



HAL
open science

Effets du dopage fer et carbone dans la zone tampon GaN sur les constantes de temps de pièges dans les HEMT

Jose Anerson Silva dos Santos, Emmanuel Dupouy, Florent Gaillard, P.V. Raja, Guillaume Callet, Raphaël Sommet, Jean-Christophe Nallatamby

► To cite this version:

Jose Anerson Silva dos Santos, Emmanuel Dupouy, Florent Gaillard, P.V. Raja, Guillaume Callet, et al.. Effets du dopage fer et carbone dans la zone tampon GaN sur les constantes de temps de pièges dans les HEMT. XXIIèmes Journées Nationales Microondes (JNM) 2022, Jun 2022, Limoges, France. hal-03745041

HAL Id: hal-03745041

<https://hal.science/hal-03745041>

Submitted on 3 Aug 2022

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.

Effets du dopage fer et carbone dans la zone tampon GaN sur les constantes de temps de pièges dans les HEMT.

J.A. Silva Dos Santos¹, E. Dupouy², F. Gaillard¹, P. V. Raja³, G ; Callet⁴, R. Sommet¹, J-C. Nallatamby¹

¹ Laboratoire XLIM, 123 avenue Albert Thomas, 87060 Limoges

² NXP, 134 Av. du Général Eisenhower, 31100 Toulouse

³ Department of Electrical Engineering, IIT Dharwad, Karnataka - 580011, India

⁴ UMS, 10 avenue du Québec, 91140 Villebon-sur-Yvette

Jean-christophe.nallatamby@xlim.fr

Résumé – Ce travail étudie expérimentalement par l'analyse des transitoires de courant de drain (DCT) les pièges électriquement actifs dans les transistors à haute mobilité électronique (HEMT) à base d'InAlN/GaN et d'AlN/GaN. L'impact du dopage fer ou carbone dans la couche tampon de GaN est notamment examiné. Un piège de niveau profond positionné à $E_C - 0,63$ eV avec une section de capture de $\sigma = \sim 6 \times 10^{-15}$ cm² est identifié pour le transistor InAlN/GaN à dopage Fe. Les mesures DCT montrent par contre que le transistor AlN/GaN HEMT (dopé C) possède quant à lui un piège à électrons positionné à $E_C - 0,33$ eV avec une section de capture de 2×10^{-20} cm². Contrairement au dopage Fe, ces analyses montrent que le buffer à dopage carbone dispose de constantes de temps d'émission de pièges très lentes. Ces caractérisations permettent de définir une méthodologie de tri des composants très utile pour leur fabricant.

1. Introduction

L'incorporation de dopants dans la couche tampon des HEMTs GaN tels que le fer de type p ou le carbone permettent de compenser le dopage résiduel de type n du GaN et ainsi d'assurer efficacement le confinement des électrons dans le puits 2D. Cependant, ces dopants influent sur les effets de capture des électrons du canal par des états situés dans la bande interdite. Ces défauts peuvent être électriquement actifs et avoir un impact direct sur les performances électriques des dispositifs, notamment sur la tension de seuil V_T et sur la transconductance G_m . Le comportement d'un HEMT GaN en régime dynamique sera grandement différent entre un composant dopé Fe ou dopé carbone à cause de leurs constantes de temps d'émission des pièges. Les transistors à dopage carbone présentent des constantes de temps très longues, qui peuvent être supérieures à la dizaine de seconde. Les mécanismes des effets dispersifs entraînent donc une dégradation de la résistance dynamique à l'état passant R_{ON} et une chute du courant de drain. Cette résistance dynamique est un paramètre essentiel lorsqu'il s'agit de concevoir des circuits de commutation performants. La caractérisation des pièges peut

permettre d'orienter les choix technologiques dans le but de minimiser les effets transitoires inhérents aux phénomènes de piégeage. Il convient donc de développer et d'améliorer la précision de l'instrumentation dédiée à la mise en évidence des effets dispersifs. Parmi les méthodes disponibles pour la détermination des constantes de temps d'émission des pièges, la méthode de caractérisation des mesures transitoires de courant (I-DLTS) sera décrite dans ce papier. Ensuite, les mesures transitoires du courant de drain seront réalisées sur des transistors HEMT InAlN/GaN (dopé Fe) et AlN/GaN (dopé C) sur substrat SiC ayant pour longueur de grille 0.1µm.

2. Technologie HEMT GaN

Les deux structures épitaxiales que nous avons utilisées pour la caractérisation des pièges concernent d'une part une structure InAlN/GaN et d'autre part une structure AlN/GaN. Ces dernières possèdent toutes deux une couche de nucléation, une couche d'exclusion et une couche de surface (ou cap). La structure InAlN/GaN est constituée d'une couche barrière InAlN et d'une couche tampon, appelée aussi buffer dopé fer alors que la structure AlN/GaN possède une couche barrière AlN et une couche tampon dopé carbone. Ces dopants ont pour fonction de confiner efficacement le gaz 2D et peuvent pénaliser le fonctionnement dynamique par des phénomènes de pièges.

3. Caractérisation I-V pulsées

La caractérisation I-V pulsée nous donne accès à diverses informations et nous permet de comparer les composants par rapport à certains paramètres fondamentaux : tension de seuil, courant maximum ou transconductance. Ces mesures sont aussi un indicateur intéressant des phénomènes de piégeage dans le composant.

- Comparaison des niveaux de courant et des transconductances

En comparant le dopage Fe et carbone (Figure 2), on constate une augmentation du courant maximum d'un facteur supérieur à 2 pour le composant dopé carbone. Les mesures n'ont pas été davantage poussées en V_{GS} afin de ne pas détériorer les composants. Bien que le courant maximum ne soit pas atteint, on peut malgré tout constater que sa croissance est ralentie en observant la transconductance. On peut conclure que le dopage carbone permet d'atteindre une plus grande densité de courant. La transconductance s'en trouve améliorée mais par un facteur bien moindre, environ 15% d'augmentation.

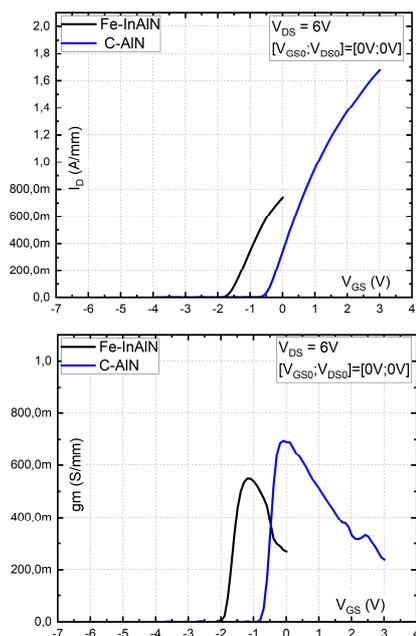


Figure 2 : Comparaison du courant (a) et de la transconductance (b) entre les dopages dans la zone tampon GaN

b. Effet des pièges sur les caractéristiques I_{DS} - V_{DS} pulsées

La figure 3 présente les mesures I-V pulsées pour caractériser les pièges dans chaque technologie.

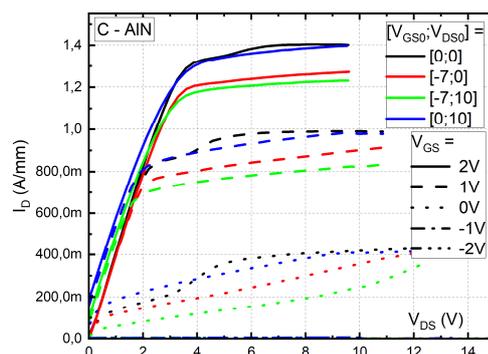
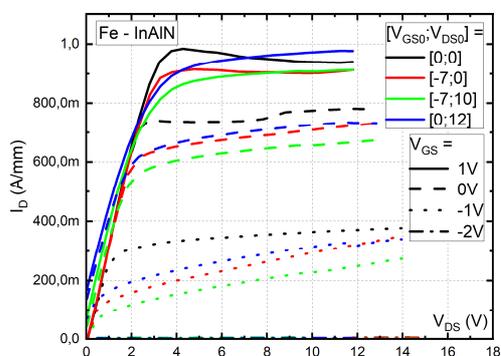


Figure 3 : Comparaison des mesures $I_{DS}=f(V_{DS}$ de « gatelag », « drainlag » et « point chaud » entre ces deux technologies.

La comparaison entre les dopages montre un comportement similaire avec un écroulement du courant en « drainlag » comme en « gatelag ». L'impulsion sur le drain n'amplifie que peu le phénomène de piégeage. La prédominance provient de l'impulsion sur la grille. Cette hypothèse est confirmée par la mesure au point chaud qui ne provoque pas d'écroulement du courant. Ces composants ont des tensions de seuil différentes et les résistances R_{ON} pour le dopage fer et carbone sont respectivement égales à 3ohm.mm et 2.5 ohm.mm. La technique I-V pulsée ne sert finalement qu'à constater l'existence plus ou moins importante des pièges. Mais la signature des pièges ne peut être évaluée avec précision que lors d'une mesure transitoire ou fréquentielle.

4. Caractérisation des effets de pièges

La mise en place d'une mesure de type transitoire de courant permet d'identifier les énergies d'activation et les sections de capture des pièges. Un banc de mesure transitoire de courant de drain en appliquant simultanément une impulsion sur le drain et sur la grille est présenté sur la Figure 4.

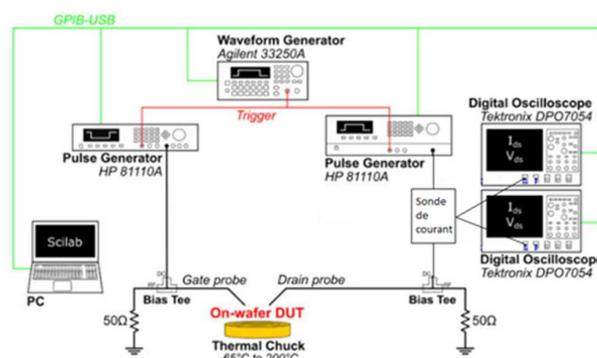


Figure 4. Schéma du banc de mesure transitoire du courant.

Ce banc de mesure est composé de deux générateurs d'impulsions HP 8110A permettant de délivrer les polarisations de grille et drain, de deux oscilloscopes Tektronix DPO7054 munis d'une sonde de courant

développée en interne. Cette sonde de courant a été réalisée avec un amplificateur d'instrumentation AD8421 de Analog Devices dont le gain a été fixé à 100. Cet amplificateur d'instrumentation a été choisi notamment pour sa grande bande passante (2MHz pour un gain de 100) et son faible bruit ($3.2nV/Hz^{0.5}$). Le composant à mesurer est disposé sur un chuck thermique dont la température peut varier entre 25°C et 200°C.

Le chronogramme de la séquence des impulsions de tension appliquée aux composants est schématisé sur la Figure 5

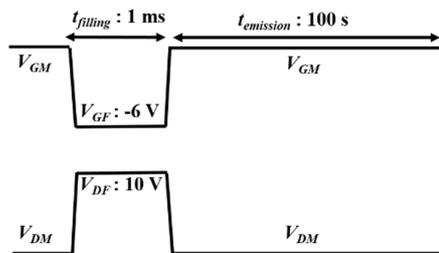


Figure 5. Chronogramme des impulsions générées pour la polarisation lors de la mesure transitoire du courant de drain.

Au cours de notre campagne de mesures, nous avons fait varier la durée de remplissage des pièges ($T_{filling}$) afin d'évaluer le temps nécessaire pour remplir une majorité de pièges. Les tensions V_{GF} , V_{DF} , V_{GM} et V_{DM} ont été choisies en fonction du composant considéré afin d'éviter les effets thermiques et pour se concentrer uniquement sur la contribution provenant des pièges.

Le point de polarisation choisi correspond à un courant d'environ 20 mA/mm à 30°C. Ce point de polarisation est choisi suffisamment bas pour ne pas provoquer un auto-échauffement significatif dans le composant. En effet, la tension maximum en V_{DS} est d'environ 10 V, ce qui correspond à une puissance dissipée de 200 mW/mm. En considérant une résistance thermique de 20°C.mm/W, un échauffement moyen de seulement 4°C est obtenu dans le canal. De plus, les signatures de pièges sont généralement extraites aux tensions de drain les plus faibles pour éviter l'influence du champ électrique.

5. Résultats et discussion

a) Influence de la largeur d'impulsion

La figure 6 montre l'évolution du courant de drain en fonction du temps d'émission pour les différentes durées de remplissage des pièges pour les pièges associés au gate-lag sur le transistor dopé fer (a) et le transistor dopé carbone (b).

Un phénomène de saturation du remplissage est visible entre les durées 10 ms et 10 s. On peut donc considérer qu'au-delà de 1s, la plupart des pièges sont remplis.

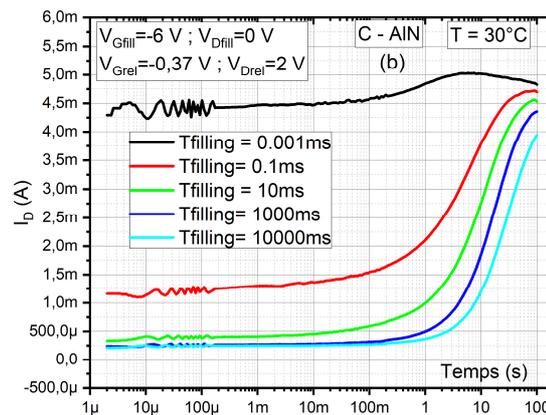
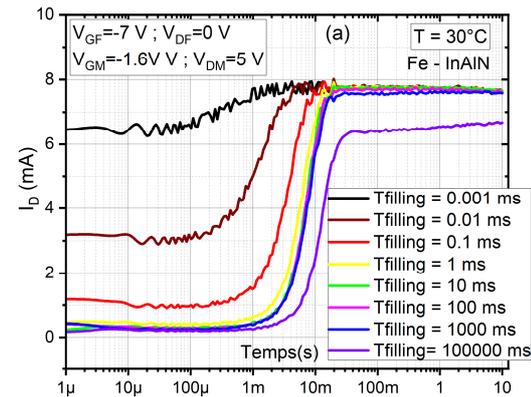


Figure 6 : Influence du temps de remplissage sur la mesure de « gate-lag »

Pour la suite nous choisissons un temps de remplissage des pièges de 1s, qui présente un bon compromis entre le temps de mesure et la quantité de pièges remplis. Ce temps suffit à ce que le courant s'écroule totalement et atteigne une valeur très faible au début de la mesure que ce soit sur les transistors dopés fer ou carbone.

Le relevé des transitoires de courant de drain, une modélisation basée sur un modèle multi-exponentielles et le traitement de la dérivée du courant de drain en fonction de la température permettent de déterminer l'énergie d'activation et la section efficace de capture des pièges à l'aide de la loi d'Arrhenius [1]

b) HEMT1-InAlN : Fe

Sur la figure 7, la présence d'un piège qui se décale avec la température est visible. Son énergie d'activation vaut 0.63 eV et sa section de capture $6.10^{-15}cm^2$. Cette énergie d'activation est associée dans la littérature à des pièges du buffer GaN dopé Fe [1].

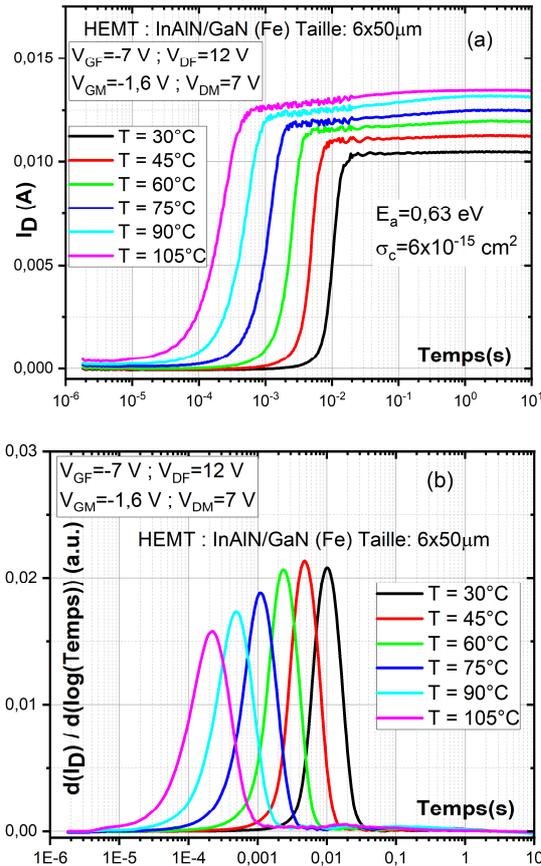


Figure 7 : Transitoire de courant de drain et sa dérivée. $V_{GF}=-7V$ et $V_{DF}=12V$; $V_{GM}=-1.6V$, $V_{DM}=7V$.

c) HEMT2-AIN : C

Le point de relaxation à $V_{DM}=1V$ a volontairement été choisi sur la figure 8 afin de mettre en évidence le recouvrement du courant à long terme sur les transistors dopés carbone. La signature des pièges est extraite avec une énergie d'activation de 0.33 eV et une section de capture de $2.10^{-20} cm^2$.

Une énergie d'activation similaire des pièges a été détectée par Verzellesi et al. [2] dans le HEMT AlGaIn/GaN avec un buffer dopé C.

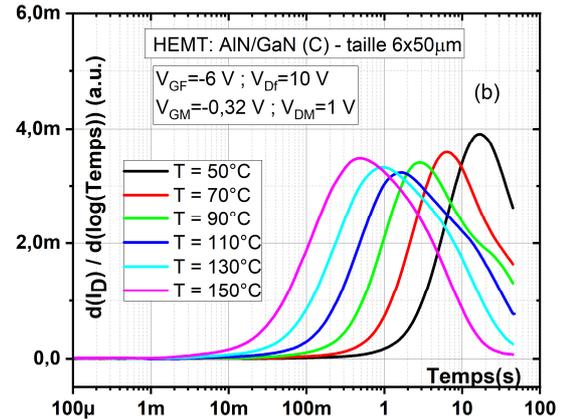
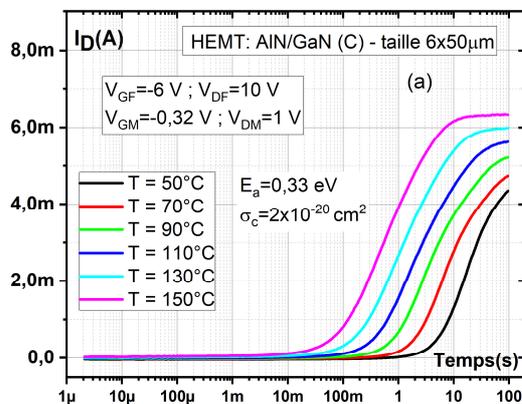


Figure 8. Transitoire de courant de drain et sa dérivée. $V_{GF}=-6V$ et $V_{DF}=10V$; $V_{GM}=-0.32V$, $V_{DM}=1V$.

6. Conclusion

Les pièges électriquement actifs dans les HEMT InAlN/GaN et AlN/GaN respectivement à dopage fer et carbone ont été identifiés par des mesures transitoires du courant de drain. Ces pièges suivent la statistique de Shockley-Read-Hall. Le piège à électrons à $E_c-0.63eV$ est attribué aux défauts liés au dopage Fe dans le buffer GaN. Pour le dopage carbone, Koller et al. [3] ont montré que le défaut C_N n'interagit pas directement avec la bande de conduction, mais avec un autre niveau de défaut. Cela expliquerait la faible valeur de section de capture ($2.10^{-20} cm^2$) avec une énergie d'activation de 0.33eV de la bande conduction.

Références

- [1] M. Meneghini, G. Meneghesso, and E. Zanoni, "Trapping and degradation mechanisms in GaN-based HEMTs," in *Gallium Nitride (GaN) Physics, Devices, and Technology*, Boca Raton, USA: 2016, pp. 327-361.
- [2] G. Verzellesi, et al., "Influence of buffer carbon doping on pulse and AC behavior of insulated-gate field-plated power AlGaIn/GaN HEMTs," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 35, no. 4, pp. 443-445, Apr. 2014.
- [3] C. Koller, G. Pobegen, C. Ostermaier, et D. Pogany, «Effect of Carbon Doping on Charging/Discharging Dynamics and Leakage Behavior of Carbon-Doped GaN», *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 65, n° 12, p. 5314-5321, déc. 2018, doi: [10.1109/TED.2018.2872552](https://doi.org/10.1109/TED.2018.2872552).