

Mécanismes physiques de HEMT GaN révélés par l'instabilité de la tension de seuil

Harold RAZAFIMANJAKA¹, David TRÉMOUILLES¹, Maroun ALAM², Valeria RUSTICHELLI², Laurence ALLIRAND³, Abdelhakim BOURENNANE¹

¹LAAS-CNRS, Université de Toulouse, CNRS

²IRT St Exupery, Institut de Recherche Technologique

³Shaeffler, 40 Avenue du Général De Crouette, Toulouse, France

RESUMÉ – Dans les études de fiabilité des composants, différents paramètres électriques comme la tension de seuil (V_{TH}) sont caractérisés afin de suivre la dégradation du composant. Cependant, pour les HEMT GaN, les mesures de V_{TH} sont souvent instables en raison de mécanismes comme le piégeage des charges induits par l'historique des polarisations. Cette instabilité peut être considérée comme caractéristique de la structure du transistor et n'est pas liée au vieillissement. Ce travail se concentre sur la compréhension de l'origine de l'instabilité de V_{TH} des transistors GaN normally-off, en utilisant des mesures répétées de V_{TH} . Les mesures successives de V_{TH} , entrecoupées de polarisations de drain ou de grille respectant les limites de la datasheet, génèrent des dérives reproductibles de V_{TH} , formant ainsi une signature unique du composant. À travers cette signature, l'instabilité initiale de V_{TH} sera illustrée, où les principaux acteurs de cette instabilité sont les zones de field plates et la grille p-GaN. Deux références sont testées, et les signatures uniques obtenues révèlent les différences de structure entre les composants.

Mots-clés – Nitrure de Gallium, HEMT, Tension de seuil, p-GaN, Composants de puissance, Normally-off, Fiabilité

1. INTRODUCTION

Les transistors à effet de champ en nitrure de gallium (GaN) se sont imposés comme une alternative prometteuse aux technologies silicium dans les applications de conversion d'énergie et de haute fréquence, grâce à leurs propriétés électriques supérieures [1]. Parmi ces dispositifs, les transistors normally-off P-GaN tirent parti d'une couche de GaN dopée au magnésium (Mg) pour contrôler l'ouverture du canal.

Cependant, la stabilité de la tension de seuil (V_{TH}) reste un défi majeur, même avant tout phénomène de vieillissement prolongé. En effet, avant d'être soumis à des cycles de vieillissement accéléré, les transistors p-GaN peuvent déjà présenter des variations notables de V_{TH} sous l'influence de mécanismes intrinsèques tels que le piégeage de charges aux interfaces ou les effets transitoires de stress électrique. Ces variations, compliquent la prédiction du comportement du composant et peuvent affecter la fiabilité des circuits dans lesquels il est intégré [2].

Pour mieux comprendre cette instabilité, nous proposons ici la notion de "signature de V_{TH} " : une approche expérimentale permettant d'évaluer la réponse de la tension de seuil sous différentes conditions de polarisation. En appliquant des séquences de mesures spécifiques, cette méthode met en évidence l'impact des charges piégées aux interfaces et dans le volume du P-GaN, ainsi que leur influence sur la stabilité de V_{TH} .

Dans cet article, nous détaillons la méthodologie de la signature de V_{TH} dans une première partie. Ensuite, nous présentons les résultats expérimentaux obtenus sur des HEMT normally-off COTS. Dans une troisième partie nous analysons les mécanismes sous-jacents responsables de l'instabilité initiale de V_{TH} en corrélant les variations observées avec les caractéristiques structurelles du transistor. Enfin, nous appliquerons différentes

méthodes de préconditionnement permettant de réduire ces instabilités afin de pouvoir effectuer des mesures de fiabilité.

2. MÉTHODOLOGIE

Les composants testés sont deux HEMT commerciaux normally-off à grille p-GaN de 650 V, 30 A, 50 mΩ et 200 V, 15 A, 22 mΩ, respectivement DUT A et DUT B.

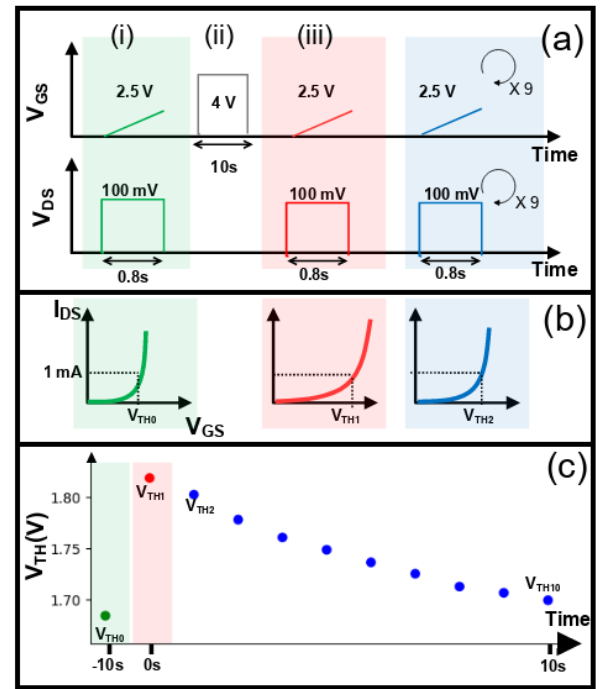


FIG. 1. Protocole de test d'une signature. Un total de 11 valeurs de V_{TH} sont mesurées. (a) Formes d'onde de la mesure de V_{TH} et de la polarisation appliquée : (i) V_{TH0} est mesuré, (ii) une polarisation est appliquée sur la grille pendant 10 s, (iii) 10 mesures consécutives de V_{TH} , de V_{TH1} à V_{TH10} , sont ensuite effectuées. À partir des caractéristiques I_{DS} - V_{GS} obtenues, V_{TH} est extrait à 1 mA pour $V_{DS}=100$ mV. Signature de V_{TH} montrant le décalage induit par la polarisation appliquée, avec un V_{TH1} supérieur à V_{TH0} dans cet exemple.

Nous définissons la signature de V_{TH} d'un composant comme la réponse du V_{TH} à une séquence de différentes polarisations appliquées sur la grille ou sur le drain. Pour une polarisation donnée, le protocole de test est le suivant : V_{TH} est mesuré en polarisant le drain à 100 mV et en balayant simultanément la tension de grille de 0 V à 2,5 V (Fig. 1a). L'extraction de V_{TH} est effectuée en prenant le courant de drain (I_D) à 1 mA. Une po-

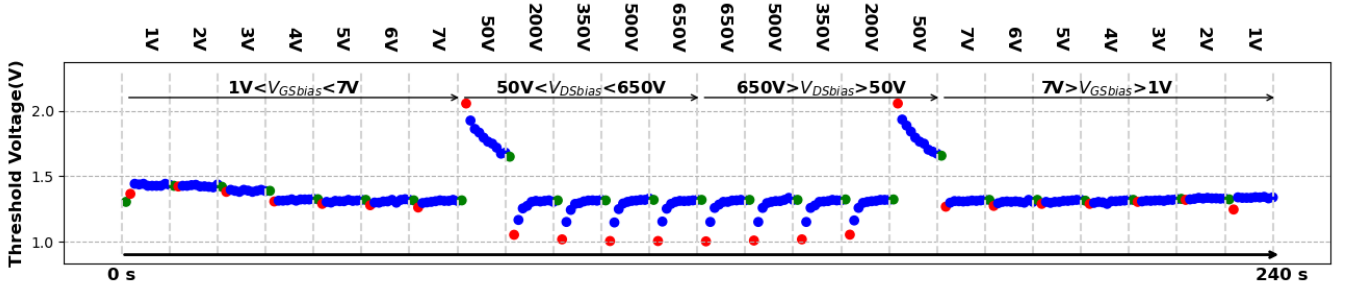


FIG. 2. Signature pour le DUT A. Les valeurs de V_{TH} sont affichées dans l'ordre chronologique de mesure, de gauche à droite. On peut observer une diminution de V_{TH} après les polarisations de grille. Dans le cas des polarisation de drain, on observe une dérive positive V_{TH} pour $V_{DS}=50$ V et négative pour les V_{DS} plus élevés.

larisation est ensuite appliquée pendant 10 secondes, suivie de dix mesures consécutives de V_{TH} (elles seront désignées dans ce travail comme les V_{TH} de récupération). Les formes d'onde de V_{GS} , V_{DS} et I_{DS} sont représentées en Fig. 1a. Ces dix valeurs de V_{TH} sont comparées à la valeur de V_{TH} initiale (avant polarisation), afin d'analyser le décalage et la récupération induits par l'application de la polarisation.

Cette séquence constitue la réponse à une polarisation appliquée. Une représentation schématisée de cette réponse est montrée en Fig 1c : pour chaque séquence, les points verts indiquent le V_{TH} mesuré avant l'application de la polarisation (V_{TH0}), le point rouge correspond au V_{TH} mesuré juste après la polarisation (V_{TH1}), et les neuf points bleus représentent la récupération (V_{TH2} à V_{TH10}).

Une signature de V_{TH} inclut plusieurs réponses consécutives. La signature du composant de test A (Fig. 2) contient plusieurs réponses successives en premier lieu pour des polarisations de grille allant de 1 V à 7 V, puis pour des polarisations de drain de 50 V à 650 V. Cette séquence est ensuite réalisée dans le sens inverse, partant de $V_{DS}=650$ V jusqu'à $V_{GS}=1$ V. L'ensemble des mesures sont réalisées sur l'analyseur de composant de puissance B1505A à 150°C. Une température élevée favorise une récupération plus rapide du composant après les différentes polarisations et évite la superposition des effets liés à l'historique des polarisation.

TABLEAU 1. Polarisations Utilisés

DUT	Polarisations de Grille ($V_{DS}=0$ V)	Polarisations de drain ($V_{GS}=0$ V)
DUT A	1 V à 6 V (avec un pas de 1 V)	50 V à 650 V (avec un pas de 150 V)
DUT B	1 V à 7 V (avec un pas de 1 V)	40 V à 200 V (avec un pas de 40 V)

3. SIGNATURE DES DEUX RÉFÉRENCES

Cette partie présente une analyse de l'instabilité de la tension de seuil (V_{TH}) pour deux transistors p-GaN HEMTs, DUT A et DUT B. Les réponses aux différentes polarisations de grille et de drain, référencées au tableau 1, sont étudiées afin de mettre en évidence leurs similarités et différences dans l'évolution de V_{TH} .

3.1. DUT A

Pour le DUT A (Fig. 2), les valeurs de V_{TH} mesurées après les polarisations à $V_{GS} = 1$ V et $V_{GS} = 2$ V restent stables, une fluctuation faible autour de 1,40 V est observée. À partir de $V_{GS} = 3$ V, une diminution de V_{TH} est observée après la polarisation. Cette baisse se poursuit à $V_{GS} = 4$ V, atteignant 1,25 V. Pour les polarisations $V_{GS} = 5$ V, 6 V et 7 V, les réponses restent

constantes à 1,25 V.

Lorsque la polarisation passe à $V_{DS} = 50$ V, une augmentation marquée de V_{TH} est observée, atteignant 2 V. Cependant, les mesures de récupération montrent une diminution progressive jusqu'à 1,6 V. Pour les polarisations plus élevées ($V_{DS} = 200$ V et au-delà), V_{TH1} présente une dérive négative jusqu'à 1 V. Puis une récupération vers 1,4 V est observée.

Lors de l'application des polarisations dans le sens opposé (de $V_{DS} = 650$ V jusqu'à $V_{GS} = 1$ V), des tendances similaires sont observées. Parmi les polarisations drain, seule celle à $V_{DS} = 50$ V induit une hausse de V_{TH} . Enfin, lors du retour aux polarisations de grille, V_{TH} diminue à nouveau jusqu'à 1,25 V, avec une légère augmentation pour les plus faibles polarisations de grille.

3.2. DUT B

Dans le cas du DUT B (Fig. 3), l'application d'une polarisation sur la grille entraîne une augmentation de la tension de seuil. Les hausses successives de V_{TH} induites par les différentes polarisations font passer sa valeur de 1,05 V à 1,5 V. Toutefois, une légère diminution est ensuite observée lors des mesures de récupération. À la suite de la polarisation $V_{DS} = 40$ V, une augmentation plus marquée est constatée, atteignant 1,7 V, suivie d'une récupération progressive. Lors des polarisations de drain suivantes, une baisse de la tension de seuil est observée, accompagnée, à chaque fois, d'une récupération tendant systématiquement vers 1,25 V.

De manière symétrique, l'application des polarisations dans le sens opposé révèle des tendances similaires. Lors des polarisations de grille, une augmentation de V_{TH} , suivie d'une phase de récupération, est systématiquement observée. Toutefois, l'amplitude de cette augmentation diminue à mesure que la tension de polarisation décroît. Ce phénomène, combiné à la baisse de V_{TH} pendant la phase de récupération, conduit à une diminution progressive de la tension de seuil, partant de 1,75 V jusqu'à 1,5 V.

4. MÉCANISMES IMPLIQUÉS

Les fluctuations de V_{TH} observées lors des polarisations de grille et de drain sur les deux DUTs peuvent être mises en relation avec plusieurs mécanismes connus, décrits dans la littérature. Ces mécanismes incluent notamment les effets liés aux pièges dans différentes couches, les phénomènes capacitifs ainsi que l'influence des plaques de champ.

4.1. Drain

L'application d'une séquence de polarisation croissante, puis décroissante, démontre la répétabilité des effets de polarisation. Pour les deux DUTs, les polarisations de drain montrent une tendance similaire. Bien qu'il soit largement reconnu que les zones tampons jouent un rôle clé dans ces fluctuations, plusieurs hypothèses sont proposées dans la littérature :

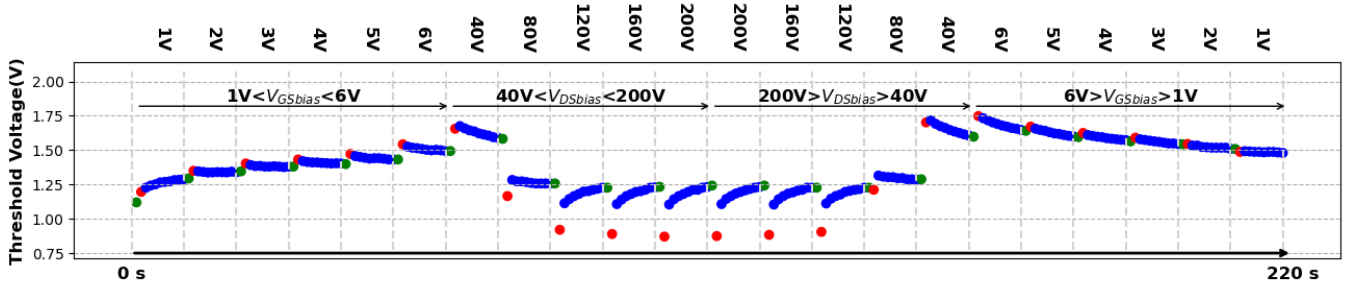


FIG. 3. Signature pour le DUT B. On peut observer une augmentation de V_{TH} après les polarisations de grille. Pour les polarisation de drain, le comportement est similaire au DUT A, une dérive positive V_{TH} pour $V_{DS}=40$ V et négative pour les V_{DS} plus élevés.

- La première hypothèse attribue ce phénomène à la présence de pièges à électrons dans la zone tampon. En raison de la forte densité de défauts générés lors de l'épitaxie, des électrons peuvent être injectés du substrat vers le tampon sous de fortes conditions de polarisation de drain [4].
- La seconde hypothèse considère la présence de pièges à trous dans la zone tampon. Dans ce cas, une forte polarisation de drain entraînerait la déplétion du tampon. L'utilisation généralisée de tampons dopés au carbone dans les transistors GaN HEMTs commerciaux soutient cette hypothèse [4].
- Une troisième hypothèse lie la dérive observée à l'effet Maxwell-Wagner, où des charges peuvent s'accumuler aux interfaces des isolants situés dans les couches tampons et au substrat [5].
- La quatrième hypothèse propose une modélisation capacitive des couches de grille. Les polarisations de drain chargeraient ces capacités, et si la décharge est incomplète lors de la mesure suivante de V_{TH} , une fluctuation de la tension de seuil serait observée [6].

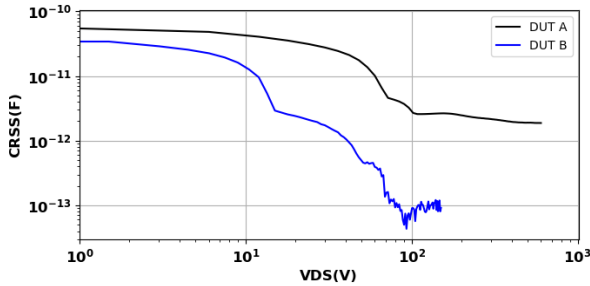


FIG. 4. Caractéristique C_{RSS} des DUTs. Chaque baisse de capacité correspond à l'activation des field-plates.

Un autre phénomène est observable pour $V_{DS} = 50$ V et $V_{DS} = 40$ V, respectivement pour le DUT A et le DUT B. Dans ces conditions, on note une augmentation de V_{TH} suivie d'une rapide diminution lors de la phase de récupération. Cette dérive positive de V_{TH} résulte de la déplétion du 2DEG induite par les plaques de champ [7]. Lorsque le champ électrique devient suffisamment élevé, les plaques de champ protègent la grille. Cette fluctuation peut également être corrélée avec les variations observées dans la caractéristique de capacité de sortie (C_{RSS}) du composant. Pour le DUT B (Fig.3), une forte diminution de la capacité est observée autour de 40 V, ce qui confirme la déplétion du canal.

4.2. Grille

Dans le cas des polarisations de grille, des comportements distincts sont observés pour les deux DUTs. Lorsque la polarisation de grille augmente, V_{TH} diminue pour le DUT A et aug-

mente pour le DUT B.

Pour le DUT A, une faible fluctuation de V_{TH} est observée pour $V_{GS} = 1$ V et $V_{GS} = 2$ V. En revanche, pour des polarisations de grille plus élevées, à partir de 3 V, une diminution de V_{TH} plus marquée est constatée. Dans ce cas, les valeurs de V_{TH} de relaxation ne retournent pas à leur état initial. D'après la littérature [8], ce phénomène s'explique par un mécanisme d'injection de trous, qui entraîne le dépiégeage des électrons et une augmentation de la densité du 2DEG. Cette redistribution des charges conduit à un courant plus élevé dans le canal, et donc à une réduction de V_{TH} . Lors de l'application des polarisations dans le sens inverse, une baisse durable de V_{TH} de 1.6 V à 1.25 V est observée à partir des polarisations de grille, confirmant l'effet d'injection de trous pour ces polarisations.

Pour le DUT B (Fig. 3), le drift et les V_{TH} de relaxation ne tendent pas vers leur valeur avant polarisation. La relaxation après une polarisation de grille est donc plus lente. De plus, plus la polarisation est élevée, plus la relaxation semble lente. Contrairement au DUT A, le mécanisme d'injection de trous ne se manifeste pas dans les plages de polarisation explorées.

Dans le cas d'un composant avec une grille p-GaN, la polarisation pour laquelle l'injection de trous apparaît pourrait être modulée et survenir pour des polarisations plus élevées. D'après [9], cette modulation est principalement influencée par :

- L'épaisseur de la barrière d'AlGaIn,
- Le taux de dopage en aluminium de cette barrière,
- Le dopage en magnésium du p-GaN.

Une autre hypothèse suggère la présence d'une couche intermédiaire d'AlGaIn entre le p-GaN et le métal de grille, qui pourrait modifier la dynamique des charges [10].

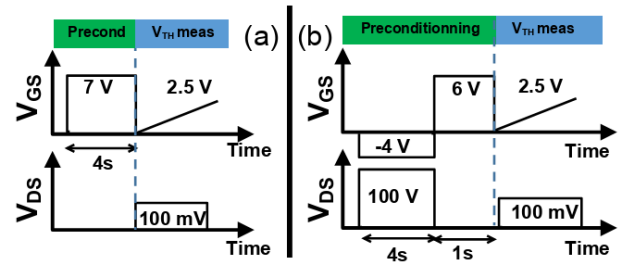


FIG. 5. Protocoles de préconditionnement appliqué avant chaque mesure de V_{TH} . (a) Protocole utilisant le mécanisme d'injection de trous obtenu pour les fortes valeurs de polarisations de grille. (b) Protocole utilisant successivement le blocage du drain puis une forte polarisation de grille permettant de créer une reproductibilité de la distribution des charges dans le composant.

Le décalage de ce mécanisme de dépiégeage par injection de trous pourrait laisser une plus grande place aux phénomènes de piégeages, principalement dans les oxydes et à l'interface GaN/AlGaIn. Lagger et al. [11] soutiennent l'hypothèse selon laquelle des chemins de fuite sont présents sur la barrière Al-

GaN, permettant de remplir les pièges du diélectrique de passivation.

Enfin, de manière similaire aux fluctuations observées sur le drain, les fluctuations de V_{TH} pourraient être expliquées par des effets capacitifs sur les couches de grille. Les capacités chargées par les polarisations ne seraient pas entièrement déchargées lors des mesures de V_{TH} .

5. RÉDUCTION DE L'INSTABILITÉ AVEC UN PRÉCONDITIONNEMENT

Sous certaines conditions, les tensions de seuil peuvent être répétées. Profiter de cette répétabilité pour obtenir une faible fluctuation de la tension de seuil, quel que soit l'historique de polarisation, est le principe du préconditionnement. Le préconditionnement est une technique couramment utilisée dans les procédures de qualification de la fiabilité des transistors en carure de silicium, où elle est déjà implémentée de manière standardisée par le JEDEC [2] [12]. Dans le cas des GaN HEMTs, l'activation du mécanisme d'injection de trous avec une forte polarisation de grille avant d'effectuer une mesure de V_{TH} a été prouvée fonctionnelle [13][14].

Le protocole utilisé pour le DUT est détaillé sur la figure 5a. Il consiste à appliquer $V_{GS} = 7$ V et $V_{DS} = 0$ V pendant 4 secondes. Une fluctuation de V_{TH} passant de +50% à +1% peut être observée grâce au préconditionnement pour le DUT A.

Un préconditionnement spécifique a été appliqué au DUT B [13], pour lequel ce mécanisme d'injection de trous n'était pas visible. Ce préconditionnement consiste d'abord en un blocage du drain pendant 4 secondes avec $V_{GS} = -4$ V et $V_{DS} = 100$ V, suivi d'une application de $V_{GS} = 6$ V et $V_{DS} = 0$ V pendant 1 seconde. Une fluctuation de V_{TH} passant d'un maximum de +46% pour la signature non préconditionnée, à +2% pour la signature préconditionnée peut être observée pour le DUT B.

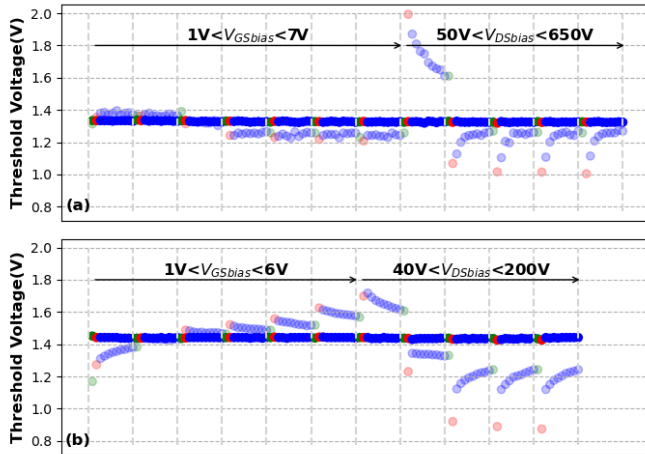


FIG. 6. Signatures préconditionnées. Les signatures non préconditionnées, présentées précédemment dans les figures 2 et 3, sont affichées en transparence. Avant chaque mesure de V_{TH} , le composant est polarisé selon un protocole pour avoir une mesure de V_{GS} fixe. (a) Signature préconditionnée du DUT A, la fluctuation est réduite grâce au mécanisme d'injection de trous. (b) Signature préconditionnée du DUT B, un autre protocole impliquant de bloquer le drain puis de polariser la grille est utilisé.

6. CONCLUSION

La signature de V_{TH} d'un composant GaN est un outil pour analyser l'instabilité des caractéristiques électriques du composant. Cette instabilité résulte des différences de structure entre les différentes couches du composant et se manifeste principalement sur V_{TH} . Dans l'état de l'art du GaN, les couches p-GaN et les field plates, responsables respectivement de la redensification et de la déplétion du 2DEG, jouent un rôle clé dans cette

instabilité.

Certains de ces mécanismes d'instabilité sont durables dans le temps et peuvent interagir avec d'autres phénomènes. Les effets liés à l'historique des polarisations passées, ainsi que les mesures successives de V_{TH} , génèrent des déplacements de charges dans le composant, modifiant ainsi son comportement. Les signatures présentées ici reflètent l'état initial des composants avant tout test de vieillissement.

Bien que, dans ces travaux, la dérive du V_{TH} ne soit pas permanente, des méthodes pour la minimiser et obtenir des mesures stables et reproductibles dans le cadre du suivi du vieillissement du transistor ont déjà été proposées.

La principale différence entre les deux références testées réside dans la présence du mécanisme d'injection de trous. Comme le souligne [15], ce mécanisme pourrait être responsable d'une dégradation prématurée de la grille du composant, affectant ainsi sa longévité et ses performances.

Concernant les fluctuations globales des composants p-GaN, plusieurs hypothèses ont été proposées. Elles ne sont pas nécessairement concurrentes et ne mettent pas au premier plan les fluctuations expliquées uniquement avec des mécanismes de piégeage, généralement mentionnés dans la littérature comme cause principale.

7. REMERCIEMENTS

Nous exprimons notre sincère gratitude à l'IRT Saint Exupéry et à Schaeffler pour leur précieuse collaboration, qui a grandement enrichi notre compréhension de la fiabilité des composants GaN. Ce projet PWEVTF du LAAS-CNRS, soutenu par l'IP-CEI ME-CT 2026 de Schaeffler (Vitesco Technologies France), est financé par le gouvernement français dans le cadre de France 2030. Ce travail a également été réalisé avec le soutien de la plateforme PROOF du LAAS-CNRS, partiellement financée par la région Occitanie.

8. RÉFÉRENCES

- [1] Y. Zhang et al., "Multidimensional device architectures for efficient power electronics," *Nature Electron.*, vol. 5, no. 11, pp. 723–734 (2022), doi : 10.1038/s41928-022-00860-5.
- [2] A. Deb et al., "On the Repeatability and Reliability of Threshold Voltage Measurements during Gate Bias Stresses in Wide Bandgap Power Devices," 2022 IEEE Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications in Europe (WiPDA Europe), Coventry, United Kingdom, (2022) doi : 10.1109/WiPDAEurope55971.2022.9936437
- [3] Threshold Voltage Instability in p-GaN Gate AlGaIn/GaN HFETs », *IEEE Transactions on Electron Devices*, PP. 1-7(2018). 10.1109/TED.2018.2828702
- [4] C. Zhou et al., "Vertical leakage/breakdown mechanisms in AlGaIn/GaN-on-Si structures," 2012 24th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs, Bruges, Belgium, 2012, pp. 245-248, doi : 10.1109/ISPSD.2012.6229069
- [5] Cavaliere et al., « Current Collapse in Buffer-Free GaN-on-SiC Power Transistors : Maxwell–Wagner Effect and Related Model », *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2025, 1-7. <https://doi.org/10.1109/TED.2025.3556052>.
- [6] J. Wei et al., "Charge Storage Mechanism of Drain Induced Dynamic Threshold Voltage Shift in p -GaIn Gate HEMTs," in *IEEE Electron Device Letters*, vol. 40, no. 4, pp. 526-529, April 2019, doi : 10.1109/LED.2019.2900154.
- [7] Chu et al., « 1200-V Normally Off GaN-on-Si Field-Effect Transistors With Low Dynamic on -Resistance ». *IEEE Electron Device Letters* 32, no 5 (mai 2011) : 632-34.
- [8] Tang, Xi et al., « Demonstration of Electron/Hole Injections in the Gate of p-GaN/AlGaIn/GaN Power Transistors and Their Effect on Device Dynamic Performance ». In 2019 31st International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD), 415-18, 2019.
- [9] Zhang, et al., « Threshold voltage shift model for p-GaN gate enhancement mode HEMT ». *Microelectronics Reliability* 147 (1 août 2023) : 115057.

- [10] Wang et al., "Hole Injection Effect and Dynamic Characteristic Analysis of Normally Off p-GaN HEMT with AlGaIn Cap Layer on Low-Resistivity SiC Substrate." *Micromachines* 13 (2022).
- [11] P. Lager et al., "Comprehensive Study of the Complex Dynamics of Forward Bias-Induced Threshold Voltage Drifts in GaN Based MIS-HEMTs by Stress/Recovery Experiments," in *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 61, no. 4, pp. 1022-1030, April 2014, doi : 10.1109/TED.2014.2303853.
- [12] JEDEC, *Guidelines for Measuring the Threshold Voltage (VT) of SiC MOSFETs*, JEP183A, Jan. 2023. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.jedec.org/standards-documents/docs/jep183a>
- [13] Alam et al., « New methodology for optimal preconditioning of GaN HEMT devices ». *Microelectronics Reliability* 170 (1 juillet 2025) : 115776. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2025.115776>.
- [14] Ghizzo et al., « Preconditioning of p-GaN power HEMT for reproducible Vth measurements ». *Microelectronics Reliability* 144 (1 mai 2023) : 114955. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2023.114955>.
- [15] Tang, et al., « Effect of Hole-Injection on Leakage Degradation in a p - GaN Gate AlGaIn/GaN Power Transistor ». *IEEE Electron Device Letters* 39, no 8 (août 2018) : 1203-6. <https://doi.org/10.1109/LED.2018.2849398>.