

Dopage par épitaxie localisée de nanostructures pour les dispositifs de puissance en GaN

Daniel ROULY¹, Josiane TASSELLI¹, Patrick AUSTIN¹, Frédéric MORANCHO¹, Karine ISOIRD¹, Yvon CORDIER²

¹LAAS-CNRS, Université de Toulouse, CNRS, UPS, FRANCE, ²CRHEA-CNRS, Valbonne, France

RESUME – La fabrication de structures nanométriques innovantes est un enjeu majeur pour le développement de composants électroniques avancés en GaN. Cet article présente un procédé de réalisation de nano-caissons en P-GaN, reposant sur la technologie etch-and-regrowth. Combinant gravure et croissance épitaxiale localisée, cette méthode constitue une alternative prometteuse à l'implantation ionique pour la fabrication de diodes PN en GaN. Ce travail explore les paramètres critiques de fabrication et analyse les défis topologiques des structures. Les résultats révèlent que la géométrie et l'orientation des motifs ont un impact déterminant sur la qualité des structures. L'optimisation des processus de gravure chimique et la maîtrise des impuretés apparaissent comme des leviers essentiels pour améliorer les performances.

Mots-clés – Épitaxie localisée, etch-then-regrowth, Dopage, nano-structures.

1. INTRODUCTION

La technologie silicium se distingue par sa remarquable flexibilité, permettant l'utilisation d'une large palette de techniques telles que l'implantation, la gravure ou encore les dépôts. Ces procédés offrent la possibilité de concevoir des composants variés sur un même substrat, à différentes échelles, favorisant une intégration très efficace.

En revanche, la technologie GaN présente des limitations significatives en termes de flexibilité. L'absence d'implantation ionique [1, 2], pour la création de zones dopées localement, réduit considérablement les options de design d'intégration fonctionnelle. Actuellement, ces contraintes sont partiellement surmontées grâce à l'utilisation de substrats avec des couches spécifiques conçues pour des besoins précis, permettant la réalisation de structures verticales comme les diodes PN et les MOSFETs ou de structures latérales qui reposent majoritairement sur des hétéroépitaxies pour la fabrication de HEMTs AlGaIn/GaN [3]. Cependant, la cointégration de ces structures reste un défi majeur.

Dans ce contexte, une approche innovante pour la réalisation de HEMTs AlGaIn/GaN "normally-off" repose sur une architecture de grille, nanostructurée en 3D (Figure 1b), différente de celle de la structure HEMT normally-off à grille p-GaN classique (Figure 1a). Le concept fondamental s'inspire du fonctionnement d'un transistor à effet de champ à jonction (JFET) où la largeur du canal de conduction est si réduite que les zones de charge d'espace (ZCE) des jonctions p-n adjacentes se recouvrent naturellement, assurant ainsi un blocage complet du canal en l'absence de polarisation de grille. Spécifiquement, la grille de ce HEMT est constituée d'une succession de caissons (ou "puits") de GaN de type p, dont la profondeur traverse le canal 2DEG et dont l'espacement inter-caissons est critique. Le développement relativement faible des ZCE à l'équilibre thermodynamique impose un dimensionnement nanométrique précis de ces caissons et de leur espacement (typiquement quelques dizaines de nanomètres) pour garantir la fonctionnalité "normally-off".

Une évolution vers des configurations de HEMT à multiples canaux 2DEG, Figure 1c, a été envisagée par simulations numériques. En répartissant la charge électronique totale sur plusieurs

canaux 2DEG superposés verticalement, on peut réduire localement la densité de charge par canal. Ceci améliore le rapport de charges entre le canal et la zone p-GaN adjacente, permettant d'obtenir une déplétion complète du canal pour des largeurs de mesa (D_T) plus importantes (de l'ordre de 100 nm contre 75 nm pour un canal unique), ce qui représente une piste d'intégration 3D plus efficace.

Malgré tout, cette nano-structuration est un défi technologique majeur.

La technologie de gravure puis croissance (souvent désignée par le terme anglais "etch-then-regrowth") est apparue comme une approche alternative prometteuse pour surmonter ces limitations [4, 5]. Cette méthode combine une étape de gravure sélective pour définir des cavités ou des tranchées, suivie d'une étape de croissance épitaxiale localisée pour remplir ces structures. Bien qu'elle repose sur l'épitaxie sélective, un procédé complexe à intégrer dans les chaînes de fabrication, elle représente aujourd'hui la solution la plus avancée pour étendre les possibilités de conception dans la technologie GaN. Les avantages potentiels de cette approche incluent un meilleur contrôle de la géométrie des régions dopées, la possibilité de réaliser des jonctions p-n abruptes et la préservation de la qualité des couches environnantes.

L'objectif principal de cet article est d'explorer de manière détaillée les limites et les perspectives de la technologie de gravure suivie de croissance épitaxiale pour la réalisation de caissons p-GaN intégrés dans la grille d'un HEMT Normally-off tel qu'illustré dans la Figure 1b. Une attention particulière sera portée aux aspects critiques tels que la qualité cristalline, la morphologie de surface, le dopage, ainsi que l'influence des défauts et de la contamination sur les performances finales des dispositifs fabriqués.

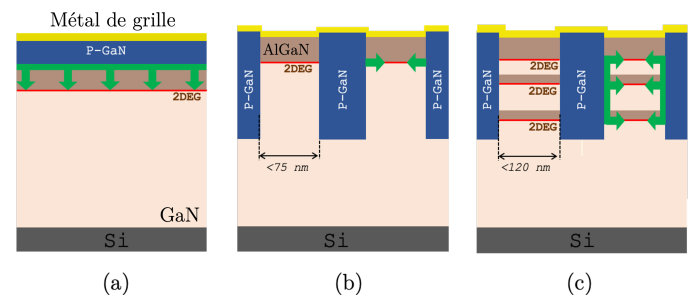


FIG. 1. Illustration schématique du fonctionnement des grilles dans les transistors HEMT normally-off : a) Grille p-GaN au-dessus du canal avec modulation verticale du canal 2DEG, b) et c) Grille p-GaN latérale avec modulation horizontale du canal 2DEG, comportant respectivement un et trois canaux 2DEG.

2. FABRICATION DES DISPOSITIFS

Le processus de fabrication des caissons p-GaN par la technique de "gravure puis croissance" comprend plusieurs étapes clés, allant de la préparation du substrat à la réalisation finale

des structures dopées. Le processus est illustré sur la Figure 2

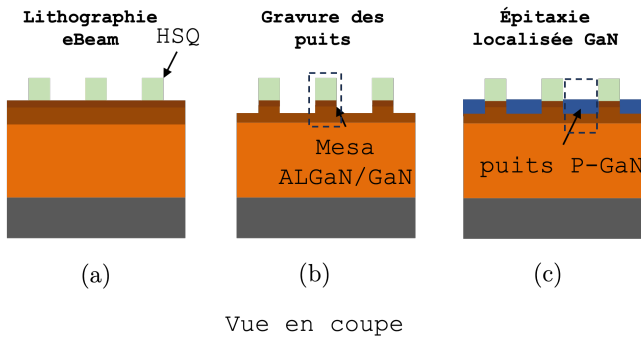


FIG. 2. Illustration schématique du procédé de fabrication de la grille 3D nanostructurée d'un HEMT normally-off : a) Écriture e-beam de la résine HSQ, b) Gravure des mesa AlGaIn/GaN pour former les puits et c) Remplissage des puits par EJM (épitaxie par jets moléculaires).

2.1. Préparation des substrats et Lithographie

Les travaux ont été réalisés sur des hétérostructures Al-GaN/GaN déposées sur substrat silicium. La première étape cruciale est la définition des motifs nanométriques où les caissons p-GaN seront formés. Pour cela, une lithographie électronique de haute résolution a été employée, utilisant une résine électrosensible de type HSQ (Hydrogen Silsesquioxane). Cette résine a été choisie pour sa capacité à définir des motifs de très petites dimensions et pour sa compatibilité avec les étapes de gravure et de croissance ultérieures, où elle sert également de masque diélectrique.

2.2. Gravure des Cavités

Une fois les motifs définis dans la résine HSQ, l'étape suivante consiste à graver les cavités (ou puits) dans l'hétérostructure AlGaIn/GaN. Cette gravure a été réalisée par gravure ionique réactive couplée à un plasma inductif (ICP-RIE). Des gaz de gravure à base de chlore (Cl_2) et de trichlorure de bore (BCl_3) ont été utilisés pour leur efficacité sur les matériaux nitrures. La vitesse de gravure typique était de l'ordre de 350 nm/min. Un contrôle précis de la profondeur de gravure et de l'anisotropie du profil est essentiel pour obtenir des cavités aux dimensions souhaitées, généralement de l'ordre de 100 nm de profondeur. La résine HSQ, après insolation, offre une sélectivité comprise entre 2 et 3 lors de cette étape.

2.3. Épitaxie Localisée du p-GaN

L'étape centrale du procédé est la croissance épitaxiale localisée du p-GaN à l'intérieur des cavités préalablement gravées. Cette croissance a été effectuée par épitaxie par jets moléculaires (EJM, ou MBE en anglais). L'EJM a été choisie pour sa capacité à réaliser des croissances à plus basse température que la MOCVD, ce qui peut être bénéfique pour limiter la diffusion d'impuretés.

Les conditions de croissance ont été soigneusement optimisées pour la réalisation des couches dopées au magnésium. La croissance s'effectue sous un flux de NH_3 à des températures typiquement comprises entre 700°C et 800°C. Le gallium provient de cellules à effusion maintenues à environ 900°C. Pour le dopage de type p, une source à effusion contenant du magnésium (Mg) solide, évaporée aux alentours de 200°C, a été utilisée. L'objectif était d'atteindre une concentration en accepteurs (N_A) de l'ordre de $5 \times 10^{18} cm^{-3}$ à $5 \times 10^{19} cm^{-3}$ dans les couches p-GaN. La résine HSQ sert de masque diélectrique, empêchant la croissance sur les zones qu'elle recouvre et favorisant ainsi la croissance sélective dans les ouvertures. Un nettoyage chimique spécifique à base de KOH a été réalisé avant

l'introduction des échantillons dans le bâti EJM afin de minimiser les contaminations de surface. Nous parlons par la suite de valeur cible en faisant référence à l'épaisseur d'une couche 2D épitaxiée dans les mêmes conditions de croissance.

3. CARACTÉRISATIONS PHYSIQUES DE L'ÉPITAXIE LOCALISÉE DE Puits DE GaN

3.1. Limites géométriques et dynamiques de croissance

Dans une étude précédente [8], nous avons identifié des limitations majeures dans la croissance localisée de GaN non intentionnellement dopé (nid) et dopé au magnésium. La géométrie des motifs gravés, en particulier leur forme, taille et taux d'ouverture, influence fortement la dynamique de croissance et la morphologie finale du matériau déposé.

Ouvertures étroites (< 500–800 nm) : un remplissage non uniforme est fréquemment observé, avec une accumulation de matière sur les bords (surcroissance) et un déficit au centre pouvant aboutir à des structures creuses et/ou poreuses comme illustré sur la Figure 3a. Ce comportement est attribué à une diffusion latérale préférentielle des espèces précurseurs et à une limitation du flux atteignant le fond des cavités étroites.

Ouvertures plus larges (1 μm) : un remplissage quasi-plan et homogène peut être atteint, en raison d'un accès plus favorable aux espèces réactives (voir Figure 3b).

3.2. Influence de l'orientation cristallographique

La croissance est également fortement influencée par l'orientation cristallographique des motifs : Les motifs hexagonaux, alignés avec le réseau cristallin du substrat, favorisent une croissance homogène grâce à leur symétrie. Les motifs rectangulaires de petite dimension présentent une croissance comparable, mais avec des irrégularités localisées sur les bords.

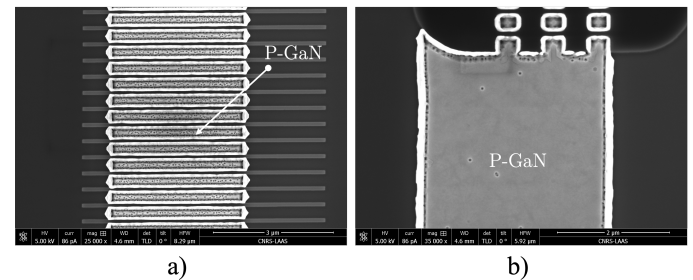


FIG. 3. Observations MEB a) des défauts de croissance de puits de GaN favorisés par la largeur submicronique des cavités rectangulaires et b) de la couche homogène attendue de GaN épitaxie après gravure dans une zone de surface supérieure à 1 μm x 1 μm

Orientation des plans : les lignes exposant les plans m donnent une morphologie plus lisse que celles exposant les plans a, révélant une anisotropie de croissance notable.

3.3. Optimisation du remplissage des puits sur AlGaIn/GaN

Pour la fabrication des dispositifs sur hétérostructure Al-GaN/GaN, nous avons augmenté l'épaisseur cible de la couche P-GaN de 100 nm à 200 nm afin d'améliorer le remplissage des puits. Cette approche a permis un remplissage plus complet, bien que des défauts persistent aux bords. La Figure 4a et 4b illustrent respectivement les résultats de croissance de 100 nm d'épaisseur ciblée de GaN non intentionnellement dopé et de 200 nm d'épaisseur ciblée de p-GaN au sein de puits submicroniques. Ces défauts sont exacerbés par des effets d'ombrage au cours des étapes ultérieures de dépôt (oxydes, métaux), induisant :

- des dépôts inhomogènes des couches métalliques de Nickel et Or,
- une topologie de surface irrégulière,

— des plaques de champ discontinues (Figure 4d).

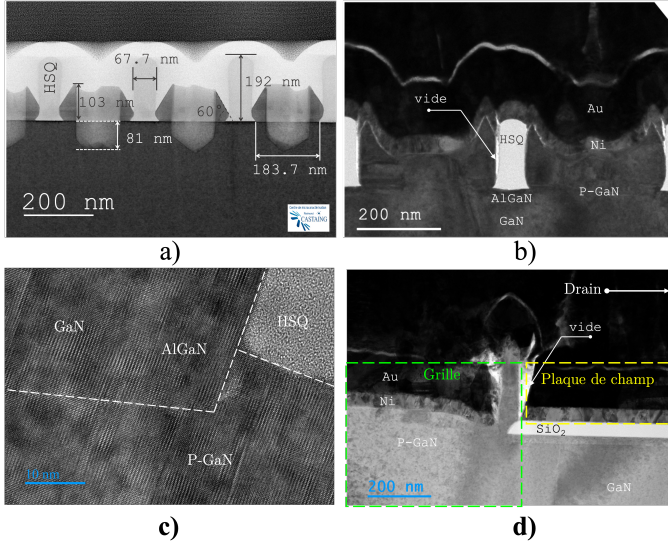


FIG. 4. Observations de la croissance EJM et des dépôts métalliques sur puits submicroniques de GaN : a) Croissance incomplète par EJM d'un puits submicronique de GaN nid, avec une épaisseur cible de 100 nm en couche pleine; b) Surcroissance par EJM d'un puits submicronique de p-GaN avec une épaisseur cible de 200 nm en couche pleine; c) Analyse TEM de la croissance de puits de p-GaN sur une hétérostructure AlGaIn/GaN; d) Observation FIB d'un dépôt métallique Ni/Au discontinu, provoqué par une excroissance en bord de puits : à gauche, grille du HEMT; à droite, plaque de champ côté drain.

Malgré cela, l'accord de maille entre le p-GaN et l'hétérostructure AlGaIn/GaN reste satisfaisant (Figure 4c). Des analyses TEM révèlent une croissance épitaxiale continue avec les couches de GaN et d'AlGaIn. Toutefois, la qualité de la couche demeure affectée par l'apparition de quelques fautes d'empilement. Par ailleurs, l'interface au sommet du mesa AlGaIn/GaN présente une zone plus claire, attribuée à une contamination. Une amorphisation locale de la région n'a pu être exclue.

3.4. Analyse EDX : contamination interfaciale au silicium

Des analyses EDX réalisées sur des coupes transversales ont mis en évidence une contamination significative en silicium à l'interface entre le P-GaN et les matériaux sous-jacent. Ce phénomène, absent lors de la croissance de GaN sur GaN, semble spécifique à l'épitaxie localisée sur AlGaIn/GaN gravé. Il pourrait provenir des étapes de gravure ou de résidus lors du nettoyage de surface, et contribue possiblement aux dysfonctionnements observés électriquement (cf. section 4).

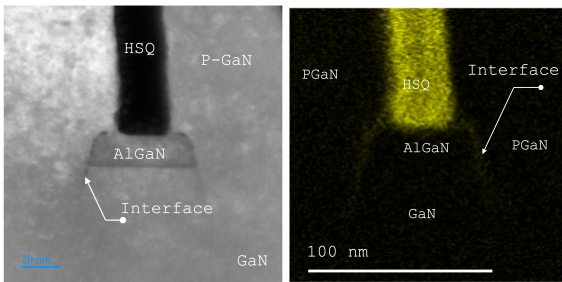


FIG. 5. Analyse de la croissance du p-GaN autour d'un MESA AlGaIn/GaN : a) Observation STEM de la croissance du p-GaN autour du MESA; b) Analyse EDX au même emplacement, révélant une forte densité de contamination en Si à l'interface de croissance.

3.5. Analyse SIMS du dopage en magnésium

L'efficacité de l'incorporation du dopant Mg est cruciale pour la fonctionnalité des zones P-GaN. Les mesures SIMS effectuées sur une couche pleine de P-GaN épitaxiée (épaisseur ciblée : 100 nm) montrent une concentration de l'ordre de $4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, en bon accord avec les objectifs de dopage. Le profil est plat jusqu'à $\approx 80 \text{ nm}$, suggérant une bonne uniformité dans cette zone et une chute abrupte est observée au-delà, indiquant une transition nette avec une diffusion limitée du Mg.

Important : ces mesures SIMS ont été réalisées sur des zones de grande surface plane. En raison de la résolution latérale limitée de la méthode, il n'a pas été possible de caractériser précisément le profil de dopage à l'intérieur des puits de P-GaN. Cette limitation empêche d'évaluer finement l'efficacité d'incorporation locale du Mg dans les géométries confinées.

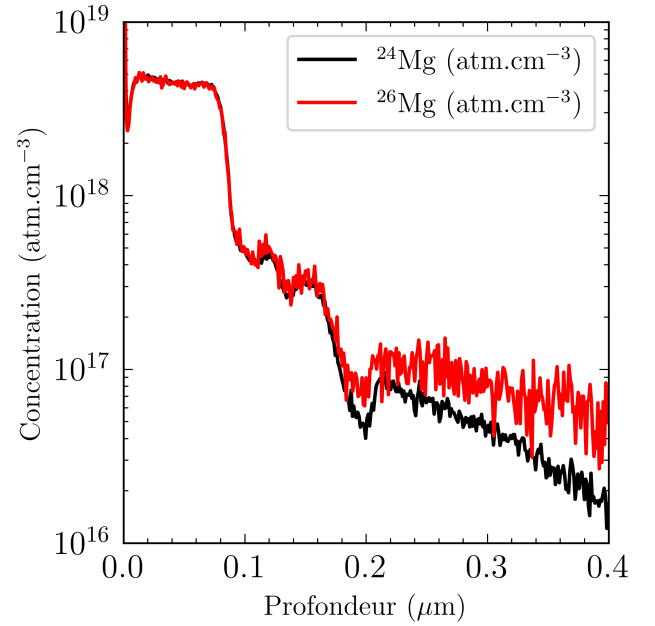


FIG. 6. Analyse SIMS des isotopes ^{24}Mg et ^{26}Mg dans une couche de p-GaN épitaxiée après gravure.

4. CARACTÉRISATIONS ÉLECTRIQUES

4.1. Diodes PN (P-GaN / 2DEG)

Les diodes testées présentent des caractéristiques atypiques : La tension de seuil mesurée est faible par rapport aux 3,4 V attendus pour des jonctions PN GaN idéales et nous avons observé une forte dispersion des courants de fuite, avec des valeurs élevées, suggérant des voies de conduction parasite (Figure 7).

Ces résultats traduisent un procédé encore immature. La contamination interfaciale au silicium observée par EDX est une explication plausible, car elle peut :

- perturber la formation de la jonction PN,
- limiter l'extension de la zone de charge d'espace,
- induire des chemins de fuite.

4.2. Transistors HEMT à grille P-GaN

Les transistors HEMT présentent un comportement non normally-off et une modulation très limitée du courant de canal. Trois hypothèses principales sont envisagées :

1. Inactivation partielle du dopant Mg ou incorporation incomplète dans les puits.
2. Contraintes ou relâchement des contraintes de réseau dans la structure de maille, qui ne préservent pas le 2DEG.

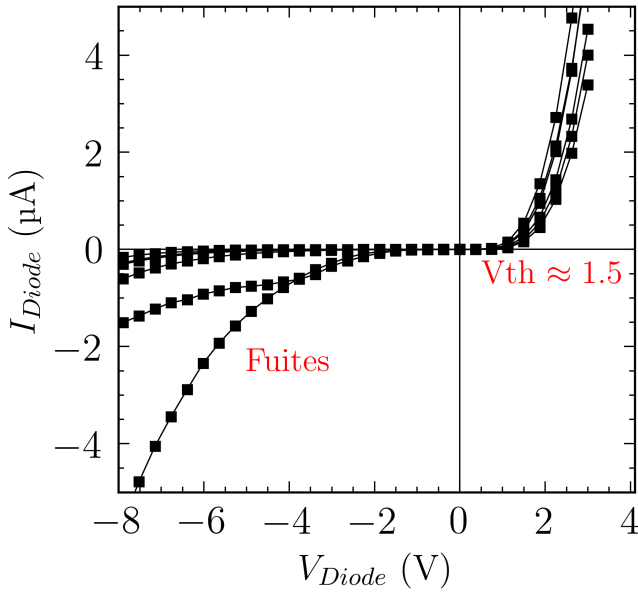


FIG. 7. Mesures électriques I(V) réalisées sur les diodes P-GaN/2DEG fabriquées

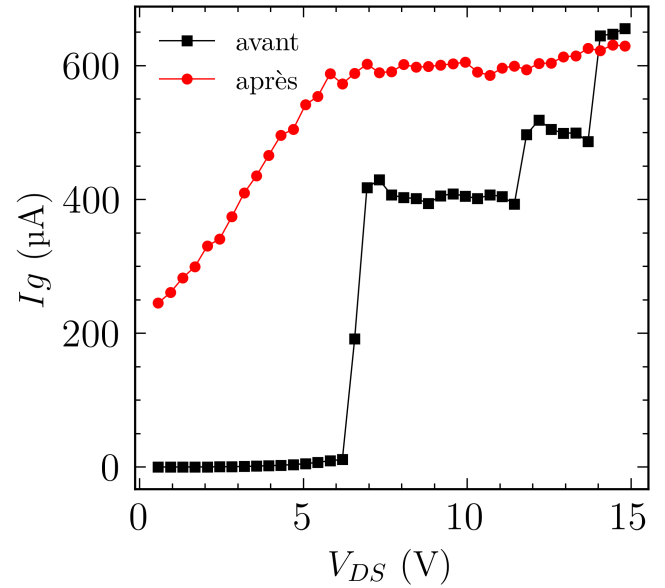


FIG. 9. Mesures de tenue en tension de la diode p-GaN/2DEG formant la grille d'un HEMT fabriqué : en noir, évolution progressive menant à la défaillance de la grille; en rouge, comportement après défaillance irréversible.

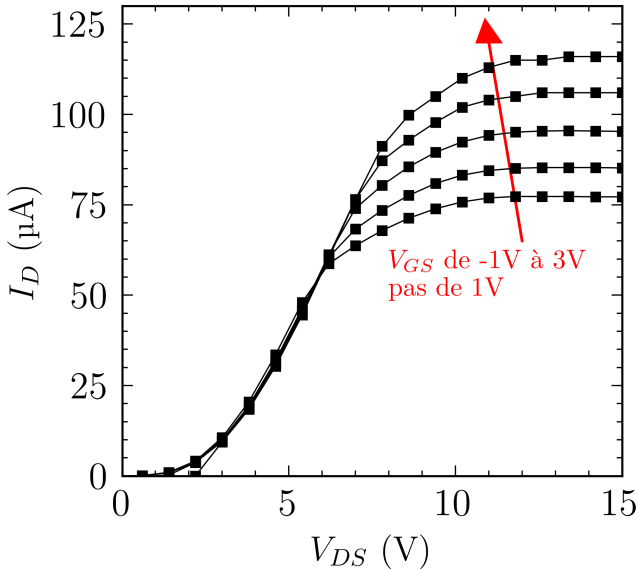


FIG. 8. Caractéristiques électriques $I_D(V_{DS})$ mesurés sur les HEMTs fabriqués

3. Contaminations au silicium à l'interface P-GaN/AlGaIn, qui peut agir en tant que dopant de type N dans le GaN et l'AlGaIn, dégradant ainsi l'équilibre des charges électriques la jonction PN et empêchant l'extension correcte de la zone de déplétion.

Le courant mesuré semble principalement être un courant de fuite légèrement modulé par la présence du P-GaN, plutôt qu'un courant de canal typique.

4.3. Robustesse de la grille sous tension

Les structures de grille montrent une défaillance critique côté drain lorsque la tension entre le drain et la grille est supérieure à 7 V. Cette défaillance est progressive et hétérogène, affectant certaines cellules plus rapidement. Les causes identifiées incluent :

1. La présence de plaques de champ flottantes inefficaces pour réduire le champ électrique dans la structure

2. La formation de points chauds localisés, résultant d'impuretés Si créant des chemins de conduction parasite.

Ces observations confirment que la qualité de l'interface et la maîtrise de la contamination sont essentielles pour la fiabilité des composants.

5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les résultats montrent que la qualité de l'épitaxie localisée des puits de P-GaN est fortement dépendante de la géométrie des motifs, de l'orientation cristallographique, et de la pureté des interfaces. Bien que l'épaisseur accrue du P-GaN ait permis un remplissage plus efficace, les défauts en bord de puits et la contamination au silicium restent des obstacles majeurs à l'obtention de composants fonctionnels.

Les corrélations établies entre les défauts de croissance (observés par TEM, EDX et SIMS) et les dégradations électriques (tension de seuil faible, courant de fuite, défaillance en tension) soulignent l'importance d'un contrôle strict du procédé, en particulier lors des étapes de gravure et de nettoyage. Une analyse complémentaire est nécessaire pour évaluer précisément l'activation du p-GaN dans les zones confinées, où les effets de géométrie peuvent limiter l'efficacité du dopage. Des améliorations ciblées sur la qualité interfaciale ainsi que sur l'activation du dopage sont indispensables pour atteindre les performances attendues des dispositifs normalement-off à base de GaN.

6. RÉFÉRENCES

- [1] Lorenz, K., Wendler, et al. Implantation damage formation in a-, c- and m-plane GaN. *Acta Materialia*. **123** pp. 177-187 (2017)
- [2] Zkria, A., Katamune, Y., Yoshitake, T., Ohmagari, S., Hanada, T. & Others P-type doping of GaN by magnesium ion implantation. *Applied Physics Express*. **10** pp. 016501 (2017)
- [3] Greco, G. Review of technology for normally-off HEMTs with p-GaN gate.
- [4] Fu, H., Fu, K., Yang, C., Liu, H., et al. Selective area regrowth and doping for vertical gallium nitride power devices : Materials challenges and recent progress. *Materials Today*. **49** pp. 296-323 (2021,10)
- [5] Peri, P., Fu, K., Fu, H., Zhao, Y. & Smith, D. Characterization of As-Grown and Regrown GaN-on-GaN Structures for Vertical p-n Power Devices. *Journal Of Electronic Materials*. **50**, 2637-2642 (2021,5), <http://link.springer.com/10.1007/s11664-021-08769-z>
- [6] Fu, K., Fu, H., Huang, X., Chen, H., Yang, et al. Demonstration of 1.27 kV

Etch-Then-Regrow GaN p - n Junctions With Low Leakage for GaN Power Electronics. *IEEE Electron Device Letters*. **40**, 1728-1731 (2019,11),

- [7] Rouly, D. Conception et réalisation d'interrupteurs de puissance avancés HEMTs AlGa_N/Ga_N normally-off. Thèse de doctorat (Université de Toulouse, 2024)
- [8] Rouly, D., Tasselli, J., Austin, P., Cordier, Y., Courville, A., Vaurette, F., ... & Morancho, F. (2023, July). Epitaxie localisée de P-GaN par EJM pour la fabrication de HEMTs AlGa_N/Ga_N normally-off. In *Symposium de génie électrique SGE 2023*..