



HAL
open science

Identification de pièges dans le buffer des HEMTs AlGa_N/Ga_N basée sur des mesures de paramètres S basse fréquence et sur des simulations physiques

Julien Couvidat, Nandha Kumar Subramani, Ahmad Al Hajjar,
Jean-Christophe Nallatamby, Raphaël Sommet, Nathalie Deltimple, Raymond
Quéré

► To cite this version:

Julien Couvidat, Nandha Kumar Subramani, Ahmad Al Hajjar, Jean-Christophe Nallatamby, Raphaël Sommet, et al.. Identification de pièges dans le buffer des HEMTs AlGa_N/Ga_N basée sur des mesures de paramètres S basse fréquence et sur des simulations physiques. 20èmes Journées Nationales Microondes, May 2017, Saint-Malo, France. hal-01661791

HAL Id: hal-01661791

<https://hal.science/hal-01661791>

Submitted on 12 Dec 2017

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.

Identification de pièges dans le buffer des HEMTs AlGaIn/GaN basée sur des mesures de paramètres S basse fréquence et sur des simulations physiques

Julien Couvidat^{1,2}, Nandha Kumar Subramani¹, Ahmad Al Hajjar¹, Jean-Christophe Nallatamby¹, Raphaël Sommet¹, Nathalie Deltimple², Raymond Quéré¹

¹Institut de recherche Xlim, 7 rue Jules Vallès, 19100 Brive-la-Gaillarde

²Laboratoire IMS, 251 Cours de la Libération, 33400 Talence

julien.couvidat@xlim.fr

Résumé — Dans ce papier, la détermination du type, de l'énergie d'activation (E_a) et de la section de capture (σ_n) des pièges de buffer des transistors HEMTs AlGaIn/GaN est présentée. Les caractéristiques des pièges, extraites à partir de mesures de paramètres S basse fréquence, sont validées par des simulations physiques à deux dimensions. En outre, cette étude conclut sur la présence de pièges de buffer GaN de type accepteurs, ayant une concentration de $5.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ et un niveau d'énergie d'activation de 0.4 eV en dessous de la bande de conduction du GaN.

1. Introduction

Les transistors à haute mobilité électronique (HEMTs) à base de nitrure de gallium (GaN) ont démontré d'excellentes performances pour les applications micro-ondes et millimétriques à forte puissance. Malheureusement, la présence de niveaux profonds d'énergie [1], appelés pièges, dégrade les performances dynamiques des composants ainsi que leur fiabilité à long-terme. La densité de porteurs dans le canal est altérée par la capture et l'émission de porteurs par ces niveaux profonds d'énergie qui peuvent se situer en surface, à l'interface entre les matériaux ou à l'intérieur de la structure. De plus, ces pièges possèdent des constantes de temps asymétriques : la capture est très rapide tandis que l'émission de porteur est lente. Jusqu'à présent, l'origine et les caractéristiques de ces pièges restent mal expliquées. Par conséquent, l'analyse de ces phénomènes suscite un grand intérêt.

Différentes méthodes de caractérisation du comportement des pièges dans les composants GaN existent, telles que la spectroscopie transitoire des niveaux profonds (DLTS), les mesures transitoires Gate-Lag (GL) et Drain-Lag (DL), l'étude de la dispersion en fréquence de la transconductance, ou la mesure du bruit basse fréquence. Toutes ces techniques de mesure ont pour but d'extraire les caractéristiques des niveaux profonds d'énergie qui sont : le type, l'énergie d'activation, la section de capture des électrons (et des trous) et la localisation spatiale dans la structure.

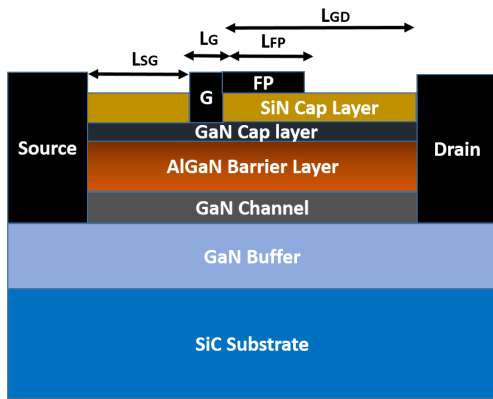
Dans ce papier, les pièges de buffer d'un transistor GaN/AlGaIn/GaN sur substrat SiC sont caractérisés à travers des mesures de paramètres S basse fréquence (BF).

En outre, nous présentons les résultats DC et Y22 BF de simulations physiques (TCAD) réalisées pour valider notre technique de mesure. Les résultats de simulation révèlent qu'il est impossible de mettre en évidence les pièges de barrière avec cette technique. Nous décrivons en section 2 les principaux paramètres du modèle physique implémenté. Nous présentons des comparaisons mesures/simulations de caractéristiques I/V afin d'évaluer la précision du modèle en statique. En section 3, les mesures de paramètres S basse fréquence, convertis en paramètres Y, sont comparées aux résultats de la simulation physique ; les pièges identifiés en mesure étant préalablement insérés dans le buffer GaN de la structure pour la simulation physique. En section 4, nous présentons les différentes simulations qui nous ont permis de conclure que seuls les pièges de buffer peuvent être identifiés par cette technique.

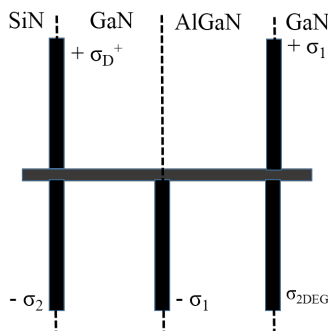
2. Modèle physique du composant

Les simulations physiques à deux dimensions (TCAD) sont réalisées sur le logiciel Sentaurus de Synopsys Inc. La structure modélisée, donnée en Figure 1a, est composée des couches GaN/AlGaIn/GaN sur substrat SiC avec passivation SiN. La grille, de longueur (L_G) $0.25 \mu\text{m}$, présente un développement total de $600 \mu\text{m}$ (6 doigts de $75 \mu\text{m}$ de largeur) avec une « field-plate » qui s'étend du milieu de l'électrode de grille vers le drain (longueur $L_{FP}=1 \mu\text{m}$). Les espaces grille-source et grille-drain valent respectivement $0.8 \mu\text{m}$ et $2.7 \mu\text{m}$. La Figure 1b présente l'implémentation des charges de polarisation à l'interface entre chaque couche de matériau. Les valeurs de σ_1 et σ_2 sont respectivement $\pm 1.23 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ et $-2.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. De plus, des pièges de surface sont introduits à l'interface SiN/GaN dans le but d'obtenir le gaz 2D dans le canal. Ce sont des pièges de type donneur (σ_D^+), avec une densité de 10^{13} cm^{-2} et une énergie d'activation de 0.2 eV en dessous de la bande de conduction du GaN. Un dopage fer uniforme de concentration $3.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ est ajouté dans le buffer GaN.

A partir des résultats de l'étude de la dispersion de l'admittance de sortie (paramètre Y22) en BF, nous ajoutons, dans le buffer GaN, un piège de type accepteur ayant une concentration de $5.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, un niveau d'éner-



(a)



(b)

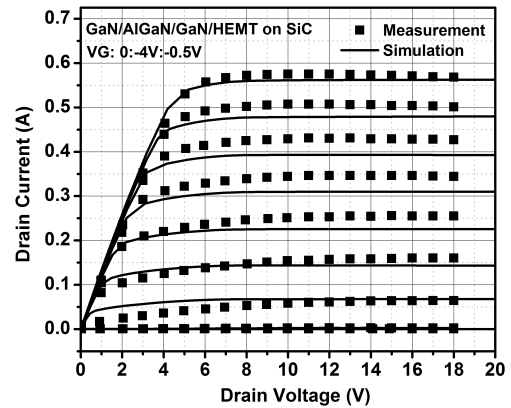
Figure 1. (a) Structure insérée dans le simulateur. (b) Position des charges de polarisation.

gie d'activation de 0.4 eV en dessous de la bande de conduction du GaN, une section de capture des électrons de $3.2 \times 10^{-18} \text{cm}^2$ et une section de capture des trous de $1.0 \times 10^{-20} \text{cm}^2$, plus de détails sur l'extraction des caractéristiques du piège sont donnés en section 3.

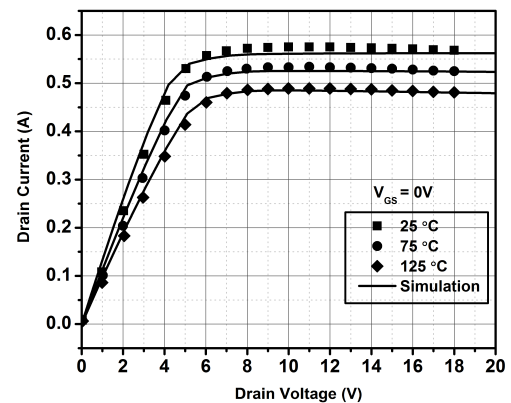
A l'aide de l'instrument de mesure BILT d'AMCAD, des mesures I/V impulsionnelles (période $900 \mu\text{s}$, rapport cyclique 0.1%) sont réalisées sur un transistor sous-pointes à différentes températures de chuck. Les tensions de repos entre les impulsions sont choisies de manière à ne pas activer les pièges, soit $V_{GSQ} = V_{DSQ} = 0V$. Le modèle physique est calibré afin de retrouver ces mesures de caractéristiques I/V, à la fois en amplitude et en température. La Figure 2 présente la comparaison des caractéristiques de sortie simulées et mesurées, à différentes températures. La méthode de calibration du modèle physique employée est décrite en détail en [2].

3. Mesures Y22 basse fréquence

Les mesures de paramètres S BF sont réalisées avec l'instrument E5061b de Keysight. Un thermo-chuck est employé pour faire varier la température de 25°C à 125°C par pas de 25°C . La bande de fréquence mesurée s'étend de 10Hz à 10MHz, une description du banc de mesure est donnée dans un autre article [3]. Le point de polarisation ($V_D=15V, I_D=57\text{mA}$) est choisi de manière à limiter l'effet de l'auto-échauffement du transistor. Un ajustement de la tension V_G est réalisé dans le but de maintenir constant



(a)



(b)

Figure 2. Caractéristiques I/V simulées (lignes) et mesurées (symboles). (a) Id/Vd pour V_{GS} allant de $-4V$ à $0V$ et $T_{Chuck}=25^\circ\text{C}$. (b) Id/Vd pour $V_{GS}=0V$ et T_{Chuck} variant de 25°C à 125°C .

le courant de polarisation à 57 mA à toutes les températures.

Les pièges présents dans le buffer GaN causent la dispersion fréquentielle de l'admittance de sortie, elle est visible sur le paramètre Y22 aux basses fréquences. Les mesures de paramètres S BF sont converties en paramètres Y à l'aide du logiciel ADS. Les résultats de mesure de la partie imaginaire de l'admittance de sortie à différentes températures de chuck sont tracés en traits pleins sur la Figure 3a. Les tracés de la partie imaginaire de l'admittance révèlent la présence d'un maximum pour chaque température. Ce maximum permet de calculer la constante d'émission du piège (τ_n) à l'aide de la formule (1).

$$f_{peak} = f_{Imag[Y_{22}]} = \frac{1}{2\pi\tau_n} \quad (1)$$

La constante d'émission du piège diminue avec la température, les maxima se décalent vers les hautes fréquences. En relevant la valeur fréquentielle du pic de la partie imaginaire de l'admittance de sortie pour chaque température et en calculant sa constante d'émission, la courbe d'Arrhenius (2) est tracée sur la Figure 3b. En appliquant une régression linéaire, il est possible d'extraire l'énergie d'activation et la section de capture du piège

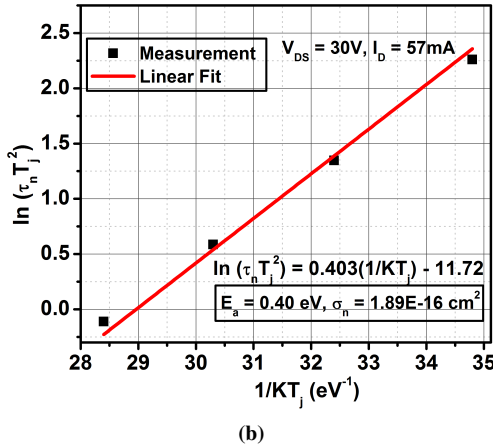
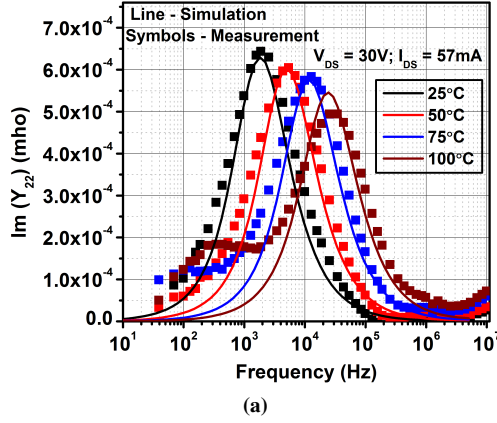


Figure 3. Etude de la dispersion fréquentielle de l'admittance de sortie. (a) Comparaison entre simulations (symboles) et mesures (lignes) de la partie imaginaire du paramètre Y22, T_{Chuck} variant de 25°C à 100°C. (b) Tracé d'Arrhenius correspondant aux relevés des maxima.

considéré à partir du coefficient directeur et de l'ordonnée à l'origine de la droite obtenue [4].

$$\frac{e_n}{T^2} = \frac{\sigma_n A_n}{g} \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2)$$

$$\text{avec } A_n = \frac{N_c v_{th}}{T^2} \quad \text{et} \quad e_n = \frac{1}{\tau_n}$$

où e_n est le taux d'émission, T est la température, σ_n est la section de capture, N_c est la densité d'états effective dans la bande de conduction, v_{th} est la vitesse thermique, g est le facteur de dégénération ($=1$), E_a est l'énergie d'activation apparente, et k est la constante de Boltzmann.

4. Résultats et discussion

A partir des mesures de paramètres S BF, l'énergie d'activation apparente extraite vaut 0.4 eV et la section de capture vaut $1.89 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$. L'origine physique de ce piège pourrait être imputée à la présence de dopant de type fer (Fe) dans le buffer. En ajoutant un piège de type accepteur dans le buffer de la structure avec une énergie de 0.4 eV, la simulation physique nous donne des résultats

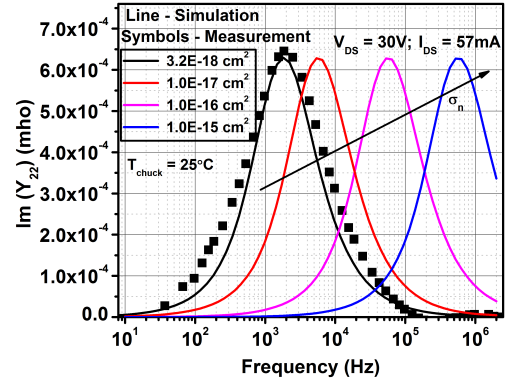


Figure 4. Impact de la section de capture des électrons sur l'admittance de sortie BF.

en accord avec les mesures d'admittance de sortie BF à condition que la section de capture des électrons du piège soit ajustée. En effet, comme le montre la figure 4, seule la section de capture des électrons valant $3.2 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$ permet de retrouver les mesures. Chose intéressante, la section de capture calculée avec les maxima des résultats de simulation correspond à celle calculée avec les maxima des mesures. Nous utiliserons dorénavant cette section de capture pour les simulations.

Afin de valider l'hypothèse d'identification de piège dans le buffer uniquement, nous effectuons une simulation en plaçant à la fois des pièges donneurs et accepteurs dans la barrière AlGaIn. L'accepteur possède une énergie d'activation de 0.6 eV tandis que celle du donneur vaut 0.3 eV. La concentration des pièges est de 10^{16} cm^{-3} et leur section de capture des électrons vaut 10^{-18} cm^2 . Sur la figure 5a, il est clair que les pièges de barrière ne provoquent aucune dispersion sur l'admittance de sortie quelle que soit la température de chuck. Lorsque l'on ajoute, aux deux pièges déjà présents dans la barrière, un troisième piège de type accepteur ($E_a=0.4\text{eV}$, $N_T=5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) dans le buffer GaN, de la dispersion apparaît dans les résultats de simulation et l'énergie d'activation extraite à partir des maxima est celle du piège de buffer (Figure 5b). Ce résultat démontre que seuls les pièges situés dans le buffer peuvent être identifiés par cette technique de mesure.

Les pièges de barrière peuvent être mis en évidence par d'autres techniques de mesure comme l'étude du Gate-Lag transitoire [5]. La figure 6 montre les résultats de simulations transitoires du courant de drain lorsque la grille du composant est pulsée de -10V à -3V avec le drain fixé à 15V. Pour ces simulations, deux pièges sont placés dans la barrière AlGaIn de la structure : un piège donneur proche de la surface ayant une énergie d'activation de 0.3 eV et un piège accepteur proche du canal ayant une énergie d'activation variant de 0.3 à 0.9 eV. A partir des résultats de simulation, il est clair que les pièges de barrière capturent les électrons en provenance du canal et qu'il les ré-émettent quelques temps après. Ces résultats suggèrent que les pièges de barrière peuvent être identifiés au moyen de mesures transitoires de courant.

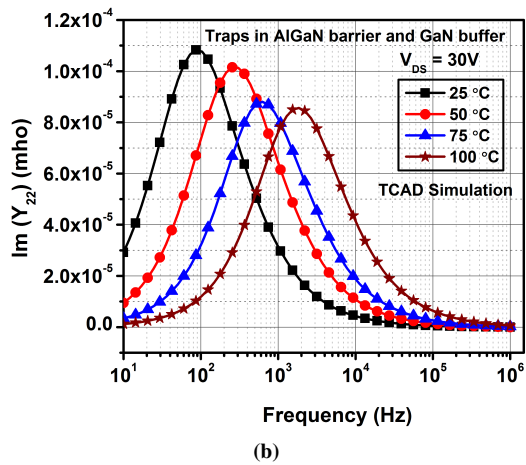
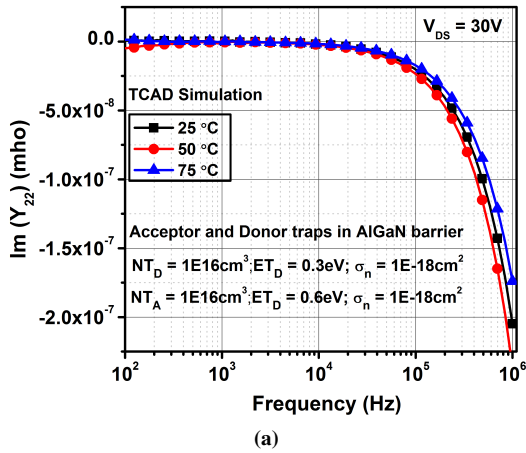


Figure 5. Impact de la localisation des pièges sur l'admittance de sortie BF. (a) Présence de pièges dans la barrière seulement. (b) Présence de pièges dans la barrière et dans le buffer.

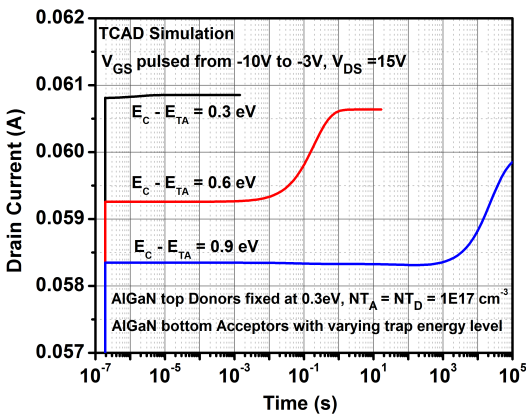


Figure 6. Simulations gate-lag transitoires avec deux pièges insérés dans la barrière AlGaIn. Plus l'énergie d'activation du piège proche du canal est importante, plus la constante d'émission est longue.

5. Conclusion

Dans ce papier, un piège de type accepteur avec un niveau d'énergie de 0.4 eV en dessous de la bande de conduction du GaN a été mis en évidence par des mesures de paramètres S basse fréquence. En outre, nous avons présenté les résultats de simulation physique (TCAD) pour un composant HEMT GaN/AlGaIn/GaN sur substrat SiC. Le modèle physique a été calibré sur des mesures I/V impulsives puis des simulations petit signal du transistor incorporant ce piège dans le buffer GaN se sont révélées en accord avec les mesures. De plus, une série de simulations a permis de conclure que seuls les pièges de buffer sont identifiables par l'étude de la dispersion fréquentielle de l'admittance de sortie du transistor. Par conséquent, ceci montre que cette méthode est efficace pour identifier les pièges de buffer GaN, qui sont probablement dus à l'utilisation d'un dopant.

Références

- [1] J. Yang, S. Cui, T. P. Ma, T.-H. Hung, D. Nath, S. Krishnamoorthy, and S. Rajan, "Electron tunneling spectroscopy study of electrically active traps in algan/gan high electron mobility transistors," *Applied Physics Letters*, vol. 103, no. 22, 2013.
- [2] N. K. Subramani, A. K. Sahoo, J. C. Nallatamby, R. Sommet, N. Rolland, F. Medjdoub, and R. Quéré, "Characterization of parasitic resistances of aln/gan/algan hemts through tcad-based device simulations and on-wafer measurements," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 64, no. 5, pp. 1351–1358, May 2016.
- [3] J. C. Nallatamby, R. Sommet, O. Jardel, S. Laurent, M. Prigent, and R. Quere, "A microwave modeling oxymoron? : Low-frequency measurements for microwave device modeling," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 15, no. 4, pp. 92–107, June 2014.
- [4] C. Potier, J.-C. Jacquet, C. Dua, A. Martin, M. Campovecchio, M. Oualli, O. Jardel, S. Piotrowicz, S. Laurent, R. Aubry, O. Patard, P. Gamarra, M.-A. di Forte-Poisson, S. L. Delage, and R. Quéré, "Highlighting trapping phenomena in microwave gan hemts by low-frequency s-parameters," *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, vol. 7, no. 3-4, pp. 287–296, 006 2015.
- [5] D. Bisi, M. Meneghini, C. de Santi, A. Chini, M. Dammann, P. Brückner, M. Mikulla, G. Meneghesso, and E. Zanoni, "Deep-level characterization in gan hemts-part i : Advantages and limitations of drain current transient measurements," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 60, no. 10, pp. 3166–3175, Oct 2013.