

# Épitaxie localisée de P-GaN par EJM pour la fabrication de HEMTs AlGaIn/GaN normally-off

Daniel ROULY<sup>1</sup>, Josiane TASSELLI<sup>1</sup>, Patrick AUSTIN<sup>1</sup>, Yvon CORDIER<sup>2</sup>, Aimeric COURVIL<sup>2</sup>, François VAURETTE<sup>3</sup>, Aurélie LECESTRE<sup>1</sup>, Benjamin REIG<sup>1</sup>, Karine ISOIRD<sup>1</sup>, Frédéric MORANCHO<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LAAS-CNRS, Université de Toulouse, CNRS, UPS, Toulouse, France

<sup>2</sup>CRHEA-CNRS, Valbonne, France

<sup>3</sup>IEMN, Villeneuve d'Ascq, France

**RESUME** - La technologie des structures HEMT GaN fait l'objet d'importants développements pour les composants de puissance grand gap. Cependant, il est nécessaire de développer des solutions technologiques innovantes pour obtenir des composants normally-off performants. Nous présentons une nouvelle structure normally-off basée sur une grille nanostructurée à multi-puits P-GaN. La conception de cette structure issue de simulations numériques ainsi que les avancées technologiques pour sa fabrication par épitaxie localisée des caissons P-GaN le long de la grille seront exposées.

**Mots-clés**— AlGaIn/GaN HEMT, normally-off, épitaxie localisée, EJM, simulation numérique TCAD, P-GaN

## 1. INTRODUCTION

La technologie HEMT GaN (*transistor à haute mobilité électronique en nitrure de gallium*) est en plein essor dans le domaine des composants de puissance car elle offre de nombreux avantages par rapport à la technologie silicium traditionnelle tels que, par exemple, la capacité à fonctionner à des tensions, températures et fréquences élevées. Cependant, ces transistors présentent l'inconvénient d'être naturellement normally-on : le canal sous la grille est peuplé d'électrons même à une tension de grille nulle. Afin de répondre aux exigences d'efficacité et de sécurité de fonctionnement des systèmes énergétiques, il est nécessaire de développer des solutions technologiques innovantes pour obtenir des composants « normally-off » performants présentant des tensions de claquage élevées, de faibles résistances à l'état passant et des tensions de seuil supérieures à 2V.

Plusieurs approches, chacune avec ses propres limitations, ont été proposées pour assurer la fonctionnalité normally-off comme la gravure de grille (ou recessed-gate) [1], l'implantation ionique au plasma de fluor [2], ou l'injection dans la grille (GIT) [3]. La voie technologique la plus couramment développée consiste à introduire une couche GaN de type P en-dessous de l'électrode de grille du HEMT [4]: le canal 2DEG (gaz bidimensionnel d'électrons) créé par l'empilement AlGaIn/GaN est ainsi déserté sous la grille. Il est alors nécessaire d'appliquer une tension de grille positive pour rétablir le canal sous la grille, rendant ainsi le HEMT normally-off. La technologie AlGaIn/FinFET est également devenue une solution pertinente pour la fabrication de composants normally-off, rendue possible grâce aux progrès des techniques de lithographie électronique à haute résolution [1].

Nous avons montré lors de précédents travaux [2] qu'il était possible, pour la réalisation de la grille, d'associer la technologie « recessed-gate » avec la croissance localisée par épitaxie par

jets moléculaires (EJM) de GaN dopé P (Magnésium) afin d'obtenir des HEMT normally-off présentant des tensions de seuil de l'ordre de 1 V. L'inconvénient de cette méthode est qu'il est nécessaire de contrôler la profondeur de gravure de la couche d'AlGaIn à l'échelle nanométrique.

Nous présentons, dans cet article, une nouvelle structure de grille constituée de multi-puits nanométriques répartis le long de cette dernière et remplis de P-GaN par épitaxie localisée par EJM. Nous rappellerons les résultats des simulations numériques qui ont permis de définir les paramètres de conception de la grille [3] et nous présenterons les avancées technologiques sur l'épitaxie localisée du P-GaN.

## 2. OPTIMISATION DES PARAMETRES TECHNOLOGIQUES DU HEMT

Des simulations 2D par éléments finis ont été réalisées en utilisant le logiciel de simulation Sentaurus TCAD afin de déterminer les paramètres géométriques et technologiques de la nouvelle structure de grille que nous proposons. Cette dernière est constituée d'une alternance de régions P-GaN espacées par les zones actives AlGaIn/GaN qui assureront la continuité du canal 2DEG de la source vers le drain du transistor à l'état passant. Ce dernier est établi par un potentiel positif appliqué sur l'électrode de grille de type Schottky afin de retrouver l'intégrité du canal 2DEG en diminuant la Zone de Charges d'Espace (ZCE) de déplétion des régions P-GaN.

La figure 1 montre des vues 3D et en coupe de la structure HEMT étudiée : a) vue schématique 3D du HEMT complet ; vues en coupe schématiques le long de la grille montrant l'alternance des caissons P-GaN (b) ; à travers un caisson P-GaN entre source et drain (c) et entre source et drain, et entre deux caissons P-GaN.

La vue en coupe schématique de la figure 2 représente la cellule élémentaire simulée, constituée de deux caissons P-GaN situés le long de la grille du HEMT et espacés par une zone active AlGaIn/GaN.

Les paramètres qui caractérisent la grille et qui influent sur la variation de la tension de seuil, et donc sur la fonctionnalité normally-off du HEMT, sont respectivement la profondeur  $e_T$  et la largeur  $L_T$  des caissons P-GaN, la concentration  $N_{CP}$  en atomes dopants du P-GaN et la distance  $D_T$  entre deux régions P-GaN.

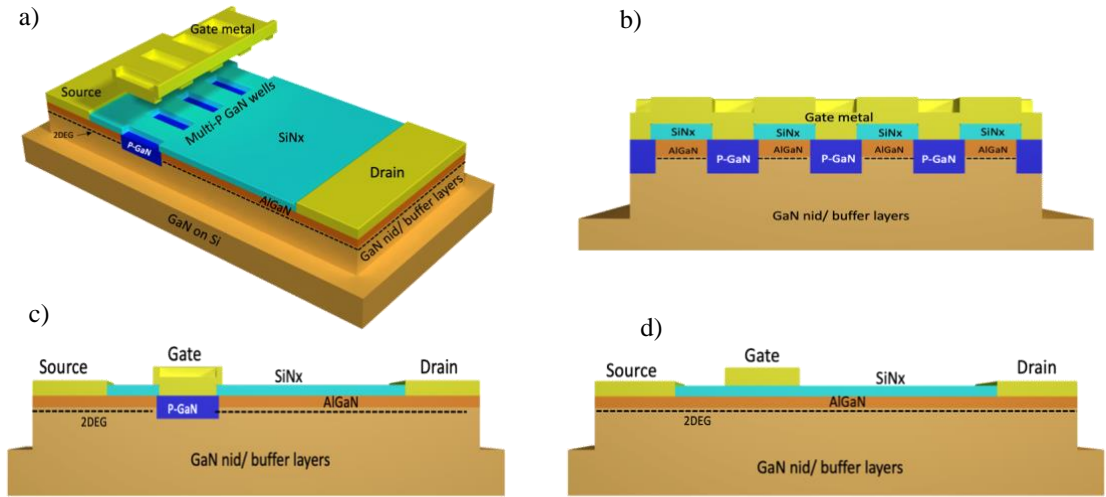


Fig. 1. Vue schématique 3D de la nouvelle structure HEMT à grille P-GaN nano-structurée (a); Vues en coupe schématiques (b) le long de la grille montrant l'alternance des caissons P-GaN, (c) traversant un caisson P-GaN entre source et drain, (d) entre source et drain, et entre deux caissons P-GaN.

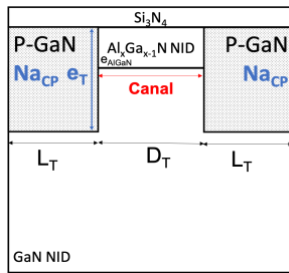


Fig.2. Vue en coupe schématique de la cellule élémentaire simulée montrant deux caissons P-GaN et la région active AlGaIn/GaN.

### 2.1. Conditions de simulation

L'hétérostructure simulée est définie par un empilement de la barrière  $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}$  sur une couche GaN avec des épaisseurs respectives de 20 nm et 1  $\mu\text{m}$ . La teneur en aluminium  $x_{\text{Al}}$  de la barrière est comprise entre 15% et 25%. Une fine couche de  $\text{Si}_3\text{N}_4$  permet de modéliser les effets de piégeage à la surface de l'hétérostructure qui compensent les charges piézoélectriques [5].

Les simulations sont effectuées à l'équilibre thermodynamique afin d'optimiser les paramètres de la grille permettant d'obtenir l'extension  $L_{\text{ZCE}}$  de la zone de charges d'espace côté canal la plus grande possible (figure 3). Pour des raisons de faisabilité technologique, l'objectif est de maximiser  $L_{\text{ZCE}}$  pour chaque paramètre de la structure épitaxiale considérée, tout en maintenant un rapport entre la largeur  $L_T$  du caisson P et la largeur  $D_T$  du canal le plus petit possible.

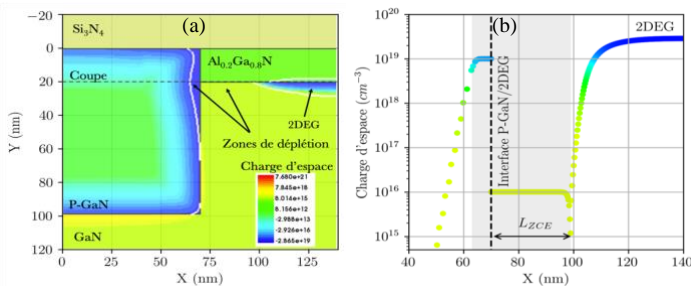


Fig. 3. Exemple de simulations 2D montrant la zone de charges d'espace créée à la jonction du puits P-GaN et du canal du HEMT dans une cellule élémentaire (a) et à l'interface AlGaIn/GaN (b).

### 2.2. Optimisation des paramètres technologiques des caissons P-GaN

Nous avons étudié l'influence de  $e_T$ , la profondeur des caissons P, et de  $\text{Na}_{\text{CP}}$ , la concentration de dopants actifs dans le P-GaN, sur la largeur de la zone de déplétion côté canal  $L_{\text{ZCE}}$  et ce en fonction de la variation du taux d'aluminium dans la couche AlGaIn. Pour chacune des simulations, les paramètres qui ne varient pas ont été fixés à 100 nm pour  $e_T$ ,  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  pour  $\text{Na}_{\text{CP}}$  et 1  $\mu\text{m}$  pour  $L_T$  de manière à considérer une jonction infinie côté P-GaN.

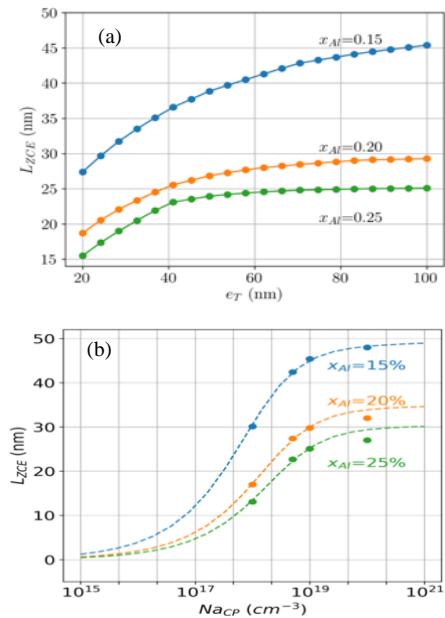


Fig. 4. Variations de  $L_{\text{ZCE}}$  en fonction de  $e_T$  pour  $\text{Na}_{\text{CP}}$  fixé à  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  (a) et en fonction de  $\text{Na}_{\text{CP}}$  pour  $e_T$  fixé à 100 nm (b) pour différents d'aluminium  $x_{\text{Al}}$  dans l'AlGaIn de 15%, 20% et 25%.

Les simulations montrent que  $L_{\text{ZCE}}$  varie entre 25 nm et 45 nm dans la gamme des valeurs du taux d'aluminium choisies (figure 4.a). Naturellement, plus le dopage du caisson P-GaN est élevé et plus  $L_{\text{ZCE}}$  est importante. Cependant, quel que soit le taux d'aluminium,  $L_{\text{ZCE}}$  ne varie plus au-delà d'une concentration  $\text{Na}_{\text{CP}}$  de  $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  (figure 4.b).

La largeur  $L_T$  des caissons influe directement sur l'équilibre des charges de la jonction P-GaN/2DEG et donc sur l'extension de la ZCE. Nous avons donc cherché à déterminer pour quelle valeur minimale de  $L_T$  l'extension de la charge d'espace dans le canal est maximale.

La figure 5.a illustre l'évolution de  $L_{ZCE}$  pour trois largeurs  $L_T$  du caisson P-GaN, 2.5 nm, 7 nm et 18 nm, dans le cas d'une teneur en aluminium de 20% et d'une concentration  $N_{ACP}$  de  $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . Pour 2.5 nm, le caisson est trop fin ce qui limite l'extension de la ZCE dans le canal. En augmentant  $L_T$ ,  $L_{ZCE}$  augmente jusqu'à atteindre sa valeur maximale.

Nous avons analysé la variation de la largeur minimale des caissons  $L_{Tmin}$  pour laquelle  $L_{ZCE}$  arrive à 95% de sa valeur maximale (figure 5.b). Pour un dopage donné,  $L_{Tmin}$  augmente avec le taux d'aluminium ; de même  $L_{Tmin}$  diminue quand le dopage du caisson P-GaN augmente. Dans le cas simulé de la figure 5.a, la largeur minimale du caisson est de 16 nm.

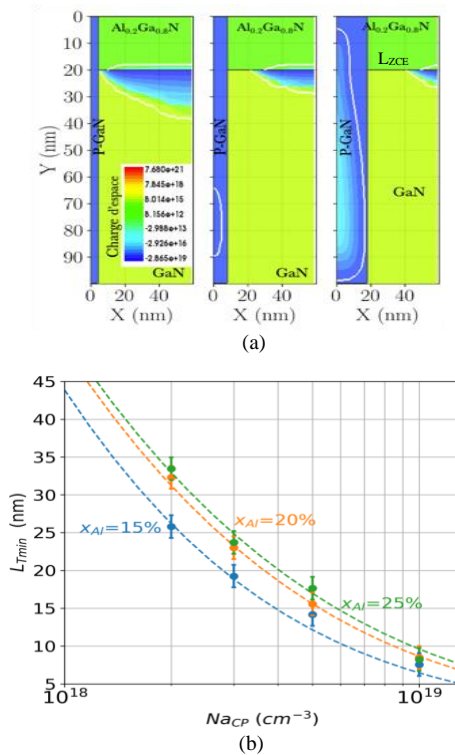


Fig. 5. Variations de  $L_{ZCE}$  pour différentes largeurs des puits P-GaN, 2.5 nm, 7 nm et 18 nm (a) ; évolution de  $L_{Tmin}$  en fonction de  $N_{ACP}$  pour différents taux d'aluminium  $x_{Al}$  dans l'AlGaIn de 15%, 20% et 25% (b).

Si l'on considère la structure de départ qui contient une hétérostructure  $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$  avec une couche AlGaIn d'une épaisseur de 20 nm, les paramètres optimisés permettant une déplétion totale du canal 2DEG avec une extension de charge d'espace maximale de 29 nm sont les suivants : une largeur de caisson  $L_T$  supérieure à 20 nm, une profondeur  $e_T$  de 100 nm et une concentration  $N_{ACP}$  de  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ . Une distance  $D_T$  inférieure à 58 nm permettra donc un bon recouvrement des ZCE de la cellule.

### 2.3. Simulation 3D du HEMT normally-off

La figure 6.a montre une vue 3D de la demi-cellule simulée : le modèle physique a été établi à partir des paramètres des couches du HEMT calibré dans les travaux de thèse de C.M. Ngom [6]

Le modèle de simulation est composé d'une cellule de grille avec une concentration de dopants des régions de type P de  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ . La largeur de la région P-GaN est de 50 nm, une électrode de grille schottky, avec un travail de sortie de 5.1 eV est placée sur les caissons P-GaN. Le canal est modélisé par une hétérojonction AlGaIn/GaN avec une teneur en aluminium dans la barrière de 20%. Des contacts ohmiques de drain et source sont placés de chaque côté de la structure.

La caractéristique simulée  $I_D$  ( $V_{GS}$ ) à  $V_D = 1 \text{ V}$  est reportée sur la figure 6.b. La tension de seuil  $V_{th}$  du HEMT varie de 1,7 à 2,5 V pour des espacements intercellulaires  $D_T$  allant de 30 à 70 nm. Les valeurs positives de  $V_{th}$  obtenues confirment la fonctionnalité normally-off de la structure étudiée.

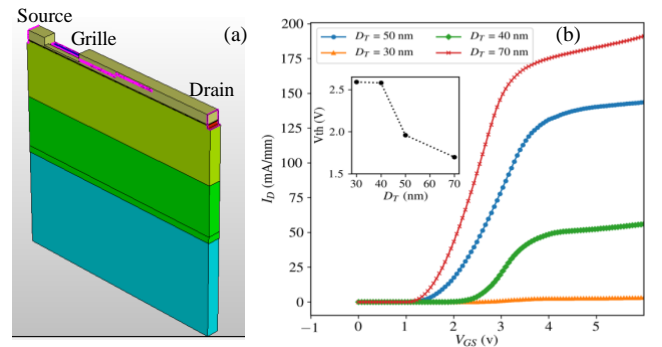


Fig. 6. Demi-cellule du HEMT simulée (a) et caractéristique de transfert simulée  $I_D$  ( $V_{GS}$ ) à  $V_D = 1 \text{ V}$  pour  $D_T$  variant de 30 nm à 70 nm (b).

## 3. DEVELOPPEMENT TECHNOLOGIQUE POUR LA REALISATION DE LA GRILLE NANOSTRUCTUREE

La réalisation de la grille nano-structurée nécessite trois étapes principales : la définition de motifs nanométriques dans de la résine inorganique HSQ (Hydrogen Silsequioxane) par lithographie électronique, la gravure du GaN pour définir les puits le long de la grille et l'épitaxie localisée par EJM pour réaliser les zones P-GaN.

### 3.1. Réalisation du masque de gravure en résine HSQ

Les ouvertures de grille sont tout d'abord obtenues par gravure plasma d'une couche de  $\text{SiO}_2$  déposée au préalable sur le substrat. L'étape suivante consiste en la fabrication de nano-fils en résine électro-sensible HSQ à l'intérieur de la grille, afin de définir les murs des caissons P-GaN. Le  $\text{SiO}_2$  et la résine HSQ sont choisis car ces deux matériaux servent de masque pour l'épitaxie localisée [7,8].

Le procédé débute par le dépôt de résine HSQ de 200 nm d'épaisseur en utilisant un mélange de HSQ/mibk (1:1) suivi d'un recuit sur plaque chauffante à  $80^\circ \text{C}$  pendant 1 min. La lithographie est ensuite effectuée sur un équipement eBeam EBPG 5000Plus Raith en utilisant une dose qui varie entre 1996 et  $2700 \mu\text{C}/\text{cm}^2$  en fonction de la nature de l'échantillon pour un courant de 10 nA. Le développement de la résine HSQ est réalisé en utilisant un bain de TMAH 25% pendant 4 minutes suivi d'un rinçage à l'eau DI de 2 minutes puis d'un bain de méthanol de 1 min. Les échantillons sont ensuite séchés sur plaque chauffante à  $50^\circ \text{C}$  à l'aide d'un jet de  $\text{N}_2$  appliqué parallèlement aux nano-fils.

### 3.2 Gravure des puits P-GaN

La première étape consiste en une densification de la résine HSQ en utilisant un plasma d'oxygène à 150 W pendant 5 minutes. Nous avons ensuite mis en œuvre la gravure RIE-ICP sur un équipement SENTECH SI500 pour réaliser des caissons d'une profondeur de 100 nm. La gravure des couches AlGaIn et GaN est effectuée en utilisant un plasma de  $\text{BCl}_3/\text{Ar}/\text{N}_2$  avec des flux de 20/5/10 sccm, une puissance ICP de 300 W, une puissance de polarisation de 150 W et une pression de 3 mTorr pendant 30 à 60 secondes [9]. Des analyses par microscopie à force atomique (AFM) ont permis d'évaluer la rugosité de surface résultante de l'ordre de 0.2 nm, et de mesurer une vitesse de gravure de 350 nm/min (figure 7.a).

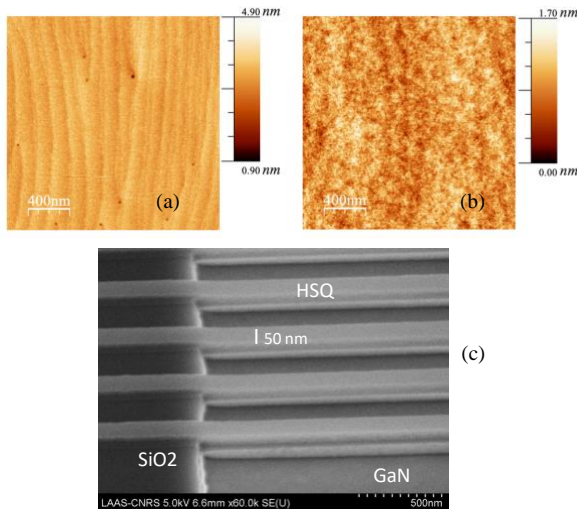


Fig. 7. Mesures AFM montrant la rugosité de surface des couches GaN loin (a) et près (b) des bords de caisson ; Observation MEB de nano-fils de HSQ/GaN de 50 nm de large (c).

La figure 7.b montre une vue partielle de l'ouverture de grille délimitée par le  $\text{SiO}_2$  où l'on peut voir les caissons gravés entre des lignes de HSQ de 50 nm de large.

### 3.3 Épitaxie localisée par EJM de GaN NID et de GaN dopé Mg

Nous avons choisi la technique EJM pour l'épitaxie localisée du GaN dopé Mg. Le procédé débute par un nettoyage chimique de la surface avec une solution de HCl 37%. La résine HSQ est ensuite stabilisée en effectuant un dégazage à 500 °C suivi d'un recuit à 800 °C sous un flux de  $\text{NH}_3$ . Cette résine possède alors les mêmes propriétés qu'un matériau de type  $\text{SiO}_x$ . Un traitement chimique au KOH permet ensuite de nettoyer la surface du GaN abimée par la gravure. L'épitaxie localisée du GaN de 100 nm d'épaisseur prévue est alors effectuée à 800 °C dans un réacteur EJM sous un flux de  $\text{NH}_3$ .

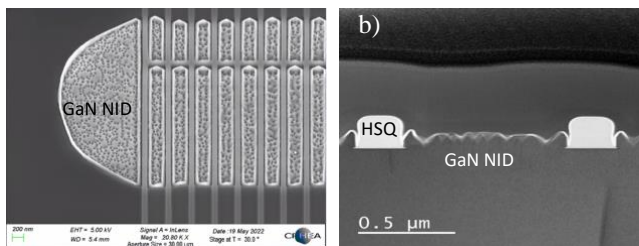


Fig. 8. Observations MEB d'une grille avec une épitaxie de GaN NID pour un nettoyage KOH, HCl (a) et coupe FIB correspondante (b).

Les premiers essais ont concerné la croissance de GaN non intentionnellement dopé (NID) afin de valider la faisabilité du

procédé. Les observations MEB des grilles (figure 8.a) et les coupes FIB effectuées entre les lignes de HSQ (figure 8.b) montrent que la croissance du GaN n'est pas uniforme dans les caissons.

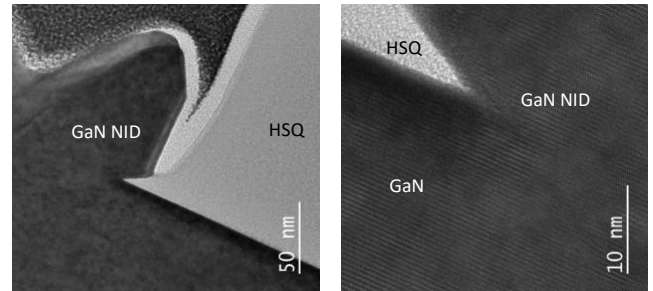


Fig. 9. Analyses TEM de l'épitaxie de GaN NID pour un nettoyage KOH, HCl

Les analyses TEM reportées dans la figure 9 montrent que la croissance du GaN s'effectue préférentiellement sur les flancs des caissons, côté  $\text{SiO}_2$  et HSQ, et que l'on obtient un parfait accord de maille entre le GaN gravé dans le caisson et le GaN NID épitaxié.

Ces essais ont mis également en évidence l'importance du dimensionnement des nano-fils de HSQ : si le rapport de forme hauteur/largeur est trop grand, les lignes ont tendance à se déformer pendant le développement de la résine lors de la lithographie eBeam, comme le montre l'image MEB de la figure 10.a pour des nano-fils de 100 nm de large et une ouverture de grille de 3  $\mu\text{m}$ .

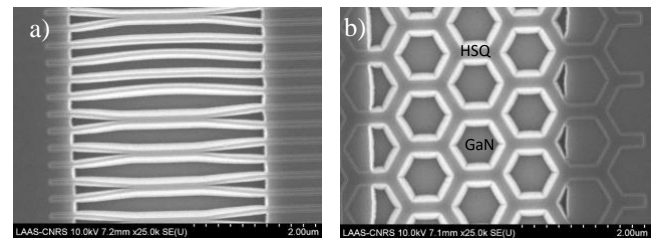


Fig. 10. Observations MEB de lignes de HSQ de 70 nm de large (a) et de caissons en forme de nids d'abeille (b) pour une ouverture de grille de 3  $\mu\text{m}$ .

La surface apparente des fils joints peut ainsi être 2 à 3 fois plus grande que les dimensions requises pour  $D_r$  issues de la simulation. Nous avons donc envisagé la réalisation de caissons en forme de nids d'abeille afin d'augmenter la robustesse des murs de HSQ, permettant à la résine de supporter les différents bains chimiques lors de la fabrication du dispositif. La figure 10.b montre un réseau ainsi obtenu après gravure du GaN pour des murs de 200 nm de large.

Différents nettoyages chimiques ont été testés avant la croissance sélective du GaN dopé Magnésium, afin d'éliminer toute contamination chimique ou tous défauts de gravure pouvant être à l'origine de la croissance non uniforme observée pour l'épitaxie localisée du GaN NID :

- Nettoyage 1 : Bain de HCl à 85 °C, puis bain de TMAH 25% à 80 °C suivi d'un Piranha à 110 °C et d'un bain de HCl à 37% (figure 11.a) ;
- Nettoyage 2 : Piranha à 110 °C suivi d'un bain de HCl 37% (figure 11.b).

Dans chacun des cas un dégazage sous vide à 500 °C est effectué suivi d'un recuit à 800 °C sous  $\text{NH}_3$  avant l'épitaxie.



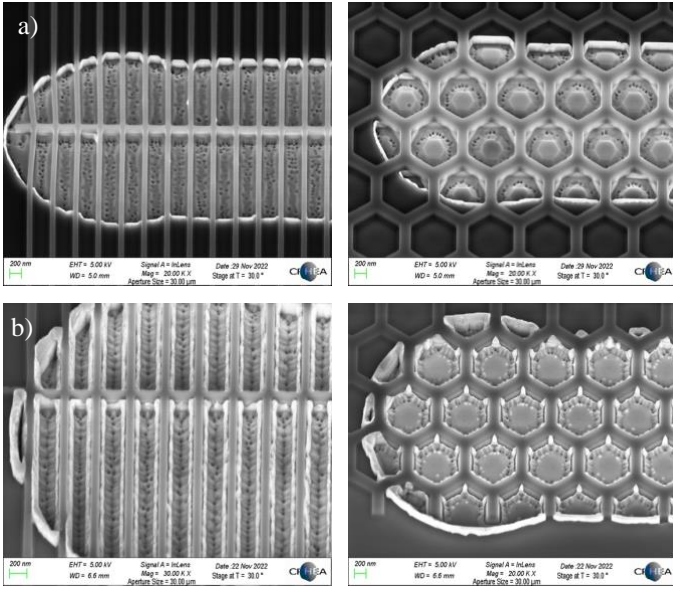


Fig. 11. Observations MEB d'une grille avec une épitaxie localisée P-GaN pour des nettoyages avant croissance HCl, TMAH, Piranha, HCl (a) et Piranha, HCl (b).

La croissance dans les puits est toujours insuffisante, le remplissage étant plus uniforme dans les fonds de caisson pour les structures en nid d'abeille (figure 12). Dans le cas d'un nettoyage à base de Piranha-HCl, la croissance du P-GaN s'effectue également préférentiellement sur les flancs des caissons.

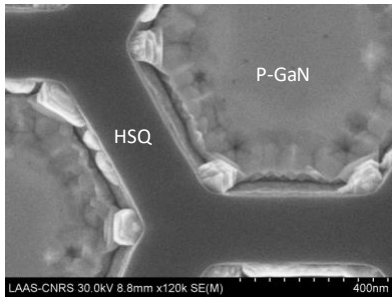


Fig. 12. Observations MEB de l'épitaxie localisée de P-GaN dans les caissons en forme de nids d'abeille dans le cas du nettoyage 2 à base de Piranha-HCl.

Par contre, dans le cas d'un nettoyage à base de TMAH, on ne constate plus la surcroissance sur les bords des caissons. Une observation MEB a permis de mettre en évidence l'absence de matériau GaN sous les nano-fils HSQ qui sont alors suspendus au-dessus de la grille (figure 13.a). Ce type de nettoyage trop agressif a conduit à une sur-gravure du GaN et à l'élimination des murs des caissons. Sur l'image MEB de la figure 13.b dans le cas de fils de 200 nm de large espacés de 400 nm, on peut constater la présence, sous les lignes HSQ, du Pt utilisé pour la coupe FIB, ce qui montre que le GaN a été gravé sous la résine.

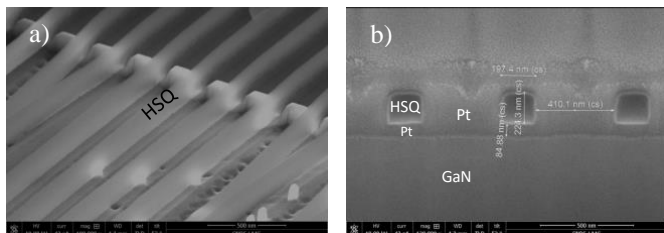


Fig. 13. Observation MEB (a) et coupe FIB (b) sur un réseau de lignes HSQ après épitaxie localisée de P-GaN dans le cas du nettoyage 1 à base de TMAH.

Nous avons pu également observer que dans le cas de caissons en forme de nids d'abeille il était important de prendre en compte l'orientation cristalline du substrat de départ. En effet, si l'on considère les images MEB de la figure 14, on peut voir que dans le cas de la gravure sèche RIE du GaN, les murs des caissons sont parfaitement définis (figure 14.a). Par contre après la gravure humide à base de TMAH on constate que l'orientation des murs est à 45 degrés de celle de la résine HSQ (figure 14.b) : les traits en pointillés sur l'image délimitent les flancs du caisson résultant de cette gravure. La croissance du P-GaN s'effectue alors selon ces plans nouvellement définis comme le montre l'hexagone de P-GaN au centre du caisson.

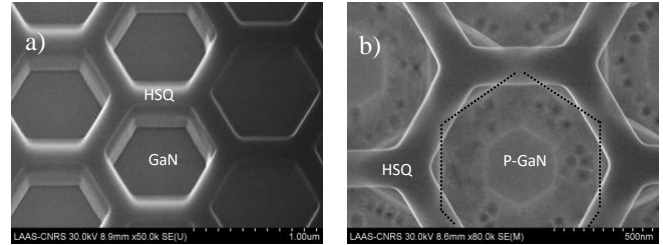


Fig. 14. Observations MEB de caissons en forme de nids d'abeille après gravure RIE du GaN avant épitaxie (a) et après nettoyage chimique et épitaxie localisée (b).

Les premiers résultats d'épitaxie localisée ont montré l'importance de maîtriser les nettoyages chimiques tant pour la définition des nano-fils HSQ que pour la préparation de la surface après la gravure chlorée des caissons GaN et avant la croissance épitaxiale par MBE. D'autres nettoyages à base de KOH-HCl doivent être testés.

La technique de réalisation de caissons P-GaN par EJM ayant été validée, les paramètres de l'épitaxie localisée doivent être optimisés afin d'atteindre une épaisseur de 200 nm de P-GaN pour assurer un meilleur remplissage des caissons et une meilleure uniformité de cette couche.

#### 4 CONCLUSIONS

Nous avons présenté la conception et les étapes de fabrication d'une nouvelle structure de grille pour la réalisation d'un HEMT AlGaIn/GaN normally-off. Le principe retenu est la création de puits enterrés P-GaN de dimension nanométrique espacés par des zones actives AlGaIn/GaN et répartis le long de la grille. La simulation numérique par Sentaurus TCAD a permis de déterminer les paramètres optimaux de la grille permettant d'obtenir une déplétion totale du canal 2DEG, à savoir une largeur de caisson P-GaN supérieure à 20 nm, une profondeur de 100 nm et une concentration de  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ .

Nous avons utilisé la lithographie électronique avec une résine HSQ pour la définition des caissons et l'épitaxie localisée par EJM pour leur remplissage. Nous avons développé des structures de caissons en forme de nids d'abeille qui présentent une meilleure robustesse des murs en HSQ comparé aux structures linéaires. Les résultats ont montré qu'il était possible d'obtenir des caissons P-GaN de 100 nm à 200 nm de large espacés par des zones actives de 50 nm à 100 nm de large respectivement.

Ces premiers résultats ont mis en évidence l'importance du nettoyage chimique avant épitaxie du P-GaN, une étude plus approfondie devant être menée afin d'en analyser l'impact sur la croissance épitaxiale. Nous poursuivons les travaux technologiques pour optimiser le remplissage des caissons et l'uniformité de la couche épitaxiée. Il s'en suivra la fabrication

du HEMT afin d'évaluer ses performances électriques et valider notre choix technologique.

Le développement de ces étapes technologiques critiques permettra de lever un verrou pour la conception de fonctions de puissance intégrées à base de HEMTs normally-off.

## 5 REMERCIEMENTS

Ce travail a été soutenu par le programme IPCEI on Microelectronics, projet Nano2022, et par la plateforme de micro et nanotechnologies du LAAS-CNRS, membre du réseau français RENATECH. Nous remercions la plateforme RENATECH de l'IEMN pour la lithographie électronique de la HSQ et le CRHEA-CNRS pour les épitaxies localisées.

## 6 REFERENCES

- [1] J. Ma and E. Matioli, "High Performance Tri-Gate GaN Power MOSHEMTs on Silicon Substrate," in *IEEE Electron Device Letters*, vol. 38, no. 3, pp. 367-370, March 2017, doi: [10.1109/LED.2017.2661755](https://doi.org/10.1109/LED.2017.2661755).
- [2] Haloui, C. (2021). Développement et réalisation technologique de composants HEMTs en Nitrure de Gallium (GaN) présentant la fonctionnalité "Normally-Off" [Theses, Université Toulouse 3 Paul Sabatier]. <https://hal.laas.fr/tel-03400573>
- [3] Rouly, D., Tasselli, J., Austin, P., Haloui, C., Isoird, K., & Morancho, F. (2022, June). Design Optimization of a New Nanostructured P-GaN Gate for Normally-off GaN HEMTs. 29th International Conference on Mixed Design of Integrated Circuits and Systems (MIXDES 2022).
- [4] M. Meneghini *et al.*, « GaN-based power devices: Physics, reliability, and perspectives », *Journal of Applied Physics*, vol. 130, n° 18, p. 181101, nov. 2021, doi: [10.1063/5.0061354](https://doi.org/10.1063/5.0061354).
- [5] G. Longobardi *et al.*, « Impact of Donor Traps on the 2DEG and Electrical Behavior of AlGaIn/GaN MISFETs », *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 35, n° 1, p. 27-29, janv. 2014, doi: [10.1109/LED.2013.2290471](https://doi.org/10.1109/LED.2013.2290471).
- [6] C.M. Ngom, (2021), Développement d'une métrologie par rayons X et laser impulsif pour l'évaluation des effets des radiations sur les composants semiconducteurs avancés, Université de Montpellier
- [7] S. Kotzea, A. Debald, M. Heuken, H. Kalisch, et A. Vescan, « Demonstration of a GaN-Based Vertical-Channel JFET Fabricated by Selective-Area Regrowth », *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 65, n° 12, p. 5329-5336, déc. 2018, doi: [10.1109/TED.2018.2875534](https://doi.org/10.1109/TED.2018.2875534).
- [8] R. A. Ferreyra, A. Suzuki, T. Kazumoto, et D. Ueda, « n<sup>++</sup> GaN Regrowth Technique Using Pico-Second Laser Ablation to Form Non-Alloy Ohmic Contacts », *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 38, n° 8, p. 1079-1081, août 2017, doi: [10.1109/LED.2017.2721951](https://doi.org/10.1109/LED.2017.2721951).
- [9] E. A. Douglas, C. A. Sanchez, R. J. Kaplar, A. A. Allerman, et A. G. Baca, « Inductively coupled BCl<sub>3</sub>/Cl<sub>2</sub>/Ar plasma etching of Al-rich AlGaIn », *J. Vac. Sci. Technol. A*, vol. 35, n° 2, p. 021305, mars 2017, doi: [10.1116/1.4971245](https://doi.org/10.1116/1.4971245)