

Présentation d'une méthodologie d'évaluation de la stabilité de la grille de transistors de puissance Grands Gaps en fonctionnement en fréquence

Marc ORSATELLI, Lucas MOREAU, Cyril CHABOT, Alonso GUTIERREZ-GALEANO, Emmanuel MARCAULT, Mathieu GAVELLE

CEA, Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives, 51 rue de l'Innovation, 31670 Labège

RESUME – Les transistors de puissance Grands Gaps présentent des performances très intéressantes en comparaison avec leur équivalent en Silicium. Cependant, ils sont impactés par des effets dynamiques, qui peuvent induire une modification de la résistance d'état passant du transistor de puissance (GaN/Si) ou provoquer un décalage de V_{TH} pendant le fonctionnement (SiC et GaN/Si). Pour évaluer ces phénomènes en fonctionnement en fréquence, un banc de test de commutation en MultiPulse spécifique a été développé. Basé sur les signaux extraits, une méthodologie a été mise en œuvre afin d'évaluer la stabilité de la grille pendant le fonctionnement du dispositif, par extraction d'un indicateur de la tension de seuil en fonctionnement dynamique. L'objectif de cet article est de présenter une méthodologie d'extraction de la tension de seuil dynamique, se voulant être une méthode simple à mettre en place pour évaluer la stabilité de la grille lors de tests représentatifs des cas applicatifs.

Mots-clés—Composants Grand Gaps, GaN HEMT, SiC, cellule de commutation, fiabilité, vieillissement, analyse de données.

1. INTRODUCTION

Les nouvelles générations de dispositifs de puissance basées sur les technologies GaN/Si et SiC démontrent de bien meilleures performances par rapport à la technologie Si traditionnelle. Cependant, ils sont affectés par des phénomènes qui peuvent entraîner un vieillissement prématuré lorsqu'ils sont utilisés dans des applications, comme des effets de piégeage conduisant à l'effondrement du courant et au décalage de la tension de seuil V_{TH} pour les technologies GaN/Si [1] [2] ou la dérive de V_{TH} dans les MOSFET de puissance SiC [3]. Ces effets peuvent considérablement perturber le fonctionnement et les performances des applications dans lesquelles ces composants sont intégrés. Des travaux ont été effectués pour caractériser le V_{TH} via des méthodes de pré-conditionnement pour le SiC (JEDEC JEP183[4]) mais également pour le GaN/Si [5][6][7]. Ces méthodes de pré-conditionnement sont réalisées essentiellement en fonctionnement statique via des caractérisations statiques, adaptées au binning, aux tests paramétriques et quasi-statiques sur les dispositifs de puissance. Cependant, elles peuvent ne pas décrire correctement le comportement réel du dispositif dans des conditions applicatives [8].

Pour vérifier la stabilité de la grille en fonctionnement dynamique du composant, nous proposons une méthodologie basée sur l'extraction d'un nouveau paramètre, représentatif de l'évolution de V_{TH} pendant la commutation. Ce paramètre est un indicateur dynamique et diffère de la tension de seuil V_{TH} , ce

dernier étant extrait via des caractérisations spécifiques en régime statique. Dans le document suivant, ce paramètre dynamique est appelé « v_{th} dynamique », par analogie avec le $R_{DS(on)}$ dynamique pour les composants GaN/Si, ou « AC v_{th} », car il est extrait lors du fonctionnement en fréquence du dispositif. Cette méthode se veut être simple à mettre en place et peut être utilisée pour des essais de vieillissement en dynamique ou de fiabilité (DHTOL par exemple).

2. BANC DE COMMUTATION EN FREQUENCE

Un banc de caractérisation en commutation en multi-pulse a été développé pour évaluer les performances des dispositifs dans des conditions proches de l'application, initialement pour les tests GaN/Si, en suivant les recommandations de JEDEC JEP173 [9], comme présenté dans la Figure 1.

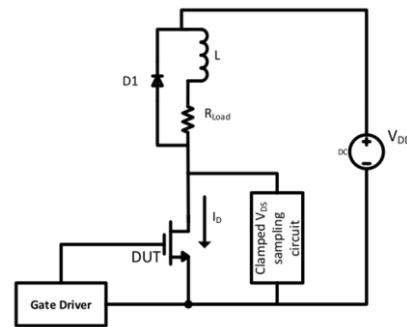


Fig. 1. Schéma du banc MultiPulse issu des recommandations du JEDEC JEP173 sous charge inductive et résistive.[9]

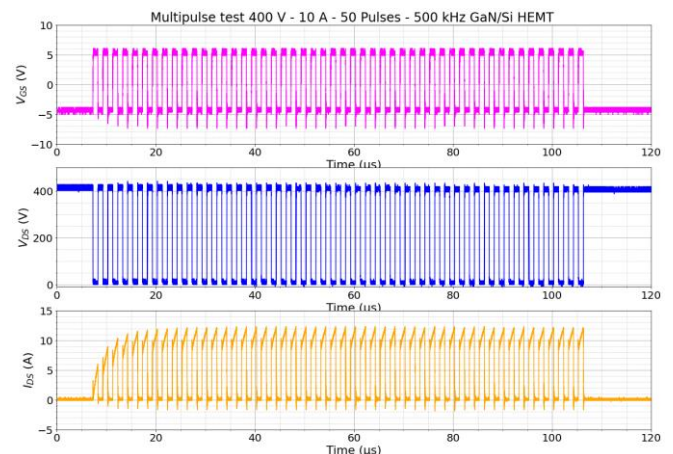


Fig. 2. Formes d'ondes d'un test de MultiPulse Switching réalisé à 400 V – 10 A sur composant GaN/Si HEMT E-mode à 25°C. Signaux : tension de grille V_{GS} en magenta, tension de drain V_{DS} en bleu, et courant I_{DS} en orange. Bande passante des signaux = 500 MHz. Fréquence d'échantillonnage = 5 GHz.

Des formes d'ondes d'un test MultiPulse Switching réalisés à 400 V – 10 A sur un transistor GaN/Si HEMT E-mode sont présentés dans la Figure 2.

Les conditions de test sont : fréquence de commutation = 500 kHz ; $T_{ON} = T_{OFF} = 1 \mu s$; $R_{G(ON)} = 6 \Omega$; $R_{G(OFF)} = 1 \Omega$; $R_{Load} = 20 \Omega$ et $L_{Load} = 65 \mu H$; Nombre de pulses = 50 ; durée de fonctionnement = 100 μs (pour négliger l'auto-échauffement du composant).

3. PRESENTATION DE LA METHODE D'EXTRACTION DU V_{TH} DYNAMIQUE

L'extraction du v_{th} dynamique est effectuée à partir des formes d'ondes de la tension de grille V_{GS} et du courant I_{DS} à la fermeture du transistor, comme présenté dans la Figure 3.

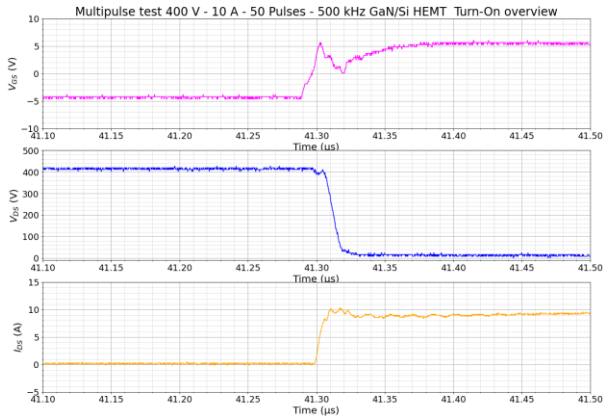


Fig. 3. Zoom à la fermeture issu des formes d'ondes de la figure 3 du test de MultiPulse Switching test réalisé à 400 V – 10 A sur composant GaN/Si HEMT E-mode à 25°C.

Ces formes d'ondes permettent alors de construire une caractéristique $I_{DS} = f(V_{GS})$ en dynamique (Figure 4) où l'on s'intéresse au début de la commutation, c'est-à-dire pour $I_{DS} < 1$ A. Au-delà de 1 A, on peut considérer que la grille du composant a dépassé son seuil et que le composant est passant. Un traitement des données simple est alors réalisé, et la valeur du AC v_{th} est extraite comme étant la tension V_{GS} pour laquelle la dérivée de la caractéristique est positive.

Les variations et irrégularités des données brutes (en bleu) sont dues à la fréquence d'échantillonnage élevée (12.5 GHz) et au bruit de digitalisation. En vert, les données "nettoyées", utilisant une valeur seuil K déterminée en fonction du bruit déterminé (rouge). Si $I_{DS} < K$ alors I_{DS} est mis à 0.

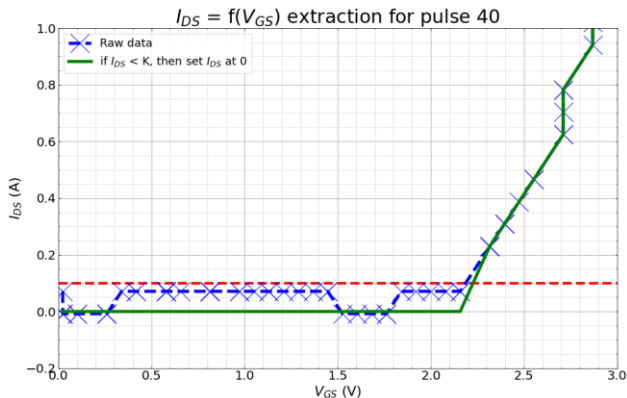


Fig. 4. Caractéristique $I_{DS} = f(V_{GS})$ construite à partir des signaux V_{GS} et I_{DS} à la fermeture (ici, pour le 40^{ème} pulse de courant), pour $I_{DS} < 1$ A. En bleu, les données brutes du $I_{DS} = f(V_{GS})$.

En automatisant ce traitement pour chaque pulse, on peut tracer l'évolution du AC v_{th} durant le fonctionnement du composant (Fig. 5).

Evolution of V_{TH} with pulse

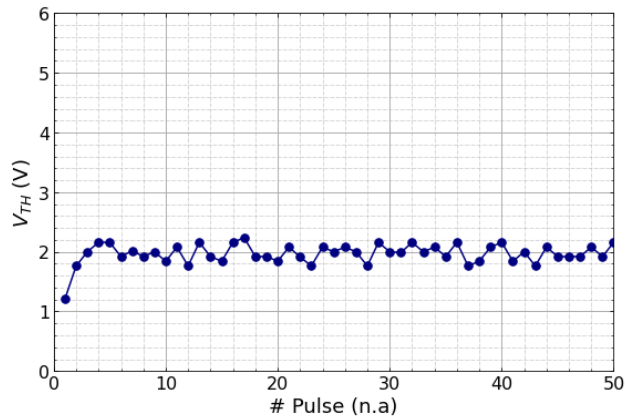


Fig. 5. Evolution du AC v_{th} pour chaque pulse, à 25°C

4. RESULTATS

Dans cette partie sont exposés des résultats issus d'essais en MultiPulse Switching opérés sur plusieurs composants de puissance du commerce. Nous nous concentrons ici sur l'extraction du v_{th} dynamique, comme explicité dans la partie précédente.

Le Tableau 1 présente les conditions de test des différents composants évalués. Pour les dispositifs Si et SiC, les tensions $V_{GS(off)}$ et $V_{GS(on)}$ sont respectivement -2 V et 15 V. A noter que les références des composants GaN/Si testés ici sont différentes du précédent présenté dans les parties II et III.

DUT	Technologie	V_{DS}	I_{DS}	Fréq.
DUT 1	GaN/Si HEMT pGaN	400 V	10 A	500 kHz
DUT 2	GaN/Si HEMT pGaN	160 V	10 A	500 kHz
DUT 3	Si IGBT	400 V	10 A	250 kHz
DUT 4	SiC MOSFET	400 V	10 A	500 kHz

Tab. 1. Liste des composants évalués et des conditions de test. Les essais sont réalisés à 25°C.

La Figure 6 suivante présente les résultats des extractions du v_{th} dynamique selon la méthodologie présentée sur les 4 composants du commerce.

Evolution of dynamic v_{th} with pulses at 25°C

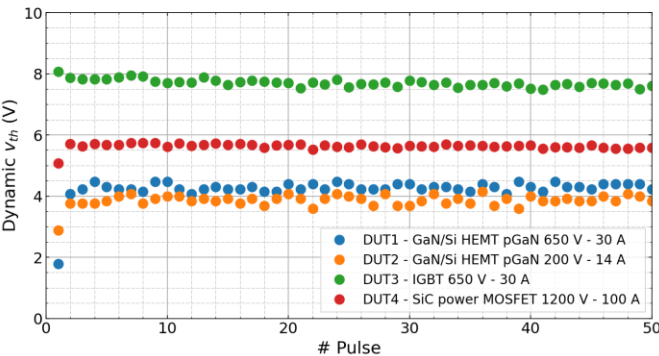


Fig. 6. Evolution du AC v_{th} des composants du commerce évalués, pour chaque pulse, à 25°C.

Chaque point présente la valeur extraite pour un pulse de courant. Cette visualisation permet de vérifier la stabilité de la grille pendant l'essai, ici de 50 pulses.

Nous pouvons observer que les composants GaN/Si présentent des valeurs significativement plus faibles que les dispositifs Si et SiC, ce qui est attendu.

Nous pouvons également observer que les valeurs extraites sont relativement élevées comparées à celles du V_{TH} classique (DC V_{TH} à environ 1.5 V en typique pour les composants GaN/Si, 3.0 V typique pour le SiC et 5.1 V typique pour le Si). Cependant, les valeurs extraites ici ne pourraient être comparées avec leurs V_{TH} statiques, mesurés de façon conventionnelle.

En effet, la tension de seuil V_{TH} est en général donnée pour des valeurs de courant de l'ordre du mA. Or en dynamique, il peut être difficile d'avoir la résolution nécessaire pour mesurer avec exactitude des courants si faibles. Comme nous pouvons le voir sur la Figure 4, l'ordre de grandeur du courant pour l'extraction du AC v_{th} est plutôt de l'ordre de la centaine de mA, ce qui peut expliquer en partie que les AC v_{th} sont plus élevés que les V_{TH} DC. De plus, contrairement au régime stationnaire, les composants présentent un certain délai entre la commande et la réponse du transistor lors de la commutation. A la fermeture, ce délai est appelé t_{don} et impacte directement l'extraction du AC v_{th} en décalant les valeurs vers les valeurs positives.

On peut également observer que les composants GaN/Si et SiC présentent une variation notable entre le 1^{er} point et les autres, contrairement au composant Si qui reste stable tout au long de l'essai. Cette augmentation pourrait s'expliquer par un phénomène de piégeage bien connu sur les composants GaN/Si suite à un stress, et à une stabilisation du V_{TH} pour le SiC suite à un stress en tension. Néanmoins, il est important de garder à l'esprit qu'il s'agit d'un essai dynamique sous charge inductive. Le courant met un certain nombre de pulses pour atteindre son niveau nominal, et les variations observées peuvent être dues simplement au fait que le courant n'est pas encore suffisant au 1^{er} pulse. Il est toutefois intéressant de voir que le phénomène n'apparaît pas pour le composant Si qui, par nature, n'est pas impacté par des variations de sa tension de seuil. Des essais complémentaires permettraient de déterminer la cause exacte de ces variations.

Enfin, nous pouvons observer que les valeurs sont relativement stables pendant l'essai pour chacun des dispositifs, sans tendance particulière. Cet essai, bien que réalisé dans des conditions applicatives cohérentes, reste très court, essentiellement pour s'affranchir de l'auto-échauffement du DUT. La partie suivante présente des résultats issus d'essais sur des temps plus longs.

5. RESULTATS EN SEQUENCE MULTIPULSE REPETES

L'essai réalisé ici est une séquence de MultiPulse répétitif séparé par 10 secondes de stress V_{DS} . Chaque test de commutation MultiPulse est réalisé dans les conditions exposées en partie II et dans le tableau 1.

Cette séquence permet de simuler un temps d'opération « long » tout en limitant au maximum l'auto-échauffement, et donc à T_j constant, sans avoir à réaliser une boucle de régulation ou une dissipation thermique suffisante pour maintenir une température constante. Pour chaque train de MultiPulse, on extrait les signaux comme exposé en Figure 2. Le traitement des données reste également identique.

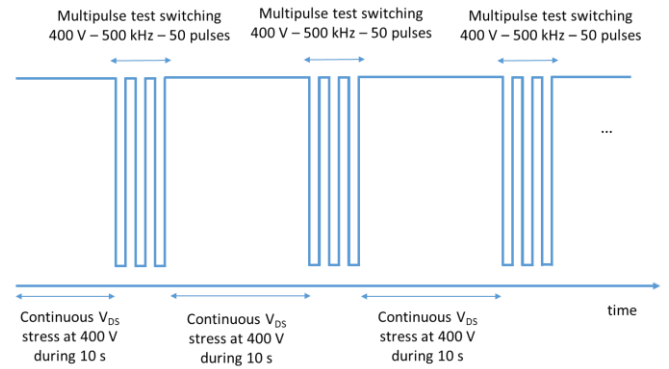


Fig. 7. Séquence de MultiPulses répétitifs.

Pour cette étude, nous avons choisi de réaliser 30 MultiPulses séparés de 10 secondes de polarisation statique, simulant un fonctionnement d'environ 5 minutes. Les Figures 8 à 11 exposent les résultats des extractions des valeurs de v_{th} dynamique pour les composants listés dans le Tableau 1.

Les valeurs sont affichées en boxplot, afin d'observer l'évolution globale pendant le fonctionnement ainsi que les dispersions pour chaque train de pulse. Chaque box contient l'ensemble des valeurs extraites lors d'un essai MultiPulse, moins les 10 premières valeurs (ou 10 premiers pulses), pour ne garder que les pulses à courant nominal.

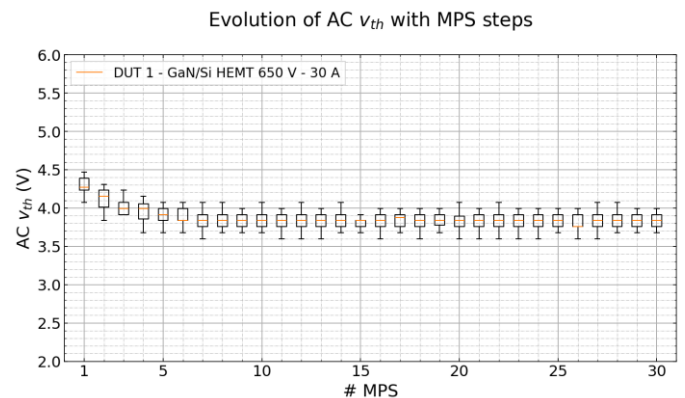


Fig. 8. Evolution et dispersion des valeurs de AC v_{th} pour une séquence MultiPulse à 400 V – 10 A sur un composant du commerce p-GaN GaN/Si HEMT 650 V – 30 A (DUT 1).

Dans l'ensemble, les dispersions et valeurs médianes des v_{th} dynamiques restent stable pendant la durée des essais.

Seul le composant GaN/Si 650 V – 30 A (DUT 1), présente des valeurs élevées au début de l'essai, puis une diminution, et une stabilisation après quelques trains de pulses. Néanmoins, le AC v_{th} reste stable pendant l'essai, indiquant que les composants ne semblent pas présenter de dégradation dans ces conditions.

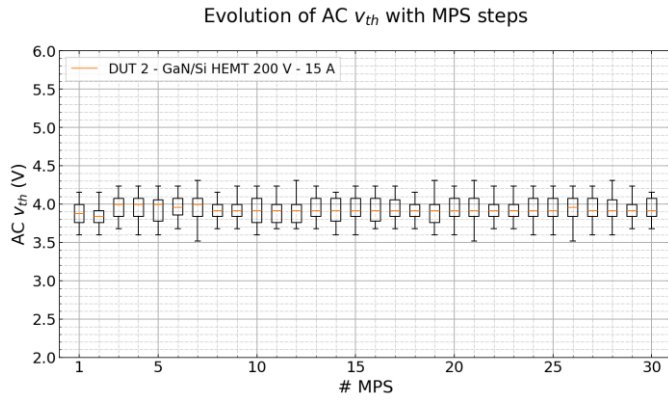


Fig. 9. Evolution et dispersion des valeurs de AC v_{th} pour une séquence MultiPulse à 160 V – 10 A sur un composant du commerce p-GaN GaN/Si HEMT 200 V – 15 A (DUT 2)

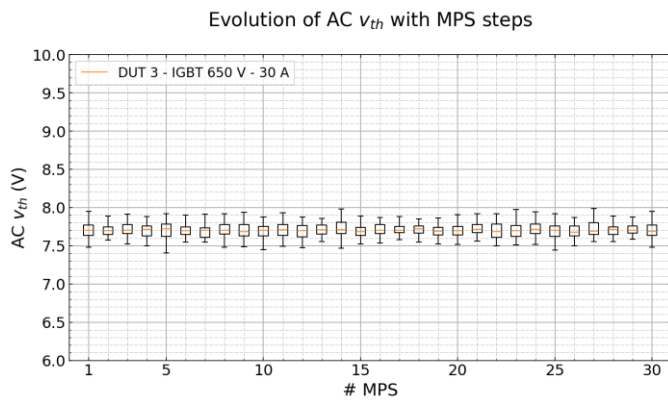


Fig. 10. Evolution et dispersion des valeurs de AC v_{th} pour une séquence MultiPulse à 400 V – 10 A sur un composant du commerce IGBT 650 V – 30 A (DUT 3).

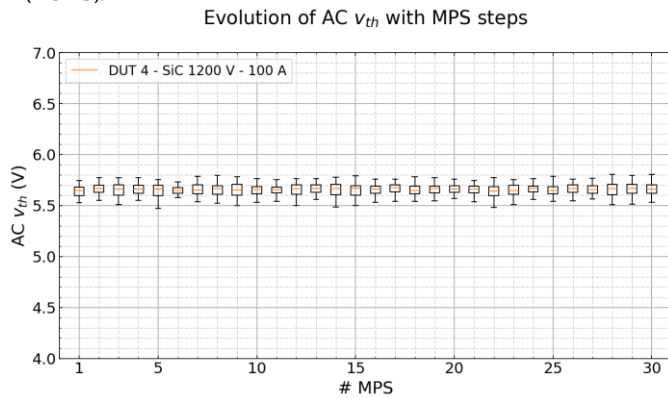


Fig. 11. Evolution et dispersion des valeurs de AC v_{th} pour une séquence MultiPulse à 400 V – 10 A sur un composant du commerce SiC MOSFET 1200 V – 100 A (DUT 4).

6. CONCLUSIONS & DISCUSSIONS

La stabilité de la grille d'un composant GaN/Si a été évaluée grâce à des signaux issus du fonctionnement dynamique et à la mise en œuvre d'une méthodologie pour extraire un nouvel indicateur de la tension de seuil pendant la commutation.

Des mesures et des extractions ont été effectuées sur des références commerciales de dispositifs de puissance, GaN/Si, Si, et SiC. Les résultats obtenus sur ces dispositifs de puissance

n'ont pas montré de tendance de variation du AC v_{th} pendant les essais, malgré des dispersions notables des valeurs extraites. Ces dispersions sont principalement dues au bruit de numérisation des formes d'onde et au traitement des données appliqué aux mesures, pouvant entraîner des imprécisions potentielles. Ceci pourrait être atténué en réduisant le bruit de numérisation et en appliquant une caractérisation métrologique : analyse statistique, développement d'un traitement de signal spécifique...

L'extraction du paramètre proposée ici et son étude pendant le fonctionnement des composants (GaN/Si notamment) peut fournir de nouvelles informations sur l'état du dispositif, et mener à une compréhension plus poussée des phénomènes de piégeage en fonctionnement dans des conditions applicatives.

Les prochaines étapes de cette étude consisteront à réaliser de nouveaux essais de commutation MultiPulse en faisant varier d'autres paramètres tels que la fréquence de commutation, la température, la tension, etc. En outre, il sera intéressant d'évaluer le comportement des dispositifs de puissance et leur stabilité en utilisant des tests de fonctionnement plus longs, et lors d'essais de vieillissement en fonctionnement nominal (DHTOL par exemple).

7. REMERCIEMENTS

Ces travaux sont issus de l'IPCEI « Microelectronics and Connectivity » et soutenus par les pouvoirs publics français dans le cadre de France 2030.

8. REFERENCES

- [1] Zongqi Cai et al., "The investigation of threshold voltage instability of p-GaN AlGaIn/GaN HEMT caused by the measurement," 2023 24th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT), Shihezi City, China, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICEPT59018.2023.10492197.
- [2] R. Escoffier et al., "Analytic Model of Threshold Voltage (V_{TH}) Recovery in Fully Recessed Gate MOS-Channel HEMT (High Electron Mobility Transistor) after OFF-State Drain Stress". *Energies* 2022. <https://doi.org/10.3390/en15030677>.
- [3] T. Aichinger et al., "Threshold voltage peculiarities and bias temperature instabilities of SiC MOSFETs," *Microelectronics Reliability* 80 (2018).
- [4] JEP 183 Guidelines for Measuring the Threshold Voltage (V_T) of SiC MOSFETs. January 2023.
- [5] 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, pp. 1-6, doi: 10.1109/WiPDAEurope55971.2022.9936437.
- [6] A. Deb et al., "Unipolar and Bipolar Pulsed Gate Stresses and Threshold Voltage Shifts in GaN e-HEMTs," 2022 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Detroit, MI, USA, 2022, pp. 1-7, doi: 10.1109/ECCE50734.2022.9947415.
- [7] L. Ghizzo et al., "Preconditioning of p-GaN power HEMT for reproducible V measurements. *Microelectronics Reliability*". 144. 10.1016/j.microrel.2023.114955.
- [8] E. Marcault et al., "Dynamic of power-GaN-HEMT electrical parameters: Why DC characterization might be misleading," 2016 18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe), Karlsruhe, Germany, 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/EPE.2016.7695492.
- [9] JEDEC JEP173, "Dynamic ON-Resistance Test Method Guidelines for GaN HEMT based Power Conversion Devices", Version 1.0, January 2019.