



**HAL**  
open science

## Première démonstration expérimentale d'un interrupteur HEMT normally-off en GaN avec une région P-GaN enterrée

Audrey Chapelle, Éric Frayssinet, Yvon Cordier, Yohann Spiegel, Leïla Benmosfeta, David Trémouilles, Karine Isoird, Frédéric Morancho, Josiane Tasselli, Patrick Austin, et al.

### ► To cite this version:

Audrey Chapelle, Éric Frayssinet, Yvon Cordier, Yohann Spiegel, Leïla Benmosfeta, et al.. Première démonstration expérimentale d'un interrupteur HEMT normally-off en GaN avec une région P-GaN enterrée. Symposium de Génie Electrique (SGE 2018), Université de Lorraine [UL], Jul 2018, Nancy, France. pp.3 - 5. hal-02981903v2

**HAL Id: hal-02981903**

**<https://laas.hal.science/hal-02981903v2>**

Submitted on 24 Jul 2018

**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.

# Première démonstration expérimentale d'un interrupteur HEMT normally-off en GaN avec une région P-GaN enterrée

Audrey CHAPELLE<sup>a</sup>, Éric FRAYSSINET<sup>b</sup>, Yvon CORDIER<sup>b</sup>, Yohann SPIEGEL<sup>c</sup>, Leïla BENMOSFETA<sup>a</sup>, David TRÉMOUILLES<sup>a</sup>, Karine ISOIRD<sup>a</sup>, Frédéric MORANCHO<sup>a</sup>, Josiane TASSELLI<sup>a</sup>, Patrick AUSTIN<sup>a</sup>, Dany HACHEM<sup>a</sup>, Chaymaa HALOUI<sup>a,d</sup>

<sup>a</sup> LAAS-CNRS, Université de Toulouse, CNRS, UPS, 31400 Toulouse, France

<sup>b</sup> Université Côte d'Azur, CNRS, CRHEA, rue Bernard Grégory, 06560 Valbonne, France

<sup>c</sup> Ion Beam Services (IBS), 13790 Peynier, France

<sup>d</sup> CEA Tech Occitanie, 135 avenue de Ranguel, INSA Bât. 17, 31400 Toulouse

**RÉSUMÉ** – Un nouveau concept d'interrupteur de puissance HEMT en GaN présentant la fonctionnalité « normally-off » est expérimentalement validé. L'introduction d'une couche P-GaN suffisamment dopée (autour de  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ) au sein de la couche buffer GaN NID, en-dessous de l'électrode de grille et sous l'interface AlGaIn / GaN, permet d'obtenir une tension de seuil positive de 0,8 V, soit un décalage significatif supérieur à 6 V par rapport à celle d'un HEMT conventionnel « normally-on ».

**Mots-clés** – Interrupteur puissance, GaN, HEMT, normally-off.

## 1. INTRODUCTION

Les transistors à haute mobilité (High Electron Mobility Transistors – HEMTs –) en Nitrure de Gallium (GaN) présentent des propriétés très intéressantes pour la fonction « interrupteur de puissance », essentiellement en raison de la largeur importante de la bande interdite du GaN. Par rapport au Silicium (Si), les principaux bénéfices apportés par le GaN sont un bon fonctionnement sur une large gamme de température, un champ électrique critique élevé et une valeur élevée de la vitesse de dérive des électrons. En outre, contrairement au Carbure de Silicium (SiC), autre matériau à large bande interdite intéressant pour les applications de puissance, qui doit obligatoirement être réalisé par croissance cristalline sur un substrat de même composition et, en général, de faible diamètre (100 à 150 mm maximum actuellement), le GaN, lui, peut être déposé par hétéro-épitaxie sur des substrats en Silicium, permettant ainsi une production sur des plaquettes de surface plus importante (150 à 200 mm de diamètre) et bas coût.

Ainsi, le GaN devrait permettre la conception d'interrupteurs haute tension avec une chute de tension réduite à l'état passant, travaillant à des fréquences et des températures plus élevées que les composants en Si, et répondant ainsi aux quatre difficultés des systèmes énergétiques que sont le refroidissement, le poids, l'encombrement et le rendement.

L'inconvénient majeur des HEMTs conventionnels est qu'ils sont normally-on (« normalement fermés »), leur blocage se faisant à des tensions de commande de grille négatives (entre - 8 V et - 3 V). Or, de nombreuses applications de puissance requièrent l'utilisation d'interrupteurs normally-off

(« normalement ouverts »), c'est-à-dire des interrupteurs ayant des tensions de seuil positives.

Plusieurs architectures GaN HEMT ont été proposées dans la littérature afin de satisfaire à la fonctionnalité « normally-off » : les plus notables sont celles à fossé de grille (« recess gate ») [1], à grille P-GaN [2] [3], à injection dans la grille [4], les structures hybrides MOS-HEMTs [5] et les montages de type cascode associant un HEMT en GaN à un transistor MOS en Si [6]. Une autre solution a été proposée par Hamady *et al.* [7] : elle consiste en l'introduction d'une couche de 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.

L'objectif du travail présenté ici est de valider expérimentalement cette dernière solution. Dans un premier temps, nous résumerons les principaux résultats théoriques précédemment établis [7]. La seconde partie présentera le procédé de fabrication de cet interrupteur HEMT original. Enfin, la troisième partie sera dédiée aux résultats expérimentaux, via essentiellement des caractérisations en régime statique.

## 2. ÉTUDE THÉORIQUE

L'interrupteur HEMT normally-off en GaN proposé par S. Hamady est présenté Fig. 1-b. Il se différencie d'un HEMT conventionnel normally-on (Fig. 1-a) par l'introduction d'une couche P-GaN au sein de la couche GaN NID en-dessous de l'électrode de grille, sous l'interface AlGaIn / GaN.

À l'équilibre, le niveau de Fermi est constant ; la couche P-GaN a pour effet de relever le niveau de la bande de conduction dans la région sous la grille. L'analyse du fonctionnement électrique, basée sur des simulations bidimensionnelles de type TCAD, montre que, 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.

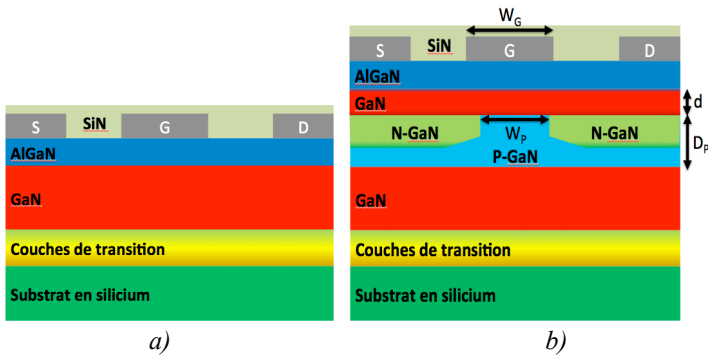


Fig. 1. Coupes schématiques : a) d'un HEMT en AlGaIn/GaN conventionnel, b) du nouveau HEMT normally-off proposé par Hamady *et al.* [7].

Plus précisément, pour obtenir un tel HEMT, la région P-GaN épitaxiée doit présenter les caractéristiques suivantes :

- une largeur  $W_P$  de la zone P-GaN inférieure à la largeur  $W_G$  de la grille,
- une épaisseur  $D_P$  minimale : une centaine de nanomètres,
- une concentration en dopants activés autour de  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ,
- une distance  $d$  entre P-GaN et l'interface AlGaIn/GaN de l'ordre de 10 nm.

Notons en outre que le dopage P du GaN est « compensé » de part et d'autre de la région de grille grâce à l'incorporation d'un dopage N suffisamment élevé permettant de restaurer le passage du courant d'électrons ; sans ces régions N-GaN, le HEMT serait continuellement bloqué sous l'effet de la région P-GaN, quelle que soit la tension appliquée sur la grille.

### 3. PROCÉDÉ DE FABRICATION

La Fig. 2 présente les principales étapes du procédé de fabrication. Celui-ci débute par la réalisation, sur un substrat de Silicium (111), d'épitaxies successives des couches de nucléation et transition, d'une couche de GaN NID puis d'une couche P-GaN (Fig. 2.a). La seconde étape consiste à implanter des donneurs (atomes de Silicium) dans les zones d'accès de source et de drain de part et d'autre des futures grilles (Fig. 2.b). Vient ensuite la reprise d'épitaxie du canal GaN non dopé épais de 10 nm et de la couche barrière AlGaIn (Fig. 2.c) protégée par une fine couche (2 nm) de SiN épitaxié. Les étapes suivantes consistent en la fabrication des transistors (Fig. 2.d) au moyen de procédés classiques.

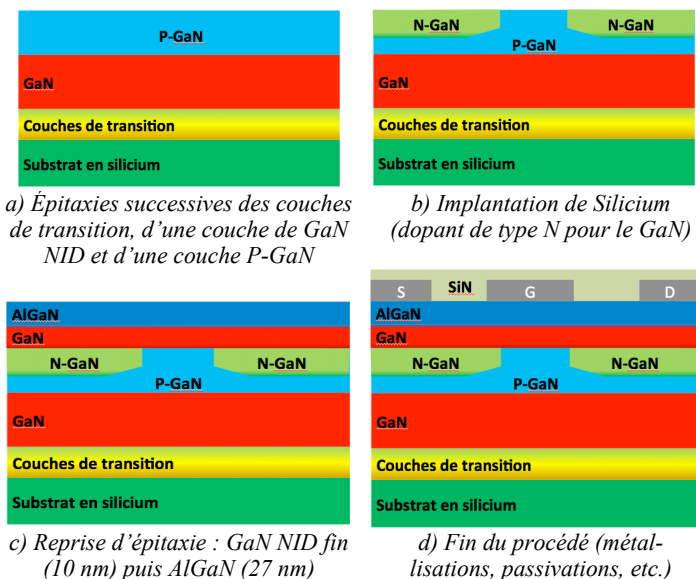


Fig. 2. Principales étapes du procédé de fabrication du HEMT normally-off avec une région P-GaN sous l'interface AlGaIn/GaN.

### 3.1. Épitaxies

Les épitaxies et reprises d'épitaxie ont été réalisées par épitaxie en phase vapeur aux organo-métalliques (EPVOM) au CRHEA. La première étape consiste à réaliser l'hétéro-épitaxie de la couche tampon en GaN sur un substrat de Silicium (111). Une couche de nucléation en AlN suivie de couches de transition permet de compenser les contraintes thermo-élastiques et d'éviter la fissuration du matériau [8]. Les caractérisations structurales (diffraction des rayons X, microscopie à force atomique) permettent d'estimer la densité de dislocations traversantes à environ  $3-4 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ . Cette étape d'épitaxie s'achève avec le dépôt d'une couche de GaN dopée avec du Magnésium ( $[Mg] > 3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ) et épaisse d'au minimum 100 nm (Fig. 2.a). La densité d'accepteurs évaluée par des mesures capacitives sur des échantillons d'étalonnage est supérieure à  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ .

### 3.2. Implantation ionique et reprise d'épitaxie

Pour le GaN, les atomes donneurs sont les atomes de Silicium. Deux techniques d'implantation de Silicium ont été testées pour réaliser les caissons N : l'implantation ionique « classique » au LAAS et l'implantation ionique par immersion plasma (PIII) chez IBS.

#### 3.2.1. Implantation ionique classique

Plusieurs conditions d'implantation combinant différentes énergies (50 et 100 keV) et doses ( $10^{15} \text{ cm}^{-2}$ ,  $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  et  $2,5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ ) ont été testées sur des quarts de plaquettes en Silicium de diamètre 150 mm (Fig. 3.a).

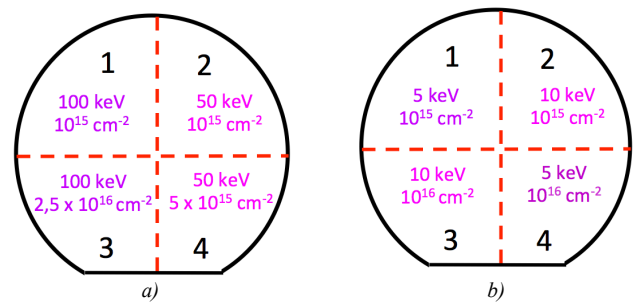


Fig. 3. Différentes conditions testées sur des quarts de plaquettes Si de diamètre 150 mm : a) implantation ionique « classique », b) PIII.

La Fig. 4 présente les profils SIMS mesurés depuis la surface de la région P-GaN après implantation puis recuit d'activation (30 s à  $1100^\circ\text{C}$ ) d'une dose de  $10^{15} \text{ cm}^{-2}$  aux énergies de 50 et 100 keV : les régions N obtenues affichent des profondeurs de l'ordre de 100 à 150 nm et des pics de concentration compris entre  $10^{19}$  et  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$ , valeurs théoriques a priori acceptables pour restaurer le passage du courant d'électrons dans le gaz bidimensionnel.

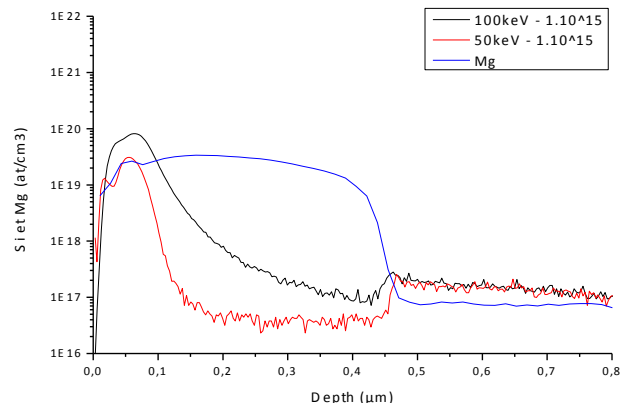


Fig. 4. Profils SIMS mesurés depuis la surface de la région P-GaN après implantation classique d'une dose de  $10^{15} \text{ cm}^{-2}$  aux énergies de 50 et 100 keV.

Un des inconvénients majeurs de l'implantation ionique classique est qu'elle brise des liaisons cristallines et génère des défauts qu'une reprise d'épitaxie autour de 1000°C n'est pas toujours apte à guérir. Un compromis entre dopage N et restauration de la qualité cristalline doit donc être trouvé. La microscopie à force atomique a été utilisée pour étudier la morphologie de surface après différentes tentatives d'implantation et reprises d'épitaxie (Fig. 5). Une énergie ou une dose trop élevée a pour conséquence une croissance très rugueuse. Ceci est non seulement dommageable au transport électronique dans le canal mais peut également générer des courants de fuite à travers la barrière AlGaN entre la grille du transistor et le canal.

Ainsi, avant implantation, la rugosité de surface de la plaquette était de 1,5 nm RMS (référence) alors qu'après implantation d'une dose de  $10^{15} \text{ cm}^{-2}$  puis reprise d'épitaxie, les rugosités variaient de 1,9 nm dans le meilleur des cas (énergie de 50 keV) et 4,4 nm dans le pire des cas (énergie de 100 keV). Les rugosités obtenues avec les doses  $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  et  $2,5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$  ne sont pas présentées ici car elles étaient beaucoup trop importantes, de 10 à 70 nm, rendant impossible la réalisation du canal GaN (10 nm d'épaisseur).

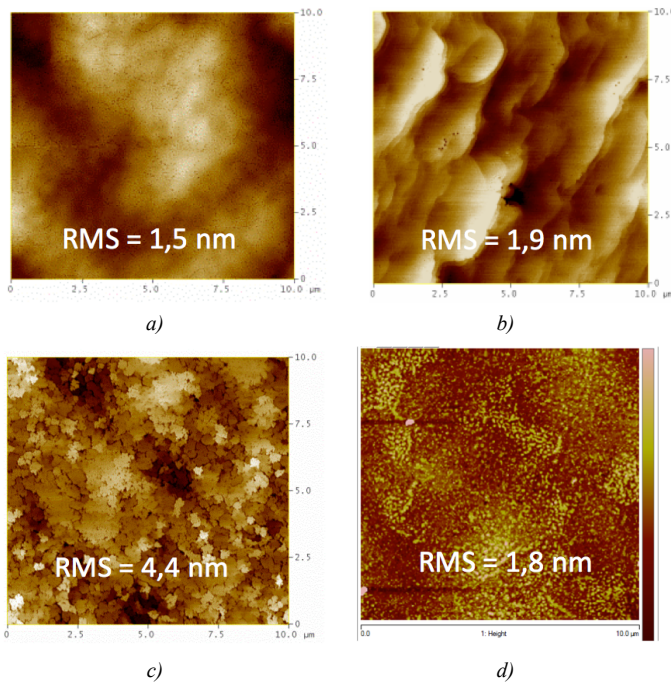


Fig. 5. Microscopie à force atomique montrant l'évolution de la morphologie de surface après reprise d'épitaxie sur des couches implantées Silicium : a) référence avant implantation, b) implantation classique (dose de  $10^{15} \text{ cm}^{-2}$  et énergie de 50 keV), c) implantation classique (dose de  $10^{15} \text{ cm}^{-2}$  et énergie de 100 keV), d) implantation PIII (dose de  $10^{15} \text{ cm}^{-2}$  et énergie de 10 keV).

Ces rugosités risquant de se traduire par des courants de fuite non négligeables, des diodes Schottky, dans lesquelles une zone de type N a été implantée dans le P-GaN, ont été conçues en tant que structures de test (Fig. 6) afin d'évaluer les courants de fuite de grille induits lors des différents essais d'implantation. La caractérisation I-V en inverse de ces diodes (Fig. 7) montre clairement que, quelle que soit la position des composants testés sur la plaquette, c'est-à-dire quelles que soient les conditions de dose et d'énergie d'implantation, les courants de fuite mesurés sont trop importants quelle que soit la tension appliquée en inverse.

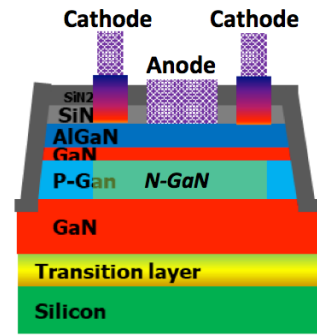


Fig. 6. Coupe schématique de la diode Schottky de test conçue afin d'évaluer les courants de fuite de grille (l'anode de la diode Schottky représentant ici la grille du futur HEMT) après implantation (classique ou PIII) de Silicium dans la région P-GaN.

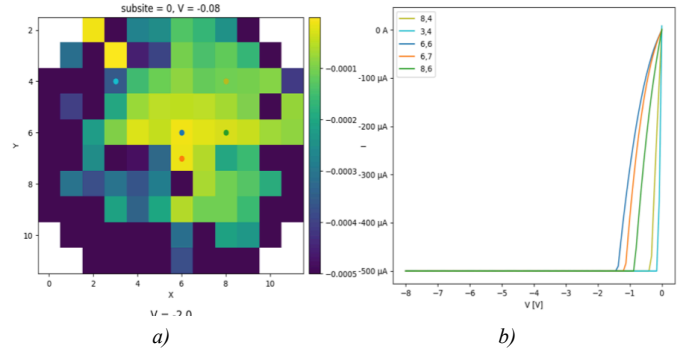


Fig. 7. a) Cartographie de la plaquette montrant la localisation des diodes Schottky testées, b) caractéristiques I-V en inverse des diodes Schottky après implantation classique de Silicium dans la région P-GaN.

L'implantation classique n'apparaît donc pas adaptée pour réaliser les régions N du nouveau transistor HEMT ; c'est la raison pour laquelle une solution alternative, l'implantation ionique par immersion plasma (PIII), a également été étudiée.

### 3.2.2. Implantation ionique par immersion plasma

Par rapport à l'implantation ionique classique, la PIII permet d'implanter de fortes doses à des énergies bien plus faibles, ce qui permet de réduire la profondeur de pénétration des ions et de générer moins de défauts [10]. Ainsi, plusieurs conditions de PIII combinant différentes énergies (5 et 10 keV) et doses ( $10^{15}$  et  $10^{16} \text{ cm}^{-2}$ ) ont été testées sur des quarts de plaquettes en Silicium de 150 mm de diamètre (Fig. 3.b).

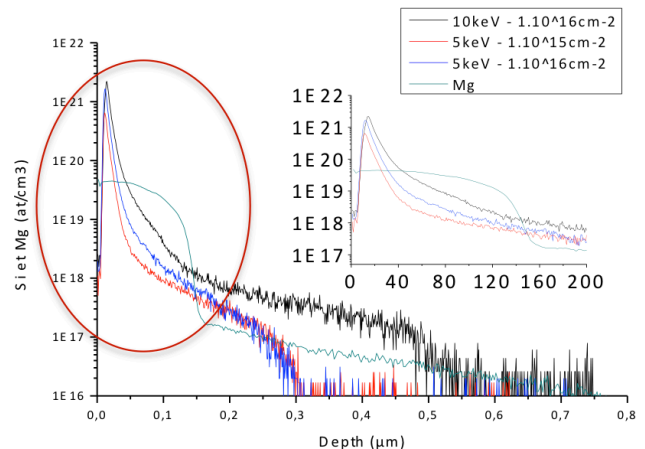


Fig. 8. Profils SIMS mesurés depuis la surface de la région P-GaN après implantation PIII sous diverses conditions de dose et d'énergie.

La Fig. 8 présente les profils SIMS mesurés depuis la surface de la région P-GaN après implantation PIII puis recuit d'activation (30 s à 1100°C) sous diverses conditions de dose et d'énergie : les régions N obtenues affichent ici des

profondeurs plus faibles, de l'ordre de 40 nm maximum, avec des pics de concentration proches ou supérieurs à  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$ , valeurs théoriques ici aussi a priori convenables pour restaurer le passage du courant d'électrons dans le gaz bidimensionnel.

Concernant la rugosité de surface, elle est restée stable et relativement faible, autour de 1,8 nm RMS (cf Fig. 5.d), quelles que soient les conditions d'implantation. Cette rugosité acceptable est confirmée par la caractérisation I-V en inverse des diodes Schottky (Fig. 9) qui montre clairement que, quelle que soit la position des composants testés sur la plaquette, c'est-à-dire quelles que soient les conditions de dose et d'énergie d'implantation PIII, les courants de fuite mesurés sont raisonnables, jusqu'à des polarisations inverses de 2 à 6 V, le meilleur résultat étant obtenu pour une dose de  $10^{15} \text{ cm}^{-2}$  et une énergie de 5 keV – diode bleu ciel de coordonnée (3,2) en haut à gauche de la plaquette –.

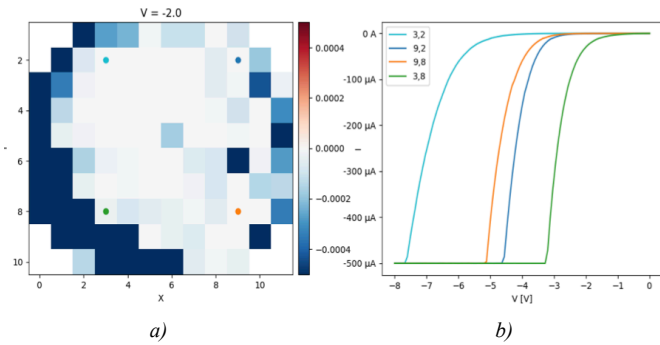


Fig. 9. a) Cartographie de la plaquette montrant la localisation des diodes Schottky testées, b) caractéristiques I-V en inverse des diodes Schottky après implantation PIII de Silicium dans la région P-GaN.

La PIII apparaît donc plus adaptée que l'implantation classique pour réaliser les régions N ; c'est ce procédé qui a donc été retenu pour la réalisation technologique du nouveau HEMT, objet de notre étude.

### 3.3. Autres étapes

Les autres étapes du procédé (gravures, métallisations, passivations, etc.) ont pu être effectuées dans la salle blanche du LAAS-CNRS dédiée aux technologies microélectroniques en Silicium. Cela montre un des avantages majeurs du GaN sur substrat Si, par rapport au SiC notamment, à savoir la possibilité d'utiliser les mêmes équipements que ceux utilisés en technologie Si. De manière générale, notamment en terme d'industrialisation, c'est une des forces du GaN de pouvoir être « processé » dans une ligne de production « Silicium », c'est-à-dire une ligne déjà amortie et donc bas coût.

### 3.4. Autres composants réalisés

Un HEMT conventionnel normally-on (cf. Fig. 1-a) a également été réalisé comme référence selon le même procédé. Cette référence est une structure tout à fait classique, c'est-à-dire conçue sans la moindre volonté d'amélioration de performances ou d'innovation avec, par exemple, une grille de type Schottky, ce qui n'est pas optimal pour les applications de puissance. Le but de ce travail étant en d'étudier l'influence de la région additionnelle P-GaN et de la reprise d'épitaxie sur la tension de seuil, il nous est apparu plus opportun de réaliser une structure de référence la plus simple possible afin de pouvoir la comparer avec le nouveau HEMT.

Un procédé incluant la reprise d'épitaxie sans implantation ionique a également été testé pour évaluer les conséquences de la contamination de surface sur la tension de seuil de la structure HEMT de référence. Comme on peut le voir sur la Fig. 10, la mesure de la capacité réalisée au moyen d'une sonde

à bille de Mercure montre le pincement du gaz bidimensionnel d'électrons constituant le canal aux alentours de - 4,5 V. L'intégration de la capacité depuis le pincement jusqu'à 0 V révèle une densité de charges de  $8 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ . L'analyse de la structure HEMT réalisée par reprise d'épitaxie après exposition de la couche tampon GaN à l'atmosphère montre une tension de pincement encore plus négative ( $V_p \sim - 6 \text{ V}$ ), révélant une augmentation de la densité de charges de  $3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  due pour l'essentiel à la présence de Silicium jouant le rôle de dopant de type N [9]. La hauteur du plateau de capacité reste inchangée, ce qui atteste que les donneurs Silicium incorporés produisent des électrons venant enrichir le gaz bidimensionnel d'électrons à l'interface entre la barrière AlGaIn et le canal GaN.

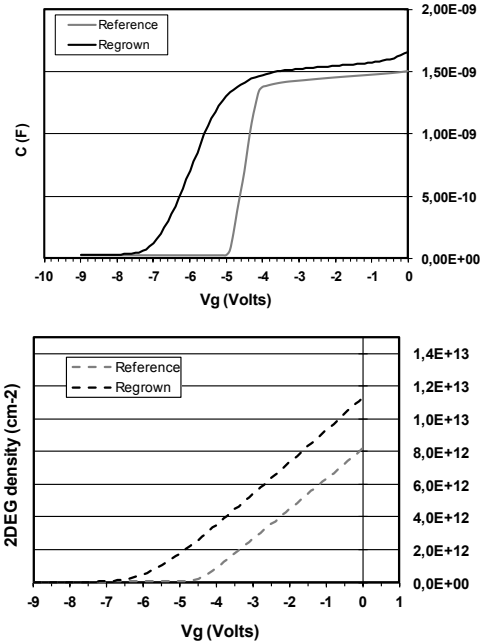


Fig. 10. Profils capacité-tension et densités de charges intégrées dans une structure HEMT de référence et une structure réalisée avec reprise d'épitaxie sans P-GaN.

## 4. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

### 4.1. Caractéristiques de transfert

La Fig. 11 présente les caractéristiques de transfert  $I_d(V_{gs})$  mesurées à  $V_{ds} = 1 \text{ V}$  sur le HEMT de référence (HEMT conventionnel normally-on) et sur le nouveau HEMT.

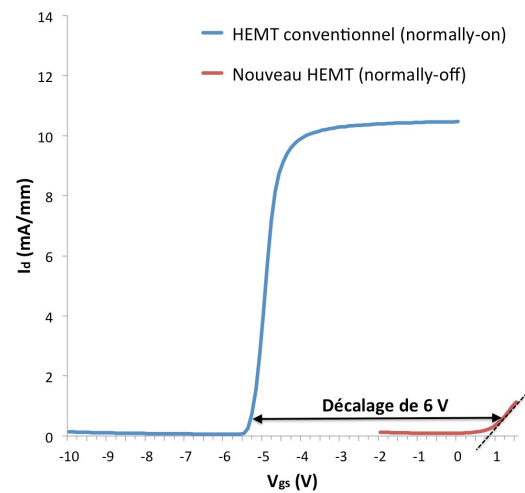


Fig. 11. Caractéristiques expérimentales de transfert  $I_d(V_{gs}) @ V_{ds} = 1 \text{ V}$  du HEMT de référence (en bleu) et du nouveau HEMT normally-off (en rouge).

Les tensions de seuil des deux composants, extraites de la Fig. 11, sont respectivement égales à - 5,5 V pour la référence et à + 0,8 V pour le nouveau HEMT, ce qui permet de valider expérimentalement le nouveau concept proposé ici. Non seulement le HEMT est normally-off – même si la valeur de + 0,8 V serait en pratique insuffisante pour les applications de puissance – mais le décalage de la tension de seuil, apporté par l'introduction de la région P-GaN sous la grille, est supérieur à 6 V, ce qui est remarquable. Un tel décalage a été rendu possible grâce à la concentration élevée en dopants activés dans la région P-GaN, estimée à  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . En outre, il a été montré [11] que, du fait de la localisation de la région P-GaN dans le volume du composant – entre deux couches de GaN NID –, ce concept pouvait être combiné, par exemple, à un « recess » de la grille et/ou à une grille P-GaN qui sont, eux localisés à la surface ; leur effets cumulés permettraient ainsi d'obtenir une tension de seuil suffisamment élevée ( $V_T > 3 \text{ V}$ ) pour satisfaire aux exigences de nombreuses applications de puissance.

Il convient cependant d'émettre quelques bémols aux résultats obtenus.

En premier lieu, l'utilisation d'une grille Schottky n'a pas permis d'étudier le comportement du nouveau HEMT au-delà d'une tension  $V_{gs}$  de 1,5 V. En effet, lorsque  $V_{gs} > 1,5 \text{ V}$ , la diode Schottky devient passante et la tension  $V_{gs}$  atteint donc sa valeur maximale, ce qui limite de façon simultanée la valeur du courant de drain. Cela réduit donc grandement la plage d'utilisation d'un tel composant dans les applications de puissance : si une grille Schottky est nécessaire pour les applications RF, il apparaît ici qu'une grille de type MIS (Métal Isolant Semi-conducteur) est indispensable pour utiliser ce nouveau HEMT en tant qu'interrupteur de puissance.

Par ailleurs, les niveaux de courant affichés par les deux composants, aussi bien à l'état ON qu'à l'état OFF, ne sont pas satisfaisants. Les faibles niveaux de courant à l'état ON sont notamment dus à la faible qualité des contacts ohmiques de source et drain réalisés à ce stade de développement de notre procédé technologique. Concernant l'état OFF, les courants de fuite des deux structures se sont avérés très importants (autour de 100  $\mu\text{A}$ ), ce qui a rendu l'exploitation des résultats difficile car en partie « parasitée » par lesdits courants de fuite. Les origines de ces fuites semblent multiples : d'une part, les différentes étapes technologiques – épitaxies, reprise d'épithaxie et technologie « secondaire » (gravures, métallisations, passivations, etc.) – n'ont pas encore été totalement optimisées ; d'autre part, comme précédemment montré dans le §3.2, l'implantation ionique de Silicium, même par PIII, induit des fuites supplémentaires dans la nouvelle structure. Une voie technologique alternative permettant d'éviter l'implantation ionique pourrait être l'utilisation d'épithaxies localisées de couches dopées in situ Silicium (pour type N) et/ou Magnésium (pour type P).

Quoiqu'il en soit, l'objectif de ce travail étant de réaliser une preuve de concept du HEMT normally-off proposé par Hamady *et al.* [7], cet objectif a été atteint grâce à la validation expérimentale présentée ici. Il n'en reste pas moins vrai que la réalisation d'un composant performant est la prochaine étape indispensable afin de pouvoir étudier plus profondément les avantages et inconvénients de ce nouveau HEMT en termes de performances – statiques et dynamiques –, robustesse et fiabilité.

#### 4.2. Résistance à l'état passant

La Fig. 12 présente les variations de la résistance à l'état passant  $R_{ON}$  en fonction de la différence ( $V_{gs} - V_T$ ), mesurées à  $V_{ds} = 1 \text{ V}$ , pour le HEMT de référence et le nouveau HEMT.

Le HEMT conventionnel affiche une variation classique de  $R_{ON}$  avec un plateau apparaissant à partir de  $V_{gs} - V_T = 1 \text{ V}$  : la résistance à l'état passant sur ce plateau est de  $96 \Omega \cdot \text{mm}$ , valeur élevée qui montre à nouveau la nécessité d'améliorer le procédé technologique de fabrication des HEMTs ; notamment, un soin particulier devra être apporté au procédé de réalisation des contacts ohmiques de source et drain.

Concernant le nouveau HEMT, les mesures s'étant arrêtées à  $V_{gs} = 1,5 \text{ V}$ , la résistance à l'état passant n'a pu être mesurée que jusqu'à la valeur :  $V_{gs} - V_T = 1,5 - 0,8 = 0,7 \text{ V}$ . La Fig. 12 montre que, à cette valeur, le plateau est loin d'être atteint, ce qui confirme la nécessité d'améliorer grandement le composant – outre l'optimisation du procédé technologique, nous pensons ici à l'utilisation d'une grille MIS et d'épithaxies localisées avec dopage in situ – afin d'obtenir plus d'informations sur les performances de ce nouveau HEMT. D'après l'allure de la courbe rouge, on peut malgré tout imaginer que le plateau se situera à une valeur supérieure aux  $96 \Omega \cdot \text{mm}$  de la structure de référence ; la résistance à l'état passant semble donc avoir été dégradée mais il reste à savoir quelle est la cause principale de cette dégradation : présence du P-GaN à proximité (10 nm en dessous) du canal ? fuites induites par l'implantation ionique ? autre cause ?

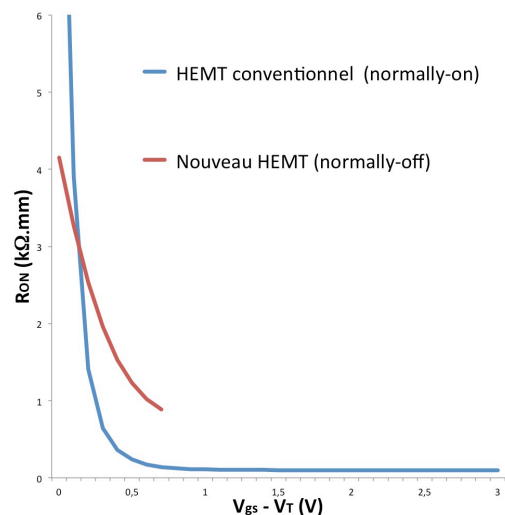


Fig. 12. Évolutions de la résistance à l'état passant  $R_{ON}$  @  $V_{ds} = 1 \text{ V}$  du HEMT conventionnel (en bleu) et du nouveau HEMT normally-off (en rouge).

## 5. CONCLUSION

Un nouveau concept d'interrupteur de puissance HEMT en GaN permettant de réaliser la fonctionnalité « normally-off » a été expérimentalement validé. L'introduction d'une couche P-GaN suffisamment dopée (autour de  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ) au sein de la couche buffer GaN NID, en-dessous de l'électrode de grille et sous l'interface AlGaIn/GaN, a permis d'obtenir un décalage significatif (plus de 6 V) de la tension de seuil  $V_T$  par rapport à celle d'un HEMT conventionnel de technologie équivalente et résultant en une tension de seuil positive ( $V_T = + 0,8 \text{ V}$ ). Cependant, à ce stade, nous n'avons pu présenter qu'une preuve de concept : des optimisations du procédé (épitaxies, reprise d'épithaxie, gravure, métallisations pour contacts ohmiques et Schottky, passivations, etc.) ainsi que de nouvelles voies technologiques (utilisation d'une grille MIS et d'épithaxies localisées avec dopage in situ) sont nécessaires pour obtenir un composant performant, robuste et fiable.

## 6. REMERCIEMENTS

Ces travaux ont été supportés par la plateforme micro et nanotechnologies du LAAS-CNRS, membre du réseau RENATECH, et par la SATT Toulouse Tech Transfer.

## 7. REFERENCES

- [1] W. Saito, Y. Takada, M. Kuraguchi, K. Tsuda et I. Omura, « Recessed-gate structure approach toward normally off high-voltage AlGaIn/GaN HEMT for power electronics applications », *IEEE Trans. On Electron Devices*, Vol. 53, N°2, février 2006.
- [2] X. Hu, G. Simin, J. Yang, M. Asif Khan, R. Gaska et M.S. Hur, « Enhancement mode AlGaIn/GaN HFET with selectively grown pn junction gate », *Electronics Letters*, Vol. 36, N°8, pp. 753-754, avril 2000.
- [3] G. Greco, F. Iucolano et F. Roccaforte, « Review of technology for normally-off HEMTs with p-GaN gate », *Material Science in Semiconductor Processing*, Vol. 78, pp. 96-106, mai 2018.
- [4] Y. Uemoto, M. Hikita, H. Ueno, H. Matsuo, H. Ishida, M. Yanagihara, T. Ueda, T. Tanaka et D. Ueda, « Gate Injection Transistor (GIT) – A normally-off AlGaIn/GaN power transistor using conductivity modulation », *IEEE Trans. On Electron Devices*, Vol. 54, N°12, décembre 2007.
- [5] H. Kambayashi, Y. Satoh, S. Ootomo, T. Kokawa, T. Nomura, S. Kaot et T-P. Chow, « Over 100 A operation normally-off AlGaIn/GaN hybrid MOS-HFET on Si substrate with high-breakdown voltage », *Solid-State Electronics*, Vol. 54, Issue 6, pp. 660–664, juin 2010.
- [6] X. Huang, Z. Liu, G. Li et F.C. Lee, « Evaluation and application of 600V GaN HEMT in cascode structure », *APEC 2013*, pp. 1279–1286, mars 2013.
- [7] S. Hamady, F. Morancho, B. Beydoun, P. Austin et M. Gavelle, « P-doped region below the AlGaIn/GaN interface for normally-off HEMT », *EPE'2014, Lappeenranta (Finlande)*, août 2014.
- [8] E. Frayssinet, Y. Cordier, H.P. David Schenk et A. Bavard, « Growth of thick GaN layers on 4-in. and 6-in. silicon (111) by metal-organic vapor phase epitaxy », *Physica Status Solidi*, Vol. 8, Issue 5, pp. 1479-1482, mars 2011.
- [9] Y. Cordier, M. Azize, N. Baron, Z. Bougrioua, S. Chenot, O. Tottereau, J. Massies et P. Gibart, « Subsurface Fe-doped semi-insulating GaN templates for inhibition of regrowth interface pollution in AlGaIn/GaN HEMT structures », *Journal of Crystal Growth*, Vol. 310, Issue 5, pp. 948–954, mars 2008.
- [10] F. Torregrosa, Y. Spiegel, J. Duchaine, T. Michel, G. Borvon, L. Roux, « Recent developments on PULSION® PIII tool: FinFET 3D doping, High temp implantation, III-V doping, contact and silicide improvement, & 450 mm », *IWJT'2015*, juin 2015.
- [11] S. Hamady, F. Morancho, B. Beydoun, P. Austin et M. Gavelle, « Hybrid normally-off AlGaIn/GaN HEMT using GIT technique with a p-region below the channel », *CSW'2014, Montpellier*, mai 2014.