

Méthode de caractérisation sur plaquette de diodes GaN latérales pour le suivi des mesures I(V) au cours de tests de fiabilité

Geoffroy ROUVRE^{1, 2}, Nathanaël GRILLON², Nathalie MALBERT-SAYSSET¹, Loïc THEOLIER¹

¹ Univ. Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, IMS, UMR 5218, F-33400 Talence, France

² STMICROELECTRONICS, 10 rue Thalès de Milet, Tours, France

RÉSUMÉ - Dans le cadre des études de fiabilité de composants à base de GaN, l'instabilité des indicateurs de dégradation est problématique, car il est nécessaire de décorréler la variation due au vieillissement et celle due à l'état des pièges du composant. Une étape de préconditionnement doit être appliquée avant la caractérisation électrique des diodes Schottky latérales GaN pour s'affranchir de l'état des pièges dans la structure. Cette étude se propose d'évaluer l'impact de plusieurs paramètres pouvant intervenir dans la reproductibilité de la caractérisation de la diode dans ses deux modes de fonctionnement pour conclure sur une procédure recommandée dans le cadre de vieillissement de diodes Schottky sur plaquette.

Mots-clés— Diode Schottky GaN, méthode de caractérisation, instabilité du courant de fuite, instabilité de la résistance à l'état passant, fiabilité.

1. INTRODUCTION

Dans le contexte actuel d'innovation technologique, les composants de puissance à base de nitrure de gallium (GaN) se distinguent par leur efficacité énergétique et leur densité de puissance [1]. STMicroelectronics s'engage à accompagner la transition technologique en développant des composants GaN, notamment des diodes Schottky. Pour que ces dispositifs soient adoptés à grande échelle, ils doivent atteindre un niveau de fiabilité au moins équivalent à celui des dispositifs en silicium. Cependant la modélisation des mécanismes intrinsèques de dégradation des composants GaN est encore mal maîtrisée, ce qui peut représenter un frein important pour leur qualification et industrialisation. Typiquement, le test de vieillissement accéléré normalisé HTRB (High Temperature Reverse Bias) doit permettre, en fonction des applications, de garantir un fonctionnement nominal en régime bloqué, sur plusieurs décennies [2].

Pour évaluer les mécanismes de dégradation des diodes GaN, il est crucial de mesurer les caractéristiques électriques au cours des tests de vieillissement accélérés, en identifiant les dégradations irréversibles ou en suivant les dérives des paramètres critiques. Des mesures stables et reproductibles sont indispensables pour différencier les dérives associées à une dégradation du composant de celles associées aux conditions de mesures. Cet article présente le travail réalisé pour mettre en place une méthode de caractérisation sur plaquette de diodes GaN latérales, pour le suivi des caractérisations électriques I(V) en direct et en inverse.

2. PROBLÉMATIQUE ET MÉTHODOLOGIE

2.1. Technologie étudiée

L'étude porte sur des diodes Schottky latérales GaN fabriquées sur des plaquettes de silicium de 8 pouces à ST Tours (Figure 1). La structure épitaxiale repose sur l'hétérojonction AlGaIn/GaN. La conduction s'effectue latéralement au sein d'un gaz bidimensionnel d'électrons (2DEG) formé à l'hétérojonction AlGaIn/GaN. Les électrodes sont réalisées par dépôt de couches métalliques sur la surface de GaN après gravure de la couche AlGaIn. Un contact ohmique est formé sur la cathode, tandis qu'un contact Schottky est formé sur l'anode. Cette diode est conçue pour fonctionner avec l'anode reliée au substrat et peut supporter une tension inverse nominale de 650 V et un courant direct maximum de 6 A.

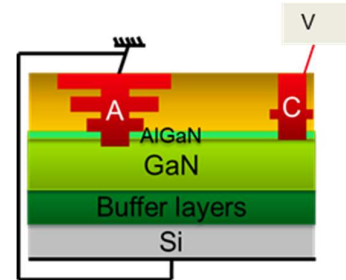


Figure 1 : Structure de la diode Schottky latérale GaN

2.2. Problématique

Pour modéliser les mécanismes de dégradation des diodes GaN en régime bloqué, des campagnes de vieillissements accélérés de type HTRB sont envisagées. Les paramètres critiques à surveiller incluent le courant de fuite inverse (I_r) en régime bloqué, dont la dégradation est suivie en temps réel. La littérature établit un lien entre une hausse brutale du courant de fuite et le pic de champ électrique localisé proche du coin de l'anode [3], [4]. En régime passant, la tension de seuil (V_{th}) et la résistance à l'état passant (R_{on}) sont des paramètres critiques dont la dérive est liée à des phénomènes de piégeage d'électrons près de l'anode [5], [6], [7].

Durant les campagnes de vieillissement de type HTRB, les paramètres critiques sont mesurés à intervalles de temps réguliers. Durant l'essai de vieillissement, une caractérisation complète des composants est réalisée à 25 °C et 150 °C pour établir un référentiel. Pendant le vieillissement, le courant de

fuite inverse est mesuré en continu. Entre chaque période de vieillissement, des mesures de reprises doivent être effectuées de manière rapide, simple et fiable, pour évaluer l'état de dégradation du composant. Pour ces mesures, réalisées à 25 °C, la température du chuck de la station sous pointe est abaissée. Dans le cas d'un vieillissement à 150 °C, la descente à 25 °C nécessite 13 minutes sur notre station sous pointes.

Les composants à hétérojonction AlGaIn/GaN peuvent présenter des problèmes de reproductibilité de mesures liés à l'état de charge de la structure et à l'historique des mesures [8]. Ces problèmes ont été rapidement identifiés lors des premières caractérisations à 25 °C dans les deux modes de fonctionnement de la diode. En effet, la Figure 2 présente les mesures I(V) en inverse et en direct, mesurées deux fois consécutivement. Nous pouvons observer que les mesures ne sont pas superposables. À l'état bloqué, le courant de fuite à 300 V augmente de 45 % lors de la deuxième mesure. À l'état passant, une augmentation de 11 % de la résistance est observée. Ces instabilités compromettent l'interprétation des dérives liées aux vieillissements.

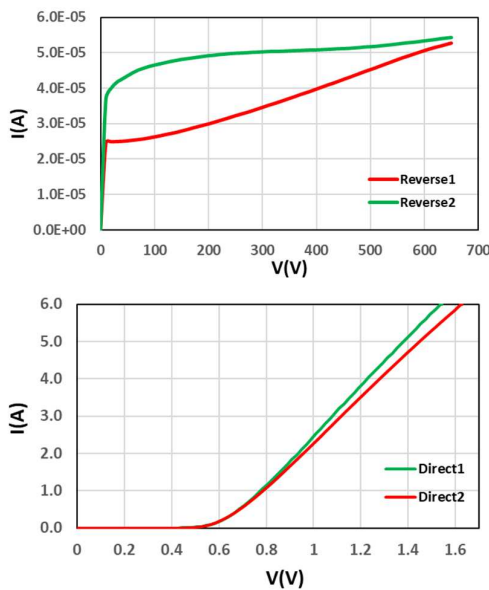


Figure 2 : Instabilités des mesures I(V) de la diode en inverse et en direct

Pour résoudre ces problèmes, une méthodologie a été mise en place afin d'évaluer l'influence des conditions de mesures sur la reproductibilité des caractéristiques intrinsèques, l'objectif étant la création d'un protocole de caractérisation stable et reproductible.

2.3. Méthodologie

Une méthodologie a été développée pour étudier la reproductibilité des caractérisations. Pour assurer l'intégrité des mesures, un écart relatif de 10 % pour le courant de fuite inverse entre deux mesures et un écart relatif de 5 % pour la tension de seuil et la résistance à l'état passant ont été fixés arbitrairement. En effet, il est attendu qu'au cours du test de vieillissement accéléré, l'évolution de ces paramètres soit significativement supérieure à la dérive relative à la mesure [3], [9], [10].

Dans le cadre d'un préconditionnement, des conditions de mesures ont été identifiées et leur influence a été étudiée. Le plan d'expérience consiste à fixer un ensemble de conditions avant d'évaluer l'influence de chacune séparément. Le Tableau 1 regroupe les conditions étudiées et les valeurs testées.

L'étude a d'abord porté sur la caractérisation en inverse, où les instabilités de mesure sont les plus problématiques. Les protocoles ont ensuite été appliqués à la caractéristique en direct. Enfin, l'impact du sens de la séquence de caractérisation a été évalué.

En pratique, cette étude a été menée sur l'ensemble des puces de la plaquette. Cependant, pour des raisons de lisibilité, seuls les résultats d'une puce représentative sont exposés dans chaque figure.

Tableau 1 : Paramètres étudiés durant le plan d'expérience

Grandeur	Conditions de mesure	Valeurs comparées
Temporelle	Intervalle entre mesures successives	1 s et 10 s pour un I(V) en inverse
		1 s et 10 s pour un I(V) en direct
Temporelle	Durée du palier de préconditionnement à 150 °C	Aucune, 30 min, 15 min, 5 min avant un I(V) en inverse
		Aucune, 15 min avant un I(V) en direct
Temporelle	Intervalle entre le préconditionnement et la mesure	0 min, 24 h, 48 h avant un I(V) en inverse
		0 min, 24 h avant un I(V) en direct
Séquentielle	Ordre des caractérisations	I(V) en inverse puis I(V) en direct
		I(V) en direct puis I(V) en inverse

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Reproductibilité de la caractéristique en inverse

3.1.1. Intervalle entre des mesures I(V) successives

Pour évaluer la reproductibilité des mesures I(V) en inverse, des séquences successives ont été réalisées à 25 °C, pour une tension allant de 0 à 650 V, avec deux intervalles de mesure : 1 seconde (Figure 3a) et 10 secondes (Figure 3b).

Dans les deux scénarios, la première mesure inverse IV1 présente un courant de fuite inférieur à celui des mesures suivantes, mettant en évidence la non-reproductibilité de la mesure. La stabilisation des mesures est observée à partir de la troisième mesure, IV3, pour un intervalle de 1 seconde entre chaque mesure, tandis que la deuxième mesure IV2 est déjà stabilisée pour un intervalle de 10 secondes.

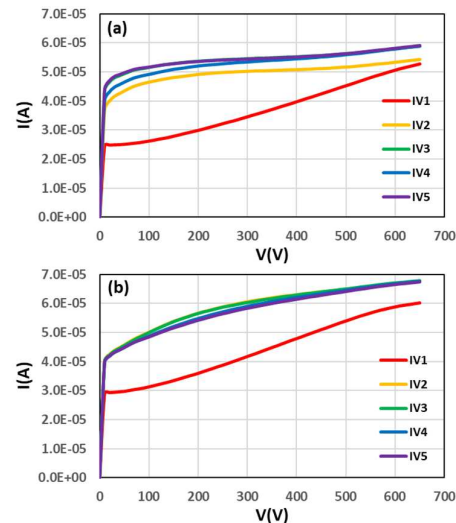


Figure 3 : Évolution de la caractéristique inverse pour 5 mesures I(V) successives à 25 °C, avec un intervalle de mesure de (a) 1 s, (b) 10 s

Ainsi, pour obtenir une caractéristique inverse stable et reproductible, un protocole de mesure avec une mesure « sacrificielle » est adopté. Ce protocole consiste à réaliser une première mesure *IV1*, suivie par 10 secondes de pause, puis à réaliser une seconde caractéristique *IV2*. Ce protocole est appliqué dans toutes les études suivantes, et seules les caractéristiques *IV2* sont présentées dans la suite de cet article.

3.1.2. Durée d'un préconditionnement thermique

Les tests de vieillissement étant réalisés à haute température, l'utilisation d'un préconditionnement lors des caractérisations initiales permet de reproduire les conditions expérimentales similaires en température entre les caractérisations initiales et les mesures de reprises durant le vieillissement, qui elles, sont réalisées à 25 °C.

De ce fait, l'effet d'un préconditionnement thermique à 150 °C, sur la répétabilité des caractérisations a été étudié. Cette étape est constituée d'une montée en température de 13 minutes, d'un palier à 150 °C d'une durée variable puis d'une descente en température de 13 minutes. La littérature montre un effet de stabilisation de l'état de charge des composants en maintenant les puces à 150 °C pendant 30 minutes, sans polarisation [11].

La Figure 4 présente les caractéristiques *I(V)* inverse à 25 °C pour une puce vierge et une puce ayant subi un préconditionnement thermique de 30 min à 150 °C. Les mesures *I(V)* à 25 °C, sur des puces vierges, montrent un décalage du courant de 2 % pour des tensions inférieures à 300 V, tandis qu'aucun décalage n'est visible pour des tensions supérieures à 300 V. Pour optimiser la durée du préconditionnement, des mesures ont été réalisées pour des durées de 30, 15 et 5 minutes à 150 °C. Les résultats illustrés dans la Figure 5 montrent que les durées de préconditionnement de 15 minutes et 5 minutes entraînent des décalages de 3 % du courant à 300 V et 1 % à 650 V par rapport à la durée de 30 minutes.

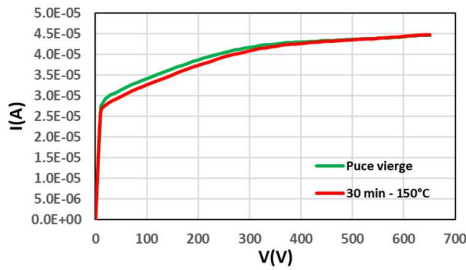


Figure 4 : Mesures *I(V)* en inverse à 25 °C pour une puce vierge et une puce ayant subi un préconditionnement thermique de 30 min à 150 °C

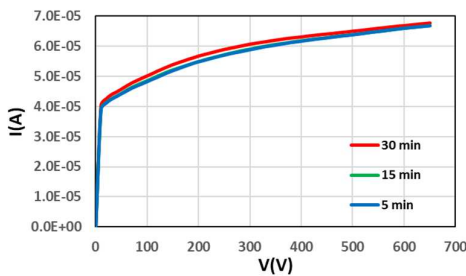


Figure 5 : Mesures *I(V)* en inverse à 25 °C pour trois conditions de durée de préconditionnement thermique à 150 °C

Ces résultats démontrent qu'un préconditionnement thermique a peu d'influence sur les caractéristiques inverses.

3.1.3. Intervalle entre le préconditionnement et la mesure

L'impact de l'intervalle de temps de repos entre un préconditionnement thermique de 5 minutes, et une mesure à 25 °C a été étudié. La Figure 6 montre les mesures *I(V)* pour trois conditions de repos : un temps de repos minimum (13 minutes) dû à la descente en température de l'équipement, et un repos de 24 heures et 48 heures. Le courant de fuite diminue de 5 % pour un temps de repos de 24 heures mais cette diminution n'évolue pas pour des temps plus longs.

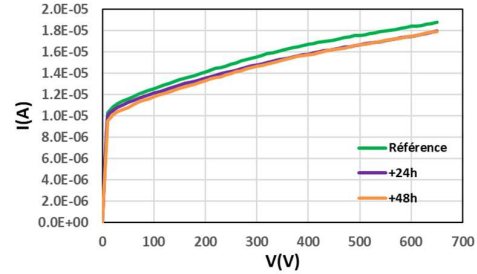


Figure 6 : Mesures *I(V)* inverses à 25 °C pour différents intervalles entre préconditionnement et mesure

Ces observations indiquent que le temps de repos après le préconditionnement thermique influence modérément la stabilité des mesures *I(V)*. Néanmoins, cette instabilité est inférieure à l'écart maximum établi et n'évolue pas au-delà de 24 heures de repos.

Un préconditionnement de 5 minutes à 150 °C suivi d'un délai d'attente de 48 heures entraîne un écart de mesure cumulée inférieure à 10 %. Cette incertitude reste inférieure au critère maximum défini initialement.

3.2. Reproductibilité de la caractéristique en direct

3.2.1. Intervalle entre des mesures *I(V)* successives

Des séquences de mesures *I(V)* successives, à 25 °C, pour des tensions allant de 0 à 1,5 V, avec une compliance à 6 A, ont été réalisées avec des intervalles de temps de 1 seconde (Figure 7a) et 10 secondes (Figure 7b).

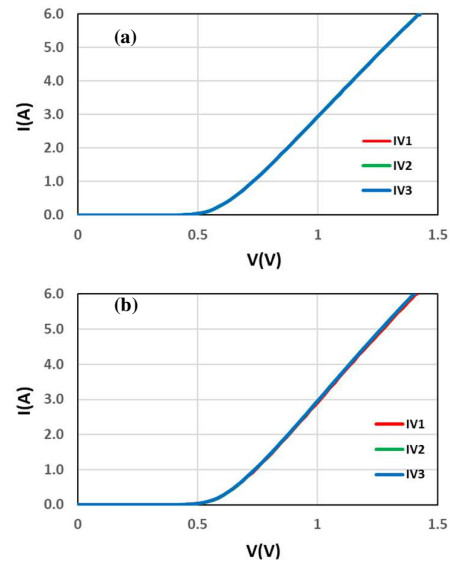


Figure 7 : Évolution de la caractéristique directe pour 3 mesures *I(V)* successives à 25 °C, avec un intervalle de mesure de (a) 1 s, (b) 10 s

Dans les deux conditions, les caractéristiques sont stables et répétables. La tension de seuil (V_{th}), mesurée pour un courant de 100 mA varie de moins de 0,5 % tandis que la résistance à l'état passant (R_{on}), calculée au-delà de 1 A, varie de moins de 1 %.

Ces résultats montrent que l'instabilité de la caractéristique en direct, mentionnée dans la problématique, n'est pas due uniquement à la succession de mesures à l'état passant.

3.2.2. Impact d'un préconditionnement thermique

L'effet d'un préconditionnement thermique à 150 °C sur la répétabilité des caractéristiques a été exploré. Les mesures I(V) en direct à 25 °C, sur des puces vierges, montrent une bonne reproductibilité avec une instabilité inférieure à 0,5 % pour V_{th} et inférieure à 1,5 % pour R_{on} (Figure 8).

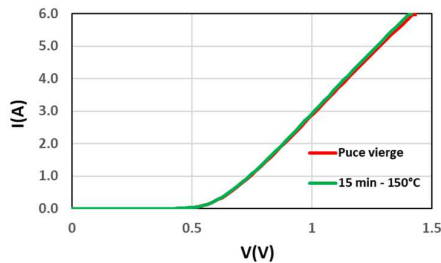


Figure 8 : Impact d'un préconditionnement de 15 minutes à 150 °C sur la mesure I(V) en direct à 25 °C

Ces résultats démontrent qu'un préconditionnement thermique n'est pas utile pour garantir la stabilité des caractéristiques en direct à 25 °C.

3.2.3. Intervalle entre préconditionnement et mesure

L'impact du temps de repos entre le préconditionnement thermique et la mesure en direct a été étudié. Les mesures I(V) obtenues (Figure 9) présentent les résultats des mesures après un préconditionnement de 15 minutes à 150 °C, sans repos et avec 24 heures de repos. L'instabilité est inférieure à 0,3 % pour la tension de seuil (V_{th}) et à 2 % pour la résistance à l'état passant (R_{on}).

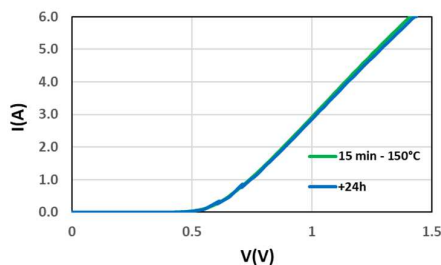


Figure 9 : Impact d'un repos de 24 heures entre le préconditionnement thermique et la mesure sur la mesure I(V) en direct à 25 °C

Ces résultats indiquent un faible impact de la durée de repos entre le préconditionnement et la mesure.

Un préconditionnement de 15 minutes à 150 °C suivi d'un délai d'attente de 24 heures entraîne un écart de mesure cumulée inférieure à 1,3 % pour V_{th} et 4,5 % pour R_{on} . Cette incertitude reste inférieure au critère maximum défini initialement. Néanmoins, cette étude ne reflète pas complètement l'instabilité initialement détectée qui montrait une dérive de 11 % sur le paramètre R_{on} . Ainsi, le dernier paramètre dont l'influence est à évaluer est l'ordre de la séquence de caractérisation

3.3. Ordre de la séquence de caractérisation

3.3.1. Impact sur la caractéristique en direct

Une étude a été menée pour évaluer l'impact de l'ordre des caractérisations à 25 °C. Des séquences composées de deux mesures I(V) en direct (*Direct1* et *Direct2*) séparées d'une mesure I(V) en inverse ont été réalisées. La Figure 10 présente les caractéristiques des deux mesures réalisées en direct. Une augmentation de 8 % est observable sur le paramètre R_{on} pour la mesure *Direct2*, sans variation significative de V_{th} .

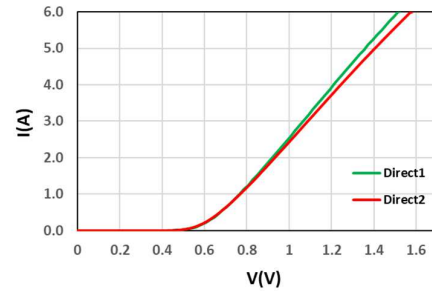


Figure 10 : Influence d'une mesure I(V) en inverse sur une mesure en direct à 25 °C

Ces résultats révèlent un fort impact de la mesure I(V) en inverse sur la mesure I(V) directe, suivante. Cette instabilité peut être expliquée par des mécanismes de piégeage dans la structure durant l'état bloqué qui dégradent la conduction à l'état passant.

3.3.2. Impact sur la caractéristique en inverse

Des séquences de mesure à 25 °C dans l'ordre inverse ont également été réalisées. Ces séquences sont composées de deux mesures I(V) en inverse (*Reverse1* et *Reverse2*), séparées d'une mesure I(V) en direct ont été réalisées. La Figure 11 présente les caractéristiques des deux mesures réalisées en inverse. On peut observer une variation de 1 % sur le courant de fuite mesuré à 300 V et 2 % à 650 V.

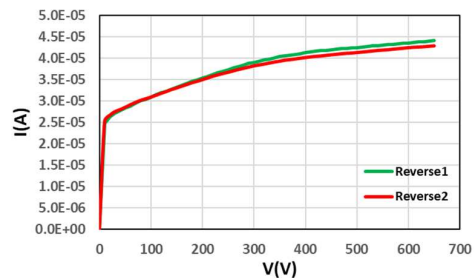


Figure 11 : Influence d'une mesure I(V) en direct sur une mesure en inverse à 25 °C

Ces résultats montrent qu'une mesure I(V) en direct a peu d'influence sur la mesure en inverse suivante.

Nous recommandons donc de privilégier les mesures en direct avant d'effectuer les mesures en inverse. Cet ordre de mesure doit être utilisé afin de garantir une bonne reproductibilité des mesures I(V) à 25 °C.

4. VALIDATION DU PROTOCOLE DE CARACTERISATION

La reproductibilité des séquences de mesures I(V) suivant le protocole établi au cours de cet article a été étudiée. Ce protocole comprend :

- Un préconditionnement thermique de 15 min à 150 °C
- Une mesure I(V) en direct (*Direct1*)
- Une mesure I(V) sacrificielle en inverse
- Un délai d'attente de 10 secondes.
- Une mesure I(V) en inverse (*Reverse1*)

À la suite de la première mesure, le composant a été stocké plusieurs heures, puis une mesure du courant de fuite à 300 V a été effectuée pour modifier son état de charge. En suivant, le protocole a été reproduit à l'identique, en respectant une même durée de préconditionnement et un même temps de repos avant la première mesure. Les mesures Direct2 et Reverse2 ont alors été obtenues.

La Figure 12 compare les mesures I(V) en direct et en inverse à la suite de chaque protocole de caractérisation. Nous observons un écart de 0,5 % sur le paramètre *Ron* à l'état passant et un écart de 1 % pour le courant de fuite en inverse.

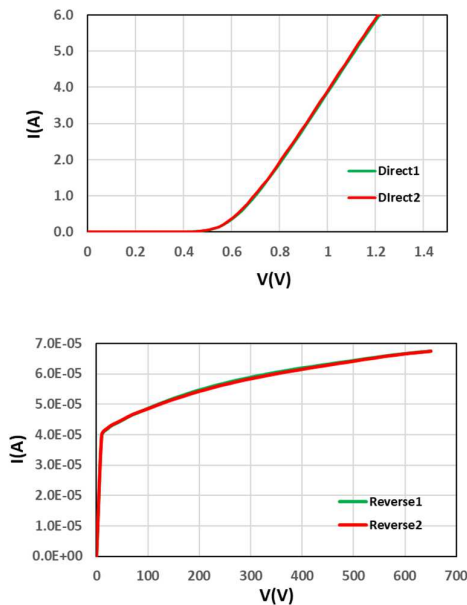


Figure 12 : Reproductibilité du protocole de mesures I(V) à 25 °C en direct et en inverse

Ces résultats valident la bonne reproductibilité des mesures I(V) en direct et en inverse avec l'utilisation du protocole établi.

5. CONCLUSIONS

Cet article présente la méthodologie d'évaluation de l'impact de plusieurs paramètres pouvant intervenir dans la reproductibilité des caractéristiques de la diode dans ses deux modes de fonctionnement.

Des phénomènes d'instabilités liés à l'état de charges de la diode ont été observés sur les mesures I(V) en inverse, tandis que l'historique des mesures vues par la diode provoque des instabilités sur la mesure en direct.

Un protocole de caractérisation a été établi permettant de régler ces problématiques et de suivre de manière reproductible l'évolution des paramètres critiques de la diode durant son vieillissement.

6. RÉFÉRENCES

- [1] M. Meneghini, C. D. Santi, et I. Abid, « GaN-based power devices: Physics, reliability, and perspectives », *Journal of Applied Physics*, vol. 130, n° 181101, 2021, doi: 10.1063/5.0061354.
- [2] K. V. Smith, J. Haller, J. Guerrero, R. P. Smith, R. Lal, et Y.-F. Wu, « Lifetime tests of 600-V GaN-on-Si power switches and HEMTs », *Microelectronics Reliability*, vol. 58, p. 197-203, mars 2016, doi: 10.1016/j.microrel.2015.12.016.
- [3] J. Hu *et al.*, « Time-Dependent Breakdown Mechanisms and Reliability Improvement in Edge Terminated AlGaIn/GaN Schottky Diodes Under HTRB Tests », *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 38, n° 3, p. 371-374, mars 2017, doi: 10.1109/LED.2017.2661482.
- [4] E. Acurio *et al.*, « Reliability Improvements in AlGaIn/GaN Schottky Barrier Diodes With a Gated Edge Termination », *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 65, n° 5, p. 1765-1770, mai 2018, doi: 10.1109/TED.2018.2818409.
- [5] M. Florović, J. Kováč, P. Benko, A. Chvála, J. Škriniarová, et P. Kordó, « Electrical Properties of Recessed AlGaIn/GaN Schottky Diodes Under off-State Stress », *Journal of Electrical Engineering*, vol. 65, n° 5, p. 313-316, sept. 2014, doi: 10.2478/jee-2014-0051.
- [6] J. Hu *et al.*, « Investigation of constant voltage off-state stress on Au-free AlGaIn/GaN Schottky barrier diodes », *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 54, n° 4S, p. 04DF07, avr. 2015, doi: 10.7567/JJAP.54.04DF07.
- [7] R. R. Malik, V. Joshi, R. R. Chaudhuri, S. D. Gupta, et M. Shrivastava, « Reverse Bias Stress-Induced Turn-On Voltage Shift in Recessed AlGaIn/GaN Schottky Barrier Diodes », *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 70, n° 12, p. 6211-6216, déc. 2023, doi: 10.1109/TED.2023.3321864.
- [8] X. Li, « Observation of Dynamic VTH of p-GaN Gate HEMTs by Fast Sweeping Characterization », *IEEE Electron Device Letters*, 2020, doi: 10.1109/LED.2020.2972971.
- [9] H. Kang *et al.*, « Effects of a GaN cap layer on the reliability of AlGaIn/GaN Schottky diodes », *Physica Status Solidi (a)*, vol. 212, n° 5, p. 1158-1161, mai 2015, doi: 10.1002/pssa.201431719.
- [10] M. Meneghini *et al.*, « Degradation of AlGaIn/GaN Schottky diodes on silicon: Role of defects at the AlGaIn/GaN interface », *Applied Physics Letters*, vol. 102, n° 16, p. 163501, avr. 2013, doi: 10.1063/1.4802011.
- [11] O. Chihani *et al.*, « Temperature and voltage effects on HTRB and HTGB stresses for AlGaIn/GaN HEMTs », in *2018 IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS)*, mars 2018, p. P-RT.2-1-P-RT.2-6. doi: 10.1109/IRPS.2018.8353685.