

Développement technologique d'un HEMT normally-off avec une grille à barrière P-GaN

Chaymaa HALOUI^{1,2}, Gaëtan TOULON³, Josiane TASSELLI¹, Yvon CORDIER⁴, Éric FRAYSSINET⁴, Karine ISOIRD¹, Frédéric MORANCHO¹, Mathieu GAVELLE²

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

²CEA Tech Occitanie, Toulouse, France

³EXAGAN, Toulouse, France

⁴CRHEA-CNRS, Valbonne, France

RESUME - Les travaux portent sur la réalisation technologique d'un HEMT AlGaIn/GaN normally-off avec une grille à barrière P-GaN. Des résultats de simulation ont montré que la tension de seuil de cette nouvelle structure peut atteindre une valeur supérieure à 2 V et qu'elle est liée à la profondeur de gravure de la couche d'AlGaIn. Nous avons développé une recette de gravure sèche avec une faible vitesse permettant un contrôle de gravure d'ordre nanométrique avec une rugosité de surface satisfaisante.

Mots-clés — HEMT, P-GaN, AlGaIn/GaN, normally-off, gravure d'AlGaIn, RIE.

1. INTRODUCTION

L'augmentation de la consommation électrique et l'évolution des besoins en électronique de puissance nécessitent de nouveaux composants intégrés de puissance ayant une forte densité de courant et assurant une meilleure efficacité de conversion d'énergie. La technologie des transistors à haute mobilité électronique en nitrure de gallium (HEMT GaN) est très prometteuse et répond à ces exigences énergétiques. Cependant, ces transistors présentent l'inconvénient d'être normally-on : le canal sous la grille est peuplé d'électrons même à une tension de grille nulle. Pour des raisons de sûreté de fonctionnement, de nombreuses recherches se sont focalisées sur le développement de transistors normally-off, c'est-à-dire des transistors affichant des tensions de seuil positives. Plusieurs approches, chacune avec ses propres limitations, ont été proposées pour assurer la fonctionnalité normally-off. L'implantation ionique au plasma de fluor [1], le traitement à l'oxygène [2], l'injection dans la grille (GIT) [3] et la grille P-GaN [4] sont les voies technologiques les plus couramment développées. Une autre solution originale, proposée par Hamady *et al.*[5], consiste à introduire une couche GaN dopée P (P-GaN) au sein de la couche GaN NID (Non Intentionnellement Dopée) en dessous de l'électrode de grille, sous l'interface AlGaIn/GaN.

Dans cet article, nous proposons une structure qui combine les deux approches que sont la grille enterrée et la recroissance par épitaxie du P-GaN. Dans un premier temps, nous présentons les résultats de simulation du nouveau HEMT AlGaIn/GaN normally-off avec une grille à barrière P-GaN [6]. Puis nous donnerons un aperçu sur le processus technologique de réalisation d'un tel dispositif. Nous nous focaliserons sur la gravure de l'ouverture de grille et la reprise d'épitaxie du P-GaN.

2. SIMULATION

La structure étudiée est présentée sur la Fig. 1. L'insertion d'une couche GaN de type P dans la couche d'AlGaIn, en-dessous de l'électrode de grille, a pour effet de rapprocher le niveau de Fermi de la bande de valence et, de ce fait, remonter le niveau de la bande de conduction dans la région sous la grille. Si la concentration en dopants de type P est suffisante, il est possible d'élever le niveau de la bande de conduction au-dessus du niveau de Fermi : le canal (gaz bidimensionnel d'électrons) est ainsi déserté sous la grille ; il est alors nécessaire d'appliquer une tension V_{GS} positive pour rétablir le canal sous la grille, rendant ainsi le HEMT normally-off.

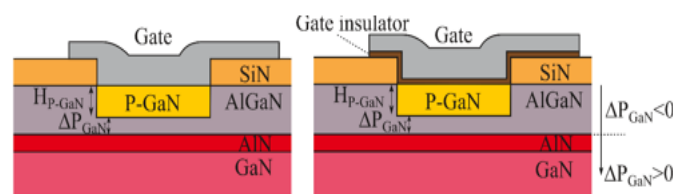


Fig. 1 : Descriptif de la grille de la structure proposée avec : métal sur P-GaN : (à gauche) et isolant de grille sur P-GaN : Grille MIS (à droite).

Des simulations 2D ont été réalisées avec l'outil Sentaurus TCAD afin de déterminer la tension de seuil du HEMT proposé. Deux variantes de structure ont été analysées : une structure Schottky avec le métal de grille directement sur la région P-GaN et une structure MIS avec un isolant entre les deux (Fig. 1).

Les paramètres utilisés pour la simulation sont caractérisés par une épaisseur de la couche d'AlGaIn de 25 nm, une distance grille-source de 2 μm et une distance grille-drain de 15 μm . Une plaque de champ de grille d'une longueur de 3 μm est ajoutée côté drain.

Les premières simulations ont été réalisées sur les structures où le métal de grille est déposé directement sur le P-GaN. Le diagramme de bandes à l'équilibre pour différentes épaisseurs ΔP_{GaN} (Fig.1) de la couche P-GaN de grille sous l'AlGaIn restant est présenté sur la Fig. 2. Il montre l'effet de la gravure de l'AlGaIn sur le profil de la bande de conduction, en particulier côté GaN. La fonctionnalité normally-off dépend de ΔP_{GaN} : pour des valeurs négatives de cette épaisseur (c'est-à-dire pour une gravure partielle de l'AlGaIn), la couche restante de l'AlGaIn fournit une charge de polarisation plus élevée à compenser, ce qui conduit à une faible tension de seuil.

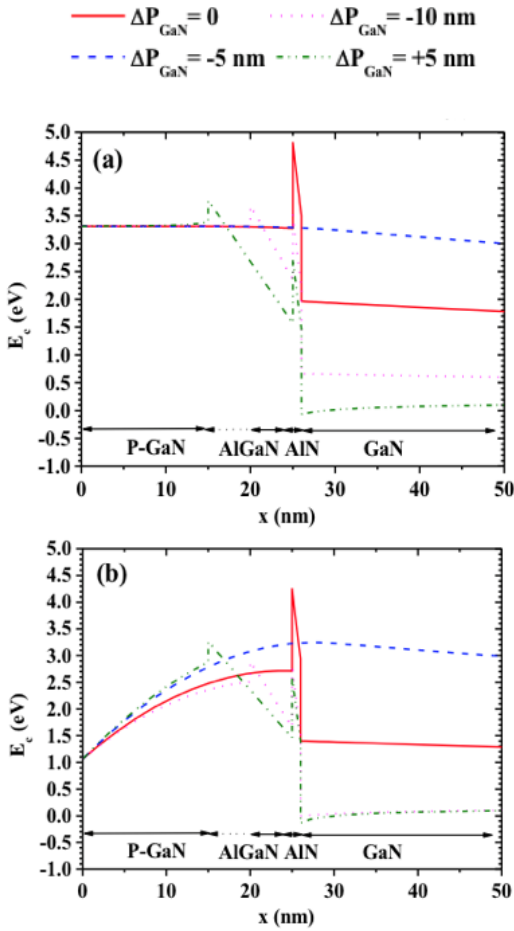


Fig. 2. Diagramme de bandes pour différentes valeurs de ΔP_{GaN} à $V_{\text{GS}} = 0$ V pour : (a) contact de grille considéré ohmique (b) contact de grille Schottky.

Les résultats de la simulation des variations de tension de seuil en fonction du dopage de la couche P-GaN sont représentés sur la Fig. 3. En considérant le contact ohmique, aucune déplétion n'apparaît dans le P-GaN donc la tension de seuil est indépendante de la concentration de dopage de la couche P-GaN. Cela peut être confirmé par l'absence de courbure de la bande de conduction côté P-GaN comme le montre la Fig. 2 (a). Dans le cas d'une structure à grille Schottky, le niveau d'énergie de la

bande de conduction diminue proche du contact en raison de l'apparition d'une zone de charge d'espace proche du contact. Au-delà, le niveau de Fermi est ancré proche de la bande de valence. Pour les faibles valeurs de dopage, cette extension est plus marquée et peut s'étendre dans toute la couche P-GaN pour les faibles valeurs de ΔP_{GaN} , ce qui explique les tensions de seuil plus faibles observées sur la Fig. 3 (b).

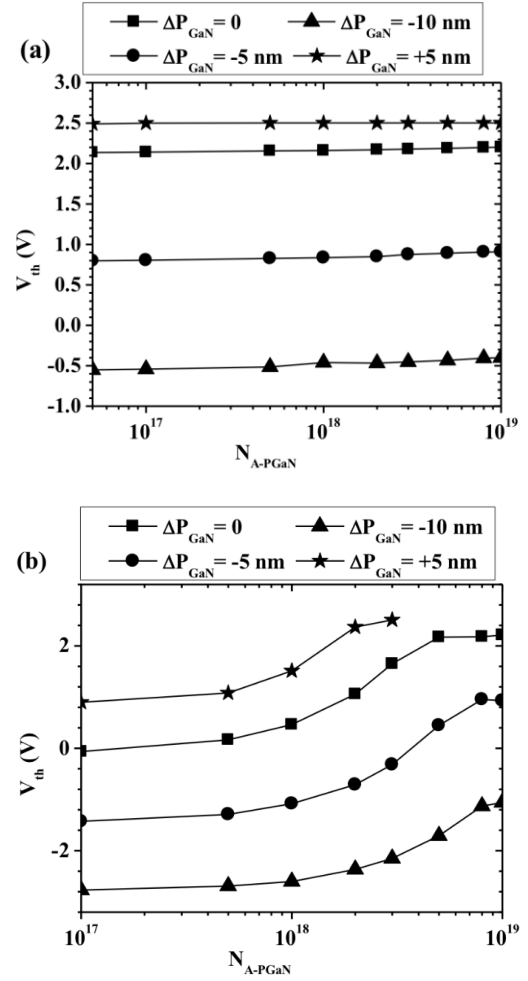


Fig. 3. Variations de la tension de seuil en fonction du dopage P-GaN pour différentes valeurs de ΔP_{GaN} : (a) Grille MIS ; (b) Grille Schottky.

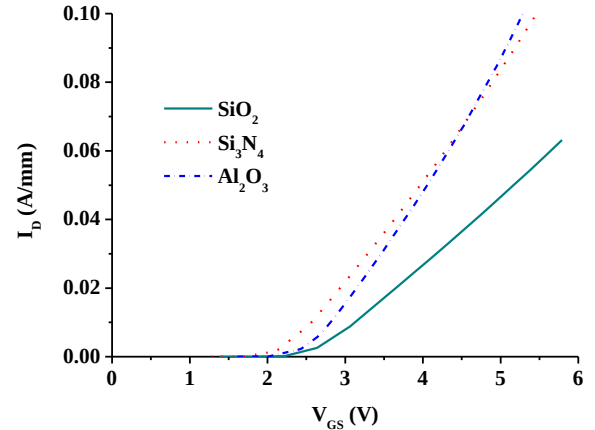


Fig. 4. Caractéristiques de transfert $I_D(V_{\text{GS}})$ de HEMT pour différents isolants de grille de 30 nm d'épaisseur.

Pour l'analyse de la structure de type MIS, le matériau utilisé comme isolant de grille ainsi que son épaisseur doivent être pris en compte. Des matériaux tels que SiO_2 ou Al_2O_3 sont prometteurs en raison de leur bande interdite et de leur affinité électronique plus élevées [7], ce qui signifie une augmentation de la discontinuité de la bande de conduction avec le P-GaN, favorable à la réduction des courants de fuite. Cependant, la faible permittivité relative du SiO_2 n'est pas favorable en termes de caractéristiques électriques car elle donne une transconductance plus faible comme le montrent les caractéristiques $I_D(V_{GS})$ reportées sur la Fig. 4. De plus, il a été démontré que le SiO_2 induit une densité élevée d'états de surface avec le GaN [8] qui sont source de piégeage de porteur et donc de dégradation des caractéristiques électriques telles que des variations de la tension de seuil ou l'augmentation de la résistance à l'état passant ; phénomène connu sous le terme « curret collapse ».

Les variations de la tension de seuil avec la concentration du dopage P-GaN pour différents matériaux isolants et épaisseurs sont présentées sur la Fig. 5. La densité des états d'interface a été insérée, sur la base de valeurs extraites pour des structures avec une couche de Si_3N_4 déposée sur P-GaN par LPCVD. Ces valeurs devraient changer avec le matériau isolant et sa méthode de dépôt. En fonction de son épaisseur et de sa permittivité, l'ajout d'une couche de diélectrique permet d'absorber le champ électrique lorsqu'une tension de grille est appliquée, ce qui augmente la variation de la tension de seuil avec la concentration du dopage P de la couche GaN. Si l'on peut atteindre une concentration de dopage P-GaN élevée (au-dessus de quelques 10^{18} cm^{-3}), une tension de seuil positive élevée peut être obtenue.

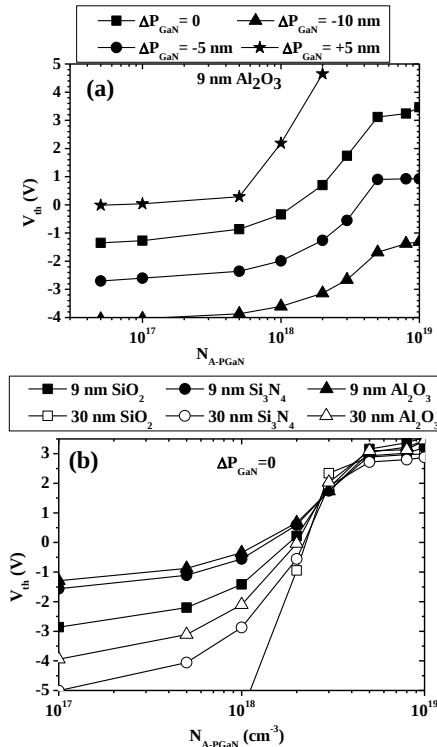


Fig. 5. Variations de la tension de seuil en fonction du dopage de P-GaN (a) pour différentes valeurs de ΔP_{GaN} et 9 nm d' Al_2O_3 (b) pour différents diélectriques de 9 nm et 30 nm d'épaisseur.

Les résultats de simulation montrent l'importance de l'épaisseur de la couche restante d' AlGaIn sous la grille, donc du contrôle de la gravure de l' AlGaIn , et de la valeur du dopage de la couche P-GaN.

Nous présentons, dans la partie suivante, l'étude que nous avons menée pour réaliser la gravure de la grille et nous donnons un aperçu des premiers résultats obtenus sur la reprise d'épitaxie du P-GaN.

3. PROCEDE DE FABRICATION

La réalisation technologique de la structure proposée a été initiée afin de valider les résultats de simulation. Les couches du HEMT AlGaIn/GaN ont été épitaxiées au CRHEA par dépôt chimique en phase vapeur aux organo-métalliques (MOCVD) sur substrat silicium : l'empilement est composé d'une alternance de couches AlN/GaN , couches de transition permettant de compenser les contraintes thermomécaniques et éviter la fissuration du matériau suivie d'une couche tampon en GaN de 1,5 μm , d'une couche de transition AlN de 1,5 nm, d'une couche barrière AlGaIn de 25 nm et enfin d'une couche de protection de SiN déposée in situ de 10 nm.

Nous nous sommes concentrés dans un premier temps sur la mise au point des étapes technologiques critiques pour réaliser la grille, à savoir la gravure de l' AlGaIn , la croissance de la couche P-GaN, la maîtrise de l'interface $\text{AlGaIn}/\text{Métal}$ (grille Schottky) et $\text{AlGaIn}/\text{Isolant}$ (grille MIS).

Avant la gravure, 50 nm de Si_3N_4 et 100 nm de SiO_2 sont déposés sur les couches épitaxiées par LPCVD et ICPECVD respectivement (Fig. 6.a). La couche de SiO_2 permet la croissance sélective de la couche épitaxiée P-GaN uniquement dans l'ouverture de grille. Cette dernière est réalisée par gravure plasma des trois matériaux : le SiO_2 et Si_3N_4 par chimie fluorée (CHF_3/O_2) et l' AlGaIn par chimie chlorée (Cl_2) (Fig. 6.b). La couche de P-GaN est déposée par épitaxie localisée (Fig. 6.c). La couche de masquage SiO_2 est ensuite retirée par voie humide (Fig. 6.d).

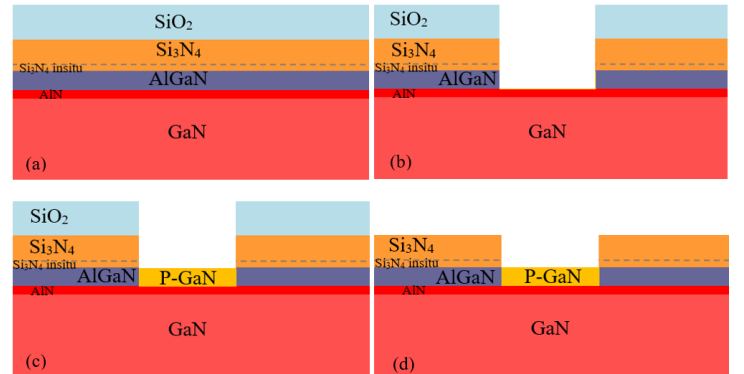


Fig. 6 : Enchaînement des étapes de reprise d'épitaxie du P-GaN sur la région de grille : (a) empilement des couches; (b) gravure de l'ouverture de la grille; (c) croissance du P-GaN en MBE avec dopage Mg; (d) retrait du SiO_2 .

3.1. Gravure de la grille

La structure du HEMT proposé est caractérisée par une couche barrière AlGaIn de faible épaisseur (25 nm). Par

conséquent, la vitesse de gravure de cette couche doit être bien contrôlée afin de préserver les propriétés du gaz bidimensionnel (2DEG) et ne pas détruire la couche d'AlN sous-jacente.

Dans ce travail, la gravure de l'AlGaIn a été effectuée à base de Cl_2 par gravure ionique réactive (RIE). Les conditions de gravure sont : puissance RF = 60 W, pression = 5 mTorr et débit de Cl_2 = 10 sccm [9]. Après gravure, le masque de résine a été retiré par acétone, isopropanol et EDI suivi d'un plasma O_2 (800 W). Les profondeurs de gravure ont été mesurées par microscopie électronique à transmission (TEM) et sont de 6 nm, 19 nm et 21 nm pour des temps de gravure de 25 s, 35 s et 45 s respectivement.

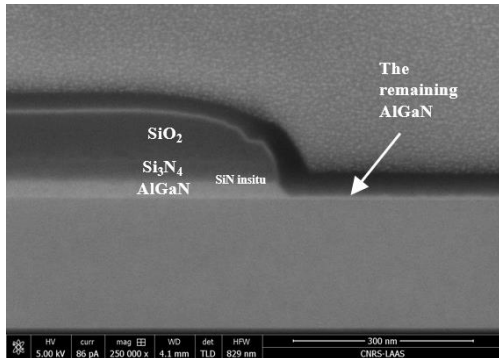


Fig. 7 : Image FIB après gravure RIE de l'AlGaIn par Cl_2 en 35 s.

L'utilisation d'une puissance RIE moyenne (< 100 W) a permis de diminuer et contrôler précisément la vitesse de gravure. L'image d'une coupe FIB de l'ouverture de la grille montre les quelques nm d'AlGaIn restant après une gravure de 35 s (Fig. 7).

Les mesures de rugosité effectuées après gravure au microscope à force atomique (AFM), sur une fenêtre de $2 \times 2 \mu\text{m}^2$, ont indiqué des valeurs d'écart quadratique de rugosité (RMS) de 0,43 nm avant gravure et 1,22 nm après gravure (Fig.8). La surface de l'AlGaIn après gravure présente une rugosité trois fois plus élevée que la rugosité initiale mais reste acceptable pour un mode de gravure par bombardement physique (RIE). L'ajout d'une quantité appropriée de BCl_3 au mélange de plasma pourrait aider à améliorer la rugosité de la surface gravée [10].

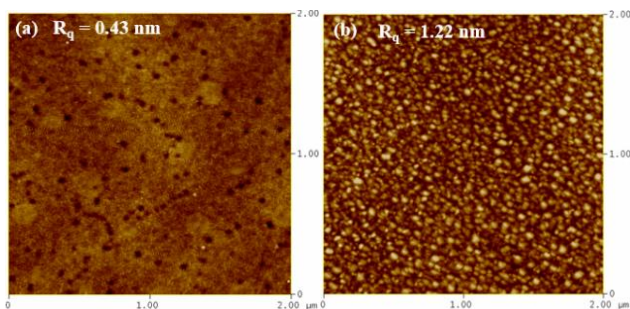


Fig.8 : Images AFM de l'AlGaIn : (a) avant gravure, (b) après gravure RIE par Cl_2 pendant 25 s (puissance RF = 60 W, pression = 5 mTorr and Cl_2 flow = 10 sccm).

3.2. Croissance du P-GaN par reprise d'épitaxie

Deux techniques de croissance ont été utilisées pour valider la reprise d'épitaxie du GaN sur AlGaIn gravé : la MOCVD et l'épitaxie par jets moléculaires (MBE). Les premiers essais effectués par MOCVD ont été réalisés à partir de conditions précédemment optimisées pour la croissance planaire. Dans ce cas la reprise d'épitaxie conduit à une croissance discontinue de la couche GaN de grille, avec des îlots de croissance de forme pyramidale, comme le montre la Fig. 9.

La reprise d'épitaxie par MBE a permis quant à elle l'obtention de couches GaN uniformes (Fig. 10.a). Pour ce premier essai, le Magnésium, dopant de type P, n'a pas été introduit durant la croissance. Même si la surface après gravure de l'AlGaIn est rugueuse à l'échelle nanométrique, avec une rugosité de l'ordre de 1,22 nm, la croissance de GaN lisse complètement la surface. On obtient alors une rugosité moindre de 0,850 nm (Fig. 10.b). En outre, on ne constate pas de problèmes de nucléation.

Ce résultat obtenu par MBE est encourageant. Les conditions de croissance doivent encore être optimisées afin de diminuer l'épaisseur de la couche GaN qui avoisine les 100nm pour ce premier essai. L'étape suivante consistera à réaliser une croissance de GaN dopé Mg, avec le contrôle du dopage effectif. Il faudra également traiter la gestion d'une éventuelle contamination à l'interface de recroissance.

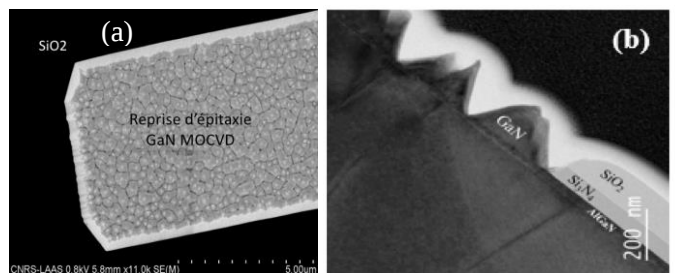


Fig. 9 : Images MEB de la reprise d'épitaxie du GaN par MOCVD après gravure chlorée de l'AlGaIn pendant 25 s : (a) vue de dessus d'une ouverture de grille de $6\mu\text{m}$, (b) vue en coupe.

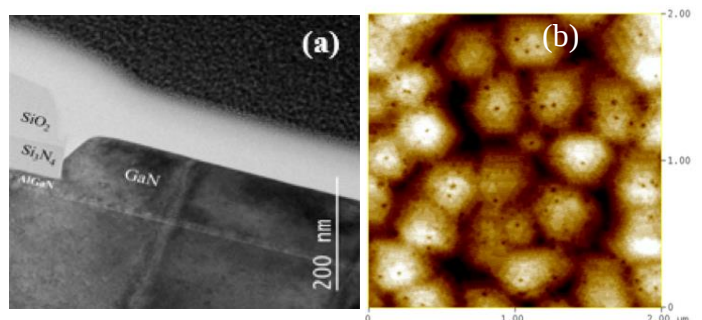


Fig. 10 : Images de la reprise d'épitaxie du GaN par MBE après gravure chlorée de l'AlGaIn pendant 25 s : (a) vue en coupe au MEB, (b) vue AFM de la rugosité de surface.

4. CONCLUSION

Dans ce travail, une nouvelle structure de HEMT AlGaIn/GaN normally-off a été proposée. Les résultats de simulation sous Sentaurus TCAD ont montré que l'introduction d'une

couche P-GaN sous le contact de grille permet de rendre le composant normally-off. Des tensions de seuil élevées peuvent être obtenues en réduisant l'épaisseur de l'AlGaIn sous le P-GaN. En ce qui concerne la réalisation technologique du HEMT normally-off, les travaux menés sur la gravure RIE de la grille à base de Cl_2 ont permis d'obtenir une gravure nanométrique de l'AlGaIn. La rugosité obtenue après gravure, bien que plus élevée que celle initiale des couches, reste acceptable pour un mode de gravure RIE. La reprise d'épitaxie localisée du P-GaN a été testée avec les deux techniques de croissance que sont la MOCVD et la MBE. Cette dernière a permis l'obtention de meilleurs résultats en termes d'uniformité de couche.

Les futurs travaux vont concerner la mise en place de l'ensemble des étapes technologiques de fabrication du composant pour valider le comportement normally-off.

5. REMERCIEMENTS

Ces travaux ont été en partie supportés par la plateforme micro et nano-technologies du LAAS-CNRS, membre du réseau français RENATECH.

6. REFERENCES

- [1] K. J. Chen *et al.*, « Physics of fluorine plasma ion implantation for GaN normally-off HEMT technology », déc. 2011, p. 19.4.1-19.4.4, doi: 10.1109/IEDM.2011.6131585.
- [2] Y.-L. He *et al.*, « Recessed-gate quasi-enhancement-mode AlGaIn/GaN high electron mobility transistors with oxygen plasma treatment », *Chin. Phys. B*, vol. 25, n° 11, p. 117305, nov. 2016, doi: 10.1088/1674-1056/25/11/117305.
- [3] H. Okita *et al.*, « Through recessed and regrowth gate technology for realizing process stability of GaN-GITs », in *2016 28th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD)*, Prague, Czech Republic, juin 2016, p. 23-26, doi: 10.1109/ISPSD.2016.7520768.
- [4] Y. Zhong *et al.*, « Effect of Thermal Cleaning Prior to p-GaN Gate Regrowth for Normally Off High-Electron-Mobility Transistors », *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 11, n° 24, p. 21982-21987, juin 2019, doi: 10.1021/acsami.9b03130.
- [5] S. Hamady, F. Morancho, B. Beydoun, P. Austin, et M. GAVELLE, « P-doped region below the AlGaIn/GaN interface for normally-off HEMT », in *16th Conference on Power Electronics and Applications, EPE'14-ECCE Europe*, Lappeenranta, Finland, août 2014, vol. 961, p. 1-8, doi: 10.1109/EPE.2014.6910769.
- [6] G. Toulon et C. Mattew, « Transistor HEMT de type normalement ouvert présentant une tension de seuil élevée et une résistance de conduction réduite. », FR 3 047 609-A1.
- [7] J. Robertson et B. Falabretti, « Band offsets of high K gate oxides on III-V semiconductors », *J. Appl. Phys.*, vol. 100, n° 1, p. 014111, juill. 2006, doi: 10.1063/1.2213170.
- [8] T. Hashizume, S. Ootomo, T. Inagaki, et H. Hasegawa, « Surface passivation of GaN and GaN/AlGaIn heterostructures by dielectric films and its application to insulated-gate heterostructure transistors », *J. Vac. Sci. Technol. B Microelectron. Nanometer Struct.*, vol. 21, n° 4, p. 1828, 2003, doi: 10.1116/1.1585077.
- [9] D. Buttari *et al.*, « Systematic characterization of Cl_2 reactive ion etching for improved ohmics in AlGaIn/GaN HEMTs », *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 23, n° 2, p. 76-78, févr. 2002, doi: 10.1109/55.981311.
- [10] Y. Han *et al.*, « Nonselective and smooth etching of GaN/AlGaIn heterostructures by $\text{Cl}_2/\text{Ar}/\text{BCl}_3$ inductively coupled plasmas », *J. Vac. Sci. Technol. Vac. Surf. Films*, vol. 22, n° 2, p. 407-412, mars 2004, doi: 10.1116/1.1641054.