (2).

$$\ln(\tau * t^2) = E_a * \frac{q}{kt} + \ln\left(\frac{1}{\gamma + \sigma_{\infty}}\right) \quad (2)$$

où  $k$  est la constante de Boltzmann. Le terme logarithmique est inversement proportionnel à la densité des pièges, la vitesse thermique et la section efficace.

Le résultat final est l'obtention des niveaux d'énergie de différents pièges, capturant et libérant des électrons selon certaines constantes de temps. Ces pièges peuvent ensuite être représentés à la Figure 7.

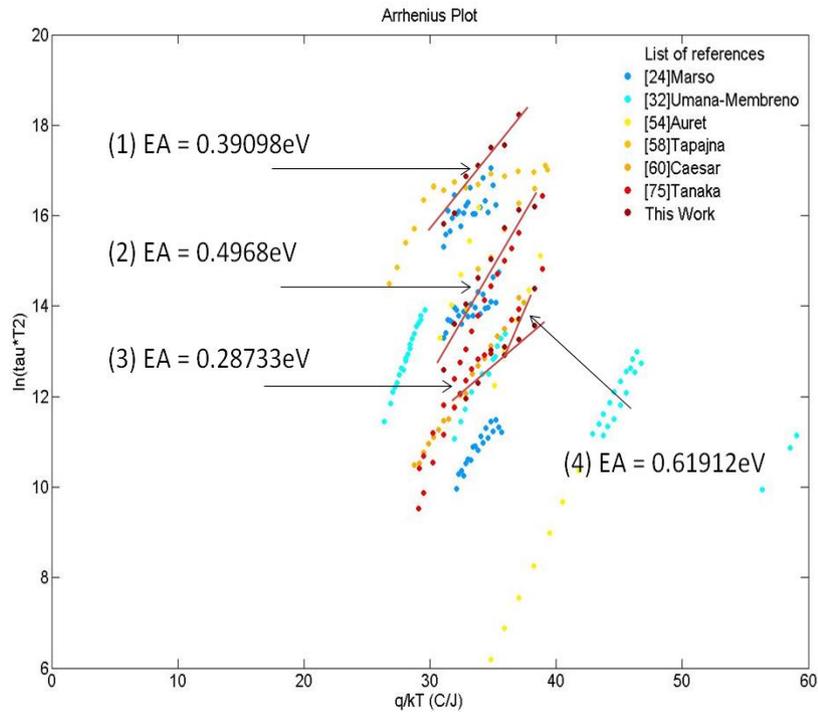


Figure 7: Comparaison des énergies d'activation des pièges avec d'autres travaux

Une comparaison avec les travaux réalisés par différents chercheurs sur le sujet permet de trouver des corrélations avec les pièges obtenus au travers des mesures. Cette comparaison a permis de mettre en évidence que les pièges présentaient des similitudes avec ceux de Tanaka [6], Tapajna [7], Umana-Membreno [8] et Marso [9]. Ainsi, les pièges présents dans le transistor peuvent être situés profondément entre la grille et le drain ou juste à côté d'eux. Les résultats permettent également de supposer que les pièges ne sont pas présents en surface. Les pièges peuvent être l'interaction des électrons avec les défauts de cristal et/ou les impuretés présentes.

En conclusion, des pièges se situent sous le canal et dans les couches profondes du transistor.

## 6. Conséquence de la translation de seuil sur les systèmes électroniques

Au vu des résultats précédents, il paraît légitime de se poser la question de la fiabilité de tels transistors. L'impossibilité du transistor à conserver une tension de seuil fixe aussi bien en température qu'en tension oblige les concepteurs à se demander s'il est bien judicieux d'utiliser de tels composants dans des circuits électroniques de puissance. Ces circuits étant soumis à de fortes variations de tensions et à de fortes puissances, les effets de translations, pour ne citer qu'eux, seront irrémédiablement présents. En prenant l'exemple d'un transistor employé dans un convertisseur de puissance DC/DC dans une voiture électrique, il serait dommage pour le conducteur de ne plus pouvoir commander son moteur correctement dès que celui-ci demande une tension supérieure à 100V...

Cependant, il aurait été dommage à ce niveau de renoncer à une telle technologie ; c'est pourquoi des solutions simples ont été implémentées afin de pallier les divers défauts des GaN. La tension de seuil n'étant pas soumise à une translation constante, cette dernière apparaît comme ne dépassant jamais les 6V dans les résultats (voir figure). Ainsi, le transistor étant commandé par sa grille, une tension de commande de 6V ou plus est suffisante pour ne pas devoir se soucier des tensions appliquées entre le drain et la source. Cette solution est d'ailleurs celle adoptée par le fabricant GaN Systems [10]

## 7. Conclusions

Au travers des tests, la présence des pièges, telle qu'établie par hypothèse, a été démontrée durant les tests en double impulsif. Les tests en courant transitoire permettent ensuite de caractériser les pièges et de les localiser. Dans le cas exposé ici, les pièges se situent sous le canal et dans les couches profondes du transistor. Il devient dès lors possible de définir à quelles étapes de fabrication des améliorations sont à apporter. Ceci afin d'optimiser les performances des dispositifs. Une amélioration de la qualité du cristal peut être une solution, l'ajout de couches et d'éléments compensatoires une autre. Cependant, cette dernière solution peut présenter un désavantage en perturbant d'autres aspects du transistor, à l'image de la couche de passivation.

Malgré leurs défauts, les transistors GaN présentent une technologie plus qu'intéressante pour l'avenir de l'électronique. Les satellites Proba-V utilisent déjà des transistors à base de cette technologie dans leurs convertisseurs et les futures applications prévoient une utilisation à grande échelle dans les domaines tels que les énergies renouvelables, les voitures électriques, voire même les chargeurs

d'ordinateurs portables. Ces composants commencent à peine à faire leur percée dans le secteur industriel public mais leur avancée et le fait qu'ils apportent une solution à nos besoins en énergie en font de parfaits candidats. Au même titre que le silicium fut nommé matériau du 20<sup>ème</sup> siècle en matière d'électronique, certains chercheurs surnomment d'ores et déjà le GaN comme étant le composant du 21<sup>ème</sup> siècle.

## Sources

- [1] GaN Systems, (consulté en janvier 2016), *Why Gallium Nitride*, [http://www.gansystems.com/why\\_gallium\\_nitride\\_new.php](http://www.gansystems.com/why_gallium_nitride_new.php)
- [2] Meneghesso G. et al., *First Reliability Demonstration of Sub-200-nm AlN/GaN-on-Silicon Double-Heterostructure HEMTs for Ka-Band Applications*, in IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, vol. 13, no. 4, pp. 480-488, Dec. 2013.
- [3] MISHRA Umesh K., SINGH Jasprit, *Semiconductor device Physics and design*, Springer edition, ISBN 978-1-4020-6481-4 (e-book)
- [4] TARTARIN Jean-Guy, *La technologie GaN et ses applications pour l'électronique robuste, haute fréquence et puissance*, Rapport LAAS n 08644, Veille technologique sur la filière GaN, 2008, hal-00341009. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00341009/document>
- [5] BISI Davide et al, *Deep-Level Characterization in GaN HEMTs-Part I: Advantages and Limitations of Drain Current Transient Measurements*, iee, DOI: 10.1109/TED, 2013, 2279021.
- [6] Tanaka Kenichiro et al, 'Effects of deep trapping states at high temperatures on transient performance of AlGaIn/GaN heterostructure field-effect transistors', Japanese Journal of Applied Physics 52, 2013, 04CF07
- [7] Tapajna Milan et al, *Integrated Optical and Electrical Analysis: Identifying Location and Properties of Traps in AlGaIn/GaN HEMTs During Electrical Stress*, DOI: 10.1109/LED.2010.2047092
- [8] Umana-Membreno G.A. et al, *Electrically Active Defects in GaN Layers Grown With and Without Fe-doped Buffers by Metal-organic Chemical Vapor Deposition*, Journal of Electronic Materials, May 2008, Volume 37, Issue 5, pp 569-572

- [9] Marso M. et al, *Investigation of buffer traps in an AlGaIn/GaN/Si high electron mobility transistor by backgating current deep level transient spectroscopy*, Appl. Phys. Lett. 82, 633 (2003), DOI 10.1063/1.1540239
- [10] GaN Systems, (consulté en janvier 2016), *650 2 kW GaN E-HEMT half bridge*, <http://www.gansystems.com/gs66508t-evbhb.php>