



HAL
open science

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

Chaymaa Haloui, Gaëtan Toulon, Josiane Tasselli, Yvon Cordier, Éric Frayssinet, Karine Isoird, Frédéric Morancho, Mathieu Gavelle

► To cite this version:

Chaymaa Haloui, Gaëtan Toulon, Josiane Tasselli, Yvon Cordier, Éric Frayssinet, et al.. Développement technologique d'un HEMT normally- off avec une grille à barrière P-GaN. SYMPOSIUM DE GENIE ELECTRIQUE (SGE 2020), Jul 2021, Nantes, France. hal-02918372v1

HAL Id: hal-02918372

<https://hal.science/hal-02918372v1>

Submitted on 20 Aug 2020 (v1), last revised 27 Sep 2021 (v2)

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

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 AlGaN/GaN normally-off avec une grille à barrière P-GaN. Des résultats de simulation ont montré que la tension de seuil de cette structure peut atteindre une valeur supérieure à 2 V et qu'elle est liée à la profondeur de gravure de la couche d'AlGaN. 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, AlGaN/GaN, normally-off, gravure d'AlGaN, 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. Dans cet article, nous présentons les travaux de réalisation technologique d'une nouvelle structure de HEMT normally-off en GaN avec une grille à barrière P-GaN [1]. Nous nous focaliserons sur la gravure de l'ouverture de grille et la reprise d'épitaxie du P-GaN.

2. SIMULATION

Des simulations 2D ont été réalisées avec l'outil Sentaurus TCAD afin de déterminer la tension de seuil du HEMT proposé. La structure simulée a une distance grille-source de 2 µm et une distance grille-drain de 15 µm. Une plaque de champ de grille de 3 µm est ajoutée du côté du drain. L'insertion d'une couche GaN de type P dans la couche d'AlGaN, 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 la bande de conduction afin que le dispositif ainsi conçu ait la fonction normally-off. Cette dernière dépend de l'épaisseur ΔP_{GaN} d'AlGaN sous le P-GaN (Fig. 1) : pour des valeurs négatives de

cette épaisseur, la couche restante de l'AlGaN sous la grille fournit une charge de polarisation plus élevée à épuiser, ce qui conduit à une faible tension de seuil.

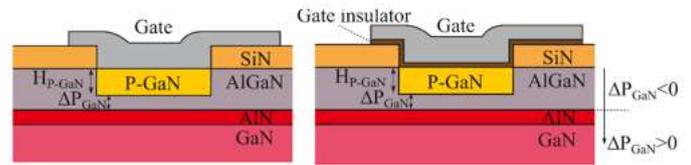


Fig. 1 : Descriptif de la grille de la structure proposée avec : métal sur P-GaN : Grille Schottky (à gauche) et isolant de grille sur P-GaN : Grille MIS (à droite).

Deux variantes de structure ont été analysées : l'une avec le métal de grille directement sur la région P-GaN et l'autre avec un isolant entre les deux (Fig. 1). Les variations de la tension de seuil en fonction du dopage et de la hauteur du P-GaN ($H_{\text{P-GaN}}$) obtenues par simulation sont représentées Fig. 2. Dans le cas d'une grille MIS, la tension de seuil est indépendante du dopage de la couche P-GaN contrairement au cas d'un contact Schottky où V_{th} dépend de l'épaisseur à désertier.

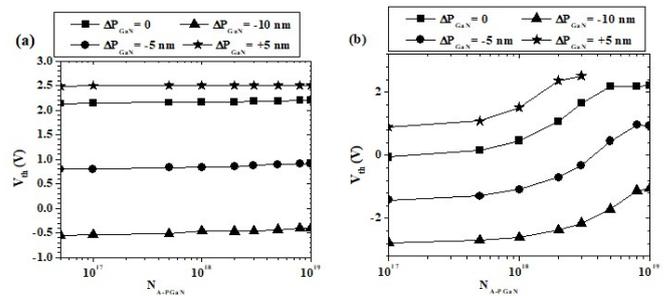


Fig. 2 : Variations de la tension de seuil en fonction du dopage P-GaN pour différentes valeurs de ΔP_{GaN} : (a) Grille MIS ; (b) Grille Schottky.

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 AlGaN/GaN ont été épitaxiées par dépôt chimique en phase vapeur organométallique (MOCVD) sur substrat silicium : l'empilement est composé d'une alternance de couches AIN/GaN, suivie d'une couche de buffer GaN de 1,5 µm, d'une couche de transition AIN de 1,5 nm, d'une couche barrière AlGaN de 25 nm suivie d'un cap de SiN 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 que sont la gravure, la croissance de la couche P-GaN, la maîtrise de l'interface AlGaN/Métal (grille Schottky) et AlGaN/Isolant (grille MIS). Avant la gravure de la grille, 50 nm de Si₃N₄ et 100 nm de SiO₂ sont déposés sur les couches épitaxiées, par LPCVD et ICPECVD respectivement (Fig. 3.a), ces couches permettent la croissance sélective de la couche épitaxiée P-GaN. La grille est réalisée par gravure plasma des trois matériaux : le SiO₂ et Si₃N₄ par chimie fluorée (CHF₃/O₂) et l'AlGaN par chimie chlorée (Cl₂) (Fig. 3.b). La couche de P-GaN est déposée par épitaxie localisée (Fig. 3.c). La couche de masquage SiO₂ est ensuite retirée par voie humide (Fig. 3.d).

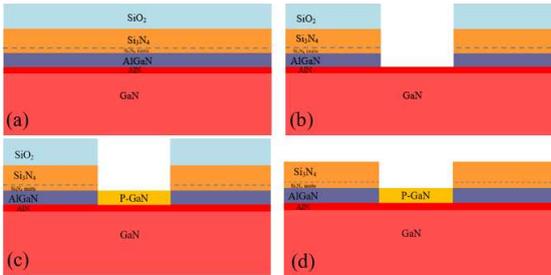


Fig. 3 : Enchaînement des étapes de reprise d'épitaxie du P-GaN sur la région de grille : (a) empilement des couches; (b) gravure de l'ouverture de la grille; (c) croissance du P-GaN en MBE avec dopage Mg; (d) retrait du SiO₂.

3.1. Gravure de la grille

La structure du HEMT proposé est caractérisée par une couche barrière AlGaN 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'AlGaN a été effectuée à base de Cl₂ par gravure ionique réactive (RIE). Les conditions de gravure sont : puissance RF = 60 W, pression = 5 mTorr et débit de Cl₂ = 10 sccm [2]. Après gravure, le masque de résine a été retiré par acétone, isopropanol et EDI suivi d'un plasma O₂ (800W). 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. L'image d'une coupe FIB de l'ouverture de la grille après une gravure de 35 s est présentée dans la Fig. 4.

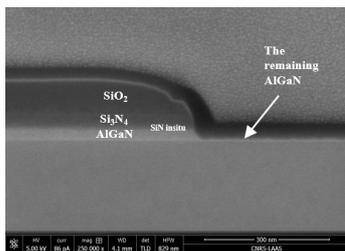


Fig. 4 : Image FIB après gravure RIE de l'AlGaN par Cl₂ en 35 s.

L'utilisation d'une puissance RIE moyenne (< 100 W) a permis de ralentir et contrôler précisément la vitesse de gravure.

Les mesures de rugosité effectuées après gravure au microscope à force atomique (AFM), sur une fenêtre de 2 x 2 μm², ont indiqué des valeurs d'écart quadratique de rugosité (RMS) de 0,43 nm avant gravure et 1,22 nm après gravure (Fig.5). La surface de l'AlGaN 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 BCl₃ au mélange de plasma pourrait aider à améliorer la rugosité de la surface gravée [3].

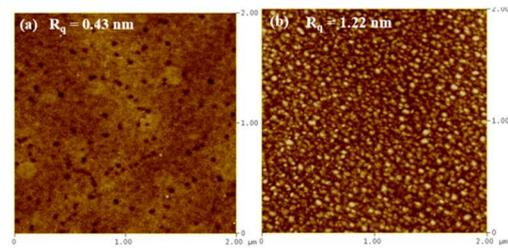


Fig.5 : Images AFM de l'AlGaN : (a) avant gravure, (b) après gravure RIE par Cl₂ pendant 25 s (puissance RF = 60 W, pression = 5 mTorr and Cl₂ flow = 10 sccm).

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 AlGaN gravé. Les premiers essais ont été réalisés à partir de conditions précédemment optimisées pour la croissance planaire. Ces essais conduisent à une croissance pyramidale discontinue dans le cas d'une épitaxie en MOCVD (Fig. 6.a) alors que la croissance MBE par jets moléculaires a permis l'obtention de couches uniformes (Fig. 6.b). Au-delà de la rugosité et du contrôle des épaisseurs, le contrôle du dopage effectif et la gestion d'une éventuelle contamination à l'interface de recroissance sont des points qui doivent également être traités.

Une étude théorique a été menée pour figer des choix technologiques liés à la fabrication du composant.

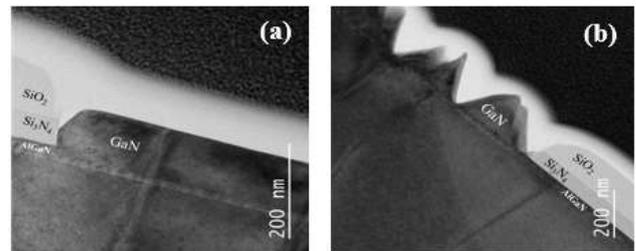


Fig. 6 : Images MEB de la reprise d'épitaxie du GaN après gravure chlorée de l'AlGaN pendant 25s : (a) en MBE, (b) en MOCVD.

4. CONCLUSION

Dans ce travail, une nouvelle structure de HEMT AlGaN/GaN normally-off a été proposée. 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'AlGaN sous le P-GaN. L'optimisation des paramètres du procédé de gravure RIE à base de Cl₂ permet de maîtriser la vitesse de gravure et d'obtenir une gravure précise de l'AlGaN. La rugosité obtenue après gravure, bien que plus élevée que la rugosité initiale des couches, reste acceptable pour un mode de gravure RIE. La reprise d'épitaxie localisée du P-GaN a été testée en MOCVD et MBE. Cette dernière technique 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. REFERENCES

- [1] 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.
- [2] D. Buttari *et al.*, « Systematic characterization of Cl₂ reactive ion etching for improved ohmics in AlGaN/GaN HEMTs », *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 23, n° 2, p. 76-78, févr. 2002, doi: 10.1109/55.981311.
- [3] Y. Han *et al.*, « Nonselective and smooth etching of GaN/AlGaN heterostructures by Cl₂/Ar/BCl₃ inductively coupled plasmas », *J. Vac. Sci. Technol. Vac. Surf. Films.*, vol. 22, n° 2, p. 407-412, mars 2004, doi: 10.1116/1.1641054.