



**HAL**  
open science

## Identification des pièges de surface et dans la zone tampon GaN des transistors HEMT dopés Fe

Mohamed Bouslama, Florent Gaillard, P.V. Raja, Emmanuel Dupouy, Christophe Chang, Raphaël Sommet, Jean-Christophe Nallatamby

### ► To cite this version:

Mohamed Bouslama, Florent Gaillard, P.V. Raja, Emmanuel Dupouy, Christophe Chang, et al.. Identification des pièges de surface et dans la zone tampon GaN des transistors HEMT dopés Fe. XXIIèmes Journées Nationales Microondes, Jun 2022, Limoges, France. hal-03745526

**HAL Id: hal-03745526**

**<https://hal.science/hal-03745526v1>**

Submitted on 4 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.

## Identification des pièges de surface et dans la zone tampon GaN des transistors HEMT dopés Fe.

M. Bouslama<sup>2</sup>, F. Gaillard<sup>1</sup>, P. V. Raja<sup>3</sup>, E. Dupouy<sup>4</sup>, C. Chang<sup>5</sup>, R. Sommet<sup>1</sup>, J-C. Nallatamby<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire XLIM, 123 avenue Albert Thomas, 87060 Limoges

<sup>2</sup> III-V Lab, 1 Av. Augustin Fresnel, 91120 Palaiseau

<sup>3</sup> Department of Electrical Engineering, IIT Dharwad, Karnataka - 580011, India

<sup>4</sup> NXP, 134 Av. du Général Eisenhower, 31100 Toulouse

<sup>5</sup> UMS, 10 avenue du Québec, 91140 Villebon-sur-Yvette.

Jean-christophe.nallatamby@xlim.fr

**Résumé** – Les pièges trouvent leur origine dans différents types de défauts présents dans l'épithaxie et/ou provenant de la fabrication du transistor. Ce papier est dédié à la simulation physique et la caractérisation des pièges de surface et de la zone tampon des transistors HEMT AlGaIn/GaN dopés fer à partir des caractéristiques de transconductance  $Y_{21}$ . La simulation physique « TCAD » des paramètres  $Y$  est effectuée à l'aide du logiciel Sentaurus. La présence de ces deux pièges situés respectivement à  $E_C-0.2$  eV dans l'interface GaN/Nitride et à  $E_C-0.45$  eV dans la zone tampon GaN est confirmée avec les résultats obtenus par la simulation du paramètre  $Y_{21}$ .

Ce papier montre clairement et pour la première fois que le paramètre  $Y_{21}$  est une caractéristique essentielle pour identifier les défauts localisés dans la zone tampon et en surface.

### 1. Introduction

Les effets parasites représentent l'un des défauts majeurs de la technologie HEMT GaN. Il est impératif de comprendre leur origine afin de pouvoir les maîtriser. Ces effets thermiques et de piégeage-dépiégeage sont également un frein important à l'obtention de performances en terme de rendement et de linéarité des amplificateurs de puissance (PA) réalisés avec ces technologies de transistors, en particulier pour des dimensions réduites. La compréhension et la localisation des mécanismes de piégeage dans ces dispositifs nécessitent impérativement l'utilisation simultanée de simulations physiques et de caractérisations complexes mettant en évidence ces effets dispersifs dus aux pièges.

Ce papier aborde d'une part la problématique de la simulation physique TCAD du transistor HEMT GaN/AlGaIn à l'aide du logiciel Sentaurus développé par Synopsys et d'autre part la caractérisation des pièges au moyen de techniques de mesures fréquentielles. Les pièges sont extraits à partir des parties imaginaires des paramètres  $Y_{21}$  (transconductance  $g_m$ ) et  $Y_{22}$  (conductance de sortie) basses fréquences. Les constantes de temps sont

déterminées en identifiant les maximums et minimums des paramètres cités précédemment.

### 2. Technologie HEMT GaN

La structure du transistor AlGaIn/GaN ainsi que les densités de charges induites par polarisation, utilisées pour la simulation physique, sont présentées sur la Fig 1.

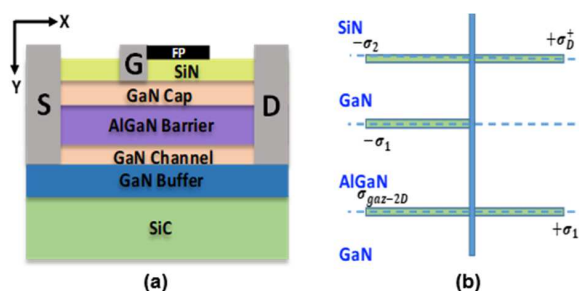


Figure 1 : (a) Structure du transistor (b) Densités de polarisation de charge

Les différentes longueurs et largeurs des régions et des contacts ne peuvent pas être indiquées pour des raisons de confidentialité avec le fondeur. La couche AlGaIn contient un taux d'aluminium de 0.27 %. La connaissance de ce taux est importante pour pouvoir calculer les différentes densités de charges avec les modèles adéquats. Basées sur les travaux de Ambacher [1], les valeurs des densités de charges surfaciques  $\sigma_1$  et  $\sigma_2$  sont respectivement  $1.4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  et  $-2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ . Tous les résultats de mesures et de simulation présentés ci-dessous portent sur le transistor de taille  $8 \times 50 \mu\text{m}$  et une longueur de grille  $0.15 \mu\text{m}$

### 3. Simulation physique « TCAD »

Les simulations physiques ont été effectuées à l'aide du logiciel Sentaurus [2] de la société SYNOPSIS. La démarche de simulation comporte la phase de description physique et géométrique du composant en définissant

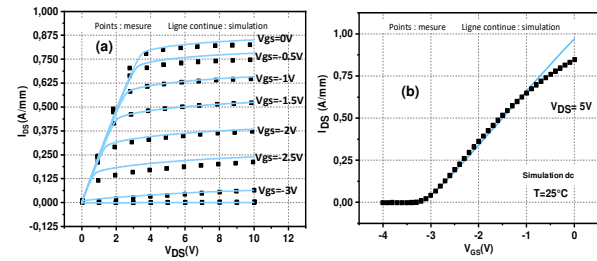
dans chaque région, les paramètres physiques du matériau semi-conducteur choisi, ainsi que les caractéristiques des impuretés et des pièges qu'il contient. Une fois la structure définie, nous choisissons les modèles physiques [3] qui décrivent les phénomènes existants dans ce composant dont on cherche à étudier les effets, comme le modèle de la variation de la mobilité en fonction du champ électrique, le modèle du processus de génération-recombinaison de type Shockley-Read-Hall, l'effet de la température, etc.. Dans cette phase le modèle de transport est dans notre cas le modèle dérive-diffusion pour lequel les équations de Poisson et de continuités du courant permettent d'obtenir les variables physiques scalaires inconnues (potentiel électrostatique, densités des porteurs, ...) à chaque nœud du maillage. Ces variables sont ensuite utilisées pour calculer les paramètres vectoriels inconnus (champ électrique, densités de courant, ...) situés entre deux nœuds adjacents du maillage. Ce modèle présente un bon compromis entre précision, convergence et temps de calcul. En appliquant la démarche de simulation DC bien établi, on peut déterminer alors l'état d'équilibre du composant sous test en un point de polarisation donnée. Dans un premier temps, les densités de charges surfaciques  $\sigma_1$  et  $\sigma_2$ , le dopage Fe (type p) dans la zone tampon GaN avec une concentration uniforme  $N_{FE}=3.10^{16}cm^{-3}$  ainsi que les pièges donneurs de surface sont introduits afin d'obtenir la bonne densité de gaz 2D. Les paramètres du modèle et les différentes grandeurs physiques sont ensuite ajustés lors d'une phase de calibration à 25°C afin de retrouver les caractéristiques DC mesurées. Dans le tableau 1 sont reportés les paramètres essentiels utilisés pour la calibration des caractéristiques statiques I(V).

Paramètres	HEMT ( $L_G = 0.15 \mu m$ )
Mobilité: $\mu_n$	1200 $cm^2/V s$ (in GaN) – 300 $cm^2/V.s$ in AlGaIn
Vitesse de saturation : $V_{sat}$	$1.4 \times 10^7$ cm/s (GaN)
Pièges de surface	$E_{TS} = E_C - 0.2$ eV, $N_{TS} = 2 \times 10^{13} cm^{-2}$ , $\sigma_{nS} = 2 \times 10^{-18} cm^2$ , $\sigma_{pS} = 10^{-20} cm^2$ .
Pièges dans la zone tampon	$E_{TB} = E_C - 0.45$ eV, $N_{TB} = 1 \times 10^{17} cm^{-3}$ , $\sigma_{nB} = 5 \times 10^{-16} cm^2$ , $\sigma_{pB} = 10^{-20} cm^2$
Grille	Fonction de travail : $WF = 4.7$ eV

**Tableau 1 : Grandeurs physiques pour la calibration des réseaux I(V)**

Ensuite les pièges accepteurs dans la région tampon GaN sont injectés. Les courbes courant-tension sont de nouveau ajustées en faisant varier la densité, l'énergie d'activation. La surface effective de capture de ces pièges n'a pas d'effet sur les caractéristiques I(V) alors qu'elle a une grande importance sur les paramètres [Y]. La valeur de la surface effective de capture de ces pièges ne peut être déterminée par la simulation des courbes I(V).

La figure 2 montre une bonne concordance entre les réseaux de caractéristiques statiques I(V) mesurés et simulés à température ambiante. Les courbes I(V) ont été validées pour des températures jusqu'à 100°C.



**Figure 2. Comparaison entre mesures dc et simulations (a)  $I_{DS}(V_{DS})$  à  $T=25^\circ C$ .  $V_{GS}=-6$  à  $0$  V par pas de  $0.5$  V ;  $V_{DS}=0$  à  $10$  V. (b)  $I_{DS}(V_{GS})$ .  $V_{GS}=-4$  à  $0$  V ;  $V_{DS}=5$  V**

Les signatures des pièges ont été déterminées en tenant compte la valeur extraite de la résistance thermique de  $13^\circ C.mm/W$ . Cette bonne corrélation est obtenue entre mesures et simulations après optimisation de la mobilité du GaN, de la concentration du dopage Fe, de la fonction du travail de la grille et de la concentration des pièges donneurs. Cette étape est d'une importance capitale avant d'entreprendre la simulation de la dispersion fréquentielle.

Une fois l'état d'équilibre DC déterminé, on pourra calculer les paramètres petit-signal, en linéarisant le système d'équation en présence d'une perturbation petit signal appliquée à l'un des contacts extérieurs du composant : c'est ce que l'on appelle la simulation AC

## 4. Résultats et discussions

Parmi les techniques de caractérisation des pièges, la mesure de paramètres [S] basse fréquence a été utilisée. Cette mesure permet ensuite de revenir aux paramètres Y et d'exploiter les paramètres  $Y_{22}$  et  $Y_{21}$  qui se révèlent sensibles aux effets de pièges. Ces paramètres Y obtenus par les mesures, couplés avec la simulation physique ont permis de faire ressortir la présence de certains centres de pièges. Chaque lobe présent sur les courbes de la partie imaginaire des paramètres  $Y_{22}$  et  $Y_{21}$  correspondent à la fréquence de coupure des pièges  $\tau^{-1}$  [4]. Tous les résultats présentés ci-dessous concernent des transistors HEMT  $8 \times 50 \mu m$  de longueur de grille  $0.15 \mu m$ . Les mesures de paramètres [S] basses fréquences ont été réalisées avec l'analyseur vectoriel E5061B de Keysight. Ce banc de mesure est couplé à une station sous pointes équipée d'un chuck thermique permettant de faire varier la température entre  $25^\circ C$  et  $200^\circ C$

### 4.a. Etude de localisation des pièges

Les constantes de temps ( $\tau_n$ ) des pièges sont accessibles sous forme de pics positifs ou/négatifs qui se déplacent vers les hautes fréquences lorsque la température augmente. Afin de localiser les pièges plusieurs configurations ont été étudiées en injectant les pièges accepteurs dans la barrière AlGaIn, dans la région GaN cap ou dans la zone tampon GaN en présence des

pièges donneurs ( $E_a=0.3eV$ ,  $\sigma_{ns} = 1 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$ ). Ces différentes simulations ont montré que seuls les pièges accepteurs situés dans la zone tampon sont détectés à partir des parties imaginaires  $Y_{22}$ . Alors que la partie imaginaire de  $Y_{21}$  montre clairement les pièges situés aussi bien dans la zone tampon que ceux situés en surface du composant.

Les figures 3 et 4 présentent les résultats de simulation de la partie imaginaire de  $Y_{22}$  et  $Y_{21}$  à 25°C, 50°C, 75°C dans les conditions de polarisation  $V_{DSq} = 10 \text{ V}$  et  $I_{DSq} = 50 \text{ mA/mm}$  en présence des pièges donneurs en surface et des pièges accepteurs dans la zone tampon GaN.

On remarque que lorsque la température augmente, la position des maxima se décale vers les fréquences hautes en raison de la dépendance thermique des pièges. Les fréquences de résonances obtenues à partir de ces maximums et minimums à différentes températures ont permis de déterminer l'énergie d'activation ( $E_a$ ) ainsi que la section efficace de capture  $\sigma n$  en utilisant l'équation (1) suivante [5]

$$\ln(\tau_n T_j^2) = \frac{E_a}{k_B T_j} + \ln\left(\frac{g T_j^2}{\sigma_n N_C v_{th}}\right) \quad (1)$$

$v_{th}$  : la vitesse thermique des électrons dans le nitrure de gallium ( $\text{ms}^{-1}$ )

$N_C$  : présente la densité effective d'état dans la bande de conduction ( $\text{m}^{-3}$ )

$T_j$  : température de jonction (Kelvin).

$g$  : taux de dégénérescence du niveau d'énergie des pièges  $\approx 1$ .

$k_B$  : constante de Boltzmann  $\approx 8.6173303 \times 10^{-5} \text{ eV} \cdot \text{K}^{-1}$ . Le tracé de  $\ln(\tau n T^2)$  en fonction de  $1/k_B T$ , appelé graphe d'Arrhenius, permet ensuite d'extraire les signatures des pièges (Energie d'activation et section de capture) par évaluation de la pente et de l'ordonnée à l'origine pour  $V_{DSq} = 10 \text{ V}$  et  $I_{DSq} = 50 \text{ mA/mm}$

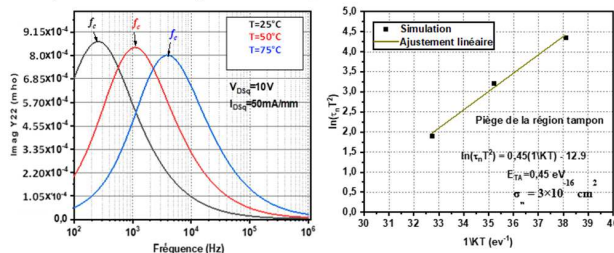


Figure 3 : Résultat de Simulation de la partie imaginaire  $Y_{22}$  et Extraction de l'énergie d'activation des pièges.

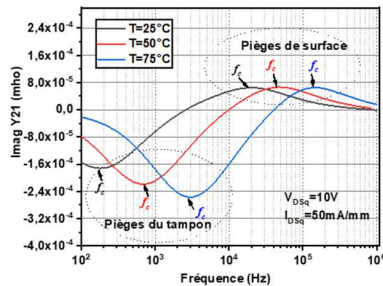


Figure 4 : Résultat de Simulation de la partie imaginaire  $Y_{21}$

La figure 5 présente les signatures de pièges de surface et dans la zone tampon GaN extraite à partir du paramètre  $Y_{21}$ .

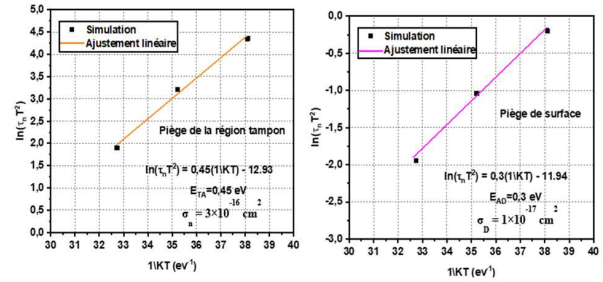


Figure 5 : Extraction de l'énergie d'activation des pièges détectés par la simulation de la partie imaginaire  $Y_{21}$ .

#### 4.b. Partie imaginaire du paramètre $Y_{21}$ : Résultats de mesures et simulation

La bonne corrélation entre les mesures et les résultats de simulation (Fig.6) confirme sans ambiguïtés la localisation des défauts dans la zone tampon et en surface.

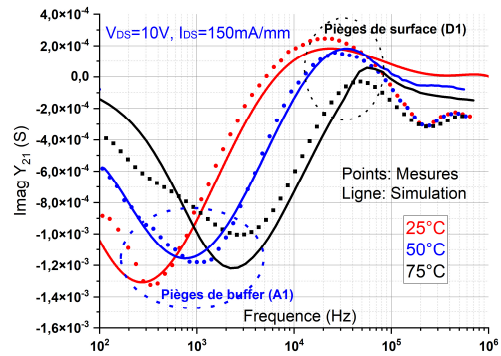


Figure 6: Mesures et simulation de la partie imaginaire de  $Y_{21}$ . Mise en évidence des pièges de surface et de la zone tampon.

Le tracé d'Arrhenius (Figure 7) permet d'extraire les deux signatures de pièges provenant du paramètre  $Y_{21}$

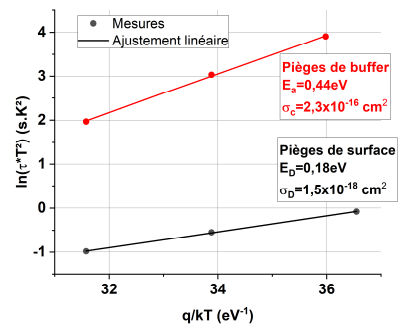
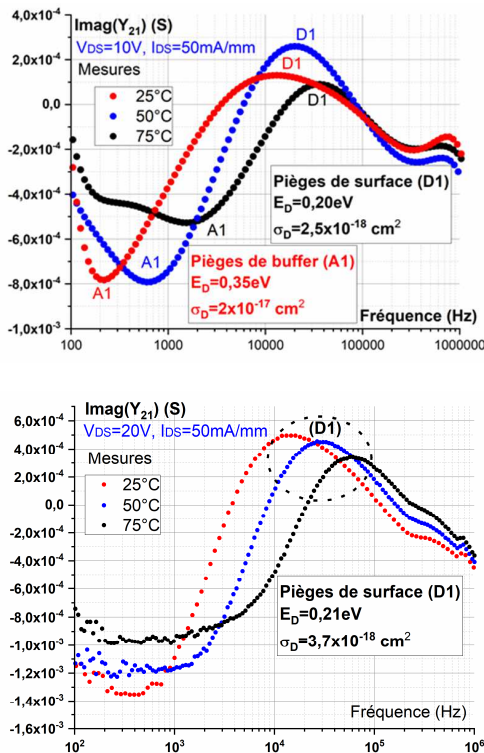


Figure 7 : Tracé d'Arrhenius

Les figures 8 (a) et (b) montrent l'importance des conditions de polarisation pour mettre en évidence la



présence des pièges de surface et dans la zone tampon GaN.

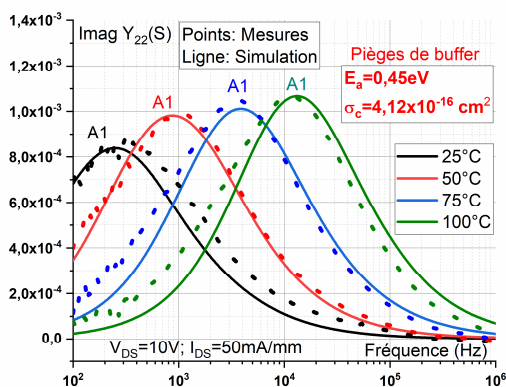


**Figure 8: Mesures de la partie imaginaire de Y21 en fonction de la fréquence pour deux points de polarisation. Présence de pièges de surface.**

On remarque que quelque soit la configuration la partie imaginaire permet de retrouver les pièges de surface.

#### 4.c. Partie imaginaire du paramètre Y<sub>22</sub>

La figure 9 montre un très bon accord entre les résultats de mesure et de simulation de la partie imaginaire Y<sub>22</sub>.



**Figure 9: Comparaison mesures et résultats de la partie imaginaire de Y22 en fonction de la fréquence.**

Cette simulation confirme donc la présence de pièges de type accepteur dans la région tampon GaN du transistor avec une énergie d'activation choisie de 0.45 eV [6,7], une section efficace de capture de  $3 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ , et une densité

des pièges autour de  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . L'amplitude élevée des pics positifs du paramètre Y<sub>22</sub> viendrait probablement masquer la présence des pics négatifs, lieu de présence des pièges de surface.

## 5. Conclusion

Dans ce papier, nous avons montré que le paramètre Y<sub>21</sub> permet d'identifier les centres accepteurs et donneurs respectivement localisés dans la zone tampon GaN et à l'interface GaN/Nitride alors que le paramètre Y<sub>22</sub> est sensible aux pièges situés dans la zone tampon GaN. Contrairement aux mesures I(V), les paramètres Y<sub>21</sub> et Y<sub>22</sub> dépendent sensiblement de l'énergie d'activation et de la section efficace de capture. L'avantage majeur du paramètre Y<sub>21</sub> repose sur l'alternance des pics négatifs correspondants aux pièges situés dans la zone tampon et ceux positifs correspondants aux pièges de surface. Ces pics ont des amplitudes similaires. Le résultat intéressant de la partie imaginaire de Y<sub>21</sub> est très prometteur pour la modélisation électrique des pièges.

## Références

- [1] Ambacher, O.; et al. Two dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization in undoped and doped AlGaIn/GaN heterostructures. *J. Appl. Phys.* **2000**, *87*, 334-344. <https://doi.org/10.1063/1.371866>
- [2] Sentaurus TCAD User Guide, Version N-2017.09, Synopsys Inc., San Jose, CA, USA, 2017.
- [3] P. Vigneshwara Raja, Jean-Christophe Nallatamby, Nandita DasGupta, Amitava DasGupta, "Trapping effects on AlGaIn/GaN HEMT characteristics", *Solid-State Electronics*, Volume 176, **2020**, 107929, ISSN 0038-1101, <https://doi.org/10.1016/j.sse.2020.107929>
- [4] J. M. Golio, M. G. Miller, G. N. Maracas and D. A. Johnson, "Frequency-dependent electrical characteristics of GaAs MESFETs," in *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 37, no. 5, pp. 1217-1227, May 1990, doi: 10.1109/16.108182
- [5] P. Vigneshwara Raja, Mohamed Bouslama, Sujana Sarkar, Khade Ramdas Pandurang, Jean-Christophe Nallatamby, Nandita DasGupta, Amitava DasGupta. "Deep-Level Traps in AlGaIn/GaN- and AlInN/GaN-Based HEMTs With Different Buffer Doping Technologies". *IEEE Transactions on Electron Devices*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2020, 67 (6), pp.2304-2310. (10.1109/TED.2020.2988439)
- [6] Meneghesso, G.; Meneghini, M.; Bisi, D.; Rossetto, I.; Cester, A.; Mishra, U.K.; Zanoni, E. Trapping phenomena in AlGaIn/GaN HEMTs: A study based on pulsed and transient measurements. *Semicond. Sci. Technol.* **2013**, *28*, 074021. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/28/7/074021>.
- [7] M. Bouslama, Christophe Chang, Raphaël Sommet, Jean-Christophe Nallatamby. "Extraction de la signature des pièges sur les HEMT GaN à courte longueur de grille en utilisant deux techniques de mesures différentes". *Journées Nationales Microondes 2019, Mai 2019, CAEN, France*.