

Méthodologie innovante pour la caractérisation dynamique, reproductible et sans parasite de composants p-GaN HEMTs ; mise en évidence d'effets exclusivement dynamiques

Ludovic ROCHE^{1,2}, David TRÉMOUILLES¹, Emmanuel MARCAULT², Corinne ALONSO¹

(1) LAAS-CNRS, Université de Toulouse, CNRS, UPS, Toulouse, France

(2) CEA, CEA Tech Occitanie, F-31670 Labège, France

Résumé – Des p-GaN HEMTs à grille schottky sont étudiés en fonctionnement dynamique, sans parasites, grâce à un environnement de test 50 Ohms spécialement conçu. Des phénomènes dynamiques exclusifs sont mis en évidence, notamment une phase de transition des énergies de commutation ; et une montée drastique du Ron, allant jusqu'à cinquante fois sa valeur nominale en présence de surtensions transitoires de grille. Ce phénomène est structural, causé par la grille schottky. Contrairement au comportement observé en mesures quasi-statiques, les résultats sont reproductibles sans préconditionnement.

Mots-clés – p-GaN, HEMT, 50 Ohms, piégeage, dynamique, transitoire, préconditionnement

1. INTRODUCTION

Les composants à large bande interdite tels que les GaN HEMTs possèdent des caractéristiques intéressantes pour l'électronique de puissance, notamment grâce à leurs fronts de commutation raides et leur faible résistance à l'état passant [1].

Cependant, leur adoption industrielle est entravée par des phénomènes de fluctuation de leurs caractéristiques électriques, généralement attribués au piégeage de charge [2–7]. Ces fluctuations sont observées lors de caractérisations statiques ou quasi-statiques et sont associées à des problèmes de fiabilité [8].

L'étude fine de ces fluctuations en fonctionnement dynamique est essentielle pour quantifier leur effet en commutation réaliste. Cependant, les méthodologies usuelles de conception et d'instrumentation de circuits imprimés en électronique de puissance sont mises en défaut par les fronts de commutation très raides produits par ces composants. Trois phénomènes contradictoires sont usuellement à équilibrer : l'augmentation des distances entre le composant à caractériser et son instrumentation pour obtenir un ensemble modulaire ; l'augmentation de la raideur des fronts, idéalement aussi raides que dans l'application ; et la suppression des oscillations parasites. L'amélioration d'un des trois éléments entraîne généralement une dégradation des deux autres.

La méthodologie 50 Ω présentée en section 2 lève complètement ce compromis. Cette méthodologie permet une caractérisation dynamique fine des composants GaN HEMTs. Une comparaison expérimentale du comportement dynamique au comportement statique, plus connu, est décrite en section 3. Les résultats sont présentés en section 4, avec une étude plus approfondie de l'impact des surtensions transitoires de grille sur ces composants.

2. ENVIRONNEMENT DE CARACTÉRISATION 50 OHMS

L'environnement de test 50 Ω est présenté avec ses particularités en section 2.1. L'instrumentation de grille est discutée en section 2.2, et celle de drain en partie 2.3. Enfin, l'intérêt de cette

conception particulière pour l'électronique de puissance est résumée en partie 2.4

2.1. Particularités de la conception en environnement 50 Ω

L'environnement de test 50 Ω que nous avons développé [9] est présenté en figure 1. Il est inspiré, bien que complètement original, de bancs de tests à *Transmission Line Pulse* [10]. Le composant testé est soudé sur un circuit imprimé dédié, et est relié au reste de l'instrumentation par des câbles coaxiaux 50 Ω uniquement.

Un modèle traditionnel de ce montage intégrerait des composants parasites démesurés : pour l'inductance (liée à la longueur des câbles) et pour la capacité (liée à la proximité des conducteurs de signal et masse le long des câbles coaxiaux). Cependant, une telle modélisation n'est pas pertinente dans ce cas : en effet, l'hypothèse de base de ce modèle est l'Approximation des Régimes Quasi-Stationnaires, qui n'est ici pas vérifiée puisque la longueur des conducteurs est trop grande au vu des longueurs caractéristiques des signaux.

Le modèle des lignes de transmission, qui rend compte du temps de propagation des signaux dans les conducteurs, est ici indispensable. La conception d'un environnement de test via ce modèle diffère des méthodes traditionnelles, puisque ce modèle introduit des notions (rebonds de signaux, coefficient de réflexion, temps de propagation des ondes) qui ne sont pas modélisés avec des composants discrets. Pour autant, cette conception est plus adaptée au contenu fréquentiel élevé intrinsèque aux composants à grand-gap. L'ensemble des éléments théorique a été détaillé dans un précédent article [9].

2.2. Instrumentation de commande

Côté grille, un générateur (pour lequel un brevet est en cours de dépôt) permet d'émettre des formes d'onde contrôlables, qui sont transmises par la ligne de grille et se réfléchissent sur la grille du composant testé. Ces formes d'onde incidentes et réfléchies sont visualisables en sortie du générateur de tension de grille par la mesure de V_i (voir fig. 1). En particulier, les formes d'onde incidentes sont présentées en figure 2.

La tension de grille est la somme de l'onde incidente et de sa réflexion sur la grille du composant [9]. L'envoi d'une forme d'onde incidente appropriée permet l'obtention de la tension de grille voulue ; l'amplitude de réglage permise par le générateur de tension permet l'obtention d'une grande variété d'ondes incidentes, et donc de tensions de grille.

On peut donc appliquer sur la grille du composant différentes tensions qui correspondent à différentes commandes (différents routages, différentes valeurs de résistance de grille). A titre d'exemple, des tensions de grilles typiques sont visibles en figure 6, avec différentes valeurs de surtensions transitoires

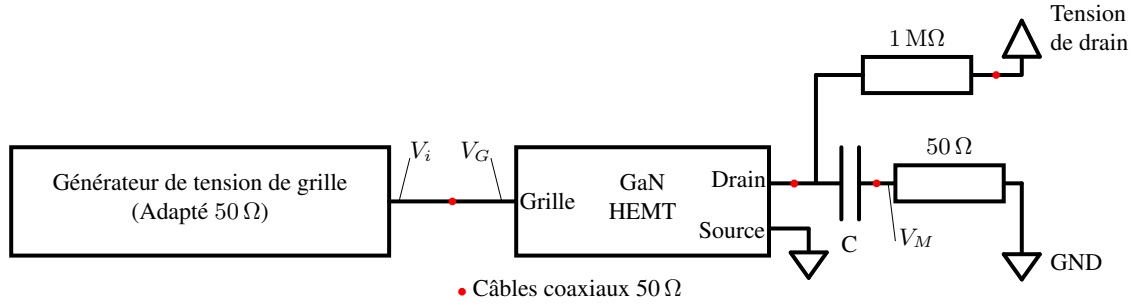


FIG. 1. Instrumentation 50 Ω permettant l'étude en commutation de composants GaN HEMT de puissance. V_i est la tension produite par le générateur, qui permet de visualiser l'onde incidente de grille. V_g est la tension de grille. V_M est la tension mesurée côté puissance, qui permet de calculer les tensions et courants de drain [9].

qui correspondent à des commandes de grille imparfaites (oscillantes).

Le générateur de tension de grille est adapté 50 Ω , c'est à dire que son impédance de sortie est de 50 Ω . Lorsque la forme d'onde réfléchi sur la grille revient au générateur, elle est donc entièrement dissipée et aucune réflexion ultérieure n'a lieu. Ainsi, la tension de grille n'est la somme que de la première onde incidente et de son unique réflexion sur la grille.

2.3. Instrumentation de puissance

L'instrumentation de drain est composée de la résistance d'un Meg-Ohm, de la résistance 50 Ω , et de la capacité C . L'ensemble est équivalent à un générateur de Thévenin de résistance 50 Ω contigu au composant [9]. Lors des commutations, le contenu fréquentiel est suffisamment élevé pour passer entièrement par la branche constituée de la résistance 50 Ω et de la capacité. La tension V_M est une image directe du courant drain-source du transistor par la loi d'Ohm. La tension drain-source en est déduite selon la relation suivante :

$$V_{DS} = \int \frac{V_M}{RC} dt + V_M + V_{C,0} \quad (1)$$

qui est valable grâce à l'adaptation 50 Ω .

2.4. Intérêt de la conception 50 Ω pour la caractérisation dynamique de composants de puissance

Cette méthode de conception 50 Ω répond à plusieurs problématiques actuelles pour la caractérisation de composants grand-gap.

Toute l'instrumentation peut être déportée du composant de plusieurs dizaines de centimètre en assurant l'absence totale de parasites (puisque ceux-ci sont entièrement pris en compte dans la théorie des lignes de transmission).

Cette distanciation permet d'appliquer des contraintes (thermiques, d'irradiation, etc.) au composant sans contraindre le reste de l'instrumentation (ce qui est une source de dérives et d'incertitudes de mesures).

De plus, distinguer les formes d'onde incidentes et réfléchies sur le composant, côté commande ou puissance, permet de vérifier que l'instrumentation impose un point de fonctionnement invariant.

Lorsque le composant et l'instrumentation sont contigus, i.e. dans l'instrumentation classique, les formes d'onde sont systématiquement au point de fonctionnement instantané qui résulte des interactions entre le circuit et le composant.

Dans le cas de circuits complexes (par exemple, en test *double-pulse* avec des éléments non linéaires : des pistes ayant des inductances et capacités parasites au premier, deuxième ordre... ; une diode de roue libre, etc.), ce point de fonctionnement dépend fortement des valeurs des différents composants-parasites et non linéaires inclus. Une variation du comportement du composant (due à une dérive de vieillissement, dégradation, piégeage ; ou structurelle) interagit alors invariablement avec

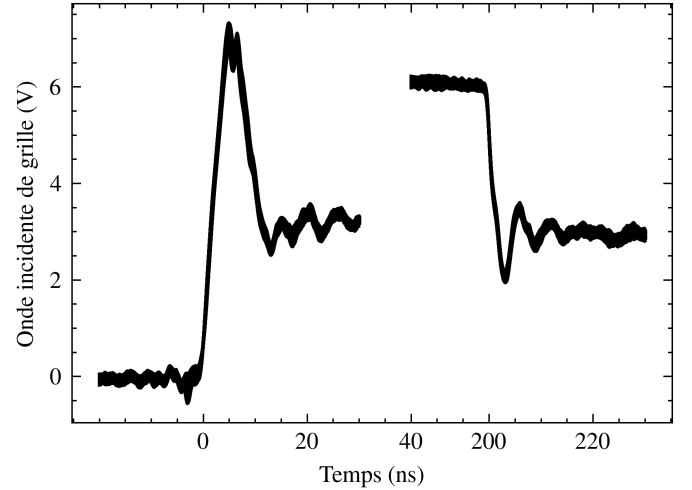


FIG. 2. Superposition des 3200 formes d'onde incidentes V_i émises par le générateur de tension de grille dans cette étude, pour la fermeture (jusqu'à 40 ns) et pour l'ouverture (200 ns et plus). La reproductibilité de ces formes d'onde permet d'assurer que toute modification du comportement du composant est intrinsèque, et ne provient pas de dérives instrumentales.

l'instrumentation. Le point de fonctionnement résultant comporte alors toute l'information cherchée sur l'état du composant, mais est bruité par le comportement de l'instrumentation.

Avec la conception 50 Ω , le composant n'interagit qu'avec les pistes 50 Ω , soit de manière totalement théorisée par le modèle des lignes de transmission et sans parasites. Ainsi, le point de fonctionnement est ici clairement défini côté instrumentation, car 50 Ω ; ce qui permet de suivre avec une grande précision les variations dues au composant, seul.

Cette conception 50 Ω est également immédiatement transposable pour le test sous pointes, ce qui permet donc des tests dynamiques réalistes sur plaquette de composants. Le tryptique de compromis habituel entre : l'augmentation de la distance composant-instrumentation ; l'augmentation de la vitesse des fronts ; la suppression des oscillations parasites ; est ainsi résolu, en permettant des fronts rapides, sans parasites, à grande distance pilote-grille.

3. PROCÉDURE DE TEST

Quatre échantillons ont été utilisés afin d'étudier la reproductibilité des mesures en fonctionnement dynamique grâce à cette instrumentation.

Les mesures sont réalisées à l'aide du circuit présenté en partie 2. Les 3200 formes d'onde incidentes appliquées à la grille des composants au cours des essais sont présentées en figure 2 et démontrent l'excellente reproductibilité des essais permise par le générateur.

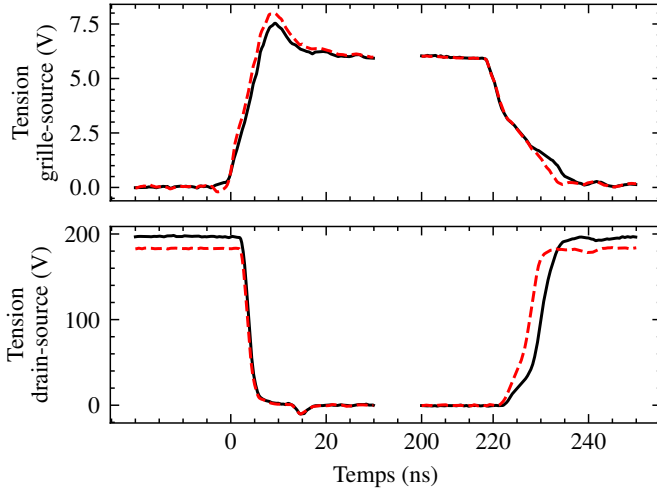


FIG. 3. Visualisation des première (noir) et vingtième (rouge) formes d'onde de commutation de grille et de drain typiques d'un composant. On constate un raidissement des fronts d'ouverture, en accord avec la baisse des énergies, et la modification de forme de tension de grille.

Sur chacun des quatre composants, dix séries de 40 commutations sont réalisées. Le composant est maintenu fermé durant 200 ns pour une période de 7 μ s afin de limiter l'auto-échauffement. Afin de permettre la recharge de la capacité du montage, une pause de vingt secondes est observée entre deux salves de 40 commutations.

Dans cette expérience, la commande de fermeture reproduit un routage de grille amenant une surtension, et la commande d'ouverture correspond à une commande plus lente afin d'observer précisément les phases de commutation. Ces commandes sont réglées grâce au générateur de tension de grille et correspondent à des formes d'onde de grille typiques de ce que l'on peut rencontrer en opération usuelle, pour différentes valeurs de résistance de grille [9].

Les formes d'onde résultantes sont présentées en fig. 3.

De plus, une série de mesures quasi-statiques est réalisée à l'aide d'un Keysight B1505A pour contrôler l'intégrité des composants. Ces mesures sont effectuées avant l'ensemble des salves dynamiques ; entre la cinquième et la sixième salve ; et à la fin de l'ensemble des salves, pour chaque composant. Aucune dégradation des composants n'est constatée lors de ces mesures.

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les différences observées entre le comportement statique et dynamique du composant sont présentées en section 4.1. Les comportements exclusifs du composant sont ensuite présentés en section 4.2.

4.1. Particularités du comportement dynamique

Le comportement en caractérisation quasi-statique des composants GaN révèle usuellement une grande variabilité. Celle-ci est attribuée à du piégeage de charge dans les matériaux [2]. Cette variabilité peut être minimisée par des procédures de pré-conditionnement [2] [11].

Contrairement à ce comportement bien documenté dans la littérature, l'étude dynamique des énergies de commutation révèle plusieurs phénomènes inédits : 1) les enveloppes des mesures d'énergies et leur écart-type, présentées en fig. 5, témoignent d'une très bonne répétabilité des mesures en dynamique. D'autres grandeurs caractéristiques comme les vitesses de commutation sont calculées et sont similairement répétables (mais non-présentées ici) [11] ; 2) il existe une évolution notable de l'énergie de commutation, notamment d'ouverture. Cette évolution est temporaire et reproductible, et exclusivement ob-

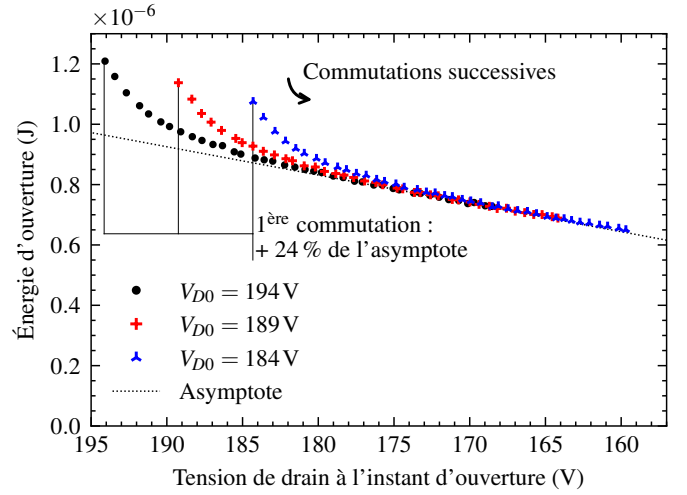


FIG. 4. Évolution du phénomène de chute des énergies avec la tension de départ, pour exclure l'influence de la chute de tension de blocage

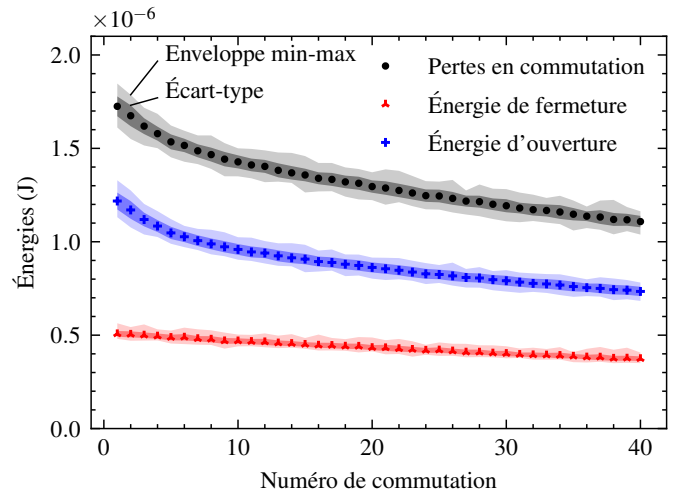


FIG. 5. Énergies de commutation relevées sur les quatre composants. Les pertes en commutation sont la somme des énergies d'ouverture et de fermeture. Les niveaux des énergies d'ouverture et de fermeture sont différents, car la commande d'ouverture est intentionnellement lente comparée à la commande de fermeture.

servable en fonctionnement dynamique.

Une partie de la baisse des énergies de commutation est due à la décharge de capacité C (voir fig. 1). Notamment, les énergies de fermeture se comportent de la manière attendue : une décroissance constante et linéaire avec la chute progressive de la tension aux bornes de la capacité C . Afin de décorréler la décroissance de tension de C de la décroissance rapide des énergies d'ouverture, le même essai est reproduit en figure 4. Cette décroissance rapide a lieu de manière similaire pour toutes les tensions initiales de blocage testées. Ainsi, il ne s'agit pas d'un effet lié à une valeur particulière de tension de blocage.

Contrairement aux observations en caractérisation quasi-statique, pour laquelle les mesures sont généralement fortement dépendantes aux polarisations passées [2], on démontre ici que les résultats sont reproductibles en fonctionnement dynamique sans procédure additionnelle comme le pré-conditionnement.

L'explication que nous proposons est qu'en fonctionnement dynamique, des hautes tensions de drain et de grille sont naturellement alternées. Ces deux modes sont connus pour fortement pré-conditionner le composant lors de tests statiques [2], c'est à dire le mettre dans un état reproductible. Ainsi, le mode

de fonctionnement dynamique semble intrinsèquement propice à des résultats reproductibles. Cette reproductibilité simplifie, en perspective, la modélisation des composants.

L'évolution observée des énergies de commutation témoigne d'une transition reproductible de l'état obtenu lorsque le composant est bloqué vers un état stabilisé propre au cyclage en commutation ; suivant l'analyse précédente, ces états peuvent dépendre des paramètres de l'application (tension de blocage, fréquence, etc.). Des détails supplémentaires sur ces expériences ont été publiés [11].

4.2. Phénomènes dynamiques exclusifs : approfondissement

D'autres essais ont été reproduits sur six autres composants p-GaN commerciaux à grille schottky, de référence différente, afin d'explorer le phénomène de transition dynamique observé en figure 5. Ce phénomène semble être accentué par la présence de surtensions transitoires de grille. Ainsi, des séries de commutations similaires à celles décrites en section 3 ont été réalisées, en ne changeant que la valeur maximale de la surtension transitoire de grille, comme présenté en figure 6. Des valeurs de surtension allant de 0 V à 10 V au dessus du plateau de 6 V recommandé par le fabricant ont été imposées à la grille du composant. Il apparaît un phénomène inédit dans la littérature : la résistance à l'état passant évolue de manière drastique avec la valeur des surtensions, comme présenté en figure 7 : jusqu'à 20 Ω , au lieu des 0.4 Ω spécifiés dans la notice du composant. Ce phénomène se traduit par une hausse de la tension de drain à l'état passant, comme en fig. 6.

L'explication physique de ce phénomène pour les faibles (inférieurs à 14 V) OVSs est présentée en figure 8. Le composant GaN HEMT utilisé pour ces essais possède une grille "schottky", c'est à dire constituée d'un empilement métal/p-GaN sur l'AlGaIn/GaN. Cette grille comporte en fait deux diodes internes : une diode schottky par la jonction métal/p-GaN, et une diode "pin" par la jonction p-GaN/AlGaIn.

Lorsque les deux diodes sont bloquées, elles se comportent comme un diviseur de tension capacitif, décrit par l'équation (2). Les tensions sont définies en figure 8.

$$\Delta V_{MP} = \Delta V_g \frac{C_{sch}}{C_{sch} + C_{pin}} \quad (2)$$

Cette équation est en terme de Δ car elle découle de l'égalité du courant dans les deux capacités, qui résulte en une égalité des *incrément*s de charge, i.e. *d'incrément*s de tension. Les capacités sont supposées constantes pour la simplicité de l'explication.

Pour des OVS suffisamment faibles, le gaz 2D peut être considéré complètement établi et donc uniformément à 0 V. Pour une condition initiale des tensions V_g et V_{PM} à 0 V, l'équation (2) est équivalente à un ratio fixe entre V_g et V_{PM} , comme en phase I, fig. 8.

Lorsque la tension de grille augmente, la tension du point milieu est écrétée par la tension de seuil de la diode pin (phase II, fig. 8).

Lorsque la tension de grille s'abaisse, l'équation (2) en incréments est de nouveau applicable, comme en phase III, fig. 8, mais la condition initiale est décalée par la phase II et la tension de seuil de la pin. Cela résulte en un abaissement du point milieu par rapport à une commande sans OVS. Le potentiel du point milieu est directement relié à la densité du gaz 2D d'électrons, et donc à la valeur du R_{ON} .

Ce phénomène, démontré pour la première fois dans le cadre de ces essais, a plusieurs implications. Tout d'abord, la hausse de la résistance à l'état passant débute pour un transitoire à 9 V, soit trois volts au dessus de la valeur du plateau recommandé par le fabricant. Dans la notice du composant, il est spécifié que la *safe operating area* de celui-ci est de 10 V pour une surtension transitoire de grille de 1 μ s au plus. D'après nos essais, la résistance à l'état passant pour une surtension de 10 V et de 20 ns serait pourtant de six fois sa valeur nominale.

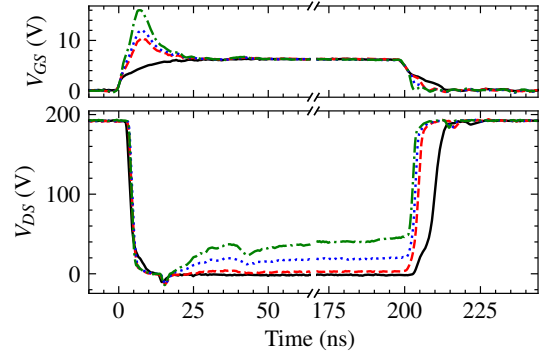


FIG. 6. Différentes tensions sont appliquées sur la grille et impactent directement la valeur de R_{ON} du composant, et donc la tension drain-source.

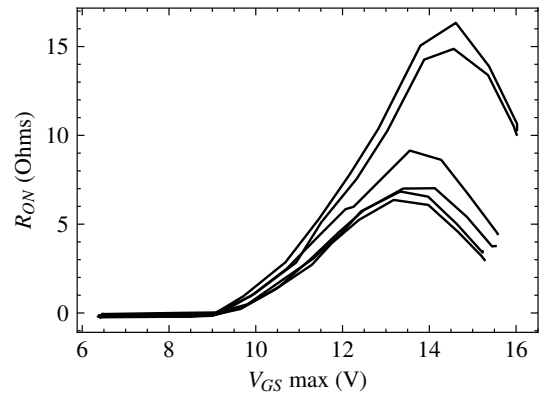


FIG. 7. Augmentation et diminution de la résistance à l'état passant avec la valeur de surtension transitoire de grille.

Ensuite, les mécanismes survenant sous et au dessus de 14 V de surtension sont a priori différents, de par leur impact différent sur la résistance à l'état passant du composant, comme présenté en fig. 7. Actuellement, les tests en vieillissement sont accélérés en augmentant la valeur des surtensions (typiquement autour de 20 V) pour diminuer la durée nécessaire avant casse des composants, et obtenir des résultats plus rapidement par l'utilisation d'une loi de Weibull et d'accélération [12]. L'existence de mécanismes différents pour de fortes et faibles valeurs de surtensions peut indiquer des mécanismes de défaillances divers. Des études supplémentaires sont nécessaires pour approfondir l'impact du phénomène sur le vieillissement.

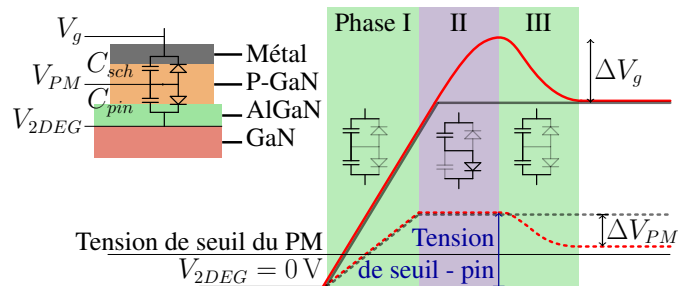


FIG. 8. En rouge : la tension du point milieu (pointillés) est écrétée par la tension de seuil de la diode pin, mais est abaissée par la redescende de la surtension de grille (en traits pleins), ce qui déplète le gaz 2D. Une commande sans surtension est représentée en gris.

5. CONCLUSION

Un phénomène inédit de transition des énergies de commutation est observé sur des composants p-GaN HEMTs placés en fonctionnement dynamique, ainsi qu'un impact drastique des transitoires de tension de grille sur la résistance à l'état passant des composants.

Toutes les mesures sont répétables sans procédure additionnelle, contrairement au comportement connu en tests quasi-statiques. En effet, il apparaît que le mode de fonctionnement dynamique opère sur l'état des composants des effets similaires au préconditionnement des tests statiques.

L'excellente qualité des mesures (sans parasites) permise par l'instrumentation 50 Ω innovante permet une analyse fiable et fine de cette transition. La reproductibilité qui semble inhérente au fonctionnement dynamique facilite, en perspective, la modélisation des p-GaN HEMTs.

Les phénomènes de variation de résistance à l'état passant sont dus à la structure de la grille des p-GaN HEMTs schottky. Les valeurs de R_{ON} obtenues sont de cinquante fois la valeur nominale au maximum observé ; et six fois la valeur nominale dans les conditions préconisées par le fabricant. Ces résultats appellent donc des essais supplémentaires pour cerner leur impact sur le bon fonctionnement des convertisseurs. De plus, ces résultats remettent en cause les méthodologies traditionnelles de vieillissement de grille accéléré.

6. RÉFÉRENCES

- [1] R. Rupp, T. Laska, O. Häberlen, and M. Treu. Application specific trade-offs for WBG SiC, GaN and high end Si power switch technologies. In *2014 IEEE International Electron Devices Meeting*, pages 2.3.1–2.3.4, December 2014.
- [2] L. Ghizzo, D. Trémouilles, F. Richardeau, S. Vinnac, L. Moreau, and N. Mauran. Preconditioning of p-GaN power HEMT for reproducible V_{th} measurements. *Microelectronics Reliability*, 144 :114955, May 2023.
- [3] Jin Wei, Han Xu, Ruiliang Xie, and Kevin J Chen. Principles and impacts of dynamic threshold voltage in a p-GaN gate high-electron-mobility transistor. *Semicond. Sci. Technol.*, 36(2) :024006, February 2021.
- [4] Muqin Nuo, Ming Zhong, Zetao Fan, Yunhong Lao, Lifeng Liu, Maojun Wang, and Jin Wei. Full-Range Investigation of Drain-Dependent Bidirectional Dynamic Threshold Voltage Shift in Schottky-Type p-GaN Gate HEMT. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 72(3) :1021–1026, March 2025.
- [5] A. N. Tallarico, M. Millesimo, B. Bakeroot, M. Borga, N. Posthuma, S. Decoutere, E. Sangiorgi, and C. Fiegna. TCAD Modeling of the Dynamic VTH Hysteresis Under Fast Sweeping Characterization in p-GaN Gate HEMTs. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 69(2) :507–513, February 2022.
- [6] Han Xu, Jin Wei, Ruiliang Xie, Zheyang Zheng, Jiabei He, and Kevin J. Chen. Incorporating the Dynamic Threshold Voltage Into the SPICE Model of Schottky-Type p-GaN Gate Power HEMTs. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 36(5) :5904–5914, May 2021.
- [7] Xuyang Lu, Arnaud Videt, Soroush Farammehr, Ke Li, Vlad Marsic, Petar Igic, and Nadir Idir. Impact of $V_{\text{matsf th}}$ Instability of Schottky-Type p-GaN Gate HEMTs on Switching Behaviors. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 39(9) :11625–11636, September 2024.
- [8] M. Millesimo, B. Bakeroot, M. Borga, N. Posthuma, S. Decoutere, E. Sangiorgi, C. Fiegna, and A. N. Tallarico. Gate Reliability of p-GaN Power HEMTs Under Pulsed Stress Condition. In *2022 IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS)*, pages 10B.2–1–10B.2–6, March 2022.
- [9] Ludovic Roche, David Trémouilles, Emmanuel Marcault, and Corinne Alonso. Study of GaN HEMTs Robustness to Application-Like, Software-Controlled Overshoots Emulating Different Gate Routings in Original 50 Ohms Environment. In *2023 IEEE 10th Workshop on Wide Bandgap Power Devices & Applications (WiPDA)*, pages 1–6, December 2023.
- [10] Joost Willemen, David Johnsson, Yiqun Cao, and Matthias Stecher. A TLP-based characterization method for transient gate biasing of MOS devices in high-voltage technologies. In *Electrical Overstress/Electrostatic Discharge Symposium Proceedings 2010*, pages 1–10, October 2010.
- [11] Ludovic Roche, David Trémouilles, Emmanuel Marcault, and Corinne

Alonso. Static vs. Dynamic Characterization of p-GaN HEMTs : Discrepancies in Electrical Characteristics and their Dependence on Bias History. In *The 26th European Conference on Power Electronics and Applications*, March 2025.

- [12] Bixuan Wang, Ruizhe Zhang, Hengyu Wang, Quanbo He, Qihao Song, Qiang Li, Florin Udrea, and Yuhao Zhang. Dynamic Gate Breakdown of p-Gate GaN HEMTs in Inductive Power Switching. *IEEE Electron Device Letters*, 44(2) :217–220, February 2023.