



**HAL**  
open science

# Conception et réalisation d'interrupteurs de puissance avancés HEMTs AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> normally-off

Daniel Rouly

► **To cite this version:**

Daniel Rouly. Conception et réalisation d'interrupteurs de puissance avancés HEMTs AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> normally-off. Energie électrique. Université de Toulouse, 2024. Français. NNT : 2024TLSES065 . tel-04645980v2

**HAL Id: tel-04645980**

**<https://laas.hal.science/tel-04645980v2>**

Submitted on 9 Sep 2024

**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.

# Doctorat de l'Université de Toulouse

préparé à l'Université Toulouse III - Paul Sabatier

---

Conception et réalisation d'interrupteurs de puissance  
avancés HEMTs AlGaIn/GaN normally-off

---

Thèse présentée et soutenue, le 12 avril 2024 par

**Daniel ROULY**

## École doctorale

GEETS - Génie Electrique Electronique, Télécommunications et Santé : du système au nanosystème

## Spécialité

Composants et Systèmes de gestion de l'Energie

## Unité de recherche

LAAS - Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes

## Thèse dirigée par

Patrick AUSTIN et Josiane TASSELLI

## Composition du jury

M. Dominique PLANSON, Rapporteur, INSA Lyon

Mme Nathalie MALBERT, Rapporteur, Université de Bordeaux

M. Yvon CORDIER, Examineur, CRHEA-CNRS

M. Farid MEDJDOUB, Examineur, IEMN

M. Emilien BOUYSSOU, Examineur, ST Microelectronics Tours SAS

M. Jean-Guy TARTARIN, Examineur, Université Toulouse III

M. Patrick AUSTIN, Directeur de thèse, Université Toulouse III - Paul Sabatier

## Membres invités

M. Frédéric Morancho, Université Toulouse III

Mme Josiane Tasselli, LAAS-CNRS



# Remerciements

L'ensemble du travail de recherche accompli durant ces quatre années de thèse n'aurait pas été possible sans les diverses rencontres effectuées. Il me semble donc important de remercier toutes les personnes qui m'ont accompagné dans cette aventure.

En premier lieu je souhaite remercier les membres de l'équipe ISGE et plus particulièrement Karine Isoird pour m'avoir donné l'opportunité de faire un stage au LAAS-CNRS et pour m'avoir accueilli au sein de l'équipe de recherche. Je remercie également Frédéric Morancho, à l'initiative du projet qui a défini le cadre de ma thèse et qui m'a renouvelé sa confiance pour poursuivre les travaux entrepris.

Je tiens à remercier Nathalie Malbert et Dominique Planson qui ont accepté de rapporter sur mes travaux, Yvon Cordier, Farid Medjdoub et Emilien Bouyssou pour leur participation à mon jury et enfin Jean-Guy Tartarin pour avoir accepté d'en assurer la présidence. Je les remercie pour leur bienveillance et nos échanges lors de la soutenance.

Réaliser une thèse est loin d'être une banalité, c'est beaucoup d'engagement et de travail mais c'est également beaucoup d'incertitudes et parfois même de solitude qui érodent au fil du temps la confiance. J'ai eu la chance de travailler avec Patrick Austin et Josiane Tasselli, mes directeur·rice·s de thèse, qui ont été un véritable soutien durant ces quatre années.

Tout d'abord merci à Patrick pour la confiance qu'il m'a accordée ainsi qu'à mes travaux. Les derniers moments ont été intenses et j'ai probablement contribué à l'apparition de quelques cheveux blancs supplémentaires. Néanmoins, il a su croire en ce projet et en moi, même dans les moments de doute, ce qui a été déterminant pour la réussite.

Je tiens à exprimer ma gratitude à Josiane pour ces belles années. J'ai eu la chance d'avoir une directrice disponible au quotidien pour m'offrir son expertise et ses conseils avisés. Nous avons pu obtenir un mémoire dont la qualité reflète ses talents hors pair d'édition et cette rigueur que nous nous sommes imposée. Au-delà de son rôle de directrice, elle a été avant tout une véritable source d'encouragements et de motivation inestimable. Je suis plus qu'heureux d'avoir vécu cette aventure et appris le métier de chercheur à ses côtés.

Une grande majorité de ce travail n'aurait pas été possible sans le soutien technique et l'aide des ingénieurs et techniciens de la plateforme RENATECH de micro et nano fabrication du LAAS. Je pense notamment à Franck Carcenac pour son expérience et son regard sur mes

travaux. Je remercie plus particulièrement François Vaurette et Yves Deblock de la plateforme RENATECH de l'IEMN à Lille et Yvon Cordier du CRHEA-CNRS à Valbonne. Je remercie également Claudie Josse, Teresa Hungria et Armel Descamps du Centre de Microcaractérisation Raimond Castaing.

Un grand merci à Gaëtan Toulon, qui m'a offert son expertise sur les outils de simulation numérique mais aussi les outils de caractérisation électrique sur lesquels j'ai pu m'appuyer tout au long de mes travaux de thèse. J'ai beaucoup apprécié sa disponibilité et les moments de "brainstorming" que nous avons partagés.

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont fait partie de mon quotidien au laboratoire, et avec lesquels j'ai partagé des repas, des discussions toujours dans la gaieté et de nombreux moments de convivialité. C'est d'autant plus important pour moi car ces interactions ont été d'une richesse exceptionnelle. Alors merci à Clément, Yasser, Emilian, Matthieu, Félipé, Raïd, Aurélien, Léa et Rachel.

Toute cette aventure a commencé bien avant la thèse, lorsque j'étais encore sur les bancs de l'Université Paul Sabatier. J'y ai rencontré Florent Sevely et Lucas Laplanche et nous sommes allés ensemble chercher le titre de docteur. Merci d'avoir été présents tout ce temps.

Je tiens à remercier mes amis et surtout ma famille, qui ont toujours été présents pour moi jusqu'à l'achèvement de ma thèse, le jour de la soutenance en m'encourageant directement depuis les sièges de la salle de conférences, ou bien depuis leur bureau au travail, depuis leur salle de classe ou encore le siège de leur pelleteuse.

Enfin tout simplement merci à ma partenaire de vie qui me soutient au quotidien et qui a rendu tout cela possible.

# Acronymes

**EBC** Énergie de la Bande de Conduction.

**GaN** Nitrure de Gallium.

**HEMT** Transistor à Haute Mobilité Électronique.

**ICP-RIE** Inductively Coupled Plasma - Reactive Ion Etching.

**JFET** Transistor à Effet de Champ à Jonction.

**SDE** Sentaurus Structure Editor.

**SDEVICE** Sentaurus Device.

**SNMESH** Sentaurus Mesh.

**TCAD** Technology Computer Aided Design.



# Glossaire

$Al_2O_3$  Alumine ou Oxyde d'aluminium.

$B_V$  Tension de claquage.

$D_T$  Espacement intercellulaire.

$I_G$  Courant de grille.

$I_{DS}$  Courant drain-source.

$I_D$  Courant drain.

$L_G$  Longueur de grille.

$L_{FP}$  Longueur des plaques de champs de grille.

$L_{GD}$  Distance grille-drain.

$L_{GS}$  Distance source-grille.

$L_{Tmin}$  Valeur minimale de la largeur de caisson P-GaN.

$L_T$  Largeur de caisson P-GaN.

$L_{ZCE}$  largeur de la zone de charge d'espace de déplétion.

$N_s$  Concentration électronique.

$N_{aCP}$  Dopage de type P de caisson P-GaN.

$R_{\square}$  Résistance par carée.

$R_c$  Résistance de contact ohmique.

$R_{on}$  Résistance à l'état passant.

$R_{tot}$  Résistance totale.

$SiO_2$  Oxyde de silicium.

$Si_3N_4$  Nitrure de silicium.

$V_G$  Potentiel électrique de grille.

$V_{DS}$  Tension drain-source.

$V_{GS}$  Tension grille-source.

$V_{th}$  Tension de seuil.



$W_{fin}$  Largeur des nanofils AlGa<sub>x</sub>N/GaN.

$\rho_{pol}$  Charges de polarisation piézoélectrique.

$e_T$  Profondeur de caisson P-GaN.

$l_T$  Longueur de caisson P-GaN.

$n_s$  Densité électronique de couche.

$x_{Al}$  Teneur en aluminium.

# Table des matières

<b>Introduction générale</b>	<b>13</b>
<b>I État de l'art des structures HEMT AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> normally-off</b>	<b>17</b>
1 Le nitrure de gallium . . . . .	19
1.1 Propriétés du Ga <sub>N</sub> . . . . .	20
1.1.1 Mécanismes de polarisation . . . . .	22
1.1.2 Dopage du Ga <sub>N</sub> . . . . .	23
1.2 Technologie HEMT AlGa <sub>N</sub> /Ga <sub>N</sub> . . . . .	24
1.2.1 Hétérostructure AlGa <sub>N</sub> /Ga <sub>N</sub> . . . . .	24
1.2.2 Structure HEMT AlGa <sub>N</sub> /Ga <sub>N</sub> . . . . .	28
1.2.2.1 Tension de seuil $V_{th}$ . . . . .	29
1.2.2.2 Résistance à l'état passant $R_{on}$ . . . . .	29
2 Revue des différentes approches de HEMT Ga <sub>N</sub> normally-off . . . . .	30
2.1 HEMT à grille semi-enterrée ou enterrée . . . . .	31
2.1.1 HEMT à grille semi-enterrée ou "recessed gate" . . . . .	32
2.1.2 MIS/MOS-HEMT à grille enterrée . . . . .	33
2.2 HEMT avec traitement au fluor . . . . .	34
2.3 HEMT e-mode à grille p-(Al)Ga <sub>N</sub> . . . . .	36
2.3.1 Évolution de la technologie HEMT à grille P-Ga <sub>N</sub> . . . . .	37
2.3.2 Méthodes de fabrication de la structure HEMT à grille P-Ga <sub>N</sub> .	39
2.3.2.1 Gravure sélective . . . . .	40
2.3.2.2 Épitaxie localisée . . . . .	41
2.3.2.3 Traitement plasma à base d'hydrogène . . . . .	42
2.3.2.4 Sublimation du Ga <sub>N</sub> . . . . .	43
2.4 Configuration cascode . . . . .	43
2.5 Structure HEMT normally-off à 3 dimensions de type FinFET . . . . .	44
3 Développement de HEMTs normally-off au LAAS-CNRS . . . . .	46
3.1 HEMT à barrière P-Ga <sub>N</sub> enterrée . . . . .	46
3.2 HEMT à barrière P-Ga <sub>N</sub> semi-enterrée par épitaxie localisée . . . . .	48
3.3 Objectifs de la thèse . . . . .	49
4 Conclusion . . . . .	50
<b>II Conception d'un HEMT AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> normally-off à grille P-Ga<sub>N</sub> nano-structurée</b>	<b>53</b>

1	Présentation des outils et modèles de simulation . . . . .	54
1.1	Environnement de simulation TCAD Sentaurus . . . . .	54
1.1.1	La modélisation . . . . .	54
1.1.2	La discrétisation . . . . .	54
1.1.3	La résolution numérique . . . . .	55
1.1.4	Traitement des résultats . . . . .	55
1.2	Modélisation de HEMTs en GaN . . . . .	56
1.2.1	Modélisation du 2DEG . . . . .	56
1.2.2	Structure générique . . . . .	58
1.2.3	Structure spécifique . . . . .	60
1.3	Modèles physiques de simulation . . . . .	61
1.3.1	Équation de Poisson couplée au modèle de transport par dérive diffusion . . . . .	61
1.3.2	Modèles physiques de simulation . . . . .	62
1.3.3	Calibration de la structure HEMT . . . . .	63
2	Conception de la grille P-GaN nanostructurée . . . . .	64
2.1	Présentation de la nouvelle structure . . . . .	65
2.2	Caractéristiques et paramètres de la grille nanostructurée . . . . .	66
2.3	Optimisation des paramètres de la grille à l'équilibre thermodynamique en [2D] . . . . .	68
2.3.1	Étude de la largeur $L_{ZCE}$ en fonction de la profondeur $e_T$ . . . . .	68
2.3.2	Étude de la largeur $L_{ZCE}$ en fonction du dopage $N_{ACP}$ et du taux d'aluminium $x_{Al}$ . . . . .	69
2.3.3	Étude de la largeur $L_{ZCE}$ en fonction de la largeur $L_T$ des cais- sons P-GaN . . . . .	71
2.3.4	Étude de l'influence de l'espacement $D_T$ entre caissons P-GaN . . . . .	74
2.4	Simulation de la grille à l'équilibre thermodynamique en [3D] . . . . .	76
2.5	Conclusion intermédiaire . . . . .	77
2.6	Étude du rétablissement du 2DEG sous polarisation de grille . . . . .	78
2.6.1	Modélisation du contact de grille . . . . .	78
2.6.2	Modulation de la charge d'espace de la diode P-GaN/2DEG . . . . .	78
2.6.3	Évaluation d'une grille MOS . . . . .	85
2.7	Simulation en [3D] du comportement électrique de la grille dans la struc- ture HEMT complète . . . . .	86
2.8	Conclusion sur l'étude de la grille . . . . .	89
3	Étude de la fonctionnalité du HEMT à grille nanostructurée . . . . .	90
3.1	Modèle de simulation . . . . .	90
3.2	Étude de l'état passant . . . . .	91
3.2.1	Caractéristique de transfert avec un contact de grille ohmique . . . . .	91
3.2.2	Caractéristique de transfert avec un contact de grille Schottky . . . . .	92

3.3	Étude de l'état bloqué . . . . .	94
3.3.1	Rétablissement du 2DEG en fonction de la tension drain-source $V_{DS}$ . . . . .	95
3.3.2	Influence du contact de grille sur le rétablissement du 2DEG . .	96
3.4	Optimisation de l'état bloqué par segmentation de la grille . . . . .	99
3.4.1	Segmentation . . . . .	99
3.4.2	Analyse des potentiels électriques et concentrations du 2DEG en fonction de la segmentation . . . . .	101
4	Conclusion . . . . .	103

### III Développement technologique pour la fabrication d'un HEMT AlGaIn/GaN

	<b>normally-off à grille P-GaN nanostructurée</b>	<b>105</b>
1	La fabrication des caissons P-GaN . . . . .	106
1.1	Lithographie électronique de la résine HSQ . . . . .	107
1.1.1	Propriétés de la résine HSQ . . . . .	107
1.1.2	Caractéristiques du dépôt de la résine HSQ . . . . .	108
1.1.3	Paramètres de la lithographie électronique . . . . .	108
1.1.4	Optimisation de la lithographie eBeam de la résine HSQ sur AlGaIn/GaN . . . . .	110
1.1.4.1	Amélioration de la robustesse des motifs . . . . .	112
1.1.4.2	Amélioration de l'adhérence de la résine HSQ . . . . .	114
1.2	Gravure des puits nanostructurés . . . . .	116
1.2.1	Protocole expérimental de la gravure . . . . .	117
1.2.2	Caractérisation de la gravure . . . . .	118
1.3	Croissance localisée de P-GaN par épitaxie par jets moléculaires à l'inté- rieur de nano-tranchées . . . . .	120
1.3.1	Protocole expérimental de la croissance localisée par EJM . . .	120
1.3.2	Préparation des échantillons avant épitaxie . . . . .	121
1.3.3	Épitaxie localisée de GaN . . . . .	123
1.3.3.1	Influence de la forme des motifs . . . . .	123
1.3.3.2	Influence du taux d'ouverture . . . . .	125
1.3.3.3	Dynamique de la croissance . . . . .	127
1.3.4	Caractérisations physiques de l'épitaxie localisée . . . . .	129
1.3.4.1	Caractérisation de l'épitaxie du GaN NID . . . . .	129
1.3.4.2	Caractérisation de l'épitaxie du P-GaN . . . . .	130
1.3.5	Étude de la contamination silicium . . . . .	133
1.3.6	Influence du nettoyage pré-reprise d'épitaxie . . . . .	134
1.4	Discussions . . . . .	135
2	Fabrication du HEMT AlGaIn/GaN normally-off à grille P-GaN nanostructurée	137
2.1	Description des étapes technologiques de fabrication du HEMT . . . . .	137
2.2	Conception du jeu de masques . . . . .	141

2.3	Réalisation technologique du HEMT . . . . .	144
2.3.1	Préparation des échantillons . . . . .	144
2.3.2	Écriture des mires d'alignement . . . . .	144
2.3.3	Ouverture des doigts de grille . . . . .	145
2.3.4	Épitaxie localisée des caissons P-GaN . . . . .	145
2.3.5	Isolation par gravure MESA . . . . .	146
2.3.6	Réalisation des contacts ohmiques de source et de drain . . . . .	148
2.3.7	Réalisation du contact de grille . . . . .	149
2.3.8	Réalisation des plots de reprise de contact . . . . .	151
3	Conclusion . . . . .	152
<b>IV Caractérisation électrique des structures réalisées</b>		<b>153</b>
1	Fonctionnalité de l'hétérostructure AlGa <sub>0.3</sub> N/GaN des substrats de la série ST200	154
2	Caractérisation électrique des contacts et du 2DEG . . . . .	155
2.1	La méthode TLM . . . . .	155
2.2	Détermination des résistances de contact $R_c$ et de la couche $R_{\square}$ . . . . .	156
3	Caractérisation des HEMTs normally-off . . . . .	158
3.1	Caractérisation de la diode P-GaN/2DEG . . . . .	158
3.2	Caractérisation du HEMT à barrière P-GaN latérale nanostructurée . . . . .	160
3.3	Analyse des contacts de source et de drain du HEMT . . . . .	162
3.4	Analyse de la grille du HEMT . . . . .	163
4	Conclusion . . . . .	164
<b>Perspectives</b>		<b>165</b>
<b>Conclusion générale</b>		<b>173</b>

# Introduction générale

La gestion de l'énergie constitue l'un des plus importants défis que notre société va devoir relever au cours du XXI<sup>e</sup> siècle marqué par une croissance exponentielle de la demande énergétique. Les composants de puissance les plus utilisés actuellement, tels que les MOSFET, IGBT ou thyristors GTO, sont majoritairement développés sur silicium et répondent aux problématiques de secteurs comme le ferroviaire et les réseaux électriques, pour des besoins en moyenne puissance et/ou des fréquences de fonctionnement inférieures à 100 kHz. Dans ce contexte, il est indispensable de concevoir de nouveaux interrupteurs de puissance à semi-conducteurs afin d'assurer une meilleure gestion de l'énergie électrique, pour des applications nécessitant des performances à haute fréquence avec une efficacité énergétique élevée.

Les matériaux à large bande interdite tels que le carbure de silicium (SiC) ou le nitrure de gallium (GaN) sont les candidats adéquats pour répondre à ce nouveau défi. C'est ainsi que les transistors à haute mobilité électronique (High Electron Mobility Transistor ou HEMT) en GaN ont connu un fort développement ces dernières années. Les propriétés intrinsèques du HEMT telles qu'une haute mobilité électronique, une large bande interdite et une tension de claquage élevée en font un candidat idéal comme interrupteur de puissance. L'inconvénient actuel et majeur des HEMTs conventionnels est que leur blocage se fait à des tensions négatives ; c'est ce que l'on appelle un composant "normally-on" (normalement passant). Or, la plupart des applications de commutation de puissance requièrent l'utilisation d'interrupteurs "normally-off" (normalement ouvert) pour des questions de sécurité des systèmes car ils permettent un contrôle précis du courant et de la tension. Plusieurs architectures de HEMT en GaN "normally-off" ont donc été proposées dans la littérature mais chacune de ces solutions présente des inconvénients aussi bien technologiques qu'en termes de performances.

Dans ce cadre, nos travaux de thèse se proposent d'explorer une nouvelle voie pour obtenir des interrupteurs HEMT AlGaN/GaN "normally-off" : le HEMT à barrière P-GaN latérale nanostructurée. L'idée générale repose sur le principe de fonctionnement d'un JFET dans lequel la largeur de la région de conduction N serait tellement étroite que les Zones de Charge d'Espace (ZCE) de déplétion des jonctions PN se rejoignent naturellement de manière à assurer la déplétion totale de la zone de type N. Le développement des zones de charge d'espace à

l'équilibre thermodynamique étant faible, la conception des grilles doit obligatoirement passer par une nano-structuration. La grille de cette nouvelle structure HEMT sera donc constituée d'une succession de caissons ou "puits" GaN de type P dont la profondeur doit traverser le canal 2DEG et l'espacement entre deux puits permettre le recouvrement naturel des zones de charge d'espace.

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été effectués au sein de l'équipe Intégration des Systèmes de Gestion de l'Énergie (ISGE) du Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes du CNRS (LAAS-CNRS), dont les recherches portent essentiellement sur la réalisation et la caractérisation de composants de puissance innovants sur matériaux à large bande interdite comme le GaN ou le diamant, et sur le développement de convertisseurs de puissance. Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet IPCEI Nano2022 piloté par ST Microelectronics. La réalisation technologique a été effectuée au sein de la plateforme RENATECH du LAAS-CNRS avec le soutien du CRHEA-CNRS pour les épitaxies du P-GaN et de la plateforme RENATECH de l'IEMN pour la lithographie électronique.

Dans la première partie de ce manuscrit, nous dressons un état de l'art des structures HEMT GaN "normally-off". Après avoir rappelé les paramètres physiques intéressants du matériau GaN en termes de largeur de bande interdite, champ critique élevé et vitesse de saturation des porteurs, nous nous intéresserons plus particulièrement au comportement de l'hétérostructure AlGaIn/GaN, puis du transistor HEMT pour lequel nous définirons les paramètres qui le caractérisent comme la tension de seuil  $V_{th}$  et la résistance à l'état passant  $R_{on}$ . Nous passerons en revue les différentes approches technologiques permettant d'assurer la fonctionnalité "normally-off" comme les HEMT à grille semi-enterrée, les MOS-HEMT ou les HEMT à grille p-(Al)GaIn, chacune avec des avantages et inconvénients. Nous insisterons sur cette dernière qui est la plus communément développée ces dernières années et nous décrirons les différentes technologies mises en œuvre pour obtenir une grille P-GaN. Une autre structure a émergé récemment comme le HEMT AlGaIn/GaN de type FinFET, la grille ayant une structure en nanofils.

Nous terminerons cet état de l'art par les structures "normally-off" développées au sein de l'équipe ISGE, qui ont donné lieu à des brevets : le HEMT à barrière P-GaN enterrée proposée par S. Hamady et le HEMT à barrière P-GaN semi-enterrée par épitaxie localisée proposée par G. Toulon, qui a fait l'objet de la thèse de C. Haloui. C'est dans la continuité de ces travaux que nous avons proposé de concevoir et réaliser le HEMT à barrière P-GaN latérale nanostructurée.

Le deuxième chapitre porte sur la conception du HEMT AlGaIn/GaN "normally-off" à grille P-GaN nanostructurée par simulation numérique à partir du logiciel Sentaurus TCAD. Nous décrirons les différents outils de simulation TCAD et les modèles physiques de simulation utilisés pour décrire la structure HEMT de référence. Nous nous focaliserons sur la conception et l'optimisation des paramètres de la grille à l'équilibre thermodynamique à l'aide de simulations

---

[2D] et [3D]. Nous étudierons l'influence de la dimension des caissons P-GaN (largeur, espace-ment et profondeur), du taux d'aluminium dans la barrière AlGaN et du dopage P du GaN sur le recouvrement des zones de charges d'espace entre deux caissons. Nous analyserons ensuite le fonctionnement de la grille sous polarisation afin de vérifier le rétablissement du 2DEG.

Enfin, nous étudierons par simulation [3D] le comportement de la grille dans la structure HEMT complète afin de valider le concept proposé et vérifier la fonctionnalité "normally-off".

Dans le troisième chapitre, nous présentons le développement technologique du HEMT "normally-off" à grille P-GaN nanostructurée et l'optimisation des deux étapes technologiques critiques que sont la définition à l'échelle nanométrique des caissons de grille et l'épitaxie localisée de P-GaN. Nous mettrons l'accent sur l'utilisation de la lithographie électronique de la résine HSQ, et sur l'influence de la topologie des caissons sur leur remplissage par épitaxie. Nous présenterons les résultats des analyses TEM qui ont servi à caractériser la fabrication des caissons.

Après avoir décrit le jeu de masques que nous avons conçu pour la fabrication du HEMT, nous détaillerons le procédé de fabrication complet du HEMT avec des étapes technologiques qui n'ont pas demandé de développement spécifique comme la gravure mesa ou la passivation, et une étape que nous avons étudiée plus particulièrement, à savoir la réalisation des contacts ohmiques de source et drain.

Dans la dernière partie de ce manuscrit, nous donnerons les premiers éléments de caractérisation électrique : nous évaluerons la fonctionnalité de l'hétérostructure AlGaN/GaN, de la diode P-GaN/2DEG et nous analyserons le comportement électrique du HEMT réalisé.

Nous terminerons ce document en proposant des perspectives à ces travaux afin de mieux appréhender les potentialités de la structure HEMT que nous avons choisie de développer au laboratoire.





---

# Chapitre I

## État de l'art des structures HEMT AlGaN/GaN normally-off

### Introduction

La consommation mondiale d'électricité connaît une croissance rapide, mettant en évidence la diminution des ressources en énergie fossile et le besoin urgent d'efficacité énergétique et de sobriété dans la consommation d'énergie [1, 2]. Dans ce contexte marqué par une augmentation exponentielle de la demande énergétique et l'impératif de transition vers des sources d'énergies renouvelables, l'électronique de puissance assume un rôle de plus en plus central. La conversion d'énergie, en particulier, est au cœur de cette transformation, nécessitant l'adoption de technologies plus efficaces et durables.

Le marché des semi-conducteurs pour l'électronique de puissance est actuellement dominé par des composants basés sur le silicium, tels que les MOSFET, IGBT et thyristors GTO, largement utilisés dans divers secteurs tels que le ferroviaire et les réseaux électriques. Bien que des progrès aient été réalisés, ces composants présentent des limitations en termes de résistance aux champs électriques élevés, de gestion thermique et de densité de puissance en raison des limites physiques intrinsèques au matériau.

Ces limitations sont visuellement et clairement illustrées dans la Figure I.1, qui montre les plages d'application des dispositifs en fonction de la puissance de commutation et de la fréquence opérationnelle. Ici, nous voyons que bien que les dispositifs en SiC et en GaN offrent des avantages dans les applications haute puissance et haute fréquence ; le GaN semble particulièrement adapté aux applications à très haute fréquence, tandis que le SiC est efficace sur un spectre de puissance et de fréquence plus large. En revanche, les technologies en silicium, y compris les IGBT, sont limitées à des puissances faibles à modérées et des fréquences inférieures, soulignant la nécessité d'innover au-delà de ces matériaux traditionnels.

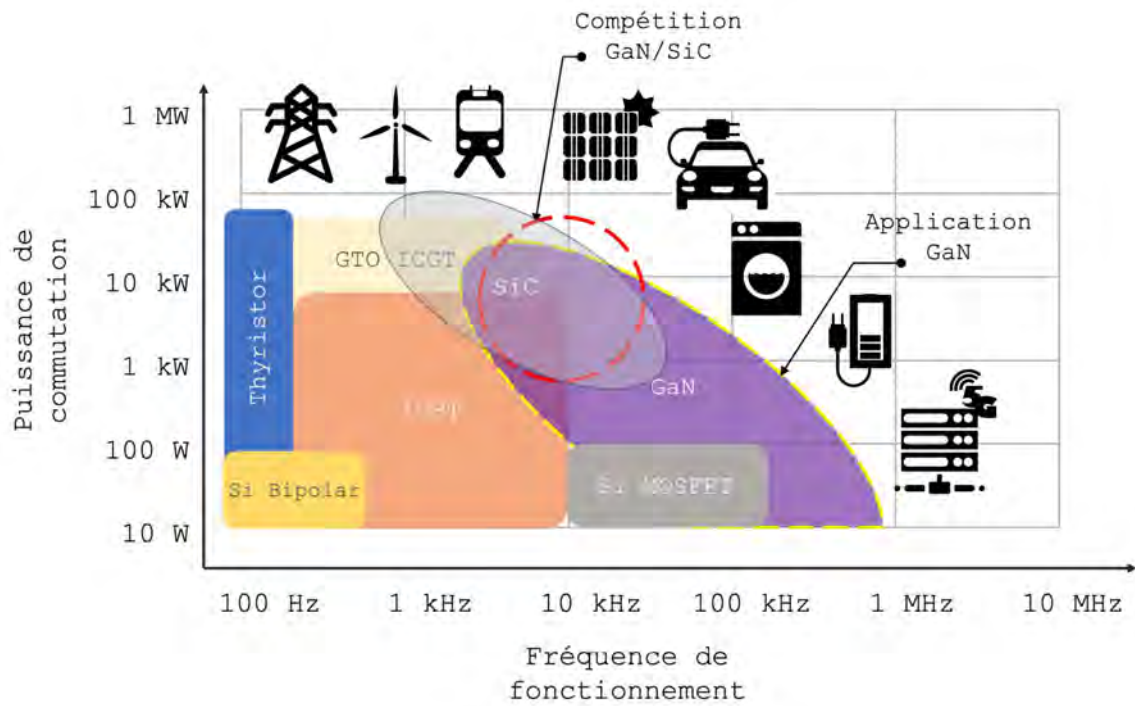


FIGURE I.1 – Domaine de fonctionnement en puissance et en fréquence de différents composants de puissance et leurs applications (Reproduit depuis les sources [3, 4]).

Face aux contraintes du silicium, les matériaux à large bande interdite, tels que le SiC (carbure de silicium) et le GaN, se présentent donc comme des alternatives prometteuses. De grandes entreprises du secteur [5], EPC, GaN Systems et plus récemment STMicroelectronics [6] développent activement des composants basés sur ces matériaux, offrant des perspectives nouvelles pour des applications de moyenne et haute puissance.

Spécifiquement, le GaN présente des avantages pour les applications haute fréquence, comme le démontre la technologie des HEMT GaN, qui marque une avancée technologique majeure. Ces dispositifs sont pressentis pour révolutionner les applications automobiles et les convertisseurs AC/DC et DC/DC de moyenne puissance grâce à leurs performances supérieures. Ils permettent une commutation à des fréquences plus élevées, ce qui se traduit par une efficacité accrue et des avantages supplémentaires pour les utilisateurs. Dans le domaine de la recharge sans fil, le GaN permet aux clients industriels de tirer parti des avantages de cette technologie, notamment pour les téléphones mobiles. Avec la demande croissante de nouvelles fonctionnalités performantes pour les téléphones portables, comme le transfert de données à haute vitesse et les technologies 5G, le GaN offre des solutions de gestion d'alimentation innovantes.

Les solutions en silicium, bien que toujours actives pour les applications de faible puissance, sont moins efficaces pour les besoins supérieurs à 30 W. Le GaN, en revanche, est de plus en plus compétitif pour les applications entre 30 et 100 W, offrant une recharge rapide avec une bonne gestion thermique et un design optimal. Les fabricants d'équipement cherchent des chargeurs rapides et compacts, une demande que le GaN peut satisfaire efficacement.

Dans le secteur automobile, le GaN gagne du terrain dans les applications de charge pour véhicules électriques (VE) légers [7], notamment dans les marchés des chargeurs rapides et des stations de recharge. Le GaN et le SiC sont particulièrement adaptés aux VE et véhicules hybrides électriques (VHE) en raison de leur capacité à fonctionner à des tensions et températures plus élevées, leur robustesse, leur longue durée de vie et leur commutation rapide. Avec des délais de propagation réduits et une meilleure robustesse aux variations de tension, les circuits intégrés GaN peuvent étendre les capacités des topologies traditionnelles à des fréquences de l'ordre du mégahertz, permettant l'introduction commerciale de projets qui s'inscrivent dans une vision plus large du développement durable avec des solutions innovantes et respectueuses de l'environnement.

Ce chapitre se focalisera sur la technologie des HEMT GaN, en examinant leurs propriétés, les méthodes de fabrication et en analysant en détail leur fonctionnement, avantages, inconvénients et l'état de l'art des solutions normally-off. Enfin, nous discuterons de la maturité technologique du GaN, en mettant l'accent sur les processus innovants et des exemples de réalisations récentes.

## 1 Le nitrure de gallium

L'introduction de la technologie du nitrure de gallium (GaN) pour les applications de puissance s'inscrit dans un contexte scientifique et technologique riche, marqué par plusieurs décennies de développement des semi-conducteurs.

Initialement, l'accent a été mis sur l'utilisation de substrats en carbure de silicium (SiC), tirant parti de l'expérience et des outils déjà développés dans l'industrie des LED. Cette approche a permis d'obtenir des avancées significatives dans la compréhension et la manipulation du GaN.

Les publications de Shuji Nakamura et al [8, 9] au début des années 90 ont marqué un tournant dans cette recherche. Leur travail a non seulement élargi le spectre des applications possibles du GaN mais a également été reconnu, comme en témoigne l'attribution du prix Nobel de physique en 2014 [10] pour leurs travaux sur les LED bleues en GaN.

Aujourd'hui, le GaN trouve des applications dans divers domaines tels que l'éclairage LED, les télécommunications et l'électronique de puissance avec une évolution continue de la technologie GaN que ce soit en recherche ou dans l'industrie.

L'état de l'art sur les dispositifs semi-conducteurs GaN que nous présenterons dans cette partie, en particulier les interrupteurs de puissance type HEMTs, s'appuie sur une série de travaux de recherche récents. Ce domaine a en effet connu une activité intensive au cours de la dernière décennie, marquant des avancées importantes dans la technologie des dispositifs de puissance GaN.

Nous pouvons citer par exemple les travaux de Meneghini et al. [11], Chen et al. [12], Greco [13] et Roccaforte et al. [14] qui proposent une revue complète des dispositifs à base de GaN. L'accent est mis en particulier sur les progrès technologiques de HEMT AlGaIn/GaN

"normally-off" à grille P-GaN, sur les problèmes de fiabilité liés aux procédés de fabrication et sur les tendances émergentes dans les semi-conducteurs à large bande interdite (WBG) pour les dispositifs de puissance et leurs applications (convertisseurs, ...).

## 1.1 Propriétés du GaN

Le GaN est un matériau semi-conducteur appartenant à la famille III-V et se caractérise par une large bande interdite (WBG) avec un gap direct de 3.4 eV, ce qui le rend particulièrement adapté pour des applications nécessitant une haute résistance à la température et à la tension.

Comparé à d'autres matériaux semi-conducteurs comme le silicium (Si), l'arséniure de gallium (GaAs), le carbure de silicium (SiC), le nitrure d'aluminium (AlN), le diamant et l'oxyde de gallium ( $Ga_2O_3$ ) (Table I.1), le GaN présente le plus grand gap énergétique, le champ critique le plus élevé et la vitesse de saturation la plus haute parmi les matériaux ayant atteint un stade de maturité technologique permettant leur commercialisation.

Matériau	Si	GaAs	4H-SiC	GaN	$b - Ga_2O_3$	Diamond	AlN
$E_G$ (eV)	1.12	1.42	3.23	3.4	4.9	5.5	6.2
$\epsilon_r$	11.7	12.9	9.66	8.9	10	5.7	8.5
$\mu$ (cm <sup>2</sup> /V s)	1440	9400	950	1400	250	4500	450
$E_c$ (MV/cm)	0.3	0.4	2.5	3.3	8	10	15
$v_s$ ( $\times 10^7$ cm/s)	1	0.9	2	2.4	1.1	2.3	1.4

TABLE I.1 – Table des principaux paramètres physiques du GaN en comparaison avec d'autres semi-conducteurs à température T égale à 300 K. Les paramètres reportés sont : ( $E_G$ ) énergie de gap de la bande interdite, ( $\epsilon_r$ ) permittivité diélectrique relative, ( $\mu$ ) mobilité électronique des porteurs, ( $E_c$ ) champ électrique de claquage, ( $v_s$ ) vitesse de saturation des porteurs. Les données sont reprises de Fay et al. [15]

La relation entre le champ de claquage ( $E_c$ ) et le gap ( $E_G$ ) pour les matériaux semi-conducteurs indique une dépendance en loi de puissance, de la forme :

$$E_c \propto E_G^{2.3} \quad (I.1)$$

Cette relation, conforme avec la littérature [16], souligne l'avantage significatif des semi-conducteurs à large bande interdite, comme illustré sur la Figure I.2a, pour la fabrication de dispositifs électroniques de puissance. En effet, plus le gap est grand et plus le matériau pourra supporter un champ électrique élevé.

Les semi-conducteurs sont souvent comparés à l'aide de figures de mérite (FOM : figure of merit), les plus courantes étant la figure de mérite de Johnson (FFMO) pour les dispositifs opérant à haute fréquence et celle de Baliga (BFOM) pour les dispositifs à haute puissance. Les valeurs de ces deux figures de mérite, illustrées sur la Figure I.2b, sont calculées à partir des valeurs des paramètres de la Table I.1 et normalisées par rapport à celles du GaN pour améliorer la clarté des comparaisons.

La FOM de Johnson [15], définie par l'équation (I.4), est une mesure qui évalue la capacité d'un matériau semi-conducteur à opérer à des fréquences élevées, représentées par sa fréquence de coupure ( $f_T$ ) pour une valeur donnée d'espacement  $l$  entre la source et le drain (eq. I.2), tout en maintenant une tension de claquage ( $V_{BR}$ ) élevée (eq. I.3).

$$f_T = \frac{v_s}{2\pi l} \quad (\text{I.2})$$

$$V_{BR} = E_c l \quad (\text{I.3})$$

$$JFOM = V_{BR} * f_T = \frac{E_c * v_s}{2\pi} \quad (\text{I.4})$$

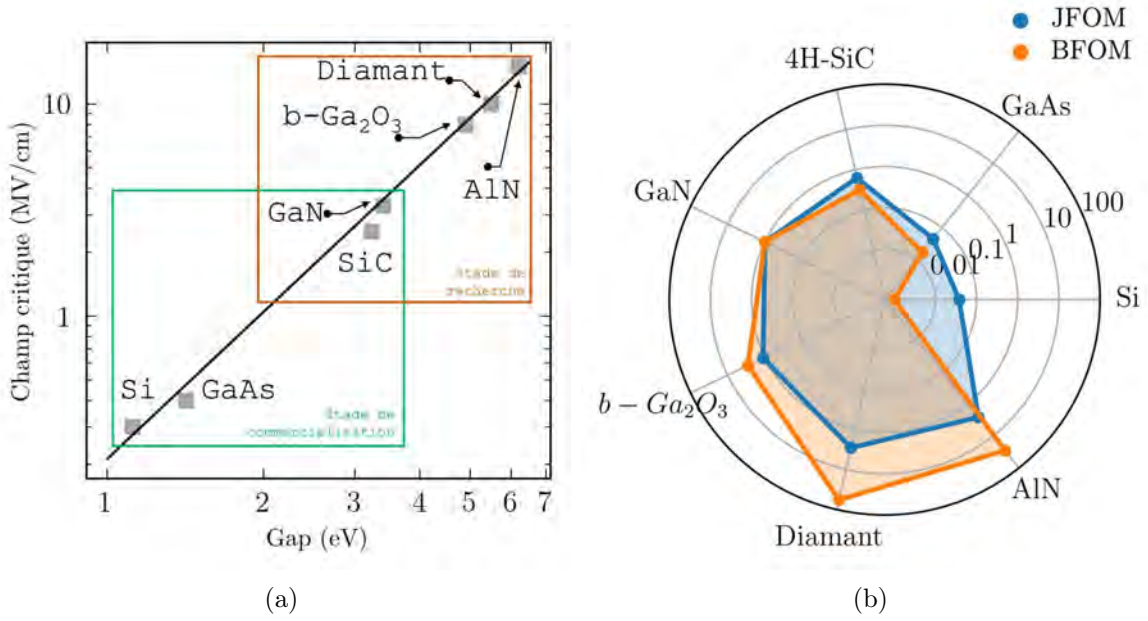


FIGURE I.2 – (a) Relation du champ de claquage avec l'énergie de gap des différents matériaux semi-conducteurs de la Table I.1 et (b) Figures de mérite calculées de Johnson et Baliga pour ces mêmes matériaux. Les valeurs sont normalisées par rapport à celles du GaN.

Cette équation montre que le produit de la tension de claquage et de la fréquence de coupure est constant et indépendant de l'espacement ( $l$ ) entre les deux électrodes de puissance. Cela signifie que l'augmentation de la fréquence de coupure est possible sans réduire la tension de claquage en utilisant un matériau ayant un champ critique plus élevé et une vitesse de saturation des porteurs élevée.

La FOM de Johnson du GaN est légèrement supérieure à celle du SiC (0,63), comparable à celle du  $b - Ga_2O_3$  (1,11), et bien plus élevée que celles du Si (0,037) et du GaAs (0,045). L'utilisation de l'AlN (2,65) et du diamant (2,90) ne représente qu'une légère amélioration en termes de FOM de Johnson.

Baliga [17, 18] a introduit une figure de mérite (FOM) pour les applications en électronique de puissance qui découle du calcul de la résistance spécifique par unité de surface d'une jonction  $P^+N$  abrupte. Cette FOM de Baliga, définie dans l'équation (I.5), est utilisée pour évaluer les paramètres du matériau dans le but de minimiser les pertes de conduction dans les transistors de puissance. Elle repose sur l'hypothèse que les pertes de puissance sont exclusivement dues à

la dissipation de puissance à l'état actif. En conséquence, la BFOM s'applique principalement aux systèmes fonctionnant à des fréquences plus basses, où les pertes de commutation sont négligeables.

$$BFOM = \epsilon * \mu E_c^3 \quad (I.5)$$

Le GaN affiche une FOM de Baliga nettement supérieure à celles du Si (0,001) et du GaAs (0,017), et plus élevée que celle du SiC (0,32). Les semi-conducteurs à ultra-large bande interdite comme le diamant (57) et l'AlN (28) présentent une FOM de Baliga beaucoup plus élevée, offrant des alternatives intéressantes pour repousser les limites en termes de tenue en tension.

### 1.1.1 Mécanismes de polarisation

Le GaN se présente sous deux formes cristallines principales : la structure Wurtzite et la structure Zinc-blende. La Wurtzite, stable à température ambiante, est souvent privilégiée pour des applications spécifiques comme les transistors à haute mobilité électronique (HEMTs). Cette structure illustrée sur la Figure I.3, est constituée d'une cellule unitaire hexagonale (a) avec deux sous-réseaux distincts (b), l'un de gallium (Ga) et l'autre d'azote (N). Bien que la polarisation soit annulée à l'intérieur du matériau, une polarisation spontanée  $P_{SP}$  spécifique le long de l'axe  $c$  ([0001]) de la structure Wurtzite du GaN émerge en raison de l'asymétrie sur la face coupée du cristal [19]. Cette polarisation spontanée est influencée par la différence d'électronégativité entre les atomes de gallium et d'azote, qui confère des caractéristiques anioniques (+) et cationiques (-) respectivement aux atomes de Ga et de N, générant ainsi la polarisation spontanée [20].

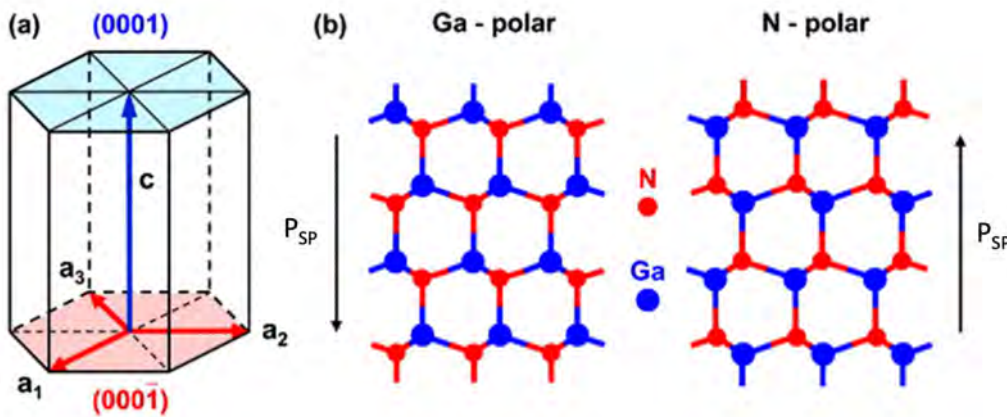


FIGURE I.3 – (a) Cellule unitaire hexagonale (b) structure atomique du GaN en polarité Ga et N. Les flèches représentent la direction de la polarisation spontanée,  $P_{SP}$ , dans l'axe  $c$  de la structure Wurtzite [21]

Le stress mécanique dans les couches épitaxiales, causé par les différences de constantes de maille, génère un nouveau type de polarisation nommée polarisation piézoélectrique. Cette polarisation est illustrée dans la Figure I.4 pour les semi-conducteurs nitrure. Sous contrainte mécanique, l'angle  $\theta$  s'élargit ou se resserre, entraînant un déséquilibre du champ électrique

interne et l'apparition du champ piézoélectrique  $P_{Pol}$  orienté négativement ou positivement le long de l'axe  $c$  de la structure Wurtzite selon que la maille du cristal est en tension ou compression.

Dans le livre "Polarization Effects in Semiconductors" H. Morkoc et J. Leach [22] donnent une représentation plus complète des mécanismes de polarisation piézoélectrique dans les dispositifs à hétérostructure à base de GaN considérant les différentes polarités du cristal. D. Ueda [20] considère également l'effet des alliages ternaires  $Al_xGa_{(1-x)}N$ ,  $In_xGa_{(1-x)}N$ , et  $Al_xIn_{(1-x)}N$  en fonction de la fraction molaire  $x$ , basé sur les travaux de Ambacher et al [23] sur la densité de charges piézoélectriques induites par ces mécanismes.

Cette polarisation piézoélectrique est le mécanisme de base des technologies des transistors à haute mobilité électronique (HEMTs) à base d'hétérostructure AlGaN/GaN. Elle contribue à la formation d'une couche à deux dimensions de gaz électronique (2DEG) à l'interface entre les deux couches, l'AlGaN étant en tension et le GaN sans contrainte, permettant aux HEMTs de bénéficier d'une haute mobilité électronique et d'une grande efficacité dans les applications à haute fréquence et haute puissance.

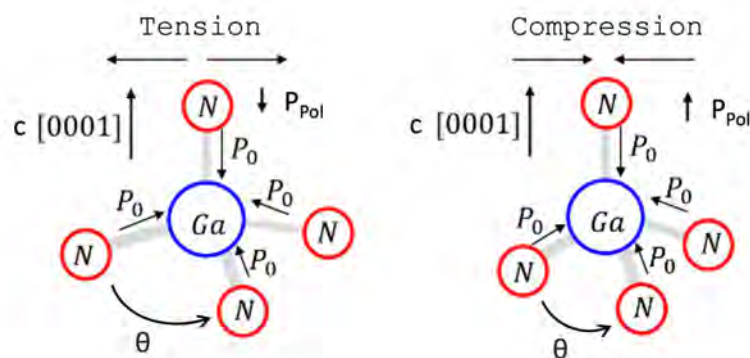


FIGURE I.4 – Représentation schématique des liaisons atomiques d'un tétraèdre de GaN dans une structure Wurtzite en polarité Ga avec déformation dans le plan  $c$  (a) en tension et (b) en compression, montrant la formation d'une polarisation piézoélectrique  $P_{Pol}$  [21]

### 1.1.2 Dopage du GaN

Doper le matériau GaN avec différents éléments, tels que le silicium (Si) pour obtenir un type de dopage N ou le magnésium (Mg) pour un type de dopage P, permet de modifier ses caractéristiques électriques. Plus spécifiquement, l'introduction de couches dopées au magnésium (Mg) élargit les possibilités des technologies HEMT permettant de créer des structures de type p-n. Cela ouvre la voie à la création de composants électroniques plus complexes et performants, en particulier pour des applications dans le domaine de l'électronique de puissance ou des dispositifs optoélectroniques.

L'écart entre le niveau d'énergie d'un donneur ( $E_D$ ) ou d'un accepteur ( $E_A$ ) par rapport à celui de la bande de conduction ( $E_C$ ) ou de la bande de valence ( $E_V$ ) respectivement, représente l'énergie d'ionisation du dopant.



Sheu et Chi [24] passent en revue en 2002 les effets caractéristiques du dopage obtenu par implantation ionique ou directement lors de la croissance épitaxiale sur les propriétés électriques et optiques des matériaux à base de Ga<sub>N</sub>. En ce qui concerne le dopage du Ga<sub>N</sub> de type N, le silicium (Si) avec une énergie d'ionisation d'environ 15 meV permet d'obtenir des couches de faible résistivité. Cependant, le dopage de type P avec du Mg présente des défis, notamment en ce qui concerne la solubilité limite du Mg dans le Ga<sub>N</sub> et la formation de complexes de compensation. Les valeurs reportées d'énergie d'ionisation du Mg sont comprises entre 125 meV et 170 meV selon les méthodes de mesure, de dopage et d'activation thermique [25, 26, 27, 28].

Pour obtenir une forte densité de trous dans le Ga<sub>N</sub>, il est donc nécessaire d'atteindre des niveaux de dopage supérieurs à  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  car même le Ga<sub>N</sub> de haute qualité présente une conductivité de type N résiduelle, avec une concentration comprise entre  $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  et  $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  selon les propriétés des matériaux, due à des défauts natifs (défauts ponctuels, lacunes) et à des impuretés (C, H et O). Cette capacité à ajuster précisément les propriétés électriques du Ga<sub>N</sub> grâce au dopage est essentielle pour répondre aux besoins spécifiques des dispositifs électroniques.

De plus, grâce à sa bande interdite directe, le Ga<sub>N</sub> est également adapté aux dispositifs optoélectroniques. En combinant l'indium (In) ou l'aluminium (Al) avec le Ga<sub>N</sub> pour former des alliages ternaires tels que l'InGa<sub>N</sub> ou l'AlGa<sub>N</sub>, il est possible de couvrir une large gamme du spectre lumineux, allant du visible à l'ultraviolet.

## 1.2 Technologie HEMT AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>

Le principe fondamental d'un transistor à haute mobilité électronique (HEMT) en Ga<sub>N</sub> repose sur une structure à hétérojonction AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>. L'un des avantages de cette technologie réside dans le fait qu'elle ne requiert pas de dopage qui engendre des mécanismes de dégradation de la mobilité par diffusion des porteurs de charge. Nous rappelons dans cette partie les paramètres qui caractérisent l'hétérostructure AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> ainsi que ceux qui caractérisent les performances du HEMT, à savoir la tension de seuil  $V_{th}$  et la résistance à l'état passant  $R_{on}$ .

### 1.2.1 Hétérostructure AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>

La Figure I.5 illustre la répartition de la charge, le profil du champ électrique et une représentation schématique simplifiée de la bande de conduction de la structure à hétérojonction AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> à face Ga principalement utilisée dans la technologie HEMT.

La charge totale présente à la surface de la couche d'AlGa<sub>N</sub> provient de deux sources principales : la charge en surface des donneurs  $qN_{DD}^+$  et la charge de polarisation, qui résulte de manière combinée des contributions spontanée et piézoélectrique de la couche d'AlGa<sub>N</sub>, notée  $Q_{Pol}(AlGaN)$ . En l'absence de polarisation électrique, le champ électrique dans la barrière d'AlGa<sub>N</sub> dépend uniquement de la densité de charges et il est exprimé par :

$$E_{AlGaN} = \frac{[qN_{DD}^+ - Q_{Pol}(AlGaN)]}{\epsilon_0 \epsilon_{AlGaN}} \quad (\text{I.6})$$

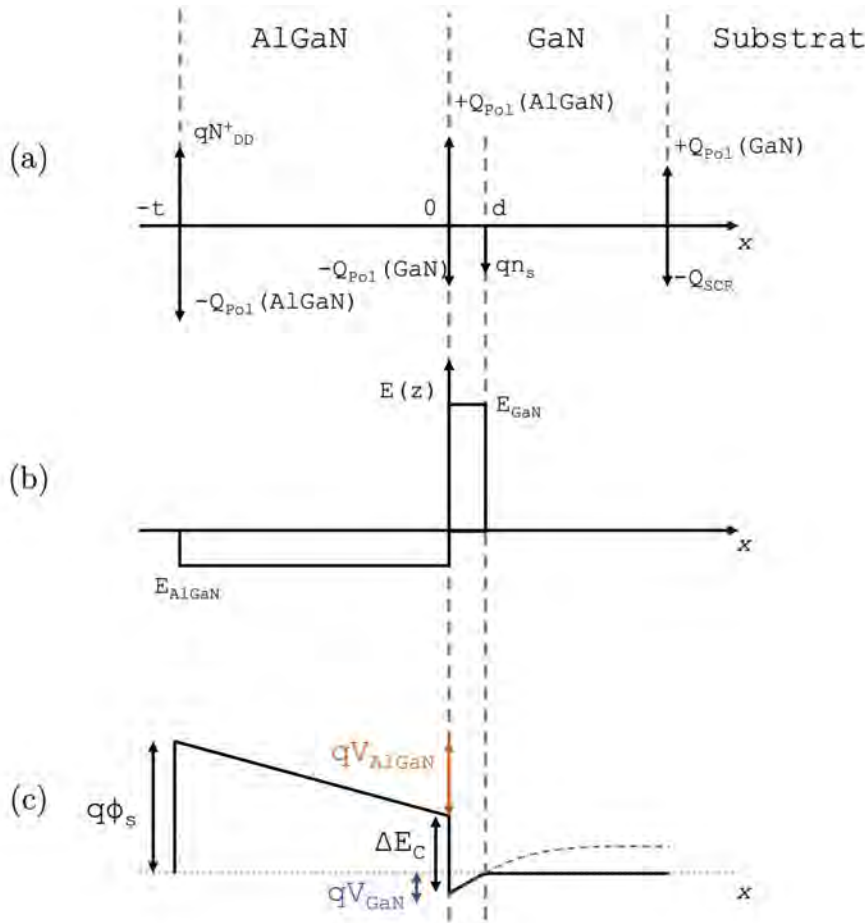


FIGURE I.5 – (a) Distribution de charges, (b) profil du champ électrique et (c) diagramme de bandes typique d'une hétérostructure AlGaN/GaN. Meneghini et al. [21]

Lorsque l'on considère la jonction AlGaN/GaN, la charge totale est calculée à partir de la différence entre les charges de polarisation de l'AlGaN et du GaN, soit  $Q_{Pol}(AlGaN) - Q_{Pol}(GaN)$ . Cette valeur est positive en raison de la polarité Ga des couches nitrures.

Au niveau de l'hétérojonction, où un puits de potentiel triangulaire est présent du côté du matériau GaN, on observe la formation d'un gaz bidimensionnel d'électrons (2DEG). Pour simplifier notre analyse, nous considérons le 2DEG comme étant une couche située à une distance fixe ( $d$ ) de l'hétérojonction. Pour déterminer la valeur de " $d$ ", on se réfère à la position centrale de la distribution électronique du 2DEG, comme illustré sur la Figure I.6, obtenue en résolvant l'équation de Schrödinger-Poisson [29, 30] dans un puits de potentiel de forme triangulaire, qui est souvent utilisé pour simplifier les calculs analytiques à l'interface AlGaN/GaN. Une valeur typique de " $d$ " est d'environ 2 nm [31].

Le champ électrique à l'intérieur de la couche GaN, noté  $E_{GaN}$ , est supposé être généré uniquement par la charge présente dans le 2DEG, notée  $n_s$ . Par conséquent, le champ électrique  $E_{GaN}$  peut être exprimé comme :

$$E_{GaN} = \frac{qn_s}{\epsilon_0 \epsilon_{GaN}} \quad (I.7)$$

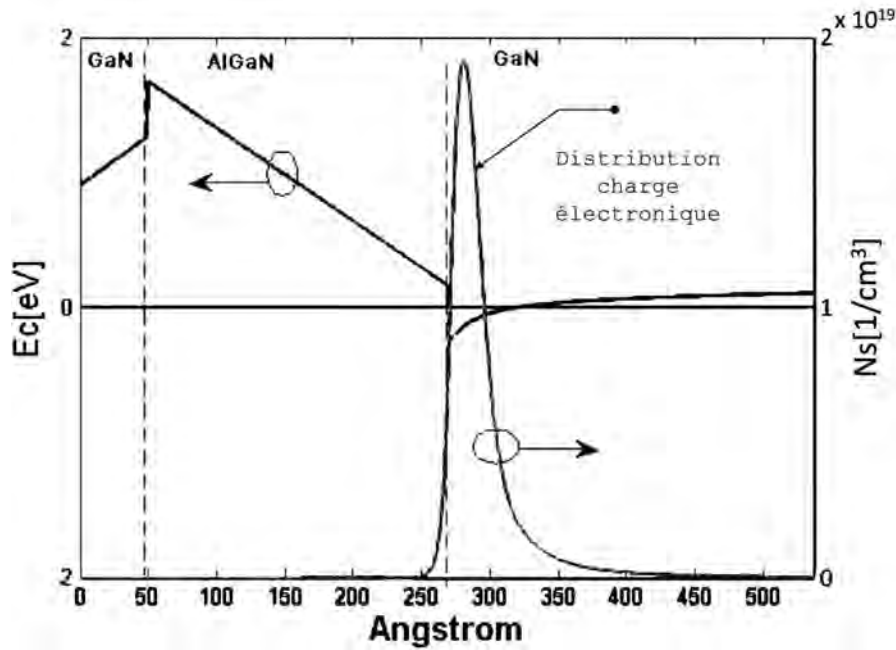


FIGURE I.6 – Bande de conduction  $E_C$ , énergie du niveau de Fermi  $E_F$  et concentration du 2DEG  $N_s$  dans une structure AlGaN/GaN, en tenant compte d'une barrière d'une épaisseur de 22 nm avec un taux d'aluminium de 18% et d'une couche de GaN de 5 nm : image reproduite des travaux de Jogai [29] sur la résolution auto-cohérente des équations de Schrödinger et de Poisson [1D] sur des hétérostructures AlGaN/GaN

Au niveau de la base de la couche de GaN, à l'interface avec le substrat, une charge de compensation  $Q_{scr}$  neutralise la composante positive  $Q_{Pol}(GaN)$  provenant de la polarisation spontanée du GaN. En l'absence de compensations, un champ électrique important serait généré, phénomène non physique. Cette charge de compensation peut provenir de diverses sources, et elle est utilisée ici pour simplifier l'analyse de la structure de base d'un HEMT en compensant la charge de polarisation  $-Q_{Pol}(GaN)$  présente à la surface du GaN. Ce mécanisme de compensation est similaire à la surface de la couche d'AlGaN par la présence d'un état de surface de type donneur ( $N_{DD}^+$ ) observé expérimentalement.

Enfin, à la surface de la couche d'AlGaN (lorsque cette couche est suffisamment épaisse), le potentiel  $q\Phi_s$  est fixé au niveau du donneur en surface  $E_{DD}$ .

Il faut noter que dans des structures avancées, des couches supplémentaires sont introduites pour des raisons technologiques, telles qu'une couche de nucléation en AlN pour la croissance épitaxiale du GaN, ou des couches de transition comme par exemple une couche dopée au carbone, une couche tampon permettant de maîtriser les contraintes mécaniques entre la couche de canal en GaN et le substrat. Cependant, pour simplifier notre explication, ces couches ne sont pas représentées ici.

Nous pouvons déduire du champ électrique la chute du potentiel dans la couche d'AlGaN d'épaisseur  $t$ , avec la relation :

$$V_{AlGaN} = -E_{AlGaN}t = -\frac{[qN_{DD}^+ - Q_{Pol}(AlGaN)]}{\epsilon_0\epsilon_{AlGaN}}t \quad (I.8)$$

$$= \frac{[Q_{Pol}(AlGaN) - Q_{Pol}(GaN) - qn_s]}{\epsilon_0\epsilon_{AlGaN}}t \quad (I.9)$$

et de manière similaire dans le GaN avec :

$$V_{GaN} = -E_{GaN}d = -\frac{qn_s}{\epsilon_0\epsilon_{GaN}}d \quad (I.10)$$

Et, en considérant le diagramme de bandes dans la Figure I.5, nous pouvons déduire la relation suivante :

$$\Phi_s - V_{AlGaN} - \frac{\Delta E_c}{q} + V_{GaN} = 0 \quad (I.11)$$

Par combinaison des équations précédentes et en approximant  $\epsilon_{GaN} = \epsilon_{AlGaN} = \epsilon$ , le calcul de la densité du 2DEG  $n_s$  devient :

$$n_s = \frac{[Q_{Pol}(AlGaN) - Q_{Pol}(GaN)]t - \epsilon(\Phi_s - \frac{\Delta E_c}{q})}{q(t+d)} \quad (I.12)$$

La densité de charge du 2DEG peut être modifiée en appliquant un potentiel électrique  $V_G$  via un contact métallique qui fixe le potentiel de surface à  $q\phi_b$ . Dans ce contexte, cette modulation est décrite par l'expression suivante :

$$n_s(V_G) = \frac{[Q_{Pol}(AlGaN) - Q_{Pol}(GaN)]t - \epsilon[V_G - (\Phi_b - \frac{\Delta E_c}{q})]}{q(t+d)} \quad (I.13)$$

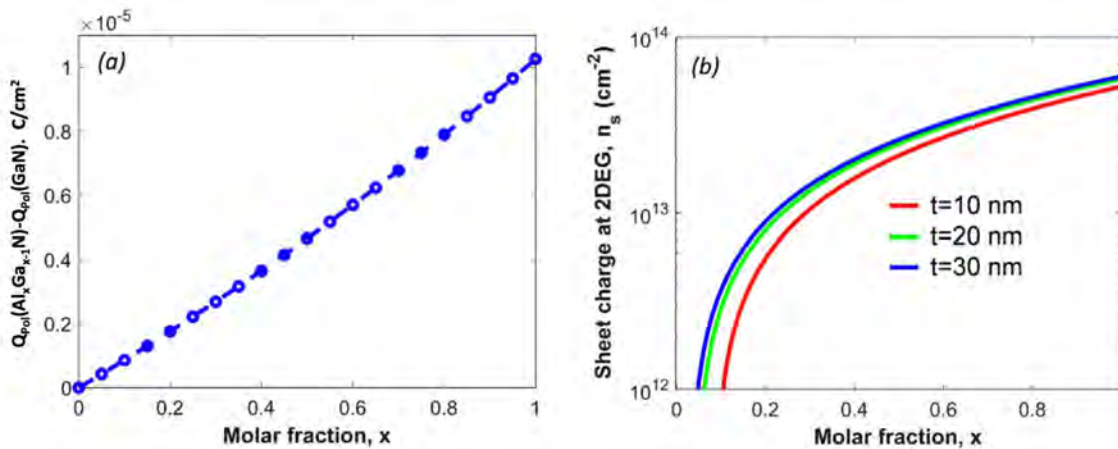


FIGURE I.7 – (a) Charges de polarisation à l'interface AlGaN/GaN  $[Q_{Pol}(AlGaN) - Q_{Pol}(GaN)]$  et (b) densité  $n_s$  du 2DEG calculées, pour une hétérojonction AlGaN/GaN en fonction du taux d'aluminium et de l'épaisseur de la couche d'AlGaN. Figures reprises des travaux de synthèse de Meneghini et al. [21]

Le 2DEG s'accumule lorsque la tension de grille est positive et diminue lorsqu'elle devient négative.

Les paramètres  $Q_{Pol}(AlGaN) - Q_{Pol}(GaN)$  et  $\Delta E_C$  dépendent du taux d'aluminium noté  $x$ , qui est introduit dans la couche d' $Al_xGa_{1-x}N$ . Une section à part entière dans le chapitre II est dédiée à la formulation de cette dépendance sur la formation des charges de polarisation piézoélectriques basée sur les travaux d'Ambacher et al. [23], car cela peut avoir un impact significatif sur la densité du 2DEG.

La Figure I.7 illustre comment la densité de charges piézoélectriques et la densité  $n_s$  du 2DEG varient en fonction de la teneur en aluminium  $x$ . Lorsque  $x$  est inférieur à 0,15, les conditions ne sont plus favorables à la formation du 2DEG en raison d'une densité de charges piézoélectriques insuffisante et d'une discontinuité de bande suffisamment élevée pour confiner le 2DEG. En revanche, au-delà de  $x=0,4$ , des contraintes importantes liées à la différence de maille entre les couches peuvent entraîner des défauts et altérer le fonctionnement global du composant [32].

Ainsi, dans la plage de  $0,15 < x < 0,4$ , la densité du 2DEG est d'environ  $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ , ce qui rend le transistor HEMT par nature de type normalement-passant ou "normally-on". À une tension de polarisation de grille nulle, le 2DEG est présent et forme un canal continu le long de l'interface.

### 1.2.2 Structure HEMT AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>

La Figure I.8 illustre la structure de base d'un HEMT AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>, qui appartient à la famille des transistors à effet de champ (FET, acronyme de Field-Effect Transistor en anglais). Ce transistor fonctionne en régulant le courant qui circule à travers le canal 2DEG, situé entre les électrodes de source et de drain, en appliquant une tension grille-source  $V_{GS}$  sur l'électrode de grille. Comme nous l'avons déjà mentionné, un HEMT est par nature un dispositif "normally-on" avec une tension de seuil  $V_{th}$  négative.

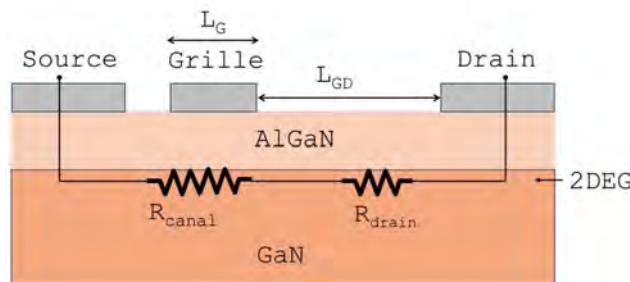


FIGURE I.8 – Schéma de la structure d'un HEMT AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> montrant les résistances dans le canal ( $R_{canal}$ ) et dans la zone d'accès de drain ( $R_{drain}$ )

### 1.2.2.1 Tension de seuil $V_{th}$

En utilisant le diagramme de bandes de l'hétérostructure AlGa<sub>x</sub>N/GaN, tel qu'illustré dans la Figure I.5, nous pouvons déterminer la tension de seuil  $V_{th}$  de cette structure à l'aide de la relation suivante :

$$V_{th}(x) = \Phi_b - V_{AlGaN} - \frac{\Delta E_C(x)}{q} \quad (\text{I.14})$$

$$= \Phi_b - \frac{\sigma_{Pol}(x)}{\epsilon_0 \epsilon_{Al_xGa_{1-x}N}} t - \frac{\Delta E_C(x)}{q} \quad (\text{I.15})$$

où  $\sigma_{Pol}(x)$  représente la densité de charge surfacique de polarisation à l'interface AlGa<sub>x</sub>N/GaN, calculée comme la différence entre les densités de charge de polarisation à l'interface AlGa<sub>x</sub>N/GaN :  $[Q_{Pol}(Al_xGa_{1-x}N) - Q_{Pol}(GaN)]$ .

Cette relation, conforme aux travaux d'Asgari et Kalafi [33], en supposant un dopage nul dans la couche d'AlGa<sub>x</sub>N, met en avant les principaux facteurs qui influencent  $V_{th}$  : la différence de densité de charges piézoélectriques  $\sigma_{Pol}(x)$ , l'épaisseur de la barrière en AlGa<sub>x</sub>N  $t$  et la hauteur de la barrière de contact de grille avec l'AlGa<sub>x</sub>N  $q\Phi_b$ .

C'est en ajustant ces paramètres que les approches visant à obtenir des composants HEMT GaN normally-off ont été développées, à savoir :

- Augmentation de la hauteur de la barrière en utilisant un matériau de grille ayant un travail de sortie plus élevé,
- Réduction de la densité de charge de polarisation en diminuant le taux d'aluminium,
- Réduction de la densité du 2DEG par amincissement de la couche d'AlGa<sub>x</sub>N.

### 1.2.2.2 Résistance à l'état passant $R_{on}$

La résistance à l'état passant ( $R_{on}$ ) d'un HEMT est principalement déterminée par la résistance du 2DEG entre la source et le drain qui se formule par l'équation suivante :

$$R_{on} = \frac{1}{W} \frac{1}{q\mu_n n_s} (L_G + L_{GD}) \quad (\text{I.16})$$

Ici  $q$  désigne la charge électronique élémentaire,  $\mu_n$  la mobilité électronique des électrons,  $W$  la largeur de la grille,  $L_G$  la longueur de la grille,  $L_{GD}$  la distance entre la grille et le drain et  $n_s$  la densité du 2DEG.

Cette résistance se compose de deux parties : la résistance du canal ( $R_{canal}$ ) et la résistance d'accès, principalement dominée par la résistance au niveau du drain ( $R_{drain}$ ) (Voir Figure I.8).

$$R_{on} = R_{canal} + R_{drain} = \frac{L_G}{W} \frac{1}{q\mu_n n_s} + \frac{L_{GD}}{W} \frac{1}{q\mu_n n_s} \quad (\text{I.17})$$

La tension à l'état bloqué d'un HEMT est supportée par la distance entre la grille et le drain ( $L_{GD}$ ). En considérant la tension de claquage ( $V_{BR}$ ) et le champ critique du GaN ( $E_c$ ), la distance grille-drain ( $L_{GD}$ ) est définie par :

$$L_{GD} = \frac{V_{BR}}{E_c} \quad (\text{I.18})$$

Dans les applications fonctionnant à haute tension, l'augmentation de  $L_{GD}$  accentue la contribution de  $R_{drain}$  sur la résistance totale  $R_{on}$ . Par conséquent, modifier la tension de seuil en diminuant la densité  $n_s$  du 2DEG sur toute la structure aura un impact significatif sur la résistance globale du dispositif.

Cependant, agir localement au niveau du canal, en différenciant les contributions de la densité du 2DEG dans le canal ( $n_s^{canal}$ ) et dans les zones d'accès ( $n_s^{drain} = n_s$ ), permet de modifier la tension de seuil sans affecter de manière significative la résistance totale  $R_{on}$  du dispositif.

Ainsi, l'expression de la résistance  $R_{on}$  peut être reformulée de la manière suivante :

$$R_{on} = \frac{1}{W} \frac{1}{q\mu_n} \left( \frac{L_G}{n_s^{canal}} + \frac{V_{BR}}{n_s E_c} \right) \quad (\text{I.19})$$

Le choix dans les paramètres de la structure HEMT et en particulier de la grille est donc primordial pour obtenir les performances souhaitées en termes de tension de seuil  $V_{th}$  et de résistance  $R_{on}$ .

## 2 Revue des différentes approches de HEMT GaN normally-off

Les structures HEMT AlGaIn/GaN conventionnelles sont de type "normally-on" (interrupteur fermé), le 2DEG se formant même en l'absence de polarisation de grille : la tension de seuil  $V_{th}$  est alors négative. Pour des applications en conversion de puissance, cela impose de concevoir des architectures complexes pour la commande de la grille. La réalisation de structures "normally-off" (interrupteur ouvert) s'est avérée indispensable afin d'assurer la sécurité de fonctionnement des systèmes.

En 1996, alors que la technologie HEMT en GaN est en plein essor, particulièrement dans les applications à haute fréquence jusqu'à 20 GHz, Khan et al.[34] reportent la toute première réalisation d'un HEMT "normally-off" avec une tension de seuil  $V_{th}$  positive de 50 mV, en utilisant une barrière ultra fine de 10 nm et une teneur en aluminium de 10%. Les caractéristiques de la barrière en termes d'épaisseur et de teneur en aluminium se rapprochent de la limite à laquelle le 2DEG ne se forme plus.

Différentes structures HEMT ont alors été proposées afin d'assurer la fonctionnalité normally-off et d'obtenir des tensions de seuil les plus élevées possibles. Les plus répandues, qui concernent la gravure partielle ou complète de la barrière AlGaIn, l'élévation de la barrière par traitement au fluor ou l'introduction d'une couche (Al)GaIn de type P sont présentées dans cette partie.

## 2.1 HEMT à grille semi-enterrée ou enterrée

Les HEMTs à grille semi-enterrée ou enterrée ("recessed-gate") se caractérisent par une gravure partielle ou complète de la barrière AlGa<sub>x</sub>N afin de diminuer son épaisseur jusqu'à disparition du 2DEG. Lorsque la gravure est partielle, l'hétérojonction AlGa<sub>x</sub>N/GaN est préservée assurant une haute mobilité électronique dans le canal 2DEG après l'application d'une tension de grille-source  $V_{GS}$  positive. Il existe deux variantes : un contact Schottky sur la grille (Figure I.9a) ou une structure de type MIS ou Metal Insulator Semi-conducteur (Figure I.9b).

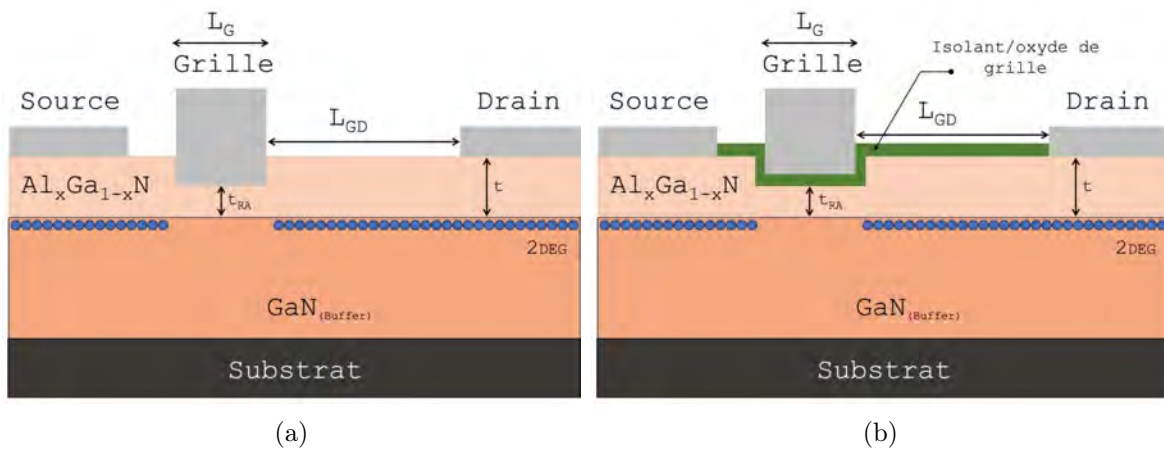


FIGURE I.9 – Vues en coupe schématiques (a) d'un HEMT et (b) d'un MIS-HEMT normally-off à grille semi-enterrée

Il est également possible de graver entièrement la barrière AlGa<sub>x</sub>N (Figure I.10). Des structures hybrides de type MIS/MOS HEMT ont ainsi été développées par l'ajout d'un isolant ou d'un oxyde de grille. Lorsqu'une tension de grille-source  $V_{GS}$  positive est appliquée, un canal d'accumulation se forme dans la couche GaN sous-jacente reliant le 2DEG encore présent dans les zones d'accès de source et de drain.

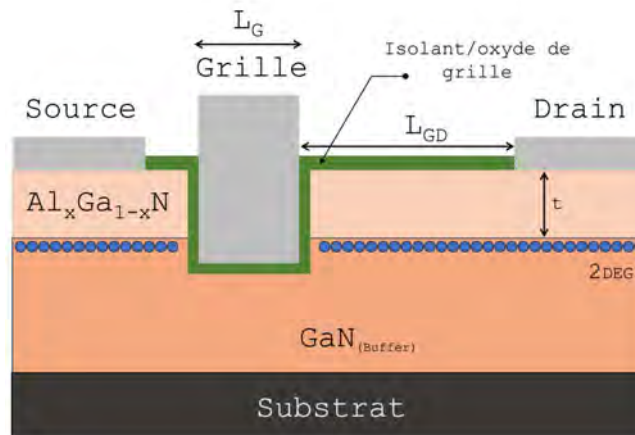


FIGURE I.10 – Vue en coupe schématique d'un MIS/MOS HEMT normally-off à grille enterrée



### 2.1.1 HEMT à grille semi-enterrée ou "recessed gate"

En 2003, Kumar et al. [35] ont obtenu une tension de seuil de 75 mV sur une hétérostructure comprenant une barrière d'AlGaIn d'une épaisseur de 18 nm avec une teneur en aluminium de 25% et un contact Schottky Ni/Au en réalisant une gravure plasma dans une ouverture de 1  $\mu\text{m}$  définissant la grille du HEMT.

Saito et al.[36] ont proposé en 2006 un modèle analytique pour cette structure. En considérant une hétérostructure AlGaIn/GaN avec une teneur en aluminium de 25% et un contact Schottky, ils ont établi une relation entre la tension de seuil  $V_{th}$  et l'épaisseur de la barrière sous la grille  $t_{RA}$  à savoir  $V_{th}=1,51-0,195\times t_{RA}$ . Cela signifie que pour obtenir une structure normally-off, la barrière doit avoir une épaisseur inférieure à 8 nm et que la sensibilité de la tension de seuil avec l'épaisseur restante de la barrière est de  $195\text{ mV}\cdot\text{nm}^{-1}$  pour une tension de seuil comprise entre 0,05 V et 1,5 V. Ces résultats soulignent un défi technologique en termes de gravure.

Lanford et al.[37] ont obtenu un HEMT normally-off à grille semi-enterrée en utilisant un procédé de gravure ICP-RIE (Inductive Coupled Plasma - Reactive Ion Etching) avec une très faible vitesse de gravure de  $1\text{ \AA}\cdot\text{s}^{-1}$ . Cependant, l'uniformité de la gravure sur l'ensemble d'un wafer reste une problématique importante.

Pour résoudre ce problème d'uniformité, Burnham et al.[38] ont travaillé, par exemple, sur des procédés de gravure par couche atomique (ALE : Atomic layer Etching) en répétant des cycles d'oxydation et de gravure, respectivement par plasma  $O_2$  et plasma  $BCl_3$ , avec une vitesse de gravure de 2,5 nm/cycle. Ils ont ainsi amélioré l'uniformité de la gravure sur un wafer de 3" avec un écart type de  $V_{th}$  de 63 mV.

Ota et al.[39] ont, par exemple, adopté une approche structurale (Figure I.11a) en utilisant une couche de neutralisation des charges piézoélectriques, en AlGaIn avec une faible teneur en aluminium de 7%, nommée PNT. Cette configuration rend la tension de seuil en théorie quasiment indépendante de l'épaisseur de barrière laissée après gravure avec une sensibilité de  $1,7\text{ mV}\cdot\text{nm}^{-1}$  lorsque le fond de gravure s'arrête dans la couche PNT. L'épaisseur de cette couche est dimensionnée afin de gommer l'inhomogénéité de l'épaisseur gravée, estimée à 5 nm sur un wafer de 3". Les résultats obtenus montrent un écart type sur la tension de seuil de 18 mV (Figure I.11a) pour cette structure contre 190 mV (Figure I.11b) pour une structure conventionnelle.

L'utilisation supplémentaire d'une couche isolante dans ces structures, entre le contact métallique et le canal, permet d'obtenir une tension de seuil plus élevée qu'avec un contact Schottky [39] améliorant ainsi le compromis  $V_{th}$  vs  $R_{on}$ , comme démontré dans les travaux de Saito et al.[36].

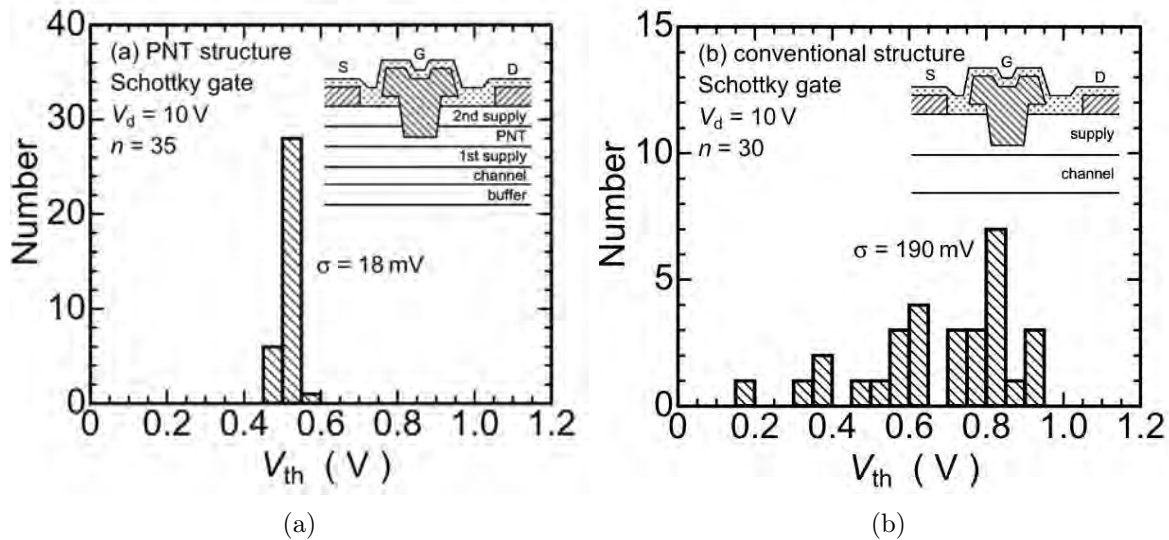


FIGURE I.11 – Histogramme des tensions de seuil  $V_{th}$  obtenu pour des structures HEMT fabriquées (a) avec la structure PNT proposée et (b) avec une structure à hétérojonction unique  $Al_{0,15}Ga_{0,85}N/GaN$ . Ota et al.[39]

### 2.1.2 MIS/MOS-HEMT à grille enterrée

Huang et al.[40] rapportent l'une des premières démonstrations de la structure hybride MOS-HEMT qui combine une structure HEMT et un canal MOS GaN avec un diélectrique de grille en  $SiO_2$ . La mobilité mesurée dans le canal atteint une valeur de  $79 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ , la tension de seuil est de 2,5 V et la résistance à l'état passant  $R_{on}$  est de  $20 \Omega \cdot \text{mm}$ .

Les performances de cette structure dépendent de la qualité de l'interface isolant/GaN. Ainsi, l'amélioration de cette solution technologique passe par l'optimisation des propriétés de cette interface à travers le choix de l'isolant et dans les procédés de fabrication de la grille enterrée afin d'optimiser la mobilité du canal et la tension de seuil.

Oka et Nozawa [41] ont obtenu une tension de seuil de 5,2 V et un pic de mobilité dans le canal à  $120 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  en utilisant une grille en  $SiN$  de 20 nm d'épaisseur déposée par PECVD, précédé par un recuit de 500°C pour réparer la surface du GaN. Kambayashi et al.[42] ont réussi à doubler la mobilité du canal à  $160 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  en reformant, dans le fond de gravure de la grille, une couche de GaN par épitaxie localisée.

Islam et al. [43] ont fait une synthèse d'un large éventail de travaux issus de la littérature sur les différents types et procédés de fabrication des isolants de grille pour la structure MIS/MOS-HEMT. L'utilisation des différents types d'isolant est discutée en termes de capacité à limiter les courants de fuite et de performance globale des dispositifs. Par exemple, Choi et al. ont démontré que l'utilisation d'une grille de haute qualité en  $SiN_{(PEALD)}$  combinée avec un diélectrique à haute permittivité en  $HfO_2$  permet d'améliorer la tenue en tension, la conduction du courant sous le seuil et la résistance à l'état passant  $R_{on}$ .

Cette structure garantit une tension de seuil supérieure à 2 V avec une résistance  $R_{on}$  minimale répertoriée de  $9,2 \Omega \cdot \text{mm}$  [44]. Cependant, des mécanismes de piépages, liés à des états de surface induits par les procédés de fabrication de la grille, sont encore un frein dans l'utilisation de ces HEMTs normally-off en raison de l'instabilité de la tension de seuil.

## 2.2 HEMT avec traitement au fluor

Une manière d'obtenir un HEMT normally-off est de compenser les charges positives présentes dans l'hétérostructure AlGa<sub>n</sub>/Ga<sub>n</sub>, qui résultent des mécanismes de polarisation piézo-électriques, par l'introduction de charges négatives.

En 2005, Cai et al.[45] ont réalisé cette compensation en incorporant des ions fluor ( $F^-$ ) dans la couche d'AlGa<sub>n</sub> à l'aide d'un traitement plasma localisé sous la grille suivi d'un recuit RTA (Rapid Thermal Annealing) à 400°C pendant 10 min, après métallisation de la grille avec un empilement Ni/Au. La tension de seuil ainsi obtenue est de +0,9 V.

Le décalage de tension vers les valeurs positives par l'introduction des ions  $F^-$  a été confirmé par des analyses DLTS (Deep-Level Transient Spectroscopy) montrant que leur incorporation introduit dans la barrière d'AlGa<sub>n</sub> un niveau profond de type accepteur à 1,8 eV de la bande de conduction [46]. Ce niveau profond permet de relever le niveau d'énergie de la bande de conduction de la barrière, comme illustré sur la Figure I.12, et de dépléter le 2DEG sous la grille.

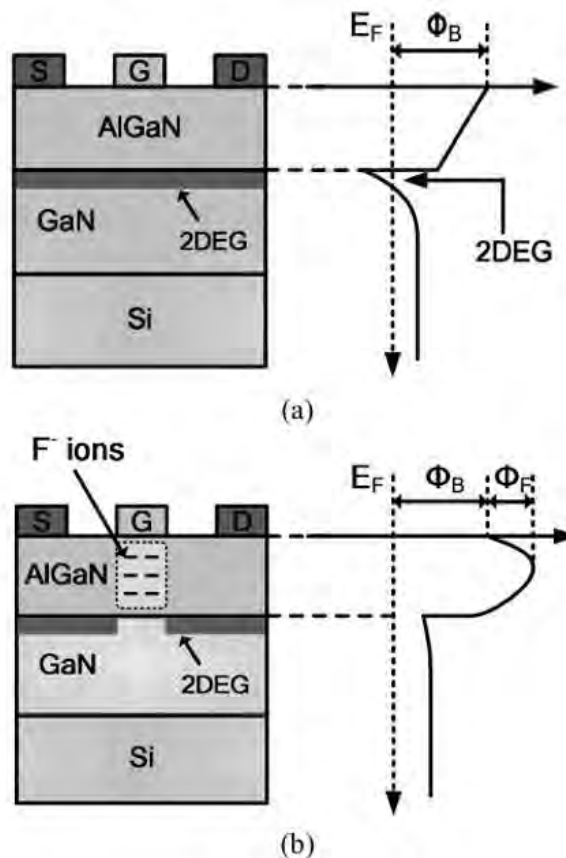


FIGURE I.12 – Coupe schématique et profil de la bande de conduction d'un HEMT (a) normally-on et (b) normally-off avec incorporation d'ions  $F^-$  par traitement plasma dans la barrière d'AlGa<sub>n</sub> sous la grille (Chen et al. [47]).

La Table I.2 reporte différents travaux portant sur la réalisation de HEMT normally-off à base de traitement au fluor sur une période allant de 2005 à 2018. Plusieurs méthodes de traitement ont été employées pour implanter les ions  $F^-$  dans la couche d'AlGaN, incluant des traitements plasma fluor, similaires à l'implantation ionique en immersion plasma (PIII), ou l'implantation ionique d'ions  $F^-$  à faible énergie variant entre 10 keV[48] et 25 keV[49].

Les tensions de seuil atteignables par ce type de procédé se situent généralement entre 0,1 V et 0,9 V, le fonctionnement étant limité par la diode de grille, due au contact Schottky direct Ni/Au sur la barrière AlGaN.

L'utilisation combinée des traitements fluor avec un diélectrique de grille, formant une structure de type MIS/MOS-HEMT (par exemple en alumine ( $Al_2O_3$ ) [50, 51, 52] ou en nitrure de silicium ( $Si_3N_4$ )[53, 48]) a permis un progrès en terme de tension de seuil, allant de 3,3 V à 5,1 V.

Métal de grille	Barrière AlGaN	Procédé de traitement fluor	$V_{TH}$ (V)	$R_{on}$	Ref
Ni/Au	x = 0,3; t = 18 nm	traitement plasma $CF_4$	+0,9	$9,6 \Omega \cdot \text{mm}$ à $V_{GS} = 3 \text{ V}$	[45]
Ni/Au	x = 0,33; 1 nm AlN; t = 25 nm;	gravure 12 nm d'AlGaN + traitement plasma $CF_4$	+0,1	$3,3 \Omega \cdot \text{mm}$ à $V_{GS} = 4 \text{ V}$	[54]
Ni/Au (20/ 300 nm)	x = 0,25; 1 nm AlN; t = 13 nm;	traitement plasma $CF_4$ + 12 nm $Al_2O_3$ ALD + recuit à 400°C 10 min	5,1	-	[50]
Ni/Au (20/ 280 nm)	x = 0,26; 1 nm AlN; t = 20 nm;	implantation ionique $F^+$ (25 keV) + recuit à 400°C 10 min	+0,6	$9,3 \Omega \cdot \text{mm}$ à $V_{GS} = 2,5 \text{ V}$	[49]
Ni/Au	x = 0,25; 1 nm AlN; t = 18 nm;	traitement plasma $CF_4$ + 17 nm $SiN_x$ (PECVD)	3,6	$9,8 \Omega \cdot \text{mm}$ à $V_{GS} = 14 \text{ V}$	[53]
Ni/Au (50/ 150 nm)	x = 0,26; 1 nm AlN; t = 30 nm;	8 nm $Si_3N_4$ (LPCVD) + implantation ionique $F^+$ (10 keV) + recuit à 400°C 10 min	3,3	$17,2 \Omega \cdot \text{mm}$ à $V_{GS} = 9 \text{ V}$	[48]
Ni/Au	x = 0,23; t = 25 nm;	gravure + 15 nm AlN/ $Al_2O_3$ (PEALD) + implantation ionique $F^+$ (10 keV) + recuit à 400°C 10 min	+0,68	$10 \Omega \cdot \text{mm}$ à $V_{GS} = 10 \text{ V}$	[51]

TABLE I.2 – Différents procédés de traitement fluor issus de la littérature

Les faibles résistances à l'état passant  $R_{on}$ , inférieures à  $10 \Omega \cdot \text{mm}$  et reportées dans la Table I.2, sont attribuables à la présence quasi générale d'une couche d'AlN d'espacement entre le canal en GaN et la barrière AlGaN, permettant un meilleur confinement du 2DEG et donc des densités et mobilités du 2DEG plus élevées.

Malgré des performances relativement élevées, cette solution technologique n'a pas connu un développement important en comparaison avec d'autres technologies, principalement en raison de l'instabilité des ions  $F^-$  et de la tension de seuil  $V_{th}$  après exposition à des températures élevées ou à un champ électrique important [55, 56, 57].

### 2.3 HEMT e-mode à grille p-(Al)Ga<sub>x</sub>N

Une approche permettant d'obtenir un HEMT normally-off est d'utiliser une couche GaN ou AlGa<sub>x</sub>N dopée de type P sous la région de grille, comme illustré sur la Figure I.13. L'introduction de cette couche relève les niveaux d'énergie de la bande de conduction de la barrière permettant de dépléter le 2DEG pour une polarisation de grille nulle. Afin d'optimiser cette déplétion, le choix dans les paramètres de l'hétérostructure, à savoir la teneur en aluminium, l'épaisseur de la barrière AlGa<sub>x</sub>N et la concentration  $N_A$  de la couche P-(Al)Ga<sub>x</sub>N, est crucial car l'introduction de cette couche ne garantit pas toujours la déplétion totale du 2DEG.

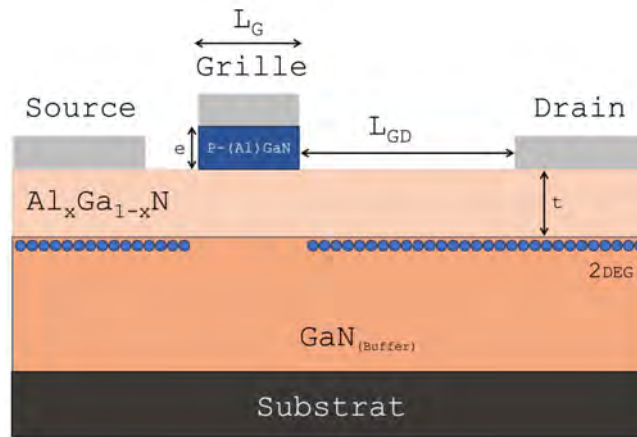


FIGURE I.13 – Représentation schématique d'un HEMT GaN à grille P-(Al)Ga<sub>x</sub>N

La Figure I.14 présente les énergies de la bande de conduction simulées dans une hétérostructure AlGa<sub>x</sub>N/GaN avec une couche P-GaN d'une épaisseur de 50 nm et dopée à  $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  en fonction de la teneur en aluminium (12% et 26%) (Figure I.14a) et en fonction de l'épaisseur de la barrière AlGa<sub>x</sub>N (10 nm et 25 nm) (Figure I.14b), selon les résultats issus de l'article de revue de Greco et al. [13].

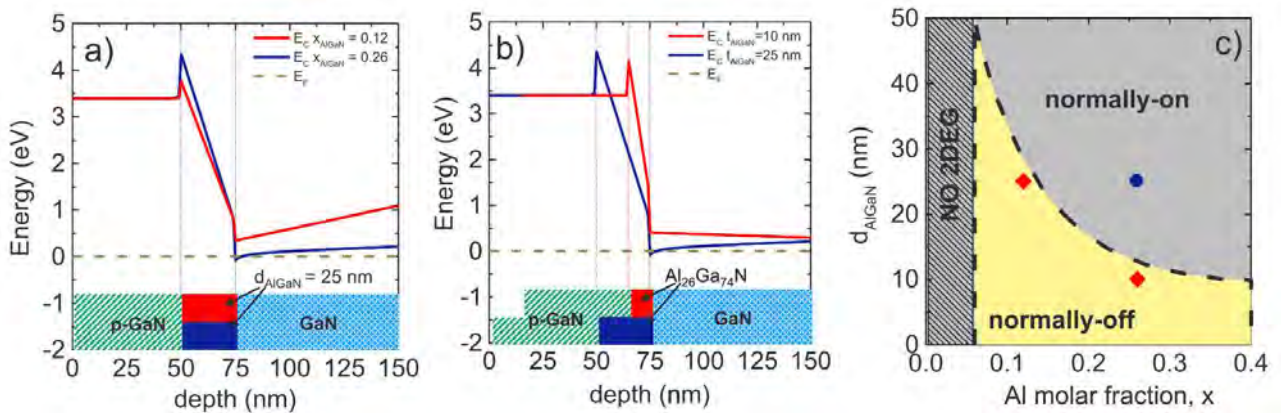


FIGURE I.14 – Diagrammes de bande simulés d'une hétérostructure P-GaN/AlGa<sub>x</sub>N/GaN pour (a) deux fractions molaires (12% et 16%) dans la barrière d'AlGa<sub>x</sub>N et (b) deux épaisseurs de la barrière AlGa<sub>x</sub>N ; (c) Frontière entre les modes normally-on et normally-off de la structure HEMT à grille P-GaN en fonction de la teneur en aluminium ( $x$ ) et de l'épaisseur de la couche barrière AlGa<sub>x</sub>N (Greco et al. [13]).

Nous pouvons observer que, pour une épaisseur donnée de 25 nm, une teneur en aluminium élevée assure la formation du 2DEG caractérisé par le niveau d'énergie de la bande de conduction sous le niveau de Fermi, et ce malgré la présence de la couche p-GaN. La même observation est faite en considérant une teneur donnée de 26% lorsque l'épaisseur de la barrière est supérieure à 25 nm.

En se basant sur cette observation, Fuji et al.[58] ont simulé le diagramme de bandes de la structure P-GaN/AlGaIn/GaN en faisant varier à la fois l'épaisseur de la barrière et la teneur en aluminium (Figure I.14.c), afin de déterminer les conditions nécessaires pour obtenir la déplétion du 2DEG. Ils ont ainsi identifié une frontière entre les deux modes de fonctionnement, normally-on et normally-off, lorsque le niveau minimum d'énergie de la bande de conduction coïncide avec celui du niveau de Fermi. Pour des valeurs de teneur en aluminium comprises entre 15% et 25%, la structure nécessite une barrière AlGaIn très fine, inférieure à 20 nm, pour dépléter efficacement le 2DEG. Les symboles rouges et bleus indiquent les conditions de simulation des figures I.14 a et b.

Métal de grille	Barrière AlGaIn	Caractéristiques de la couche p-GaN	$V_{TH}$ (V)	$R_{on}$ à $V_{GS} = 5$ V	Ref
Ni/Au	$x = 0,2$ ; $t = 30$ nm	$p = 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ; $e = 100$ nm	$\approx -0,5$	-	[59]
Ni/Au	$x = 0,22$ ; $t = 12$ nm	$N_A = 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , $e = 10$ nm	+0,5	-	[60]
Ni/Au	$x = 0,23$ ; $t = 15$ nm	$p = 3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , $e = 110$ nm	+1,25	$10,9 \Omega \cdot \text{mm}$	[61]
W	$x = 0,2$ ; $t = 15$ nm	$N_A = 2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , $e = 70$ nm	+3	$14,3 \Omega \cdot \text{mm}$ à $V_{GS} = 12$ V	[62]
Ti/Au	$x = 0,2$ ; $t = 15$ nm	$N_A = 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , $e = 100$ nm	2,44	$17 \Omega \cdot \text{mm}$ à $V_{GS} = 8$ V	[63]
Ni et W	$x = 0,2$ ; $t = 15$ nm	$N_A = 2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , $e = 70$ nm	1,23 et 3,303	$14 \Omega \cdot \text{mm}$ et $16 \Omega \cdot \text{mm}$	[64]
Ni/Au	$x = 0,25$ ; $t = 10$ nm	$N_A = 5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , $e = 60$ nm	4,3	$42 \Omega \cdot \text{mm}$ à $V_{GS} = 10$ V	[65]
Ni/Au	$x = 0,25$ ; $t = 18$ nm	$N_A = 3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , $e = 70$ nm	1,75	$22 \Omega \cdot \text{mm}$ à $V_{GS} = 6$ V	[66]

TABLE I.3 – Synthèse de la littérature sur les paramètres technologiques de fabrication de HEMTs GaN à grille P-GaN : teneur en aluminium ( $x$ ), épaisseur de la barrière AlGaIn ( $t$ ), concentration du Mg ( $N_A$ ) ou/et concentration de trous ( $p$ ), épaisseur de la couche P-GaN ( $e$ ) et métal de grille. Résultats électriques associés : tension de seuil ( $V_{th}$ ) et résistance à l'état passant ( $R_{on}$ ) extraite à partir de la pente de la caractéristique  $I_D$  vs  $V_{DS}$ .

### 2.3.1 Évolution de la technologie HEMT à grille P-GaN

La Table I.3 reporte les performances électriques en termes de tension de seuil  $V_{th}$  et de résistance à l'état passant  $R_{on}$  issues des travaux de réalisation de HEMT à grille P-GaN couvrant les deux dernières décennies. Les données recueillies dans les différentes études concernent la concentration du P-GaN, l'épaisseur et la teneur en aluminium de la barrière AlGaIn et les métaux de contact de grille permettent de tracer l'évolution de la technologie.

En 2000, Hu et al.[59] proposent pour la première fois l'idée d'utiliser une couche P-GaN pour créer une jonction PN sous la grille dans le but d'étendre la plage de tension grille-source des HEMTs à enrichissement (e-mode) et de permettre ainsi l'intégration monolithique de HEMTs à déplétion (d-mode) et e-mode dans les circuits et composants logiques.

Le fonctionnement d'un HEMT e-mode repose sur l'enrichissement du canal 2DEG en appliquant une tension de grille-source positive de plus en plus grande. Cependant, dans ce cas, le courant maximal est limité par le courant de la diode de grille. En utilisant une jonction PN sous la grille, la plage de tension de grille-source, qui maintient des courants de grille faibles, peut s'élever jusqu'à 3 V contre seulement 1 V pour une grille Schottky classique, améliorant ainsi les caractéristiques électriques en termes de courant de saturation et de transconductance.

Suh et al.[60] réalisent en 2006 un HEMT e-mode à grille P-GaN en prenant en compte pour la première fois les contraintes liées à l'utilisation des interrupteurs de puissance. Ils ont visé une tension de seuil supérieure à 1 V pour obtenir une bonne immunité à la commande de grille tout en minimisant les résistances d'accès qui contribuent à la résistance spécifique totale ( $R_{on}$ ) du dispositif. Les auteurs obtiennent une tension de seuil de +0,5 V en utilisant une couche de P-GaN d'une épaisseur de 10 nm et une concentration de  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  sur une hétérostructure AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> comprenant une barrière de 12 nm d'épaisseur et un taux d'aluminium de 22%.

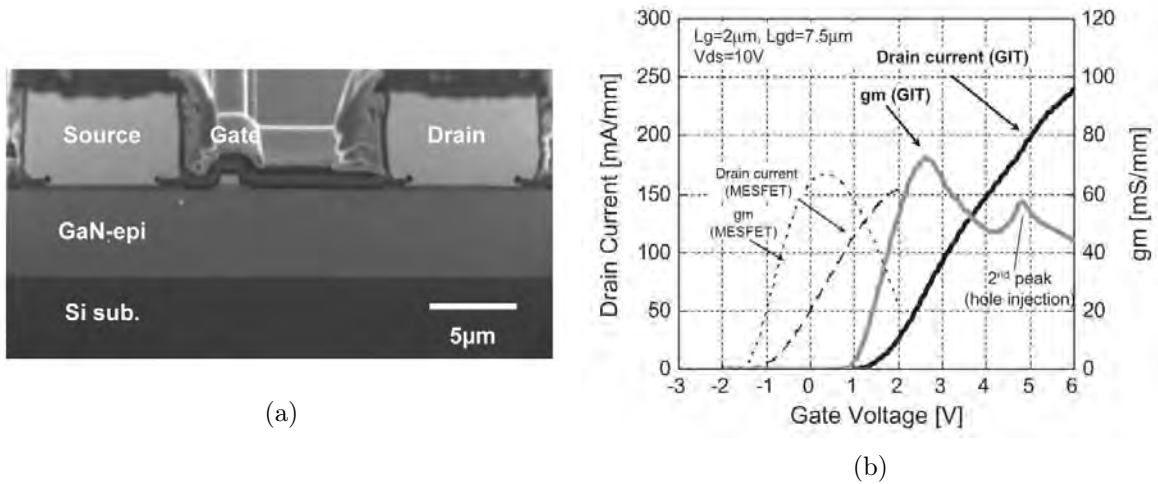


FIGURE I.15 – (a) Vue en coupe et (b) caractéristiques  $I_{DS}(V_{GS})$  et  $gm(V_{GS})$  d'un GIT fabriqué montrant deux pics dans la caractéristique de transconductance. Uemoto et al.[67]

Uemoto et al. [67] introduisent en 2007 pour la première fois le terme « GIT » (gate injection transistor) pour définir ce type de structure (Figure I.15), avec dans ce cas précis une structure à grille p-AlGa<sub>N</sub> (p-AlGa<sub>N</sub>/i-AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>) avec une tension de seuil  $V_{th}$  de 1 V, dans laquelle ils ont identifié 3 régimes de fonctionnement :

- Pour une tension grille-source inférieure à  $V_{th}$ , le canal est complètement déplété.
- Jusqu'à une tension atteignant la tension de seuil  $V_F$  de la jonction PN de grille (p-AlGa<sub>N</sub>/AlGa<sub>N</sub>), le transistor fonctionne comme un FET et le 2DEG se rétablit.

- Au-delà de cette valeur, un phénomène d'injection de trous dans le canal depuis la barrière P-AlGaN est responsable d'un second pic de transconductance dans la caractéristique de transfert  $gm$  vs  $V_{GS}$ .

Uemoto et al. expliquent que ce mode d'injection contribue à obtenir une résistance  $R_{on}$  plus faible, tout en maintenant un fonctionnement normally-off et en limitant les courants de grille. Cependant, l'observation de cet effet sur les structures à grille P-GaN est rare et peu d'études ont traité cet aspect jusqu'à présent [68, 69]. De plus, le P-GaN est très majoritairement utilisé dans la littérature comparé au p-AlGaN en raison de la discontinuité de bande entre le P-GaN et la barrière AlGaN qui favorise la déplétion du 2DEG.

À partir de cette période, les tensions de seuil observées dans les dispositifs commencent à atteindre des valeurs plus élevées situées entre 1,25 V et 4,3 V. Cela est principalement associé aux progrès réalisés dans la fabrication de couches P-GaN à forte concentration, généralement comprise entre  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  et  $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ .

Le choix de la métallisation pour le contact de grille influence également la tension de seuil du dispositif, comme démontré par les travaux de Hang et al. [62, 63, 64]. Dans leurs études, ils ont évalué l'impact du travail de sortie du contact de grille sur la tension de seuil  $V_{th}$ . Par exemple, l'utilisation du Tungstène (W) et du Titane (Ti) avec des travaux de sortie plus faibles que le Nickel (Ni), a permis de réduire les courants de fuite et d'augmenter la tension de seuil. Les valeurs de  $V_{th}$  étaient de 3,3 V et 2,44 V pour les métaux respectifs W et Ni comparées à 1,23 V pour le Ni, en raison de l'augmentation de la barrière Schottky [13].

Enfin, en 2013, Kim et al. [70] ont réalisé un HEMT à grille P-GaN sur un substrat Si de 200 mm compatible avec la technologie CMOS (Complementary Metal Oxide Semi-conductor). Les caractéristiques médianes du dispositif étaient : une tension de seuil  $V_{th}$  de 2,8 V, une résistance à l'état passant  $R_{on}$  de  $20 \Omega \cdot \text{mm}$  et une tension de claquage  $B_V$  de 670 V, permettant ainsi d'obtenir un composant adapté aux drivers en technologie Si. Cette avancée a marqué un progrès significatif dans le domaine de la technologie GaN sur substrat Si, contribuant ainsi à la réduction des coûts de fabrication.

Depuis, des solutions HEMTs normally-off 600 V ont été mises sur le marché. D'abord, Panasonic [71] a lancé sa structure GIT (utilisant une barrière p-AlGaN) suivi par GaN Systems [72] et EPC pour des applications allant jusqu'à 350 V. Parmi les solutions HEMT en GaN normally-off, celle utilisant une grille P-GaN est la seule à avoir atteint le stade de commercialisation.

### 2.3.2 Méthodes de fabrication de la structure HEMT à grille P-GaN

La fabrication de la couche P-GaN sous la région de grille constitue un défi technologique depuis les débuts de cette approche de conception jusqu'à aujourd'hui. La Figure I.16 illustre de façon schématique les 4 méthodes possibles de fabrication qui permettent d'obtenir cette couche P-GaN : gravure sélective, croissance sélective, implantation d'hydrogène et sublimation. Nous présentons par la suite les résultats obtenus pour la fabrication de HEMT p-GaN selon ces différentes techniques.



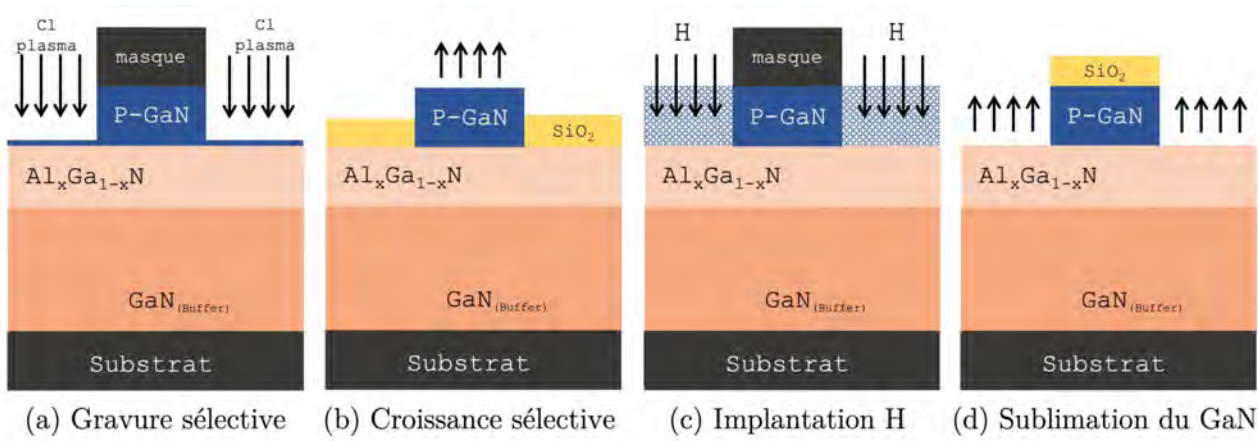


FIGURE I.16 – Procédés de fabrication de la couche P-GaN sous la région de grille du HEMT normally-off

### 2.3.2.1 Gravure sélective

L'approche de fabrication la plus répandue pour obtenir cette structure est la gravure sélective de la couche P-GaN dans les régions d'accès de source et de drain sur une hétérostructure de départ P-GaN/AlGa<sub>x</sub>N/GaN (Figure I.16a). Pour rappel, l'épaisseur de la couche P-GaN se situe généralement entre 50 nm et 100 nm et, idéalement, la gravure doit s'arrêter à la surface de la barrière AlGa<sub>x</sub>N dont l'épaisseur se situe entre 10 nm et 20 nm. Cette méthode nécessite donc un contrôle très précis lors de la gravure pour éliminer efficacement le P-GaN.

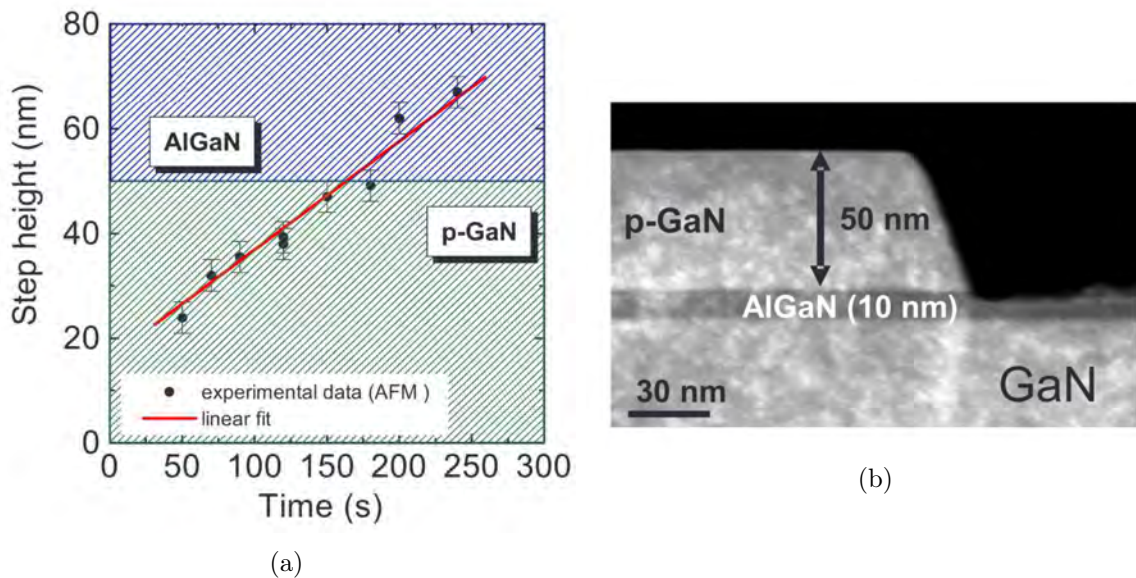


FIGURE I.17 – (a) Mesures AFM de la hauteur de marche en fonction du temps de gravure pour la calibration du procédé de gravure du P-GaN et (b) Observation TEM de la structure P-GaN/AlGa<sub>x</sub>N/GaN après gravure complète de la couche P-GaN dans les régions d'accès. Greco et al.[13]

Une gravure incomplète ou excessive de la couche P-GaN aurait pour conséquence une diminution de la densité du 2DEG soit par l'effet du P-GaN sur le nivellement vers le haut du niveau d'énergie des bandes de la barrière AlGa<sub>x</sub>N, soit par la diminution de son épaisseur. De plus, selon les paramètres du procédé de gravure plasma utilisé, tels que la puissance ou

la composition chimique du plasma, les performances du dispositif peuvent être détériorées en raison de l'augmentation de pièges ou des dommages induits pendant la gravure qui mèneraient aussi à une diminution de la densité du 2DEG ou de sa mobilité.

Greco et al.[13] recommandent l'utilisation d'un plasma de faible puissance afin d'obtenir une vitesse de gravure lente et de préserver au mieux la morphologie de surface initiale. Par exemple, l'utilisation de la gravure par ICP (Inductive Coupled Plasma) avec un plasma  $Cl_2/O_2/Ar$  (30/2/10 sccm) et une puissance  $P_{ICP}$  de 100 W à une pression de 5 mTorr a permis de graver la couche P-GaN d'une épaisseur de 50 nm à une vitesse de  $13,2 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-1}$  sans endommager la barrière d'AlGaN d'une épaisseur de 10 nm (Figure I.17).

### 2.3.2.2 Épitaxie localisée

La croissance sélective de P-GaN par épitaxie localisée (SAE : Selective Area Epitaxy) est une solution alternative à la gravure qui permet de préserver les zones d'accès de source et de drain intactes et de conserver de bonnes propriétés de conduction du 2DEG (Figure I.16b).

L'épitaxie localisée est une approche de fabrication qui peut être utilisée avec diverses techniques de croissance épitaxiale telles que la croissance par jets moléculaires (EJM), l'épitaxie en phase vapeur aux organométalliques (MOVPE ou MOCVD) et l'épitaxie hybride en phase vapeur (HVPE en anglais). En ajustant les paramètres de croissance, par exemple la température, le flux et la pression, la croissance s'effectue de manière sélective dans les zones non protégées par un masque diélectrique.

L'approche générale de fabrication illustrée dans la Figure I.18 suit les étapes technologiques suivantes (Yuan et al.[73]) :

- Dépôt du diélectrique en couche mince sur le substrat,
- Définition des motifs du masque diélectrique par lithographie et gravure fluorée,
- Croissance des micro et nano-structures par épitaxie dans les zones exposées.

Les caractéristiques du masque diélectrique doivent respecter certaines conditions pour être compatible avec les procédés de croissance épitaxiale localisée. Le coefficient d'adhérence des espèces sur le masque diélectrique [74] doit être le plus faible possible afin d'éviter toute croissance parasite. Le masque doit pouvoir supporter les conditions de température de croissance, typiquement supérieures à  $700^\circ\text{C}$ , et être chimiquement inerte aux gaz précurseurs. Pour la croissance de matériaux III-V, les diélectriques qui respectent ces conditions et qui sont majoritairement utilisés sont le  $SiO_2$ , le  $SiN$  et l' $Al_2O_3$ .

La première réalisation d'un HEMT à grille P-GaN grâce à cette technique a été entreprise par Hu et al.[59]. Ils ont utilisé une ouverture dans un masque en  $SiO_2$  déposé par PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) pour assurer la sélectivité de croissance. Les auteurs ont ainsi obtenu une couche épitaxiale de GaN dopée au Mg par MOCVD (Metalorganic Chemical Vapor Deposition) d'une épaisseur de 100 nm avec une concentration de trous mesurée par effet Hall de  $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . Le dispositif final présente une tension de seuil avec un décalage de 2,5 V vers les valeurs positives, mais qui reste néanmoins légèrement inférieure à 0 V (-0,5 V).

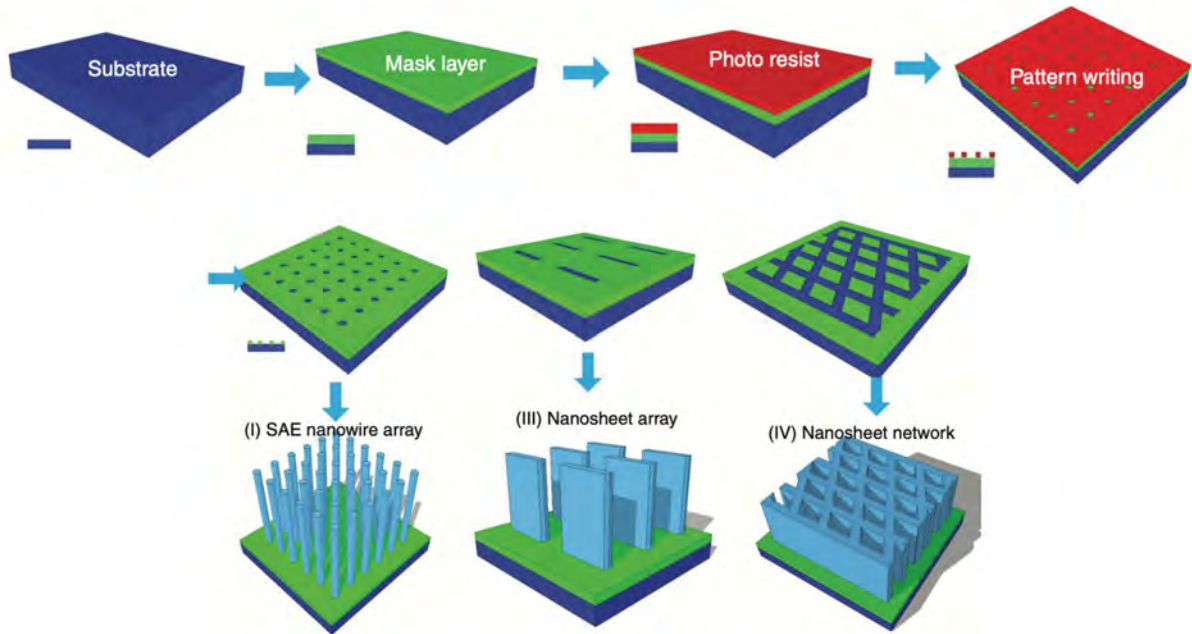


FIGURE I.18 – Illustration de la méthode de croissance épitaxiale sélective. Yuan et al.[73]

En 2016, Huang et al.[75] ont évalué dans leurs travaux l'effet du flux du biscyclopentadienylmagnésium ( $Cp_2Mg$ ) dans le bâti de croissance MOCVD sur la concentration de trous induite dans la couche P-GaN épitaxiée localement à l'aide d'un masque  $SiO_2$  déposé par PECVD. En comparaison avec la structure normally-on de référence avec un contact de grille Schottky, l'augmentation du flux de  $Cp_2Mg$  entraîne une augmentation de la concentration de trous jusqu'à  $3,3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  et par conséquent un décalage de la tension de seuil de référence de  $-3,95 \text{ V}$  à  $-0,37 \text{ V}$ .

Malgré un décalage significatif de la tension de seuil, cette solution se heurte à la difficulté d'obtenir un dopage Mg du GaN élevé par épitaxie par MOCVD et plus particulièrement lors des reprises d'épitaxie localisée.

### 2.3.2.3 Traitement plasma à base d'hydrogène

La troisième méthode permettant de rétablir le 2DEG dans les zones d'accès du HEMT consiste à appliquer un traitement plasma à base d'hydrogène pour neutraliser le P-GaN (Figure I.16c). L'hydrogène forme des complexes Mg-H qui passivent les accepteurs Mg dans la couche de P-GaN réduisant ainsi sa conductivité de type P [76, 77].

Hao et al. [66] reportent un dispositif ayant une tension de seuil de  $1,75 \text{ V}$  avec cette méthode. Cependant, les performances de ce dispositif sont moins bonnes que celles de la structure de référence à grille P-GaN utilisant la gravure plasma dans les zones d'accès : une tension de seuil inférieure, une résistance passante  $R_{on}$  de  $19,8 \Omega \cdot \text{mm}$  contre  $12,1 \Omega \cdot \text{mm}$ , bien que le courant de saturation à  $V_{GS}$  de  $6 \text{ V}$  soit  $75,7\%$  supérieur à celui de la structure de référence ( $102 \text{ mA} \cdot \text{mm}^{-1}$ ).

Cette méthode présente un potentiel et les auteurs considèrent que la diminution des performances entre les deux dispositifs est en partie liée à un traitement par plasma H non optimisé.

### 2.3.2.4 Sublimation du GaN

Damilano et al.[78] ont développé une nouvelle approche de fabrication de type "top-down" (fabrication de haut en bas) pour le GaN par sublimation (ou évaporation) à très haute température ( $\sim 900^\circ\text{C}$ ) en utilisant un masque en nitrure de silicium ( $\text{SiN}$ ) ou  $\text{SiO}_2$  dans un bâti de croissance MBE (Molecular Beam Epitaxy)(Figure I.16d). Cette technique s'est révélée sélective avec les couches de GaN contenant de l'aluminium. La sublimation est totale sur la couche d'arrêt, laissant les structures protégées par le masque avec des facettes verticales, lesquelles sont les plus stables dans la structure Wurtzite du GaN.

En 2021, Huong et al. font la démonstration d'un HEMT GaN à grille P-GaN normally-off utilisant la sublimation de la couche P-GaN dans les zones d'accès de source et de drain présentant une tension de seuil de 0,5 V, soit un décalage de 2,5 V par rapport à la structure normally-on de référence. Ensuite, Ngo et al.[79] ont appliqué cette méthode sur une épistruccure de départ P-GaN/ $\text{AlN}_{(3nm)}$ /GaN combinée à une reprise d'épitaxie localisée d'une couche AlGaN dans les zones d'accès de source et de drain. Leurs travaux ont abouti à un dispositif avec une tension de seuil de 1,5 V et une résistance passante  $R_{on}$  de  $8\ \Omega \cdot \text{mm}$  pour une tension grille-source  $V_{GS}$  de 5 V.

## 2.4 Configuration cascode

La configuration cascode est une solution normally-off basée sur un HEMT GaN normally-on à haute tension connecté en série avec un MOSFET Si à basse tension, comme illustré dans la Figure I.19.

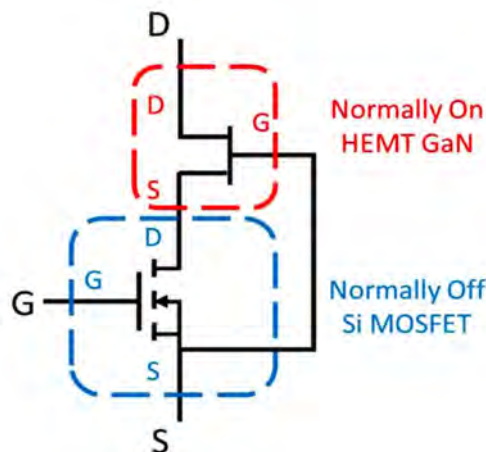


FIGURE I.19 – Configuration cascode montrant la mise en série d'une HEMT normally-on avec une MOSFET Si normally-off (Meneghini et al.[21])

Le MOSFET Si contrôle l'ouverture et la fermeture du HEMT. Lorsqu'une tension de grille positive supérieure à la tension de seuil est appliquée au MOSFET, cela induit une tension de grille-source du HEMT proche de zéro, permettant la circulation du courant dans le dispositif. En l'absence de tension de grille sur le MOSFET, le courant ne peut circuler dans le canal du HEMT et toute augmentation de la tension de drain est gérée par le HEMT. Ainsi, cette configuration cascode tire parti à la fois de la tension de seuil positive du MOSFET et de la faible résistance à l'état passant du HEMT, ainsi que du champ de claquage élevé du HEMT Ga<sub>N</sub> en condition d'état bloqué, offrant une bonne fiabilité.

Cependant, l'utilisation du dispositif Si limite les performances de la configuration cascode à haute température. De plus, l'intégration de cette configuration complexifie le packaging, augmente sa taille et introduit des inductances parasites, ce qui peut affecter les performances de commutation du circuit et limiter son fonctionnement à haute fréquence.

## 2.5 Structure HEMT normally-off à 3 dimensions de type FinFET

Une dernière solution proposée dans la littérature pour obtenir un HEMT normally-off concerne les structures [3D] de type FinFET comme illustré sur la Figure I.20a. En 2008, Tamura et al.[80, 81] ont introduit une structure multicellulaire sur la grille, obtenue par gravure de "mesas" d'une hétérostructure AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>, nommée MCC (Multi Mesa Channel) HEMT. Cette structure a démontré des performances supérieures à celles des structures planaires HEMT en Ga<sub>N</sub> traditionnelles, grâce à un contrôle plus efficace du potentiel de grille par un effet de champ qui enveloppe la forme mesa de la structure MCC. Dans des études complémentaires, Ohi et Hashizume[81] ont observé que la réduction de la largeur des nanofils résultant de la structure MMC entraînait un décalage de la tension de seuil  $V_{th}$  vers des valeurs positives.

Des simulations numériques menées par Mohamed et al.[82] ainsi que des modélisations par Ren et al.[83, 84] ont confirmé que la fonctionnalité normally-off est possible avec des structures de type FinFET AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>. La tension de seuil est influencée par plusieurs facteurs : la largeur des nanofils, la hauteur de barrière à la surface et sur les flancs des "mesas" et les caractéristiques de l'hétérostructure comme l'épaisseur et la teneur en aluminium de la barrière. Ces études mettent également en lumière l'effet de relaxation de la barrière AlGa<sub>N</sub> lorsque la largeur des nanofils est très réduite (moins de 500 nm), diminuant la densité de charges piezoélectriques et facilitant la déplétion du 2DEG.

Ces observations sont vérifiées en pratique par les travaux de Son et al. [85] qui ont rapporté un dispositif AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> FinFET normally-off (Figure I.20). Le dispositif inclut une barrière AlGa<sub>N</sub> d'une épaisseur de 15 nm avec une teneur en aluminium de 26%, une grille formée d'un diélectrique en  $Al_2O_3$  d'une épaisseur de 20 nm et un contact métallique Ni/Au. Les tensions de seuil mesurées sont de  $-6$  V,  $-3,5$  V,  $0,5$  V et  $2$  V avec des largeurs respectives du mesa  $W_{fin}$  respectives de 250 nm, 180 nm, 100 nm et 50 nm. Des observations similaires ont été faites par Matioli et al.[86] et Chien et al.[87].



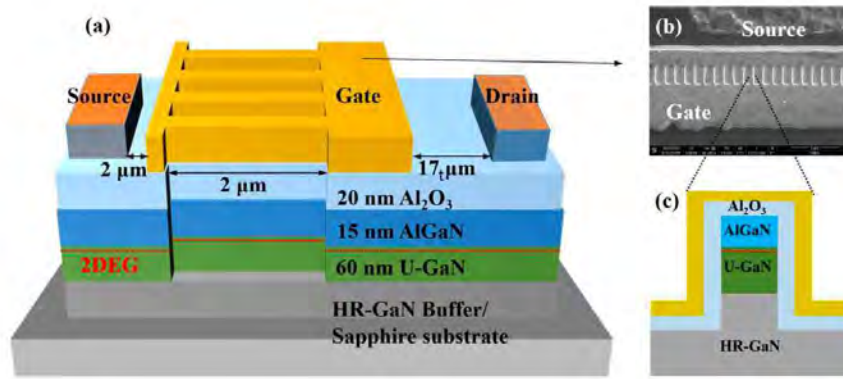


FIGURE I.20 – (a) Représentation schématique d'un HEMT FinFET, (b) observation MEB des motifs formant les structures en nanofils dans la région de grille et (c) représentation schématique en vue en coupe d'un nanofil. Son et al.[85]

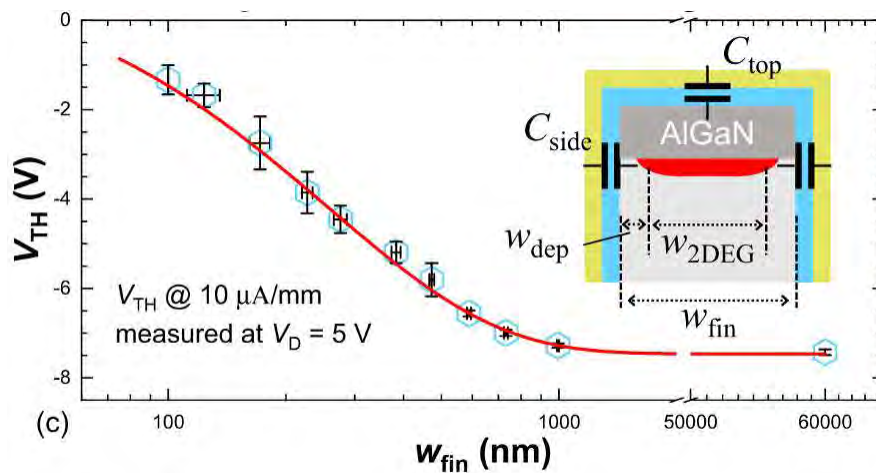


FIGURE I.21 – Évolution de la tension de seuil en fonction de la largeur  $W_{fin}$ , mesurée par observation MEB des nanofils. L'insert illustre la déplétion du 2DEG sur les bords par effet de champ enveloppant les parois de la nanostructure. Ma et al.[86]

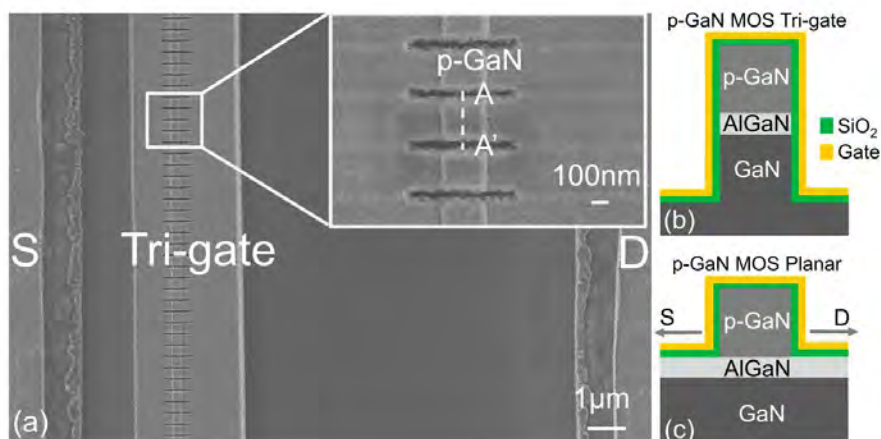


FIGURE I.22 – (a) Observation MEB et vue zoomée du MOS FinFET à grille p-GaN (b) Schéma en coupe de la région du MOS FinFET HEMT à grille p-GaN le long de la ligne AA', et (c) du MOS HEMT à grille à grille P-GaN le long de la direction source-drain. Zhu et al.[88]

Un des avantages de cette structure est la possibilité d'ajuster la tension  $V_{th}$  (Figure I.21) en maîtrisant la résolution de gravure des nanofils. Contrairement aux structures à grille enterrée ou à grille P-GaN, la précision sur la profondeur de gravure est moins critique car la gravure des "mesas" n'affecte pas la mobilité du canal 2DEG et n'induit pas de défauts significatifs. Cependant, il faut noter que l'utilisation de nanofils trop fins a pour effet d'augmenter drastiquement la résistance à l'état passant  $R_{on}$ , ce qui rend le compromis  $V_{th}$  vs  $R_{on}$  moins avantageux par rapport aux autres structures.

En couplant cette technique avec l'utilisation d'une couche P-GaN, comme le montre la Figure I.22, il est possible d'avoir une tension de seuil encore plus élevée avec des largeurs de nanofils supérieures, tout en bénéficiant des avantages de la structure mesa. Zhu et al.[88] reportent en 2021 un HEMT à topologie FinFET avec une couche P-GaN présentant un bon compromis entre la tension de seuil  $V_{th}$  de 0,9 V et la résistance  $R_{on}$  de  $9,2 \Omega \cdot \text{mm}$ , une performance comparable avec celles des autres solutions de HEMT normally-off.

### 3 Développement de HEMTs normally-off au LAAS-CNRS

Ces dernières années, différentes technologies de HEMT AlGa<sub>x</sub>N normally-off ont été développées au LAAS-CNRS au sein de la plateforme RENATECH et ont fait l'objet de différents brevets. Nous présentons ici les deux structures significatives qui ont été réalisées et qui concernent un HEMT comprenant une région P-GaN enterrée sous le canal 2DEG [89] et un HEMT associant les techniques recessed-gate et grille P-GaN [90].

#### 3.1 HEMT à barrière P-GaN enterrée

La première structure, proposée par S. Hamady [91], consiste à enterrer une région P-GaN sous la grille au sein de la couche GaN NID (Figure I.23), sous l'interface AlGa<sub>x</sub>N/GaN. Cette couche P-GaN a pour effet de relever le niveau de la bande de conduction sous la grille.

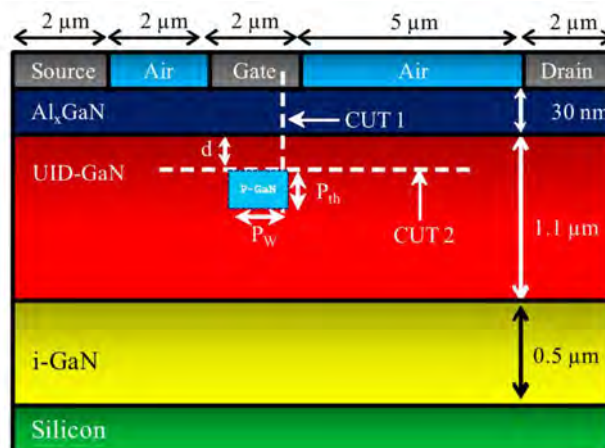


FIGURE I.23 – Vue en coupe schématique de la structure HEMT à barrière P-GaN enterrée (S. Hamady [89]).

Des simulations bidimensionnelles de type TCAD ont montré que si la concentration en atomes 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 2DEG étant ainsi déserté sous la grille. Il est alors nécessaire d'appliquer une tension  $V_{GS}$  positive pour rétablir le canal, rendant le HEMT normally-off. La zone P-GaN doit cependant avoir une largeur inférieure à la largeur de grille, une concentration supérieure à  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  et être située à 10 nm de l'interface AlGaN/GaN.

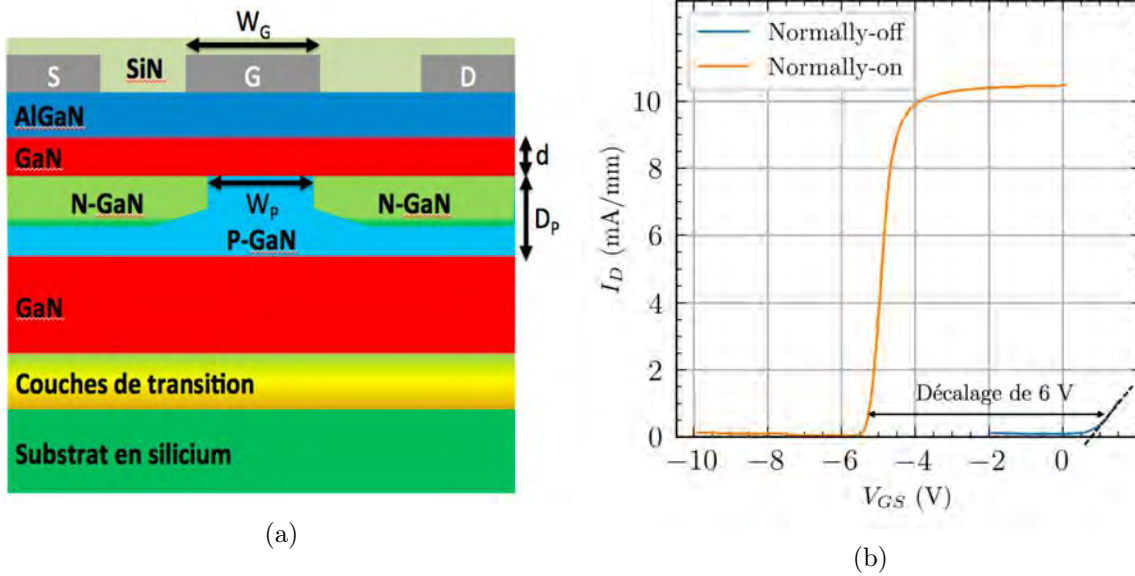


FIGURE I.24 – (a) Vue en coupe schématique de la structure HEMT à barrière P-GaN enterrée et isolée par implantation de type N dans les zones d'accès de source et de drain (S. Hamady [89]) et (b) Caractéristiques expérimentales de transfert  $I_D(V_{GS})$  à  $V_{DS} = 1 \text{ V}$  du HEMT de référence et du HEMT normally-off proposé (A. Chapelle [92])

Ce concept de barrière P-GaN enterrée a été validé expérimentalement par Chapelle et al.[92]. Un procédé de fabrication permettant d'isoler la barrière P-GaN sous la grille a été mis en place en utilisant l'implantation ionique de Si dans la couche P-GaN dans le but de restaurer le 2DEG au niveau des zones d'accès de source et de drain (Figure I.24a). Après implantation de la couche P-GaN, une couche de GaN NID servant de canal 2DEG, ainsi que la barrière AlGaN ont été réalisées par reprise d'épitaxie au CRHEA-CNRS pour finaliser l'hétérostructure AlGaN/GaN.

Le dopage de la couche P-GaN suffisamment élevé (supérieur à  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ) a permis d'obtenir un décalage significatif (plus de 6 V) de la tension de seuil  $V_{th}$  par rapport à celle du HEMT normally-on de référence : une tension de seuil positive  $V_{th} = 0,8 \text{ V}$  a ainsi été obtenue, validant le concept proposé (Figure I.24b).



### 3.2 HEMT à barrière P-GaN semi-enterrée par épitaxie localisée

La structure proposée par G. Toulon [93] est schématisée sur la Figure I.25. Elle combine les technologies de recessed-gate et celle des HEMTs à barrière P-GaN, technologies décrites dans la section II de ce chapitre, afin d'ajouter les effets de déplétion du 2DEG sur une hétérostructure P-GaN/AlGaN/AlN/GaN. La réalisation de ce HEMT a constitué les travaux de thèse de C. Haloui [90]

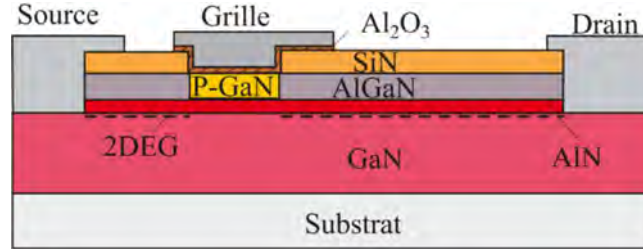


FIGURE I.25 – Vue en coupe schématique du HEMT en AlGaN/AlN/GaN à barrière P-GaN semi-enterrée (G. Toulon [93])

Après une gravure partielle de 16 nm de la barrière AlGaN d'épaisseur 25 nm avec un plasma chloré ( $Cl_2$ ) par ICP-RIE (Figure I.26a), l'épitaxie localisée du P-GaN a été effectuée par épitaxie par jets moléculaires (MBE) au CRHEA-CNRS. Des couches P-GaN avec une épaisseur de 50 nm et une concentration de Mg de  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  ont ainsi été obtenues (Figure I.26b).

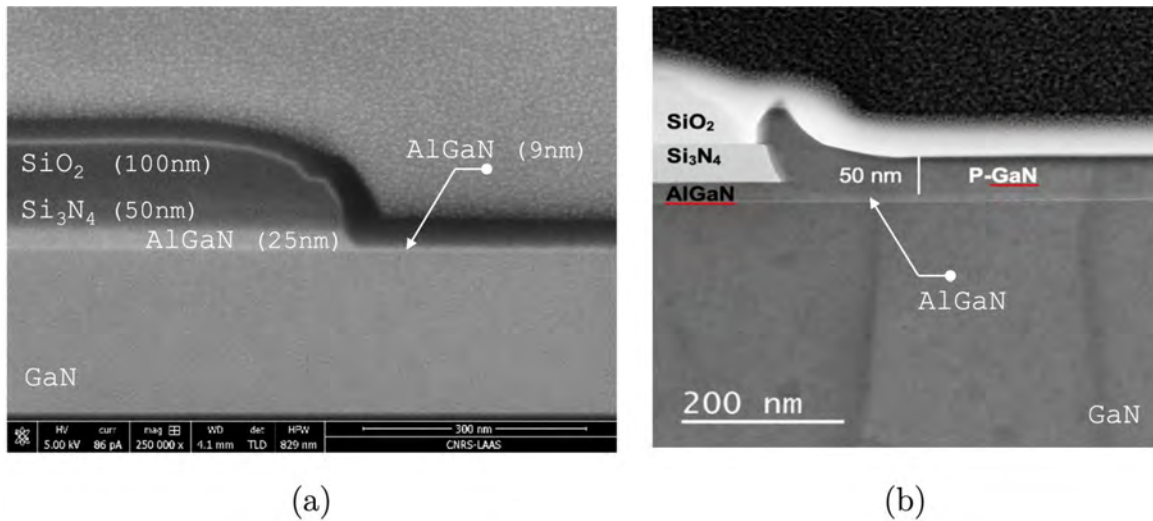


FIGURE I.26 – Observation MEB en vue de coupe FIB (a) après une gravure fluorée du  $SiO_2/Si_3N_4$  suivie d'une gravure chlorée de l'AlGaN et (b) après reprise d'épitaxie localisée du P-GaN par MBE dans la zone gravée [90]

Les HEMTs réalisés au laboratoire avec cette technologie (Figure I.27a) ont permis d'obtenir la fonctionnalité normally-off avec une tension de seuil proche de 1 V pour une tension de drain  $V_{DS}$  de 5 V, comme illustré dans la Figure I.27b, présentant la caractéristique de transfert  $I_D(V_{GS})$  d'un HEMT ayant une longueur de grille de 4  $\mu\text{m}$  et un contact de grille Schottky. Cependant, on constate que des courants de fuite importants sous le seuil sont observés, attribuables à un procédé non optimisé.

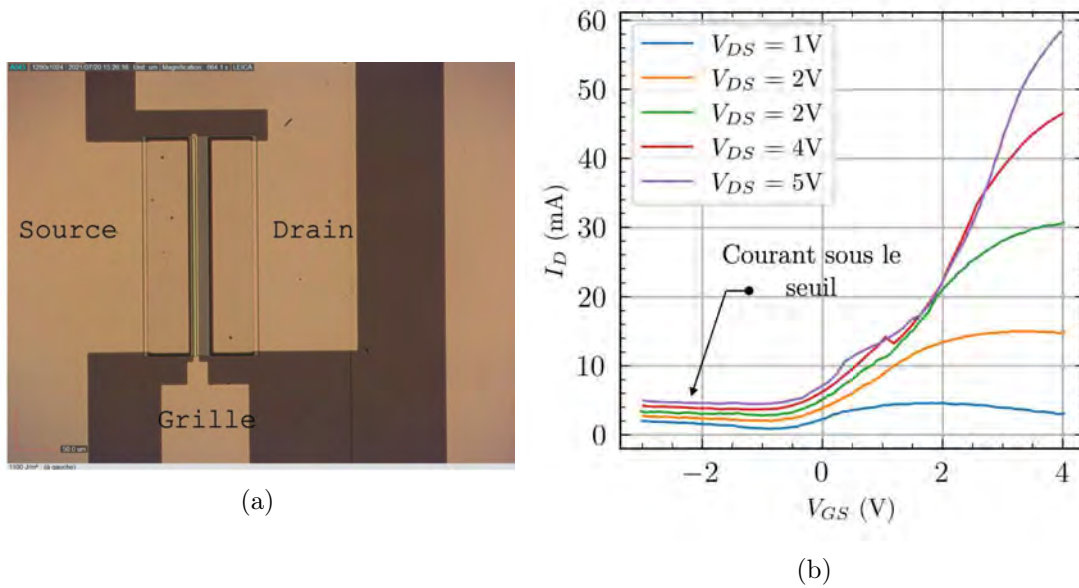


FIGURE I.27 – (a) Observation du HEMT normally-off à grille P-GaN Schottky réalisé au LAAS et (b) caractéristique de transfert  $I_D(V_{GS})$  mesurée [90]

### 3.3 Objectifs de la thèse

Nos travaux de thèse concernent la conception et la réalisation d'une structure HEMT AlGaIn/GaN normally-off dans la continuité des travaux effectués ces dernières années au LAAS-CNRS. La reprise d'épitaxie de P-GaN pour la réalisation du HEMT à barrière P-GaN semi-enterrée et les solutions de type HEMT FinFET nous ont inspiré une nouvelle structure représentée schématiquement dans la Figure I.28a : le HEMT à barrière P-GaN latérale nanostructurée.

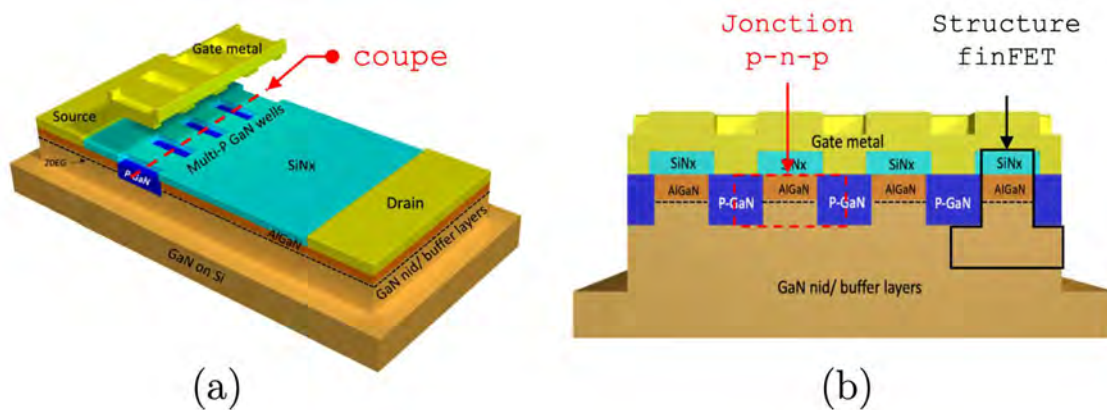


FIGURE I.28 – (a) Vue schématique de la structure HEMT normally-off à barrière P-GaN latérale nanostructurée proposée formant une structure multi-cellulaire et (b) vue en coupe traversant la grille montrant les structures HEMT FinFET épaulées par des caissons P-GaN formant des jonctions p-n-p

Dans cette configuration (Figure I.28b), les structures HEMTs FinFET de chaque cellule sont épaulées par deux caissons P-GaN traversant la barrière, permettant la déplétion du 2DEG résultant de l'équilibre des charges de la jonction p-n-p formée par la structure latérale P-GaN/2DEG/P-GaN.

L'objectif est de tirer parti de l'expérience acquise dans le développement des structures développées au LAAS-CNRS, notamment en ce qui concerne la reprise d'épitaxie localisée par épitaxie par jets moléculaires (MBE) pour la fabrication de caissons P-GaN, et le contrôle du potentiel de grille par effet de champ de la structure de type mesa, tout en éliminant les risques liés à la gravure précise nécessaire dans les technologies HEMT recessed-gate et HEMT à barrière P-GaN.

Dans ce contexte, nous cherchons à développer les technologies de dopage de caissons P-GaN par épitaxie localisée dans les procédés de type "etch-then-regrowth" [94]. Cette approche ouvre la voie à des avancées significatives dans la technologie GaN, exploitant les avantages des micro et nano-structures à jonction p-n en GaN [95] et P-GaN/2DEG latérales [96].

## 4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé l'intérêt des semi-conducteurs à large bande interdite, et mettant particulièrement en avant le nitrure de gallium (GaN), pour la conception de composants de puissance et haute fréquence. Les propriétés physiques uniques des matériaux nitrure, telles que la polarisation spontanée et piézoélectrique, permettent la formation d'un gaz bidimensionnel d'électrons (2DEG) à haute mobilité au sein des hétérostructures AlGaIn/GaN à l'origine des Transistors à Haute Mobilité Électronique (HEMTs).

Cependant, le 2DEG se forme naturellement en l'absence de polarisation externe, entraînant une caractéristique dite "normally-on" avec une tension de seuil négative dans les dispositifs HEMT. Pour assurer la sécurité des systèmes de conversion de puissance et éviter de développer des architectures de commande complexes pour les HEMTs normally-on, la mise en place de solution HEMT "normally-off" s'avère cruciale.

Nous avons vu en détail le fonctionnement du HEMT basé sur l'hétérostructure AlGaIn/GaN et identifié les axes de développement, notamment l'amincissement de la barrière AlGaIn, l'augmentation de la hauteur de barrière et la réduction de la teneur en aluminium dans la barrière AlGaIn, qui donneront lieu à des solutions de HEMT normally-off.

Nous avons passé en revue les principales approches pour obtenir des HEMT normally-off, documentées dans la littérature, à savoir les HEMTs à grille semi-enterrée ou enterrée (ou HEMT recessed-gate), les HEMTs basés sur des traitements au fluor, les HEMTs à barrière P-(Al)GaIn et des structures HEMT de type FinFET. Toutes ces technologies ont été développées parallèlement au cours des deux dernières décennies et présentent des performances comparables en termes de tension de seuil et de résistance à l'état passant. Cependant, seule la technologie de HEMT à barrière P-GaN a atteint une maturité permettant sa commercialisation.

Dans la continuité des solutions normally-off, nous avons présenté les deux structures développées au LAAS-CNRS : le HEMT à barrière P-GaN enterrée (P-GaN back barrier HEMT) et le HEMT à barrière P-GaN semi-enterrée qui ont toutes deux conduit à l'obtention de tensions de seuil proches de 1 V. À partir des résultats de la littérature et de l'expérience acquise lors des travaux de réalisation de HEMT normally-off, nous proposons un nouveau concept de HEMT

basé sur la nanostructuration de caissons P-GaN le long de la grille et fabriqués par épitaxie localisée par jets moléculaires. La conception de cette structure par simulation numérique et le développement des différentes étapes technologiques pour sa fabrication feront l'objet des chapitres suivants.



---

# Chapitre II

## Conception d'un HEMT AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> normally-off à grille P-Ga<sub>N</sub> nanostructurée

### Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons examiné la technologie des Transistors à Haute Mobilité Électronique (HEMT) en nitrure de gallium (Ga<sub>N</sub>), une technologie d'interrupteurs qui peut répondre aux exigences d'efficacité requises dans les applications de puissance associées aux systèmes de conversion d'énergie.

Nous avons passé en revue les approches et les méthodes fabrication de HEMTs normally-off (interrupteur normalement ouvert) issues de la littérature, essentielles à leur utilisation dans les systèmes de conversion. L'évaluation des performances et de la maturité technologique de chaque solution nous a inspiré une nouvelle structure multicellulaire de HEMT normally-off : le HEMT à barrière P-Ga<sub>N</sub> latérale nanostructurée.

Dans ce chapitre, nous détaillons la conception de cette nouvelle structure par simulation numérique afin de déterminer les paramètres optimaux pour sa fabrication. Ce chapitre est organisé en trois sections : la première présente les outils et modèles utilisés pour concevoir la nouvelle structure, puis nous décrivons la structure elle-même et les résultats des simulations numériques en deux et trois dimensions à l'équilibre thermodynamique, permettant d'évaluer les paramètres optimaux d'une cellule élémentaire de la structure. Enfin, une dernière partie portera sur la vérification et l'optimisation de la fonctionnalité des états passant et bloqué du dispositif.

# 1 Présentation des outils et modèles de simulation

Dans cette partie nous décrivons les différents outils et les modèles physiques de simulation que nous avons utilisés pour la conception d'un HEMT GaN.

## 1.1 Environnement de simulation TCAD Sentaurus

Sentaurus TCAD (Technology Computer Aided Design) est une suite de logiciels de simulation et d'analyse de dispositifs semi-conducteurs développée par Synopsys Inc [97]. Sentaurus TCAD utilise la méthode de calcul par éléments finis pour résoudre numériquement les équations aux dérivées partielles (EDP) qui gouvernent de nombreux comportements physiques. En utilisant la discrétisation du domaine en petites cellules, la méthode des éléments finis permet de résoudre numériquement les EDP pour simuler le comportement des dispositifs semi-conducteurs, notamment à base de matériaux à grand gap tels que le Nitrure de Gallium (GaN). Trois étapes essentielles constituent le processus de simulation : la modélisation, la discrétisation du domaine et enfin, la simulation proprement dite.

### 1.1.1 La modélisation

La modélisation numérique consiste à transcrire des phénomènes physiques réels sous la forme d'un modèle mathématique. Elle débute par le dessin de la structure en [2D] ou [3D] avec l'outil SDE (Sentaurus Structure Editor). Cet outil propose une interface graphique de dessin en temps réel ou un mode en ligne de commandes, offrant ainsi une plus grande flexibilité pour les simulations paramétriques. Au cours de cette étape, nous définissons la forme, la taille, la position et la nature des différentes régions qui constituent la structure. Cela inclut également la définition des contacts électriques et des différents dopages. Le modèle structurel est complété de modèles mathématiques qui traduisent la physique du semi-conducteur notamment les propriétés physiques des matériaux (électriques, thermiques et optiques) ainsi que les mécanismes de transport de charges.

### 1.1.2 La discrétisation

La discrétisation est le procédé qui permet de découper la structure en un nombre fini de points nécessaires à la résolution des EDP lors de la simulation. L'ensemble de ces points forme le maillage du modèle. La qualité du maillage est importante car elle conditionne la résolution et la précision de calcul des différentes grandeurs physiques.

Cependant, il est important de trouver un compromis entre la densité du maillage et le temps de calcul nécessaire. Un maillage trop dense impliquera forcément des temps de calcul élevés, ce qui sera coûteux en termes de ressources et de temps. Pour obtenir un maillage optimal, nous avons de préférence accentué le maillage dans les régions où les gradients de grandeurs sont importants, notamment les zones présentant des champs électriques et des concentrations de dopage significatifs. L'outil utilisé pour le maillage de la structure, SNMESH (Sentaurus

Mesh), permet de définir les tailles du maillage dans des blocs ou aux interfaces des différents matériaux/régions. Cela permet d'adapter la densité du maillage en fonction des caractéristiques spécifiques de la structure.

Nous notons ici un point spécifique à la simulation [3D]. Celle-ci est très gourmande en ressource de calcul et le maillage induit souvent des erreurs de convergence. En effet le maillage doit respecter certaines règles, en particulier sur les angles des tétraèdres qui forment l'unité élémentaire du maillage. Sur des structures avec des rapports de forme importants, cette condition est difficile à obtenir sans considérer un maillage extrêmement dense. Cela a été particulièrement le cas dans la structure que nous proposons et les temps de calcul ne nous ont pas permis de faire une conception entièrement à partir de simulations [3D]. Nous contournerons cette difficulté par des adaptations à partir de simulations [1D] et [2D].

### 1.1.3 La résolution numérique

La simulation est réalisée ensuite à l'aide de moteurs de résolution numérique des EDP. Dans cette étape, nous utilisons l'outil SDEVICE (Sentaurus Device) pour définir les différents comportements à analyser, c'est-à-dire l'évolution des grandeurs électriques et les états de fonctionnement à atteindre. Sentaurus propose différents "solvers" (solveurs) qui intègrent chacun des spécificités permettant de résoudre le système d'équation linéaire écrit sous la forme  $Ax=b$ .

Parmi les trois différents "solvers", nous avons SUPER, PARDISO et ILS. SUPER est le moteur par défaut de Sentaurus, robuste mais fonctionnant uniquement sur un seul cœur du processeur. PARDISO permet la parallélisation des étapes de résolution du système. Tout aussi robuste que SUPER, il offre des gains de temps significatifs grâce à la parallélisation. ILS est le plus rapide des trois, utilisant une méthode itérative et différents pré-conditionneurs pour réorganiser le système linéaire et atteindre de meilleurs résultats de convergence.

Sentaurus recommande pour la simulation de composants à matériaux grand gap le "solver" PARDISO, plus particulièrement pour de la simulation [3D]. Par expérience, ce "solver" a été celui qui nous a offert le meilleur rapport convergence/temps pour atténuer les difficultés inhérentes à la réalisation de simulations sur des structures [3D] en GaN.

### 1.1.4 Traitement des résultats

Sentaurus inclut dans sa liste un certain nombre d'outils de visualisation et de traitement des résultats obtenus. SVISUAL (Sentaurus Visual) a été particulièrement utilisé pour visualiser et extraire les résultats des simulations [2D] et [3D]. SVISUAL offre une interface et des outils qui permettent de visualiser les structures, modifier les échelles, jouer sur la transparence de certaines régions, créer des coupes et des sections qui permettent une analyse plus approfondie des résultats de simulations. En complément, les données de simulations [1D], telles que les caractéristiques électriques simulées ou les données extraites des coupes, ont plutôt été traitées avec le langage Python qui offre plus de fonctionnalités et une manipulation plus flexible des données de simulations.



## 1.2 Modélisation de HEMTs en GaN

Comme nous l'avons abordé dans le chapitre I, un Transistor à Haute Mobilité Électronique (HEMT) est décrit comme une structure comportant des empilements de plusieurs couches, chacune étant conçue pour remplir un rôle spécifique dans le fonctionnement global du HEMT. Parmi toutes ces couches, l'empilement AlGa<sub>x</sub>N/GaN occupe une place centrale car il définit la nature même du HEMT en GaN, notamment en générant le gaz bidimensionnel d'électrons (2DEG).

Cependant, la complexité de la modélisation du HEMT réside dans le fait que les couches qui le composent peuvent être très différentes d'une technologie à une autre. Dans cette partie nous explorons les bases communes de modélisation des HEMTs sur des technologies GaN sur silicium, qui représentent une approche répandue dans l'industrie. Nous examinerons les différents niveaux de complexité de modélisation de HEMTs allant de modèles simples décrivant l'hétéro-structure AlGa<sub>x</sub>N/GaN qui génère le 2DEG, jusqu'aux modèles plus complets qui prennent en compte l'ensemble de l'empilement des couches (couches de transition) et des mécanismes physiques associés.

### 1.2.1 Modélisation du 2DEG

La modélisation du 2DEG constitue le premier niveau de complexité dans la modélisation du HEMT. Le HEMT est composé de l'empilement AlGa<sub>x</sub>N/GaN et des contacts de source, de grille et de drain, comme illustré sur la figure II.1. Cette structure simplifiée permet de se concentrer uniquement sur la génération du 2DEG en considérant les phénomènes de polarisation piézoélectrique des matériaux qui le constituent.

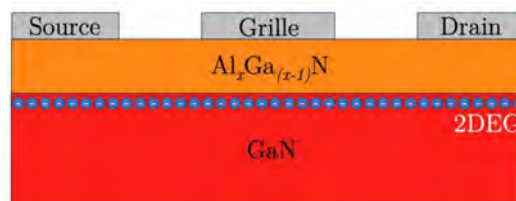


FIGURE II.1 – Structure simplifiée d'un HEMT

Le modèle de polarisation piézoélectrique est primordial pour la simulation de structures HEMT en GaN. En effet, ses performances sont étroitement liées à la formation d'un gaz bidimensionnel d'électrons (2DEG) à haute mobilité électronique à l'hétérojonction  $Al_xGa_{x-1}/GaN$ . L'utilisation du modèle de polarisation piezoélectrique permet de prendre en compte ce phénomène et de calculer les charges de polarisation à l'interface AlGa<sub>x</sub>N/GaN en tenant compte du taux d'aluminium  $x_{Al}$  présent dans la couche d'AlGa<sub>x</sub>N. Les différentes relations qui définissent le modèle sont les suivantes :

$$\sigma_{pol} = K.(P_{AlGaN} - P_{GaN}) \quad (II.1)$$

$$P = P^{sp} + P_{strain} \quad (\text{II.2})$$

$$P_{strain} = 2 * strain(e_{31} - e_{33} * \frac{c_{13}}{c_{33}}) \quad (\text{II.3})$$

où :

- $\sigma_{pol}$  sont les charges de polarisation calculées
- K est un paramètre d'activation du modèle compris entre 0 et 1
- $P^{sp}$  est la polarisation spontanée ( $C/m^2$ )
- $P_{strain}$  est la polarisation piézoélectrique calculée selon le modèle d'Ambacher et al. [23]
- $c_{ij}$  sont les modules d'élasticité [Pa]
- $e_{31}$  et  $e_{33}$  sont les coefficients piézoélectriques de tension-charge [ $C/m^2$ ]. La tension  $strain$  est calculée par l'expression :

$$strain = (1 - relax) \frac{a_0 - a}{a} \quad (\text{II.4})$$

où  $a_0$  et  $a$  représentent respectivement les paramètres de maille avec et sans contraintes [ $\text{\AA}$ ], et  $relax$  représente un paramètre de relaxation.

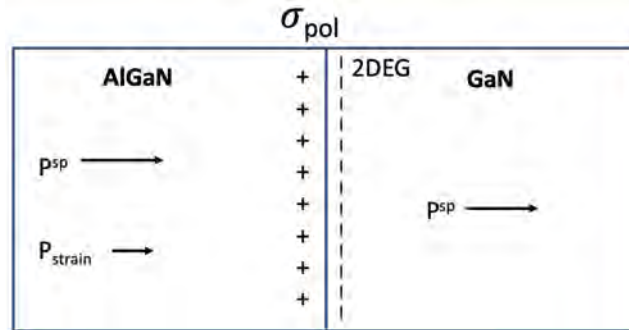


FIGURE II.2 – Représentation schématique des vecteurs des polarisations spontanées et charges piézoélectriques dans une hétéro-structure AlGaIn/GaN à face gallium

Pour évaluer les propriétés physiques de l'AlGaIn, qui est un matériau ternaire, Sentaurus utilise une interpolation linéaire ou bien, si le coefficient d'ordre 2 (paramètre nommé C) est défini, une interpolation quadratique entre les propriétés physiques Z du GaN et de l'AlN (Nitrure d'aluminium) sous la forme :

$$Z_{Al_xGa_{1-x}In} = Z_{GaN} \cdot (1 - x) + x \cdot Z_{AlN} + C \cdot x \cdot (x - 1) \quad (\text{II.5})$$

Les propriétés par défaut des matériaux nitrure sont fournis par la bibliothèque Sentaurus. Pour les simulations, nous considérons l'interface AlGaIn/GaN idéale (K=1) et le GaN relaxé. Nous illustrons sur la Figure II.2 la position des charges piézoélectriques  $\rho_{pol}$  qui induisent la formation du 2DEG dans une hétérostructure AlGaIn/GaN à face Gallium (Ga)[98].

### 1.2.2 Structure générique

Bien évidemment, les structures de type HEMT ne sont pas uniquement constituées d'un canal 2DEG et il faut aussi prendre en compte lors des simulations les interactions entre les différentes couches semi-conductrices ainsi que leurs caractéristiques propres. La Figure II.3 montre une vue de coupe d'un HEMT sur substrat silicium avec les principales couches. Nous avons choisi de nommer une telle représentation par le terme de structure générique.

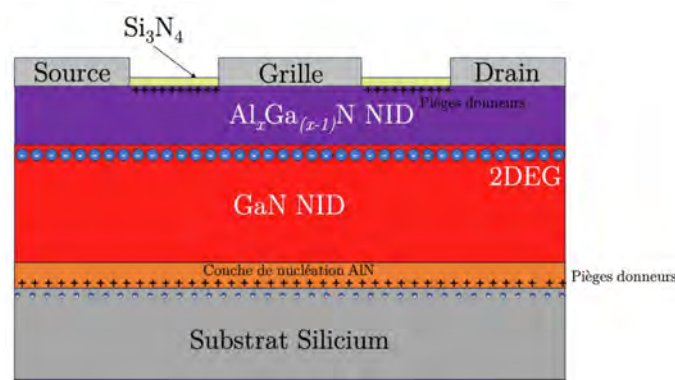


FIGURE II.3 – Modèle générique d'un HEMT pour une technologie GaN sur silicium

Cette structure générique comprend trois couches supplémentaires par rapport à la structure simplifiée. Dans les couches inférieures, nous trouvons le substrat en silicium sur lequel les couches HEMT sont épitaxiées. Généralement, le substrat est de nature très résistive (dopage inférieur à  $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ ) afin de réduire les courants de fuite dans les fonctionnements à haute tension. Entre le substrat et les couches AlGa<sub>x</sub>N/GaN, une fine couche de nucléation en nitrure d'aluminium (AlN) de l'ordre de quelques centaines de nanomètres est présente. Cette couche permet la croissance de GaN en réduisant les défauts de croissance, principalement les dislocations, sur des substrats silicium. Cela contribue à améliorer la qualité cristalline du GaN sur le substrat. Les défauts ne sont pas pris en compte dans ce modèle mais ces couches modifient le comportement électrique de la structure, notamment à l'état bloqué [99, 100].

Enfin, en surface, une couche de nitrure ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) est déposée in-situ pour prévenir l'oxydation de la couche d'AlGa<sub>x</sub>N. Cette couche maintient l'intégrité de la couche AlGa<sub>x</sub>N et préserve ses propriétés essentielles dans le dispositif.

Toutes ces couches sont justifiées technologiquement mais sont aussi également influencées par les effets de polarisation piézoélectrique. En conséquence, la répartition des charges de polarisation à chaque interface modifie le comportement électrique du dispositif. Par exemple, les charges de polarisation piézoélectrique à l'interface  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{AlGa}_x\text{N}$  entraînent deux conséquences : la formation d'un gaz bidimensionnel de trous (2DHG) se formant à cette interface et l'absence de formation du 2DEG.

Le 2DHG n'ayant jamais été observé expérimentalement, un mécanisme de piégage a été documenté [29] permettant d'expliquer à la fois la source des électrons du 2DEG et l'épinglement du niveau de Fermi [101] en fonction des états de surface. La simulation à l'équilibre thermodynamique des 2DEG et 2DHG en fonction de la concentration et de l'énergie de ces pièges est présentée sur la Figure II.4.

Les pièges considérés dans la simulation sont de type donneur avec un niveau d'énergie  $e_{Traps}$  défini par rapport au milieu du gap de la barrière d'AlGaN. L'évolution des densités des 2DEG et 2DHG par rapport à la concentration de pièges se déroule en trois phases dans lesquelles les densités des 2DEG et DGH évoluent de manière différente.

Dans la première phase, la concentration de pièges n'est pas suffisante pour affecter la densité du 2DEG. Dans la seconde phase, la densité du 2DEG augmente proportionnellement à la concentration de pièges, lesquels sont totalement ionisés, peuplant ainsi en électrons le canal 2DEG, indépendamment de leur énergie. L'augmentation de la densité du 2DEG dans la deuxième phase induit une diminution du champ électrique [102],[101] réduisant le niveau d'énergie de la bande de conduction en surface. Ce processus se poursuit jusqu'à ce que le niveau d'énergie  $e_{Traps}$  des pièges se retrouve aligné au niveau de Fermi.

Dans la dernière phase, une augmentation supplémentaire de la concentration de pièges n'entraîne plus une augmentation significative de pièges ionisés. Par conséquent, la densité du 2DEG reste relativement stable. On se retrouve dans un régime où les niveaux d'énergie sont gelés. Plus le niveau d'énergie  $e_{Traps}$  est élevé (moins profond dans le gap), et moins le champ électrique de la barrière est important, ce qui entraîne une densité du 2DEG maximale plus grande. Un parallèle peut être fait avec le 2DHG.

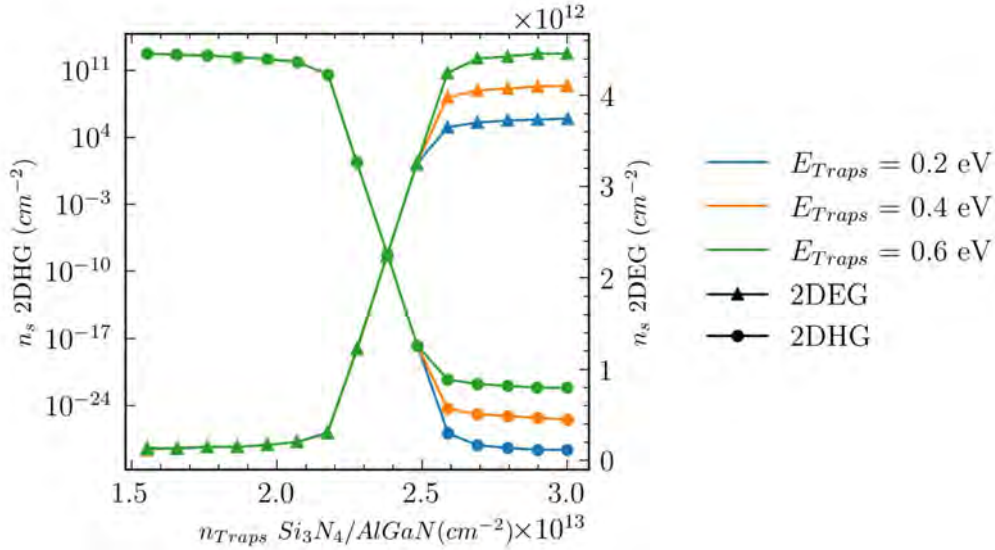


FIGURE II.4 – Simulation des concentrations du 2DEG et du 2DHG en fonction de l'énergie et de la concentration de pièges donneurs à l'interface  $Si_3N_4/AlGaN$

Évidemment, la dynamique des pièges est complexe. Leur concentration comme leur énergie ont un impact sur les caractéristiques électriques dynamiques et statiques des composants. Cependant, en première approche, une concentration à l'interface supérieure à  $3,0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  permet d'obtenir une modélisation correcte des couches HEMT.

Il est important de noter que la concentration  $n_{Traps}$  des pièges est à adapter en fonction des charges de polarisation piézoélectrique qui sont elles-mêmes dépendantes du taux d'aluminium  $x_{Al}$  dans la barrière d'AlGaN. L'exemple présenté sur la Figure II.4 est simulé pour une hété-

rostructure AlGaN/GaN avec une teneur en aluminium  $x_{Al}$  égal à 15%. Par ailleurs, l'énergie des pièges est aussi un moyen de calibration puisqu'elle agit légèrement sur la densité totale du 2DEG.

Les simulations nous ont aussi permis de mettre en évidence les différentes problématiques de convergence. En calibrant correctement la concentration de pièges ( $>3,0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ ) au-delà de la deuxième zone où le 2DEG est établi, nous avons pu réduire drastiquement le nombre d'itérations et ainsi le temps de résolution de l'état d'équilibre thermodynamique. Ce gain de temps est particulièrement significatif en [3D]. Nous noterons également dans ce modèle qu'un 2DEG se forme dans les couches inférieures entre la couche de nucléation en AlN et le substrat en Silicium. Dans le but de prévenir la formation de ce 2DEG à cette interface, des pièges sont également introduits.

### 1.2.3 Structure spécifique

Lorsque l'on cherche à faire une analyse du comportement spécifique d'un HEMT, on utilise des modèles plus complexes qui intègrent des éléments structurels supplémentaires. Un exemple est illustré sur la Figure II.5 où des plaques de champ et une couche "bulk" ont été introduites dans le modèle.

Les plaques de champ sont utilisées pour étaler le champ électrique entre la grille et le drain [103][104], ce qui améliore la tenue en tension du dispositif. En répartissant le champ électrique de manière plus homogène, cela contribue à limiter les effets de pointe de champ électrique qui sont néfastes pour la tenue en tension.

La couche "bulk", ou couche de transition, peut être de nature différente d'une technologie à une autre. Par exemple, elle peut être constituée d'un réseau AlGaN/GaN, également appelé "super lattice"[105][106], ou d'une couche de GaN dopé au carbone [107][108]. Cette couche permet de modéliser tous les mécanismes entraînant des fuites de courant dans une zone normalement isolante, modifiant les caractéristiques électriques du dispositif.

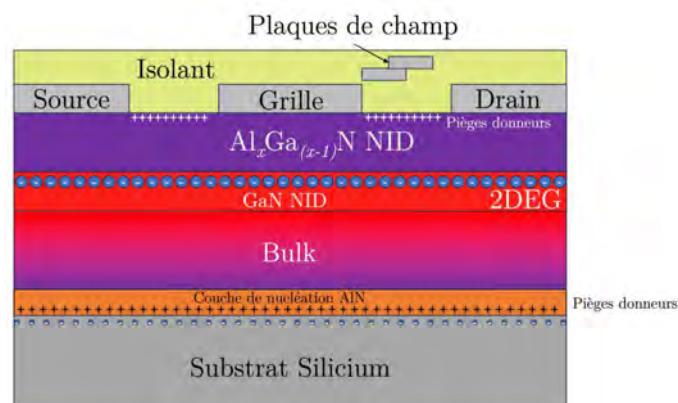


FIGURE II.5 – Structure spécifique de HEMT pour analyse approfondie

En intégrant ces éléments additionnels, on obtient une représentation plus complète du dispositif de base. Les modèles associés permettent alors de répondre à des exigences spécifiques technologiques et topologiques. Cependant, leur utilisation peut considérablement augmenter

les temps de calcul des simulations et introduire des problèmes de convergence. Par conséquent, dans le cas de l'étude conceptuelle du HEMT que nous proposons, il est préférable d'utiliser des modèles plus simples, permettant de dégager les tendances fonctionnelles et les principales caractéristiques de fonctionnement du dispositif sans entrer dans des détails structurels plus fins.

### 1.3 Modèles physiques de simulation

Pour étudier un nouveau design de transistor qui repose sur la technologie des transistors à haute mobilité électronique (HEMT) en nitrure de gallium (GaN), nous avons utilisé un modèle de simulation visant à décrire les mécanismes de base de la physique des semi-conducteurs. Nos modèles sont conçus pour être simples dans le but de saisir l'essentiel du comportement électrique de la nouvelle structure tout en ayant autant que possible une représentation réaliste des mécanismes en jeu.

#### 1.3.1 Équation de Poisson couplée au modèle de transport par dérive diffusion

Le fonctionnement d'un dispositif à semi-conducteurs peut être expliqué à l'aide de trois équations fondamentales : l'équation de Poisson qui traduit le potentiel électrostatique au sein d'un milieu à la densité de charge présente, l'équation de continuité des porteurs qui garantit la conservation de la charge à l'intérieur de ce milieu, et un modèle de transport des charges pour décrire leur déplacement.

Le potentiel électrostatique local, noté  $\phi$ , vérifie l'équation de Poisson suivante :

$$\nabla^2 \phi = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (\text{II.6})$$

où  $\rho$  est la densité volumique de charge électronique et  $\varepsilon$  la permittivité diélectrique du milieu.

La densité de charge électronique est quant à elle exprimée par :

$$\rho = q(p - n + N_D - N_A + q_{PE}) + \rho_{traps} \quad (\text{II.7})$$

où  $q$  est la charge électronique élémentaire,  $n$  et  $p$  sont les densités d'électrons et trous,  $N_D$  et  $N_A$  sont les concentrations des dopants ionisés de type donneur et accepteur,  $q_{PE}$  est la densité de charge de polarisation spontanée et piézoélectrique et  $\rho_{traps}$  est la densité de charge apportée par les pièges et les charges fixes. L'équation de Poisson est résolue à l'aide de la statistique de Fermi-Dirac.

Les équations de continuité des électrons et des trous sont exprimées par :

$$\nabla \vec{J}_n = qR_{net,n} + q \frac{\partial n}{\partial t} \quad (\text{II.8})$$

$$\nabla \vec{J}_p = qR_{net,p} + q \frac{\partial p}{\partial t} \quad (\text{II.9})$$

où  $R_{net,n}$  et  $R_{net,p}$  sont respectivement les taux de recombinaison nets des électrons et des trous,  $\vec{J}_n$  et  $\vec{J}_p$  sont les densités de courant et  $n$  et  $p$  sont les densités d'électrons et trous.

Le modèle de base utilisé sur Sentaurus pour le transport de charge est basé sur le modèle de dérive diffusion exprimé par les relations suivantes :

$$\vec{J}_n = qn\mu_n\vec{E} + qD_n\nabla_n \quad (\text{II.10})$$

$$\vec{J}_p = qp\mu_p\vec{E} + qD_p\nabla_p \quad (\text{II.11})$$

où  $\vec{J}_n$  et  $\vec{J}_p$  sont les densités de courant,  $\mu_n$  et  $\mu_p$  sont les mobilités respectives des électrons et des trous et  $D_n$  et  $D_p$  sont les coefficients de diffusion des électrons et de trous.

Ce modèle considère le transport de charge résultant de la dérive des porteurs sous l'action d'un champ électrique  $\vec{E}$  et de la diffusion des porteurs induit par le gradient de la charge électronique  $\nabla_n$  et  $\nabla_p$ . La résolution de ces trois équations est réalisée de manière couplée en chaque point du maillage.

### 1.3.2 Modèles physiques de simulation

Des modèles physiques additionnels sont imbriqués par dessus les équations de transport afin d'obtenir une représentation réaliste du dispositif. En particulier, les modèles prenant en compte les mécanismes de dégradation de la mobilité électronique :

- "DopingDependence(Masseti)" : il permet de tenir compte de la dégradation de la mobilité des porteurs résultant de la diffusion due à la présence d'impuretés, dopage et pièges.
- "HighFieldSaturation(GradQuasiFermi)" : la vitesse de dérive des porteurs suit une loi non linéaire conduisant à la saturation de cette vitesse à fort champ électrique. Ce modèle, inclus par défaut, est basé sur le modèle de Caughey Thomas, avec la vitesse de saturation des électrons dans le GaN de  $1,8 \times 10^7 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$
- La mobilité à faible champ  $\mu_{low}$  : utilisée dans le calcul de la mobilité après l'application des modèles de dégradation, elle est définie à  $1500 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  pour le GaN, tandis qu'elle est de  $2000 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  pour le 2DEG, qui est spécifique à la technologie HEMT.

ainsi que les modèles :

- "SRH" : modèle de génération-recombinaison de Shockley-Read-Hall traduisant les mécanismes de recombinaisons des pièges profonds
- "Piezoelectric\_Polarization" : il permet le calcul des charges de polarisation spontanée et piézoélectrique ajoutées dans la partie droite de l'équation de Poisson ( $q_{PE}$ )
- "Thermionic" : il améliore le modèle de transport de charge aux interfaces d'hétérojonction abrupte, permettant une définition plus précise des courants et des flux énergétiques.



Il est important de noter que Sentaurus est initialement un logiciel de simulation conçu pour le silicium. Par conséquent, tous les modèles physiques disponibles dans la bibliothèque ne sont pas nécessairement adaptés au GaN. Par exemple, le modèle par défaut de Sentaurus pour prendre en compte la dégradation de la mobilité dans le GaN, connu sous le nom "Arora", utilise des paramètres qui sont adaptés au nitrure d'indium (InN).

C'est la raison pour laquelle nous préférons dans ce cas précis utiliser un modèle empirique, inclus aussi dans Sentaurus, basé sur les travaux de Massetti et al. [109] qui ont étudié la dégradation de la mobilité dans le silicium. Ce modèle a été adapté et calibré spécifiquement pour le GaN en s'appuyant sur l'étude de Mnatsakanov et al. [110]. Il est donc essentiel de porter une attention particulière lors de la sélection des modèles de simulation.

Les paramètres physiques du matériau GaN, inclus initialement dans la bibliothèque de Sentaurus, sont principalement issus de la compilation des paramètres physiques des matériaux II-V réalisée par Vurgaftman et al. [111, 112]. En complément, ces données ont également été recueillies dans l'archive en ligne intitulée "New Semiconductor Materials : Characteristics and Properties" de l'Institut Ioffe [113].

### 1.3.3 Calibration de la structure HEMT

Dans le cadre de notre étude de conception de la structure, nous avons pris comme référence la structure HEMT modélisée par Ngom [114] dans ses travaux de thèse portant sur l'impact des radiations sur les composants semi-conducteurs. Cette structure a été élaborée en se basant sur une analyse approfondie des aspects physiques et électriques d'un composant du commerce de technologie HEMT provenant du fabricant GaNSystems [115] ainsi que sur des éléments issus de la littérature [116].

Cette calibration concerne les impuretés dans les matériaux induites par les dopages ou les pièges, les défauts structuraux induits par les stress mécaniques des couches épitaxiées et d'autres défauts physiques liés aux procédés de fabrication des composants.

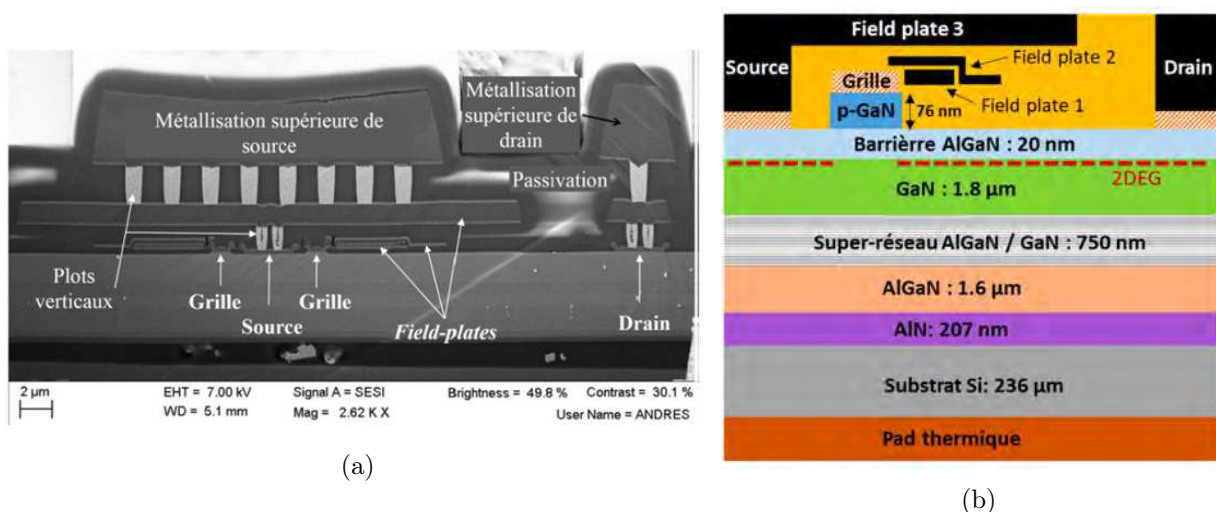


FIGURE II.6 – Vues (a) en coupe [116] et (b) schématique [114] de la structure du composant HEMT GS66508P utilisé pour la calibration des simulations



La Figure II.6 illustre la section transversale et la vue en coupe schématique de la structure HEMT de référence qui sert de base au modèle que nous utiliserons. Pour l'étude du comportement en régime à faible tension, nous considérerons la structure simplifiée. Ce modèle se concentre uniquement sur l'hétérostructure de base AlGaIn/GaN permettant la formation du 2DEG. Pour l'étude de l'état bloqué du dispositif, nous considérerons également les autres éléments de la structure de référence, à savoir le substrat en silicium, la couche de nucléation en AlN, ainsi que les couches de transition et les plaques de champ. Afin de simplifier l'étude et de minimiser les problèmes liés à un maillage d'interface trop complexe, qui pourrait engendrer des temps de calculs élevés et des difficultés de convergence en [3D], nous remplacerons les couches de transition, comprenant la couche d'AlGaIn et le super réseau AlGaIn/GaN, par une unique couche buffer d'AlGaIn. La Table II.1 présente les paramètres employés pour étudier notre structure.

Couche	Piège			Dopage	
	Type	Niveau d'énergie (eV)	Densité (cm <sup>-3</sup> )	Type	Concentration (cm <sup>-3</sup> )
Interface Al-GaN/GaN	Donneur	1.5	$1 \times 10^{13}$ - $4 \times 10^{13}$		
Barrière AlGaIn	Accepteur	0.45	$3 \times 10^{17}$	N	$5 \times 10^{16}$
GaN (canal)	Accepteur	0.5	$4 \times 10^{17}$	N	$2 \times 10^{15}$
Buffer AlGaIn	Accepteur	0.5	$3 \times 10^{16}$	N	$3 \times 10^{16}$
Substrat Si				P	$1 \times 10^{16}$

TABLE II.1 – Table de paramètres du modèle de calibration [114]

## 2 Conception de la grille P-GaN nanostructurée

Dans cette partie, nous décrivons la démarche de conception de la nouvelle structure de HEMT normally-off que nous avons choisi de développer. Dans le premier chapitre, nous avons présenté différentes solutions issues de la littérature permettant d'obtenir la fonctionnalité normally-off, telles que les HEMT à grille P-GaN, les MOS HEMT à grille encastrée et les FinFETs [117], en mettant l'accent sur les avantages et inconvénients de chacune de ces technologies. Nous proposons ici une grille innovante qui permet d'assurer la fonctionnalité normally-off dans l'optique de pouvoir utiliser cette technologie pour le développement futur de fonctions de puissance intégrées en GaN, comme nous le montrerons dans les perspectives de ce travail. Après avoir décrit le principe général de fonctionnement du HEMT à grille P-GaN

nanostructurée, nous focaliserons notre étude sur la conception et l'optimisation des paramètres de la grille à l'équilibre thermodynamique à l'aide de simulations en [2D] et [3D]. La structure complète du HEMT sera ensuite étudiée.

## 2.1 Présentation de la nouvelle structure

L'objectif de départ est d'avoir une structure qui permet de bloquer le canal 2DEG sans polarisation sur la grille. L'idée générale qui nous a porté est le principe de fonctionnement d'un Transistor à Effet de Champ à Jonction (JFET) à superjonction [118] dans lequel la largeur de la région de conduction N serait tellement étroite que les Zones de Charge d'Espace (ZCE) de déplétion des jonctions PN se rejoindraient naturellement de manière à dépléter totalement la zone de type N. Le développement des zones de charges d'espace à l'équilibre thermodynamique étant faible, la conception des grilles doit obligatoirement passer par une nano structuration.

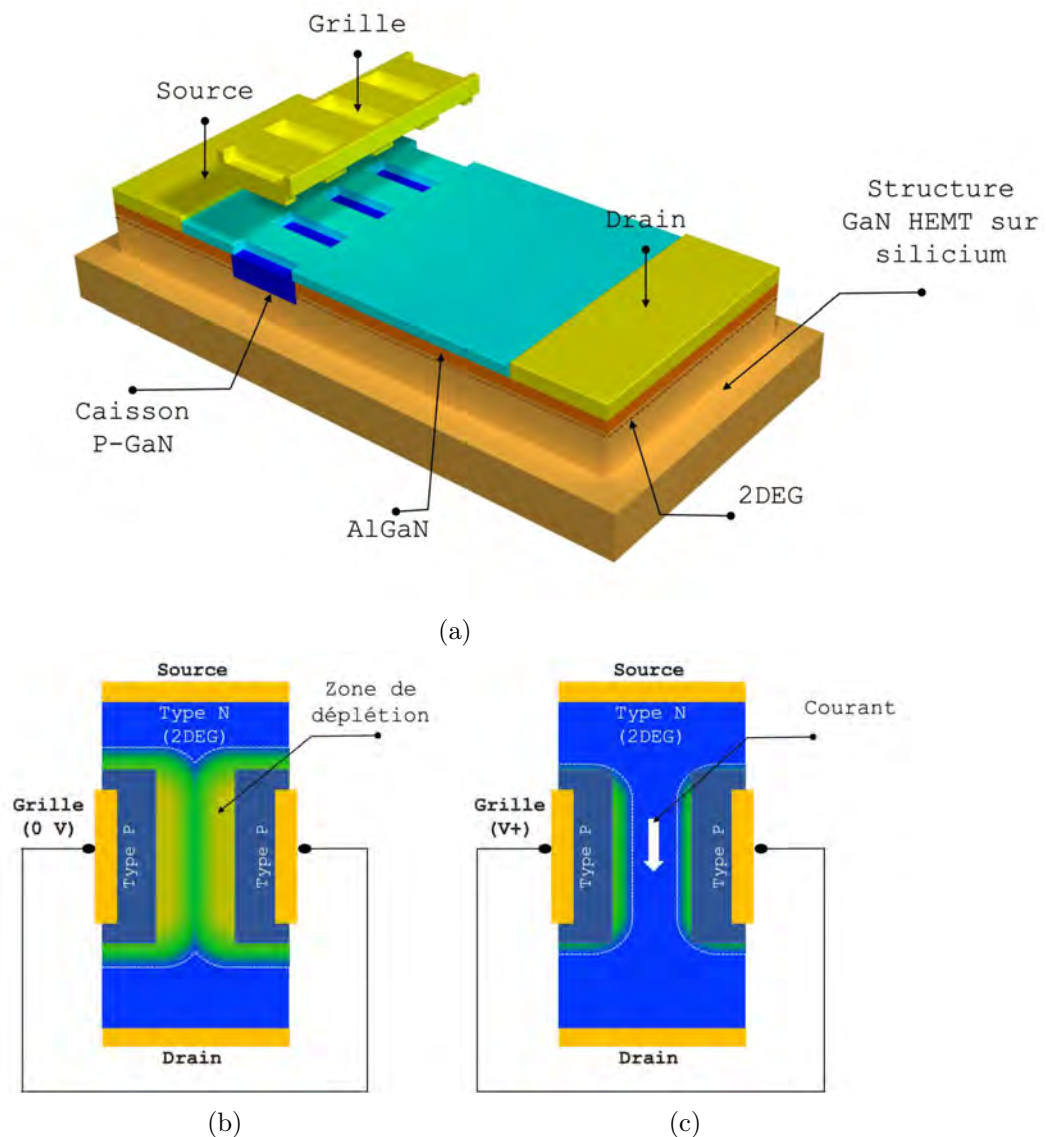


FIGURE II.7 – (a) Vue de la structure HEMT normally-off à grille P-GaN nanostructurée, (b) et (c) vues de dessus de la coupe schématique d'une cellule élémentaire du HEMT montrant la charge d'espace de déplétion dans le canal de grille

La Figure II.7a présente la structure du HEMT GaN qui est développée, à partir d'une hétérostructure AlGaIn/GaN permettant d'obtenir une couche active de conduction à haute mobilité électronique (2DEG). Outre les contacts de source et de drain, la grille est constituée d'une succession de caissons ou "puits" GaN de type P dont la profondeur doit traverser le canal 2DEG et l'espacement permettre le recouvrement naturel des zones de charge d'espace. L'optimisation de la distance entre les caissons de type P sera donc fondamentale. Nous pouvons aussi constater sur cette figure que la conception est de type multicellulaire. Le nombre de cellules élémentaires permettra d'ajuster le courant total du composant à l'état passant. Une attention particulière sera portée sur l'influence des caissons sur la tenue en tension du composant. Il faut noter que le contact sur ces caissons de type P pourra être de type ohmique, Schottky ou éventuellement de type MIS.

Les figures II.7 b et c montrent des coupes schématiques au niveau de la couche 2DEG du HEMT entre deux puits P-GaN, ce qui correspond à une cellule élémentaire du composant, où l'on retrouve le principe de fonctionnement du JFET évoqué plus haut. Lorsqu'aucune tension n'est appliquée sur la grille (Figure II.7b), le canal 2DEG est donc déplété et aucun courant ne peut circuler entre le drain et la source. Par contre, si une tension positive est appliquée sur la grille (Figure II.7c), les zones de charges d'espace de déplétion diminuent, permettant ainsi la formation du canal 2DEG assurant le passage du courant pour un potentiel drain-source  $V_{DS}$  appliqué. L'étude des différents contacts de grille sera donc importante afin de diminuer au maximum le courant de grille.

Nous allons présenter dans les sections suivantes les résultats de simulation permettant l'optimisation de la structure. Cette optimisation sera réalisée en deux étapes. La première sera effectuée à l'équilibre thermodynamique et la seconde hors équilibre thermodynamique. Cependant, cette conception de la structure passe dans un premier temps par l'étude et l'optimisation de la grille. Il faut noter qu'au regard de la topologie du composant, l'étude de conception devra passer inéluctablement par des simulations [3D]. Nous nous attendons donc à rencontrer des problèmes de convergence et des temps de calcul longs inhérents à ce type de simulations.

## 2.2 Caractéristiques et paramètres de la grille nanostructurée

La cellule élémentaire de grille que nous allons simuler est représentée schématiquement sur la Figure II.8 : elle comprend deux jonctions P-GaN/2DEG en parallèle distantes d'une longueur  $D_T$ , qui développent chacune des ZCE de déplétion qui se chevaucheront, permettant de déléter le canal 2DEG.

La neutralité électronique est principalement déterminée par la topologie du HEMT et notamment les paramètres de la grille qui sont reportés dans le Tableau II.2. Pour ce qui est de la région P, la profondeur ( $e_T$ ) et la largeur ( $L_T$ ) des caissons P-GaN ainsi que la concentration en atomes dopants ( $N_{ACP}$ ) sont les paramètres qui influent sur cet équilibre tandis que la teneur en aluminium  $x_{Al}$  est le principal facteur qui affecte la densité de charges piézoélectriques

dans la région N. L'ensemble des résultats de simulation qui seront présentés dans ce mémoire seront paramétrés en fonction du taux d'aluminium  $x_{Al}$  dans la couche d'AlGaN exprimé en pourcentage.

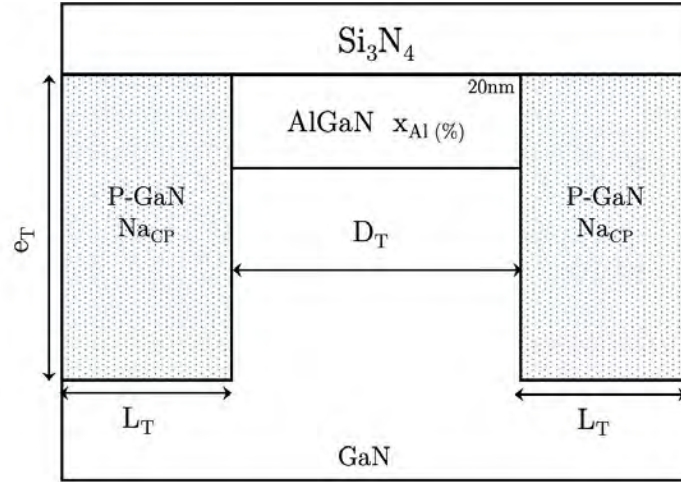


FIGURE II.8 – Vue en coupe schématique de la cellule élémentaire simulée en [2D] pour la conception et l'optimisation des paramètres des caissons P-GaN

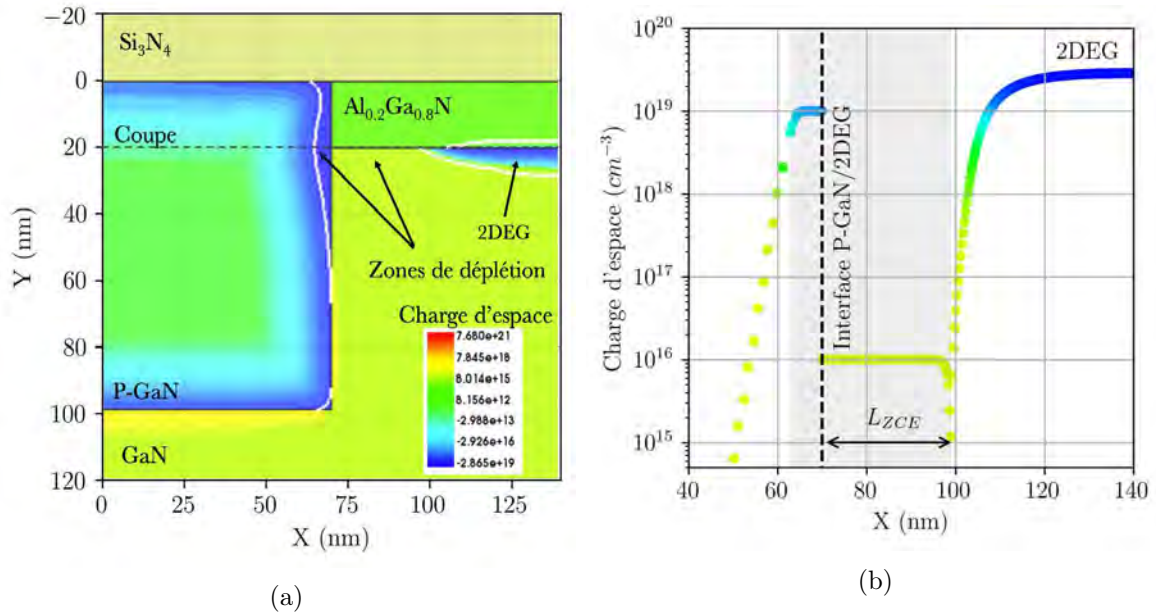


FIGURE II.9 – (a) Simulation de la charge d'espace nette totale d'une demi-cellule de grille et (b) charge d'espace totale extraite dans le plan de coupe traversant le 2DEG

La Figure II.9a présente la concentration nette de charge simulée à l'équilibre thermodynamique. Les paramètres de la grille pour cette simulation sont un caisson P-GaN de 100 nm de profondeur et 70 nm de large pour une concentration en atomes dopants de type P de  $1,0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ . L'hétérostructure est caractérisée par l'empilement de couches  $Al_{0,2}Ga_{0,8}N$  et  $GaN$  faiblement dopées respectivement à  $1,0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  et  $1,0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . La ZCE de déplétion s'étend dans la quasi-totalité de l'hétérostructure où la concentration est faible à l'exception du 2DEG ; elle se limite aux bords de la jonction dans le P-GaN et elle est plus développée autour du point triple P-GaN/AlGaN/GaN où le champ électrique est le plus élevé.

La Figure II.9b présente la charge totale dans la coupe transversale le long de l'interface AlGaIn/GaN et la zone grisée situe la ZCE de déplétion. On remarque que cette dernière est inégalement répartie de part et d'autre de la jonction P-GaN/2DEG. La répartition est liée à l'équilibre des charges fixes : les atomes dopants ionisés dans le P-GaN d'un côté, et principalement les charges piézoélectriques de l'autre côté de l'interface. La ZCE de déplétion s'étend majoritairement dans les régions les moins dopées, dans ce cas précis du côté du 2DEG avec une largeur d'environ 30 nm que l'on nommera  $L_{ZCE}$ . C'est par ailleurs à partir de ce paramètre  $L_{ZCE}$  que nous optimiserons les caractéristiques de la grille du HEMT : l'objectif sera d'obtenir la plus grande valeur de  $L_{ZCE}$ .

	Variable	Valeur
<b>Structure générale</b>		
Dopage du GaN	$N_{d_{GaIn}}$	$1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
Dopage de la barrière AlGaIn	$N_{d_{AlGaIn}}$	$1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$
Hauteur de la couche de nitrure	$e_{Si_3N_4}$	100 nm
<b>Paramètres d'étude de la cellule</b>		
Largeur du P-GaN	$L_T$	
Hauteur du P-GaN	$e_T$	
Largeur du canal	$D_T$	
Dopage du P-GaN	$N_{a_{CP}}$	
Hauteur de la barrière AlGaIn	$e_{AlGaIn}$	
Taux d'aluminium de la barrière AlGaIn	$x_{Al}$	

TABLE II.2 – Table des paramètres du modèle de simulation à l'équilibre thermodynamique

## 2.3 Optimisation des paramètres de la grille à l'équilibre thermodynamique en [2D]

Les caractéristiques de la grille P-GaN nanostructurée ayant été définies, nous allons présenter les différentes simulations à l'équilibre thermodynamique en [2D] qui ont été menées afin de déterminer l'influence de chacun des paramètres physiques et géométriques de la cellule élémentaire sur la largeur de la zone de charge d'espace de déplétion  $L_{ZCE}$ . Les différents paramètres sont reportés dans la Table II.2, les dopages des couches de l'hétérostructure AlGaIn/GaN et la hauteur de la couche nitrure étant maintenus fixes.

### 2.3.1 Étude de la largeur $L_{ZCE}$ en fonction de la profondeur $e_T$

La Figure II.10a illustre les simulations de la charge d'espace totale de la jonction P-GaN/2DEG pour un caisson P-GaN de largeur  $L_T$  70 nm, une concentration en atomes dopants  $N_{a_{CP}}$  de  $1,0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , des profondeurs  $e_T$  de 20 nm, 40 nm et 100 nm pour un taux d'aluminium  $x_{Al}$  de 20% dans la barrière AlGaIn de 20 nm d'épaisseur.

On observe qu'en augmentant la profondeur du caisson, la zone de déplétion dans le P-GaN s'affine et s'étale davantage verticalement. Pour une profondeur  $e_T$  de 40 nm, la zone de déplétion dans le caisson devient symétrique et presque plane par rapport à l'interface AlGaIn/GaN où se concentrent les charges piézoélectriques. L'apparition d'une zone électriquement neutre (zone verte) dans le caisson indique que  $L_{ZCE}$  a quasiment atteint sa valeur maximale avec l'annulation du champ électrique par diffusion des porteurs. Au-delà de 40 nm de profondeur, la zone de déplétion continue de s'affiner légèrement en profondeur.

La Figure II.10b montre la variation de la largeur de la ZCE de déplétion  $L_{ZCE}$  dans le 2DEG en fonction de la profondeur  $e_T$  du caisson pour des teneurs en aluminium de 15%, 20% et 25%. On observe une augmentation de  $L_{ZCE}$  avec l'augmentation de la profondeur  $e_T$ . À partir d'une valeur  $e_T$  de 60 nm,  $L_{ZCE}$  atteint une valeur de saturation indiquant que les ZCE de déplétion n'évoluent plus. À partir d'une valeur  $e_T$  de 100 nm, on peut considérer que la longueur  $L_{ZCE}$  a atteint une valeur maximale quel que soit le pourcentage d'aluminium.

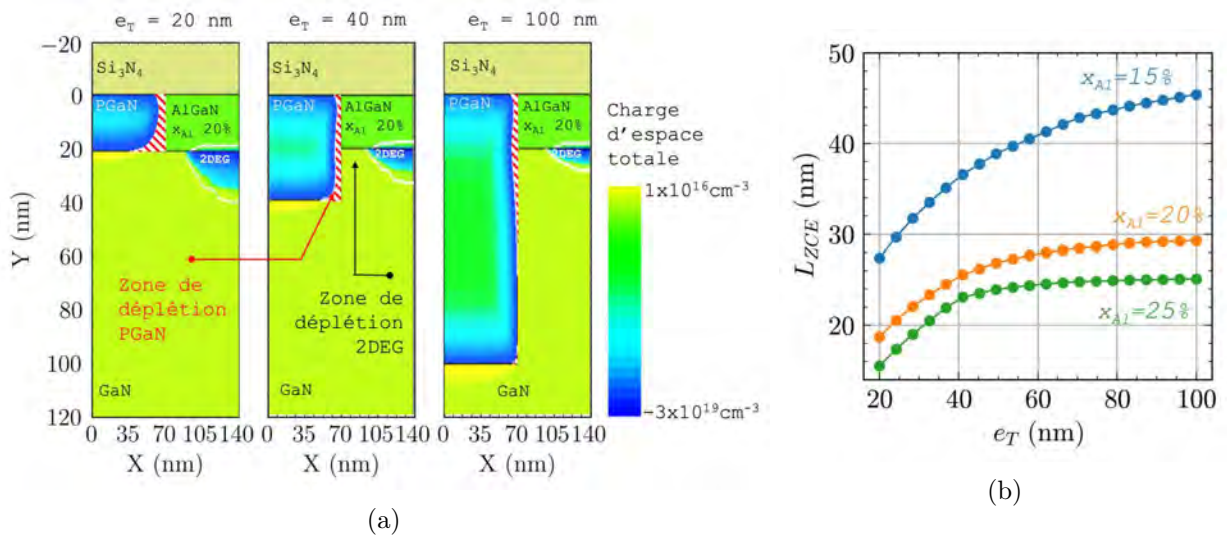


FIGURE II.10 – (a) Simulation de la charge d'espace totale dans la demi-cellule de grille avec un caisson P-GaN de 20 nm, 40 nm et 100 nm de profondeur ; (b) Évaluation de la largeur de la ZCE de déplétion dans le 2DEG en fonction de la profondeur  $e_T$  avec un taux d'aluminium dans la barrière AlGaIn  $x_{Al}$  de 15%, 20% et 25%

### 2.3.2 Étude de la largeur $L_{ZCE}$ en fonction du dopage $N_{aCP}$ et du taux d'aluminium $x_{Al}$

Le rapport entre la concentration  $N_{aCP}$  du caisson P-GaN et la teneur en aluminium  $x_{Al}$  dans la couche d'AlGaIn est le paramètre qui a le plus d'impact sur la balance des zones de charges d'espace de déplétion comme le montrent les deux cas extrêmes simulés et reportés sur la Figure II.11. Pour une teneur en aluminium élevée de 25%, avec une concentration  $N_{aCP}$  de  $1,0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , la majorité de la largeur ZCE de déplétion se retrouve dans le caisson P-GaN (zone hachurée en rouge). Pour une teneur en aluminium faible de 15%, avec  $N_{aCP}$  de  $1,0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , l'équilibre est inversé et la zone de charge d'espace de déplétion s'étend majoritairement dans le 2DEG (zone hachurée en bleue).



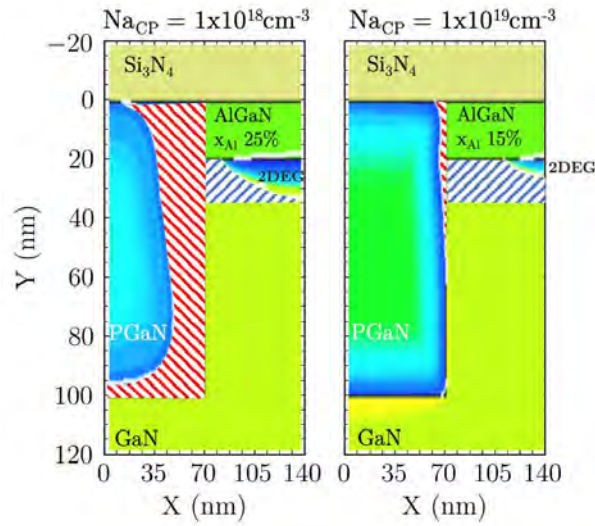


FIGURE II.11 – Simulation de la charge d'espace totale de la demi-cellule de grille avec à gauche  $N_{aCP} = 1,0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  et  $x_{Al} = 25\%$  et à droite un dopage  $N_{aCP} = 1,0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  et  $x_{Al} = 15\%$  pour  $e_T = 100 \text{ nm}$

Nous avons tracé sur la Figure II.12a la variation de  $L_{ZCE}$  en fonction des paramètres  $x_{Al}$  et  $N_{aCP}$ . Nous pouvons ainsi quantifier  $L_{ZCE}$  sur une gamme de valeurs de taux d'aluminium  $x_{Al}$  (de 15% à 25%) et de dopage du caisson P-GaN (de  $1,0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  à  $1,0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ). Il en résulte que  $L_{ZCE}$  varie de 13 nm à 45 nm.

Enfin, nous avons reporté sur la Figure II.12b les résultats de simulation de la variation de  $L_{ZCE}$  en fonction de  $N_{aCP}$  pour des valeurs de  $x_{Al}$  de 15%, 20% et 25% (points sur les courbes). Nous avons comparé les valeurs obtenues avec la courbe d'ajustement en pointillés issue de la relation II.12 à l'équilibre thermodynamique entre la longueur de la ZCE de déplétion du côté N ( $W_n$ ) et la concentration  $N_a$  de la région de type P d'une homojonction PN plane abrupte infinie [119, 120] en GaN :

$$W_n = \sqrt{\frac{2\epsilon}{q} \frac{N_a}{N_{dFIT}(N_{dFIT} + N_a)}} V_{bi} \quad (\text{II.12})$$

où  $\epsilon$  représente la permittivité du GaN,  $q$  la charge élémentaire d'un électron,  $V_{bi}$  le potentiel interne de diffusion de la jonction et  $N_{dFIT}$  le paramètre d'ajustement du modèle qui traduit le dopage  $N_d$  équivalent de la région 2DEG dans une jonction PN plane en GaN.

Le potentiel  $V_{bi}$  est aussi ajusté en suivant la relation ci-dessous :

$$V_{bi} = \frac{k_T T}{q} \ln\left(\frac{N_a N_{dFIT}}{n_i^2}\right) \quad (\text{II.13})$$

où  $k_T$  est la constante de Boltzman,  $T$  la température en Kelvin et  $n_i$  la concentration intrinsèque des porteurs ( $n_i$  est égale à  $1,6 \times 10^{-10} \text{ cm}^{-3}$  dans le GaN pour  $T$  égale à 300 K).

Les valeurs d'ajustement de  $N_{dFIT}$  pour des taux d'aluminium  $x_{Al}$  de 15%, 20% et 25% sont respectivement  $1,43 \text{ cm}^{-3}$ ,  $2,88 \text{ cm}^{-3}$  et  $3,80 \text{ cm}^{-3}$ . Il ressort de cette analyse de manière attendue que plus le dopage  $N_{aCP}$  des caissons P-GaN est élevé, plus la largeur  $L_{ZCE}$  est importante. Par conséquent, l'inverse est vrai pour  $x_{Al}$ . De plus, la tendance montre qu'une concentration

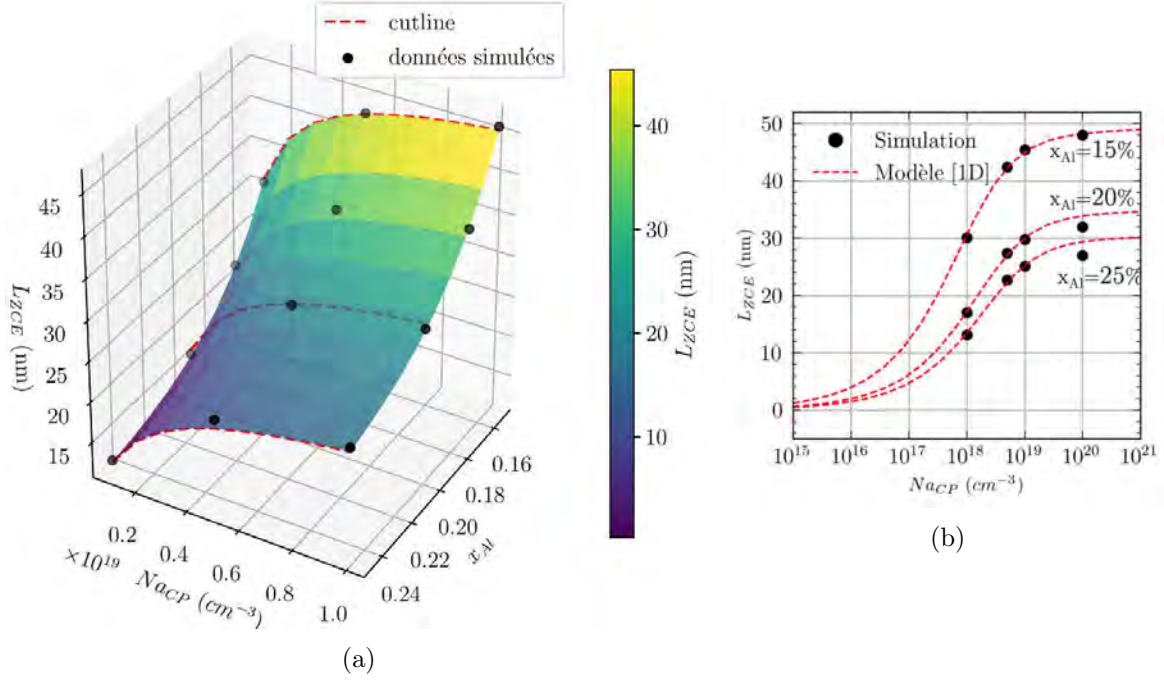


FIGURE II.12 – (a) Évaluation de la largeur  $L_{ZCE}$  en fonction de  $N_{aCP}$  et  $x_{Al}$ ; (b) Comparaison de  $L_{ZCE}$  simulée avec la largeur de la zone de déplétion  $W_n$  théorique d’une jonction PN plane en GaN [1D]

$N_{aCP}$  au-delà de  $5,0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  ne conduit pas à une augmentation supplémentaire de  $L_{ZCE}$ . Ainsi, la valeur maximale de  $L_{ZCE}$  possible est de 47 nm avec un taux d’aluminium  $x_{Al}$  de 15% et une concentration en atomes dopants  $N_{aCP}$  dans le GaN de  $5,0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ .

### 2.3.3 Étude de la largeur $L_{ZCE}$ en fonction de la largeur $L_T$ des caissons P-GaN

Nous avons considéré jusqu’à maintenant une largeur  $L_T$  des caissons P-GaN très grande afin de modéliser le cas idéal d’une jonction PN infinie. Nous avons constaté qu’au-delà d’une certaine valeur, la réduction de  $L_T$  ne modifie plus la largeur de la ZCE de déplétion.

Cependant, la proportion relative entre l’espacement  $D_T$  entre deux caissons et la largeur  $L_T$  d’un caisson joue un rôle crucial dans la détermination du courant (voir Figure II.13a). La région de transport de courant entre la source et le drain, avec une largeur  $W$ , est amincie entre les caissons et si l’on considère une densité de courant homogène dans la région de transport, alors le courant sera affecté. La valeur du courant entre source et drain  $I_{DS}$  relative au rapport des largeurs  $L_T/D_T$  est décrite par la relation du premier ordre suivante :

$$I_{norm} = \frac{D_T}{2L_T} \quad (\text{II.14})$$

Si  $D_T$  est grand par rapport à  $L_T$ , alors le courant sera élevé. À l’inverse, si  $L_T$  est grand par rapport à  $D_T$ , le courant sera plus faible, comme le montre la Figure II.13b. La conception de la structure doit donc prendre en compte ce rapport de forme afin d’obtenir un niveau de courant le plus grand possible quand nous étudierons l’état passant.



Notre objectif sera donc de minimiser  $L_T$  sans affecter la valeur de  $L_{ZCE}$  permettant d'obtenir un espacement  $D_T$  entre caissons le plus grand possible. Nous avons reporté sur la Figure II.14 les simulations effectuées afin d'extraire cette valeur de  $L_T$  minimale que nous nommerons  $L_{Tmin}$ . La Figure II.14a présente l'évolution de l'extension de la charge d'espace totale simulée pour trois largeurs de caisson  $L_T$  à savoir 10 nm, 18 nm et 30 nm et pour des paramètres de la cellule élémentaire  $N_{aCP}$  de  $5,0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ,  $x_{Al}$  de 20% et  $e_T$  de 100 nm.

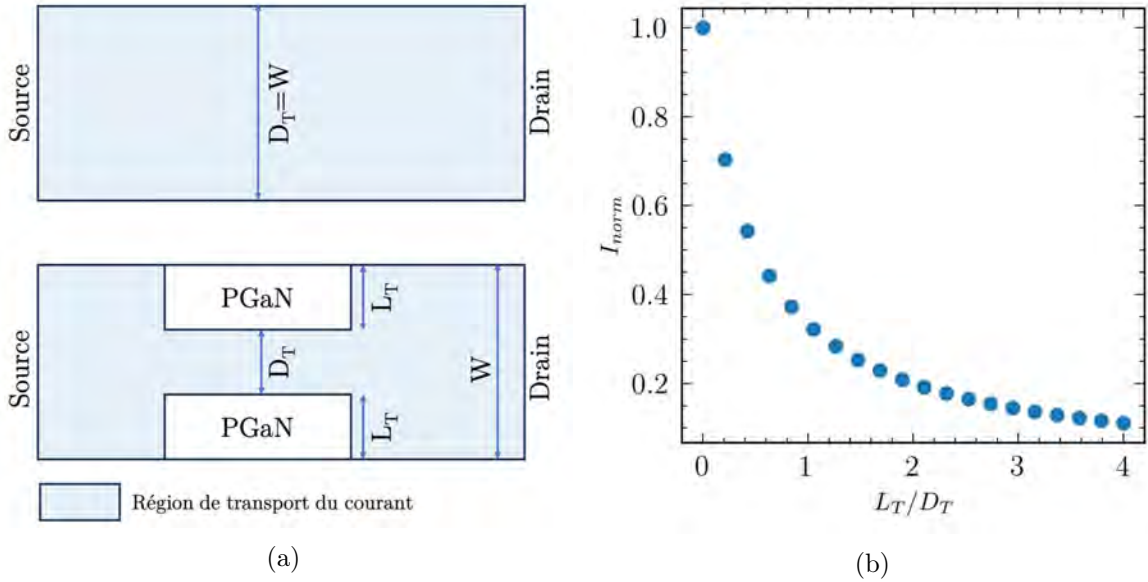


FIGURE II.13 – (a) Vue schématique de dessus d'une cellule élémentaire d'un HEMT sans et avec caissons P-GaN et (b) Évolution du courant normalisé d'une cellule en fonction du rapport  $\frac{L_T}{D_T}$  de la largeur des caissons P-GaN  $L_T$  sur la distance intercellulaire  $D_T$

L'augmentation de  $L_T$  permet d'uniformiser la distribution spatiale des charges fixes dans les deux directions X et Y. Lorsque  $L_T$  est suffisamment grand, au-delà de 18 nm, la distribution retrouve la forme que l'on a observée sur la Figure II.10a pour  $e_T = 100$  nm, la charge d'espace n'évolue presque plus en X et la neutralité électronique est atteinte sur la frontière gauche du caisson P-GaN. La charge d'espace continue d'évoluer lentement en Y jusqu'à ce que la ZCE de déplétion atteigne une extension maximale. L'évolution de  $L_{ZCE}$  en fonction de  $L_T$  est présentée sur la Figure II.14b.

Nous avons mis en place une méthode de type comportemental pour déterminer la valeur de  $L_{Tmin}$ . Les données de simulation dans la zone d'intérêt grisée montrent que la croissance de  $L_{ZCE}$  suit une relation exponentielle. Nous avons choisi cette zone d'intérêt car la courbe présente des caractéristiques idéales qui nous a permis de mettre en place un modèle mathématique d'extraction de paramètres afin d'automatiser le traitement des résultats de simulation. Nous avons pu extraire les valeurs  $L_{Tmin}$  en ajustement des paramètres  $L_{Tseuil}$  et  $\tau_{LT}$  du modèle suivant :

$$L_{ZCE} = L_{ZCE_{max}} \left( 1 - \exp \left( - \frac{L_T - L_{Tseuil}}{\tau_{LT}} \right) \right) \quad (\text{II.15})$$

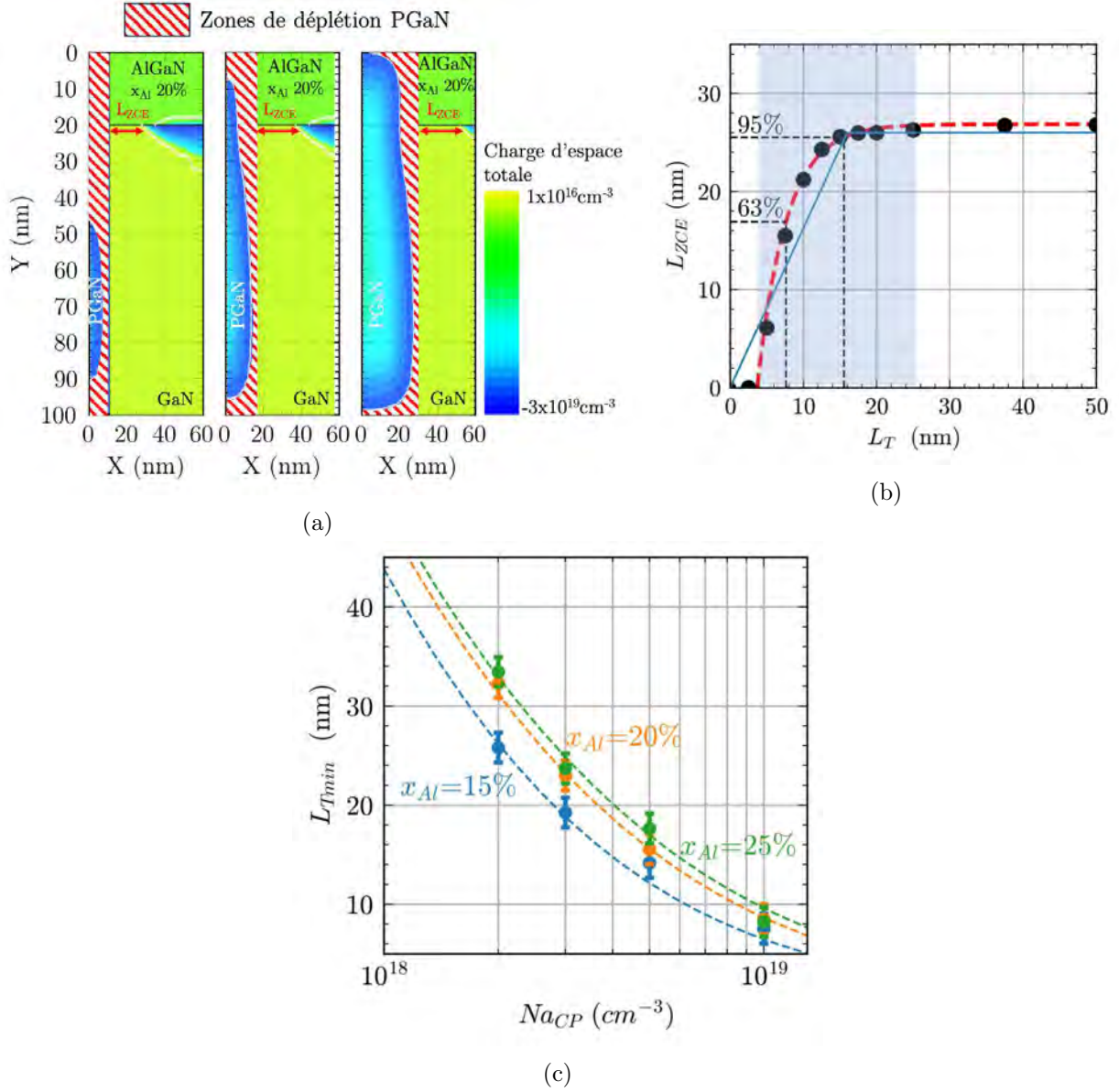


FIGURE II.14 – (a) Simulation de la charge d'espace totale de la demi-cellule de grille pour des largeurs de caisson de 10 nm, 18 nm et 30 nm avec une concentration  $N_{ACP}$  de  $5,0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ; (b) Comparaison entre l'évolution de la largeur  $L_{ZCE}$  de la jonction P-GaN/2DEG simulée et l'évolution théorique de la largeur de déplétion  $W_n$  d'une jonction PN plane en GaN [1D] (courbe bleue) en fonction de la largeur  $L_T$  de la région P pour une concentration  $N_{ACP}$  de  $5,0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ; (c) Comparaison des valeurs minimales requises de  $L_T$  extraites des simulations avec les valeurs théoriques en fonction du dopage  $N_{ACP}$  pour des taux d'aluminium  $x_{Al}$  de 15%, 20% et 25%.

Dans cette équation comportementale,  $L_{ZCE_{max}}$  correspond à la valeur maximale de  $L_{ZCE}$ ,  $L_{T_{seuil}}$  correspond au début de la zone d'intérêt et  $\tau_{LT}$  est une constante qui traduit une valeur de  $L_{ZCE}$  de 63% de la valeur maximale  $L_{ZCE_{max}}$ . Nous avons défini arbitrairement  $L_{T_{min}}$  comme la largeur pour laquelle  $L_{ZCE}$  atteint 95% de sa valeur maximale, c'est-à-dire à  $L_T = L_{T_{seuil}} + 3\tau_{LT}$ . On remarque aussi que cette valeur est très proche de la zone de charge d'espace de déplétion  $W_n$  d'une jonction PN abrupte plane en GaN où  $W_p$ , la largeur de la zone de charge d'espace de déplétion de type P, est définie de telle sorte que :

$$W_p N_{ACP} = W_n N_{d_{FIT}} \quad (\text{II.16})$$

Finalement, la Figure II.14c montre la variation des valeurs de  $L_{Tmin}$  extraites sur l'ensemble du domaine étudié ( $x_{Al}$  = 15%, 20% et 25% et  $N_{ACP}$  de  $1,0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  à  $1,0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ). Elles correspondent à celles prédites théoriquement par le modèle [1D] de la jonction PN plane en GaN avec une correspondance à plus ou moins 2 nm.

### 2.3.4 Étude de l'influence de l'espacement $D_T$ entre caissons P-GaN

Dans notre modèle de cellule, chaque jonction PN développe une ZCE de déplétion dont la largeur  $L_{ZCE}$  maximale est déterminée par le dopage P des caissons GaN et le taux d'aluminium  $x_{Al}$  de la couche d'AlGaN. Les simulations précédentes ont montré, que pour un dopage de  $5,0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  et un taux d'aluminium de 20%, la largeur maximale de la ZCE de déplétion est de 26 nm. L'espacement  $D_T$  entre deux caissons GaN doit être correctement dimensionné afin de permettre le recouvrement des deux zones de charge d'espace de déplétion créées de part et d'autre. Ainsi dans l'exemple donné plus haut,  $D_T$  devrait être de 52 nm maximum théoriquement.

À titre d'exemple, nous avons simulé deux cas distincts comme reporté sur la Figure II.15. Dans le premier cas (Figure II.15a), les ZCE de déplétion se recouvrent avec un espacement  $D_T$  défini à 52 nm, soit deux fois  $L_{ZCE}$ , ce qui entraîne une suppression complète du 2DEG. En revanche, dans le deuxième cas (Figure II.15b), l'espacement est fixé à 104 nm ( $4 \times L_{ZCE}$ ), donc bien supérieur à la somme des  $L_{ZCE}$  des deux jonctions ce qui, par conséquent, ne permet pas de dépléter entièrement le 2DEG.

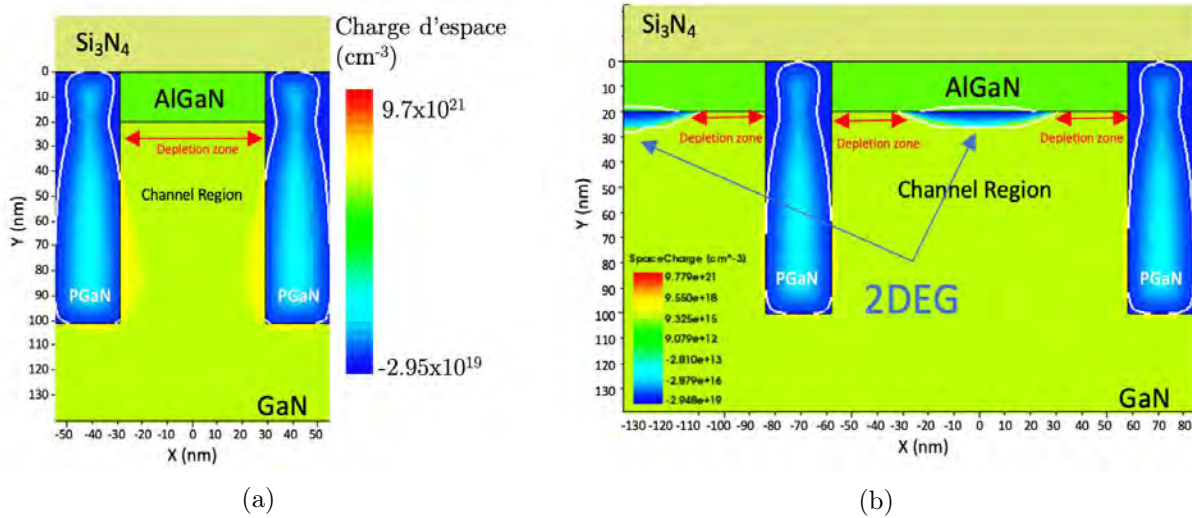


FIGURE II.15 – Simulation de la charge d'espace totale d'une cellule pour un espacement  $D_T$  de (a) 52 nm et (b) 104 nm

Le niveau d'énergie de la bande de conduction (EBC) joue un rôle crucial dans la détermination de la présence du 2DEG : quand il est inférieur au niveau de Fermi, le 2DEG se forme. La Figure II.16 montre les profils du diagramme de bandes simulés à l'interface AlGaN/GaN pour différents espacements entre caissons : nous pouvons observer que le niveau de la bande de conduction forme une cuvette entre les deux caissons P-GaN avec un minimum localisé au centre.

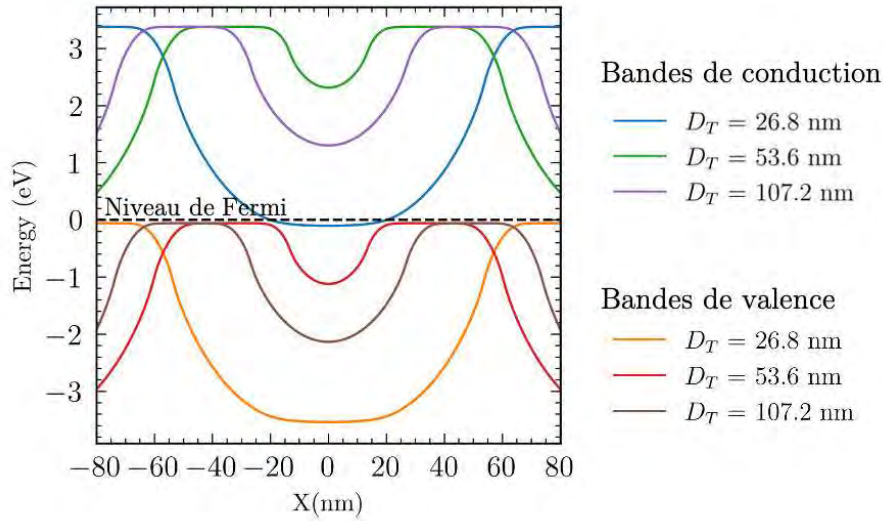


FIGURE II.16 – Diagramme de bandes simulé à l'interface AlGaIn/GaN de la cellule en fonction de l'espacement  $D_T$  entre caissons P-GaN

Nous avons tracé sur la Figure II.17a les variations de ce minimum en fonction de l'espacement  $D_T$  pour différentes valeurs du dopage P-GaN. Pour un dopage  $N_{aCP}$  de  $5,0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , le niveau EBC est au-dessus du niveau de Fermi, même pour des espacements légèrement supérieurs à deux fois la largeur de la ZCE de déplétion. Par exemple, un espacement de 75 nm (au lieu de 52 nm) permet d'obtenir un minimum de EBC supérieur à celui du niveau de Fermi.

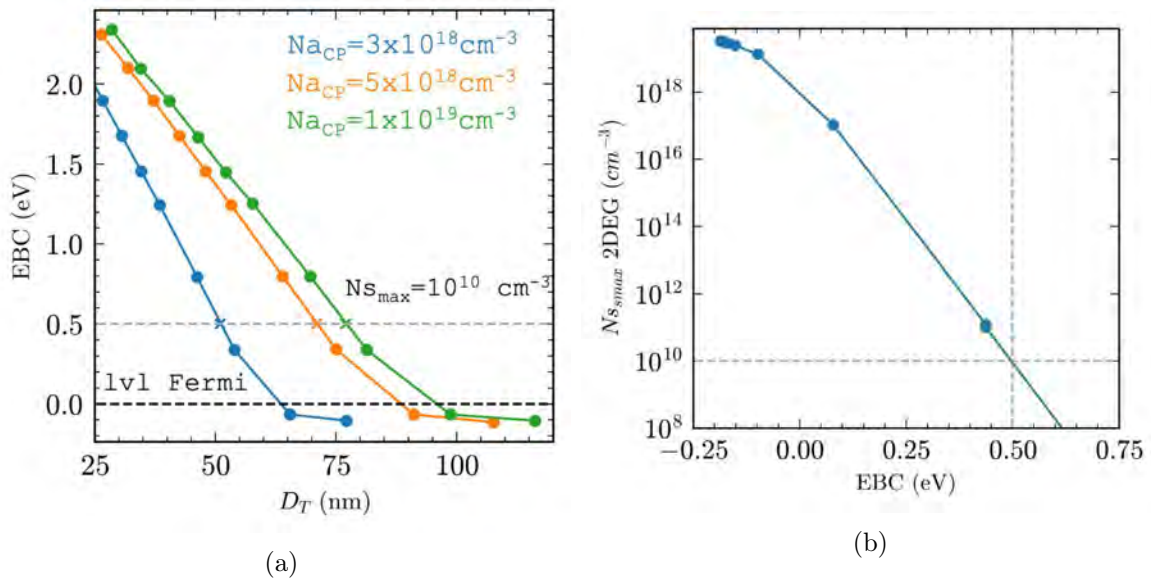


FIGURE II.17 – (a) Niveau minimum d'énergie de la bande de conduction (EBC) en fonction de l'espacement  $D_T$ ; (b) Concentration du 2DEG à l'interface AlGaIn/GaN en fonction du niveau EBC

Afin d'identifier la présence ou l'absence du 2DEG, nous avons extrait des simulations la concentration électronique dans le 2DEG en fonction du niveau d'énergie de la bande de conduction. Par exemple, pour EBC égal à 0,5 eV, la concentration électronique est d'environ



$1,0 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$  (Figure II.17b). Il n'y a pas de valeurs spécifiques requises du niveau d'énergie de la bande de conduction pour obtenir un HEMT normally-off. Cependant, plus la valeur est élevée, plus la tension de seuil sera grande.

## 2.4 Simulation de la grille à l'équilibre thermodynamique en [3D]

Les résultats de simulations [2D] présentés précédemment ont montré que chaque paramètre de la cellule élémentaire a un impact sur la longueur ZCE de déplétion imposée par la neutralité électrique. Dans le cas de simulations en [3D], la longueur  $l_T$  des caissons devient également un facteur important qui détermine l'extension des ZCE. La vue du modèle [3D] de simulation d'une cellule de grille est reportée sur la Figure II.18.

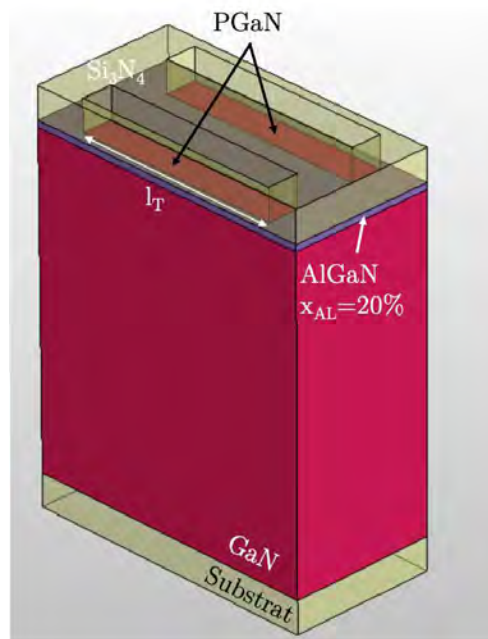


FIGURE II.18 – Vue du modèle de simulation de la cellule de grille entière en [3D]

Les simulations de la Figure II.19 présentent l'évolution de la charge d'espace nette totale à l'interface AlGaN/GaN dans un cas arbitraire d'une cellule non optimisée en fonction de la longueur des caissons P-GaN. Dans le premier cas (Figure II.19.a), nous avons paramétré la longueur des caissons P-GaN  $l_T$  égale à  $L_T$ , c'est à dire un carré avec des côtés d'une longueur de 25 nm, ce qui entraîne une ZCE de déplétion faible. Lorsque nous augmentons  $l_T$  à 50 nm et 100 nm, les ZCE de déplétion se développent autour des caissons jusqu'à ce qu'elles se chevauchent pour une longueur de 100 nm. Les caissons P-GaN forment des jonctions sphériques avec le 2DEG, ce qui entraîne la courbure des lignes de champ électrique, notamment dans les coins, limitant ainsi l'extension des ZCE de déplétion. En augmentant la longueur des caissons, on augmente la quantité de charges de type accepteur, ce qui permet une extension plus importante des ZCE de déplétion. Au-delà d'une certaine longueur, la ZCE de déplétion devient plane car son extension est maximale. Nous observons donc naturellement le recouvrement des deux ZCE de déplétion car la distance entre les caissons a été fixée à une valeur inférieure à la

somme des deux longueurs  $L_{ZCE}$  induites par les jonctions P-GaN/2DEG. Nous n'avons pas établi de valeur minimale spécifique pour ce paramètre pour chaque condition car une valeur supérieure à 100 nm est suffisante pour l'ensemble de la plage de valeurs étudiées.

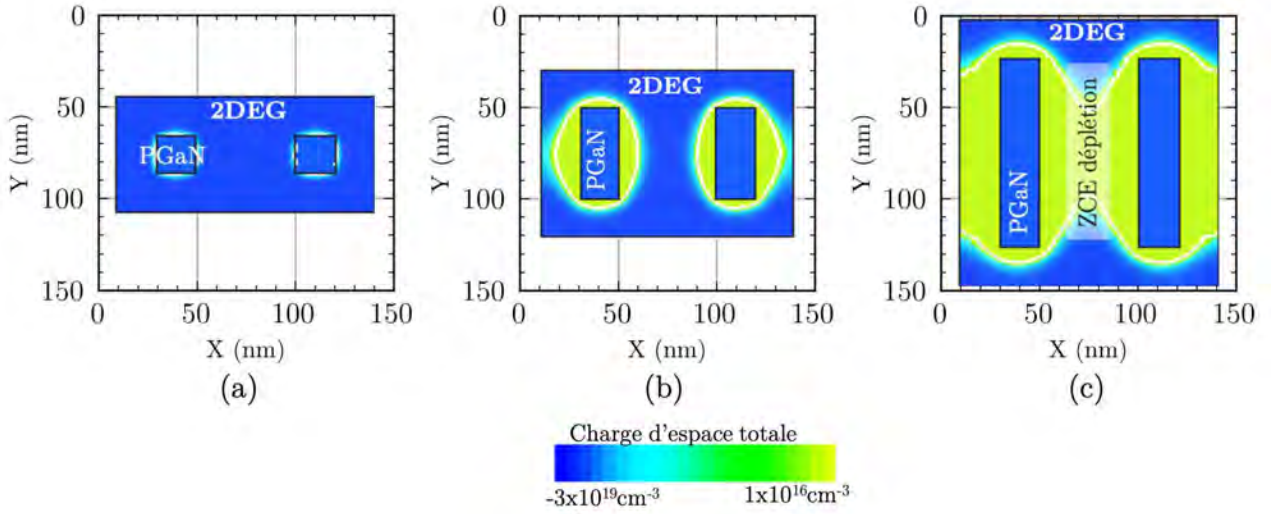


FIGURE II.19 – Vue dans le plan de coupe du 2DEG des résultats de simulation de la charge d'espace nette totale d'une cellule pour des caissons de longueur  $l_T$  de (a) 25 nm, (b) 50 nm et (c) 100 nm

## 2.5 Conclusion intermédiaire

Nous avons présenté la conception à l'équilibre thermodynamique en [2D] et [3D] d'une grille de HEMT AlGaIn/GaN constituée de multi-caissons P-GaN espacés par des zones actives, conduisant à la création de jonctions PN en parallèle. Nous avons optimisé les dimensions (largeur et profondeur) des régions de type P en tenant compte de différents paramètres technologiques tels que le taux d'aluminium  $x_{Al}$  dans la couche d'AlGaIn et la concentration de dopants  $N_{ACP}$  des caissons GaN.

Nous avons constaté que, pour un rapport de charges important entre les deux régions, à savoir pour  $x_{Al}$  égal à 15% et  $N_{ACP}$  à  $1,0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , on obtient une zone de charge d'espace de déplétion (ZCE) de 45 nm de large pour chaque jonction PN. Cependant, il est important de trouver un équilibre car le taux d'aluminium  $x_{Al}$  est étroitement lié à la densité du 2DEG (voir modèle piézo-électrique). Une valeur trop faible de  $x_{Al}$  entraînerait une résistance d'accès de drain et de source trop élevée, tandis qu'une valeur trop élevée du taux d'aluminium ne permettrait pas d'obtenir une ZCE de déplétion suffisamment large. Nous avons donc opté pour un compromis avec  $x_{Al}$  fixé à 20% pour la suite de l'étude. En ce qui concerne le niveau de dopage, une valeur comprise entre  $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  et  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  semble être réaliste compte tenu des techniques de dépôt de P-GaN connues.

Nous avons également optimisé l'espacement entre les jonctions afin d'obtenir une déplétion totale au cœur de la cellule. Il a été montré qu'une distance légèrement supérieure à deux fois la largeur de la ZCE de déplétion d'une jonction p-n permet d'obtenir une déplétion complète du 2DEG, ce qui indique la possibilité d'avoir une fonctionnalité "normally-off".

## 2.6 Étude du rétablissement du 2DEG sous polarisation de grille

Grâce à l'étude menée à l'équilibre thermodynamique, nous avons pu déterminer les paramètres de conception des caissons P-GaN afin d'obtenir une zone dépeuplée intercellulaire. Nous allons maintenant poursuivre notre étude en ajoutant un potentiel électrique aux caissons P-GaN. L'objectif est d'analyser l'évolution de la zone de charge d'espace de déplétion et de vérifier le rétablissement du 2DEG qui assure la conduction du courant entre la source et le drain.

### 2.6.1 Modélisation du contact de grille

Deux modèles de simulation [2D], appelés « modèle A » et « modèle B » sont présentés dans cette section afin de comprendre les mécanismes de rétablissement du 2DEG appauvri par la topologie de grille du HEMT étudiée. Ces deux modèles sont proposés pour pallier les problématiques de simulations [3D] en raison des limitations de temps et ressources de calcul tout en essayant de prendre en compte au maximum les effets tridimensionnels de la structure. De plus, nous verrons que cette approche nous a permis d'identifier des problématiques structurelles et d'y apporter des optimisations.

#### Modèle A

Le modèle de simulation de la cellule de grille, appelé « modèle A », est présenté sur la Figure II.20. La structure comprend une couche bulk de GaN de  $1 \mu\text{m}$  d'épaisseur, une couche barrière d'AlGaIn de 20 nm d'épaisseur et une couche de nitrure en surface. Les paramètres de conception de la cellule sont optimisés en considérant un taux d'aluminium  $x_{Al}$  de 20% dans la barrière et une concentration  $N_{aCP}$  de  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  avec une profondeur de caisson P-GaN  $e_T$  de 100 nm, une largeur  $L_T$  de 25,6 nm et un espacement intercellulaire  $D_T$  de 58,2 nm ( $2 \times L_{ZCE}$ ). Des contacts électriques sont disposés sur les caissons P-GaN et en-dessous de la structure, en contact direct avec le bulk GaN. Une tension  $V_G$  est appliquée entre les contacts supérieurs et inférieurs de la structure. Le contact inférieur sera considéré ohmique dans tous les cas d'étude présentés.

### 2.6.2 Modulation de la charge d'espace de la diode P-GaN/2DEG

Nous avons dans un premier temps simulé le comportement de la structure avec des contacts ohmiques sur les caissons P-GaN. Nous avons étudié la variation de la charge d'espace totale à l'équilibre, pour un potentiel appliqué sur la grille nul ( $V_G = 0 \text{ V}$ ) : le résultat confirme une déplétion totale de la ZCE entre les caissons (Figure II.21.a). Lorsqu'on applique un potentiel  $V_G$  de 3 V (Figure II.21.b), on observe le rétablissement du 2DEG. Il s'étale sur l'ensemble de la région intercaissons P-GaN atteignant une concentration maximale au centre de la cellule de  $5,06 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ .

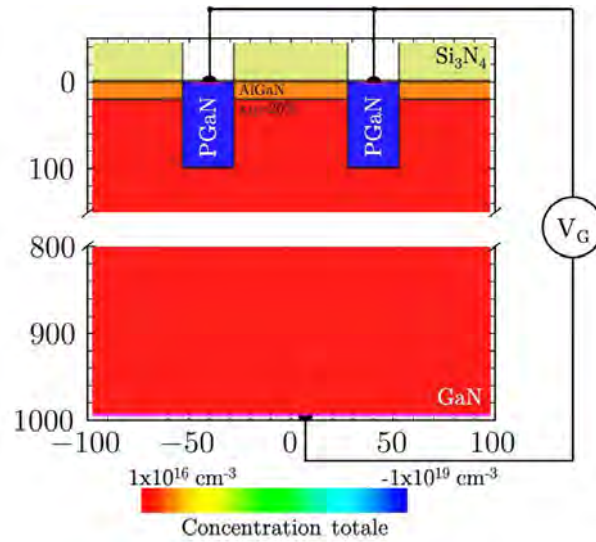


FIGURE II.20 – Vue du modèle A de simulation de la cellule de grille avec des contacts électriques sur les caissons P-GaN et sur la face arrière du composant

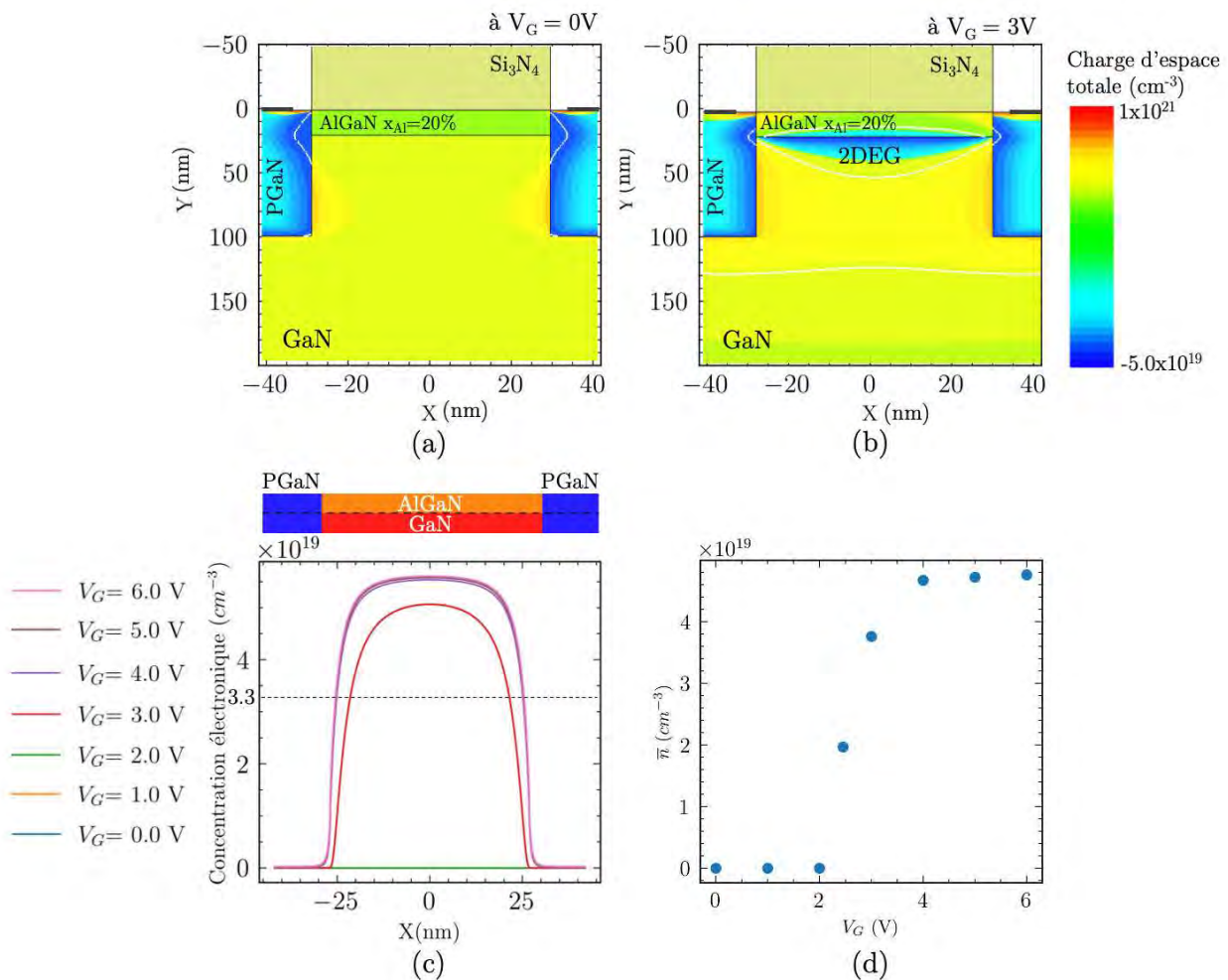


FIGURE II.21 – Simulation de la charge d'espace totale d'une cellule avec une tension  $V_G$  (a) de 0 V et (b) de 3 V ; (c) Profil de concentration du 2DEG pour plusieurs tensions  $V_G$  et (d) Évolution de la concentration moyenne  $\bar{n}$  du 2DEG en fonction de  $V_G$



La Figure II.21c illustre l'évolution du profil de la concentration électronique du 2DEG en fonction de la tension  $V_G$ . Pour des tensions inférieures à 3 V, la concentration électronique  $n$  est très faible ( $< 1,7 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ ), ce qui explique la superposition des courbes observée. À partir de  $V_G = 3 \text{ V}$ , la concentration électronique évolue très rapidement jusqu'à une valeur maximale de  $5,9 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  pour  $V_G = 5 \text{ V}$ . Parallèlement, le profil du 2DEG le long de l'interface s'élargit progressivement.

La concentration électronique moyenne  $\bar{n}$  entre les caissons P-GaN à l'interface AlGaIn/GaN (à  $Y = 20 \text{ nm}$ ) est donnée par la relation suivante :

$$\bar{n} = \frac{1}{x_2 - x_1} \int_{x_1}^{x_2} n dX \quad (\text{II.17})$$

où  $n$  est la concentration électronique,  $x_1$  et  $x_2$  correspondent aux positions des 2 jonctions PN de la cellule et tel que  $D_T = x_2 - x_1$ .

La Figure II.21.d montre l'évolution de la concentration moyenne en fonction de la tension  $V_G$  appliquée sur les caissons. Lorsque la tension de grille atteint 2,5 V, la concentration moyenne égale la concentration normale de  $3,3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  obtenue pour l'épi-structure AlGaIn/GaN avec un taux d'aluminium  $x_{Al}$  de 20%. Au-delà de  $V_G = 3 \text{ V}$ , nous observons une concentration d'électrons dans le 2DEG qui croît jusqu'à une valeur moyenne maximale de  $4,75 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ . Cela représente une accumulation supplémentaire d'électrons de 13% dans le canal à  $V_G = 3 \text{ V}$  et de 40% à  $V_G = 4 \text{ V}$ .

La structure étudiée présente néanmoins plusieurs jonctions p-n de nature différentes entre les deux contacts, chacune localisée par des symboles de diode sur la vue schématique de la Figure II.22. On distinguera une diode entre les caissons P et le GaN, une autre entre les caissons GaN et le 2DEG et une dernière entre les caissons et l'AlGaIn. Nous observons que la majorité du courant circule à travers la diode P-GaN/2DEG. Or cette diode, basée sur le modèle [1D] de la jonction PN plane en GaN, a un potentiel de diffusion interne de 3,4 V, ce qui veut dire que la diode conduit lorsque le potentiel appliqué à ses bornes devient supérieur à cette valeur. La courbe simulée  $I_G(V_G)$  (Figure II.23a) permet justement d'observer la variation des niveaux de courant de grille. Lorsque des contacts ohmiques sont utilisés sur les caissons P-GaN, le courant de grille simulé dépasse 1 A.mm à  $V_G = 6 \text{ V}$ , ce qui est excessivement élevé pour un courant de grille.

Si l'on considère un contact Schottky sur les caissons P avec des travaux de sortie de 4,6 eV et 5,1 eV, le courant est réduit drastiquement de 7 ordres de grandeur comparé au cas des contacts ohmiques. Malheureusement, cette solution n'est pas adaptée puisque le 2DEG n'est pas rétabli avec un canal de conduction fin et de faible concentration électronique comme illustré sur la Figure II.23b qui montre la variation de la concentration électronique pour les deux types de contact. En effet, en comparant les concentrations moyennes calculées du 2DEG à  $V_G = 6 \text{ V}$ , celles-ci n'atteignent que  $3,2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  et  $4,7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  pour respectivement des travaux de sortie de 4,6 eV et 5,1 eV.

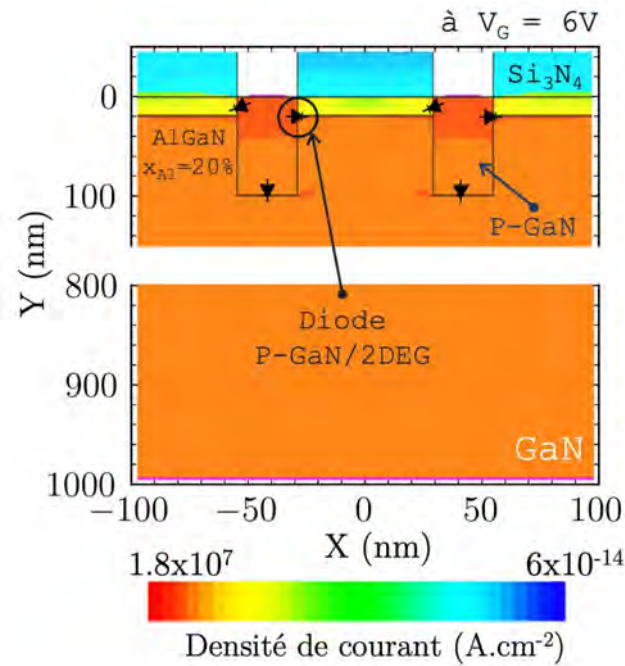


FIGURE II.22 – Simulation de la densité de courant entre les contacts sur P-GaN et le contact sur la face arrière d’une cellule à  $V_G = 6\text{ V}$ , avec un contact ohmique sur les caissons P-GaN

Il convient de noter que le modèle [2D] utilisé peut ne pas être approprié pour comprendre les mécanismes de rétablissement du 2DEG. En effet, dans une structure HEMT, le potentiel du 2DEG est aussi déterminé par les potentiels appliqués aux contacts de source et de drain, ce qui diffère de la situation précédente.

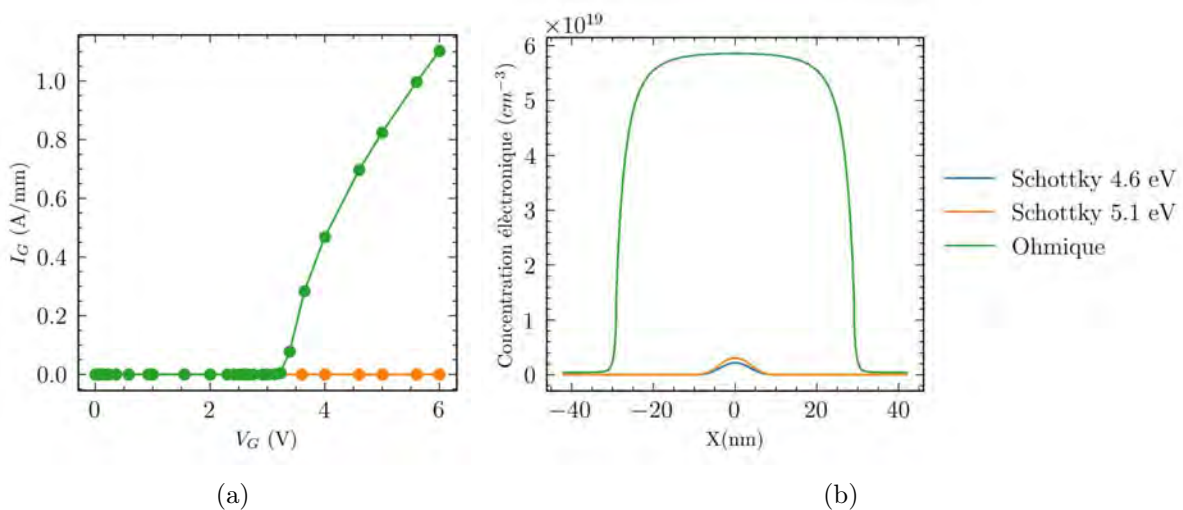


FIGURE II.23 – (a) Caractéristique  $I_G(V_G)$  simulée et (b) profil de concentration électronique du 2DEG avec un contact ohmique sur les caissons P-GaN (courbe verte), et un contact Schottky (courbes bleu et orange) avec des travaux de sortie respectifs de 4,6 eV et 5,1 eV

## Modèle B

Pour mieux comprendre le comportement des ZCE, nous avons modifié le modèle pour tenir compte du potentiel électrique aux bornes du canal 2DEG. Le modèle [2D] de simulation illustré sur la Figure II.24, que nous nommerons « modèle B », comporte donc les éléments suivants :

- un contact ohmique,
- une jonction P-GaN/2DEG présentant des paramètres optimisés pour une concentration  $N_{aCP}$  de  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  et un contact électrique de type Schottky (avec un travail de sortie WF de 5,1 eV) sur le caisson P-GaN.

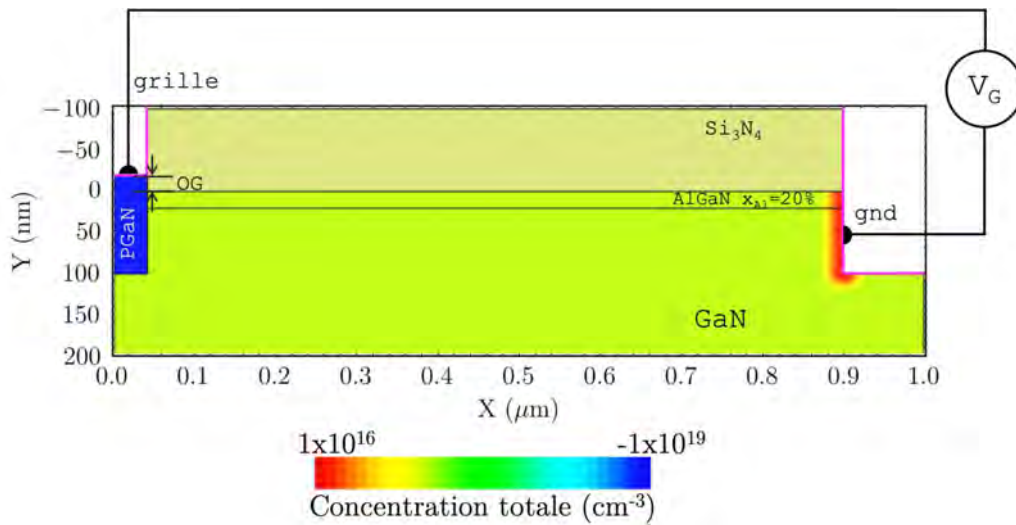


FIGURE II.24 – Modèle B de simulation de la jonction P-GaN/2DEG avec un contact ohmique assisté avec le 2DEG sur la tranche

Ces modifications visent à évaluer directement le comportement électrique et l'extension de la ZCE de déplétion de la jonction P-GaN/2DEG.

Nous avons vu que la structure était limitée par les différentes diodes qui forment la grille et que l'utilisation d'un contact Schottky permettait d'obtenir des niveaux de courant de grille réduits. Par conséquent, nous avons vérifié dans un premier temps si cela était également le cas en considérant le « modèle B ».

Dans la Figure II.25a, nous avons reporté la densité de courant simulée au niveau de la grille pour un potentiel  $V_G$  de 10 V. On observe que le courant circule du contact sur le P-GaN vers le 2DEG à travers les couches d'AlGaIn et P-GaN. Nous avons donc modifié la hauteur des caissons P-GaN en ajoutant une surépaisseur de P-GaN d'une hauteur OG (Overgrowth) de 50 nm (Figure II.25b). Cela a eu pour effet de réduire le champ électrique entre le contact et le 2DEG limitant ainsi le courant. Sur la Figure II.25c, nous avons tracé le courant de grille pour différentes valeurs de OG. Nous constatons qu'une surépaisseur de 20 nm minimum permet de réduire le courant  $I_G$  à une valeur acceptable inférieure à  $1 \times 10^{-9} \text{ A.mm}$ .

Cependant, cette surépaisseur de P-GaN peut aussi avoir un impact sur l'extension des ZCE de déplétion. Pour OG égal à 20 nm, nous avons comparé sur la Figure II.26 la charge d'espace simulée à l'équilibre ( $V_G = 0 \text{ V}$ ) et à  $V_G = 8 \text{ V}$ .

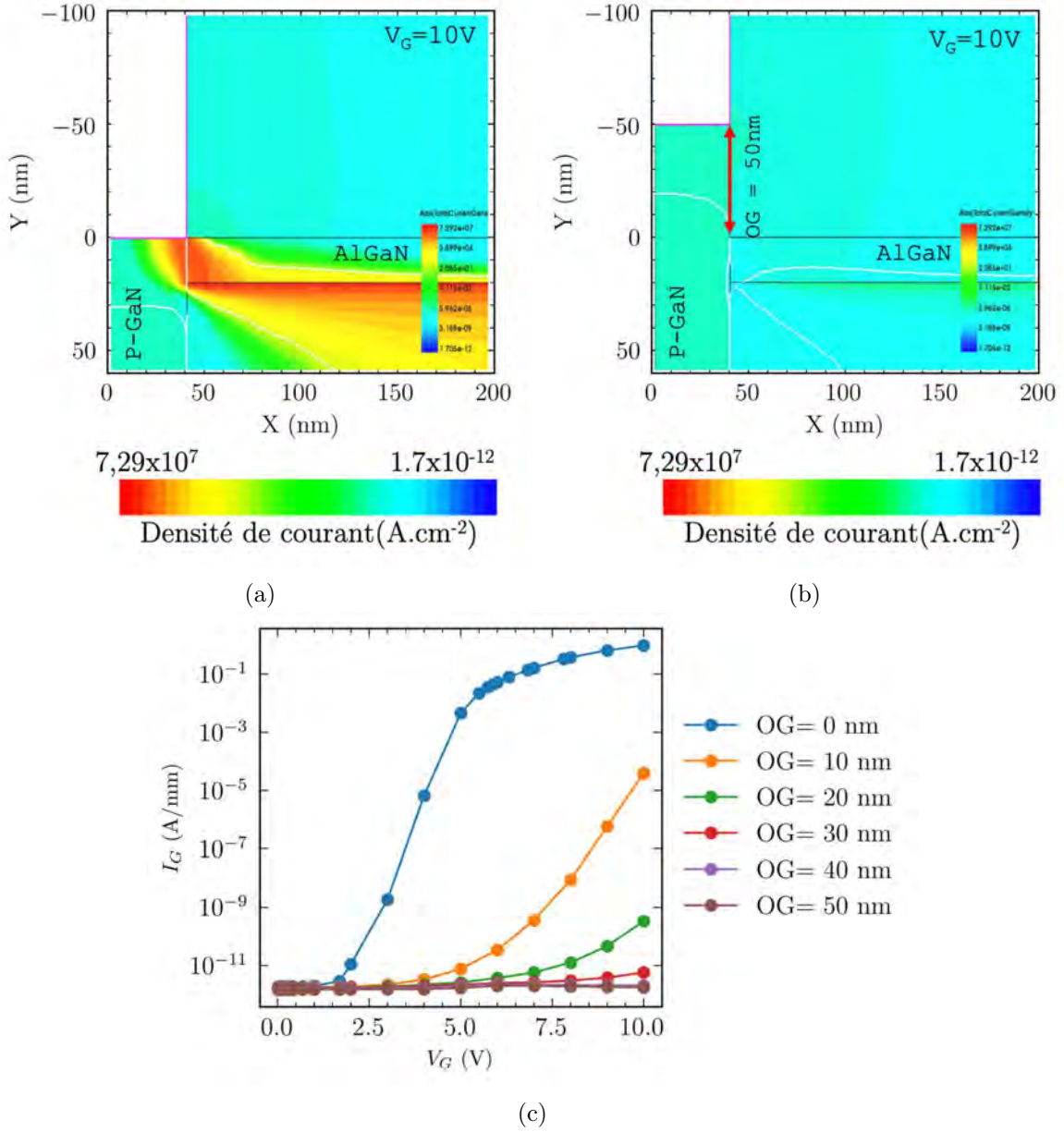


FIGURE II.25 – Simulation de la densité de courant à  $V_G = 10$  V avec (a) le caisson P-GaN coplanaire avec l’AlGaN et (b) le caisson P-GaN dépassant de 50 nm ; (c) Caractéristiques  $I_G(V_G)$  simulées avec différentes valeurs de dépassement  $OG$  des caissons P-GaN

À l’équilibre thermodynamique, la ZCE totale de la jonction P-GaN/2DEG est identique à celle que nous avons obtenue dans l’étape d’optimisation des caissons P-GaN. La largeur de ZCE de déplétion ( $L_{ZCE}$ ) dans le 2DEG est de 29,1 nm et la concentration maximale du 2DEG en dehors de la ZCE de déplétion atteint une valeur maximale de  $3,3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ . À  $V_G = 8$  V,  $L_{ZCE}$  diminue et la concentration augmente dans la région initiale de déplétion.

Le profil d’évolution de la concentration moyenne du 2DEG est montré sur la Figure II.27.a. La zone grisée correspond à la ZCE de déplétion initiale ( $V_G = 0$  V) commençant à  $x_1 = 40$  nm et se terminant à  $x_2 = 69,1$  nm. On observe que  $L_{ZCE}$  de déplétion diminue de 29,1 nm à l’équilibre à 6 nm à  $V_G > 7$  V. Il reste donc une ZCE de déplétion résiduelle à la jonction qui représente environ 20% de la ZCE de déplétion initiale. Par contre, la concentration du 2DEG augmente significativement jusqu’à  $5,0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  à  $V_G = 5$  V. Ainsi, tout comme avec le modèle

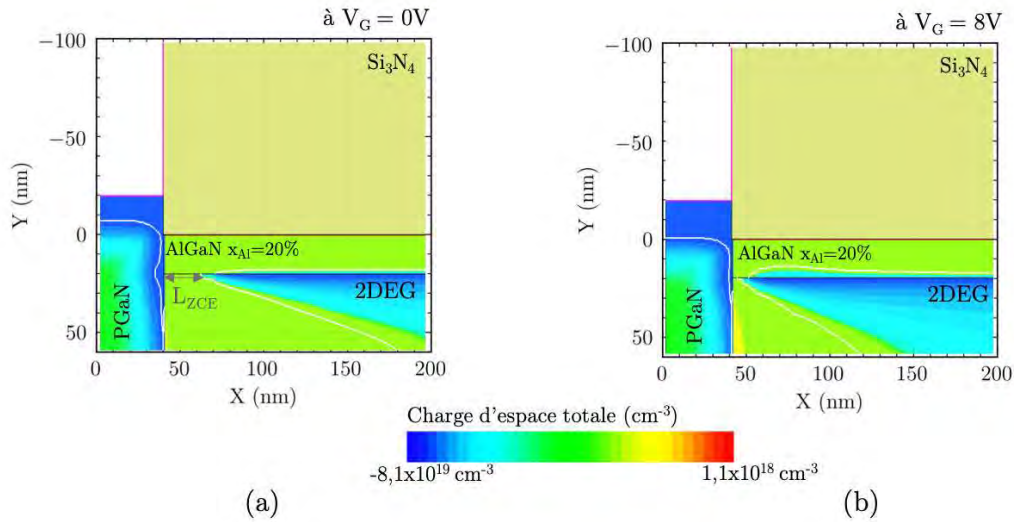


FIGURE II.26 – Simulation de la charge d'espace totale du modèle de simulation B pour (a)  $V_G = 0\text{ V}$  et (b)  $V_G = 8\text{ V}$

précédent, on observe une accumulation supplémentaire d'électrons qui compense l'espace de confinement du 2DEG perdu dans la zone résiduelle de déplétion. La valeur moyenne  $\bar{n}$  de la concentration électronique du 2DEG rétabli dans la région de déplétion initiale  $V_G$  ( $x_2 - x_1 = L_{ZCE}$ ) augmente linéairement jusqu'à une valeur un peu plus élevée que  $3 \times 10^{19}\text{ cm}^{-3}$  à  $V_G = 5\text{ V}$  puis très légèrement au-delà (Figure II.27.b). Par conséquent, nous pouvons considérer que nous rétablissons 95,4% de la valeur de concentration moyenne du 2DEG de départ qui est de  $3,3 \times 10^{19}\text{ cm}^{-3}$  déterminée par les paramètres physiques des couches AlGaIn et GaN.

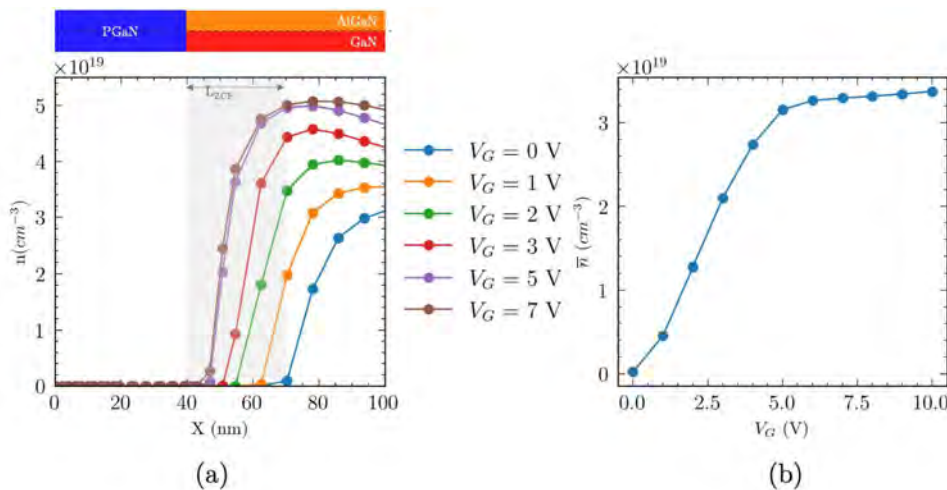


FIGURE II.27 – (a) Profil de concentration du 2DEG dans la ZCE de déplétion initiale pour différentes valeurs de potentiel  $V_G$ ; (b) Valeur moyenne de concentration du 2DEG dans la ZCE de déplétion initiale de largeur  $L_{ZCE}$  (29,1 nm) en fonction de  $V_G$



### 2.6.3 Évaluation d'une grille MOS

L'utilisation d'un contact Métal Oxyde Semi-Conducteur (MOS) sur des structures HEMT classiques n'a pas permis jusqu'à présent d'obtenir des structures "normally-off". Dans cette section, nous proposons d'évaluer notre structure, qui vise à rétablir le 2DEG en utilisant ce type de contact en deux dimensions [2D].

La Figure II.28 présente le modèle de simulation incluant un contact placé au-dessus des caissons P-GaN et isolé par une couche de  $SiO_2$  d'une épaisseur de 20 nm.

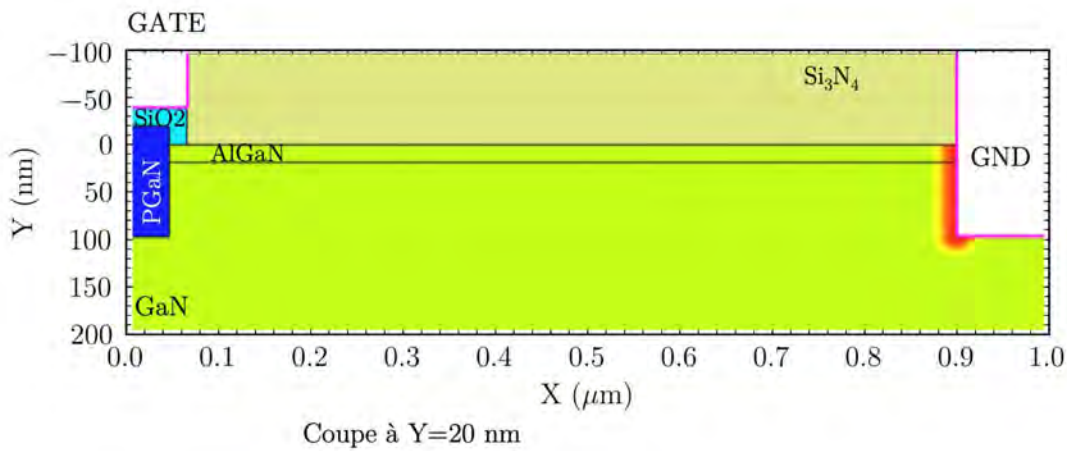


FIGURE II.28 – Modèle de simulation de la jonction P-GaN/2DEG avec un diélectrique de grille en  $SiO_2$  d'une épaisseur de 20 nm

Le profil de la concentration du 2DEG évolue comme illustré dans la Figure II.29.a. La zone grisée correspond toujours à la zone de déplétion initiale ZCE ( $V_G = 0$  V). La concentration du 2DEG augmente progressivement jusqu'à  $5,0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  à  $V_G = 10$  V. La valeur moyenne  $\bar{n}$  de la concentration électronique du 2DEG, rétablie dans la région de déplétion initiale  $V_G$  ( $x_2 - x_1 = L_{ZCE}$ ), augmente linéairement, de manière semblable à un contact de grille métallique direct, jusqu'à atteindre  $3,15 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  à  $V_G = 10$  V. Par la suite, cette valeur commence à saturer, comme illustré dans la Figure II.29.b. Par conséquent, l'utilisation d'un contact de grille MOS permet également de rétablir le 2DEG, bien que cela se traduise par un gain de transconductance moins élevé.

L'utilisation d'un contact de type MOS semble être une possibilité envisageable pour cette structure. Elle présente l'avantage de fournir une isolation efficace de la grille et de réduire les courants de fuite à travers cette grille. Une analyse plus approfondie pourrait être entreprise pour déterminer le choix optimal du matériau diélectrique de la grille.

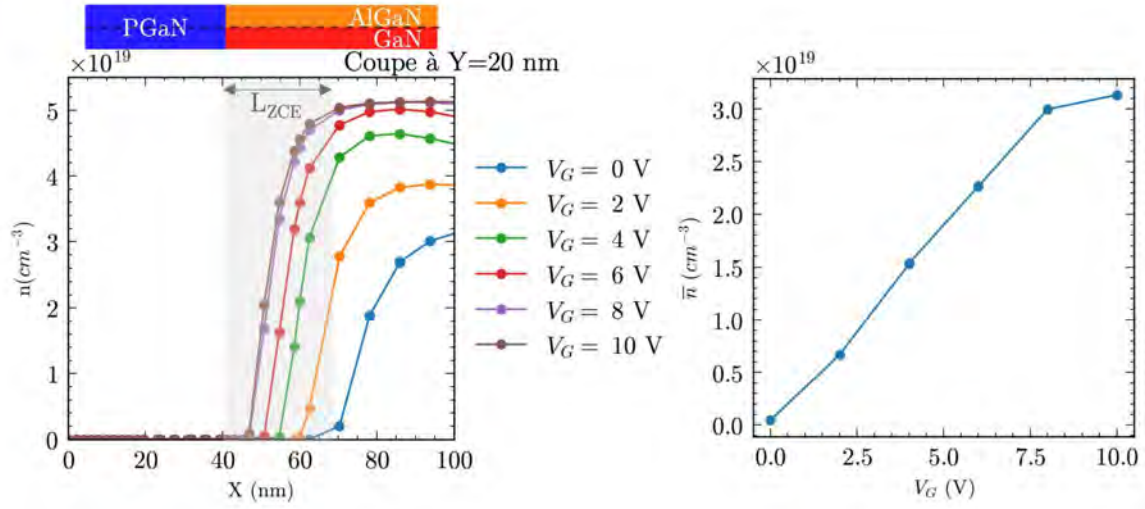


FIGURE II.29 – (a) Profil de concentration du 2DEG dans la ZCE de déplétion initiale pour différentes valeurs de potentiel  $V_G$ ; (b) Valeur moyenne de concentration du 2DEG dans la ZCE de déplétion initiale de largeur  $L_{ZCE}$  (29,1 nm) en fonction de  $V_G$

## 2.7 Simulation en [3D] du comportement électrique de la grille dans la structure HEMT complète

Nous avons jusqu'ici étudié le comportement de la grille à partir de modèles [2D] et [3D] à l'équilibre thermodynamique et analysé l'influence des paramètres physiques et géométriques caractérisant la cellule élémentaire. Nous allons maintenant simuler en [3D] le comportement de la grille au sein de la structure HEMT complète.

Les caractéristiques spécifiques des couches du HEMT sont décrites sur la Figure II.30a. Le modèle des couches du HEMT permet une approche simplifiée de la structure, en se concentrant principalement sur les mécanismes de formation du 2DEG, c'est-à-dire les pièges d'interface pour la compensation des charges piézoélectriques et la mobilité du 2DEG fixée à  $2000 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  dans une couche GaN de 10 nm d'épaisseur. Il est à noter que le choix de simuler une demi-cellule est justifié par les contraintes de simulation de composants à matériaux grands gap. Cette approche est valide car les conditions aux limites de Neumann imposent aussi une symétrie de la dérivée du champ de potentiel aux frontières du domaine de simulation.

La Figure II.30b présente le résultat de simulation à l'équilibre thermodynamique d'une demi-cellule de HEMT avec les paramètres  $L_T$  et  $D_T$  respectifs de 30 nm et 58,2 nm (soit 29,1 nm considérant la demi-cellule), une surcroissance de P-GaN (OG) de 20 nm et une concentration  $N_{ACP}$  de  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ .

La longueur de grille  $L_G$ , la distance source-grille  $L_{GS}$  et la distance grille-drain  $L_{GD}$  du HEMT sont respectivement 200 nm, 200 nm et 400 nm. Il convient de noter que des valeurs arbitraires des dimensions des longueurs grille-source ( $L_{GS}$ ) et grille-drain ( $L_{GD}$ ) sont utilisées ici, car notre objectif est d'évaluer le rétablissement du 2DEG dans une structure en [3D] complète. Celui-ci n'est pas influencé a priori par les dimensions du HEMT mais plutôt par les dimensions de la cellule de grille.

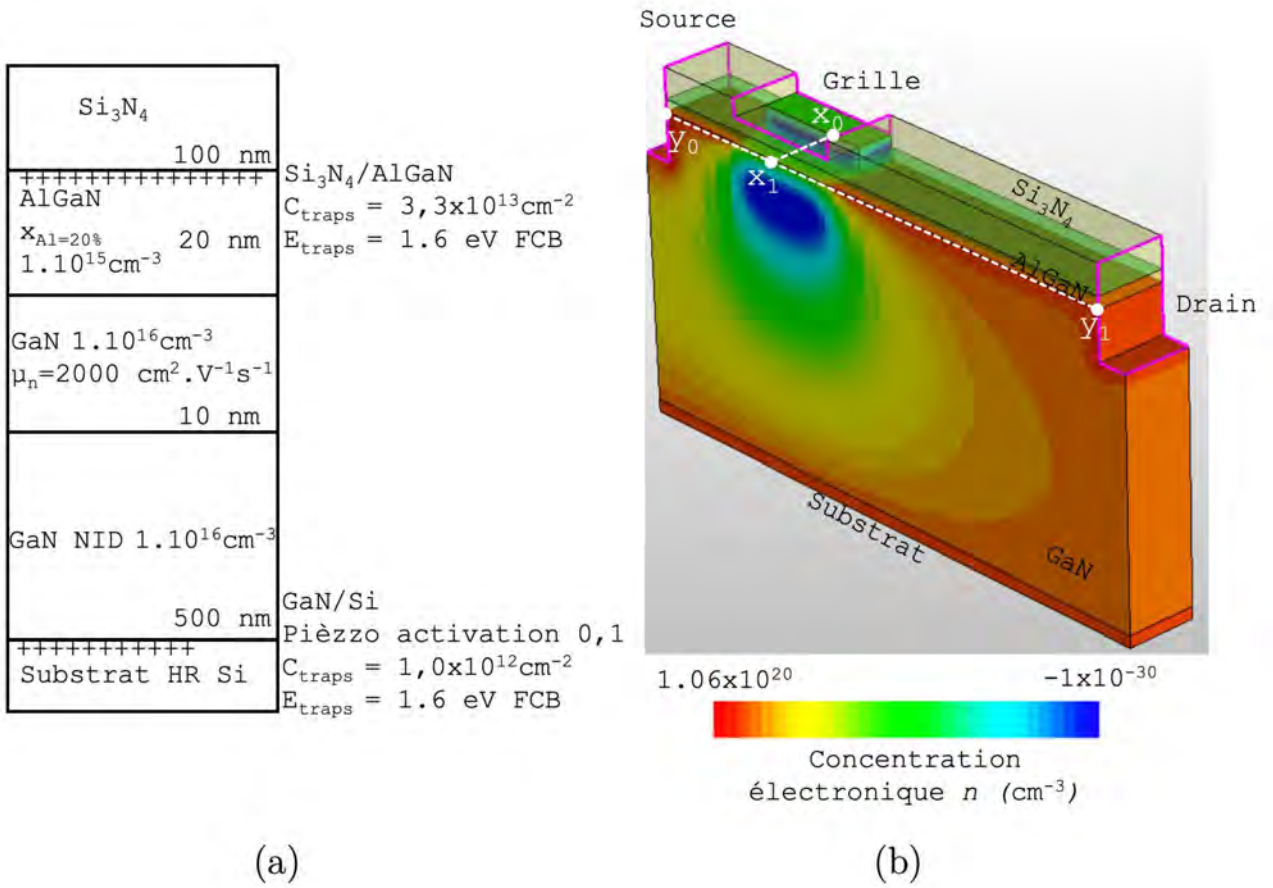


FIGURE II.30 – (a) Paramètres physiques des couches HEMT du modèle de simulation ; (b) Simulation de la charge électronique de la demi-cellule dans une structure HEMT complète en [3D]

La concentration du 2DEG est évaluée le long des lignes de coupe ( $y_0; y_1$ ) et ( $x_0; x_1$ ) qui correspondent respectivement à la coupe longitudinale entre la source et le drain au centre de la cellule, entre deux caissons, et à la coupe transversale de la grille qui traverse la jonction P-GaN/2DEG.

Les résultats de simulation à l'équilibre thermodynamique ( $V_{GS} = V_{DS} = 0 \text{ V}$ ) confirment la présence de la ZCE de déplétion attendue sous la grille. Nous avons analysé le rétablissement du 2DEG le long des lignes de coupe ( $y_0; y_1$ ) et ( $x_0; x_1$ ) pour différents potentiels  $V_G$ .

Nous avons constaté dans un premier temps (Figure II.31a) une augmentation de la concentration  $n$  du 2DEG au niveau de la grille quand  $V_G$  augmente, concentration qui dépasse celle du 2DEG dans les zones d'accès de source et de drain. Nous avons également observé des pics de concentration à chaque extrémité de la grille, avec une valeur maximale de  $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  pour un potentiel  $V_G$  de 7 V. Le profil transversal reporté sur la Figure II.31b montre la réduction de la ZCE de déplétion et l'augmentation de la concentration  $n$  dans le 2DEG jusqu'à  $4,75 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ . La valeur moyenne de la concentration le long de la coupe transversale en fonction de  $V_{GS}$ , illustrée sur la Figure II.32, met en évidence un seuil de rétablissement du 2DEG situé entre 1 V et 2 V. La valeur moyenne maximale de  $\bar{n}$  tend vers  $2,8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ .



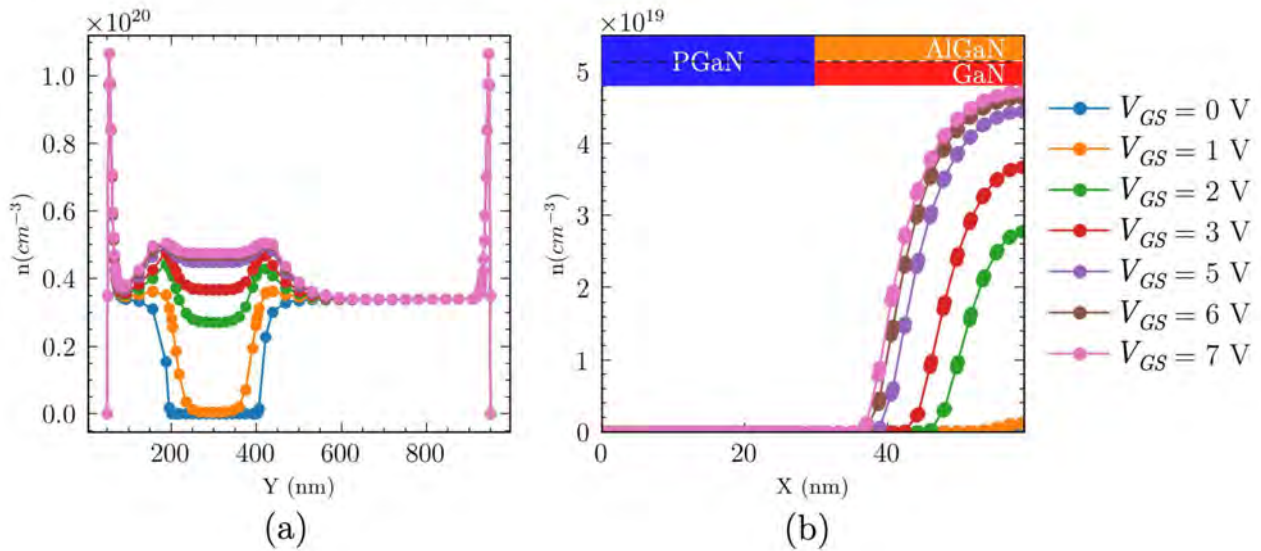


FIGURE II.31 – Profil de concentration du 2DEG pour plusieurs tensions  $V_{GS}$  appliquées dans (a) la coupe longitudinale ( $y_0 ; y_1$ ) et (b) la coupe transversale ( $x_0 ; x_1$ )

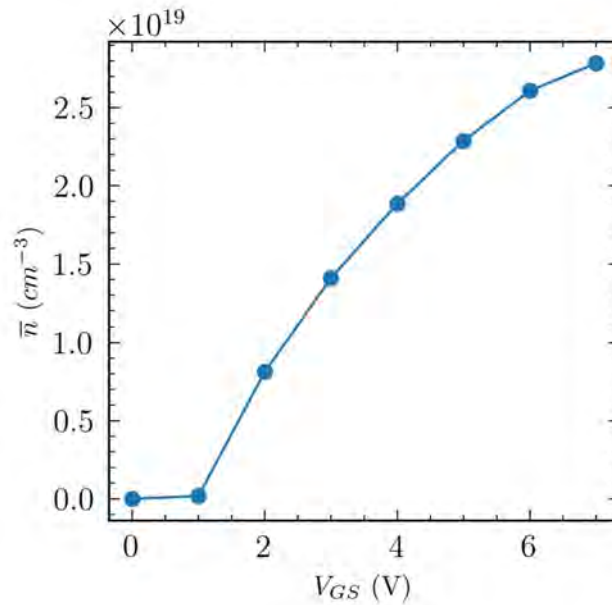


FIGURE II.32 – Concentration moyenne du 2DEG de la demi-cellule dans la coupe transversale ( $x_0 ; x_1$ ) du HEMT en fonction de la tension  $V_{GS}$  à  $V_{DS} = 0V$

La valeur de la concentration électronique maximale des pics de  $n$  et la persistance d'une zone résiduelle de la ZCE de déplétion initiale pour différentes valeurs de tensions de grille  $V_{GS}$  sont très similaires à ce que nous avons obtenu avec le « modèle B » en [2D]. Cependant, la concentration moyenne légèrement plus faible et l'observation du seuil de rétablissement sont plutôt similaires au « modèle A ». Cela suggère que les deux modèles étudiés prennent en compte des mécanismes différents. Le « modèle A » permet d'expliquer le seuil par l'effet d'auto-blindage électrique des deux caissons P-GaN et du recouvrement des ZCE de déplétion qui relève le niveau d'énergie de la bande de conduction (EBC) au centre de la cellule. Le

« modèle B », quant à lui, prend en compte le potentiel du 2DEG qui est lié à celui de la source et du drain. Les lignes de champ électrique sont modifiées en conséquence, permettant donc la réduction de la ZCE de déplétion latéralement.

D'après les résultats actuels, on peut s'attendre à ce que le HEMT présente des courants de grille assez limités par l'utilisation d'un contact Schottky au lieu d'un contact ohmique sur la grille. De plus, le seuil de tension devrait être plus ou moins proche de celui de la tension de seuil de rétablissement du 2DEG. La conception en [2D] est particulièrement adaptée à notre cas vu la difficulté à obtenir des résultats qui convergent en [3D]. Cette approche [2D] permet une exploration plus rapide des idées et une meilleure analyse de la structure.

## 2.8 Conclusion sur l'étude de la grille

Lors de l'étude de conception en [2D] de la cellule de grille à caissons P-GaN, nous avons déterminé les paramètres nécessaires permettant de créer une ZCE de déplétion intercellulaire afin de dépléter le 2DEG. Cette zone de charge d'espace de déplétion dépend des paramètres technologiques tels que la concentration de dopage  $N_{aCP}$  du P-GaN et le taux d'aluminium  $x_{Al}$  dans la barrière AlGaIn.

Nous avons également constaté que l'utilisation d'un modèle [1D] d'une jonction plane abrupte en GaN permettait de modéliser efficacement cette jonction. Nous avons choisi une valeur de  $N_{aCP}$  de  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  afin d'obtenir un bon compromis entre la largeur du canal déplété à l'équilibre thermodynamique, entre 50 nm et 80 nm pour un taux d'aluminium fixé à 20%.

Nous avons effectué une première validation en [3D] à l'équilibre thermodynamique, ce qui conforte la validité du concept de grille à caissons P-GaN. En utilisant un modèle de simulation en [2D], nous avons pu observer le rétablissement du 2DEG en appliquant un potentiel électrique aux caissons P-GaN. Cependant, nous avons constaté qu'il diffère selon le modèle utilisé. Lorsque nous avons considéré le modèle de la cellule dans lequel le 2DEG est isolé électriquement entre les caissons P-GaN, "modèle A", le rétablissement du 2DEG était négligeable, mais présentait un seuil de rétablissement autour de 2 V appliqué sur la grille. Dans le deuxième modèle, avec une jonction P-GaN/2DEG et un contact électrique sur le 2DEG, "modèle B", nous avons pris en compte de manière plus réaliste la polarisation du 2DEG. Dans ce cas, la  $L_{ZCE}$  de déplétion a diminué, permettant ainsi un rétablissement du 2DEG à 95% avec un contact Schottky.

Une surcroissance de P-GaN a été rajoutée au modèle de grille afin de diminuer le courant de grille lié au champ électrique entre le 2DEG et le contact de grille.

Finalement, une analyse en [3D] de la structure HEMT complète a permis de justifier l'utilisation des modèles [2D] pour un pré-travail de conception plus rapide. L'objectif est maintenant d'évaluer la fonctionnalité de cette structure par l'évaluation de sa tension de seuil  $V_{th}$ .

### 3 Étude de la fonctionnalité du HEMT à grille nanostructurée

Dans la partie précédente, nous avons étudié un concept de grille de HEMT à caissons P-GaN permettant de dépléter localement le 2DEG. Nous avons observé que le rétablissement du 2DEG par application d'un potentiel de grille sur les caissons P-GaN était possible avec différents types de contact de grille. Les résultats de conception en [2D] et [3D] nous permettent d'envisager la conception du HEMT normally-off dans sa totalité.

Afin de valider le concept du HEMT à grille P-GaN nanostructurée, il est nécessaire de répondre aux exigences de fonctionnement d'un transistor normally-off, à savoir, un "état passant" pour lequel le passage du courant est déterminé par la tension grille-source  $V_{GS}$  avec une tension de seuil positive et un "état bloqué" pour lequel la grille doit permettre le blocage du courant indépendamment de la tension drain-source  $V_{DS}$ .

Nous ferons dans cette partie une distinction entre le blocage du courant et la tenue en tension du dispositif. Le blocage du courant traduit la capacité fonctionnelle de la grille seule à bloquer le courant à l'état bloqué. La tenue en tension du dispositif, quant à elle, traduit la capacité physique à bloquer le courant à l'état bloqué, ce qui dépend de nombreux facteurs de conception. Par exemple, les plaques de champ permettent de réduire le champ électrique entre les contacts de drain et de grille, améliorant ainsi la tenue en tension du dispositif indépendamment de la structure de grille employée. De même, les différents mécanismes de piégeage et défauts physiques dans les couches peuvent contribuer à des fuites de courant à l'état bloqué indépendamment de la structure de grille employée.

Nous présenterons donc les simulations du HEMT normally-off complet qui permettront de répondre aux critères définis ci-dessus et d'évaluer ses performances dans différentes conditions de fonctionnement. Ces résultats permettront dans un processus de "feedback" d'affiner la conception de la grille.

#### 3.1 Modèle de simulation

Le modèle HEMT de simulation est présenté sur la Figure II.33a. La Figure II.33b montre de manière plus précise, à titre d'exemple, le caisson de la demi-cellule avec les paramètres suivants : une largeur  $L_T$  de 50 nm, une longueur  $l_T$  de 1,4  $\mu\text{m}$ , une profondeur  $e_T$  de 100 nm avec une surépaisseur  $OG$  de 50 nm et un dopage  $N_{ACP}$  de  $1,0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ . Certains de ces paramètres seront discutés plus en détail dans cette partie lors de la simulation des modes passant et bloqué.

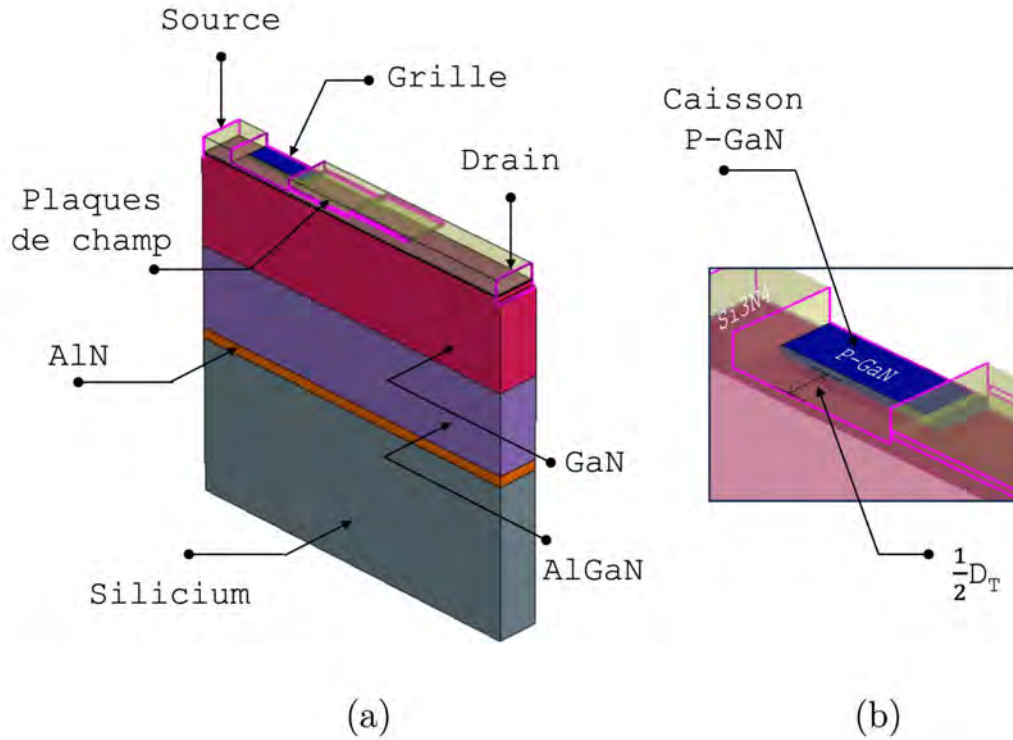


FIGURE II.33 – (a) Modèle d'une demi-cellule de HEMT utilisée pour les simulations hors équilibre et (b) Zoom sur la région de grille du modèle avec une jonction P-GaN/2DEG

## 3.2 Étude de l'état passant

Dans cette partie, nous étudierons les caractéristiques électriques simulées de la nouvelle structure afin de valider le fonctionnement en mode normally-off à l'état passant. Nous analyserons également les différents types de contact de grille, à savoir Schottky et ohmique, sur les caissons P-GaN pour déterminer les limites de chaque type de contact sur le fonctionnement du composant en terme de tension de seuil et de densité de courant dans le canal de grille.

### 3.2.1 Caractéristique de transfert avec un contact de grille ohmique

Les caractéristiques de transfert  $I_D(V_{GS})$  simulées en fonction de l'espacement inter-caissons  $D_T$  avec un contact de grille ohmique sont présentés sur la Figure II.34. Ces caractéristiques révèlent des tensions de seuil, extraites en extrapolant la tangente des caractéristiques  $I_D(V_{GS})$  dans la zone linéaire, qui sont positives et dépendantes de l'espacement inter-caissons. La variation de la tension de seuil  $V_{th}$  en fonction de  $D_T$  suit une tendance linéaire, comme illustré sur la figure II.34b. Cette tendance permet d'extrapoler la valeur maximale de  $D_T$  de 75 nm au-delà de laquelle le HEMT fonctionne en mode normally-off. La sensibilité de  $V_{th}$  par rapport à  $D_T$  est de  $57,5 \text{ mV} \cdot \text{nm}^{-1}$ , ce qui rend possible l'ajustement de la tension de seuil  $V_{th}$  du HEMT.

Cependant, conformément aux résultats de simulation de la pré-conception en [2D] de la grille, le fonctionnement à l'état passant est limité par un courant de grille très important au-delà de 3 V qui peut entraîner la dégradation du dispositif. Le contact ohmique n'est donc pas une solution optimale pour la conception de ce HEMT.

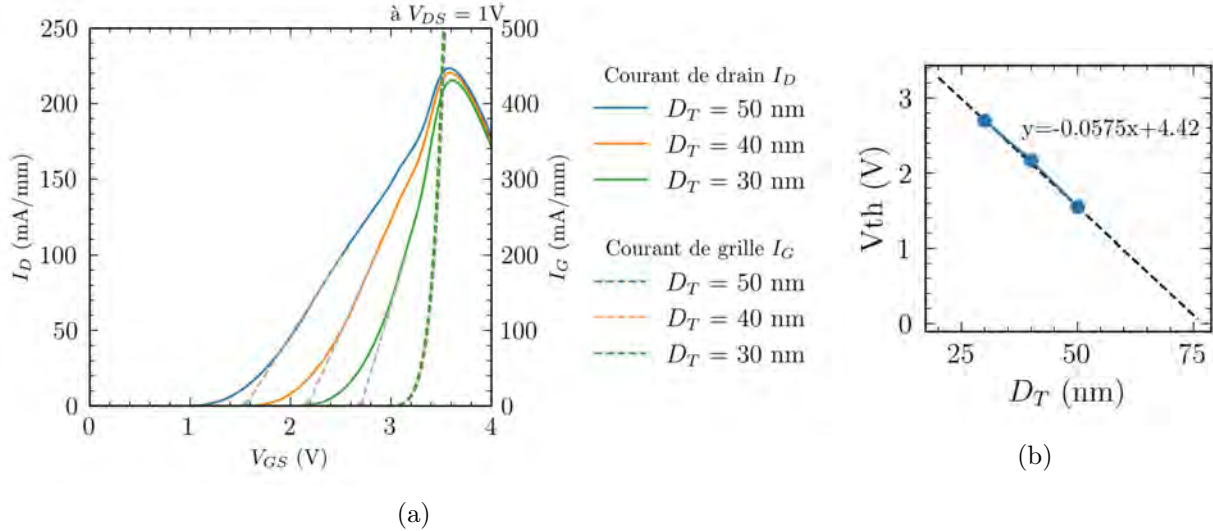


FIGURE II.34 – (a) Caractéristiques de transfert  $I_D(V_{GS})$  et (b) variation de la tension de seuil  $V_{th}$  en fonction de la distance inter-caissons  $D_T$  et à tension  $V_{DS} = 1V$

### 3.2.2 Caractéristique de transfert avec un contact de grille Schottky

Les caractéristiques de transfert  $I_D(V_{GS})$  simulées en fonction de l'espacement inter-caissons  $D_T$  avec un contact de grille Schottky sont présentés sur la Figure II.35a. Contrairement à un contact de grille ohmique, le courant maximal admissible dépend fortement de l'espacement intercellulaire, variant de trois ordres de grandeur pour des espacements compris entre 30 nm et 70 nm. Les valeurs de courant sont plus faibles à tension équivalente et la tension de seuil moins sensible (voir Figure II.35b). Cela traduit un développement moins important du potentiel de grille vers le caisson P-GaN, limitant ainsi la réduction de la ZCE de déplétion de la jonction de grille, comme nous l'avions anticipé dans la première phase de conception.

La Figure II.35c présente les valeurs calculées de la résistance drain-source  $R_{on}$  à l'état passant à tension drain-source  $V_{DS}$  égale à 1 V. Lorsque l'espacement  $D_T$  augmente, la résistance  $R_{on}$  tend vers une valeur minimale qui correspond à celle obtenue sur un transistor HEMT normally-on. En dessous d'une valeur de 50 nm, la résistance augmente très rapidement de trois ordres de grandeur.

Les simulations pour évaluer le HEMT à grille à caissons P-GaN nanostructurés à l'état passant ont produit des résultats de fonctionnement prometteurs, mettant en évidence les caractéristiques de fonctionnement normally-off que nous cherchons à obtenir. Cependant, il est important de noter que le fonctionnement de cette structure est limité par le choix du contact de grille. Avec un contact de grille ohmique, le régime de conduction de la jonction de grille P-GaN/2DEG limite la tension de commande grille-source  $V_{GS}$  à une valeur maximale de 3 V qui correspond aussi avec la tension nécessaire à la mise en conduction du dispositif. En revanche,

l'utilisation d'un contact Schottky permet une utilisation sur une plage  $V_{GS}$  plus grande, au détriment de la résistance du canal de grille, qui est fortement affectée par les paramètres structurels des caissons P-GaN. Il est tout de même préférable d'utiliser un contact de grille Schottky qui améliore la sûreté et la robustesse du composant ; le niveau de courant souhaité sera dès lors ajusté par la mise en parallèle de plusieurs cellules de grille. L'utilisation d'une grille de type MIS ou MOS n'a pas été évaluée ici en raison d'une problématique de remise en conduction du HEMT sous l'effet de la tension de drain-source. Ce phénomène sera analysé dans la suite de ce chapitre.

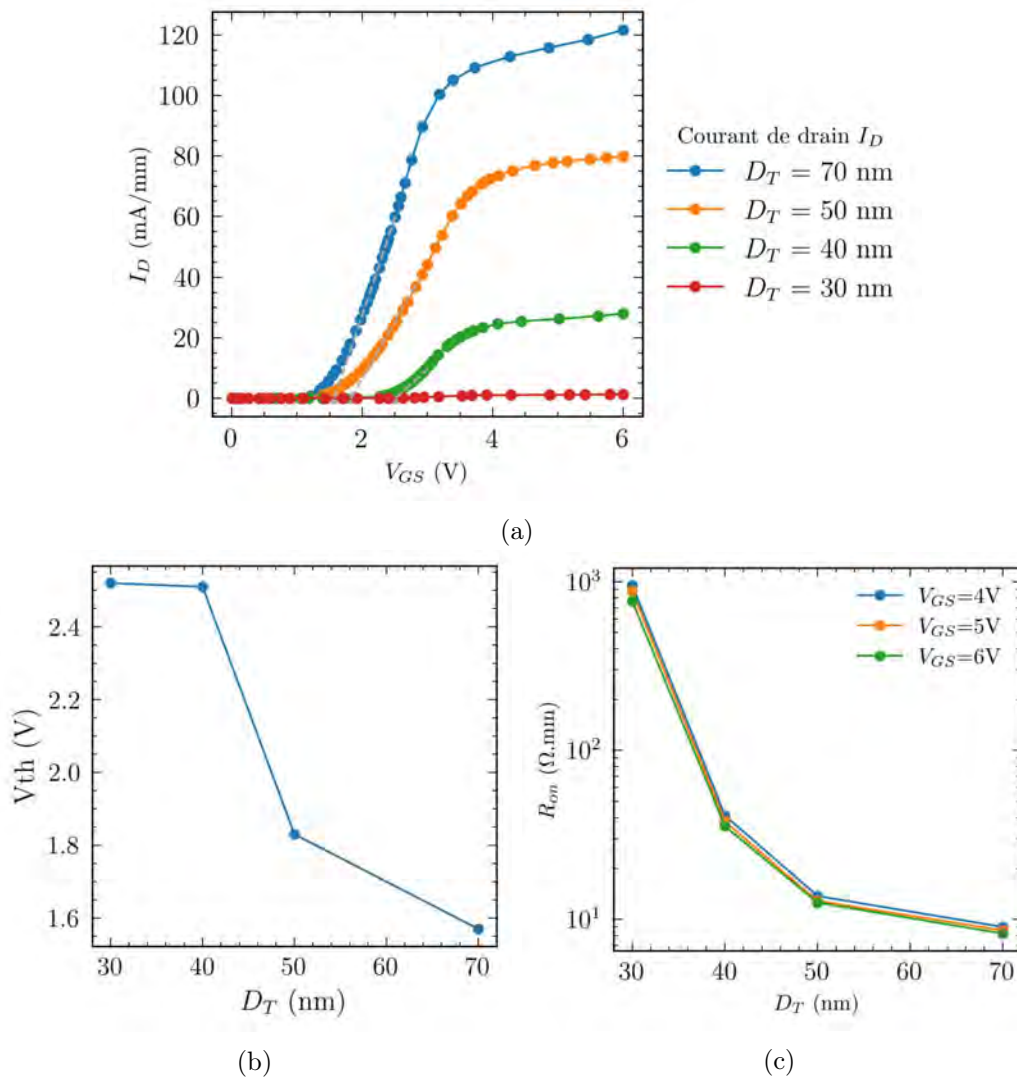


FIGURE II.35 – Variation en fonction de l'espacement intercellulaire  $D_T$  à  $V_{DS} = 1$  V avec un contact de grille Schottky de (a) la caractéristique de transfert  $I_D(V_{GS})$ , (b) la tension de seuil  $V_{th}$  et (c) la résistance  $R_{on}$

### 3.3 Étude de l'état bloqué

Nous allons maintenant étudier naturellement l'état bloqué de la structure complète. Jusqu'à présent, pour caractériser l'état passant, la tension de drain-source  $V_{DS}$  était fixée à 1 V (cf Figure II.35). Afin de vérifier la fonctionnalité de l'état bloqué, il est crucial que la structure HEMT bloque le courant à des tensions  $V_{DS}$  plus élevées, tout en maintenant une tension de grille-source  $V_{GS}$  à 0 V.

La Figure II.36a illustre les densités de courant simulées de la structure à caisson P-GaN avec une grille Schottky et un espacement intercellulaire  $D_T$  d'une valeur de 50 nm pour une tension  $V_{DS}$  de 30 V. Nous observons deux zones de circulation de courant au niveau de la région de grille. Dans la zone n°1, un courant de fuite de faible densité (inférieure à  $1 \times 10^{-4} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ ) circule normalement sous la structure de grille dans le GaN faiblement dopé. Dans la zone n°2, un courant de densité plus élevée (jusqu'à  $4,7 \times 10^4 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ ) circule anormalement à travers le canal 2DEG, mettant en défaut la fonctionnalité du dispositif.

Les courbes de caractéristiques électriques  $I_D(V_{DS})$  simulées pour différents espacements inter-caissons  $D_T$ , reportées sur la Figure II.36b, présentent l'évolution du courant de drain en fonction de la tension drain-source  $V_{DS}$ . Ces caractéristiques montrent une remise en conduction du HEMT au-delà d'un certain seuil de tension  $V_{DS}$ , un effet qui est d'autant plus marqué que l'espacement inter-caissons  $D_T$  est grand. Par exemple, la remise en conduction se produit lorsque la tension  $V_{DS}$  atteint 15 V et 45 V pour des espacements  $D_T$  respectifs de 50 nm et 40 nm. Avec un espacement de 30 nm, cet effet peut se produire pour des tensions  $V_{DS}$  supérieures à 100 V.

Ce mécanisme de remise en conduction suppose un phénomène de rétablissement du 2DEG en raison de l'influence de la tension drain-source sur le potentiel de grille. Cet effet de remise en conduction est supprimé pour des valeurs de tension  $V_{DS}$  allant jusqu'à 100 V, lorsqu'une tension de grille  $V_{GS}$  de  $-1 \text{ V}$  est utilisée pour blinder le potentiel électrostatique de la grille. Il est possible alors que l'effet de remise en conduction du dispositif soit décalé au-delà de 100 V. Vérifier cette hypothèse par simulation aurait exigé un temps de calcul considérable, étant donné les durées de simulations requises à l'état bloqué. À titre d'exemple, seules les simulations avec  $V_{GS}$  égale à 0 V, pour des distances  $D_T$  égale à 40 nm et 30 nm sont parvenues à leur terme avec des durées respectives de 389 heures et 35 heures. Cependant, placer une tension négative sur la grille est parfois utile pour réaliser des surblocages pour certaines applications.

Les niveaux de courant atteints sont quasiment du même ordre de grandeur que ceux observés pour le mode passant avec un ratio  $I_{ON}/I_{OFF}$  proche de 100 pour un espacement  $D_T$  de 50 nm. Or la valeur attendue du ratio  $I_{ON}/I_{OFF}$  pour ce genre de composant est plutôt comprise entre  $10^6$  et  $10^{10}$ .

Les caractéristiques électriques simulées révèlent que le composant ne parvient pas à respecter les critères de blocage attendus de la structure, c'est-à-dire l'incapacité de bloquer le courant à travers le canal 2DEG lorsque la tension  $V_{GS}$  est maintenue à zéro. Une étude sera présentée pour comprendre les mécanismes à l'origine de la remise en conduction. L'objectif sera de réduire son effet de telle sorte que le courant  $I_{OFF}$  soit acceptable.



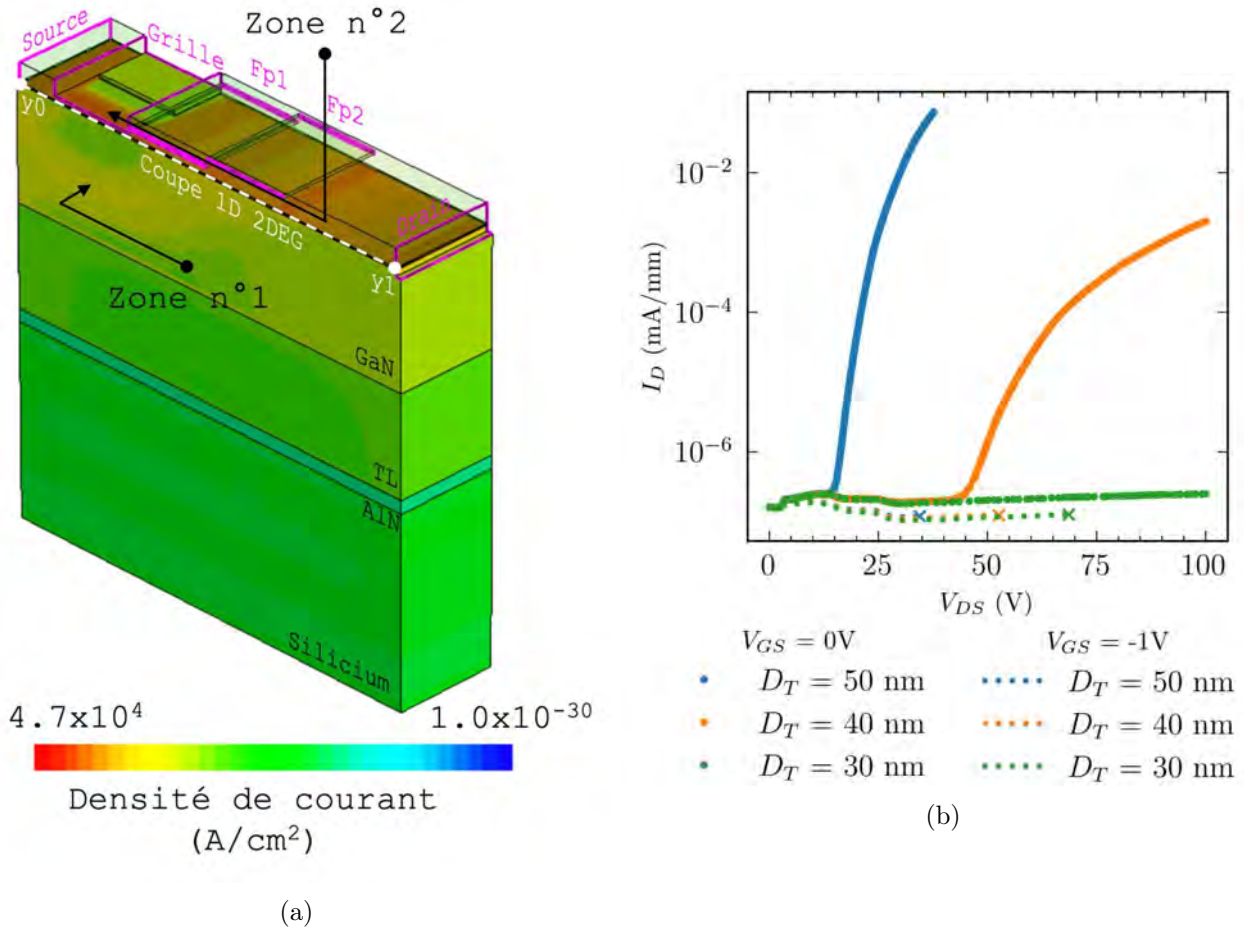


FIGURE II.36 – (a) Densité de courant simulée dans une demi-cellule avec un espacement intercellulaire  $D_T$  de 50 nm à  $V_{DS} = 30$  V et  $V_{GS} = 0$  V, et (b) caractéristiques  $I_D(V_{DS})$  simulées pour des espacements intercellulaires  $D_T$  de 30 nm, 40 nm et 50 nm à  $V_{GS} = 0$  V et  $V_{GS} = -1$  V

### 3.3.1 Rétablissement du 2DEG en fonction de la tension drain-source $V_{DS}$

Le passage du courant à travers le gaz 2DEG implique forcément un rétablissement partiel du 2DEG sous la grille. Pour examiner ce phénomène, nous avons extrait de la simulation précédente l'évolution de la concentration du 2DEG suivant la coupe ( $y_0$ ;  $y_1$ ) traversant le HEMT de la source vers le drain (Figure II.36a), en fonction de la tension drain-source  $V_{DS}$ . La Figure II.37 illustre ces variations.

Aux conditions d'équilibre thermodynamique, la concentration du 2DEG présente des valeurs attendues. Cependant, lorsque la tension  $V_{DS}$  augmente, nous pouvons faire les deux observations suivantes :

- Entre les positions  $Y = 2\mu\text{m}$  et  $Y = 5\mu\text{m}$  sous les plaques de champ, la concentration diminue en raison du pincement du canal induit par le champ électrique important généré à cet endroit. Cette tendance est de plus en plus marquée à mesure que la tension  $V_{DS}$  augmente [121] et, dans notre cas, est vérifiée jusqu'à 20 V.



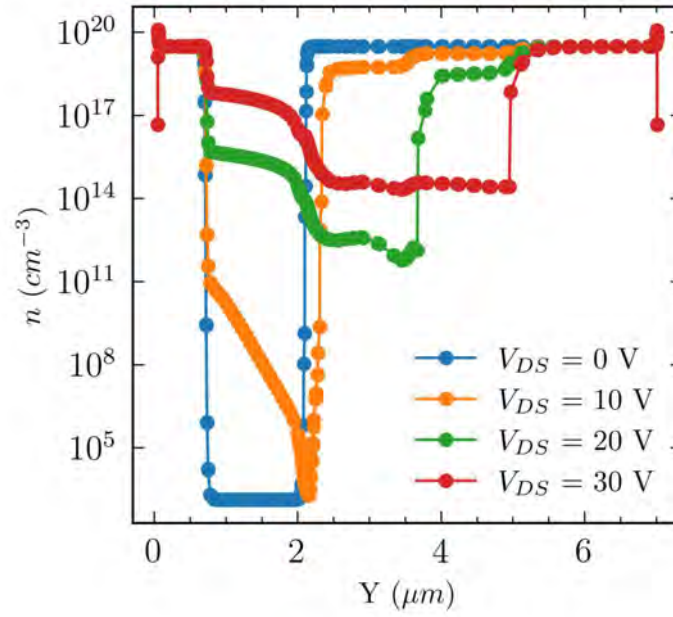


FIGURE II.37 – Concentration électronique  $n$  du 2DEG simulée le long de la coupe  $(y_0; y_1)$  avec un espacement intercellulaire  $D_T$  de 50 nm en fonction de  $V_{DS}$  pour  $V_{GS} = 0 \text{ V}$

- Pour des positions  $Y$  comprises entre  $0,6 \mu\text{m}$  et  $2 \mu\text{m}$ , la concentration du 2DEG sous la grille croît significativement à mesure que  $V_{DS}$  augmente, atteignant des valeurs comprises entre  $3,6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  et  $6,72 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . Ces valeurs sont suffisamment élevées pour permettre la circulation d'un courant important.

Par ailleurs, la valeur de la concentration électronique sous la grille semble influencer le champ électrique sous les plaques de champ. À partir de  $V_{DS}$  égale 20 V, la dynamique du champ électrique diminue. Cette interaction contribue donc également à une augmentation de la concentration du 2DEG dans cette zone.

### 3.3.2 Influence du contact de grille sur le rétablissement du 2DEG

Pour expliquer le rétablissement du 2DEG lorsque la tension drain-source  $V_{DS}$  augmente, nous avons comparé l'effet du type de contact de grille, ohmique ou Schottky, en utilisant la même structure mais en excluant les plaques de champ afin d'isoler leur effet sur la concentration du 2DEG. La Figure II.38 illustre les densités de courant selon le contact de grille choisi. Dans le cas du contact de grille ohmique (Figure II.38a), peu de courant circule à travers le 2DEG pour une tension drain-source  $V_{DS}$  de 200 V. Pour un contact Schottky (Figure II.38b), la densité dans le canal 2DEG est bien plus importante dans la région de grille pour une tension  $V_{DS}$  identique.

La densité de courant dans les couches inférieures pour les deux contacts de grille est du même ordre de grandeur ; cela signifie que le courant rétabli circule majoritairement à travers le canal 2DEG.

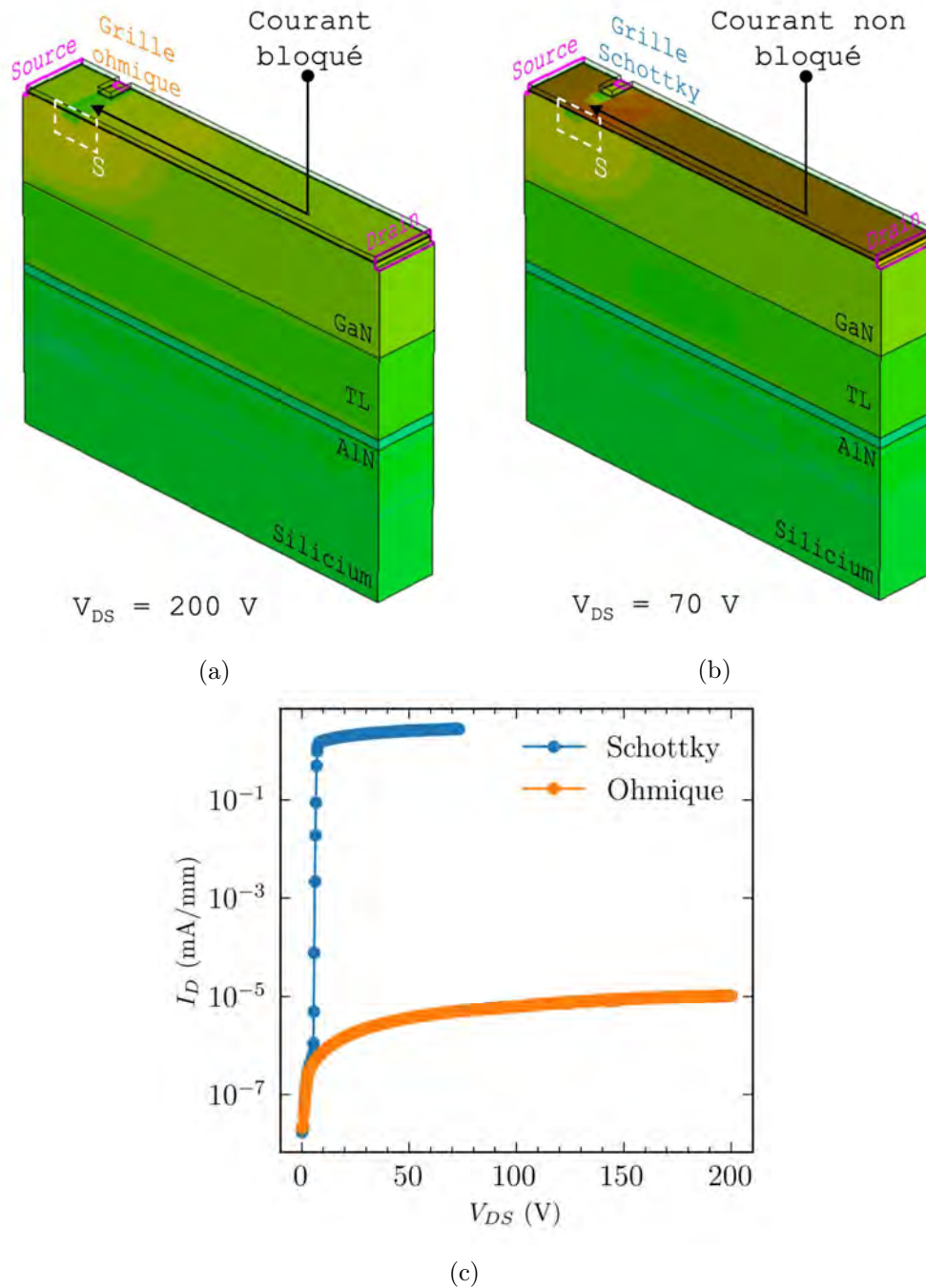


FIGURE II.38 – Densité de courant simulée dans une demi-cellule sans plaque de champ avec un espacement intercellulaire  $D_T$  de 50 nm, une longueur des caissons  $l_T$  de 300 nm à  $V_{GS} = 0 \text{ V}$  avec (a) un contact de grille ohmique et (b) un contact de grille Schottky

Les caractéristiques  $I_D(V_{DS})$  obtenues et présentées sur la Figure II.38c mettent clairement en évidence la différence de performance des deux types de contact en terme de courant. L'évolution du courant avec un contact de grille ohmique ne présente pas de seuil contrairement à celui avec un contact de grille Schottky.

Pour le contact ohmique, le niveau de courant ne semble être conditionné que par les caractéristiques physiques des couches inférieures du dispositif. Le ratio  $I_{ON}/I_{OFF}$  atteint, supérieur à  $10^6$ , est par ailleurs dans la plage de valeur acceptable.

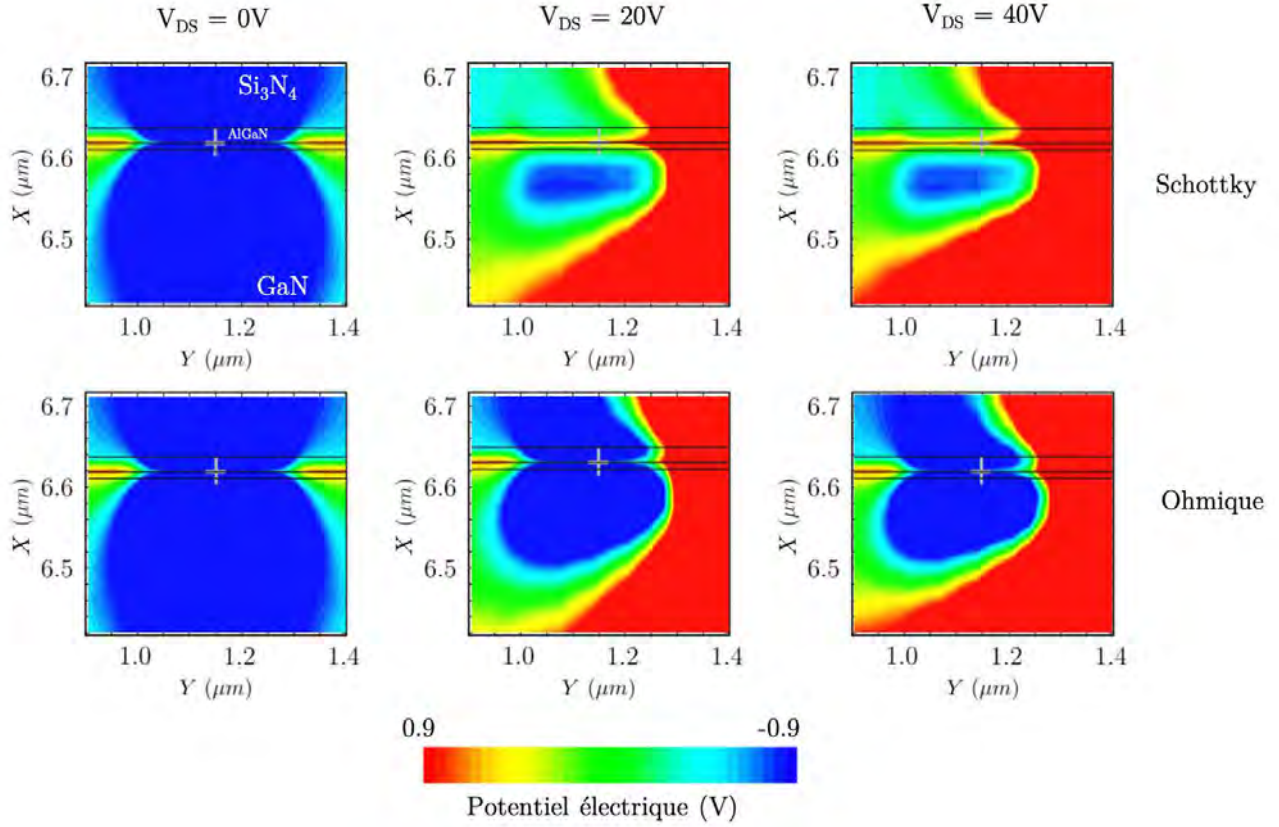


FIGURE II.39 – Observation des potentiels électriques simulés avec un contact de grille Schottky et ohmique dans la section de coupe  $S$  pour  $V_{DS}$  égale à 0 V, 20 V et 40 V

Le blocage du canal 2DEG par l'utilisation d'un contact ohmique valide l'hypothèse selon laquelle le potentiel de la grille évolue avec la tension  $V_{DS}$  lorsque le contrôle de ce potentiel est insuffisant.

L'évolution des potentiels dans la section de coupe  $S$  au centre de la cellule entre deux caissons (représentée par une fenêtre en pointillés blancs sur la Figure II.38) est illustrée sur la Figure II.39 pour des tensions  $V_{DS}$  de 0 V, 20 V et 40 V, et pour les deux contacts de grille, Schottky et ohmique.

À l'équilibre thermodynamique, à  $V_{DS} = 0$  V, les potentiels sont identiques et forment une région de potentiel négatif inférieur à  $-0,9$  V, de part et d'autre du canal 2DEG de grille dont le centre est repéré par une croix. Pour des tensions  $V_{DS}$  supérieures à 0 V, le potentiel de drain se développe rapidement en direction de la grille, modifiant ainsi la distribution spatiale du potentiel de cette dernière.

Initialement, les potentiels varient brusquement avec la tension  $V_{DS}$ , tant que la tension  $V_{DS}$  est en-dessous du seuil de rétablissement, puis n'évolue que très légèrement au-delà de 20 V. Néanmoins, la distribution du potentiel diffère selon le type de contact utilisé.

Avec un contact ohmique, la distribution du potentiel de grille est peu influencée par celle du drain et le potentiel du canal le long de la grille n'évolue que très légèrement avec une valeur qui reste négative.

En revanche, avec un contact Schottky, le potentiel augmente de manière homogène dans toute la région montrant le caractère flottant du potentiel électrique de la structure de grille. Le potentiel qui devient positif le long de la grille peut expliquer la formation du 2DEG.

Or, le choix du contact ohmique pour la structure a déjà été écarté lors de l'évaluation de l'état passant du composant afin de limiter les courants de grille. Pour obtenir un blocage efficace du composant en utilisant un contact Schottky, il devient donc impératif de trouver une solution structurelle permettant de blinder le potentiel électrique autour de la grille sous une tension de grille  $V_{GS}$  maintenue à zéro volt quelle que soit l'augmentation de la tension  $V_{DS}$ .

### 3.4 Optimisation de l'état bloqué par segmentation de la grille

L'objet de cette section est de déterminer les facteurs qui influencent la sensibilité électrique du potentiel de la région de grille vis-à-vis de la tension entre le drain et la source  $V_{DS}$  qui joue un rôle dans le rétablissement du 2DEG. Nous avons donc décidé de segmenter la structure de grille en plusieurs portions et d'observer comment cette segmentation affecte les potentiels électriques et la concentration du 2DEG. Cette démarche vise à déterminer quelle portion de la grille est la moins sensible aux variations de la tension drain-source  $V_{DS}$  avec pour objectif de prévenir la remise en conduction du dispositif.

#### 3.4.1 Segmentation

La Figure II.40 illustre la méthodologie que nous avons employée pour la segmentation de la structure de grille. Cette segmentation a été effectuée de manière à obtenir une longueur identique de l'ensemble des segments afin de garder une longueur de grille  $L_G$  fixe. Ainsi, nous obtenons une alternance de régions P-GaN/2DEG qui s'étendent le long d'une grille de  $2\ \mu\text{m}$  de longueur. En divisant la structure de grille par un nombre impair, nous nous assurons que la grille débute et termine par une région P-GaN. Par exemple, en subdivisant la grille par 1, 3 et 5, nous obtenons respectivement une grille avec des segments de longueur  $2\ \mu\text{m}$ ,  $0,6\ \mu\text{m}$  et  $0,4\ \mu\text{m}$  avec 1, 2 et 3 caissons P-GaN.

Cette figure présente également les résultats de simulation des densités de courant à tension  $V_{DS} = 20\ \text{V}$  en fonction de la segmentation de grille. Parmi les trois structures, celle avec 3 caissons permet de réduire significativement le courant dans le canal 2DEG. Les caractéristiques de courant de drain  $I_D$  en fonction de la tension  $V_{DS}$  sont reportés sur la Figure II.41, la structure avec un caisson servant de référence.

L'ajout d'un deuxième caisson de grille du côté drain avait pour hypothèse d'absorber le champ électrique entre ce caisson et le drain, servant ainsi de barrière de potentiel pour le caisson en amont du côté source. Cela devait prévenir toute modification des potentiels et donc le rétablissement du 2DEG. Cependant la remise en conduction du HEMT reste toujours valable malgré l'ajout de ce deuxième caisson, n'entraînant donc quasiment aucun changement par rapport à la structure de référence.

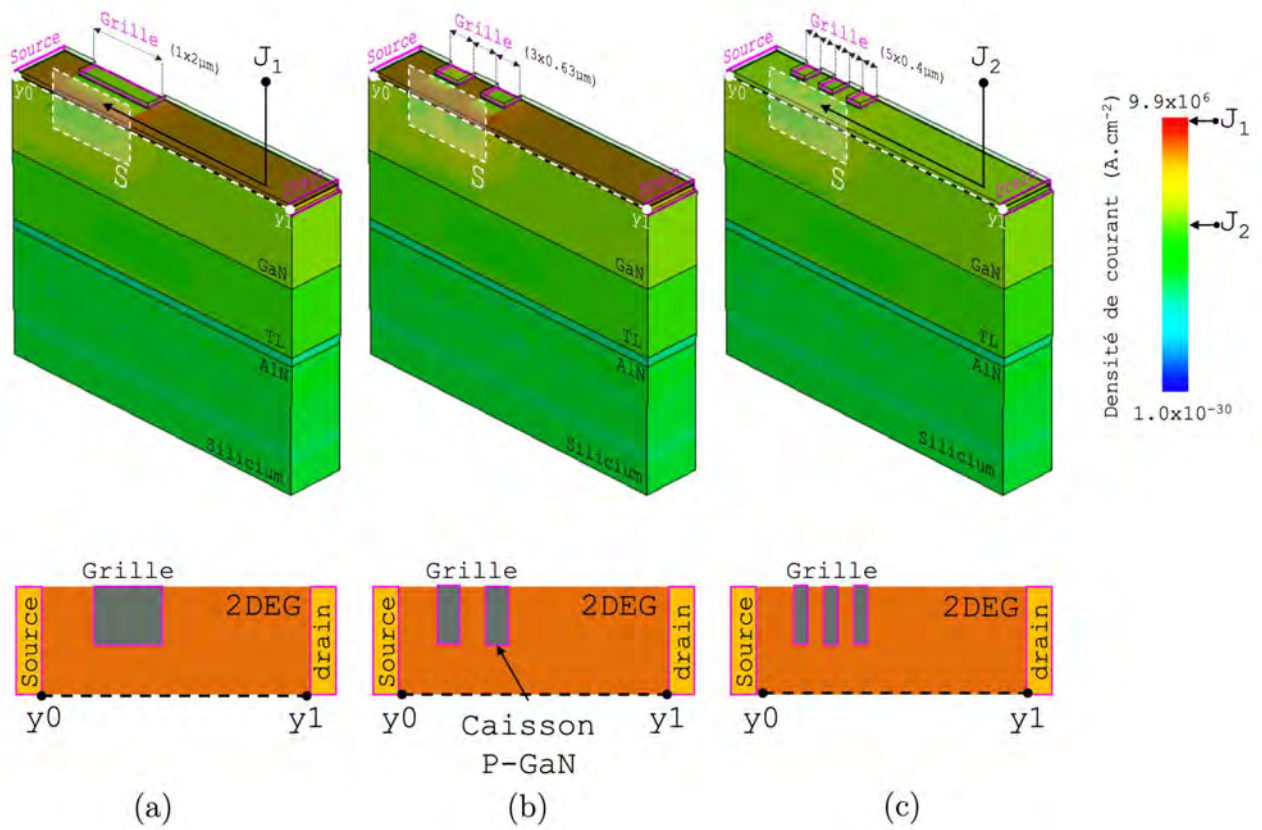


FIGURE II.40 – Densité de courant simulée dans une demi-cellule sans plaque de champ, avec un espacement intercellulaire  $D_T$  de 50 nm à  $V_{DS} = 20$  V avec une grille Schottky de 2  $\mu\text{m}$  contenant (a) 1, (b) 2 et (c) 3 caisson(s) P-GaN de longueur  $l_T$  respective de 2  $\mu\text{m}$ , 0,63  $\mu\text{m}$  et 0,4  $\mu\text{m}$

En revanche, l'ajout d'un troisième caisson permet une augmentation significative de la tension de blocage jusqu'à au moins 30 V. L'effet de la segmentation induit des mécanismes plus complexes, nécessitant une analyse approfondie pour comprendre les mécanismes sous-jacents du rétablissement du 2DEG.

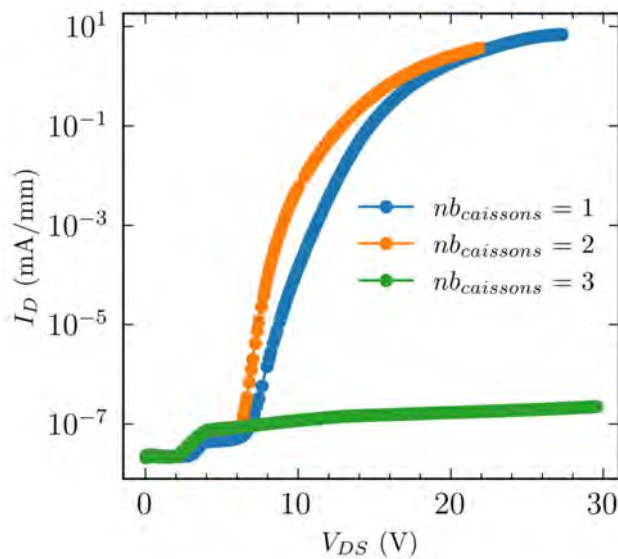


FIGURE II.41 – Caractéristiques  $I_D(V_{DS})$  simulées pour un espacement intercellulaire  $D_T$  de 50 nm à  $V_{GS} = 0$  V, avec 1, 2 et 3 caissons répartis uniformément le long d'une grille Schottky de 2  $\mu\text{m}$



### 3.4.2 Analyse des potentiels électriques et concentrations du 2DEG en fonction de la segmentation

Le potentiel électrique simulé dans la section de coupe  $S$  pour la structure de référence et pour celles segmentées avec 2 et 3 caissons P-GaN est présenté sur la Figure II.42 à  $V_{DS} = 20$  V.

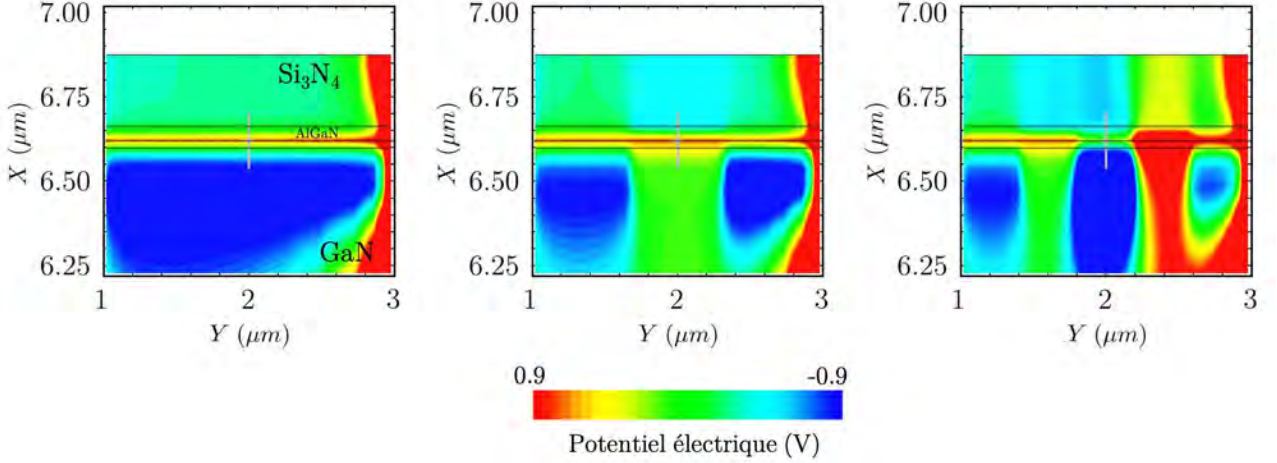


FIGURE II.42 – Observation des potentiels électriques simulés dans la section de coupe  $S$  le long de la grille à  $V_{DS} = 20$  V et  $V_{GS} = 0$  V, avec 1, 2 et 3 caissons P-GaN

La structure de référence et celle comportant deux caissons P-GaN présentent un canal 2DEG avec un potentiel élevé le long de la grille alors que le canal 2DEG de la structure avec 3 segments présente un changement abrupt du potentiel au niveau du caisson central localisé par la croix. Cette structure de HEMT ne conduisant pas de courant, le potentiel simulé légèrement négatif permettrait la déplétion du 2DEG.

Pour confirmer cette observation, nous avons extrait les valeurs du niveau d'énergie de la bande de conduction ( $E_{BC}$ ), du quasi-niveau de Fermi des électrons ( $E_{Fn}$ ) et de la concentration électronique ( $n$ ) du canal 2DEG le long de la coupe longitudinale traversant le canal comme illustré sur la Figure II.43.

Le comportement du quasi-niveau de Fermi est différent en fonction du nombre de caissons ajoutés. Lorsqu'un caisson est présent, le niveau subit une légère diminution le long de la grille, positionnée entre  $Y = 1$   $\mu\text{m}$  et  $Y = 3$   $\mu\text{m}$ . Avec deux caissons, il est moins sensible à la tension  $V_{DS}$ , restant relativement plat le long de la grille. Finalement, avec trois caissons, celui-ci évolue par palier. Dans tous les cas, le quasi-niveau de Fermi subit une variation importante vers la fin de la grille, en relation avec le champ électrique généré entre la grille et le drain. Dans la configuration à trois caissons, ce champ électrique est partagé entre les deux derniers caissons.

Le niveau d'énergie de la bande de conduction  $E_{BC}$ , qui reflète les potentiels électriques, montre des variations légères dans les régions correspondant à la position des caissons P-GaN pour les structures comportant 1 et 2 caissons. En revanche, le niveau  $E_{BC}$  subit des variations plus marquées dans la configuration à trois caissons au niveau des positions des 2ème et 3ème caissons, passant par deux fois au-dessus du quasi-niveau de Fermi.

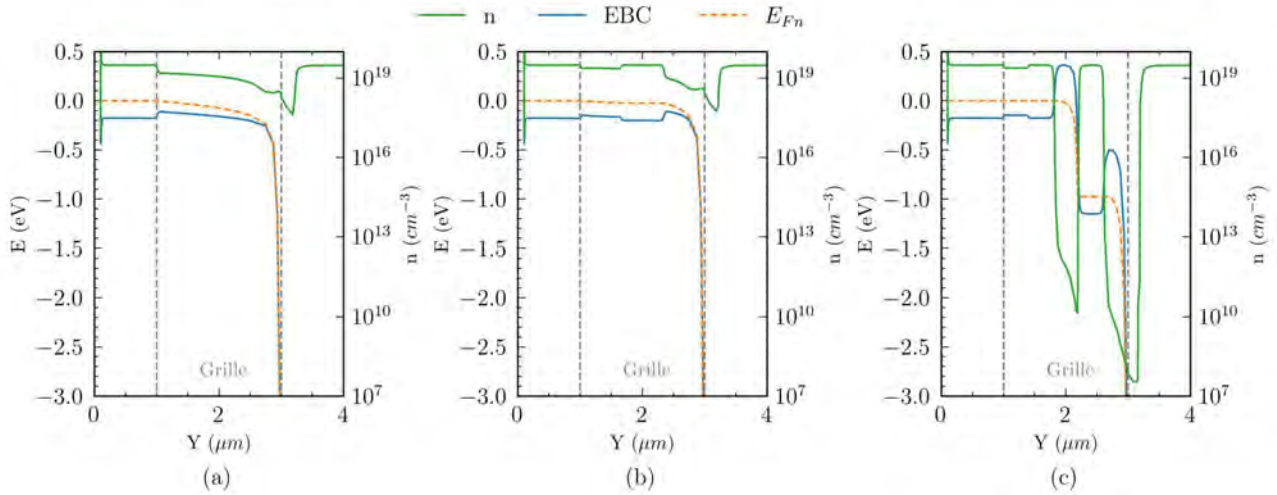


FIGURE II.43 – Variation de la concentration électronique du 2DEG  $n$ , du niveau de Fermi  $E_{Fn}$  le long de la grille selon la coupe ( $y_0; y_1$ ) pour des structures à 1, 2 et 3 caissons (a, b, c respectivement) à  $V_{DS} = 20 \text{ V}$  et  $V_{GS} = 0 \text{ V}$

La lecture de ces courbes valide le mécanisme bien établi de la formation du 2DEG lorsque le niveau EBC est inférieur à celui du niveau de Fermi. Ces observations valident aussi l'absence du 2DEG dans la région centrale de la structure à 3 caissons.

Cependant, il est important de noter qu'il n'y a également pas de 2DEG au niveau du dernier caisson de cette structure malgré un potentiel électrique élevé, ce qui indique que le potentiel électrique seul ne permet pas de déterminer le blocage. Il est donc nécessaire de regarder le potentiel électrique ou le niveau EBC par rapport au quasi-niveau de Fermi.

La Figure II.44 illustre les variations d'EBC et d' $E_{Fn}$  à  $V_{DS} = 20 \text{ V}$  par rapport aux conditions d'équilibre thermodynamique au niveau de la coupe transversale de la section  $S$ , à des positions  $Y$  égales à 1,2  $\mu\text{m}$ , 2  $\mu\text{m}$  et 2  $\mu\text{m}$  pour une structure à 3 caissons. L'objectif est d'évaluer la sensibilité de ces grandeurs vis-à-vis de la tension  $V_{DS}$  sur ces portions spécifiques.

Si l'on considère le premier caisson (Figure II.44a), le quasi niveau de Fermi  $E_{Fn}$  reste stable dans la zone de formation du 2DEG quand  $V_{DS}$  varie de 0 V à 20 V. Le niveau d'énergie de la bande de conduction quant à lui diminue de façon homogène le long de la coupe d'environ  $-0,5 \text{ eV}$ . Le décalage de EBC en-dessous du quasi niveau de Fermi conduit au rétablissement du 2DEG.

Il est à noter que le niveau EBC à l'équilibre dépend des paramètres de conception, notamment du dopage des caissons et de l'espacement inter-caissons, comme détaillé dans la section précédente. Ajuster la hauteur de EBC tout en évaluant son impact sur les performances électriques du composant est tout à fait envisageable.

Dans le cas du deuxième caisson (Figure II.44b), la variation du niveau EBC par rapport au quasi-niveau de Fermi est plus modérée, d'environ 0,1 eV dans la zone du 2DEG : cette variation ne suffit pas à le rétablir. Le quasi-niveau de Fermi demeure indépendant de la tension  $V_{DS}$ . Néanmoins, le niveau EBC peut continuer de diminuer si l'on augmente  $V_{DS}$  : pour confirmer l'efficacité du blindage électrique dans cette région de grille, des simulations à des tensions plus élevées seraient donc nécessaires.

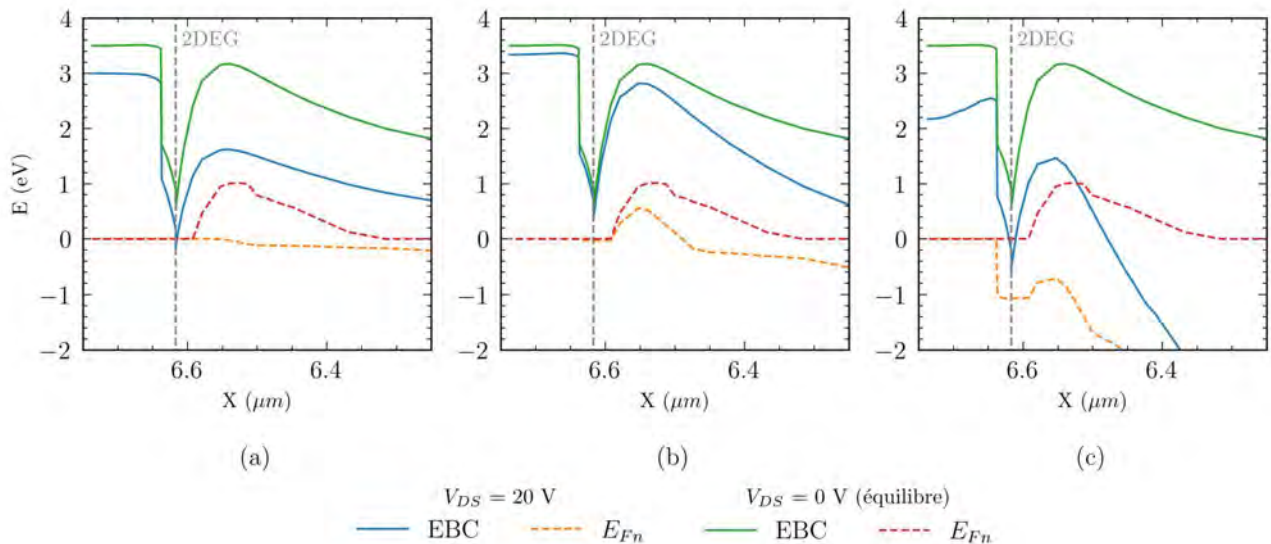


FIGURE II.44 – Observation des potentiels électriques simulés dans la section de coupe  $S$  le long de la grille à  $V_{DS} = 20$  V et  $V_{DS} = 0$  V, avec 1, 2 et 3 caissons P-GaN (a, b, c respectivement), pour  $V_G = 0$  V

Dans la troisième région (Figure II.44c), l'écart entre EBC et  $E_{Fn}$  demeure inchangé quelle que soit  $V_{DS}$ , ce qui explique la très faible concentration électronique dans cette partie de la grille.

Il convient de noter que ces résultats sont spécifiques au blocage de la grille seule. Les plaques de champ devraient contribuer à limiter le champ électrique au niveau des 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> caissons, réduisant ainsi les variations de potentiel dans toute la structure de la grille. À partir de  $V_{DS} = 30$  V, les potentiels ne varient déjà presque plus dans la grille, ce qui permet d'envisager un maintien du blocage du composant pour des tensions  $V_{DS}$  importantes.

## 4 Conclusion

Dans le cadre de notre travail de conception, nous avons introduit une nouvelle structure pour un HEMT GaN "normally-off" qui inclut une grille à barrière P-GaN composée de caissons P-GaN nano-structurés. Elle permet de dépléter latéralement le 2DEG avec un fonctionnement en mode JFET. Notre HEMT possède une structure multicellulaire ; nous avons déterminé les paramètres optimaux pour dépléter le 2DEG sous la grille, à l'équilibre thermodynamique. Ces paramètres incluent les dimensions des caissons P-GaN, leur dopage et leur espacement.

Ensuite, à l'aide de simulations [2D] et [3D], nous avons validé le fonctionnement de notre dispositif, afin d'obtenir les deux états de fonctionnement attendus d'un transistor "normally-off". Plus précisément, nous avons dédié une section à l'état passant pour confirmer la conduction du HEMT par l'application d'une tension électrique sur la grille. Nos résultats montrent que la tension de seuil est ajustable en fonction des paramètres de conception de la cellule, atteignant



jusqu'à 3V avec des contacts ohmiques ou Schottky. Nous avons également étudié deux types de contacts de grille, Schottky et ohmique, révélant un compromis entre la tension de seuil et la résistance du canal, particulièrement avec un contact Schottky.

Dans l'étude de l'état bloqué, nous avons observé un mécanisme de rétablissement du 2DEG. Lorsque la tension de drain-source ( $V_{DS}$ ) est appliquée, le potentiel à l'intérieur des caissons P-GaN augmente, ce qui diminue l'effet de champ entre les caissons et permet la réapparition du 2DEG. Nous avons constaté que l'utilisation d'un contact ohmique et/ou d'une tension négative sur la grille peut efficacement contrôler le potentiel des caissons P-GaN.

Enfin, nous avons réalisé une étude de conception visant à améliorer le blocage en utilisant un phénomène d'auto-blindage entre les caissons P-GaN. Cette approche consiste à diviser la grille en trois parties le long de l'axe source-drain, isolant ainsi électriquement le potentiel du caisson central responsable de la déplétion du 2DEG. Cette solution garantit le blocage de la structure, indépendamment du type de contact de grille utilisé, ouvrant la voie à l'utilisation d'un contact MOS.

---

## Chapitre III

# Développement technologique pour la fabrication d'un HEMT AlGaN/GaN normally-off à grille P-GaN nanostructurée

### Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté la conception d'une nouvelle structure de transistor à haute mobilité électronique (HEMT) normally-off. La nouveauté réside dans la création d'une succession de caissons en GaN avec un dopage de type P, disposés le long de la grille du HEMT. La présence de ces caissons P-GaN entraîne la désertion du canal où se forme le gaz bidimensionnel d'électrons (2DEG), permettant ainsi d'assurer un blocage du courant entre la source et le drain. Les caractéristiques des caissons P-GaN (position, dimension et dopage) ont une influence cruciale sur les caractéristiques électriques du dispositif tels que le courant, le blocage et la tension de seuil. Nous avons identifié les paramètres optimaux de la cellule élémentaire du HEMT, constituée d'un canal 2DEG situé entre deux caissons P-GaN, afin de garantir la fonctionnalité normally-off, ce qui représente un défi de fabrication étant donné les dimensions requises. Ces caissons sont en effet caractérisés par des dimensions nanométriques : une profondeur de 100 nm, une largeur minimale comprise entre 30 nm et 60 nm, en fonction des conditions de dopage et du taux d'aluminium dans la barrière AlGaN, ainsi qu'une longueur minimale de 200 nm. La largeur des caissons et leur espacement sont des paramètres critiques vis-à-vis de la fonctionnalité globale de la structure. Pour maximiser le courant, il est important de minimiser le plus possible les dimensions des caissons. Quant à l'espacement, il caractérise la largeur de la région désertée et donc la largeur du canal de grille, avec des valeurs allant de 40 nm à 80 nm.

Ce chapitre se penche sur les axes de développement technologique que nous avons choisis pour la fabrication du HEMT. Nous aborderons en détail la stratégie de réalisation ainsi que les différentes étapes du processus de fabrication du HEMT à grille nano-structurée en P-GaN. Nous discuterons plus particulièrement de la réalisation des nano-caissons P-GaN qui constituent le cœur de ce concept. Nous mettrons en lumière les défis rencontrés et les solutions mises en place pour les surmonter.

## 1 La fabrication des caissons P-GaN

La réalisation des caissons P-GaN le long de la grille du HEMT passe par le développement de trois étapes principales comme illustré sur la Figure III.1 : une première étape de lithographie permet de définir les zones où se situeront les caissons P-GaN (a), suivie par une étape de gravure (b) qui permet de créer les puits dans lesquels s'effectuera la croissance épitaxiale de la couche P-GaN (c), dernière étape de la mise en forme de la grille. Ces étapes nécessitent des techniques spécifiques qui doivent répondre aux exigences structurales du HEMT :

- La lithographie électronique pour la définition des caissons P-GaN de dimensions nanométriques, avec l'utilisation d'un masque de résine électro-sensible à haute résolution,
- La gravure des couches AlGaIn et GaN par gravure ionique réactive (RIE),
- L'épitaxie localisée afin de faire croître le GaN dopé au magnésium dans les puits de grille. L'utilisation de l'épitaxie par jets moléculaires (EJM) avec un masque diélectrique permettra un contrôle précis de la croissance, afin d'obtenir des couches GaN avec une meilleure qualité cristalline et un dopage P plus élevé que pour celles obtenues par implantation ionique.

Les étapes de gravure et d'épitaxie localisée nécessitent chacune une étape de lithographie pour définir respectivement le masque de gravure et le masque de reprise d'épitaxie. Nous avons opté pour un procédé auto-aligné avec l'utilisation d'un seul et même masque pour ces deux étapes, ce qui permet d'obtenir une meilleure définition des caissons P-GaN. Nous avons choisi la résine électro-sensible HSQ, classiquement utilisée en lithographie électronique, qui, par ses propriétés diélectriques après avoir été soumise au faisceau d'électrons, permet de servir de masque pour l'épitaxie localisée du GaN.

Afin de développer ces différentes étapes pour la réalisation de la grille du HEMT, nous avons utilisé des plaques épitaxiées par MOCVD sur substrat silicium 8" comprenant : une couche de nucléation, un réseau d'adaptation de maille, une couche de GaN d'une épaisseur de 2  $\mu\text{m}$ , une couche barrière d'AlGaIn d'une épaisseur de 20 nm avec un taux d'aluminium de 20% et enfin une couche de passivation in-situ de nitrure de silicium de 10 nm. Afin d'utiliser les différents équipements de notre salle blanche prévus majoritairement pour des substrats de 4 pouces et le bâti de croissance EJM configuré pour du 2 pouces de diamètre, les plaques ont été découpées en échantillons de 36 mm par 36 mm de côté.

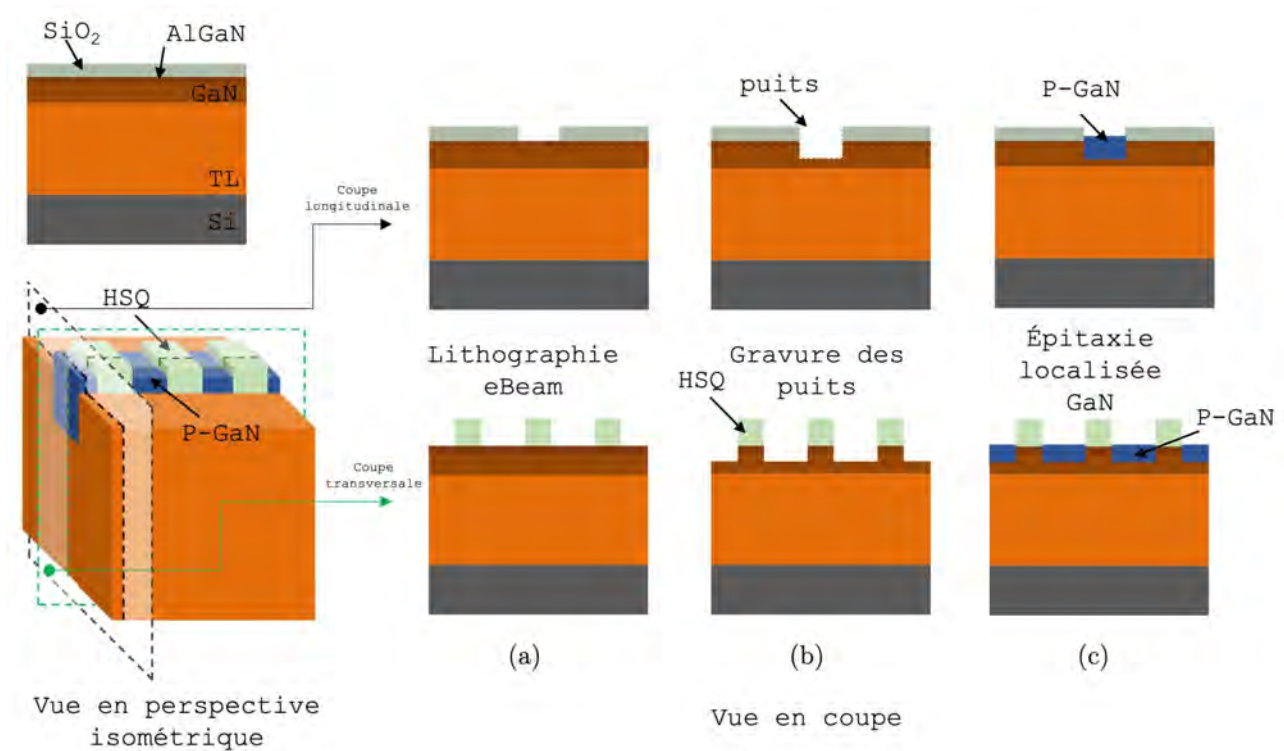


FIGURE III.1 – Description schématique (vues en perspective et en coupe) des trois principales étapes de réalisation de la grille nanostructurée à caissons P-GaN

## 1.1 Lithographie électronique de la résine HSQ

La lithographie électronique est une technique largement utilisée dans la fabrication de dispositifs électroniques pour définir des motifs avec des résolutions nanométriques. Elle consiste à utiliser un faisceau d'électrons pour définir des motifs dans une couche de résine électro-sensible. Notre objectif étant de structurer un masque permettant de supporter la gravure des puits et l'épitaxie localisée du GaN, nous avons choisi d'utiliser la résine HSQ (Hydrogen Silsesquioxane) pour ses propriétés physico-chimiques permettant de résister aux plasmas chlorés utilisés pour la gravure des puits de grille [122, 123] mais aussi pour servir de masque de diélectrique lors de la reprise d'épitaxie du P-GaN.

### 1.1.1 Propriétés de la résine HSQ

La résine HSQ est un polymère inorganique avec une formule  $(HSiO_{3/2})_{2n}$ . La structure de la résine est formée d'un réseau tridimensionnel poreux et les liaisons Si-H lui confèrent une constante diélectrique faible [124]. Lorsqu'elle est exposée à un faisceau électronique, les liaisons Si-H se brisent pour former des liaisons Si-OH [125, 126]. Ce processus transforme la résine en un matériau riche en oxyde de silicium, ce qui la rend inerte dans les solutions et développeurs à base de tetraméthylammonium hydroxide (TMAH).

Cependant, la résine HSQ étant négative (la résine exposée reste sur l'échantillon après l'étape de développement), son utilisation seule en tant que masque pour l'épitaxie localisée est inadaptée car cela impliquerait l'exposition de tout le substrat sauf à l'emplacement des puits et

cela induirait des temps d'exposition trop longs. Nous avons donc mis en place une lithographie en deux phases. La première permet de définir l'ouverture de la grille dans une couche de  $SiO_2$  préalablement déposée et gravée par RIE dans un plasma fluoré, en utilisant la lithographie UV sur une résine photosensible ECI de 1,1  $\mu m$  d'épaisseur. La deuxième phase permet de réaliser uniquement les murs des caissons de grille, qui seront définis par la lithographie électronique de la résine HSQ. La combinaison de ces deux étapes de lithographie permet un gain de temps d'exposition des résines très significatif.

Le temps d'exposition  $T$  (en secondes) peut être estimé par la relation de proportionnalité suivante :

$$T = \frac{\sigma}{I} * S \quad (III.1)$$

avec  $\sigma$  (en  $\mu C.cm^{-2}$ ) qui représente la dose d'exposition,  $I$  (en  $\mu A$ ) le courant et  $S$  (en  $cm^2$ ) la surface à exposer.

Avec l'utilisation seule de la résine HSQ, la surface à exposer est d'environ 12,9  $cm^2$  pour seulement 0,021  $cm^2$  avec l'utilisation conjointe d'un masque HSQ et d'un masque en  $SiO_2$ , soit un rapport de temps d'exposition de 600. Dans nos essais, le temps d'exposition pour une plaque est d'environ 45 min, ce qui confirme l'efficacité de la procédure que nous avons développée.

### 1.1.2 Caractéristiques du dépôt de la résine HSQ

Nous avons dans un premier temps évalué la capacité de la résine HSQ à remplir des ouvertures de grille de largeur micrométrique et de profondeur nanométrique : nous avons pour cela réalisé des tranchées dans un substrat de silicium. L'épaisseur de la résine dans la tranchée dépend des paramètres de dépôt ainsi que de l'épaisseur initiale de la tranchée. La résine est préalablement diluée dans un solvant MIBK (Méthylisobutylcétone) avec un ratio de 1 :1, avant d'être déposée à la tournette pendant une minute, suivi d'un recuit de 1 min sur plaque chauffante à 80 °C. Son épaisseur est définie par la vitesse de rotation de la tournette. À une vitesse de 3000  $tr \cdot min^{-1}$ , nous avons obtenu une épaisseur de 200 nm, tandis qu'à 5000  $tr \cdot min^{-1}$ , nous avons obtenu 150 nm. À noter qu'avant le dépôt de la résine HSQ, la surface de l'échantillon a été traitée avec un dépôt de HMDS (hexméthylsilazane) pour améliorer l'adhérence de la résine. Une coupe FIB réalisée dans la tranchée permet d'apprécier le pouvoir planarisant de la résine [127] (Figure III.2) pour un dépôt d'HSQ de 200 nm dans une tranchée de 220 nm de profondeur.

### 1.1.3 Paramètres de la lithographie électronique

Nous avons mené dans un premier temps des travaux dans la salle blanche du LAAS sur un masqueur eBeam RAITH150 de la société RAITH afin d'optimiser les paramètres d'exposition pour la résine HSQ. Cet équipement peut fonctionner à des tensions allant jusqu'à 20 kV, permettant d'obtenir des résolutions de l'ordre de 50 nm avec des résines d'une épaisseur de 50 nm.

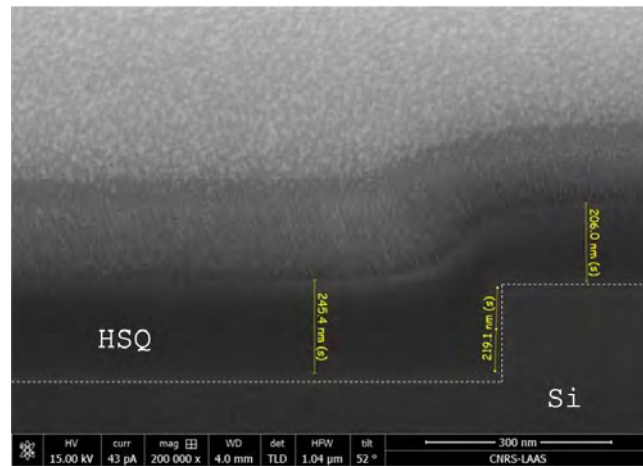


FIGURE III.2 – Observation d’une coupe FIB d’un dépôt de résine HSQ d’épaisseur 200 nm dans une tranchée Si de 220 nm de profondeur

La résine devant servir de masque pour la gravure des caissons, une couche d’une épaisseur de 200 nm est déposée sur les échantillons, sans réaliser préalablement la gravure des tranchées comme mentionné précédemment. Afin de définir la dose optimale nécessaire, nous avons réalisé une matrice de réseaux de lignes de HSQ de 100 nm de large avec un pas de 300 nm (les lignes sont donc espacées de 200 nm). Les résultats de cette lithographie sont présentés sur la Figure III.3a pour les paramètres d’exposition suivants : un courant de 116 pA, une tension de 20 kV, et un espacement entre les points de 10 nm. La dose d’exposition varie de  $350 \mu\text{C} \cdot \text{cm}^{-2}$  à  $700 \mu\text{C} \cdot \text{cm}^{-2}$  par incréments de  $50 \mu\text{C} \cdot \text{cm}^{-2}$ . Le développement de la résine s’effectue dans un bain de TMAH dilué à 25% pendant 2 minutes suivi d’un rinçage à l’eau déionisée et d’un séchage au jet d’azote ( $N_2$ ).

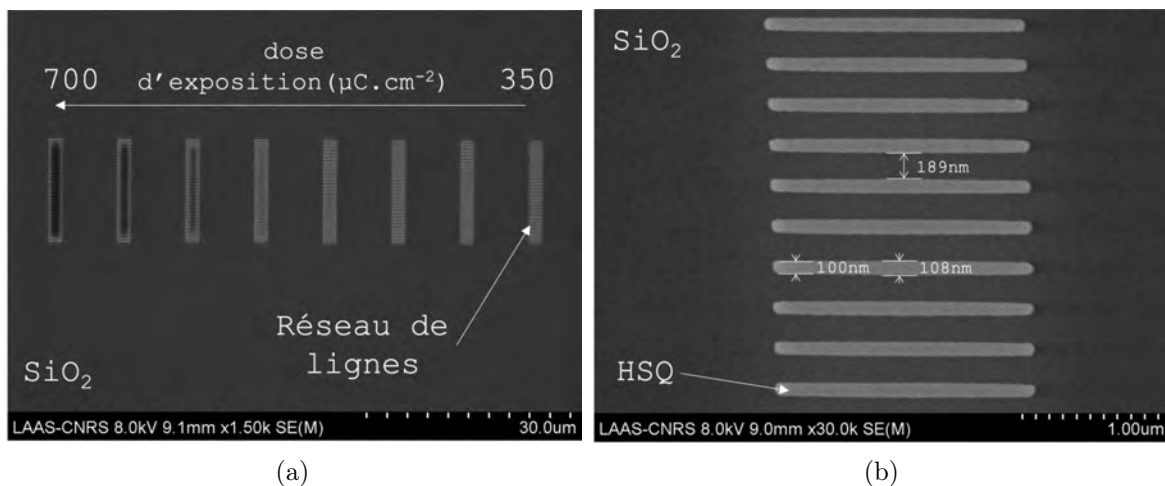


FIGURE III.3 – Observations MEB de la lithographie électronique de la résine HSQ : réseaux de lignes de 100 nm de large espacés de 200 nm (a) avec évolution de la dose d’exposition de  $350 \mu\text{C} \cdot \text{cm}^{-2}$  à  $700 \mu\text{C} \cdot \text{cm}^{-2}$  par incréments de  $50 \mu\text{C} \cdot \text{cm}^{-2}$  de droite à gauche, et (b) zoom sur un réseau de lignes avec une dose d’exposition de  $450 \mu\text{C} \cdot \text{cm}^{-2}$

Nous observons la formation d’une zone sombre au milieu des réseaux de lignes avec l’augmentation de la dose d’exposition qui est le résultat des effets de proximité liés à la rétrodiffusion du faisceau d’électrons en surface (Figure III.3a). Cette rétrodiffusion expose la résine entre les

lignes créant une fine couche de résine exposée en surface. À des doses inférieures à  $450 \mu\text{C} \cdot \text{cm}^{-2}$ , les effets de proximité sont relativement faibles. Comme le montre la Figure III.3b, cette dose permet d'obtenir partiellement les dimensions du masque de lithographie. En effet, le centre des lignes est légèrement plus large que les extrémités à cause des effets de proximité. À des doses inférieures, les lignes ne sont pas uniformes et les flancs des lignes sont mal définis.

Les dimensions requises par les paramètres optimisés de la cellule de grille du HEMT sont inférieures à celles obtenues avec ce masqueur électronique. Afin d'améliorer la résolution de la lithographie tout en conservant une épaisseur de résine suffisante, il est impératif de limiter les effets de proximité. Nous avons donc effectué la lithographie sur un masqueur eBeam plus performant, le EBPG 5000Plus RAITH du même équipementier. Cette opération a été menée au sein de la plateforme Renatech de l'IEMN à Villeneuve d'Ascq. Ce masqueur peut opérer à des tensions plus élevées allant jusqu'à 100 kV avec un courant plus important. Ces caractéristiques permettent d'obtenir des écritures plus rapides et de meilleure résolution.

La même stratégie a été adoptée afin de définir les paramètres d'exposition optimaux. Le dépôt de la résine HSQ a été réalisée au LAAS dans les mêmes conditions. Le protocole de lithographie à l'IEMN a été le suivant :

- Un dépôt de germanium d'une épaisseur de 10 nm est tout d'abord effectué par canon à électrons pour améliorer les contrastes lors de l'alignement des motifs.
- L'exposition est réalisée à différentes doses allant de  $1993 \mu\text{C} \cdot \text{cm}^{-2}$  à  $2700 \mu\text{C} \cdot \text{cm}^{-2}$  selon la nature de l'échantillon, pour un courant de 10 nA. Une étape de calibration sur un échantillon de référence présentant les mêmes caractéristiques est nécessaire, bien que l'influence de la dose sur la résolution soit faible.
- Après exposition, le développement de la résine est réalisé de manière conventionnelle dans une solution de TMAH à 25% pendant 4 minutes. Cette étape a été précédée du retrait de germanium dans une solution de peroxyde d'hydrogène  $H_2O_2$  diluée à 50%. Le développement est suivi d'un rinçage à l'eau déionisée et d'un séchage sous flux d'azote sur plaque chauffante à  $50^\circ\text{C}$ .

Le résultat de cet essai est présenté sur la Figure III.4 pour des lignes de 50 nm espacées de 300 nm. On observe une nette amélioration de la définition et de la périodicité du réseau de lignes, tandis que les effets de proximité sont absents. Il a donc été décidé par la suite d'effectuer toutes les lithographies électroniques à l'IEMN.

### 1.1.4 Optimisation de la lithographie eBeam de la résine HSQ sur AlGaIn/GaN

Les travaux précédents ont permis de mettre en avant la résine HSQ comme une solution permettant d'obtenir des motifs avec une résolution en adéquation avec notre objectif. Cependant, ces essais ont été réalisés sur des échantillons sans ouverture de grille définie pour rappel par gravure du  $SiO_2$ . La résine était donc en contact direct avec le diélectrique sur la totalité de la zone exposée.



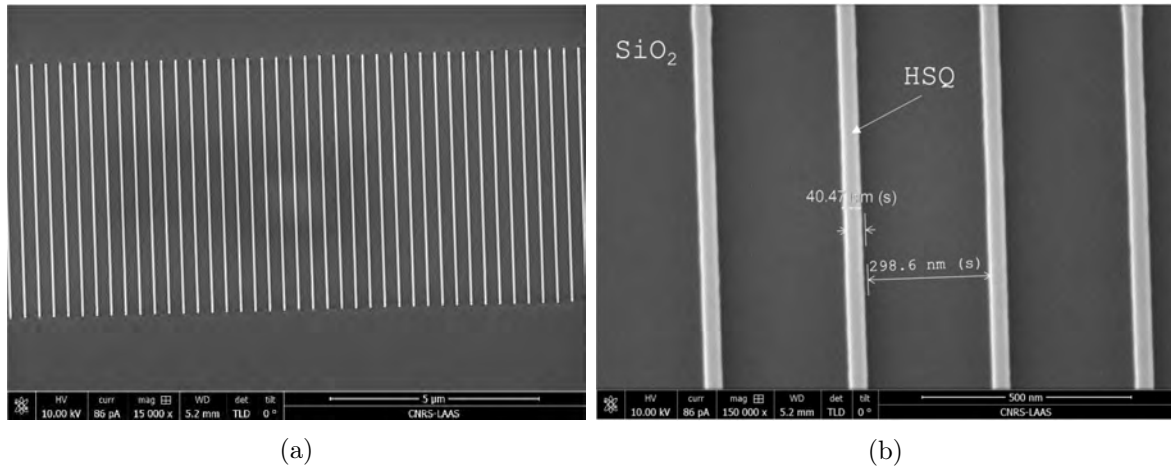


FIGURE III.4 – Observations MEB de la lithographie eBeam d’un réseau de lignes de 50 nm de large avec un pas de 350 nm dans une résine HSQ sur  $SiO_2$  avec le masqueur EBPG 5000Plus et une dose de  $2043 \mu C \cdot cm^{-2}$

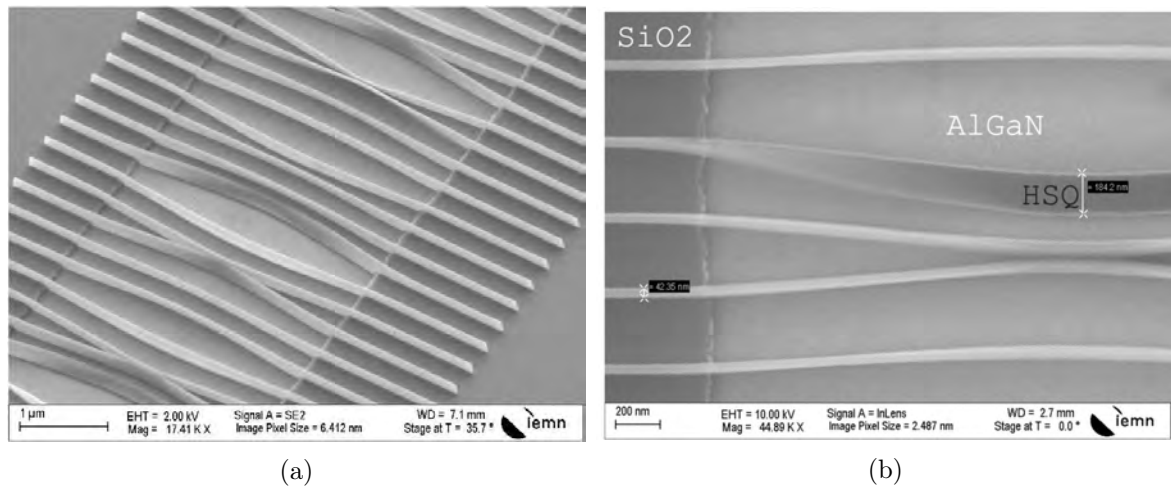


FIGURE III.5 – Observations MEB de la lithographie eBeam d’un réseau de lignes de 40 nm de large dans une résine HSQ et sur une ouverture de grille définie dans le  $SiO_2$

La Figure III.5a présente une observation MEB de la lithographie électronique d’un réseau de lignes d’une largeur de 40 nm, réalisée dans une résine HSQ d’une épaisseur de 150 nm déposée dans une ouverture de grille préalablement définie dans une couche de  $SiO_2$  de 103 nm d’épaisseur par gravure RIE. Nous pouvons observer que les lignes de HSQ se déforment à l’intérieur de l’ouverture, en contact avec l’AlGaN, et se resserrent vers le centre. Nous ne notons aucune déformation des lignes de part et d’autre de l’ouverture lorsque la résine est en contact avec le  $SiO_2$ . Cela met en évidence une meilleure adhérence de la résine HSQ sur le  $SiO_2$ , renforcée par le traitement de surface HMDS effectué avant son dépôt. Les déformations sont identifiables directement après développement de la résine. Une analyse plus détaillée des nanofils, illustrée sur la Figure III.5b, nous a permis de mesurer la hauteur de la résine à l’intérieur de l’ouverture, à savoir 184 nm dans le cas présenté. Le rapport de forme des nanofils varie donc entre 4 et 6. Ce rapport a un impact important sur la déformation des nanofils, car il amplifie les tensions superficielles pendant les étapes de rinçage à l’eau DI et séchage à l’azote.

Afin de diminuer ces tensions superficielles, T. Wahlbrink et al [128] ont démontré que l'utilisation d'un fluide supercritique au lieu de l'azote pour l'étape de séchage de la résine HSQ permettait d'obtenir des motifs en forme de lignes de 13,6 nm de large avec un rapport de forme de 14, soit deux fois plus grand qu'avec le séchage conventionnel à l'azote. En ce qui nous concerne, nous avons choisi d'effectuer un rinçage au méthanol en complément d'un séchage léger à l'azote dans le sens des lignes sur plaque chauffante. Nous avons pu ainsi obtenir des réseaux de lignes de plus de 50 nm de large, avec un espacement interligne minimal de 100 nm, sans déformations notables (voir Figure III.6).

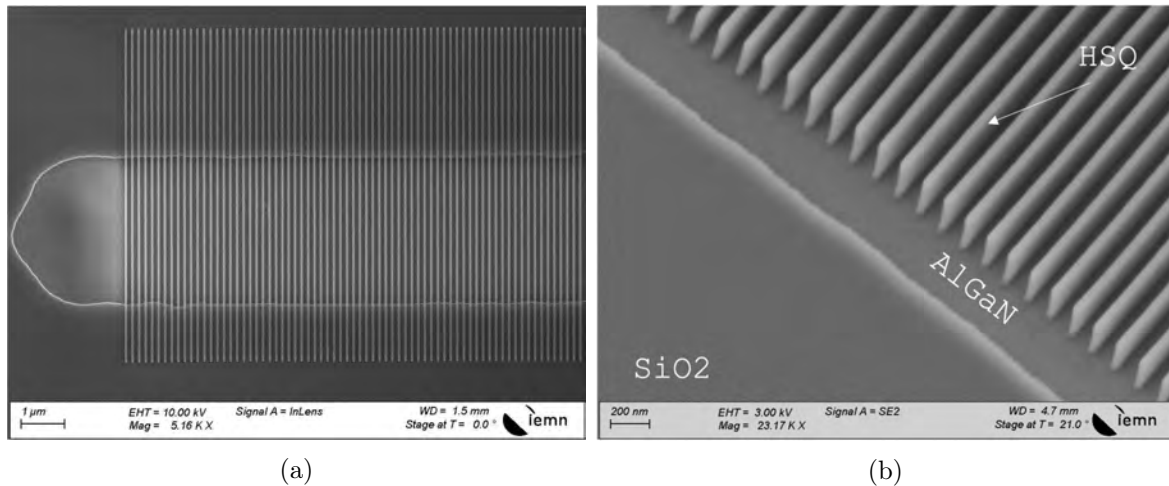


FIGURE III.6 – Observations MEB d'un réseau de lignes HSQ de 50 nm de large espacées de 300 nm avec rinçage au méthanol

Cependant, nous avons pu constater lors des premiers runs de réalisation du HEMT que les nombreuses étapes de bains chimiques qui se succèdent dans le procédé de fabrication fragilisent les structures des lignes et peuvent les déformer. Nous avons donc cherché à modifier le design des caissons de grille pour pallier la fragilité structurelle des lignes de HSQ, afin d'améliorer leur robustesse, et nous avons également modifié le procédé pour améliorer l'adhérence de la résine HSQ sur l'AlGa<sub>N</sub> et le Ga<sub>N</sub> à l'intérieur des ouvertures de grille.

#### 1.1.4.1 Amélioration de la robustesse des motifs

Nous avons dans un premier temps modifié la géométrie des caissons P-GaN en réduisant la longueur des nanofils de HSQ qui constituent les murs de séparation de ces caissons. Nous avons segmenté la grille en plusieurs caissons rectangulaires, en l'occurrence 3 caissons comme le montrent les Figures III.7a, III.7c et III.7e. Ce design correspond aux structures de grille que nous avons simulées dans la partie 3.4 du chapitre II. La surface occupée par la résine HSQ est plus importante, ce qui permet une meilleure accroche des nanofils qui sont de fait peu sensibles aux déformations. Cependant, comme observé sur la Figure III.7e, la densité de la structure en HSQ étant plus importante, celle-ci se retrouve en tension et elle n'est pas en contact avec la

surface de l'AlGaN/GaN dans l'ouverture de grille. Néanmoins, la rigidité globale du masque de HSQ, qui est maintenu de part et d'autre par la couche de  $SiO_2$ , lui permet de résister aux différents traitements chimiques lors des étapes technologiques qui suivent.

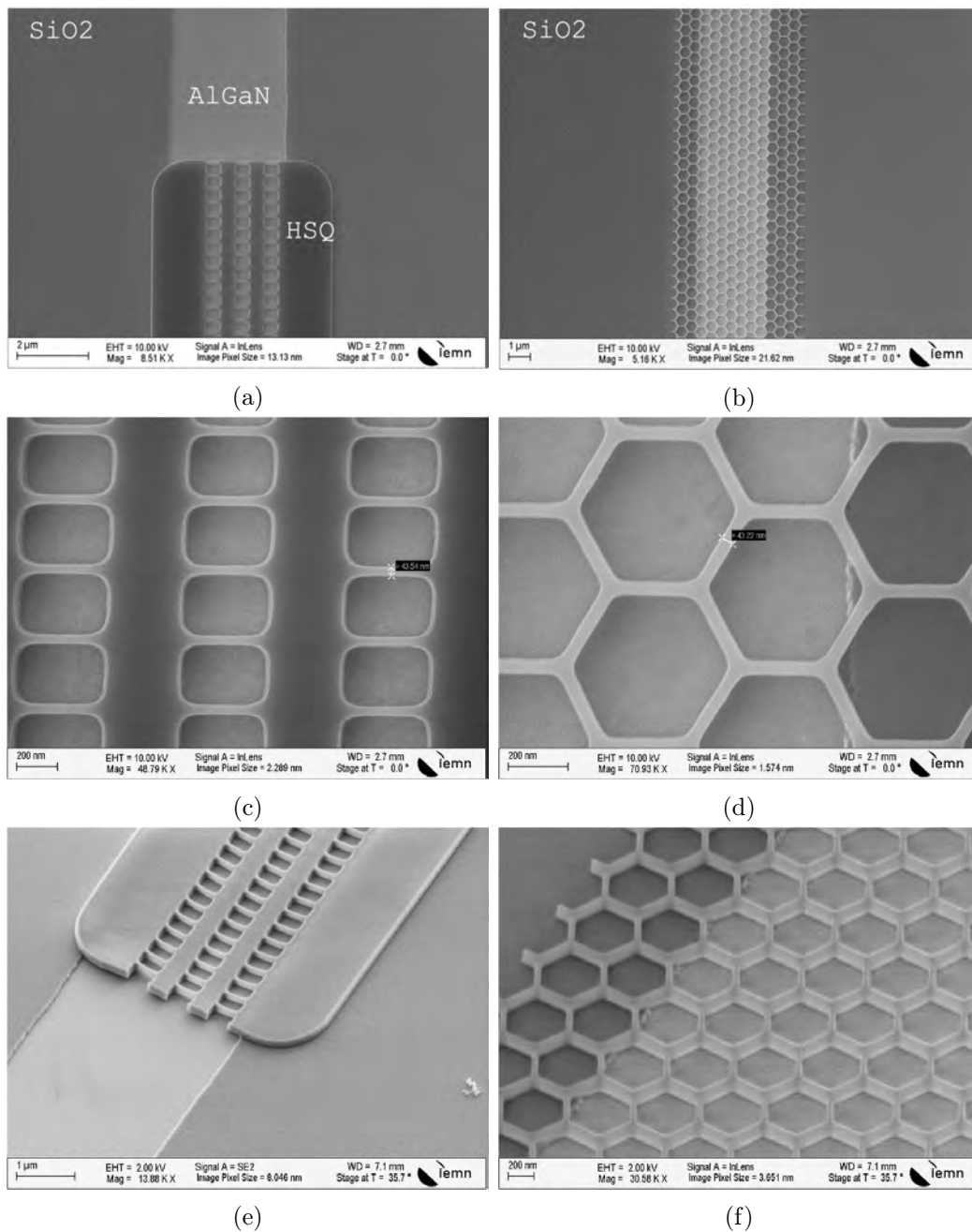


FIGURE III.7 – Observations MEB des différents motifs de caissons étudiés : rectangulaires (a,c,e) et nids d'abeilles (b,d,f)

La deuxième approche envisagée s'inspire des structures alvéolaires reconnues pour donner une solidité à des structures avec une densité de matière réduite [129]. Nous avons donc réalisé des motifs en forme de nids d'abeille, illustrées sur les Figures III.7b, III.7d et III.7f, qui présentent un rapport entre la surface et le périmètre des motifs particulièrement élevé. Cette approche s'oppose à la solution précédente car, ici, l'objectif n'est pas d'améliorer l'adhérence de la résine par l'augmentation de la surface du masque mais plutôt d'apporter une robustesse mécanique à l'ensemble de la structure. Cette structure ajoute une rigidité dans le plan du

masque, limitant les déformations des murs (Figure III.7f) malgré des rapports de forme des motifs en HSQ importants. Elle permet également une souplesse dans le design du masque en facilitant son ajustement à la forme de la tranchée. Tout comme pour les nanofils, le maintien par la couche de  $SiO_2$  de part et d'autre de l'ouverture de grille évite la dérive du masque lors de la fabrication du HEMT.

Il est à noter que les motifs des caissons en forme de nids d'abeille n'ont pas fait l'objet de simulations lors de l'étape de conception du HEMT en raison d'un temps de calcul trop important dû à un maillage beaucoup plus dense. Malgré cela, le concept est similaire à celui des lignes de nanofils car les murs de HSQ assurent une continuité du canal entre la source et le drain. Toutefois, le canal du HEMT étant de fait plus long pour une ouverture de grille donnée avec la présence de coudes, la résistance du canal de grille sera en conséquence plus grande que celle d'une structure en forme de ligne simple.

#### 1.1.4.2 Amélioration de l'adhérence de la résine HSQ

Les problèmes d'adhérence de la résine HSQ ne sont pas spécifiques aux matériaux III-V comme le nitrure de gallium. Il a été démontré que des traitements chimiques permettent d'améliorer l'adhérence de cette résine sur différents substrats ou matériaux tels que le Si, Cr, Au ou encore l'ITO (oxyde d'indium-étain) [130]. L'utilisation d'une couche de Ti pour promouvoir l'adhérence de la résine HSQ, grâce à des liaisons Ti-C sur différents types de substrats, a également été démontrée [131]. Cependant, étant donné que l'objectif est de fabriquer la grille d'un composant électronique, l'utilisation du Ti n'est pas recommandée car elle pourrait induire des contaminations. Hormis les structures auto-supportées telles que présentées précédemment, il n'y a pas, à notre connaissance, de traitements de surface permettant une utilisation efficace de la résine HSQ sur GaN.

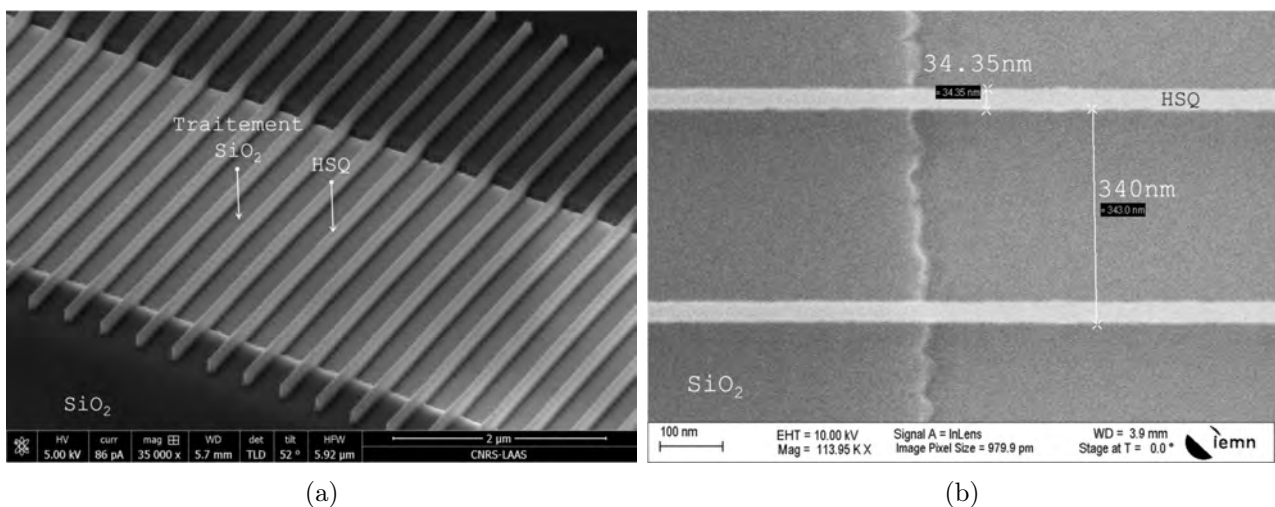


FIGURE III.8 – Observations MEB de lignes HSQ de 40 nm obtenues avec une couche d'adhérence en  $SiO_2$  dans l'ouverture de grille

Nous pouvons toutefois tirer parti de l'affinité de la résine HSQ avec le  $SiO_2$ , comme nous l'avons déjà démontré en obtenant des réseaux de lignes de 40 nm de large avec un rapport de forme supérieur à 4. Par conséquent, nous avons donc décidé de réaliser un dépôt en couche fine de  $SiO_2$  sur la surface de l'échantillon, après l'ouverture de la grille dans le  $SiO_2$  et avant le dépôt de HSQ. Cette couche, qui sert d'accroche pour la HSQ, devra être retirée dans les cavités qui seront formées par les différents motifs dans la résine juste avant l'étape de gravure des couches AlGaIn/GaN. L'épaisseur de la couche d'accroche doit être la plus fine possible de telle sorte que la forme et l'épaisseur des motifs en résine HSQ, qui sont de même nature, ne soient pas altérées lors de son retrait par gravure RIE.

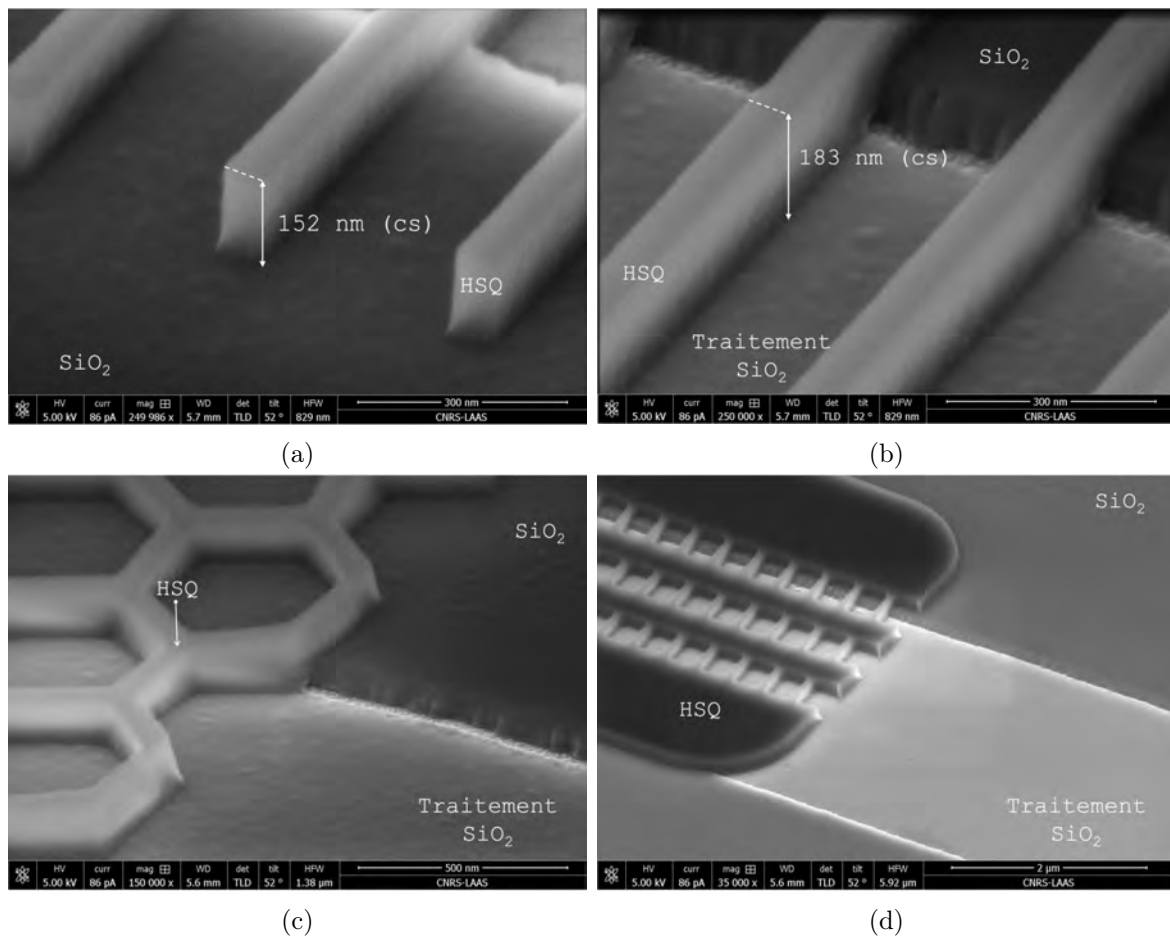


FIGURE III.9 – Observations MEB de motifs en résine HSQ obtenus avec une couche d'adhérence en  $SiO_2$

Initialement, la réalisation de cette couche devait être effectuée par dépôt en phase vapeur assisté par plasma dans un réacteur à plasma à couplage inductif (ICPECVD). Ce réacteur fonctionne à une température de 100 °C et une fréquence de la source RF de 13,56 MHz, ce qui permet d'obtenir des couches ultrafines (inférieures à 50 nm) avec un contrôle précis de la vitesse de dépôt, d'environ  $6,9 \text{ nm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Cependant, l'équipement de dépôt de  $SiO_2$  par ICPECVD ayant subi une panne de longue durée, nous avons déposé cette couche dans un réacteur à plasma à couplage capacitif (CCPECVD) fonctionnant avec une source RF cadencée à 380 kHz et à une température de 300 °C. Les conditions n'étant pas optimales pour un dépôt de couche fine, en raison de la vitesse de dépôt de  $10 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-1}$ , nous avons réalisé un dépôt d'une

épaisseur de 100 nm (temps de dépôt entre 12 s à 14 s) pour assurer l'homogénéité de la couche. L'épaisseur de la couche a ensuite été réduite par la réalisation d'une gravure pleine plaque par RIE afin d'obtenir une épaisseur de 20 nm.

Bien que la méthode ne soit pas optimale, nous présentons sur la Figure III.8 les résultats de lithographie électronique d'un réseau de lignes après traitement de surface consistant en un dépôt de  $SiO_2$ . Le réseau de lignes tel qu'illustré sur la Figure III.8a présente une bonne homogénéité le long du doigt de grille bien que la largeur des nanofils soit légèrement moins importante que prévue (Figure III.8b), de l'ordre de 34 nm pour des lignes de 40 nm. En ce qui concerne le rapport de forme (hauteur/largeur) des motifs obtenus, il varie entre 3 et 6, selon la dimension des lignes définies dans le masque d'écriture.

Enfin, les Figures III.9 a et b illustrent respectivement la bonne adhérence des lignes en HSQ à l'extérieur et à l'intérieur de l'ouverture, tandis que les Figures III.9 c et d présentent celle des motifs en forme de nids d'abeille et de la structure segmentée en plusieurs caissons rectangulaires.

## 1.2 Gravure des puits nanostructurés

La gravure du Ga<sub>N</sub> est une étape cruciale pour la fabrication de transistors à base de Ga<sub>N</sub>. Parmi les techniques de gravure, l'ICP-RIE (Inductively Coupled Plasma - Reactive Ion Etching) s'est avérée être une solution efficace et précise. Cependant, pour obtenir des résultats optimaux, il est essentiel de comprendre les différents mécanismes du plasma utilisé.

Les plasmas chlorés, notamment à base de chlore ( $Cl_2$ ) et de trichlorure de bore ( $BCl_3$ ), sont principalement utilisés pour les matériaux III-V. Leur utilisation pour la gravure du Ga<sub>N</sub> est largement documentée [132] et offre plusieurs avantages. Tout d'abord, il a été démontré que l'ajout de  $BCl_3$  dans le plasma  $Cl_2$  permet d'obtenir une rugosité plus faible de la surface du Ga<sub>N</sub> [133]. De plus, dans certaines conditions, son introduction conduit à la non sélectivité de gravure entre l'AlGa<sub>N</sub> et le Ga<sub>N</sub> [134]. Cette non sélectivité est importante pour la fabrication de notre composant car elle permet de limiter les temps de retard en début de gravure [135] et permet un meilleur contrôle de la profondeur de gravure de par la linéarité de la vitesse de gravure.

L'utilisation d'un masque en  $SiO_2$  avec des plasmas chlorés présente un avantage supplémentaire. En effet, cela permet d'obtenir une sélectivité élevée entre le masque de gravure et le Ga<sub>N</sub>, avec des valeurs comprises entre 2 et 3 comparées à seulement 0,76 pour des résines organiques [136]. Cette différence de sélectivité justifie l'utilisation de la résine HSQ comme masque de gravure, puisqu'elle possède des propriétés similaires au  $SiO_2$  après insolation.

Dans cette partie, nous présentons les résultats de notre étude sur la gravure chlorée RIE-ICP de couches AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> avec un masque qui combine du  $SiO_2$  et de la résine HSQ, l'objectif étant de réaliser des cavités d'une profondeur de 50 nm à 150 nm à remplir par croissance épitaxiale de Ga<sub>N</sub> dopé au magnésium. La rugosité du fond de gravure et le profil des murs résultant du procédé de gravure seront évalués.

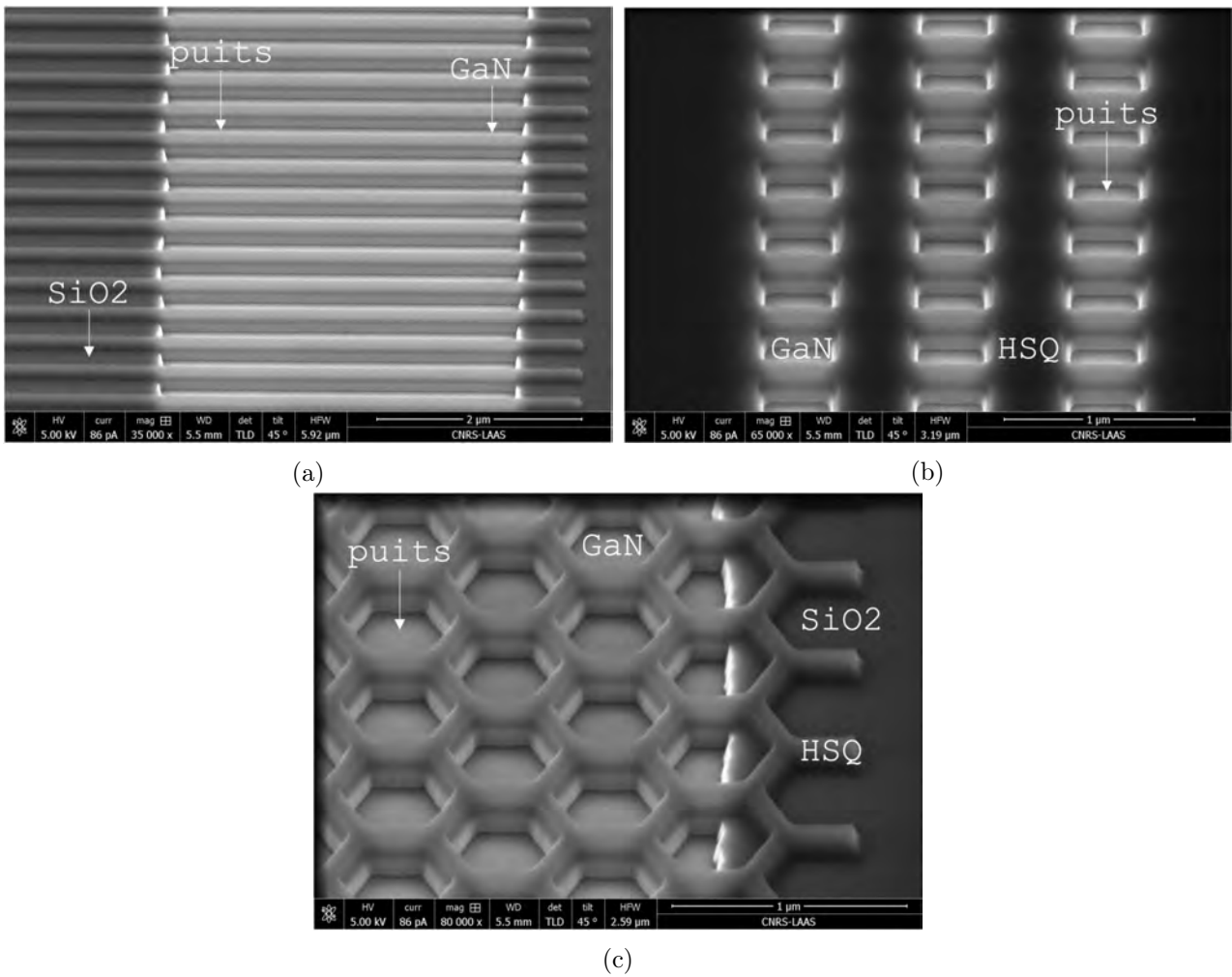


FIGURE III.10 – Observations MEB de la gravure des puits pour les différentes formes étudiées : (a) lignes, (b) rectangles et (c) nids d’abeille

### 1.2.1 Protocole expérimental de la gravure

Le protocole mis en place pour la gravure du GaN avec un masque  $SiO_2/HSQ$  consiste en plusieurs étapes : ouverture des doigts de grille par gravure RIE dans la couche de  $SiO_2$ , de 100 nm à 150 nm d’épaisseur préalablement déposée par PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition), dépôt d’une couche d’accroche en  $SiO_2$  de quelques dizaines de nanomètres d’épaisseur puis lithographie électronique de la résine HSQ afin de créer le masque de gravure.

Ensuite, le retrait de la couche d’accroche en  $SiO_2$  est réalisé dans un bâti de gravure RIE Si200 Etchlab de chez Sentech. Le plasma utilisé est un mélange  $CHF_3/O_2$ , avec des débits respectifs de 50 sccm et 3 sccm sous une pression de 70 mTorr et une puissance de la source RF de 100 W. Cette étape est suivie d’un plasma  $O_2$  in-situ pendant une minute avec une puissance RF de 40 W afin d’éliminer la fine couche de passivation fluorée créée en surface.

L’étape de gravure du GaN s’effectue dans un bâti ICP-RIE Si500 de chez Sentech en utilisant un plasma composé de  $BCl_3$ , d’Ar et de  $N_2$ . Le  $BCl_3$  a remplacé le  $Cl_2$  dans une recette prédéfinie pour la gravure du GaN pour laquelle les paramètres utilisés sont les suivants : débits respectifs de 20 sccm, 5 sccm et 10 sccm, une puissance ICP de 300 W, une puissance RF de 150 W, une pression de 3 mTorr.



Enfin, pour finaliser la gravure, une étape additionnelle de plasma  $O_2$ , pendant 5 minutes avec une puissance de 800 W, est effectuée pour éliminer les éventuels résidus issus des produits de réaction des plasmas, assurant ainsi un état de surface propre pour la poursuite des étapes de fabrication des caissons P-GaN.

Les observations MEB de la gravure ainsi obtenue sont reportées sur la Figure III.10 pour 15 secondes de gravure du GaN. Le masque en résine HSQ ne présente pas d'érosion, démontrant sa bonne résistance aux plasmas de gravure chlorés. Les motifs sont fidèlement reproduits dans les couches d'AlGaIn et de GaN, les flancs des murs sont quasiment verticaux et le fond de gravure est dépourvu de résidus.

### 1.2.2 Caractérisation de la gravure

Des caractérisations physiques ont été réalisées afin de déterminer la vitesse de gravure du GaN ainsi que la résistance des masques en  $SiO_2$  et en résine HSQ. Pour cela, un échantillon en GaN recouvert d'une couche de  $SiO_2$  d'une épaisseur de 150 nm a été préparé en réalisant une ouverture de cette couche, en effectuant la lithographie d'une résine HSQ de 200 nm d'épaisseur et en procédant à la gravure du GaN par ICP-RIE pendant une minute.

Les Figures III.11 (a) et (b) illustrent respectivement les observations MEB de la gravure avant et après le retrait des masques  $SiO_2$  et HSQ par gravure humide au BOE (Buffered oxide etch). Avant le retrait des masques, les motifs HSQ sont encore visibles à l'intérieur et à l'extérieur de l'ouverture de grille. Après le retrait des masques, la surface du GaN apparaît parfaitement plane au niveau des régions qui étaient masquées. Ces observations montrent donc que le  $SiO_2$  et la résine HSQ ont joué efficacement leur rôle de protection.

Une analyse plus détaillée a été réalisée à l'aide de la microscopie à force atomique (AFM) sur l'échantillon gravé après le retrait des masques comme illustré sur la Figure III.11c. Cette analyse nous a permis de déterminer la vitesse de la recette de gravure du GaN, qui est de  $350 \text{ nm} \cdot \text{min}^{-1}$  et d'estimer la sélectivité du  $SiO_2$  et de la résine HSQ avec le GaN, que nous avons évaluée entre 3 et 4.

L'observation par microscopie électronique à transmission (TEM) d'une lame TEM réalisée sur un échantillon avec un empilement AlGaIn/GaN, comme illustré sur la Figure III.11d, nous a permis de déterminer l'angle du profil de gravure, mesuré à  $101^\circ$ , ce qui caractérise un profil plutôt anisotrope.

La rugosité de surface du substrat étant un élément critique pour la croissance épitaxiale, nous avons également caractérisé la rugosité du fond de gravure des caissons à l'aide de mesures AFM (Figure III.12). On obtient une rugosité minimale de 0,2 nm pour une fenêtre d'analyse de 400 nm par 400 nm.

Cependant, nous avons remarqué que, bien que la rugosité apparente soit faible, la morphologie de surface diffère légèrement selon l'emplacement de la mesure. La figure III.12a présente la morphologie de surface dans une région éloignée des bords de gravure. Elle est très similaire à celle observée sur des couches de GaN produites par MOCVD (Metal-Organic Chemical Vapor Deposition) [137]. Cela indique que la gravure n'induit pas de défauts de surface.

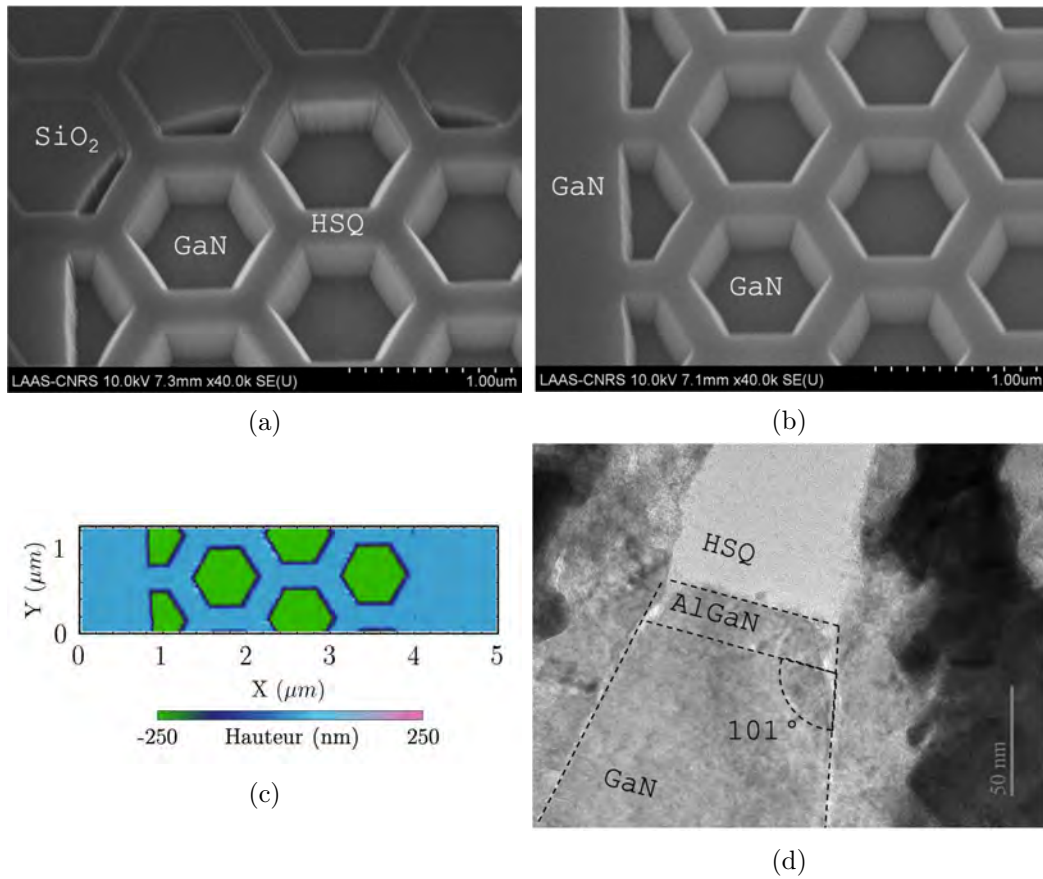


FIGURE III.11 – Caractérisation de la gravure des puits en nids d’abeille : (a) avant et (b) après élimination du masque de résine HSQ, (c) analyse AFM de l’épaisseur gravée et (d) analyse TEM du profil de gravure

Les analyses effectuées près des bords de gravure (Figure III.12b) suggèrent par contre une dégradation de l’état de surface. Cela est probablement dû à la gravure sèche qui a pu occasionner des défauts liés à la présence des masques en  $SiO_2$  et  $HSQ$ .

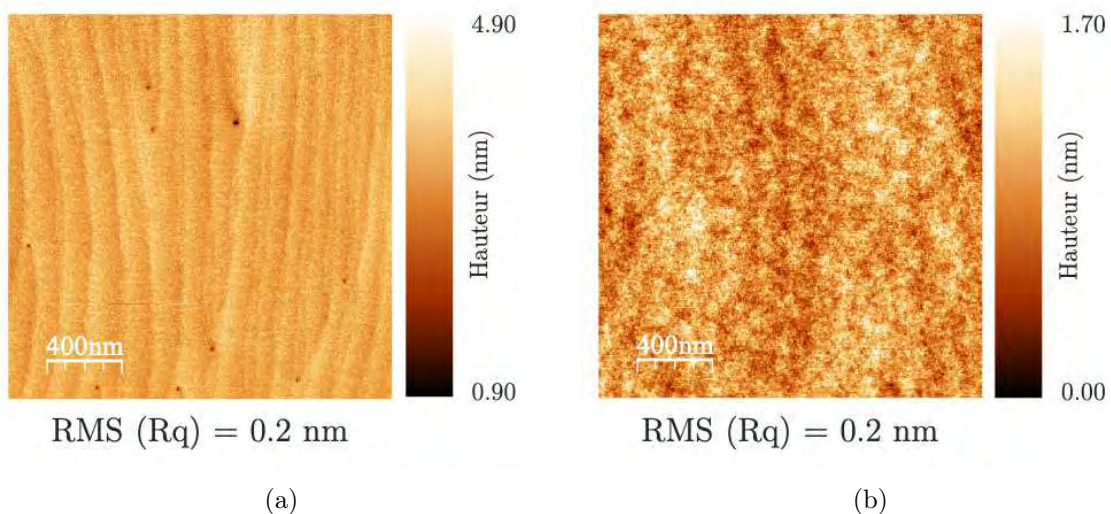


FIGURE III.12 – Analyses AFM effectuées dans le fond de gravure : (a) à une distance éloignée des flancs de gravure et (b) à une distance proche des flancs de gravure ( $< 50$  nm)

En conclusion, l'étape de gravure des puits P-GaN avec un procédé ICP-RIE a été mise au point avec un masque en résine HSQ. Nos travaux ont démontré la bonne résistance de la résine HSQ au plasma de gravure, permettant une reproduction fidèle des motifs nanométriques dans les couches AlGaIn/GaN. De plus, la rugosité de la surface dans les régions gravées est minimale, inférieure au nanomètre, bien qu'elle soit légèrement affectée près des bords de gravure.

Le procédé de gravure à base de  $BCl_3$  doit toutefois être optimisé afin de réduire la vitesse de gravure qui reste légèrement élevée pour les profondeurs nanométriques qui nous concernent. Des études sont en cours qui permettront d'améliorer la reproductibilité du procédé et de réaliser des dispositifs à base de GaN à haute résolution.

### 1.3 Croissance localisée de P-GaN par épitaxie par jets moléculaires à l'intérieur de nano-tranchées

Nous avons présenté dans la partie précédente les travaux que nous avons menés pour la définition des caissons de grille à partir de la lithographie électronique de la résine HSQ et de la gravure chlorée des puits. La résine HSQ a été choisie car elle favorise la réalisation des structures nanométriques que nous avons définies au chapitre II et elle peut également servir de masque pour la croissance épitaxiale localisée de GaN, au même titre que le  $SiO_2$  classiquement utilisé.

Afin de réaliser les caissons P-GaN sur la grille du HEMT, nous avons choisi l'épitaxie localisée par épitaxie par jets moléculaires (EJM). Les travaux ont été menés en collaboration avec le CRHEA.

Nous décrivons le protocole expérimental mis en œuvre. Nous mettrons l'accent sur l'influence de la topologie des caissons et des nettoyages chimiques avant épitaxie sur la dynamique de croissance de GaN. Nous présenterons les résultats de la caractérisation physique des couches épitaxiées à partir d'analyses MEB, TEM et SIMS, dans le cas de couches GaN NID et GaN dopé magnésium.

#### 1.3.1 Protocole expérimental de la croissance localisée par EJM

Le développement de l'étape de reprise d'épitaxie localisée semi-enterrée par EJM a été entrepris sur trois séries d'échantillons. La première série, nommée "GST", correspond aux essais préliminaires visant à évaluer la faisabilité de cette technique utilisant un masque de résine HSQ. Les échantillons utilisés pour cette série, fournis par le CRHEA, sont des couches n-GaN obtenues par croissance MOCVD (metal organic chemical vapor deposition) sur substrat saphir 2".

Les séries ST100 et ST200 qui ont suivi ont été effectuées sur des échantillons découpés en carré de 36 mm de côté, provenant de deux plaques de 8" fournies par STMicroelectronics Tours, issues d'un même lot d'épitaxie de couches HEMT sur Silicium pour applications 600 V.

La préparation des échantillons suit le même protocole de base que celui de la gravure tel que décrit en détail dans la section 1.2.1, à savoir l'ouverture des doigts de grille dans une couche de  $SiO_2$  suivie de la lithographie électronique de la résine HSQ, et de la gravure ICP-RIE des couches nitrures AlGaN et GaN pour définir les puits d'une profondeur inférieure à 200 nm.

Ensuite, vient une étape de préparation des échantillons, réalisée au CRHEA, en vue de l'épitaxie localisée : cela consiste en plusieurs nettoyages chimiques afin d'éliminer toute contamination pouvant provenir des étapes précédentes. Enfin, la dernière étape concerne l'épitaxie par EJM d'une couche GaN dont l'objectif principal est de remplir les zones gravées.

Les étapes technologiques réalisées pour les différentes séries d'échantillons sont reportées dans la Table III.1 et sont détaillées dans les paragraphes suivants. Il convient de noter que le protocole initial utilisé sur l'échantillon GST03 a légèrement évolué à mesure des séries d'expérience, notamment en ce qui concerne le traitement adhésif de la résine HSQ, sa stabilisation avant gravure, le temps de gravure ainsi que les nettoyages post-gravure. Les ajustements apportés afin d'optimiser les résultats de croissance d'une série à une autre seront présentés.

Référence		eBeam HSQ	Gravure		Croissance EJM			
série	nom	traitement adhésif	stabilisation HSQ	temps	protocole de nettoyage	type	e (nm)	T (°C)
série GST	GST02	-	plasma $O_2$	30 s	p0	GaN NID	100	800
	GST03							760
série 100	ST102	-	-	30 s	p1	P- GaN	100	760
	ST103				p2			
	ST104			25 s	p3			
série 200	ST203	$SiO_2$	-	15 s	p0	P- GaN	170	760
	ST205							
	ST206							

TABLE III.1 – Aperçu des procédés technologiques réalisés pour la croissance localisée de GaN à l'intérieur de puits gravés sur trois séries d'échantillons

### 1.3.2 Préparation des échantillons avant épitaxie

Réaliser des nettoyages chimiques avant la croissance épitaxiale permet de prévenir des contaminations potentielles qui peuvent compromettre la qualité des couches obtenues. Dans cette partie nous aborderons les différents procédés de nettoyage utilisés lors de nos tests de reprise d'épitaxie.

Les contaminants et défauts les plus couramment reportés sont le Si, le C et la présence de couches amorphes en surface. Ces impuretés peuvent provenir de différentes sources de contamination et sont particulièrement critiques pour la qualité des épitaxies et le fonctionnement des dispositifs électriques.

Par exemple, Kai Fu et al [138] ont identifié l'origine probable des contaminations Si qui proviennent en majorité des bâtis de croissance, des étapes de préparation comme la gravure plasma [95], des traitements chimiques et de la mise à l'air des couches concernées [139]. Notre protocole d'épitaxie localisée combine plusieurs de ces risques de contamination lors des traitements chimiques réalisés, la gravure des nano-tranchées et la mise à l'air lors du transport des échantillons.

Les contaminations Si sur des dispositifs à jonction, tels que celui que nous proposons, peuvent avoir un impact significatif sur leurs propriétés électriques, à savoir, l'augmentation locale du champ électrique, la réduction de la zone de charge d'espace de déplétion et l'apparition de courants de fuite plus importants en polarisation inverse [138].

Protocole p0	Protocole p1	Protocole p2	Protocole p3
2 min HCl 37% ; 2 min EDI ; dégazage sous vide à 500°C ; recuit à 820°C sous environnement $NH_3$ ; 2 min KOH ; 2 min EDI ; 2 min HCl 37%	20 min HCl à 85°C ; 2 min EDI ; 20 min TMAH 25 % à 80°C ; 2 min EDI		-
	6 min $H_2SO_4 + H_2O_2$ à 110°C ; 3 min EDI ; 5 min HCl 37%		dégazage sous vide à 500°C ; recuit à 800°C sous environnement $NH_3$
	-		2 min KOH ; 2 min EDI ; 2 min HCl 37%
dégazage sous vide à 500°C ; recuit à 820°C sous environnement $NH_3$			

TABLE III.2 – Protocoles de nettoyage avant reprise d'épitaxie localisée par EJM

Le protocole de nettoyage de base établi par l'équipe du CRHEA et validé pour la reprise d'épitaxie de contacts ohmiques sur GaN [140] ne prend en compte que les contaminations résultant de la gravure des couches nitrures. Les solutions à base de KOH à 44 % permettent en effet de réduire les contaminations C [141] et supprimer les régions amorphes de la surface gravée. L'utilisation séquentielle du KOH et du HCl supprime aussi efficacement les oxydes de surface qui empêchent la nucléation lors de l'épitaxie.

Le TMAH est une solution chimique utilisée pour la gravure et le traitement de surface du GaN. Elle permet une gravure rapide des plans semi-polaires et, dans une moindre mesure, les plans non polaires a et m de la structure cristalline wurtzite du GaN, tout en présentant une sélectivité élevée par rapport à la gravure dans le plan c, ce qui en fait une solution de gravure anisotrope. Cette anisotropie de la gravure permet de réaliser des nanofils avec une forme parfaitement rectangulaire [142], [143], ainsi que des dispositifs tels que les GaN FinFET [85]. Différentes études ont montré que le TMAH est une solution efficace pour reconstruire la surface du GaN après gravure [144].

La solution Piranha est une solution chimique composée d'un mélange d'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ) et de peroxyde d'hydrogène ( $H_2O_2$ ), très réactive et utilisée pour le nettoyage et la gravure de surface. Elle est particulièrement efficace pour éliminer les contaminants organiques.

Les différents protocoles de nettoyage utilisés, qui ont été mis en place en collaboration avec le CRHEA, sont reportés dans la Table III.2. L'objectif principal était de déterminer l'influence de l'utilisation de solutions à base de KOH, de TMAH (tétraméthyl-ammonium hydroxide) et de la solution Piranha.

Tous les protocoles incluent une étape de dégazage sous vide à une température de 500°C pour éliminer les impuretés de la surface, suivie d'un recuit à 820°C sous flux d'hydroxyde d'ammonium ( $NH_3$ ). Le but du recuit est de stabiliser et densifier la résine HSQ en préparation du nettoyage KOH, qui peut la graver lorsqu'elle est insuffisamment densifiée. Cette étape est cruciale pour garantir une croissance homogène et contrôlée du GaN.

### 1.3.3 Épitaxie localisée de GaN

L'objectif est d'assurer une croissance structurée de GaN afin de remplir des cavités de différentes formes, grâce à l'utilisation d'un masque en résine HSQ. Les premiers essais entrepris ont concerné la croissance de GaN non-intentionnellement dopé (GaN NID) afin de démontrer la faisabilité de notre choix technologique pour la réalisation de la grille du HEMT, suivie par deux séries de croissance de GaN dopé de type P.

Les reprises d'épitaxie ont été réalisées au CRHEA, utilisant un réacteur EJM RIBER Compact 21 pour la croissance de GaN NID et P-GaN. Le gallium est contenu dans des cellules à effusion maintenues à une température de 900°C et la croissance s'effectue sous flux  $NH_3$ . Le dopage de type P est obtenu à l'aide d'une source à effusion contenant du magnésium solide qui est évaporée à 200°C.

Après le nettoyage chimique, l'échantillon est introduit dans le sas du réacteur EJM, où il est soumis à un vide ultra poussé atteignant une valeur de pression inférieure à  $1 \times 10^{-7}$  torr puis transféré dans le module de dégazage fonctionnant à 500°C. Ensuite, l'échantillon est déplacé dans le module de croissance maintenu à une température de 820°C sous flux  $NH_3$ , dernière étape préparatoire de nettoyage. Enfin, le début de la croissance est initié dès que la température atteint la valeur souhaitée qui, dans notre cas, est comprise entre 700°C et 800°C.

#### 1.3.3.1 Influence de la forme des motifs

La Figure III.13 présente le résultat de la croissance localisée de 170 nm de P-GaN après une gravure de 15 s, pour trois motifs du masque de résine HSQ, à savoir des hexagones, des rectangles avec coins arrondis et des lignes.

La croissance à l'intérieur des motifs hexagonaux forme un îlot de GaN en leur centre. On note un contour net et bien défini de croissance de GaN suivant les bords de la résine HSQ (Figures III.13 a et b). L'utilisation de ce type de géométrie conduit à une dynamique de croissance similaire dans toutes les directions.

On retrouve cette dynamique de croissance dans le cas des motifs HSQ rectangulaires de petite dimension comme le montrent les Figures III.13 c et d.

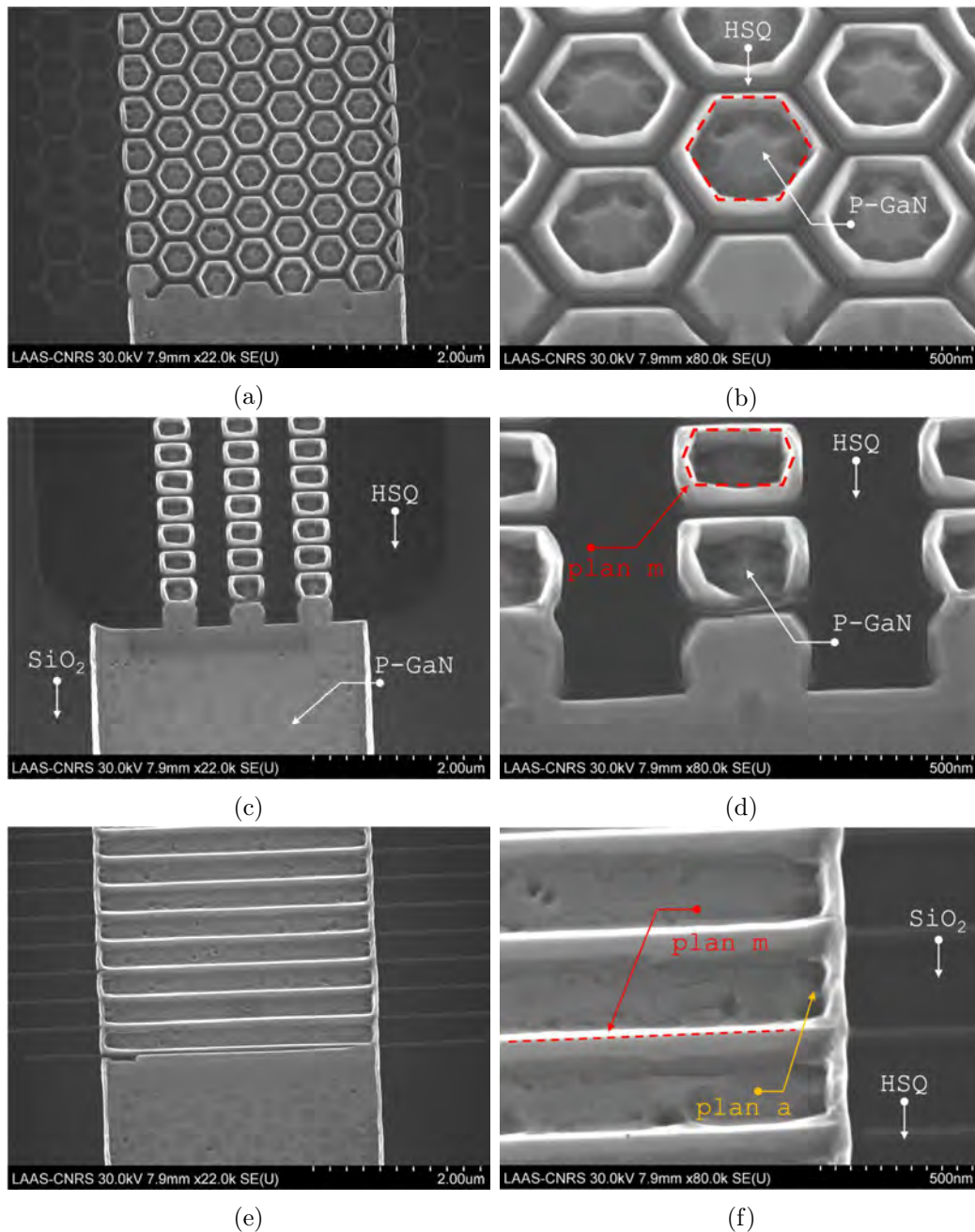


FIGURE III.13 – Analyse par MEB de la croissance localisée de 170 nm de P-GaN après 15 s de gravure (ST205) à l'intérieur de motifs (a,b) en forme d'hexagones, (c,d) en forme de rectangles avec les coins arrondis et (e,f) en forme de lignes

Dans le cas de motifs en forme de lignes, nous pouvons observer dans certains cas, lorsque la largeur des murs en HSQ est inférieure à 50 nm, une continuité de la croissance par dessus la résine HSQ, indiquant une croissance latérale importante. De plus, le nombre de défauts à l'intérieur du motif est plus important, présentant différentes formes (crevasses et trous hexagonaux) (Figures III.13 e et f). La morphologie de la croissance semble donc dépendre de la géométrie du masque utilisé.



La croissance à l'intérieur de motifs hexagonaux est la plus homogène. Ceci démontre que la structure wurtzite du GaN favorise une croissance régulière autour de cette géométrie. À noter que l'orientation cristalline des échantillons n'ayant pas été définie en amont de la croissance, celle-ci peut coïncider par hasard avec l'orientation des motifs du masque de résine HSQ.

La largeur des contours au niveau des coins arrondis semble conforter l'idée que la croissance sur les bords est plus rapide dans les régions n'appartenant pas à une orientation naturelle de la structure wurtzite du GaN. Les motifs en forme de lignes présentent une dynamique de croissance plus complexe qui montre que la croissance avec des motifs ayant des rapports de forme élevés conduit à des défauts structurels plus importants. La croissance sur les plans  $m$  exposés par les lignes en HSQ sont plus lisses que sur les plans  $a$ .

### 1.3.3.2 Influence du taux d'ouverture

Le taux d'ouverture peut avoir un impact sur les conditions de croissance impliquant différentes techniques de croissance. Par exemple Winnerl et al [145] ont montré que la taille des ouvertures du masque et leur périodicité induisent des variations dans la collecte et la diffusion des espèces dans le cas de la croissance de nano-murs en GaN sur substrat saphir par PAMBE (Plasma assisted MBE).

Cela peut se traduire par une surcroissance au niveau des bords du masque par rapport au centre. Bien que la technique de croissance soit différente en termes de température et de pression, les différents motifs utilisés sur la série GST nous ont permis d'évaluer l'influence du taux d'ouverture sur le remplissage de nos cavités.

La Figure III.14 présente les observations MEB et TEM pour les trois cas de remplissage de cavité par la croissance de GaN NID d'une épaisseur de 100 nm à l'intérieur de motifs ayant des ouvertures de l'ordre de 200 nm, 800 nm et 3  $\mu$ m et une profondeur après gravure inférieure à 150 nm.

Dans le premier cas (a,b), une ouverture hexagonale dans la résine HSQ est considérée, avec une distance de 183 nm entre murs opposés de HSQ. Une surcroissance significative de 103 nm se produit sur les bords de la cavité, formant un mur de GaN qui fait le tour des motifs du masque de résine. En revanche, la croissance dans le fond de la gravure s'effectue avec un écart de 180 nm par rapport à la hauteur au sommet des murs, formant ainsi un puits avec un fond qui présente une surface rugueuse. Cet écart est plus grand que la profondeur initiale des cavités, et s'accroît probablement au fur et à mesure de la croissance.

Dans le deuxième cas (c,d), une ouverture dans la résine HSQ en forme d'hexagones est considérée mais avec une distance de 814 nm entre les murs de HSQ. Nous constatons que le profil sur les flancs est similaire à celui obtenu dans les petites ouvertures. Cependant, la croissance au niveau du fond de la cavité a atteint la même hauteur que sur les flancs, ce qui suggère une croissance verticale plus rapide dans ces conditions. La surface présente aussi un état rugueux caractérisé par la présence de pyramides et de plateaux.

Dans le dernier cas (e,f), pour des ouvertures de 3  $\mu$ m, le remplissage de la cavité est obtenu, conduisant à une surface quasi-plane présentant une légère rugosité en s'approchant des bords.

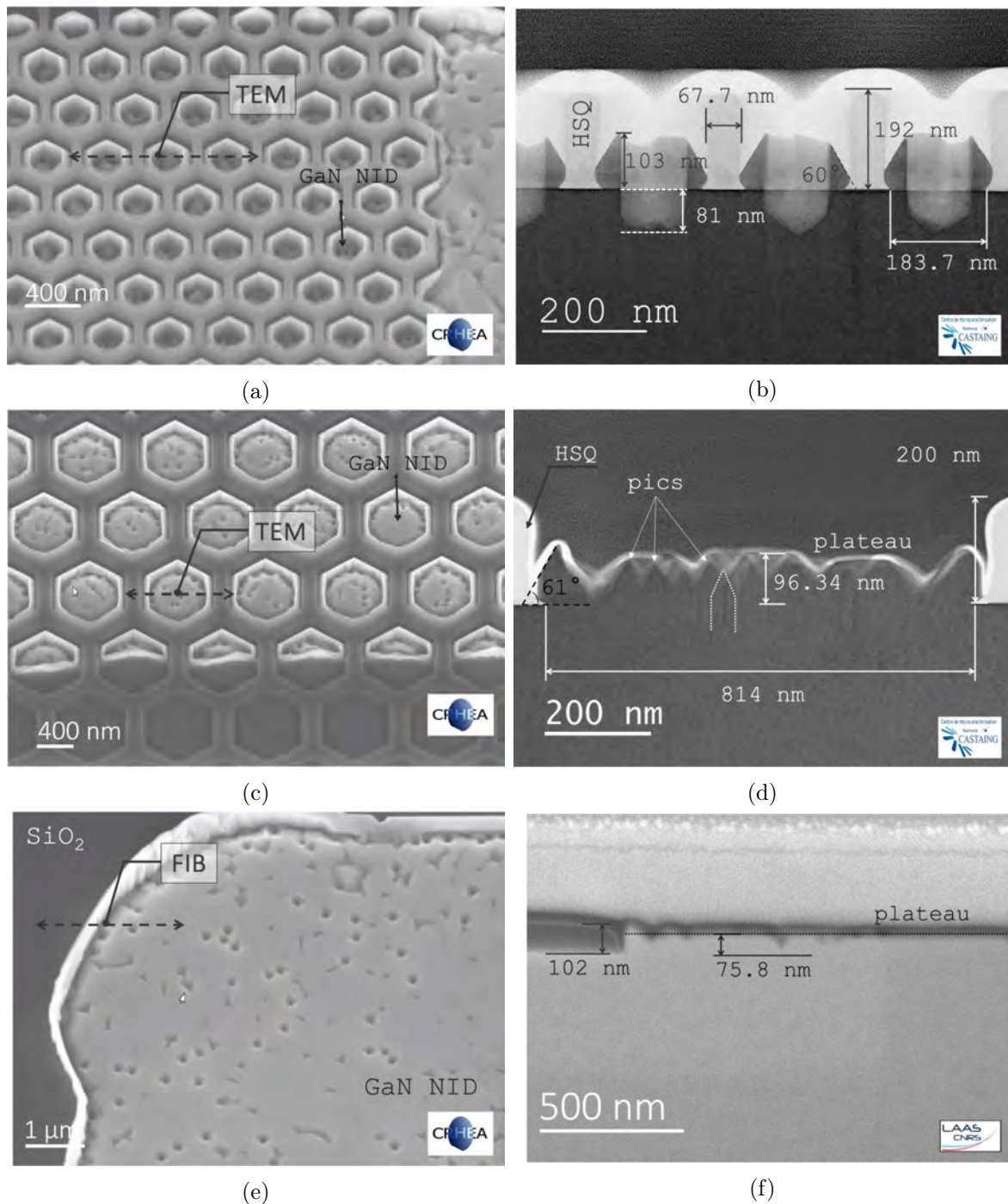


FIGURE III.14 – Analyse par observation TEM des profils de croissance localisée de 100 nm de GaN NID après gravure de 30 s (série GST) entre plusieurs lignes en résine HSQ espacées de l'ordre de (a) 200 nm, (b) 800 nm et (c) 3 μm

Le procédé de croissance EJM à l'intérieur de cavités est complexe, probablement lié à la topologie des cavités et de la résine HSQ. Afin d'obtenir un meilleur remplissage, particulièrement pour les petites ouvertures, nous avons augmenté le temps de croissance. Les Figures III.15 a et b illustrent le profil obtenu pour une croissance de 170 nm de P-GaN entre des lignes HSQ espacées de 300 nm et dans une cavité d'une profondeur comprise entre 80 nm et 90 nm suite à une gravure de 15 s (série ST200).

En analysant les résultats, une différence de 76 nm est observée entre la hauteur des murs de GaN, qui est de 142 nm par rapport à la surface, et celle du plateau central qui est évaluée à 66 nm. Cette valeur est approximativement équivalente à la profondeur initiale de la gravure, indiquant que les vitesses de croissance verticale à partir du fond de la cavité et de celle des bords de la cavité sont similaires.

Augmenter le temps de croissance ne résout pas le problème d'écart d'épaisseur de GaN entre les murs et le fond de la cavité dans les petites ouvertures (inférieures à 800 nm). Par contre, il permet d'améliorer significativement l'état de surface, qui est relativement homogène et plat.

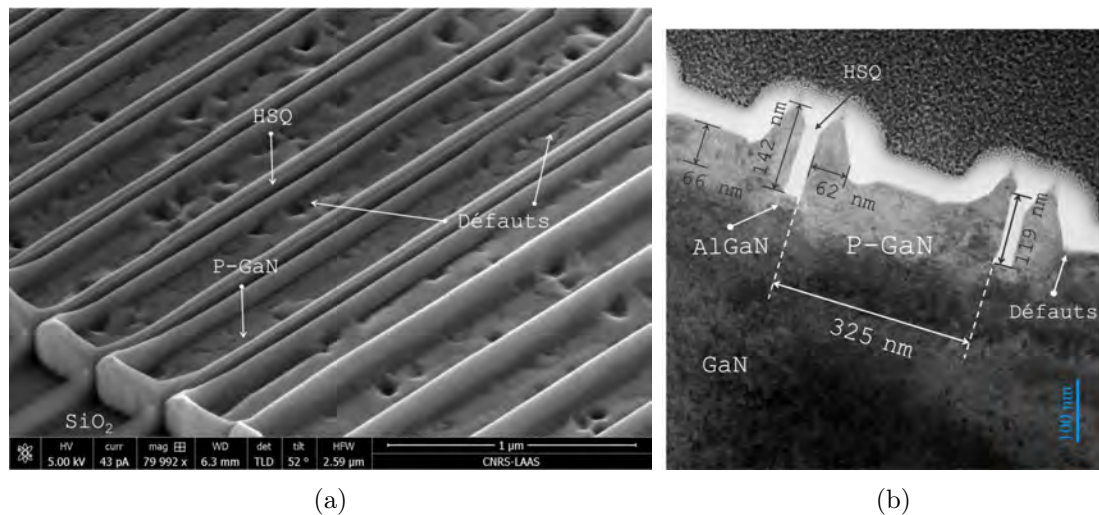


FIGURE III.15 – Observations microscopiques de la croissance de P-GaN : (a) MEB et (b) TEM montrant le profil de croissance localisée de 170 nm après 15 secondes de gravure (série ST200) dans un espace de 300 nm entre des lignes de résine HSQ

### 1.3.3.3 Dynamique de la croissance

La dynamique de croissance localisée par épitaxie par jets moléculaires de GaN, dopé ou non, au sein de cavités de dimensions nanométriques, est un procédé peu exploré dans la littérature. Bien que nos travaux de thèse ne soient pas centrés sur ce procédé en particulier, il est important d'en saisir les grandes lignes pour comprendre l'ensemble des résultats obtenus. Afin d'interpréter les mécanismes de croissance observés, nous nous sommes basés sur les différentes études portant sur la croissance localisée de nano-fils ou nano-murs impliquant différentes techniques de croissance telles que la PA-MBE, HVPE et MBE [145, 146, 147, 148, 149, 150, 151]. Nous avons, dans la Figure III.16, illustré schématiquement la dynamique de croissance localisée à l'aide de vues en coupe pour différentes dimensions de cavité.

Dans les premiers moments de la croissance, nous observons la nucléation aléatoire de grains de GaN sur la surface des parois des cavités. Suite à cette nucléation, les grains grossissent formant des îlots en forme de pyramides. Ces îlots finissent ensuite par coalescer à l'intérieur de la région définie par le masque de résine, menant à la suppression de toutes les facettes à croissance rapide et laissant une structure avec des facettes de taille plus grande mais avec

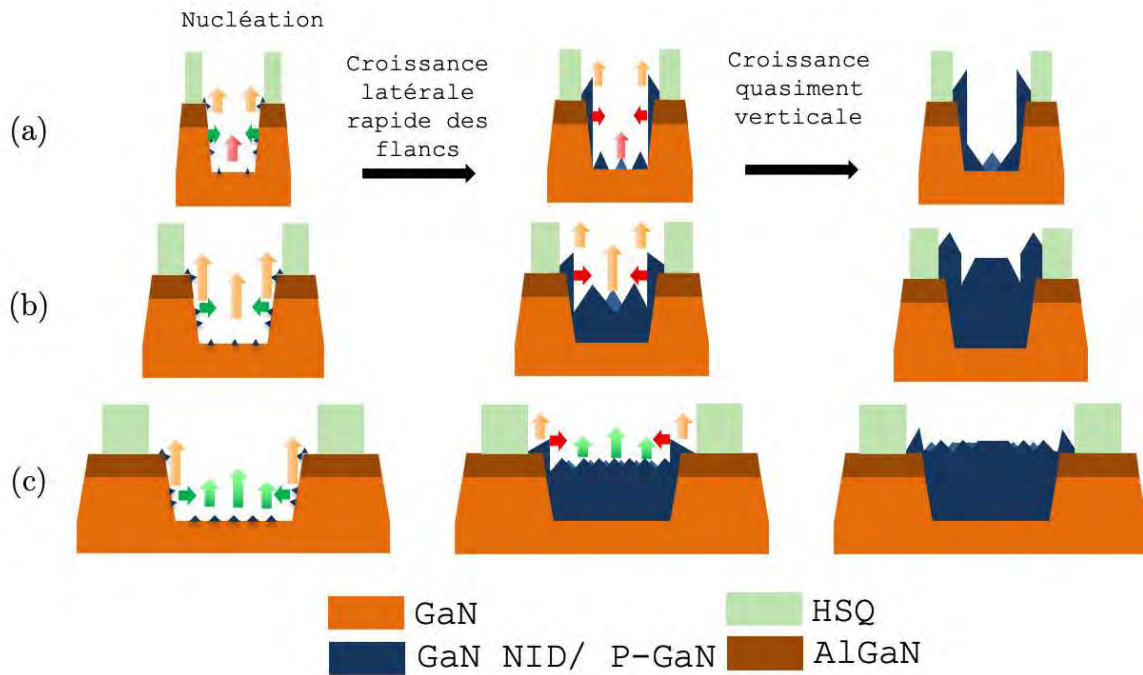


FIGURE III.16 – Vues en coupes schématisques illustrant la dynamique de croissance en fonction de la dimension des ouvertures des cavités

une vitesse de croissance réduite. Nous observons particulièrement ces facettes à croissance lente dans le cas de l'utilisation de motifs de petite taille (Figure III.16a) où l'on note la formation de 1 à 3 îlots de GaN à l'intérieur d'un pilier dont la forme est similaire à celle d'un "crayon creux". La croissance latérale sur les flancs de la cavité est très rapide dans les premiers moments jusqu'à atteindre un plan vertical associé à une orientation non polaire de la structure wurtzite du GaN. Une fois ce plan défini, la croissance est essentiellement verticale (2D). Le taux d'ouverture influence aussi la vitesse de croissance verticale. Un taux d'ouverture faible diminue la probabilité que les espèces/radicaux atteignent le fond de la cavité, limitant ainsi la croissance (Figure III.16a). Pour des taux d'ouverture plus importants (Figure III.16 b et c), la nucléation en début de croissance permet la formation de plus de grains, donc plus d'îlots, ce qui favorise la coalescence et un meilleur remplissage des cavités, comme le montre l'observation MEB de la Figure III.17. En effet dans ce cas, pour une ouverture de  $3\mu\text{m}$ , la croissance de GaN permet un remplissage quasi uniforme de la cavité. Cependant, la figure met bien en évidence la localisation des défauts de croissance à la base des murs en HSQ et  $\text{SiO}_2$ .

Étant donné la complexité et le caractère nouveau de ces travaux, à savoir le remplissage de cavités de dimension nanométrique obtenues par un procédé de gravure sèche suivi d'une croissance localisée par EJM avec un même masque, une étude dédiée plus approfondie serait pertinente pour une meilleure compréhension des phénomènes observés.

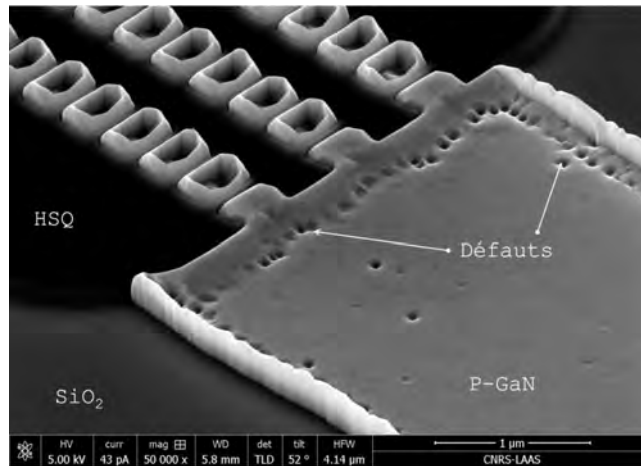


FIGURE III.17 – Observations MEB révélant les défauts de croissance aux bords des motifs en résine HSQ et  $SiO_2$  pour une ouverture de  $3\ \mu\text{m}$ .

### 1.3.4 Caractérisations physiques de l'épitaxie localisée

La partie suivante porte sur l'étude et le traitement des observations au microscope électronique à transmission (TEM) des couches épitaxiées de GaN NiD et P-GaN (échantillons GST03 et ST205). L'objectif principal est d'évaluer la qualité cristalline des épitaxies localisées, ce qui est essentiel pour le fonctionnement du dispositif.

#### 1.3.4.1 Caractérisation de l'épitaxie du GaN NID

L'observation TEM de l'échantillon GST03, illustrée sur la Figure III.18a, a été effectuée au pied d'un motif de résine HSQ. La localisation probable de l'interface entre la zone de croissance du GaN NID et le matériau GaN d'origine se situe dans la zone délimitée par des lignes en pointillés. La Figure III.18b présente une vue agrandie où le microscope a été réglé sur un axe de zone permettant de visualiser la structure cristalline des matériaux.

Les deux observations révèlent des zones de transparence ou d'ombrage, principalement en surface ou au niveau des interfaces entre la résine HSQ et le GaN NID épitaxié, liées à la perpendicularité et à la rugosité dans la profondeur de la lame TEM réalisée. Par conséquent, l'interface entre la résine HSQ et le GaN, au niveau du pied, est artificiellement diluée.

Nous avons réalisé une analyse par Transformée de Fourier (FFT) au niveau de trois zones nommées FFT1, FFT2 et FFT3. Ces zones correspondent respectivement aux régions délimitant le matériau GaN d'origine, le GaN NID au bord de la résine HSQ et à l'intérieur de la cavité. Les résultats des analyses FFT, illustrées sur la Figure III.18c, indiquent les mêmes caractéristiques fréquentielles dans les trois zones, en termes de périodicité et d'orientation, ce qui met en évidence une croissance de très bonne qualité. La structure du GaN paraît homogène et continue d'une région à une autre, indiquant que le procédé de croissance s'est déroulé correctement sans induire de défauts.

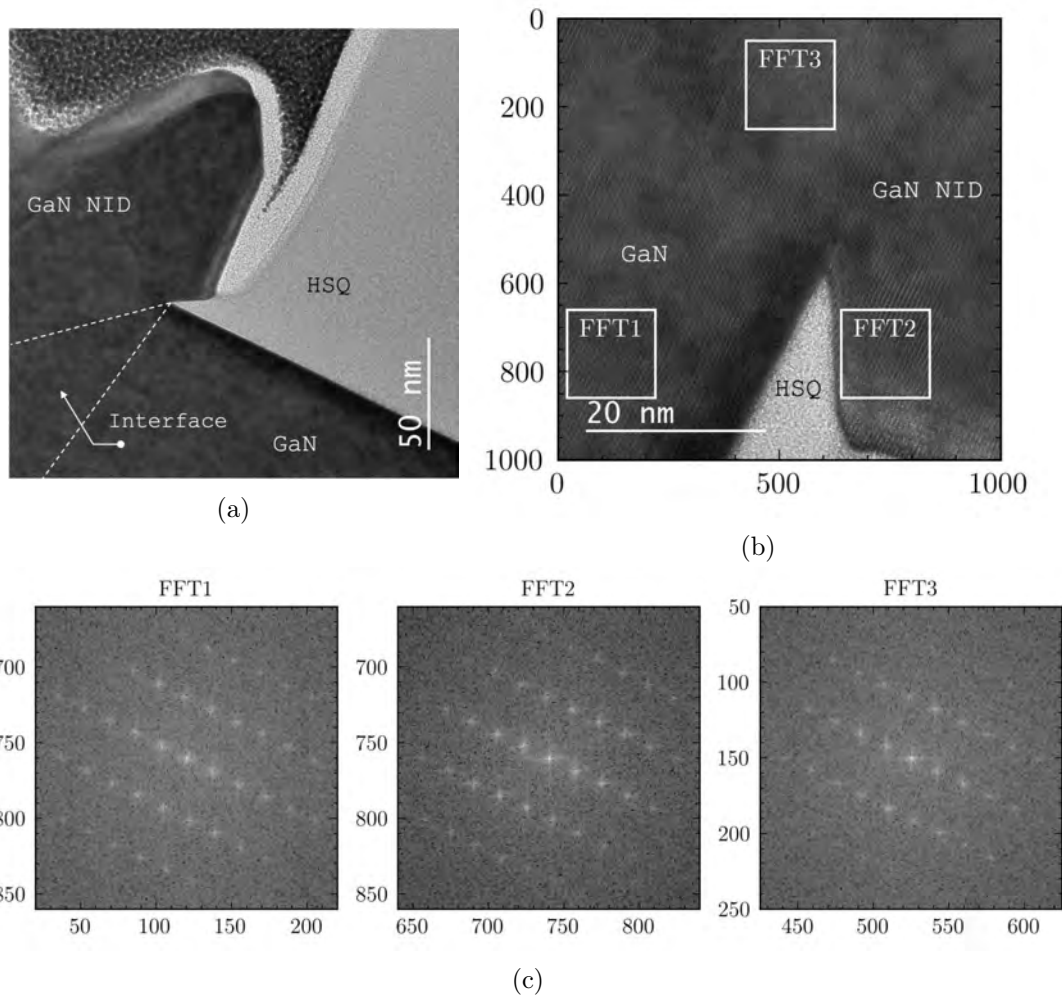


FIGURE III.18 – Analyses TEM de l'échantillon GST03 au pied de la résine HSQ (a et b) et analyses FFT pour le GaN sous la résine HSQ et le GaN NID épitaxié (c)

### 1.3.4.2 Caractérisation de l'épitaxie du P-GaN

Des analyses identiques ont été menées pour évaluer la qualité de la croissance de P-GaN sur l'échantillon ST205. L'observation par microscopie en transmission et à balayage électronique (STEM) du dépôt par épitaxie localisée de P-GaN autour d'un motif HSQ est montrée sur la Figure III.19a. Dans cette observation, la résine HSQ apparaît en noir, l'AlGa<sub>N</sub> en gris foncé et le Ga<sub>N</sub> (y compris P-GaN) en gris clair. Nous distinguons une ligne discontinue et irrégulière noire à l'interface latérale de croissance entre les matériaux d'origine AlGa<sub>N</sub> et Ga<sub>N</sub> avec le P-GaN.

La Figure III.19b présente une vue agrandie sur le coin supérieur droit de l'AlGa<sub>N</sub>, avec le microscope réglé sur un axe de zone. La structure apparaît cristalline et homogène dans tous les matériaux nitrure III-V. Cependant, l'interface de croissance se différencie par une zone plus claire et une largeur inférieure au nanomètre. Nous avons effectué une analyse FFT, présentée dans la Figure III.19c, sur trois zones, FFT1, FFT2 et FFT3 correspondant respectivement aux régions des matériaux d'origine, de la résine HSQ et de l'interface AlGa<sub>N</sub>/P-GaN.



Les spectres FFT1 et FFT3 sont similaires et présentent les mêmes caractéristiques. Le spectre FFT2 se présente sous la forme d'un cercle concentrique caractéristique d'un matériau amorphe tel que la résine HSQ.

Les niveaux de gris sur les observations STEM et TEM peuvent être corrélés à des variations dans l'épaisseur de la lame TEM, à la composition chimique ou à la densité électronique des matériaux. Dans la première observation (a), la ligne noire à l'interface peut être associée à un élément léger ou à des vides. Étant donnée la similarité de couleur avec la résine HSQ, qui a une structure proche du  $SiO_2$ , il est probable que du silicium ait contaminé l'interface avant la croissance du P-GaN. L'absence d'une composante amorphe visible dans l'analyse FFT3 de l'interface de croissance suggère une transition nette entre les matériaux d'origine et le P-GaN.

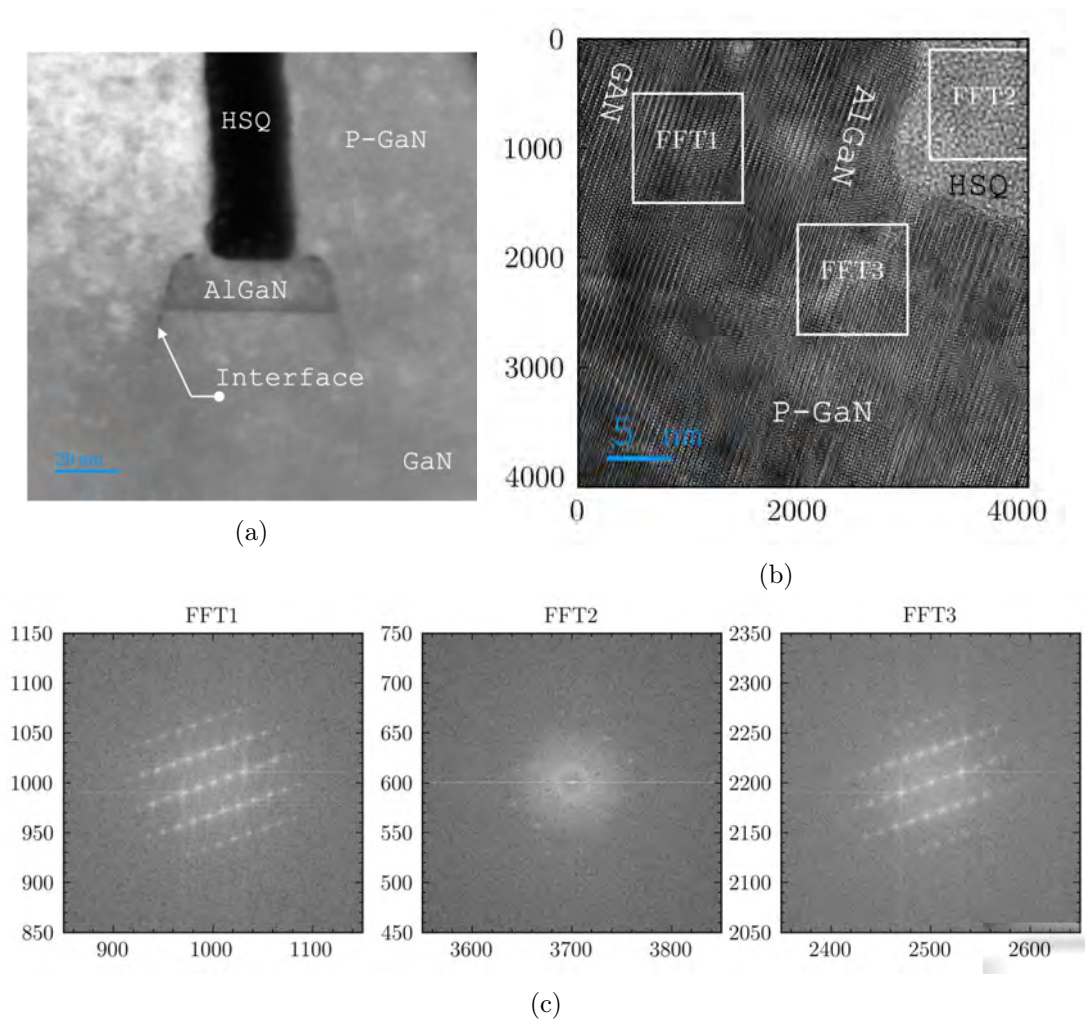


FIGURE III.19 – Analyses TEM (a) et (b) de l'échantillon ST205 et FFT (c) après épitaxie localisée de P-GaN

### Analyse SIMS de l'épitaxie du P-GaN

La Spectroscopie de Masse par Ionisation Secondaire (SIMS) est une méthode de caractérisation physique pour la détection d'éléments et d'isotopes dans les matériaux solides. Elle est particulièrement efficace pour analyser avec précision les profils de concentration en profondeur.



Deux isotopes stables  $^{24}\text{Mg}$  et  $^{26}\text{Mg}$  sont utilisés pour mesurer la concentration du Mg dans la couche épitaxiée de P-GaN, comme illustré sur la Figure III.20. La couche P-GaN analysée est située dans une région de l'échantillon ST102 avec surface de croissance importante, 3,4 mm par 3,4 mm de côté, pour éviter les effets d'ouverture constatés dans les motifs. Les courbes correspondant à  $^{24}\text{Mg}$  et  $^{26}\text{Mg}$  sont superposées jusqu'à une profondeur de 200 nm et une concentration maximale de  $4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  est observée. Cette concentration reste relativement stable sur 75 nm puis diminue rapidement à  $4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  à une profondeur de 100 nm. Cette observation suggère que l'épaisseur de la couche P-GaN est inférieure à l'estimation initiale de 100 nm et que la concentration est légèrement en-dessous de celle visée de  $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . Au-delà de cette profondeur, les caractéristiques des deux isotopes divergent, ce qui peut être attribué à des limites de détection de l'instrument de mesure, à des interférences ioniques ou à des changements dans la composition chimique des couches sous-jacentes.

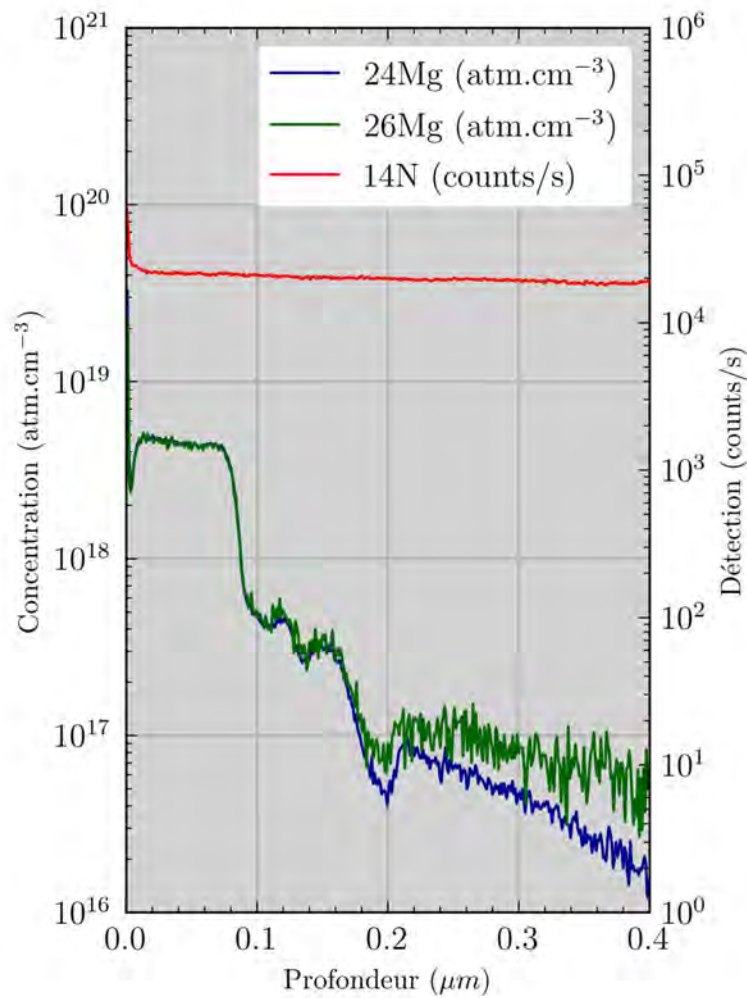


FIGURE III.20 – Analyses SIMS du P-GaN épitaxié

### 1.3.5 Étude de la contamination silicium

Suite aux précédentes observations, une analyse chimique permettant de détecter les traces de silicium, élément connu pour être une source de contamination dans les procédés de reprise d'épitaxie, a été effectuée après la croissance localisée de GaN à l'intérieur de cavités gravées. L'analyse a été réalisée sur trois échantillons : GST03 (Figure III.21a), ST103 (Figure III.21b) et ST205 (Figure III.21c). L'observation TEM a été couplée à la spectroscopie par dispersion d'énergie des rayons X (EDX), permettant d'obtenir des images à haute résolution et de déterminer la composition élémentaire des couches à l'échelle nanométrique.

Sur l'échantillon GST03, l'analyse EDX ne détecte aucune trace de silicium autre qu'à l'intérieur de la résine HSQ. Sur l'échantillon ST103, l'analyse montre une concentration notable de silicium formant une ligne depuis le pied de la résine HSQ et le long du flanc du caisson gravé, indiquant une contamination au niveau de l'interface latérale de croissance du P-GaN. Il est possible que les protocoles de nettoyage utilisés sur la série ST100 soient à l'origine ou contribuent à cette contamination.

Tout comme l'échantillon ST103, le ST205 présente aussi une densité importante de silicium le long de l'interface latérale de croissance. De plus, le traitement adhésif utilisé pour une meilleure tenue de la résine ne semble pas empêcher la contamination.

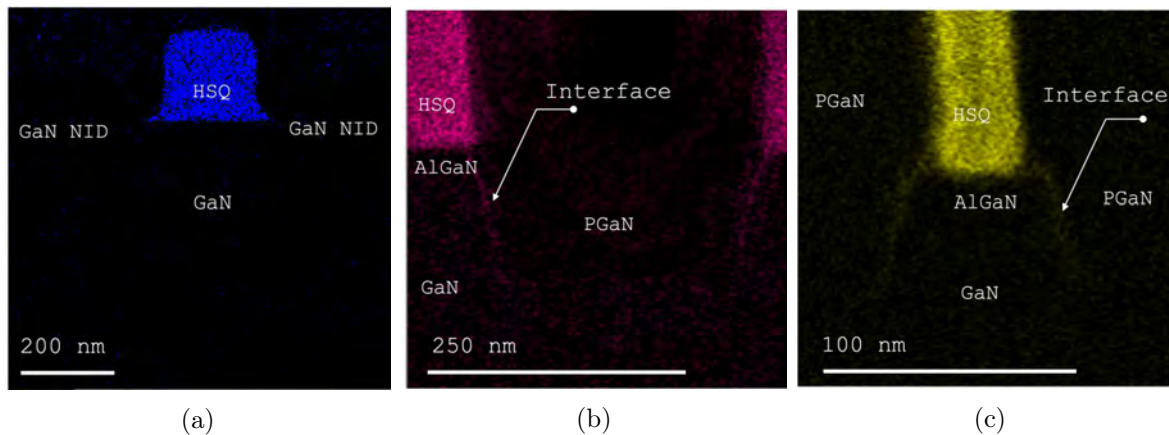


FIGURE III.21 – Observations TEM-EDX de la teneur en silicium sur les échantillons (a) GST03 (bleu), (b) ST103 (rose) et (c) ST205 (jaune)

Il est probable que la résine HSQ soit la principale source de contamination silicium pour les séries ST100 et ST200. Le plasma  $O_2$  utilisé pour stabiliser la résine HSQ avant la gravure des puits dans la série GST semble avoir renforcé la résine, limitant ainsi la contamination au Si. Cela suggère que la stabilisation de la résine HSQ peut être une stratégie efficace pour éviter ou limiter la contamination dans de futurs travaux. À noter que les séries ST100 et ST200 contiennent également une couche d'AlGaN qui a une tendance à s'oxyder plus rapidement que le GaN, pouvant aussi contribuer à fixer les atomes de silicium.

### 1.3.6 Influence du nettoyage pré-reprise d'épitaxie

Dans cette partie, nous traitons les résultats d'observation des expérimentations de la série ST100 ayant subi différents nettoyages chimiques avant la reprise d'épitaxie de P-GaN afin de diminuer les défauts de croissance que nous avons associés à des contaminations lors des premiers runs d'épitaxie de Ga<sub>N</sub> NID. La figure III.22 illustre les images d'observations MEB sur des échantillons ayant vu différents protocoles de nettoyage (cf Table III.2) :

- Protocole p1 à base de Piranha pour les observations (a) et (b)
- Protocole p2 à base de TMAH pour les observations (c) et (d)
- Protocole p3 qui combine le Piranha et le KOH pour les observations (e) et (f)

En ce qui concerne le protocole p1 à base de Piranha, la croissance dans les puits hexagonaux est assez homogène dans le fond de gravure mais irrégulière sur les bords. La nucléation du P-GaN est réduite se produisant préférentiellement dans les angles des cavités. Les motifs de plus petite dimension semblent favoriser la coalescence de ces îlots, résultant en un contour de Ga<sub>N</sub> plus uniforme (Figure III.22b). Le contour de forme hexagonale semble effectuer une "rotation" au fur et à mesure de la croissance.

Le protocole p2, qui utilise le TMAH, a été trop agressif et a conduit à la gravure des murs AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> des caissons sous la résine HSQ : le matériau restant est représenté schématiquement par des triangles sous la résine HSQ. Les contours de Ga<sub>N</sub> formés par extension latérale des flancs, en association avec les plans non polaires de la structure wurtzite du Ga<sub>N</sub> révélés par la gravure chimique, sont nets. Les bords de la croissance ont la même orientation que l'échantillon ayant reçu le protocole p1. Le fond de gravure montre une densité de défauts assez importante dans les petits motifs et une structure en forme de nid d'abeille au centre (Figure III.22d).

Le dernier protocole p3 à base de Piranha et KOH n'a pas donné de résultats satisfaisants. Certaines régions sont poreuses et présentent une grande densité de trous, en particulier pour le remplissage de structures rectangulaires (Figures III.22 e et f).

L'orientation de la croissance observée avec les protocoles p1 et p2 est certainement influencée par l'orientation cristalline initiale de l'échantillon. Le Piranha semble dégrader légèrement l'état de surface empêchant la croissance homogène du P-GaN. Multiplier les nettoyages successifs, comme cela a été fait avec le protocole p3, n'est pas recommandé même si les nettoyages seuls ne suffisent pas à expliquer l'état de la croissance. Le TMAH apparaît comme une alternative intéressante. La morphologie de la couche épitaxiée semble similaire à ce que nous obtenons avec le protocole de référence (KOH+HCl). Cependant, étant donné l'agressivité de la solution utilisée, des ajustements sont nécessaires pour maîtriser la vitesse de la gravure chimique et préserver les zones actives du dispositif électrique sous la résine HSQ (empilement AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>).

De manière générale, les différents nettoyages étudiés ne favorisent pas le remplissage des cavités, indiquant que la croissance est davantage limitée par les mécanismes de croissance que par des contaminations ou l'état de surface initial.

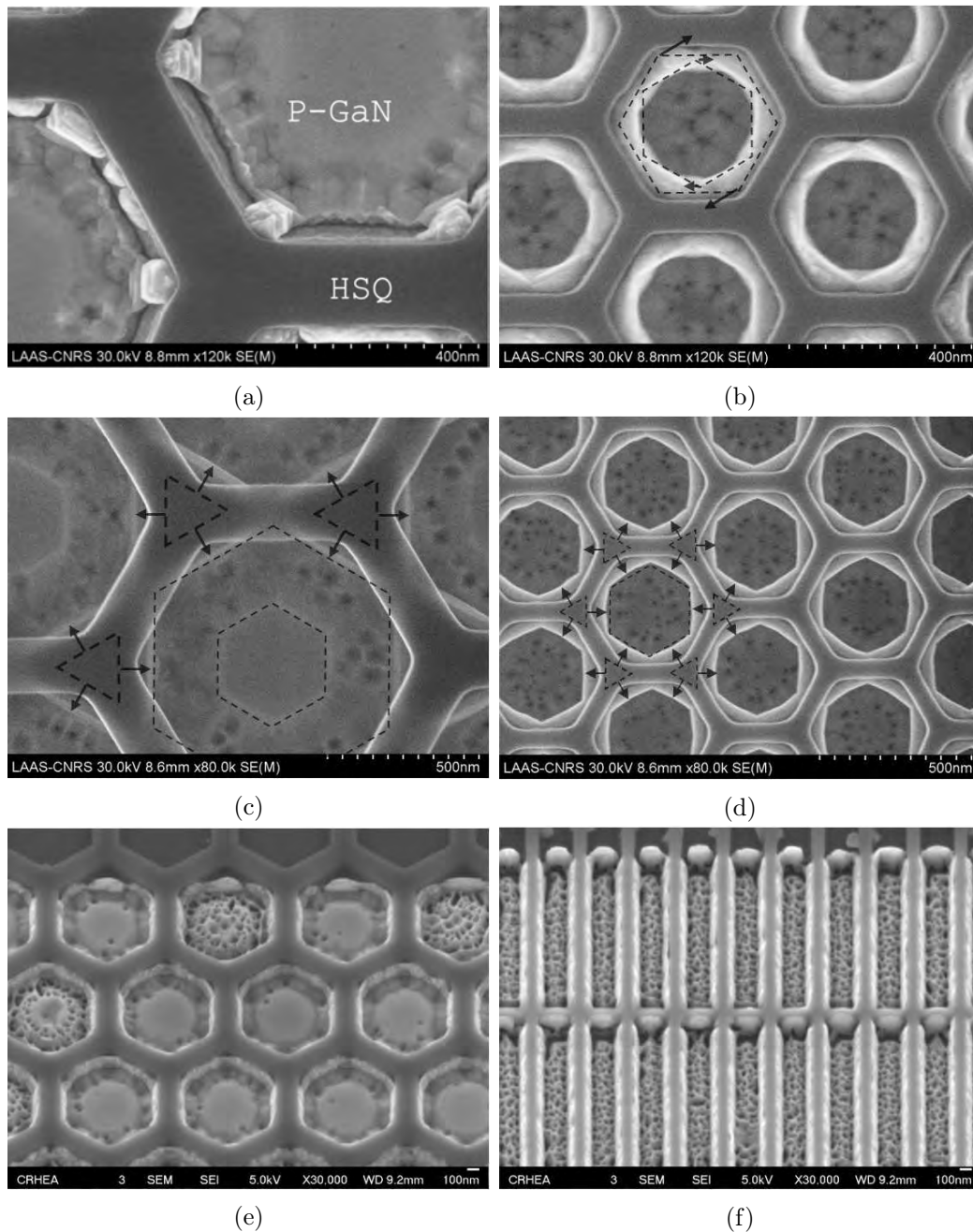


FIGURE III.22 – Observations MEB des épitaxies localisées de P-GaN pour différents protocoles de nettoyage avant épitaxie à base de : (a), (b) Piranha ; (c), (d) TMAH et (e), (f) KOH

## 1.4 Discussions

Nous avons conçu un HEMT dont la réalisation de la grille nécessite la fabrication de caissons P-GaN de dimensions nanométriques. Ces caissons traversent les couches supérieures d'AlGaIn et de GaN de la structure. Pour cela, nous avons développé un procédé de fabrication qui inclut la formation de motifs nanométriques par lithographie électronique dans une résine HSQ. Cette résine sert de masque durant les étapes de gravure des puits et pour l'épitaxie localisée par EJM des caissons P-GaN.

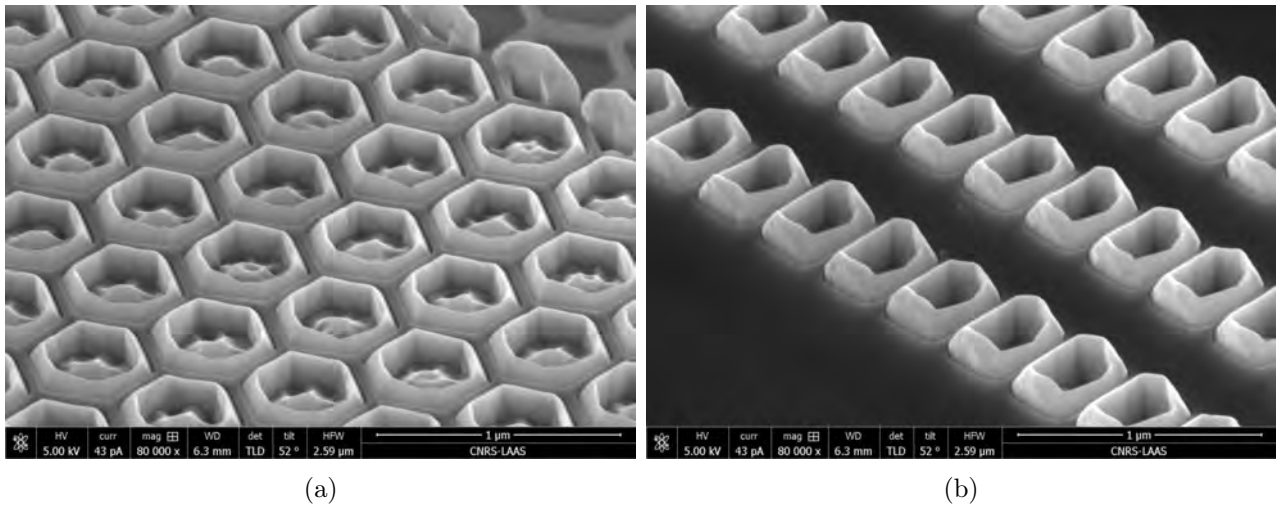


FIGURE III.23 – Observations du résultats du procédé "etch-then-regrowth" pour des motifs nanométriques en utilisant un masque en résine HSQ

Cependant, les résultats obtenus diffèrent de nos attentes. Plutôt que des caissons remplis de manière uniforme et respectant les topologies prévues lors de la conception, nous obtenons des structures plus complexes (cf Figure III.23), comme celles observées pour la croissance localisée de nanofils en GaN. La Figure III.24 montre des exemples de résultats obtenus dans la littérature pour des croissances localisées par MBE [152] et par PAMBE [149, 153]. Dans notre cas, la gravure préalable des puits influence la morphologie des couches épitaxiées, conduisant à la formation de structures de type nano-tubes, dont la dynamique de croissance dépend du type de motifs (rectangles, hexagones... ) et de leur dimension.

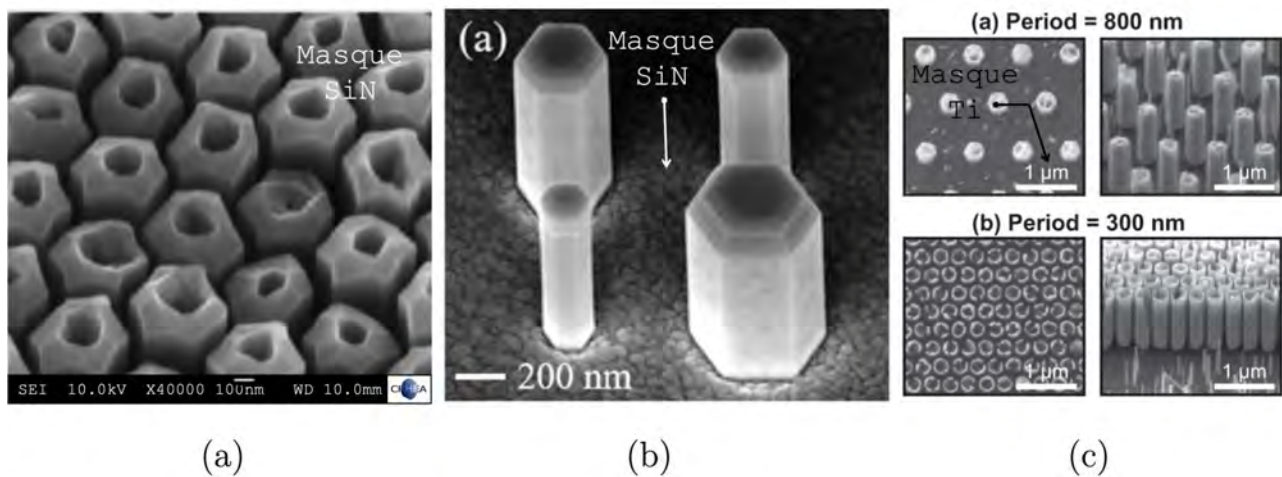


FIGURE III.24 – Résultats de croissance localisée de nanofils en GaN dans des ouvertures circulaires : (a) par MBE sur GaN avec masque SiN [152], (b) par PAMBE sur GaN avec masque SiN [149] et (c) par PAMBE sur diamant avec masque en Ti [153]

Dans le cadre de la fabrication de la grille du HEMT, ces structures complexes ne semblent pas nuire au fonctionnement du dispositif, à condition de respecter les critères issus des résultats de simulation dans le chapitre 2 : les puits doivent être remplis avec une surépaisseur minimale de 20 nm ou la largeur des murs des structures obtenues doit être suffisamment large ( $> 50$  nm).

Si l'on considère les problématiques des contaminations silicium à l'interface latérale de croissance et de dopage P-GaN obtenu de  $4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , cela peut avoir une influence sur la charge d'espace de déplétion dans le canal 2DEG, ce qui diminuerait l'efficacité de la grille. En l'état actuel de nos travaux, ces résultats ne garantissent pas encore le fonctionnement optimal du dispositif. Toutefois, ils contribuent à enrichir les études sur la fabrication de caissons P-GaN, notamment dans le cadre des procédés 'etch-then-growth' (gravure suivie de la croissance).

## 2 Fabrication du HEMT AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> normally-off à grille P-GaN nanostructurée

Dans cette partie, nous présentons les différentes étapes technologiques du procédé de fabrication du HEMT en Ga<sub>N</sub> normally-off que nous avons développé ainsi que le jeu de masques de lithographie que nous avons mis en œuvre à partir des résultats de conception de la grille nanostructurée et des études menées sur la croissance localisée du P-GaN.

### 2.1 Description des étapes technologiques de fabrication du HEMT

Le procédé de fabrication des HEMT normally-off en Ga<sub>N</sub> que nous avons suivi est illustré dans la Figure III.25. La représentation en perspective isométrique montre les plans de coupe A et B, correspondant respectivement aux coupes longitudinales traversant la structure HEMT simplifiée entre deux caissons P-GaN sur la grille et à travers un caisson P-GaN unique.

Les différentes coupes suivantes détaillent la séquence des étapes de fabrication du HEMT pour les deux plans de coupe A et B.

Le processus de fabrication comporte 4 étapes clés :

- **Fabrication des caissons P-GaN (1 et 2) :** Étapes de gravure des mires d'alignements et de la couche de  $\text{SiO}_2$  pour définir la région de grille (2 masques). Étapes de lithographie eBeam d'une résine HSQ, gravure et croissance localisée par épitaxie par jets moléculaires de P-GaN (1 masque).
- **Isolation MESA (3) :** Étape d'isolation des composants par gravure MESA (1 masque)
- **Métallisation source/drain et grille (4) :** Métallisation des contacts ohmiques de source et de drain, et métallisation de la grille du HEMT (2 masques).
- **Réalisation des plots de contacts (5,6 et 7) :** Étapes de passivation et d'ouverture des vias pour métallisation des plots de contact de source, drain et grille (1 masque). Métallisation des plots de reprise de contacts pour l'étape de caractérisation des composants I-V sous-pointes (1 masque)

Hormis les étapes 1 et 2 qui ont constitué le cœur de nos travaux, toutes les autres n'ont pas demandé de développement spécifique de notre part car elles sont classiquement utilisées pour la fabrication des HEMT AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> et elles ont déjà fait l'objet de travaux antérieurs au sein de l'équipe ISGE du LAAS [90, 92]. Nous allons donc décrire chacune de ces étapes en mettant l'accent sur les ajustements que nous avons eu à apporter sur les procédés déjà existants.



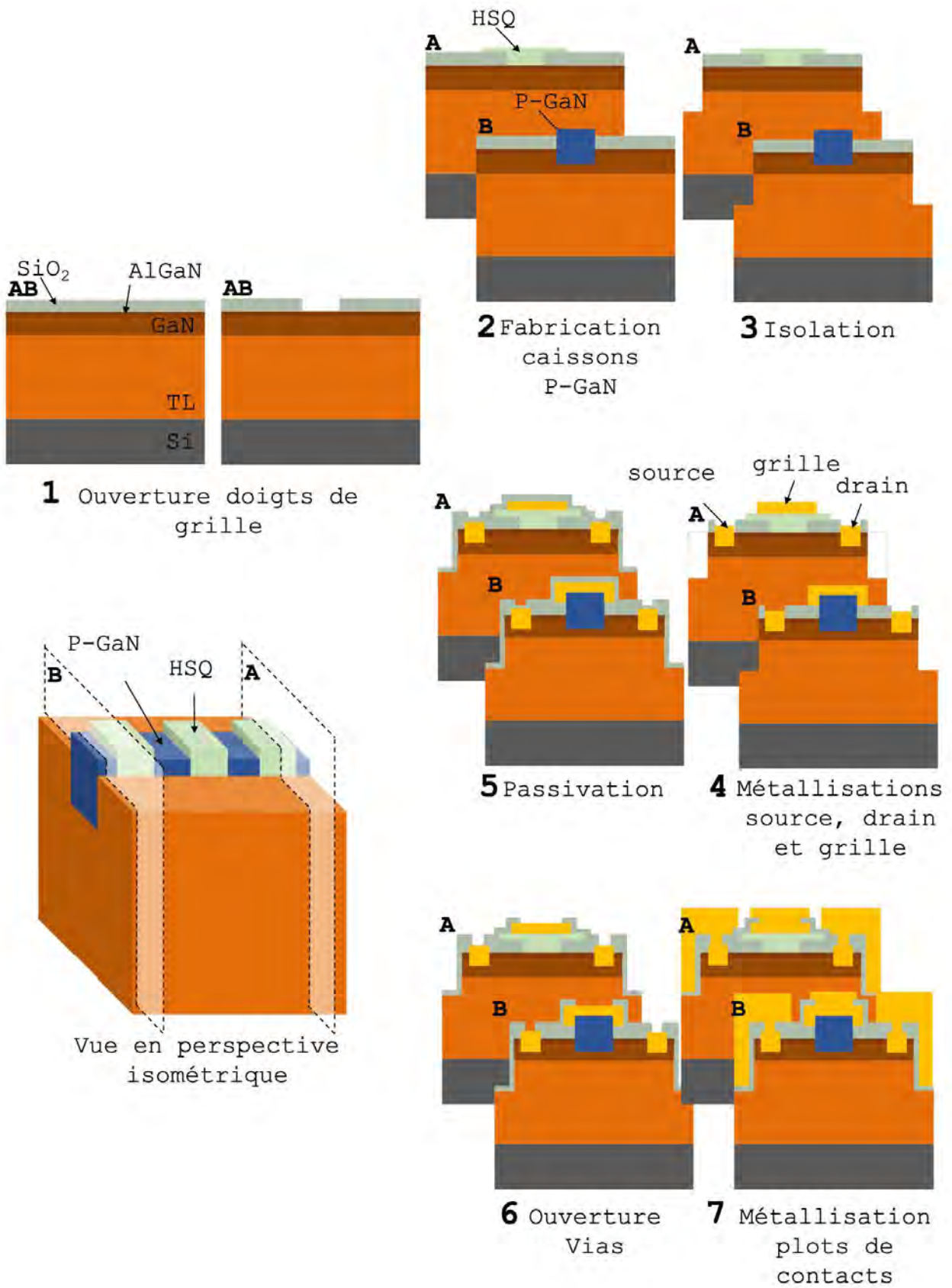


FIGURE III.25 – Description schématique du procédé de fabrication complet du HEMT normally-off à grille P-GaN nano-structurée



Afin de faciliter la lecture du manuscrit, nous avons choisi de reporter dans la Table III.3 le détail des procédés technologiques que nous avons utilisés et qui concernent, par exemple, les nettoyages plasmas, les gravures, les lithographies UV, les métallisations, etc. Lorsque nous décrivons une étape de fabrication, nous ferons référence à chacun de ces procédés par des numéros en exposant allant de 1 à 11, comme reporté dans Table III.3. Par exemple, si l'on décrit "procédés de nettoyage<sup>1,2</sup>", cela fera référence à un nettoyage aux solvants (procédé n°1 de la Table III.3) suivi d'un plasma  $O_2$  (procédé n°2 de la Table III.3).

N°	Procédé	Méthode	Ressources	Détails	Équipement
n°1	Nettoyage solvant	Bains chimiques	Acetone, ethanol, EDI		
n°2	Nettoyage Plasma $O_2$	Gravure Plasma	Plasma $O_2$	P=800 W, $O_2 = 1000$ sccm, t = 5 min, P = 1mb	DIENER (MOS)/TEPLA (NOMOS)
n°3	Dépôt $SiO_2$	CCPECVD	54 $SiH_4$	T = 300°C, t = 12 s	Multiplex CVD ApSy
n°4	Photolithographie	Spin-coating	ECL-3012 1,1µm (MicroChemicals)	a = 4000 rpm/s, v = 3600 rpm, t = 30 s, Recuit à 90°C (60 s)	Suss microtec Labspin
		Exposition UV	$\lambda = 365$ nm	E = 200 mJ · cm <sup>-2</sup> , vacuum contact, Recuit à 110°C (60 s)	SUSS MicroTec MA6 GEN 4
		Développement	MF CD-26	30 s < t < 40 s	
		Gravure RIE	Plasma $CHF_3/O_2$	$CHF_3 = 50$ sccm, $O_2 = 3$ sccm, $P_{RF} = 100$ W, P = 70 mTorr, 30 nm · min <sup>-1</sup> < v < 30 nm · min <sup>-1</sup>	Etchlab 200 SENTECH
n°5	Gravure $SiO_2$	BARC	Plasma $O_2$	$O_2 = 10$ sccm, $P_{RF} = 50$ W, P = 10 mTorr, t = 30 s	
		Gravure ICP-RIE (Rapide) Gravure RIE (Lente)	Plasma $Cl_2/N_2$	$Cl_2 = 90$ sccm, $N_2 = 10$ sccm, $P_{RF} = 60$ W, $P_{ICP} = 500$ W, P = 5 mTorr, v = 350 nm · min <sup>-1</sup> $Cl_2 = 10$ sccm, $P_{RF} = 60$ W, P = 5 mTorr, 60 nm · min <sup>-1</sup> < v < 100 nm · min <sup>-1</sup>	Si500 SENTECH
n°7	Dépôt résine LOR	Spin-coating	LOR 3A 350 nm (MicroChem)	a = 4000 rpm/s, v = 2000 rpm, t = 30 s, Recuit à 170°C (5 min)	SUSS MicroTec Labspin
			LOR 30B (MicroChem)	a = 4000 rpm/s, v = 5000 rpm, t = 30 s, Recuit à 200°C (2 min)	
n°8	Métallisation	Évaporation thermique canon à électrons	Ti/Al/Ni/Au (ohmique) Ni/Au ou Ti/Au (Schottky)	Ti = 15 nm, Al = 150 nm, Ni = 40 nm, Au = 50 nm Ti = 40 nm, Ni = 40 nm, Au = 100 nm	EVA 600 Alliance Concept
		Bain chimique	DMSO	T = 90°C, t > 1 h, agitateur de laboratoire	
n°10	Recuit de contact ohmique	RTP	Suscepteur NOMOS	T = 800°C, t = 30 s, $\Delta T = 20^\circ C \cdot s^{-1}$ , atm $N_2$	AS-ONE Annealsys
n°11	Descumming	Gravure Plasma (NOMOS)	Plasma $O_2$	P=200 W, $O_2 = 1000$ sccm, t = 2 min, P = 1mb	TEPLA

TABLE III.3 – Table des procédés utilisés pour la fabrication du HEMT

## 2.2 Conception du jeu de masques

Comme vu dans la partie précédente, la réalisation du HEMT normally-off nécessite huit étapes de lithographie, décrites ci-dessous, pour compléter le processus de fabrication.

- Niveau 1 : Gravure des mires d'alignement
- Niveau 2 : Ouverture du  $SiO_2$
- Niveau 3 : Lithographie eBeam de la résine HSQ
- Niveau 4 : Gravure du MESA d'isolation
- Niveau 5 : Gravure et lift-off du métal de source et drain
- Niveau 6 : Lift-off du métal de grille
- Niveau 7 : Gravure des vias
- Niveau 8 : Lift-off des plots de reprise de contact

Le jeu de masques a été conçu en utilisant les logiciels de dessin **CLEWin** et **KLayout** ainsi que le langage de programmation **Python**. L'utilisation de **Python** pour générer des dessins CAO présente plusieurs avantages, notamment l'automatisation et la paramétrisation des dessins selon les besoins spécifiques ainsi que la réduction des erreurs de manipulation. Les procédures **Python** peuvent être intégrées dans l'environnement du logiciel **Klayout** ce qui offre davantage de flexibilité.

Les masques ont été créés pour des échantillons de taille 2" comportant 9 cellules élémentaires de 1 cm de côté. La cellule élémentaire est présentée sur la Figure III.26 avec 2 zones distinctes : une avec des variations de la structure HEMT à gauche et une zone de caractérisation des matériaux et des procédés à droite.

Ces zones sont subdivisées en plusieurs sous-régions nommées de A à H :

- **A** : Région principale contenant la nouvelle structure HEMT normally-off avec des variations sur la forme et la taille de motifs de grille nano-structurée.
- **B** : Structures HEMT normally-on avec une variation de la longueur des doigts de grille
- **C** : Structures avancées de HEMT normally-off à doigts de grille multiples avec grilles séparées ou/et avec drain séparés (aiguilleur)
- **D** : Structures HEMT normally-off avec variation de la distance grille-drain  $L_{GD}$
- **E** : Structures HEMT normally-off avec variations sur l'orientation et/ou la longueur de doigt de grille
- **F** : Motifs de caractérisation de la résistance spécifique de contacts ohmiques sur AlGaIn/GaN : cTLMs, TLMs. Motif de caractérisation Van der Pauw pour mesure de la mobilité électronique du 2DEG, motifs de caractérisation des niveaux de métallisation
- **G** : Équivalent de la région F sur la couche P-GaN épitaxiée
- **H** : Motifs de caractérisation Effet Hall

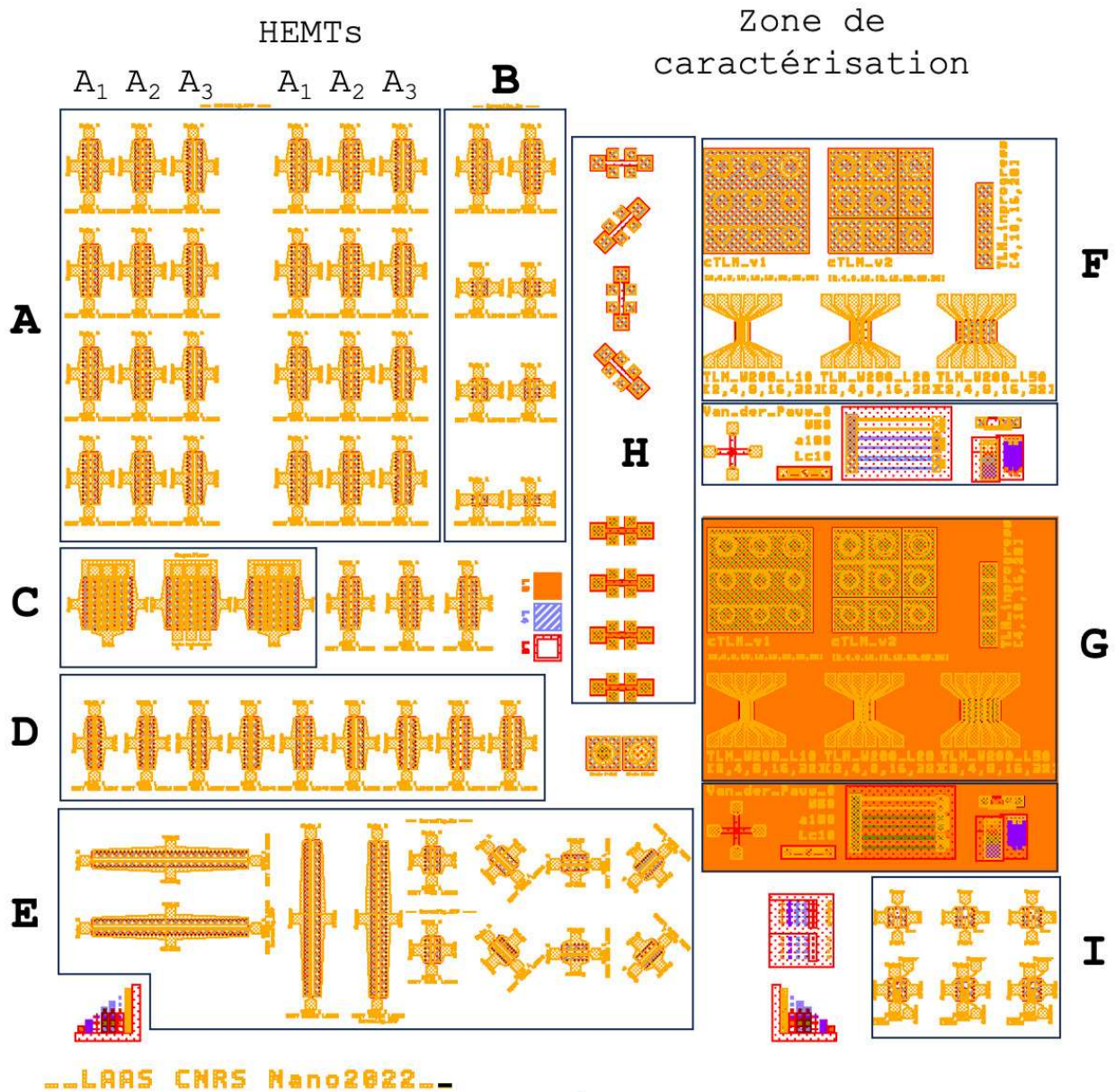


FIGURE III.26 – Dessins d'une cellule élémentaire

Le dessin du masque pour la nouvelle structure HEMT normally-off est présenté sur la Figure III.27 : la vue d'ensemble montre la structure à gauche et la vue zoomée à droite qui permet de distinguer les différents paramètres clés de la structure détaillés dans la Table III.4. Les dimensions sont ajustées afin de prendre en compte les contraintes technologiques de la lithographie UV par contact avec l'aligneur de masques SUSS MicroTec, offrant une résolution limite de  $2\ \mu\text{m}$  et un alignement inférieur à  $1\ \mu\text{m}$  sur une résine AZ ECI 3012  $1,1\ \mu\text{m}$ .

Trois procédures Python ont été utilisées pour générer les motifs de grille que l'on nomme  $A_1$ ,  $A_2$  et  $A_3$ , correspondant au masque de niveau 3 pour la lithographie électronique de la résine HSQ. Ces motifs sont illustrés sur la Figure III.28. La procédure  $A_1$  crée des motifs en forme de lignes espacées de  $300\ \text{nm}$  tandis que la procédure  $A_2$  est utilisée pour créer des trous de forme rectangulaire avec des coins arrondis, ayant des dimensions de  $400\ \text{nm}$  sur  $300\ \text{nm}$ . Enfin la procédure  $A_3$  produit une structure alvéolaire en forme de nids d'abeille. Ces trois

procédures permettent de régler le paramètre  $D_T$ , représentant la largeur des murs HSQ (en violet sur la figure), paramètre essentiel comme montré dans le chapitre de conception de la structure. Les zones exposées à l'épitaxie localisée de P-GaN sont quant à elles représentées en orange (niveau 2). Le passage du courant est assuré par les zones protégées par la résine HSQ de part et d'autre de l'ouverture de grille.

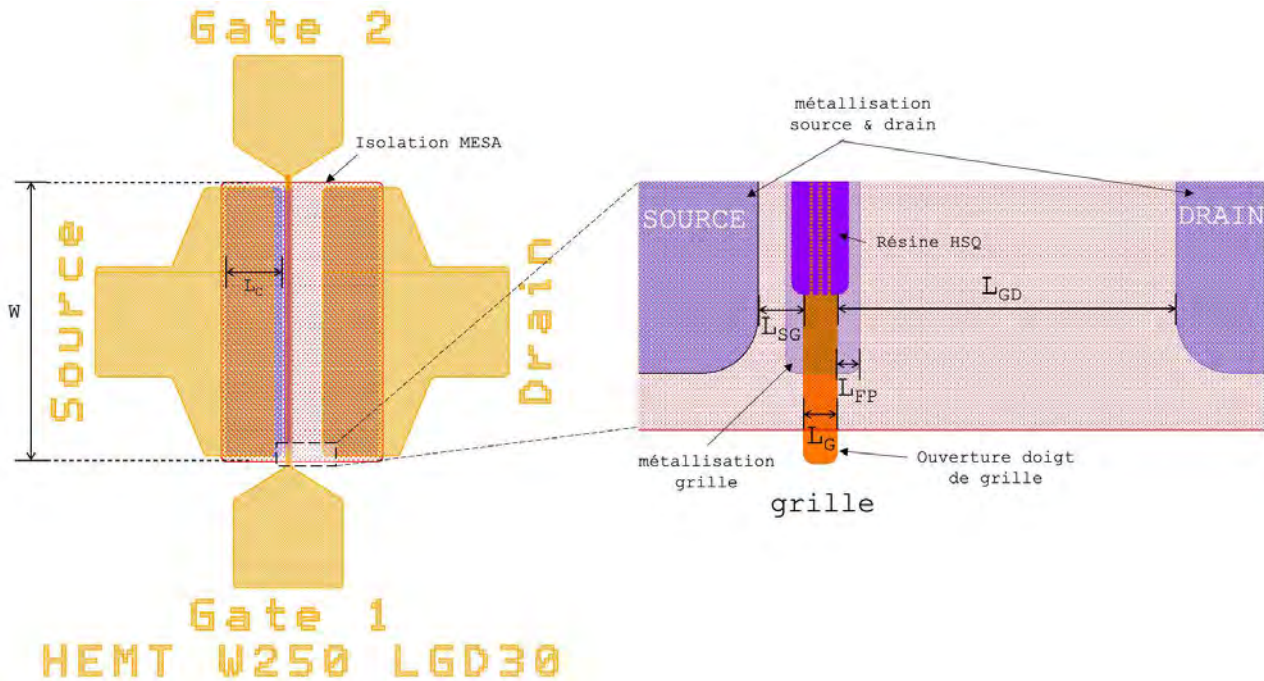


FIGURE III.27 – Dessin du masque de fabrication d'un HEMT normally-off présentant les différents paramètres géométriques de la structure dont la description est donnée Table III.4

Nom	Description	Valeur (défaut)
Paramètres fixes		
$L_C$	Longueur des contacts de source et drain	50 $\mu\text{m}$
$L_{GS}$	Longueur source-grille	4 $\mu\text{m}$
$L_G$	Longueur grille	3 $\mu\text{m}$
$L_{FP}$	Longueur plaque de champ	2 $\mu\text{m}$
Paramètres variables		
$A_x$	Module de grille	[line, (rect), hexa]
$W$	Largeur de la zone active	(500 $\mu\text{m}$ )
$L_{GD}$	Longueur grille-drain	(30 $\mu\text{m}$ )
$\Theta$	Orientation du HEMT	-
Paramètre des modules de grille		
$D_T$	Largeur des murs de résine HSQ	(50 nm)

TABLE III.4 – Table des paramètres de génération de dessins CAO du HEMT normally-off, ainsi que les valeurs par défaut associées



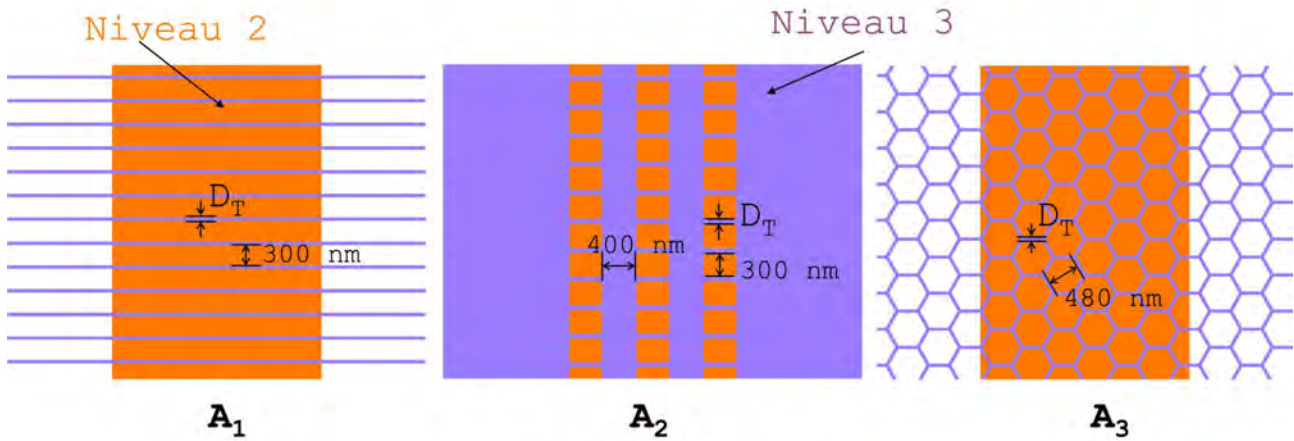


FIGURE III.28 – Dessin du masque des modules de grille avec  $A_1$ ,  $A_2$  et  $A_3$  correspondant respectivement aux modules line, rect et hexa

## 2.3 Réalisation technologique du HEMT

### 2.3.1 Préparation des échantillons

Les substrats utilisés pour la fabrication du HEMT normally-off sont des échantillons carrés de 36 mm de côté découpés à la scie diamantée dans des substrats de la technologie HEMT GaN 600 V sur silicium 8" fournis par la société STMicroelectronics : la nature de l'empilement des différentes couches et leur procédé de fabrication ne seront pas donnés pour des raisons de confidentialité. La découpe a été faite afin de s'adapter à la dimension du suscepteur du bâti de croissance EJM du CRHEA qui est de 2". La résine de découpe utilisée pour protéger la surface de l'échantillon est retirée à l'acétone et à l'éthanol puis l'échantillon est rincé dans l'eau déionisée avant d'être séché à l'azote. Un plasma  $O_2^2$  est effectué pour finaliser l'étape de nettoyage et préparer la surface aux étapes suivantes.

Un dépôt initial d'une couche de  $SiO_2^3$  amorphe de l'ordre de 100 nm est effectué. Cette couche servira de masque pour la gravure et l'épitaxie localisée du P-GaN. Elle sera conservée dans la zone active des composants permettant sa protection durant le procédé de fabrication et garantissant les propriétés électro-mécaniques de formation du 2DEG.

### 2.3.2 Écriture des mires d'alignement

Des marques d'alignement ont été réalisées dans chaque coin de l'échantillon afin de pouvoir faciliter la lithographie électronique de la résine HSQ, étape cruciale lors de la fabrication des caissons P-GaN. Lors de cette opération, le masqueur électronique doit évaluer avec précision la position de l'échantillon. Cependant, la présence de couches de résine HSQ et de  $SiO_2$  est problématique : l'accumulation de charges électriques dans ces matériaux peut atténuer l'intensité du signal reçu entraînant potentiellement des distorsions et des artefacts qui empêchent la détection précise de la position de l'échantillon.

Pour remédier à cela, nous avons choisi de graver profondément les mires. Cette méthode permet d'obtenir une topologie de surface plus marquée, améliorant significativement la détection de motifs lors de la lithographie électronique.

Ces marques ont été réalisées par photolithographie<sup>4</sup> d'une résine photosensible de type ECI, permettant la création des empreintes des mires, suivie par la gravure<sup>5</sup> de la couche de  $SiO_2$  et de la gravure<sup>6</sup> du GaN, obtenant ainsi des motifs ayant une profondeur totale de 800 nm. La Figure III.29 montre les mires spécifiques à la lithographie électronique utilisées pour le repérage de la position par détection automatique des mires carrées de 8  $\mu\text{m}$  de côté.

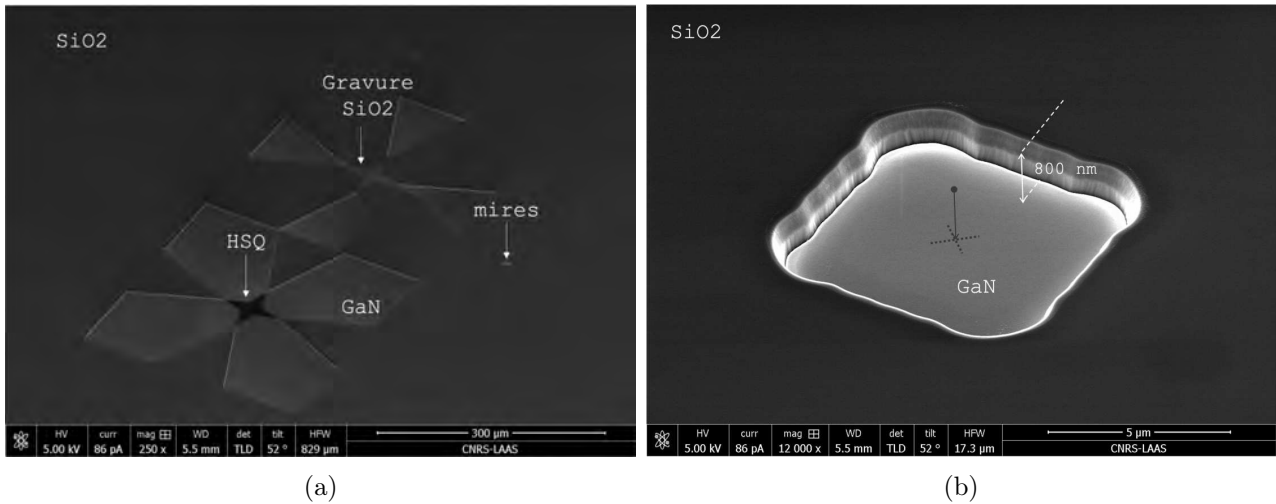


FIGURE III.29 – Observations MEB des mires après réalisation de leur gravure, de l'étape d'ouverture du  $SiO_2$  et de la lithographie électronique de la résine HSQ

Une fois les mires imprimées sur l'échantillon, le procédé se poursuit par le retrait du masque de résine aux solvants<sup>1</sup>. Cette étape est suivie d'un traitement plasma  $O_2$ <sup>2</sup> afin d'éliminer les résidus de résine.

### 2.3.3 Ouverture des doigts de grille

L'ouverture des doigts de grille est la première étape spécifique à la fabrication des HEMTs. Elle est réalisée par la gravure réactive inonique (RIE) utilisant un plasma  $CHF_3/O_2$ <sup>5</sup> de la couche de  $SiO_2$ , comme illustré sur la Figure III.30a. La largeur de la grille a été fixée à 3  $\mu\text{m}$  pour tous les types de HEMT qui seront fabriqués. Lors du retrait du masque de gravure<sup>1</sup>, des résidus en forme de films fins de résine persistent sur les bords de l'ouverture (Figure III.30b). Le procédé de nettoyage par plasma  $O_2$ <sup>2</sup> s'est révélé efficace pour supprimer ces résidus comme le montre l'observation détaillée sur plusieurs doigts de grille sur la Figure III.30c.

### 2.3.4 Épitaxie localisée des caissons P-GaN

Le développement des procédés de lithographie électronique de la résine électrosensible HSQ, de gravure ICP-RIE à base de plasma  $BCl_3$  et de reprise d'épitaxie localisée par EJM de P-GaN est détaillé dans la section 2 de ce chapitre. Cette étape constitue le cœur du fonctionnement du HEMT normally-off et a été réalisée en collaboration avec les laboratoires IEMN et CRHEA.



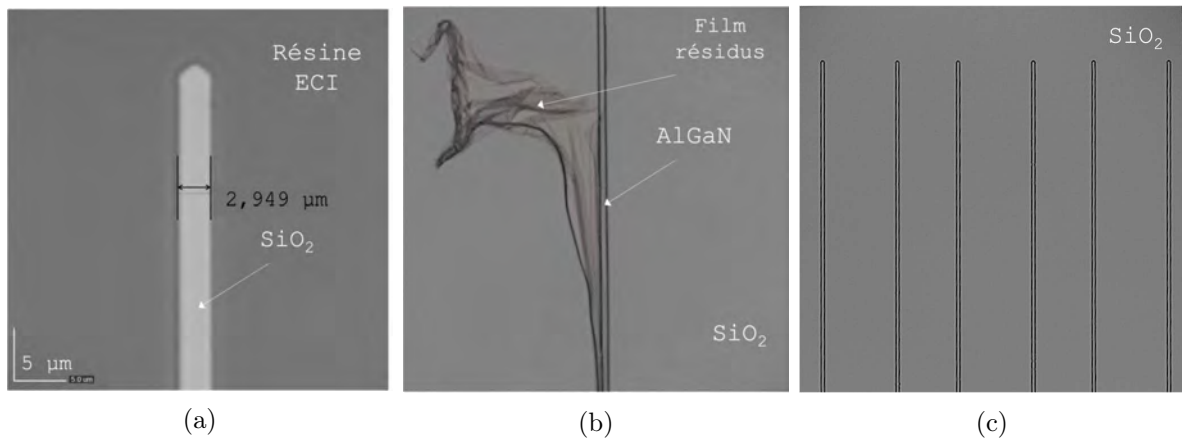


FIGURE III.30 – Observations au microscope optique : (a) résultat de l'étape de photolithographie d'un doigt de grille, (b) résultat de gravure du  $SiO_2$  après retrait du masque de résine et (c) résultat final du procédé après nettoyage plasma  $O_2$

### 2.3.5 Isolation par gravure MESA

L'étape d'isolation est importante pour garantir le fonctionnement d'un dispositif électrique pour plusieurs raisons. D'abord, elle prévient les court-circuits, soit entre dispositifs proches, soit au sein d'un même dispositif sur un échantillon donné. Ensuite, l'isolation améliore les performances en réduisant les couplages parasites entre les composants, permettant un contrôle plus efficace des tensions. Enfin, elle permet aussi de limiter les courants de fuite en confinant les flux électriques dans un domaine spatial défini.

Pour réaliser l'isolation dans le cas de HEMTs, il faut délimiter la zone active de fonctionnement pour guider le courant de la source vers le drain en passant par la grille. Le 2DEG étant le canal de transport du courant, il faut éliminer le 2DEG aux frontières de la zone active.

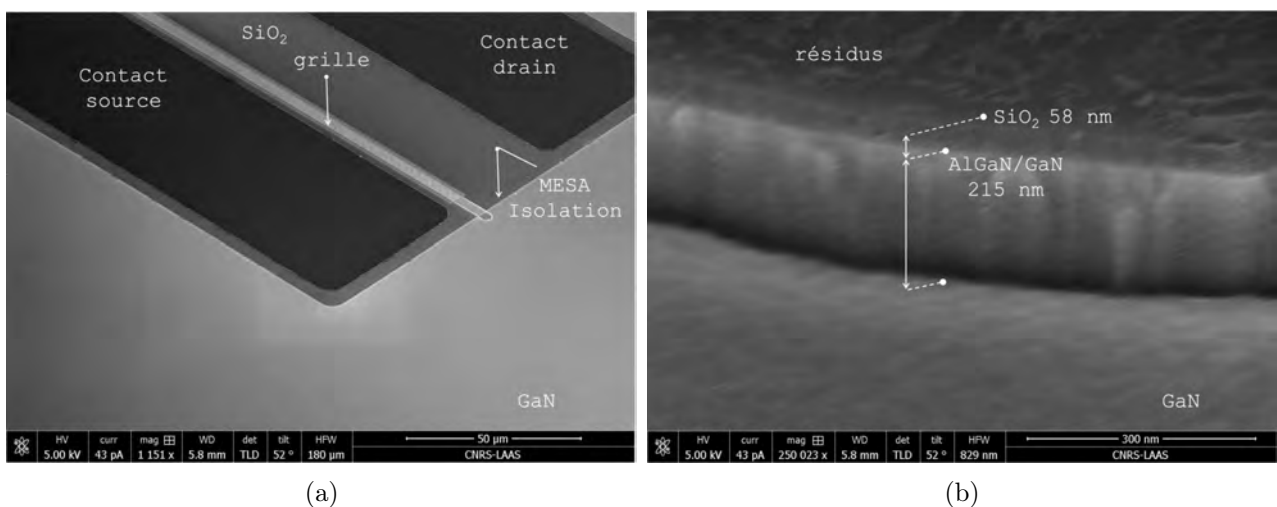


FIGURE III.31 – Observations MEB d'un HEMT (a) à l'étape de réalisation des contacts ohmiques qui suit la gravure MESA et (b) du flanc de gravure du MESA d'isolation

Différentes méthodes existent pour réaliser cette opération, telles que la gravure MESA ou l'implantation ionique, chacune ayant ses propres avantages en termes de performances. Nous avons choisi d'utiliser la gravure MESA car cette méthode est rapide à mettre en place, convenant à la réalisation d'un démonstrateur.

Cette étape implique la gravure fluorée du  $SiO_2$ <sup>5</sup> suivie par la gravure dans les couches nitrures<sup>6</sup> après avoir délimité la zone active avec un masque en résine<sup>4</sup>. Une gravure des couches AlGaN/GaN d'environ 100 nm permet d'assurer la suppression du 2DEG.

À noter que cette étape d'isolation peut être effectuée avant ou après les étapes de métallisation des contacts de drain, source et grille. Toutefois, pour ne pas compromettre la compatibilité MOS dans le bâti de gravure du GaN à base de plasmas chlorés, c'est-à-dire introduire des métaux contaminants, il est préférable de réaliser l'isolation par gravure en amont.

Dans certains cas liés à des pannes machine, nous avons dû effectuer la gravure MESA après la métallisation, ce qui nous a conduit à utiliser un bâti de gravure dit NOMOS, dans l'équipement Omega 201 (1994) de chez TriKon (SPTS), pour lequel des ajustements de procédé ont été nécessaires.

Le procédé se conclut par le retrait du masque de résine aux solvants et plasma  $O_2$ <sup>1,2</sup>.

Cependant, des résidus sont encore visibles sur la surface supérieure du MESA, ce qui est couramment observé pour des plasmas chlorés avec des masques en résine organique.

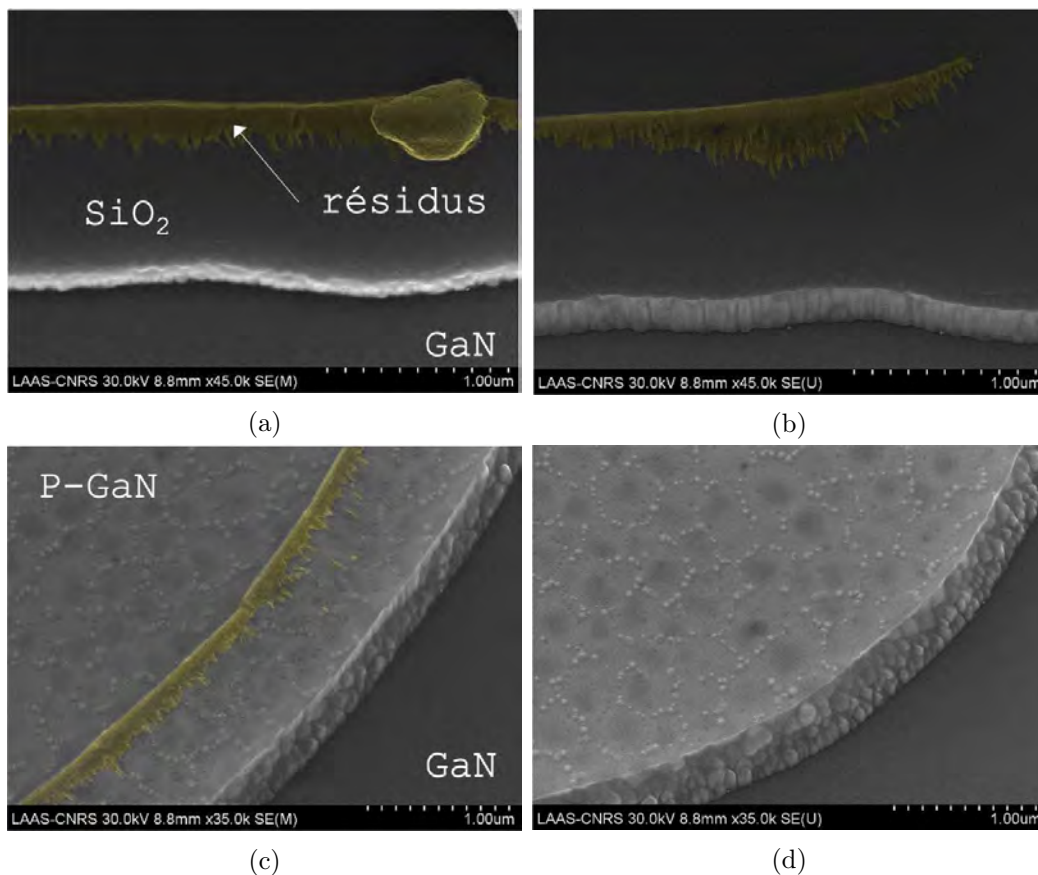


FIGURE III.32 – Observations MEB des résidus de la gravure chlorée du MESA avant (gauche) et après (droite) la procédure de nettoyage montrant respectivement le profil de gravure sur  $SiO_2$  (a,b) et sur une couche de P-GaN(c,d)

Ces résidus se manifestent sous la forme d'une ligne continue le long des bords du MESA, que ce soit sur l'empilement de couches HEMT constitué de  $SiO_2$ /AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>, ou sur la couche de P-Ga<sub>N</sub> épitaxiée localement, comme illustré sur les Figures III.32 (a) et (c) respectivement.

Pour remédier à ce problème, une technique de nettoyage développée dans des travaux antérieurs a été employée en complément de notre procédé [90]. Cette méthode consiste à insoler aux UVs les résidus et faire un bain de développeur MF-CD26 pour les dissoudre. Les résultats de cette tentative sont illustrés sur les Figures III.32 (b) et (d) révélant une élimination efficace des résidus sur le P-Ga<sub>N</sub>. Toutefois, les résidus persistent sur le  $SiO_2$ . Nous avons jugé qu'ils n'étaient pas critiques pour un bon fonctionnement du HEMT, nous avons donc décidé de poursuivre le procédé de fabrication.

### 2.3.6 Réalisation des contacts ohmiques de source et de drain

La fabrication des transistors HEMT nécessite la réalisation de contacts ohmiques de source et de drain avec une résistance de contact minimale. L'étude des contacts ohmiques sur couches HEMT a largement été documentée dans la littérature. L'empilement métallique Ti/Al/X/Au est le plus couramment utilisé, où le métal X peut être du Ti, Ni, Pt ou Mo comme mentionné dans cette référence [154].

Pour effectuer le recuit, un traitement thermique rapide à haute température (RTP), généralement entre 600°C et 900°C, est utilisé. Son objectif est de former une couche de TiN entre le semi-conducteur et le métal de contact. Cela permet de créer des lacunes d'azote dans les couches AlGa<sub>N</sub> et Ga<sub>N</sub>, provoquant un surdopage de type N en surface qui amincit la barrière de potentiel et permet ainsi la conduction par effet tunnel.

L'utilisation de l'aluminium est particulièrement importante car elle permet d'obtenir une hauteur de barrière faible. Le nickel est utilisé comme couche de barrière de diffusion lors du recuit mais il peut être remplacé par d'autres métaux comme le Mo [155] ou le Pt [156]. Enfin, l'or est utilisé pour réduire l'oxydation des métaux pendant le recuit.

Les épaisseurs des couches métalliques Ti/Al/Ni/Au ont été choisies en conformité avec la littérature, soit 15/150/40/50 nm respectivement. Un ratio Ti :Al de 15 :150 permet d'obtenir de bonnes résistances spécifiques de contact de l'ordre de  $0,06 \Omega \cdot \text{mm}^{-1}$  avec une épaisseur de la couche barrière d'AlGa<sub>N</sub> de 13 nm [157, 158].

Il a également été démontré qu'une épaisseur plus faible de la couche barrière (AlGa<sub>N</sub>) améliore le caractère ohmique du contact. Deux approches technologiques sont possibles [157, 159] : la première consiste à graver entièrement la couche d'AlGa<sub>N</sub> avant de déposer le métal, le contact est dit horizontal car il conduit le courant dans le 2DEG par la tranche ; la seconde consiste à graver partiellement la couche d'AlGa<sub>N</sub>, le courant traverse donc la partie restante de la barrière en surface.

Notre choix s'est porté sur la première approche avec un contact sur les flancs de gravure car les procédés de gravure dont nous disposons ne permettent pas de graver partiellement la couche d'AlGa<sub>N</sub>, d'une épaisseur de 20 nm, avec une bonne précision et une bonne reproductibilité.

Le procédé se déroule en plusieurs étapes : tout d'abord le dépôt de la résine LOR<sup>7</sup> suivi de la photolithographie de la résine ECI<sup>4</sup> et d'une gravure par plasma  $O_2$ <sup>11</sup> de faible puissance afin d'éliminer d'éventuels résidus de résine à l'intérieur des empreintes des contacts. Après avoir ouvert le contact dans le  $SiO_2$ <sup>5</sup>, une étape intermédiaire de gravure  $Cl_2/N_2$ <sup>6</sup> des couches nitrures AlGaN et GaN pendant 60 s est effectuée suivie du dépôt de métal par évaporation thermique par canon à électrons<sup>8</sup>. Ensuite, le masque de résine est retiré par lift-off<sup>9</sup>, supprimant le métal dans les zones protégées par le masque. Enfin, des nettoyages<sup>1,2</sup> sont effectués avant d'activer le contact par traitement RTP<sup>10</sup> à 800°C.

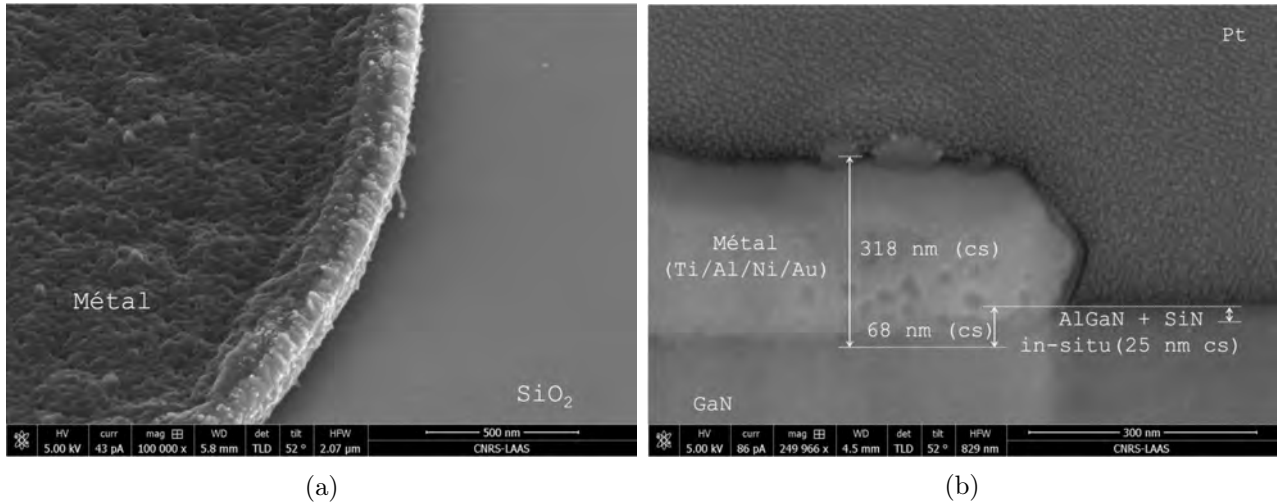


FIGURE III.33 – Observations MEB (a) et FIB (b) du dépôt de Ti/Al/Ni/Au après recuit recouvrant le flanc incliné de la gravure<sup>6</sup> de source et de drain

La Figure III.33a présente une observation MEB du contact métallique obtenu : une sur-épaisseur de métal est visible au bord du contact en raison du recouvrement des flancs légèrement inclinés suite aux gravures successives du  $SiO_2$  et des couches nitrures. La gravure d'une profondeur de 68 nm a traversé entièrement la barrière d'AlGaN. Cela est confirmé par l'observation FIB, présentée sur la Figure III.33b, effectuée sur un échantillon sans  $SiO_2$  réalisé pour validation technologique. Cette traversée complète assure ainsi le contact électrique horizontalement à travers les flancs de gravure. Il est à noter l'importance de l'inclinaison des flancs de gravure, qui favorise un dépôt métallique conforme et essentiel pour obtenir un contact ohmique optimal.

Comme noté sur la table des procédés (Table III.3), plusieurs résines LOR sont disponibles, notamment les résines LOR3A et LOR30B. Elles se distinguent par leur épaisseur, la résine LOR3A (350 nm) étant optimisée pour le dépôt de couches métalliques d'une épaisseur inférieure à 200 nm tandis que la résine LOR30B est adaptée pour le dépôt de couches plus épaisses ( $< 1 \mu\text{m}$ ).

### 2.3.7 Réalisation du contact de grille

La structure HEMT normally-off conçue contient un contact de grille de type Schottky. Ce contact est obtenu par le dépôt d'un métal sur les caissons P-GaN de la structure de grille, formant une interface métal-semi-conducteur distincte. Le métal choisi, caractérisé par son

travail de sortie, détermine la hauteur de la barrière de potentiel qui influence la tension de seuil du dispositif. Pour un semi-conducteur de type P, comme le cas des caissons P-GaN, un travail de sortie plus faible induit une hauteur de barrière plus élevée, ce qui se traduit par un décalage de la tension de seuil vers des valeurs plus positives. Notre étude de conception a considéré des travaux de sortie de 5,1 eV et 4,6 eV correspondant respectivement aux métaux nickel et titane. Nous avons gardé cette flexibilité pour la réalisation du contact de grille en choisissant les empilements Ti/Au ou Ni/Au (50/150 nm).

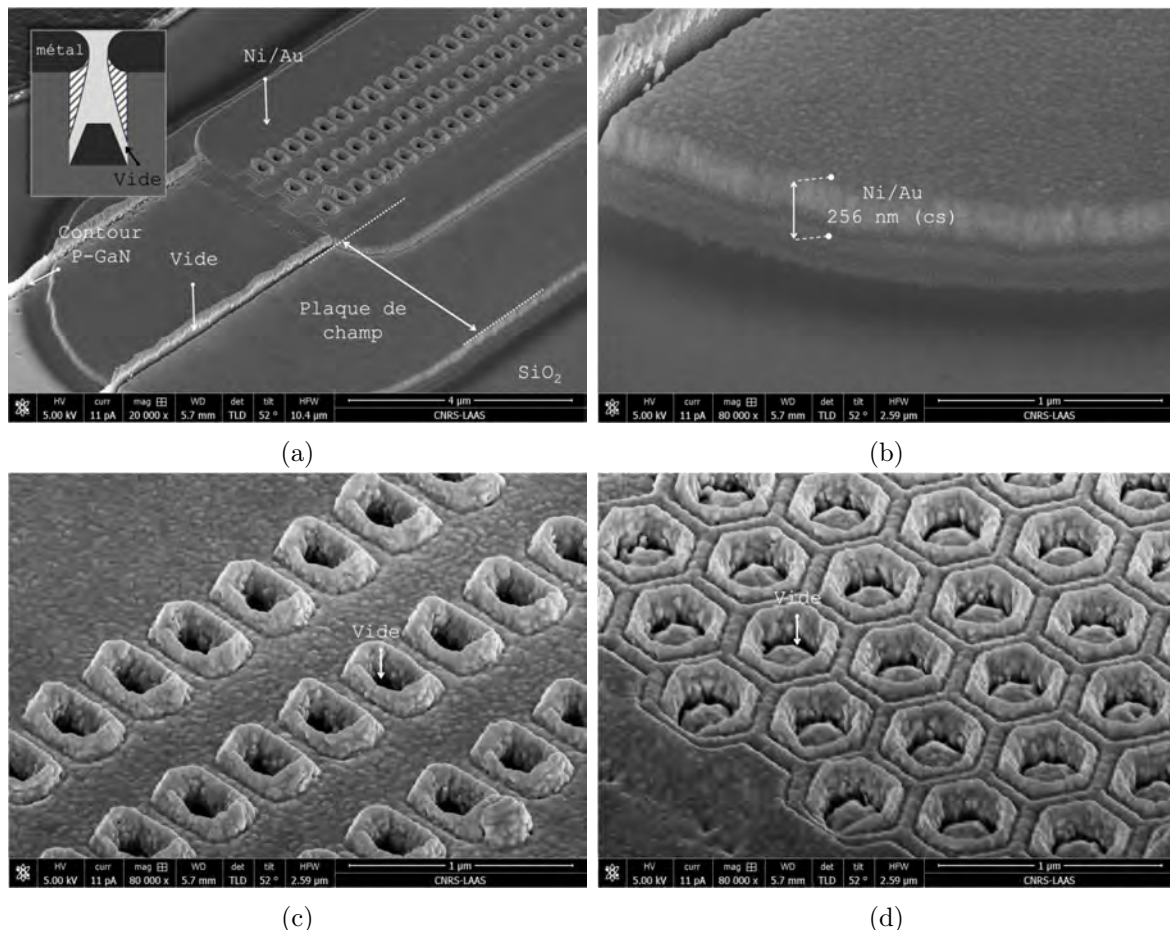


FIGURE III.34 – Observations MEB du dépôt métallique Ni/Au sur la grille : (a) vue inclinée d'une extrémité de grille, (b) vue inclinée montrant le profil du dépôt de métal, (c) et (d) vues détaillées du dépôt sur les motifs de grille

Concernant le procédé de dépôt du métal pour le contact de grille<sup>7,4,11,8,9</sup>, il est similaire à celui utilisé pour les contacts de source et de drain.

La Figure III.34a illustre l'observation du dépôt métallique, composé de Ni et d'Al d'une épaisseur de 256 nm plus importante que prévue (Figure III.34b), à l'extrémité d'un doigt de grille. Bien que le recouvrement dans les caissons semble uniforme, des zones de vide sont identifiables, notamment à proximité des surcroissances de P-GaN et des marches avec une hauteur importante. Ces vides résultent de la nature très directionnelle de la technique de dépôt par évaporation thermique<sup>8</sup>. En effet, lorsque le métal s'accumule au sommet d'une paroi, il crée une zone d'ombrage ne permettant pas un dépôt uniforme, comme le montre l'insert de la Figure III.34a. Cet effet est d'autant plus marqué avec la verticalité et la hauteur des parois.



Cela est particulièrement problématique car cela conduit à une discontinuité du métal, y compris à l'intérieur des motifs de la grille (Figure III.34c et d) et sur la plaque de champ. L'utilisation d'un flux incident oblique pour le dépôt avec rotation de l'échantillon permettrait de pallier ce problème en assurant un dépôt conforme [160]. Cependant, la compatibilité de cette technique avec le lift-off n'est pas encore établie. Un dépôt supplémentaire plus épais pour la réalisation des plots de reprise devrait permettre d'améliorer la métallisation de grille.

### 2.3.8 Réalisation des plots de reprise de contact

À ce stade de fabrication, le HEMT est opérationnel mais nécessite une étape finale de fabrication pour pouvoir le caractériser électriquement. La fabrication des plots de reprise de contact est importante pour placer des sondes électriques (pointes) ou faire des reports (bonding) pour la mise en boîtier du composant.

La réalisation des plots nécessite trois étapes de fabrication : la passivation du composant, l'ouverture des vias sur les contacts de source, drain et grille et la métallisation des plots. La passivation, réalisée par dépôt CCPECVD d'une couche de  $SiO_2^3$ , d'une épaisseur comprise entre 100 nm et 200 nm, vise à préserver l'intégrité du dispositif dans le temps et à isoler électriquement les plots de contact des couches semi-conductrices. L'ouverture des vias s'effectuant sur des contacts métalliques, la gravure fluorée est réalisée dans un équipement avec compatibilité "NOMOS" Si500 de chez SENTECH avec un procédé équivalent au procédé de gravure plasma RIE du  $SiO_2^5$  utilisé dans les étapes précédentes.

Enfin, la métallisation des plots est effectuée via la technique standard de lift-off<sup>7,4,11,8,9</sup> utilisant un masque en résine LOR/ECI. L'empilement de métal choisi est le Ti/Au : une couche de titane de 50 nm, pour assurer une bonne adhérence sur les contacts, et une couche épaisse d'or (> 200 nm) garantit une bonne conductivité et durabilité des plots lors de la caractérisation électrique sous pointes. La Figure III.35 montre une vue des HEMTs ainsi réalisés.

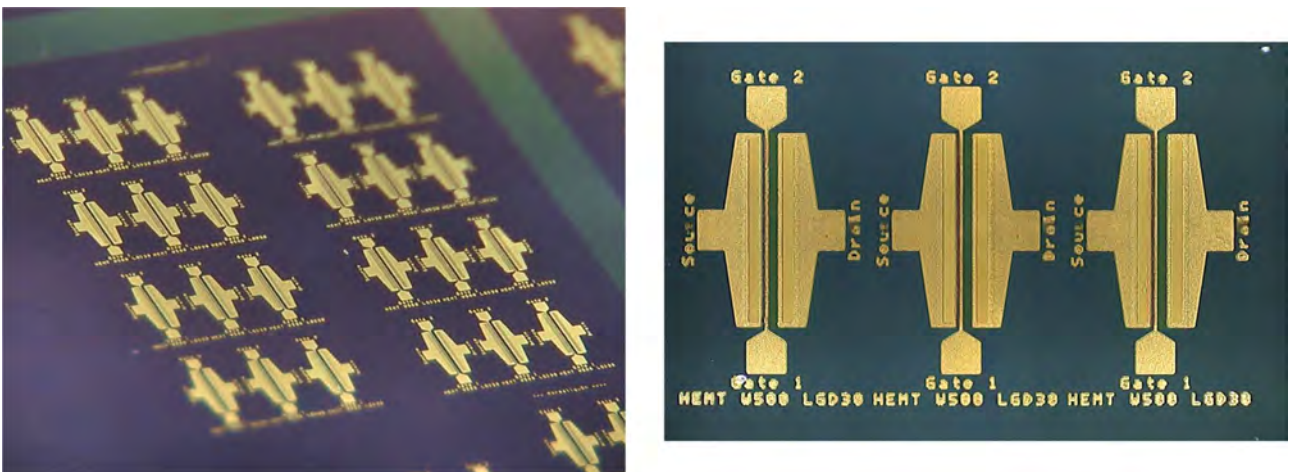


FIGURE III.35 – Photographie des HEMTs après l'étape finale de fabrication

### 3 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre un procédé de fabrication pour réaliser des nanostructures semi-enterrées à base de P-GaN, essentielles pour la réalisation de la grille de la structure HEMT GaN normally-off proposée.

Nous avons dans un premier temps développé la lithographie électronique à très haute résolution d'une résine HSQ pour la mise en forme à la fois du masque de gravure des caissons GaN et de l'épitaxie localisée du P-GaN. Nous avons apporté des optimisations concernant l'adhérence de la résine sur le GaN en appliquant un traitement de surface par dépôt de  $SiO_2$ . Nous avons ensuite procédé à la gravure des puits par plasma chloré à base de  $BCl_3$  et nous avons réalisé la croissance localisée du P-GaN dans les puits par épitaxie par jets moléculaires.

Nous avons mis en évidence que la dimension des cavités était critique pour obtenir une croissance homogène du P-GaN, ce qui s'est avéré être un défi majeur. Les faibles taux d'ouverture, de l'ordre de la centaine de nanomètres, affectent la qualité de la croissance et le taux de remplissage des cavités, avec une surcroissance de GaN localisée sur les bords du masque en  $SiO_2$  et HSQ. Pour des ouvertures de l'ordre du micron, le remplissage des cavités est quasi uniforme avec des défauts de croissance localisés sur les bords du masque. La mise place d'un plan d'expérimentation basé sur l'utilisation de nettoyages chimiques avant épitaxie à base de Piranha et TMAH n'a pas permis d'améliorer l'uniformité de la croissance du P-GaN, ni les contaminations au silicium observées lors d'analyses TEM aux interfaces latérales de croissance.

Nous avons ensuite décrit le procédé technologique complet pour la fabrication d'un HEMT à barrière P-GaN latérale nanostructurée qui fait appel à des étapes qui n'ont pas demandé de développement spécifique, comme la gravure du mesa et la réalisation des contacts ohmiques de source et de drain. La caractérisation électrique des HEMTs ainsi fabriqués fera l'objet du chapitre suivant.



---

# Chapitre IV

## Caractérisation électrique des structures réalisées

### Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons détaillé le procédé de fabrication d'un HEMT normally-off à grille latérale nanostructurée. Deux séries d'échantillons, ST100 et ST200, ont permis de développer et optimiser les différentes étapes de fabrication et, plus particulièrement, celle des caissons P-GaN par épitaxie localisée.

Les résultats d'épitaxie obtenus sur la série ST100 n'ont pas été concluants et n'ont pas permis d'envisager une fonctionnalité normally-off des dispositifs, en raison d'une croissance insuffisante du P-GaN. Sur la série ST200, nous avons augmenté le temps de croissance pour viser une épaisseur de GaN 170 nm afin d'assurer le remplissage des caissons et nous avons réalisé un nouveau cycle de fabrication du HEMT.

Nous présentons dans ce chapitre les caractérisations électriques effectuées sur un échantillon de cette série afin d'évaluer la fonctionnalité de l'hétérostructure AlGaN/GaN, de mesurer les résistances de contact et d'analyser le fonctionnement des HEMTs ainsi fabriqués.

# 1 Fonctionnalité de l'hétérostructure AlGaN/GaN des substrats de la série ST200

Afin de vérifier la fonctionnalité des couches de l'hétérostructure AlGaN/GaN sur la série ST200 et confirmer la présence du 2DEG, nous avons effectué des mesures de capacité  $C(V)$ . Pour cela, nous avons utilisé le motif de test représenté sur la Figure IV.1, qui n'est autre qu'un motif cTLM et qui nous a semblé approprié puisque constitué d'un plot circulaire de  $150\mu\text{m}$  de diamètre et d'un plan de masse avec une surface suffisamment importante. Les contacts métalliques sont réalisés à partir d'un dépôt de Ti/Pt/Au d'épaisseurs respectives  $50/70/700\text{ nm}$ .

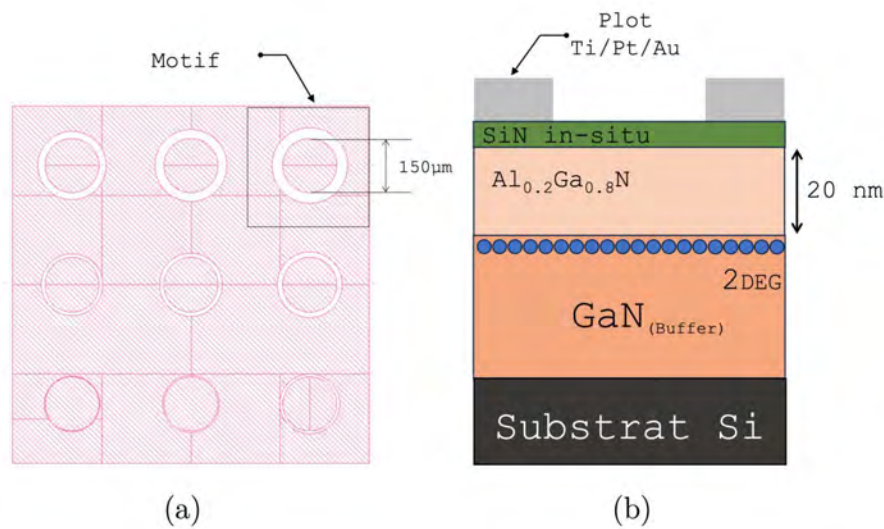


FIGURE IV.1 – (a) Motif de caractérisation utilisé pour la mesure  $C(V)$  et (b) coupe schématique des couches de la série ST200

Les mesures ont été effectuées à l'aide d'un analyseur d'impédance Agilent 4294A ainsi qu'une station sous pointes Signatone CM210. Préalablement, une calibration en circuit ouvert a été réalisée pour atténuer les impédances parasites résultantes des équipements. Une mesure de l'impédance  $Z(f)$  a été faite pour vérifier la nature capacitive du dispositif. Les résultats montrent, selon la Figure IV.2a, que l'impédance mesurée est effectivement une capacité, la phase étant de  $-90^\circ$  dans la plage de fréquence comprise entre 10 kHz et 5 MHz.

La Figure IV.2b illustre le profil  $C(V)$  mesuré qui met en évidence un pincement du 2DEG à  $-3\text{ V}$ , ce qui est un trait caractéristique des structures HEMT. Les oscillations présentes sont probablement attribuables à des effets de bord du motif de test, l'utilisation d'un motif de caractérisation inadapté (motif cTLM initialement prévu pour la caractérisation de la résistance des contacts ohmiques), ainsi qu'à des limites du banc de mesure, compte tenu de la faible valeur de la capacité mesurée, de l'ordre de quelques dizaines de pF. Cependant, ces résultats ont permis de confirmer la présence du 2DEG pour la série ST200.

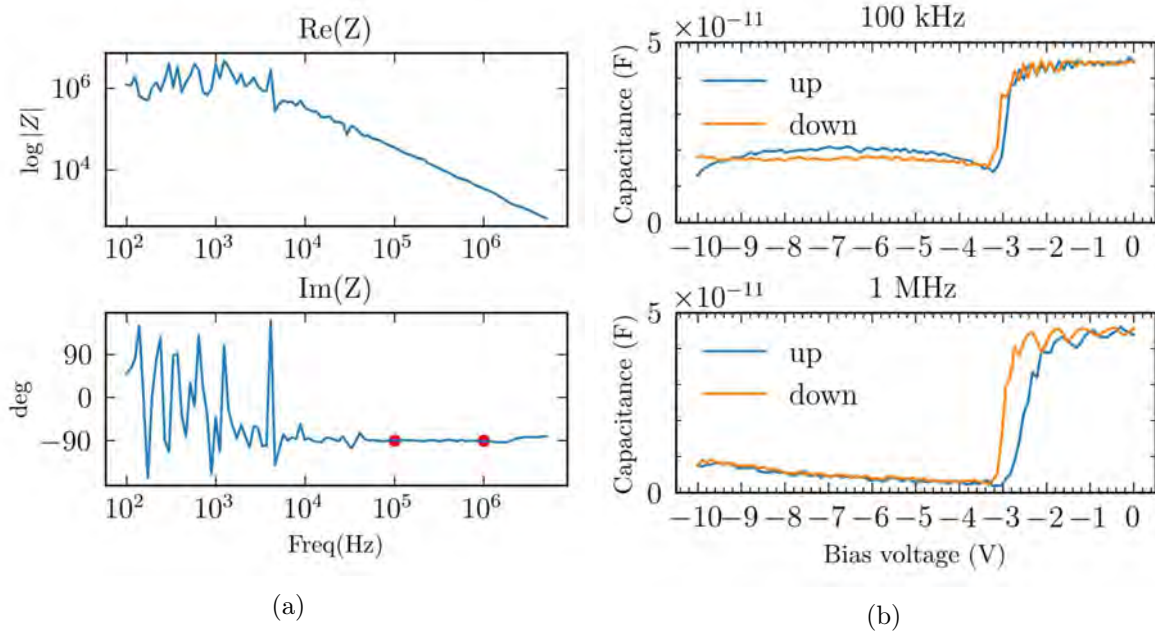


FIGURE IV.2 – Mesures de (a) l'impédance caractéristique et (b) du profil de capacité-tension à petit signal d'amplitude 1 V efficace à 100 kHz et 1 MHz

## 2 Caractérisation électrique des contacts et du 2DEG

Pour caractériser la résistance des contacts issus de notre procédé de fabrication de contacts ohmiques avec l'empilement métallique Ti/Al/Ni/Au, nous avons utilisé la technique de "Transfer length method" (TLM) afin de déterminer la résistance de contact  $R_c$  et la résistance de couche  $R_{\square}$ . Deux types de structures permettent d'effectuer des mesures TLM : les TLM droits et les TLM circulaires (cTLM). Nous présentons ici les résultats obtenus pour l'étude des TLM droits. À noter que ces caractérisations ont été faites sur une plaque de la série ST100 car nous souhaitons valider le procédé de fabrication des contacts ohmiques avant d'entamer la réalisation du HEMT.

### 2.1 La méthode TLM

Les motifs TLM se caractérisent par plusieurs contacts métalliques ayant des espacements inter-contacts différents (Figure IV.3a). Afin d'évaluer la résistance des contacts, nous injectons un courant entre deux contacts et nous mesurons la chute de tension permettant d'extraire la résistance totale  $R_{tot}$  selon la loi d'Ohm :

$$V = R_{tot} \times I \quad (\text{IV.1})$$

À noter que nous avons utilisé une mesure 4 pointes : l'injection de courant et la mesure de la chute de tension sont effectués de manière distincte afin d'éliminer les résistances propres à la sonde de mesure.

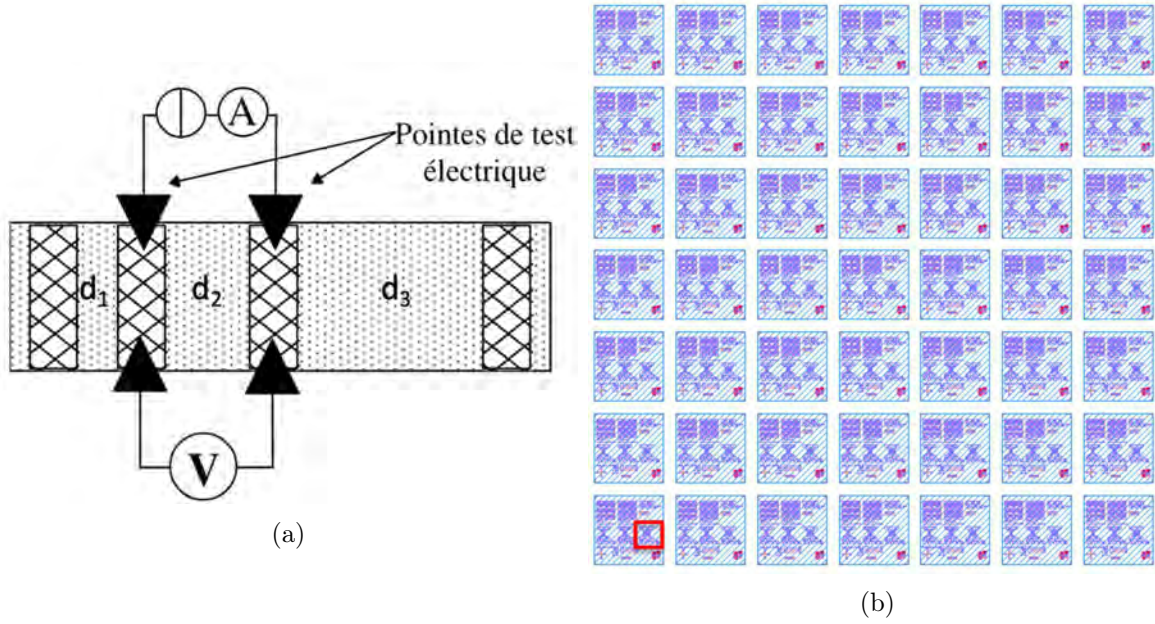


FIGURE IV.3 – (a) Méthode de mesure 4 pointes sur un motif TLM linéaire et (b) masque avec 49 cellules de caractérisation de contacts ohmiques (motif TLM linéaire testé encadré en rouge)

Nous traçons ensuite la résistance  $R_{tot}$  mesurée en fonction de la distance  $d$  entre deux contacts d'un motif TLM. Dans le cas d'un contact parfaitement ohmique, la relation entre  $R_{tot}$  et  $d$  est linéaire et exprimée par la relation :

$$R_{tot} = \frac{Rsh_{\square}}{W} \times d + 2R_c \quad (IV.2)$$

où  $R_{\square}$  est la résistance par carré de la couche active (ou du 2DEG),  $R_c$  la résistance de contact et  $W$  la longueur des contacts.

La résistance par carré de la couche active  $R_{\square}$  est obtenue à partir de la pente de la caractéristique  $R_{tot}(d)$  (Eq. IV.3) et la résistance de contact  $R_c$  est obtenue à partir de la valeur de  $R_{tot}$  extrapolée à l'origine (Eq. IV.4).

$$Rsh_{\square} = \frac{\Delta R_{tot}}{\Delta d} \times W \quad (IV.3)$$

$$R_c = \frac{1}{2} R_{tot}(0) \quad (IV.4)$$

## 2.2 Détermination des résistances de contact $R_c$ et de la couche $R_{\square}$

Les mesures TLM sont effectuées à l'aide un testeur sous pointes semi-automatique MPI TS-2000D/BA1500A avec un courant allant de  $-100$  mA à  $100$  mA et une compliance en tension de  $20$  V. La Figure IV.4a présente par exemple les caractéristiques  $V(I)$  d'un motif TLM pour différents espacements allant de  $2 \mu\text{m}$  à  $32 \mu\text{m}$ . La caractéristique  $V(I)$  n'étant pas linéaire, en raison de la saturation de la vitesse des porteurs sous champ élevé, l'extraction de la résistance

$R_{tot}$  s'effectue par la mesure de la pente de la caractéristique à 0 V. La variation de la résistance totale en fonction de la distance est illustrée sur la Figure IV.4b dans laquelle nous avons déduit une résistance de contact de  $2,5 \Omega \cdot \text{mm}$  ( $R_c/W$  avec  $W=0,25 \text{ mm}$ ) et une résistance de couche de  $626,5 \Omega \cdot \square^{-1}$ .

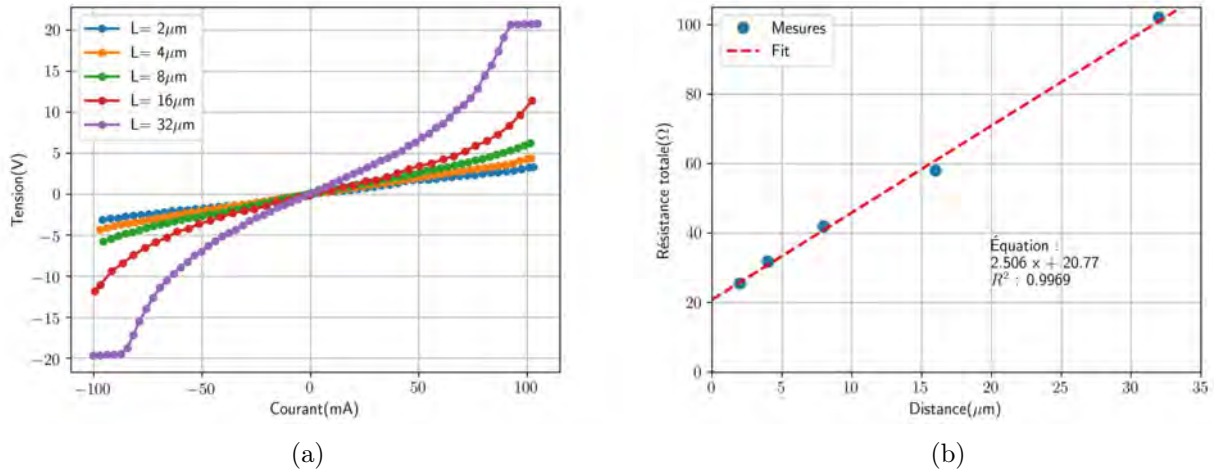


FIGURE IV.4 – (a) Caractéristiques  $I(V)$  mesurées et (b) résistance totale  $R_{tot}$  en fonction de la distance  $d$

La station sous pointes MPI possède un support motorisé semi-automatique permettant de dresser la cartographie de  $R_c$  et  $R_{\square}$  (Figure IV.5) et de vérifier l'homogénéité des caractéristiques électriques sur 49 motifs TLM ( $7 \times 7$  cellules Figure IV.3b). Le détail de la cellule de test est donné dans la Figure III.26 dans le chapitre précédent. Les deux cartographies de la résistance par carré du 2DEG et de la résistance des contacts sont homogènes sur une grande partie de l'échantillon, à l'exception de la zone centre-droite où les variations sont attribuables à la manipulation de l'échantillon lors de sa fabrication.

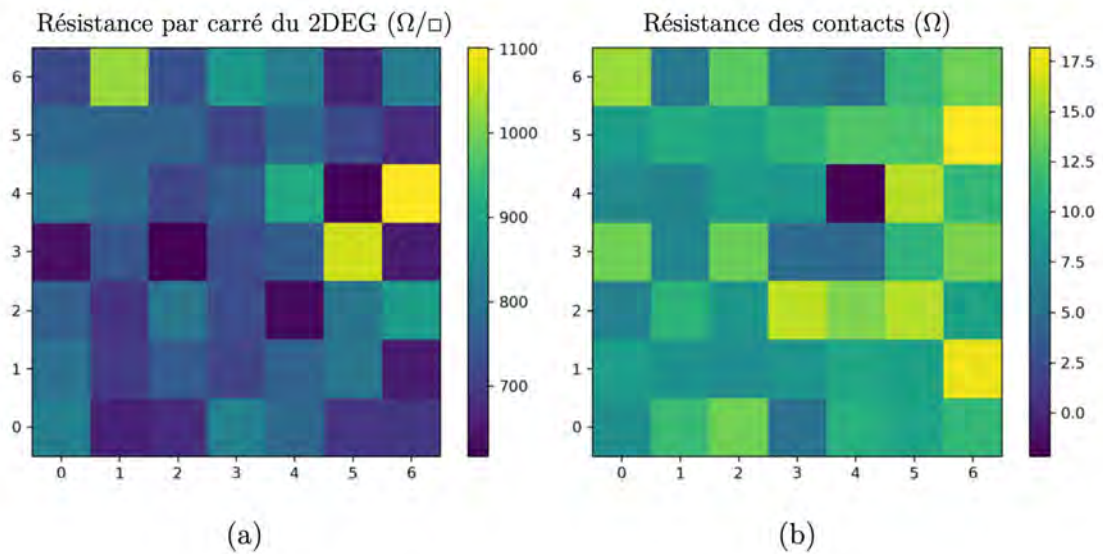


FIGURE IV.5 – Cartographie (a) de la résistance par carré du 2DEG et (b) de la résistance de contact  $R_c$  mesurée sur un échantillon de dimension  $36 \text{ mm} \times 36 \text{ mm}$  de la série ST100



Les histogrammes reportés sur la Figure IV.6 montrent que la couche active présente en moyenne une résistance variant entre  $600 \Omega \cdot \square^{-1}$  et  $800 \Omega \cdot \square^{-1}$  et une résistance de contact de  $2,5 \Omega \cdot \text{mm}$  ( $R_c/W$  avec  $W=0,25 \text{ mm}$ ).

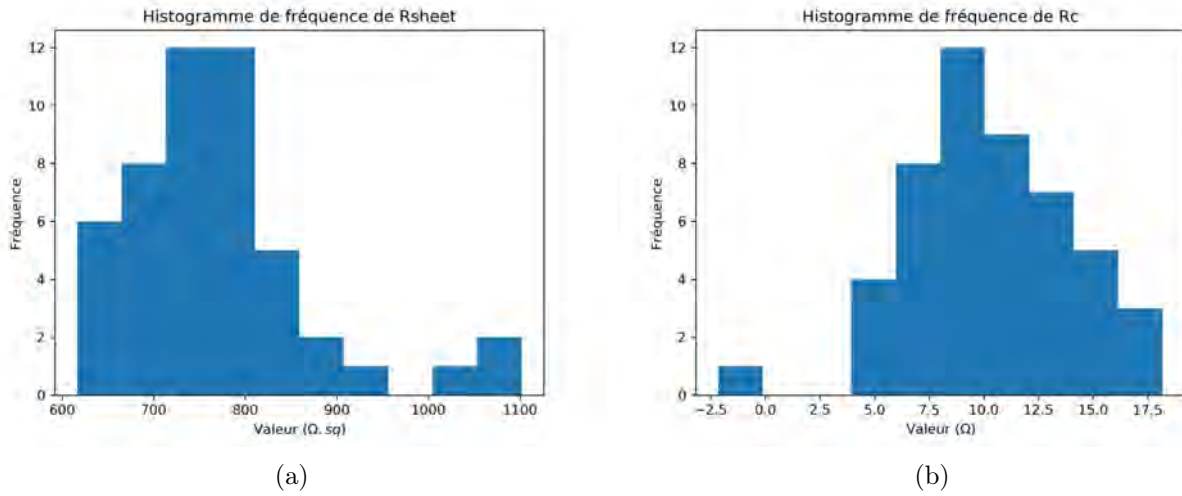


FIGURE IV.6 – Histogrammes (a) de la résistance par carré du 2DEG et (b) de la résistance des contacts

Bien que la valeur de  $R_{\square}$  soit un peu élevée, ces résultats permettent de valider le procédé de fabrication des contacts ohmiques.

### 3 Caractérisation des HEMTs normally-off

Dans cette section nous présentons les résultats de caractérisation des HEMTs à barrière P-GaN nanostructurée fabriqués lors du deuxième cycle de fabrication sur la série ST200 (Échantillon ST203), à savoir caractérisation de la diode P-GaN/2DEG et caractéristiques de sortie  $I_D(V_{DS})$  et  $I_G(V_{DS})$ .

#### 3.1 Caractérisation de la diode P-GaN/2DEG

Nous avons réalisé un motif de caractérisation (Figure IV.7a) pour l'analyse des caractéristiques électriques de la diode P-GaN/2DEG latérale, telle qu'illustrée sur la Figure IV.7b, faisant partie intégrante de la structure de grille du HEMT que nous avons développé.

Les caractéristiques  $I(V)$  sont reportées dans la Figure IV.8. Dans la caractéristique de l'état bloqué, qui est la région où la tension  $V$  appliquée est négative, nous pouvons observer que le courant est faible, à l'exception de la diode de la cellule [2,0], jusqu'à une valeur de tension d'environ  $-10 \text{ V}$ . Le comportement de la caractéristique en échelle semi-logarithmique en direct comme en inverse est typique de celui d'une diode, avec le courant qui augmente de manière exponentielle avec la tension  $V$  appliquée en sens inverse.

Cependant, une disparité dans la forme et les valeurs du courant suggère des fuites de courant qui peuvent être attribuées au procédé de fabrication. En effet, nous avons mis en évidence dans le chapitre technologique, des contaminations silicium aux frontières de la reprise d'épitaxie de la

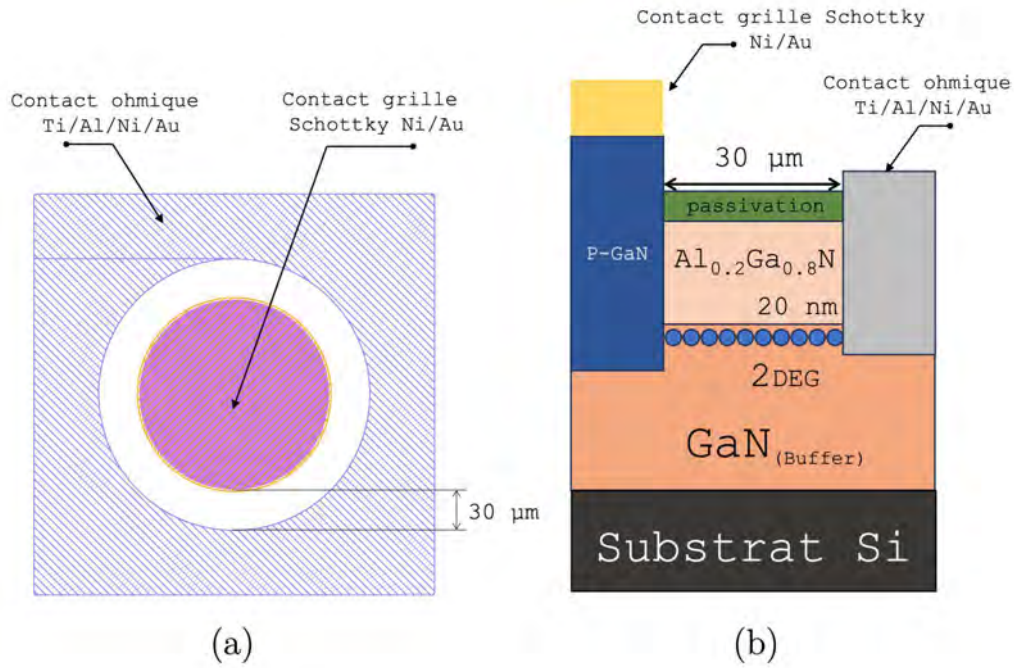


FIGURE IV.7 – (a) Masque de fabrication de la diode P-GaN/2DEG et (b) vue de coupe transversale de la diode P-GaN/2DEG latérale

barrière P-GaN pouvant contribuer à l'apparition de fuites. Il est probable que le fonctionnement du HEMT soit ainsi limité et une analyse plus détaillée ainsi que l'optimisation du procédé de fabrication sont nécessaires pour améliorer la caractéristique de la diode P-GaN/2DEG.

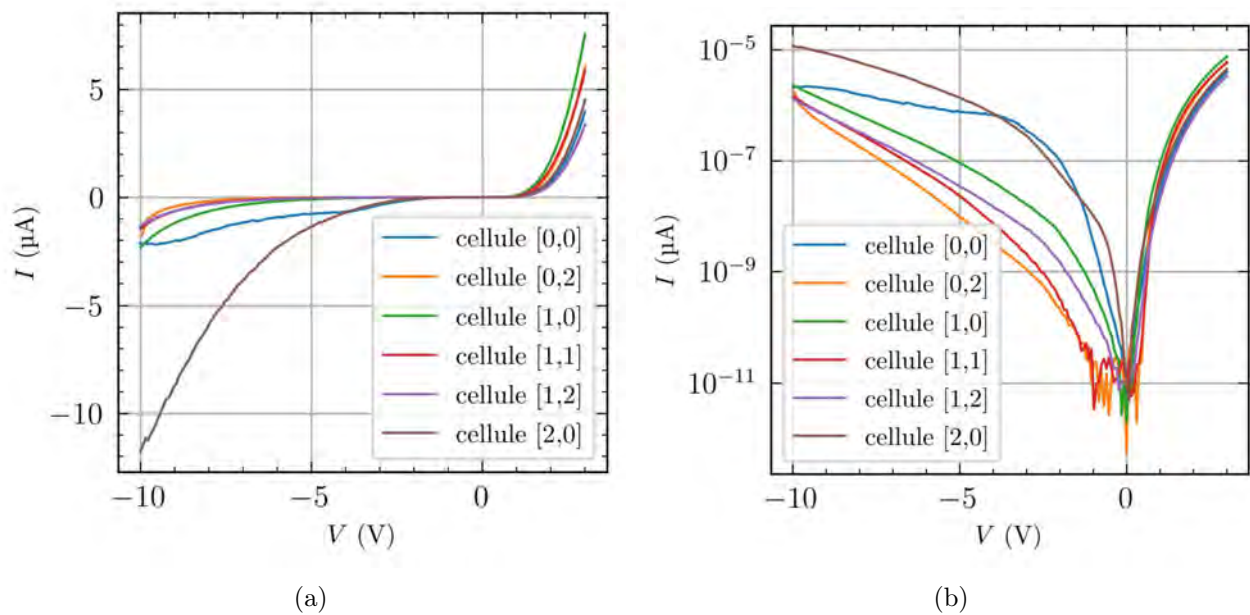


FIGURE IV.8 – Caractéristiques  $I(V)$  (a) en échelle normale et (b) en échelle semi-log de la diode P-GaN/2DEG pour différentes cellules  $[i, j]$  de l'échantillon, où  $i$  représente la ligne et  $j$  la colonne de la cellule, avec la base du repère située en bas à gauche



### 3.2 Caractérisation du HEMT à barrière P-GaN latérale nanostructurée

Les caractéristiques  $I_D(V_{DS})$  et  $I_G(V_{DS})$  d'un HEMT "normally-off" avec une largeur de canal  $W_{fin}$  de 100 nm, illustrées dans la Figure IV.9, ont été mesurées à l'aide d'un testeur sous pointes Keithley 4200 et d'une source faible puissance Agilent 4142B pour différentes valeurs de tension grille-source  $V_{GS}$  entre  $-1$  V et  $3$  V.

Les résultats de mesure ont montré un fonctionnement en mode FET avec une augmentation du courant de saturation avec la tension  $V_{GS}$  (Figure IV.9a). Cependant, le courant n'étant pas bloqué à  $V_{GS} = -1$  V, la structure ne permet pas d'obtenir la fonctionnalité normally-off attendue. La caractéristique  $I_D(V_{DS})$  présente un contact redresseur et des niveaux de courant très faibles, d'une centaine de micro ampères par millimètre, indiquant un problème de fabrication des contacts ohmiques.

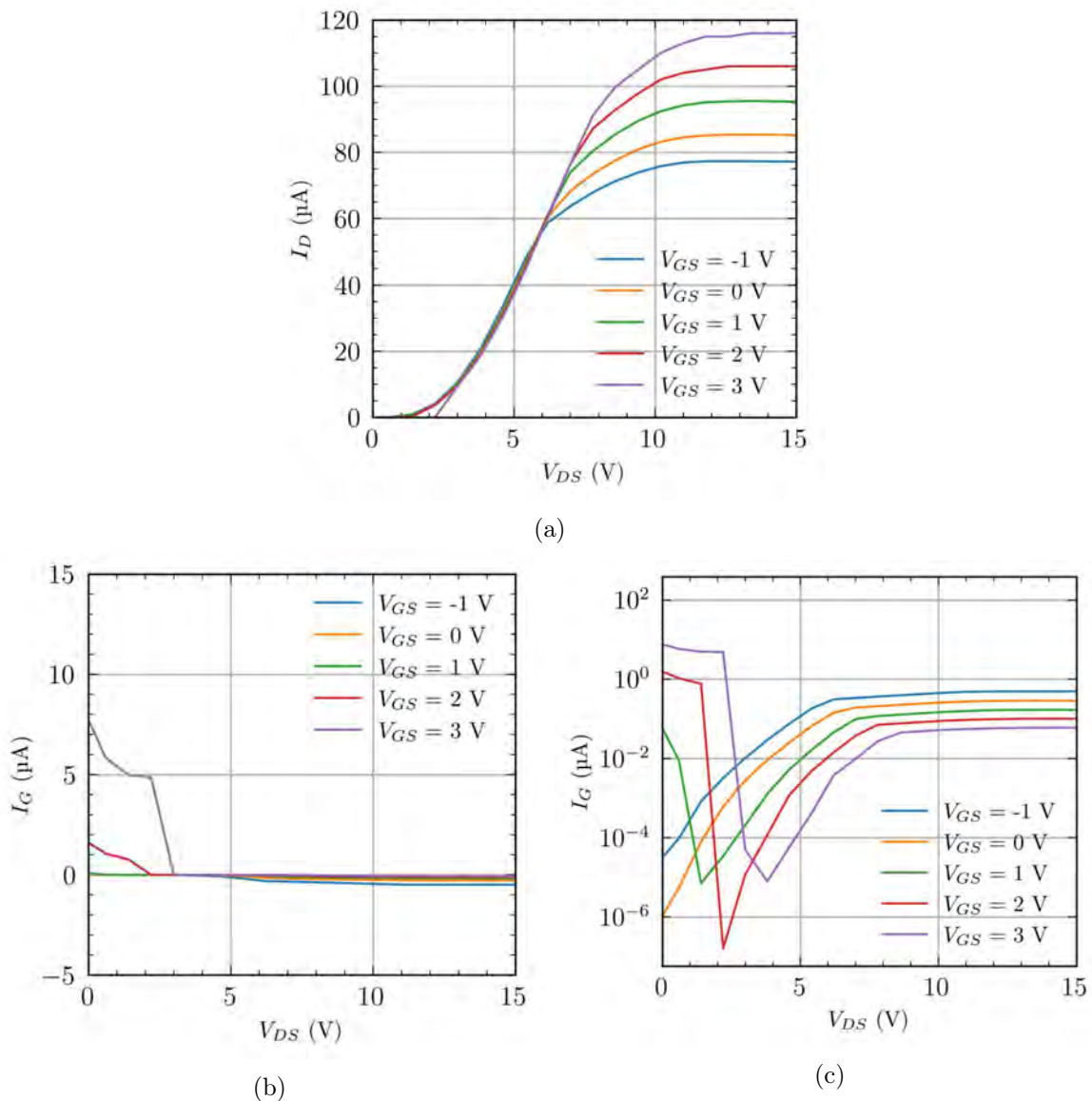


FIGURE IV.9 – Caractéristiques (a)  $I_D(V_{DS})$ , (b)  $I_G(V_{DS})$  d'un HEMT "normally-off" avec une échelle normale et (c) avec une échelle semi-log

Les caractéristiques  $I_G(V_{DS})$  mesurées (Figure IV.9 b et c) montrent que la diode de grille est passante lorsque la différence entre les tensions  $V_{DS}$  et  $V_{GS}$  est inférieure à zéro. À l'inverse, dès que le HEMT est en conduction, plus  $V_{GS}$  est grand et moins la diode de grille conduit. À noter que la diode de grille conduit très rapidement, à partir de  $V_{GS} > 2\text{V}$ , indiquant que la hauteur de barrière du contact de grille est bien plus faible qu'attendue.

Des défaillances ont été observées au cours des tests de mesure sur l'échantillon ST203. La Figure IV.10 présente deux mesures successives des caractéristiques  $I_D(V_{DS})$  et  $I_G(V_{DS})$  à  $V_{GS} = 0\text{V}$ .

Lors de la première mesure (courbes continues), une augmentation de la tension  $V_{DS}$  entraîne une montée du courant de grille jusqu'à atteindre une valeur d'environ  $2\mu\text{A}$  où le courant de grille change brusquement. À partir de ce moment, la caractéristique se dégrade par paliers successifs.

La deuxième mesure (courbes en pointillés), effectuée juste après la première, montre des caractéristiques  $I_D(V_{DS})$  et  $I_G(V_{DS})$  quasiment identiques indiquant qu'un chemin de conduction s'est créé entre la grille et le drain permettant à un fort courant parasite de circuler.

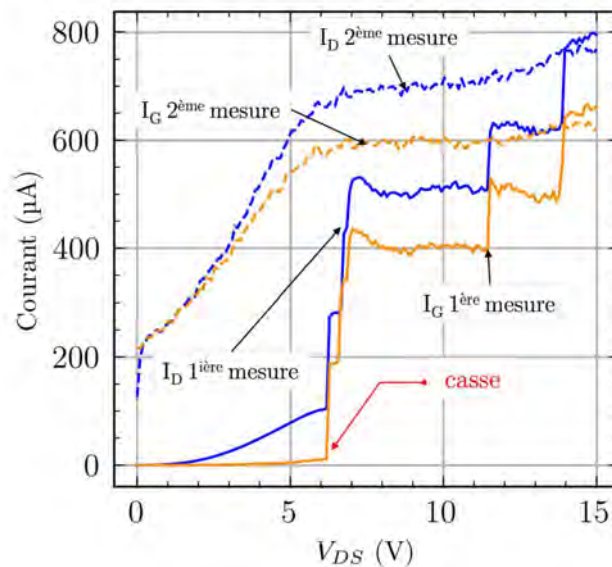


FIGURE IV.10 – Caractéristiques  $I_D(V_{DS})$  et  $I_G(V_{DS})$  mesurées à  $V_{GS} = 0\text{V}$  montrant une défaillance progressive et permanente entre la grille et le drain

Cette défaillance pourrait être expliquée par la dégradation progressive du diélectrique de grille en  $\text{SiO}_2$  utilisé ou par la dégradation de la diode de grille liée à une pointe de champ entre la grille et le drain. Cependant, aucune défaillance n'a été observée visuellement sur l'échantillon lors des mesures électriques, rendant difficile de déterminer son origine : une analyse plus approfondie est donc nécessaire.

Cette défaillance quasi systématique, la diode de grille fuyante et les contacts de source et de drain redresseurs ont donc empêché la caractérisation complète des HEMT et en particulier la détermination de la tension de seuil.

### 3.3 Analyse des contacts de source et de drain du HEMT

L'objectif de cette partie est d'identifier les raisons pour lesquelles les contacts de source et de drain ne sont pas ohmiques malgré un procédé de fabrication ayant fait l'objet au préalable d'une étude spécifique.

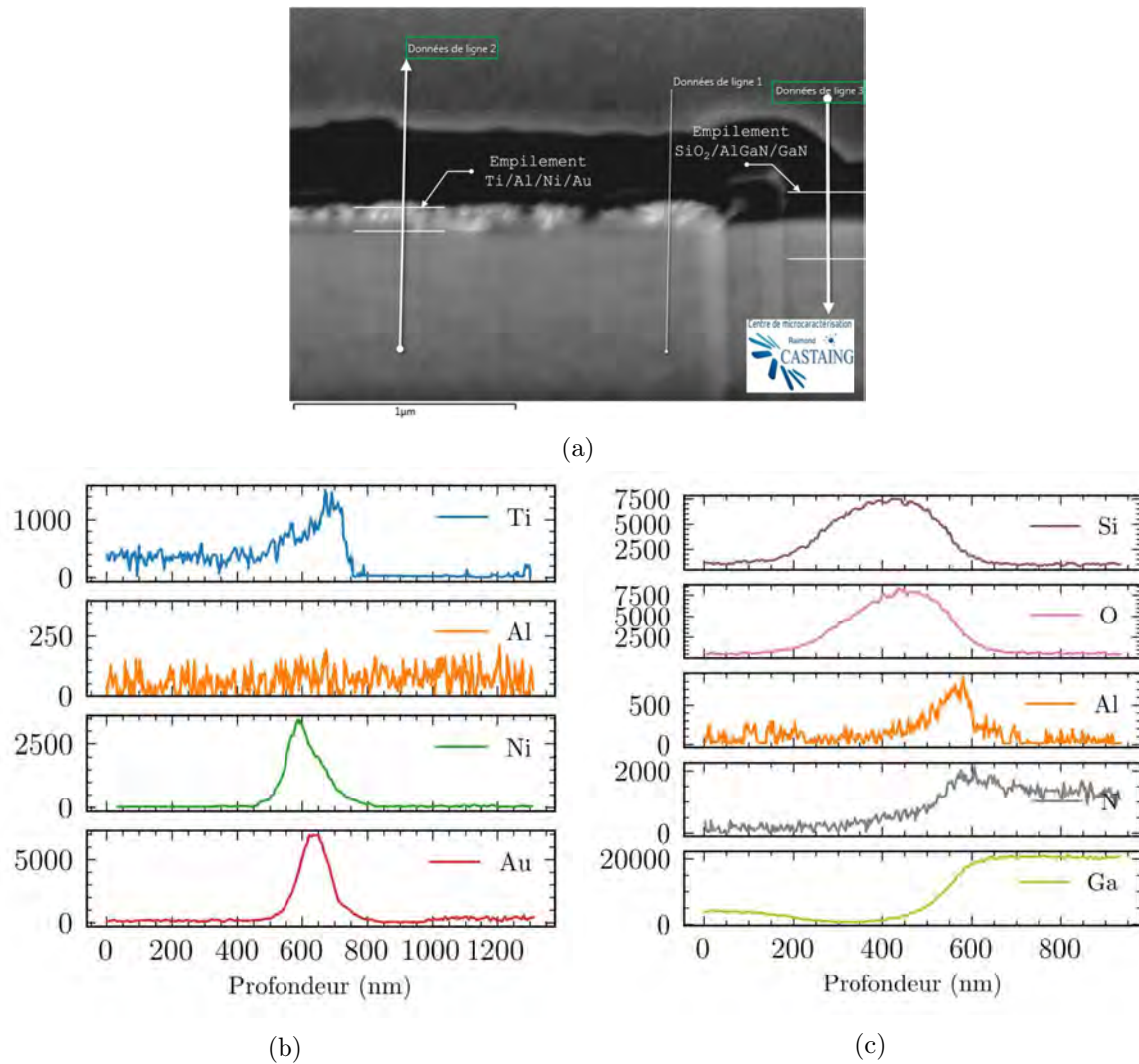


FIGURE IV.11 – (a) Observation MEB de la zone de scan EDS ; (b) profil de balayage de ligne EDS (b) de l'empilement métallique (ligne 1) et (c) de l'hétérostructure AlGaN/GaN (ligne 3)

La Figure IV.11a montre l'observation MEB de la coupe transversale d'un HEMT au niveau du contact de source, utilisée pour la caractérisation EDS (Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy). Cette technique EDS permet ici d'identifier les éléments chimiques présents dans l'empilement métallique du contact.

Les résultats de mesure (Figure IV.11b) mettent en évidence un défaut d'aluminium dans l'empilement métallique alors qu'il est essentiel au bon fonctionnement du contact ohmique. De plus, il a été constaté que le Ti a migré en surface lors du recuit. Cette migration a probablement conduit à l'oxydation ou la nitruration du Ti expliquant les résistances très élevées mesurées (dizaines de  $k\Omega$ ).

Une analyse EDS complémentaire sur l'hétérostructure AlGaN/GaN à proximité du contact a été effectuée et les résultats sont présentés dans la Figure IV.11c. Le pic d'aluminium observé provenant de la couche AlGaN écarte l'erreur de mesure ou une limite de détection de la technique utilisée concernant l'aluminium.

### 3.4 Analyse de la grille du HEMT

Afin de déterminer si l'origine des défaillances observées pouvaient provenir de la réalisation de la grille et, en particulier des caissons P-GaN, nous avons effectué des coupes FIB et analyses TEM en coupe transversale et longitudinale sur la grille du HEMT.

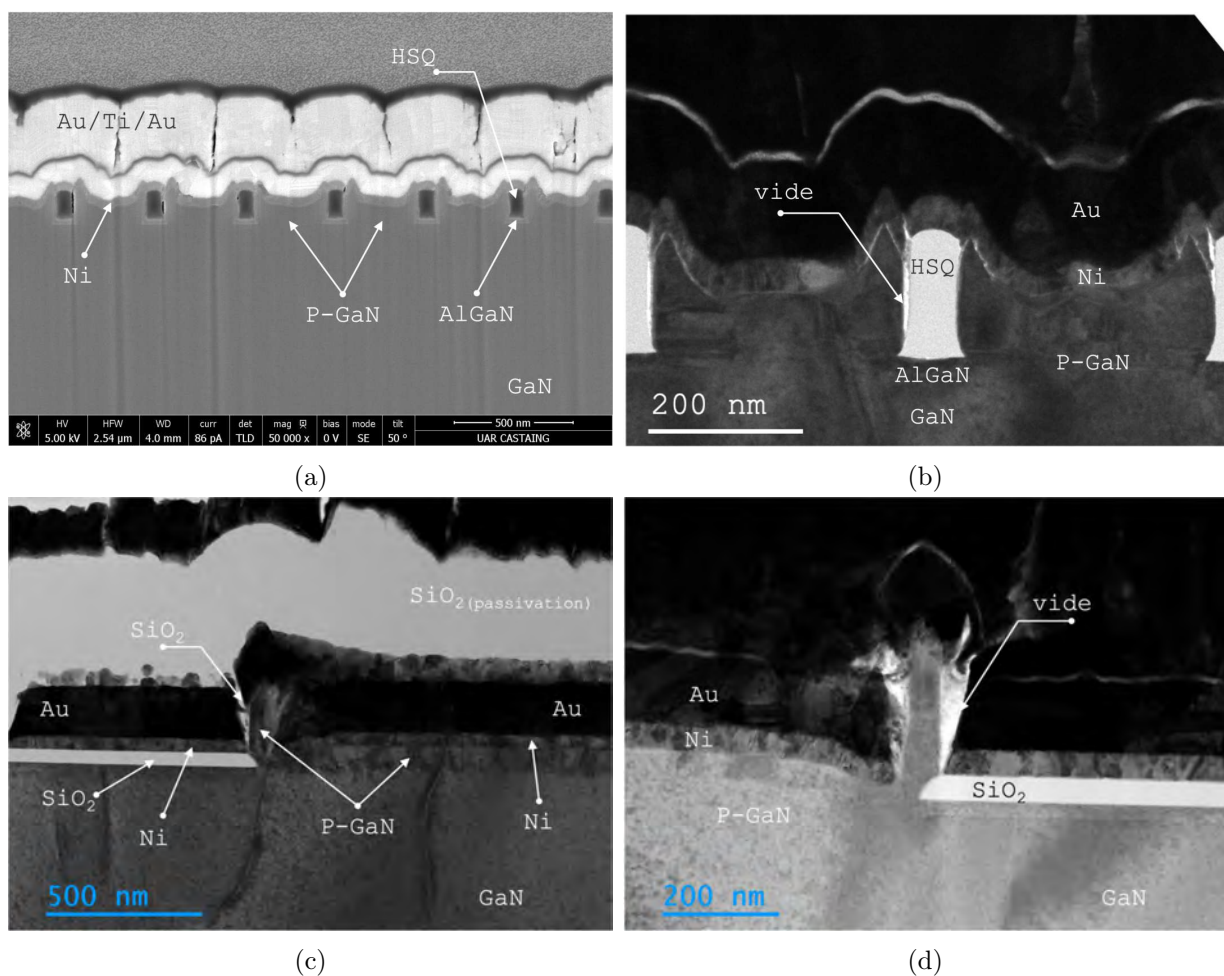


FIGURE IV.12 – Observations (a) FIB et (b) TEM de la coupe transversale et observations STEM de la coupe longitudinale entre la source et le drain en traversant un caisson P-GaN (c) côté source et (d) côté drain du HEMT

La coupe FIB transversale de la Figure IV.12a au milieu d'une grille à caissons rectangulaires de 300 nm de largeur montre que l'épitaxie localisée du P-GaN a joué son rôle et remplit parfaitement les caissons entre les lignes de résine HSQ de 80 nm de large. Néanmoins, la croissance du P-GaN laisse des zones de vide aux bords de la résine HSQ (Figure IV.12a). On note aussi le bon recouvrement du métal de grille Ni/Au.

La Figure IV.12c montre une observation STEM de la grille du côté de la source du HEMT, avec une coupe longitudinale effectuée entre la source et le drain, au milieu d'un caisson P-GaN. Au bord des ouvertures du  $SiO_2$ , on voit la surcroissance du P-GaN et la difficulté d'avoir la continuité du métal de grille par un effet de masquage. À ce niveau, il semble que le  $SiO_2$  de passivation se soit infiltré dans la crevasse lors du dépôt par CCPECVD alors que du côté du drain (Figure IV.12d) la zone masquée reste vide. On note que la discontinuité du métal de grille de ce côté est rattrapée par la métallisation des plots qui connecte les deux parties isolées.

À ce stade des analyses, nous ne pouvons conclure que l'augmentation de l'épaisseur du P-GaN a permis le remplissage des caissons, malgré une surcroissance en bord de  $SiO_2$  qui pourrait éventuellement être réduite par la gravure chimique anisotrope au TMAH. Cependant, nous ne sommes pas encore en mesure de déterminer la cause des défaillances observées lors de la caractérisation du HEMT.

## 4 Conclusion

Nous avons présenté les résultats de caractérisation électrique de la série ST200 issue d'un lot de substrats fournis par ST Microelectronics qui a permis d'obtenir les premiers HEMTs à barrière P-GaN latérale nanostructurée que nous avons choisi de développer.

Tout d'abord, la caractéristique capacité-tension présentant un pincement à  $V_{GS} = -3V$  a permis de vérifier la fonctionnalité de l'hétérostructure AlGaN/GaN.

Nous avons ensuite caractérisé les contacts ohmiques à l'aide de la méthode TLM pour valider le procédé employé pour la fabrication des contacts ohmiques. La résistance de contact mesurée est en moyenne de  $2,5 \Omega \cdot \text{mm}$  sur une couche semiconductrice ayant une résistance de  $600 \Omega \cdot \square^{-1}$  à  $800 \Omega \cdot \square^{-1}$ .

Les caractérisations de la diode de grille P-GaN/2DEG et celle du HEMT montrent que le procédé de fabrication n'est pas encore suffisamment avancé pour obtenir un composant HEMT normally-off. Les caractéristiques électriques présentent des fuites importantes au niveau de la grille et une défaillance des composants limitent l'analyse des résultats obtenus.

Un nouveau cycle de fabrication est en cours afin d'optimiser certaines étapes du procédé et d'obtenir un fonctionnement "normally-off".

# Perspectives

Nous avons présenté dans les chapitres précédents l'approche technologique que nous avons choisi de développer afin de réaliser un HEMT à grille P-GaN nanostructurée basé sur la mise en forme de caissons P-GaN par épitaxie localisée par MBE. Bien que le procédé de fabrication ne soit pas encore optimisé et que le fonctionnement du HEMT n'ait pas encore été entièrement démontré expérimentalement, nous pensons que cette approche doit être approfondie. C'est pourquoi nous proposons, dans ces prospectives, différentes voies permettant d'aboutir à la réalisation optimale de HEMTs à barrière P-GaN latérale.

Nous présenterons tout d'abord d'autres procédés technologiques permettant d'obtenir les caissons P-GaN le long de la grille puis nous proposerons un nouveau design du HEMT. Nous montrerons également les résultats de simulation obtenus sur une nouvelle structure HEMT GaN normally-off à multiples canaux et barrière P-GaN latérale.

Nous terminerons en développant les avantages de notre approche pour l'intégration de fonctions de puissance.

## Nouvelles approches technologiques et de simulation

### Épitaxie localisée AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>

Dans l'approche de fabrication de la structure présentée dans le chapitre III, les caissons de grille sont réalisés par gravure de l'hétérostructure AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> suivie par l'épitaxie localisée par jets moléculaires (MBE) du P-GaN. Une autre approche serait d'inverser l'ordre de fabrication de ces deux étapes, à savoir dans un premier temps la gravure des caissons dans une couche P-GaN épitaxiée directement "in-situ" après les couches buffer du substrat suivie par la reprise d'épitaxie de l'hétérostructure AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> [79, 161](Figure P1).

Cet enchaînement d'étapes technologiques permettrait d'utiliser différentes techniques d'épitaxie (MOCVD, PA-MBE ...) pour la croissance de l'hétérostructure AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> et de la couche P-GaN avec un degré de liberté supplémentaire. Le procédé de fabrication des caissons P-GaN nécessiterait ainsi une seule étape de lithographie électronique pour la mise en forme de la résine HSQ afin d'obtenir à la fois le masque de gravure des caissons dans la couche Ga<sub>N</sub> et



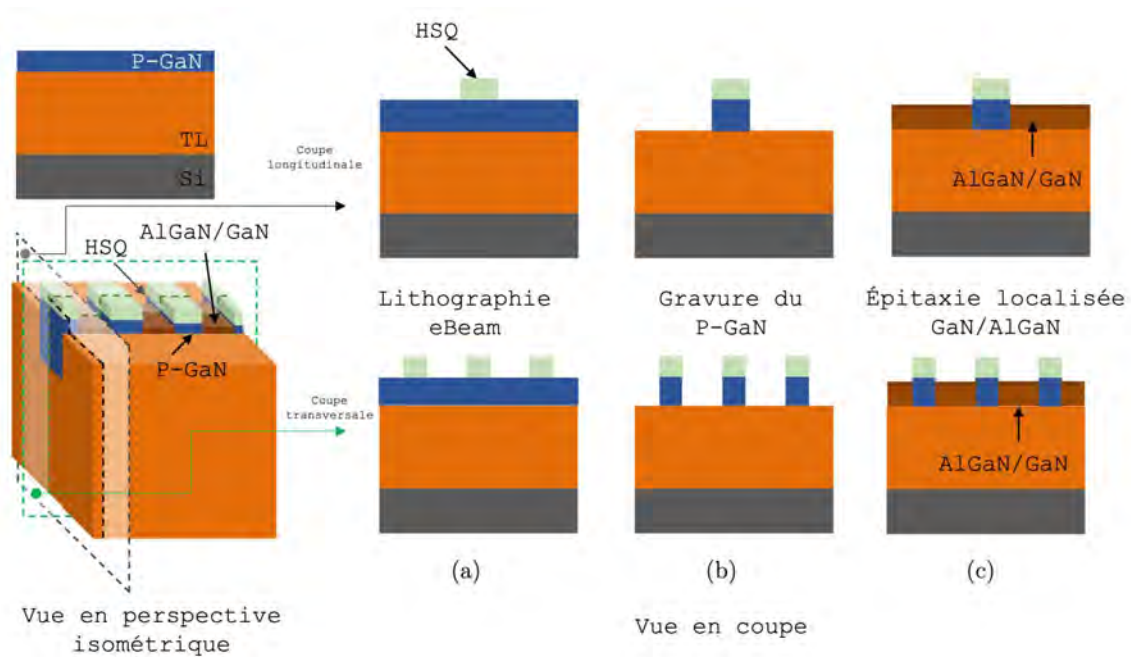


FIGURE P1 – Description schématique (vues en perspectives et en coupe) du procédé inverse de réalisation de la grille nanostructurée à caissons P-GaN

le masque pour la croissance sélective de l'hétérostructure AlGaN/GaN qui, contrairement à la structure développée dans ces travaux, combine la lithographie UV pour l'ouverture du  $SiO_2$  et la lithographie électronique des motifs en HSQ.

## Élimination de la surcroissance de GaN en bordure des caissons

Comme nous l'avons montré dans nos travaux, l'épitaxie localisée à l'intérieur des caissons a conduit à des surcroissances sur les bords du masque et, plus particulièrement, sur les flancs du masque de  $SiO_2$ , formant des piliers qui peuvent s'élever à plus de 200 nm au-dessus du niveau du plateau de croissance (cf Figure IV.12). Cela a eu pour effet d'empêcher le recouvrement homogène et continu de la grille lors de la métallisation Ni/Au.

Une solution, illustrée dans la Figure P2, pourrait être d'utiliser une gravure chimique à base de TMAH qui grave de manière préférentielle les plans semi et non polaires de la structure Wurtzite du GaN [85] qui caractérisent ces piliers : cela permettrait de réduire la topologie de surface par son effet planarisant et ainsi faciliter l'étape de métallisation de la grille.

## Influence de l'orientation cristalline du GaN

Les échantillons utilisés pour le développement des étapes technologiques et de la fabrication des dispositifs proviennent d'un substrat 8 pouces découpé en carrés de 3 cm par 3 cm de côté dont l'information sur l'orientation cristalline du substrat a été perdue. Au début des travaux de fabrication, nous n'avions pas connaissance de son importance pour le remplissage des cavités



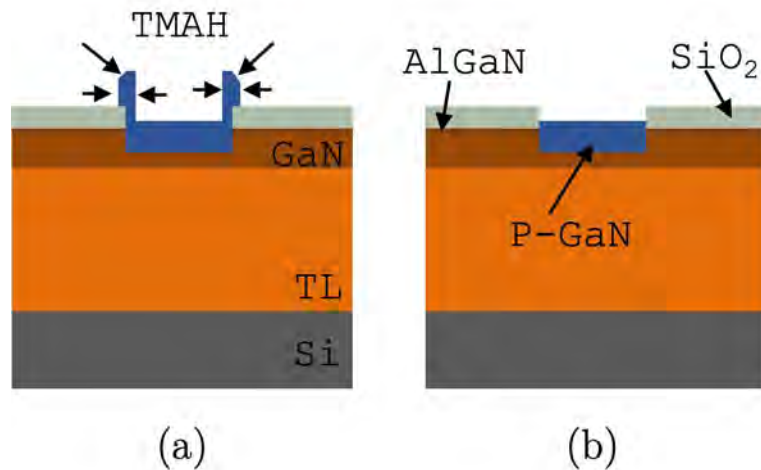


FIGURE P2 – Schéma (a) avant et (b) après la gravure chimique à base de TMAH des surcroissances de GaN aux bords du masque de croissance

par épitaxie localisée. Nous avons remarqué en effet que, sur certains échantillons, les motifs de croissance de GaN n'étaient pas orientés de la même manière que ceux présents sur le masque de croissance.

Déterminer l'orientation cristalline pourrait se faire en utilisant la gravure TMAH qui révèle les plans a et m des flancs de gravure MESA [142]. Une fois l'orientation déterminée, nous pourrions adapter les motifs du masque de croissance pour qu'ils suivent les directions qui favoriseront la croissance du GaN autour des motifs.

## Nouvelles approches de design

Les approches HEMT GaN normally-off à barrière P-GaN développées au LAAS-CNRS se distinguent de celles vues dans la littérature par leur originalité. L'utilisation d'une barrière P-GaN enterrée sous le canal 2DEG ainsi que la structure proposée dans ce mémoire avec des barrières P-GaN latérales en sont des exemples.

Nous présentons ici une vue schématique en coupe de deux autres structures qui pourraient être développées à titre de perspectives lors de futurs travaux. La première combine les structures à barrière P-GaN traditionnelles et celle que nous avons développée, formant une barrière en forme de peigne (Figure P3a). Cette version additionne les effets de déplétion du 2DEG provenant des 3 parties de la barrière P-GaN positionnées au-dessus et sur les côtés du canal 2DEG. Le procédé technologique se déroulerait comme suit :

- Gravure des caissons P-GaN selon le procédé technologique proposé dans le chapitre III,
- Suppression des motifs en résine HSQ. Le retrait de la résine HSQ en utilisant un bain d'acide fluorhydrique permettrait également de limiter les contaminations au silicium au niveau des interfaces de croissance,
- Épitaxie de la couche P-GaN dans les caissons et en surface conduisant à une structure en forme de peigne.

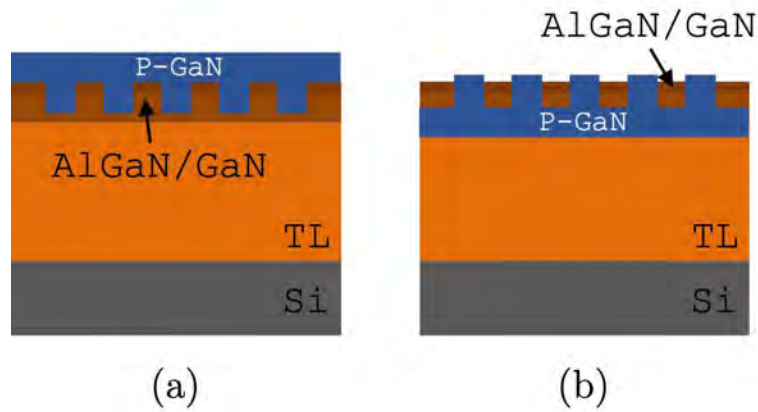


FIGURE P3 – Schémas en coupe transversale de la grille d'un HEMT à barrière P-GaN (a) en forme de peigne et (b) en forme de peigne inversé

La deuxième structure est l'inverse de la précédente avec une barrière en forme de peigne inversé (Figure P3b) dont le procédé commencerait par la gravure des caissons dans la couche P-GaN épitaxiée in-situ suivie par la reprise d'épitaxie de l'hétérostructure AlGaIn/GaN.

## La jonction p-n

Dans le cadre de nos travaux de thèse, nous avons contribué à la réalisation de caissons P-GaN pour la réalisation de diodes à jonctions p-n latérales en utilisant un procédé de gravure plasma de tranchées suivi d'une épitaxie localisée par MBE du P-GaN. Les analyses électriques sur les premiers lots réalisés ont révélé des fuites de courant.

Pour mieux comprendre les phénomènes de croissance du P-GaN, des méthodes de caractérisation plus avancées pourraient être utilisées telles que la cathodoluminescence, l'obtention des profils de concentration par émission d'électrons secondaires avec la microscopie électronique à balayage et la mesure de capacités  $C(V)$ . Cela permettrait d'évaluer par exemple la distribution du magnésium à l'intérieur des couches P-GaN épitaxiées et de caractériser les contaminations au niveau des interfaces de croissance. Ces analyses pourraient aider à identifier des axes d'amélioration.

La jonction p-n est l'un des éléments structurels les plus importants manquant à la filière technologique GaN, qui permettrait en particulier la conception de composants avancés de puissance tels que les JFET, les terminaisons de jonction et les diodes mixtes p-n/Schottky comme montré sur la Figure P4.

## Convergence des simulations

La simulation de la structure proposée en [3D] s'est révélée compliquée en raison des problèmes récurrents de convergence avec l'outil de simulation Sentaurus TCAD. La qualité du maillage est très certainement la raison principale de ces difficultés. Un maillage de bonne qualité doit satisfaire certains critères, notamment en ce qui concerne la valeur des angles des tétraèdres et les formes élémentaires du maillage en [3D]. La structure proposée présente des

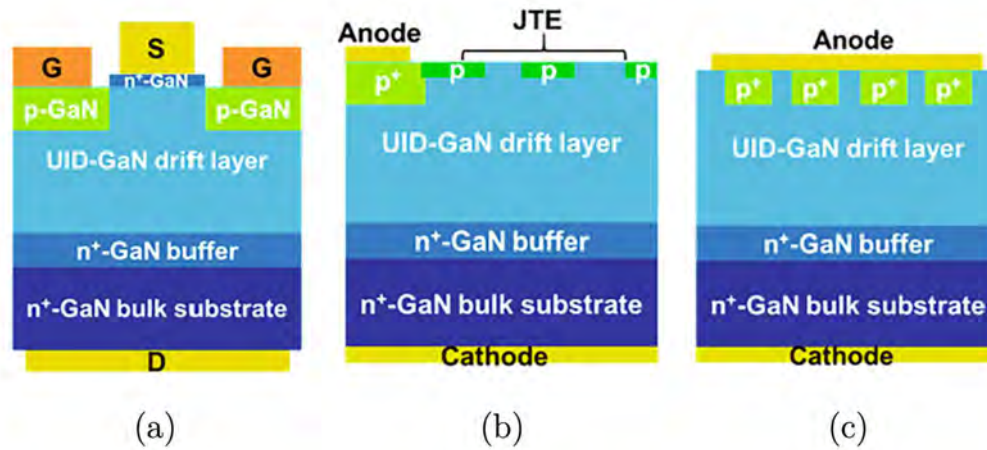


FIGURE P4 – Schémas de structures GaN basées sur la jonction p-n : (a) JFET, (b) terminaisons de jonction et (c) diode mixte p-n/Schottky. Fu et al.[94]

rapports de forme élevés avec des structures nanométriques au sein d'une structure HEMT aux dimensions micrométriques, ce qui implique un maillage précis pour éviter la distorsion du maillage. L'utilisation d'un maillage très fin avec 200 000 à 300 000 points a entraîné un mauvais compromis "temps de calcul / convergence". Le raffinement du maillage par itération selon le champ électrique et le potentiel électrique a également été exploré mais aucune de ces solutions n'a donné de résultats convaincants.

Une analyse plus poussée des outils Sentaurus TCAD pourrait permettre d'améliorer la qualité du maillage et d'envisager ainsi une étude fonctionnelle plus complète du HEMT GaN que nous avons développé en abordant notamment une étude dynamique, une étude de la tenue en tension et une analyse de points chauds qui pourrait répondre aux mécanismes de dégradation observés dans les caractérisations électriques.

## Structure HEMT GaN normally-off à multiples canaux et barrière P-GaN latérale

L'approche que nous avons présentée pour la réalisation d'un HEMT normally-off repose sur l'utilisation d'une barrière P-GaN latérale, ce qui conduit à une nano-structuration des éléments de la cellule de grille et particulièrement de la largeur  $D_T$  du mesa AlGaIn/GaN qui doit être suffisamment faible pour obtenir une déplétion complète du canal 2DEG. Nous avons vu dans le chapitre II que cette largeur est définie selon le rapport de charges entre la densité  $n_s$  du 2DEG déterminée par la teneur en aluminium ( $x_{Al}$ ), l'épaisseur de la couche barrière AlGaIn ( $t$ ) et par la concentration  $N_{ACP}$  des caissons P-GaN. Par exemple, pour  $t = 20$  nm,  $x_{Al} = 20\%$  et  $N_{ACP} = 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , la largeur maximale requise est d'environ 75 nm, valeur pour laquelle le minimum du niveau d'énergie de la bande de conduction est supérieur à 0,5 eV (cf Figure II.17a).

L'obtention d'une largeur  $D_T$  plus grande serait souhaitable d'un point de vue technologique d'autant plus que le compromis entre celle-ci et la résistance  $R_{on}$  est élevé dans le cas d'un contact de grille Schottky (cf Figure II.35c). Le fait de diminuer la densité du 2DEG pour accentuer le rapport de charges, par exemple en diminuant la teneur en aluminium dans la couche barrière AlGaIn, accentuerait davantage ce compromis.

Une solution compatible avec notre approche de fabrication serait de répartir les charges du 2DEG dans la profondeur du composant à travers une structure à multiples canaux. Ainsi, le rapport de charges serait plus favorable à la déplétion du 2DEG sur une largeur  $D_T$  plus importante tandis que le dispositif présenterait une densité de charge  $n_s$  cumulée identique.

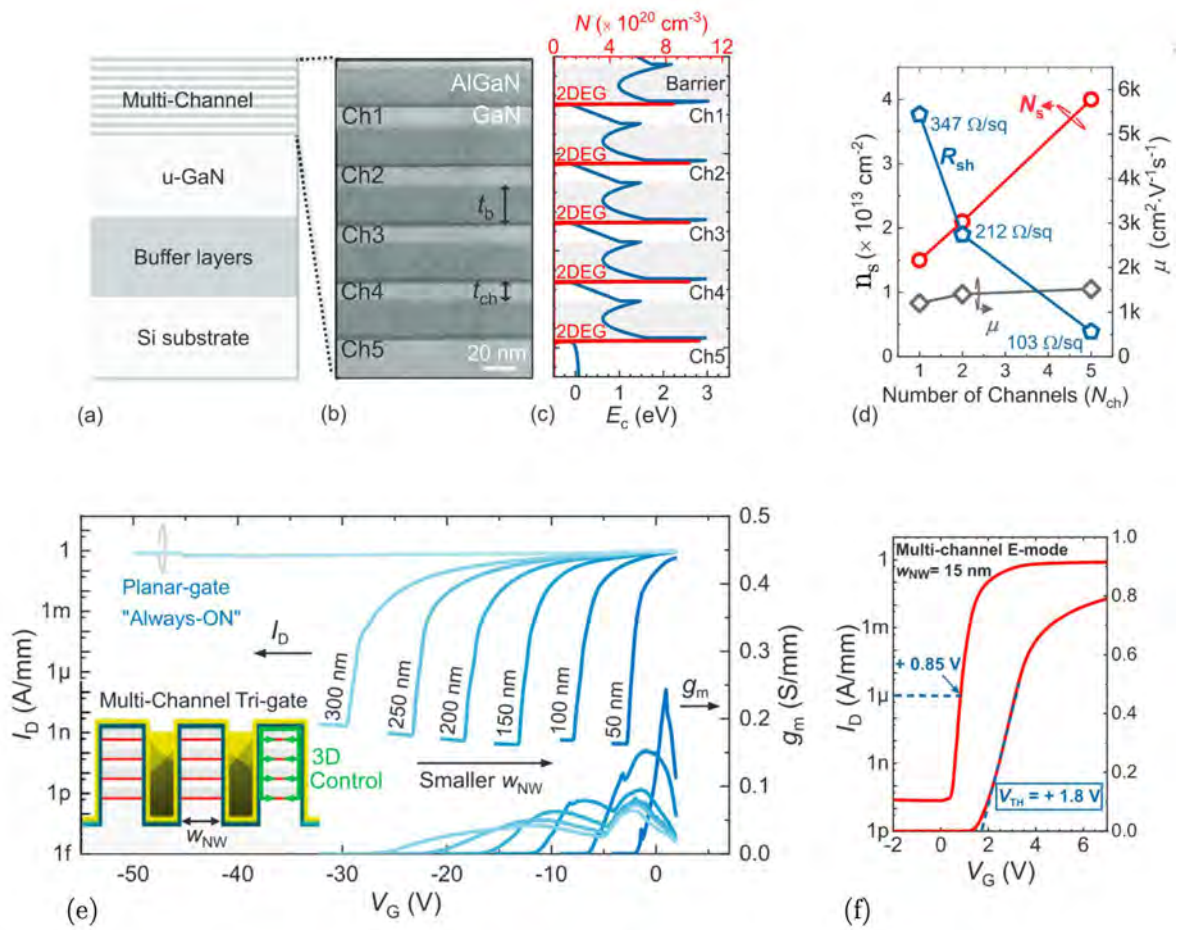


FIGURE P5 – (a) Schémas et (b) image TEM d'une hétérostructure multicanaux, ainsi que (c) les profils de la bande de conduction et de concentration électronique correspondants simulés, (d) densité de charge ( $n_s$ ), mobilité ( $\mu$ ) et résistance de couche ( $R_{sh}$ ) en fonction du nombre de canaux dans la structure AlGaIn/GaN à multiples canaux, (e) courbes de transfert pour des dispositifs FinFET AlGaIn/GaN multicanaux ayant différentes largeurs de nanofils ( $W_{NW}$ ) et (f) courbe de transfert d'un dispositif FinFET AlGaIn/GaN normally-off à multicanaux. Nela et al.[162], Meneghini et al. [21]

L'utilisation d'une structure à multiples canaux 2DEG a déjà été documentée [162] et permet, par exemple, dans une structure à cinq canaux 2DEG (Figure P5 a,b et c) de tripler la densité  $n_s$  totale et de réduire d'un facteur 3 la résistance  $R_{on}$  du dispositif HEMT (Figure



P5d). Cette solution a aussi été utilisée dans des structures de type FinFET (Multi channel tri-gate) normally-on et normally-off (Figure P5 e et f) afin d'améliorer le compromis  $R_{on}$  vs  $V_{th}$ .

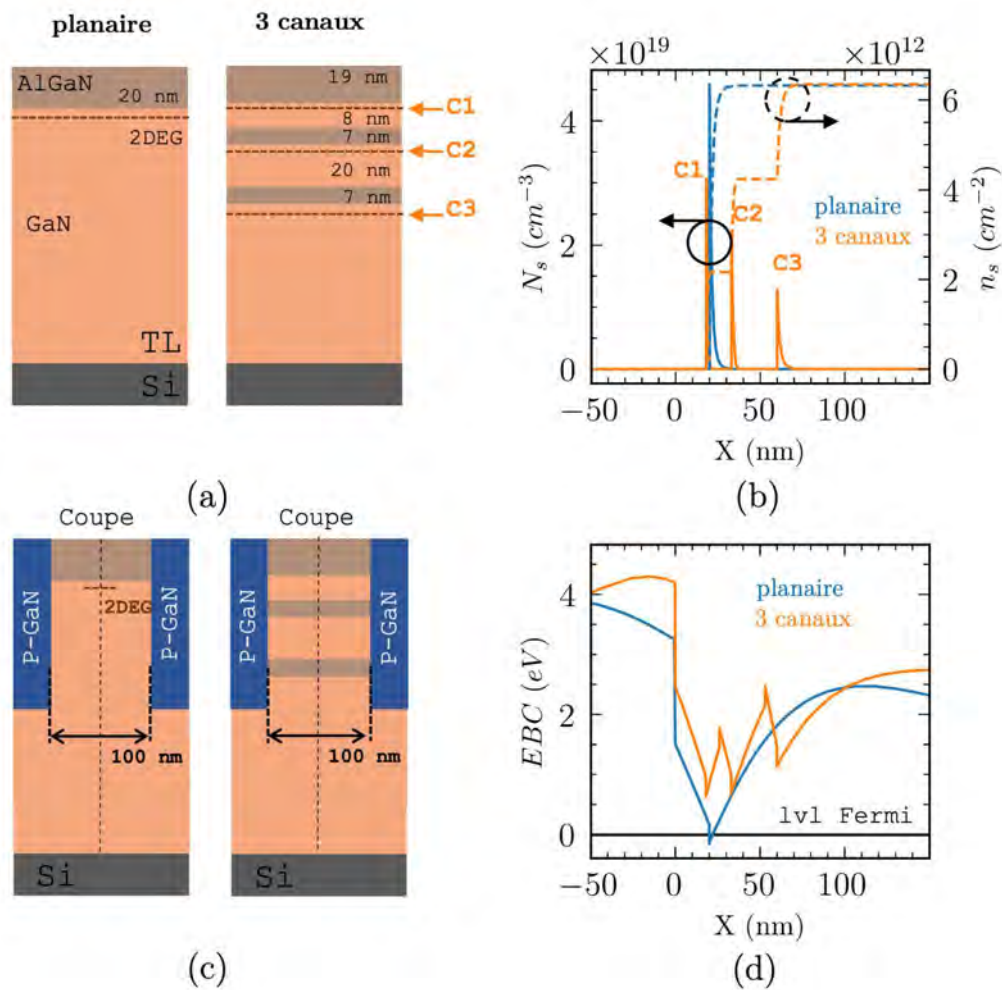


FIGURE P6 – (a) Schéma des hétérostructures AlGaN/GaN planaire et multicanaux, (b) densités électroniques  $n_s$  cumulées et concentrations électronique  $N_s$  simulées des hétérostructures AlGaN/GaN correspondantes, (c) schéma en coupe transversale de la grille d'un HEMT à barrière P-GaN latérale nanostructurée pour des hétérostructures AlGaN/GaN planaire et multicanaux et (d) profils de la bande de conduction simulés pour les structures à barrière P-GaN latérale correspondantes

Pour illustrer l'intérêt de l'approche multi-canaux avec la solution HEMT GaN normally-off proposée, nous avons étudié le cas d'une hétérostructure à trois canaux et nous avons simulé, à l'équilibre thermodynamique, la concentration  $N_s$ , la densité électronique cumulée  $n_s$  et le niveau d'énergie de la bande de conduction (Figure P6). Nous avons fixé la teneur en aluminium à 20 % pour toutes les couches AlGaN et nous avons pris comme référence une hétérostructure AlGaN/GaN classique avec une barrière de 20 nm d'épaisseur (Figure P6a).

L'hétérostructure à trois canaux présente trois 2DEG, nommés C1, C2 et C3, répartis dans la profondeur avec une densité  $n_s$  cumulée d'environ  $6 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ , quasi identique à celle de la structure planaire, permettant à ces deux structures d'être comparables en termes de densité de 2DEG (Figure P6b). Les différentes épaisseurs des couches de la structure à multi-canaux ont

été choisies de telle sorte à équilibrer la contribution de chaque canal dans la densité cumulée totale  $n_s$  du 2DEG : ces valeurs ne sont évidemment pas optimisées et servent juste à illustrer la perspective de cette approche.

Les paramètres de la structure de grille étant fixés à  $4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  pour le dopage et 100 nm pour la largeur du mesa, l'ajout de caissons P-GaN sur la structure à trois canaux (Figure P6c) permet d'élever le niveau de la bande de conduction  $E_c$  de chaque canal 2DEG au centre de la cellule de grille de +0,5 eV au-dessus du niveau de Fermi  $E_{Fn}$ , contrairement à la structure de référence pour laquelle  $E_c$  reste en-dessous de  $E_{Fn}$  (Figure P6d). Cela signifie qu'en distribuant les charges du canal 2DEG dans la profondeur, cela favorise le développement de la zone de charge d'espace de déplétion des 2DEGs. Avec un dopage de  $4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , nous obtenons une largeur de canal d'au moins 100 nm comparée à 75 nm pour un dopage de  $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . Cet écart de 33% sur la largeur du canal permettrait de relâcher les contraintes de fabrication tout en améliorant le compromis  $R_{on}$  vs  $D_T$ .

La conception de la structure à multiples canaux impose cependant la maîtrise technologique de nombreux paramètres tels que les épaisseurs de chaque couche, les teneurs en aluminium des barrières AlGaN et le nombre de canaux qui vont déterminer comment seront réparties les charges des 2DEGs.

## Vers l'intégration de fonctions de puissance

Ces travaux ouvrent la voie aussi à l'intégration de fonctions de puissance à partir de cet élément de base qu'est la jonction p-n nanostructurée. Ces fonctions incluent par exemple des capteurs de tension, des blocs d'isolation et des protections périphériques qui ont fait l'objet de travaux au sein de l'équipe ISGE ces dernières années sur substrat silicium. Nous pouvons mentionner les travaux de C. Caramel [163] portant sur la conception et l'intégration monolithique d'un circuit de détection et de protection contre les court-circuits d'un IGBT. Ce circuit est basé sur un capteur d'anode utilisant des caissons de type P. Ainsi, la réalisation de caissons P-GaN pourrait permettre le transfert de ces approches pour le développement de dispositifs de puissance avancés sur GaN.

La cointégration de structures verticales et latérales est également envisageable permettant ainsi des possibilités de conception de dispositifs plus performants. De telles structures sont actuellement développées dans le cadre de différents projets auxquels l'équipe ISGE est associée. Nous pouvons citer par exemple l'intégration d'un HEMT normally-on latéral et d'un FinFET vertical sur substrat GaN dans le projet ANR C-Pi-GaN [164] ou le développement de structures verticales dans le projet VERTIGO (PEPR électronique).

Ces travaux représentent donc une étape vers la réalisation de structures GaN intégrées pour les applications d'électronique de puissance de plus en plus exigeantes en termes de performances et fonctionnalités électriques.

# Conclusion générale

Nos travaux de thèse se sont inscrits dans la thématique de recherche de l'équipe ISGE (Intégration des Systèmes de Gestion de l'Énergie) au LAAS-CNRS qui concerne l'étude, la conception et la fabrication de dispositifs de puissance avec des matériaux à large bande interdite tels que le GaN, le SiC et le diamant. Plus particulièrement, les travaux de l'équipe portent sur la conception et la réalisation d'interrupteurs de puissance tels que les Transistors à Haute Mobilité Électronique (HEMT) en GaN normalement bloqués ou "normally-off".

Dans le cadre du projet IPCEI Nano2022 et dans la continuité des travaux de l'équipe, en particulier ceux menés par S. Hamady et C. Haloui, nous avons proposé un nouveau concept de HEMT AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> "normally-off" à grille P-GaN nanostructurée. Il consiste en l'alternance le long de la grille de caissons P-GaN obtenus par épitaxie localisée par MBE. La réalisation de cette nouvelle structure a été rendue possible grâce à la collaboration avec le CRHEA-CNRS pour leur expertise sur les techniques d'épitaxie du GaN et la plateforme Renatech de l'IEMN pour l'utilisation de la lithographie électronique.

Dans le Chapitre I, nous avons rappelé les avantages apportés par les matériaux à large bande interdite pour la réalisation de dispositifs de puissance. Ils bénéficient en effet de propriétés électriques nettement supérieures à celles du silicium en termes de champ de claquage, de mobilité des porteurs, de fonctionnement à haute température et à haute fréquence. Parmi ces matériaux, nous pouvons citer le GaN, le SiC, le diamant et le  $Ga_2O_3$ . Les dispositifs GaN et le SiC ont fait l'objet ces dernières décennies d'une recherche intensive, comparativement aux autres matériaux à large bande interdite, permettant aujourd'hui leur commercialisation à une certaine échelle. Nous avons vu en détail le fonctionnement de la technologie HEMT AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>, pressentie pour les applications de moyenne puissance à haute fréquence grâce aux progrès de croissance épitaxiale sur des substrats silicium permettant leur fabrication à faible coût. Cependant, cette technologie donne par nature des interrupteurs normalement passants (normally-on) en raison de l'hétérostructure AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> et des mécanismes de polarisation piézoélectrique donnant lieu à un canal bidimensionnel d'électrons (2DEG) à haute mobilité électronique.



Pour assurer la sécurité des systèmes de conversion de puissance, des solutions normally-off sont requises et nous avons passé en revue l'état de l'art des approches permettant d'obtenir des HEMTs normally-off : les HEMTs à grille semi-enterrée ou enterrée (recessed-gate), les HEMTs basés sur des traitements au fluor, les HEMTs à barrière P-(Al)GaN et des structures HEMT de type FinFET.

Nous avons terminé ce chapitre par l'introduction de la structure que nous proposons, qui tire à la fois parti du meilleur des technologies de type FinFET et à barrière P-GaN. La structure mesa des FinFET permet de s'affranchir des contraintes de gravure très précise indispensable dans les technologies recessed-gate et devrait bénéficier d'une hauteur de barrière élevée et, par conséquent, d'une tension de seuil élevée.

Le Chapitre II concerne l'étude de conception par simulation numérique de la nouvelle structure. Dans un premier, temps nous avons présenté les outils de simulation TCAD Sentaurus, logiciel de simulation multi-physique de semi-conducteurs. Nous avons détaillé les aspects de modélisation des structures HEMT AlGaN/GaN en présentant les modèles de simulation et les différentes structures HEMT utilisées pour l'étude de notre dispositif à l'équilibre et hors équilibre thermodynamique.

Nous avons ensuite présenté les paramètres de la structure multicellulaire proposée et évalué par simulation [2D] et [3D] à l'équilibre thermodynamique leur impact sur la zone de charges d'espace de déplétion dans le canal de la cellule élémentaire du HEMT. La cellule est composée d'une structure mesa AlGaN/GaN d'une largeur  $D_T$  épaulée par deux caissons P-GaN.

Nous avons optimisé le dimensionnement et le dopage des caissons P-GaN en fonction de la teneur en aluminium de la barrière AlGaN afin d'obtenir un canal 2DEG dépeuplé. Par exemple, nous avons déterminé que la largeur maximale de la zone de charge de déplétion dans le 2DEG est 46 nm, 29 nm et 25 nm pour des teneurs en aluminium respectives de 15%, 20% et 25% avec un dopage des caissons P-GaN de  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  avec une largeur minimale de 20 nm pour une hauteur de 100 nm et une longueur de 400 nm. Le dimensionnement de la largeur du mesa formant le canal a donc été défini en doublant la valeur de cette largeur de déplétion.

Une fois l'optimisation de la structure faite à l'équilibre thermodynamique, nous avons évalué le fonctionnement de la grille hors équilibre thermodynamique sur des sections longitudinale et transversale en [2D] du HEMT.

L'étude de la grille sur la section transversale a permis d'évaluer la caractéristique de concentration du 2DEG par rapport à la tension de grille et montre un seuil de rétablissement du 2DEG à 2 V. L'étude de la grille sur la section longitudinale a permis d'évaluer la caractéristique électrique de la diode de grille P-GaN/2DEG avec des contacts ohmiques, Schottky et MIS (Metal Isolant Semi-conducteur) sur la grille. L'utilisation d'un contact Schottky et MIS au lieu d'un contact ohmique permet de piloter la grille avec une tension plus élevée en limitant les courants de conduction dans la grille. Ces simulations ont permis d'observer le rétablissement du 2DEG en appliquant une tension positive dans la zone dépeuplée à tension de grille-source nulle.

---

Finalement, nous avons démontré la fonctionnalité normally-off du dispositif HEMT que nous avons proposé par simulation [3D]. Les résultats mettent en avant la possibilité d'ajuster la tension de seuil jusqu'à 2,5 V en modifiant la largeur du canal avec un contact de grille ohmique ou Schottky. Une attention a été portée sur l'étude de l'état bloqué du dispositif, qui a nécessité une optimisation de la structure par la segmentation de la grille, permettant un auto-blindage électrique réduisant les effets de canal court sur cette structure.

Dans le Chapitre III, nous avons détaillé les différentes étapes technologiques permettant la fabrication de la structure proposée. Un focus a d'abord été porté sur la réalisation des caissons GaN par gravure ICP-RIE par plasma chloré suivie de l'épitaxie localisée du P-GaN par épitaxie par jets moléculaires.

Nous avons proposé d'utiliser un masque de résine HSQ électrosensible à la fois pour la gravure chlorée et l'épitaxie localisée compte tenu des propriétés diélectriques de la résine une fois insolée. Cette résine, utilisée en lithographie électronique, répond aux besoins de la structure en termes de définition à l'échelle nanométrique. Cependant, la résine n'adhérant pas sur les matériaux nitrures, l'utilisation d'une couche d'adhérence en  $SiO_2$  a été nécessaire afin d'obtenir une bonne tenue des nanostructures. Le procédé de lithographie établi avec la plateforme RENATECH de l'IEMN a permis d'obtenir des motifs de différentes formes : nids d'abeille, lignes et autres structures périodiques avec une définition minimale de 30 nm pour une hauteur de résine HSQ de 170 nm.

Trois cycles de développement ont été réalisés au cours de la thèse afin d'évaluer l'épitaxie localisée de P-GaN. Le premier a concerné l'épitaxie de GaN non intentionnellement dopé sur GaN après gravure de cavités profondes de 150 nm afin d'évaluer la faisabilité de la méthode mise en place. La dimension des cavités s'est révélée être critique par rapport à l'épitaxie du GaN, les faibles taux d'ouverture ne favorisant pas la croissance homogène du GaN.

Le deuxième cycle de développement a concerné les nettoyages chimiques avant gravure avec modification du protocole à base de KOH/HCl par des nettoyages Piranha pour supprimer les résidus organiques et TMAH pour réparer la surface gravée. Il s'est avéré que ces nettoyages n'ont pas contribué particulièrement à améliorer la croissance du P-GaN. Nous n'avons pas pu confirmer l'efficacité du TMAH car le bain d'une durée trop longue et/ou d'une température trop élevée a fortement dégradé voire supprimé par endroits la structure mesa AlGaIn/GaN.

Finalement, le troisième cycle a concerné la réalisation des HEMTs : nous avons présenté et détaillé le procédé de fabrication complet, de la conception des masques jusqu'à la réalisation technologique d'un HEMT à barrière P-GaN latérale nanostructurée.

Dans le Chapitre IV, nous avons présenté les résultats de caractérisation électrique des contacts ohmiques, de la diode de grille P-GaN/2DEG et de la structure HEMT proposée. Nous avons réalisé un jeu de masques spécifiques pour la réalisation et la caractérisation des contacts ohmiques. Les résultats ont montré que nous avons obtenu des contacts ohmiques avec une valeur de résistance en moyenne de  $2,5 \Omega \cdot \text{mm}$  sur une hétérostructure AlGaIn/GaN avec

une résistance spécifique de  $700 \Omega \cdot \text{mm}^{-1}$ . La caractéristique électrique mesurée de la diode de grille est typique de celle d'une diode mais présente des fuites en mode bloqué en-dessous d'une tension de  $-7 \text{ V}$ . Cette tendance a été confirmée lors de la caractérisation du HEMT dont l'étude de la fonctionnalité complète a été compromise par la défaillance de la grille. Les caractéristiques  $I_D(V_{DS})$  obtenues montrent que le transistor conduit pour une polarisation de grille-source nulle, ne satisfaisant pas la fonctionnalité recherchée. Nous avons attribué ces résultats à un procédé de fabrication complexe et non optimisé.

Un nouveau cycle de fabrication a débuté sur de nouvelles épitaxies afin de valider le concept de HEMT normally-off à barrière P-GaN latérale nanostructurée.

Dans les perspectives de ce travail, nous proposons différentes approches technologiques pour améliorer la technologie des caissons P-GaN comme l'épitaxie localisée de l'hétérostructure AlGaIn/GaN au sein d'une couche P-GaN épitaxiée au préalable sur le substrat silicium, la réalisation de structures P-GaN en forme de "peignes" ou l'élimination des surcroissances du P-GaN en bordure du masque de  $\text{SiO}_2$ .

Nous proposons également de développer une nouvelle structure HEMT GaN normally-off à multiples canaux 2DEG et barrière P-GaN latérale.

La réalisation de jonctions p-n sur GaN ouvre la voie à la fabrication de composants avancés et de fonctions de puissance intégrées comme les capteurs de tension ou les protections périphériques déjà développés sur silicium au laboratoire.

## Références

- [1] The Energy Institute (EI) Statistical Review of WORLD ENERGY. *72nd edition Statistical Review of World Energy*. 2023. URL : <https://www.connaissancedesenergies.org/sites/default/files/pdf-actualites/Statistical%20Review%20of%20World%20Energy.pdf> (cf. p. 17).
- [2] LESECHOS. *Le monde consomme toujours plus d'énergie, y compris fossile*. 2023. URL : <https://www.lesechos.fr/industrie-services/energie-environnement/le-monde-consomme-toujours-plus-denergie-y-compris-fossile-1955797> (cf. p. 17).
- [3] EE Times INDIA. *Markets Look to WBG Devices to Boost Power Efficiency*. 12 juin 2023. URL : <https://www.eetindia.co.in/markets-look-to-wbg-devices-to-boost-power-efficiency/> (visité le 01/2024) (cf. p. 18).
- [4] T. EGAWA. « Development of Next Generation Devices Amidst Global Competition Due to Their Huge Market Potential ». In : *Ultimate in Vacuum ULVAC 63* (2012), p. 18-21 (cf. p. 18).
- [5] Edward A. JONES, Fei Fred WANG et Daniel COSTINETT. « Review of Commercial GaN Power Devices and GaN-Based Converter Design Challenges ». In : *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics* 4.3 (sept. 2016), p. 707-719. ISSN : 2168-6777, 2168-6785. DOI : 10.1109/JESTPE.2016.2582685 (cf. p. 18).
- [6] STMICROELECTRONICS. *650V GAN HEMT Power Transistors*. année de publication. URL : <https://www.st.com/en/power-transistors/g-hemt-650v-gan-hemt.html> (cf. p. 18).
- [7] TRANSFORMUSA. *Transphorm Releases Two Battery Charger Reference Designs Ideal for Two- and Three-Wheeled Electric Vehicles*. 2023. URL : [https://www.transphormusa.com/en/news/batterycharger\\_referencedesigns/](https://www.transphormusa.com/en/news/batterycharger_referencedesigns/) (cf. p. 19).
- [8] Shuji NAKAMURA, Takashi Mukai Takashi MUKAI et Masayuki Senoh Masayuki SENOH. « High-Power GaN P-N Junction Blue-Light-Emitting Diodes ». In : *Japanese Journal of Applied Physics* 30.12A (1991), p. L1998. DOI : 10.1143/JJAP.30.L1998 (cf. p. 19).
- [9] Shuji NAKAMURA, Masayuki SENOH et Takashi MUKAI. « High-power InGaN/GaN double-heterostructure violet light emitting diodes ». In : *Applied Physics Letters* 62.19 (1993), p. 2390-2392. ISSN : 0003-6951. DOI : 10.1063/1.109374 (cf. p. 19).
- [10] Royal Swedish Academy of SCIENCES. *The Nobel Prize in Physics 2014*. 7 oct. 2014. URL : <https://www.kva.se/en/news/nobelpriset-i-fysik-2014-2/> (visité le 01/2024) (cf. p. 19).
- [11] Matteo MENEGHINI, Gaudenzio MENEGHESSO et Enrico ZANONI, éd. *Power GaN Devices : Materials, Applications and Reliability*. Power Electronics and Power Systems. Springer International Publishing, 2017. DOI : 10.1007/978-3-319-43199-4 (cf. p. 19).

- [12] Kevin J. CHEN et al. « GaN-on-Si Power Technology : Devices and Applications ». In : *IEEE Transactions on Electron Devices* 64.3 (mars 2017), p. 779-795. ISSN : 0018-9383, 1557-9646. DOI : 10.1109/TED.2017.2657579 (cf. p. 19).
- [13] Giuseppe GRECO. « Review of technology for normally-off HEMTs with p-GaN gate ». In : (), p. 11 (cf. p. 19, 36, 39-41).
- [14] Fabrizio ROCCAFORTE et al. « Emerging trends in wide band gap semiconductors (SiC and GaN) technology for power devices ». In : *Microelectronic Engineering* 187-188 (fév. 2018), p. 66-77. ISSN : 01679317. DOI : 10.1016/j.mee.2017.11.021 (cf. p. 19).
- [15] Robert L. COFFIE. « High Power High Frequency Transistors : A Material's Perspective ». In : *High-Frequency GaN Electronic Devices*. Sous la dir. de Patrick FAY, Debdeep JENA et Paul MAKI. Cham : Springer International Publishing, 2020, p. 5-41. ISBN : 978-3-030-20207-1 978-3-030-20208-8. DOI : 10.1007/978-3-030-20208-8\_2 (cf. p. 20, 21).
- [16] J.L. HUDGINS et al. « An assessment of wide bandgap semiconductors for power devices ». In : *IEEE Transactions on Power Electronics* 18.3 (mai 2003), p. 907-914. ISSN : 0885-8993, 1941-0107. DOI : 10.1109/TPEL.2003.810840 (cf. p. 20).
- [17] B. J. BALIGA. « Semiconductors for high-voltage, vertical channel field-effect transistors ». In : *Journal of Applied Physics* 53.3 (mars 1982), p. 1759-1764. ISSN : 0021-8979. DOI : 10.1063/1.331646. eprint : [https://pubs.aip.org/aip/jap/article-pdf/53/3/1759/7976205/1759\\_1\\_online.pdf](https://pubs.aip.org/aip/jap/article-pdf/53/3/1759/7976205/1759_1_online.pdf) (cf. p. 21).
- [18] B.J. BALIGA. « Power semiconductor device figure of merit for high-frequency applications ». In : *IEEE Electron Device Letters* 10.10 (1989), p. 455-457. DOI : 10.1109/55.43098 (cf. p. 21).
- [19] Fabio BERNARDINI, Vincenzo FIORENTINI et David VANDERBILT. « Spontaneous polarization and piezoelectric constants of III-V nitrides ». In : *Phys. Rev. B* 56 (16 1997), R10024-R10027. DOI : 10.1103/PhysRevB.56.R10024 (cf. p. 22).
- [20] Daisuke UEDA. « Properties and Advantages of Gallium Nitride ». In : *Power GaN Devices : Materials, Applications and Reliability*. Sous la dir. de Matteo MENEGHINI, Gaudenzio MENEGHESSO et Enrico ZANONI. Springer International Publishing, 2017, p. 1-26. ISBN : 978-3-319-43199-4. DOI : 10.1007/978-3-319-43199-4\_1 (cf. p. 22, 23).
- [21] Matteo MENEGHINI et al. « GaN-based power devices : Physics, reliability, and perspectives ». In : *Journal of Applied Physics* 130.18 (14 nov. 2021), p. 181101. ISSN : 0021-8979, 1089-7550. DOI : 10.1063/5.0061354 (cf. p. 22, 23, 25, 27, 43, 170).
- [22] Hadis MORKOC et Jacob LEACH. « Polarization in GaN Based Heterostructures and Heterojunction Field Effect Transistors (HFETs) ». In : *Polarization Effects in Semiconductors*. Sous la dir. de Colin WOOD et Debdeep JENA. Boston, MA : Springer US, 2008, p. 373-466. ISBN : 978-0-387-36831-3 978-0-387-68319-5. DOI : 10.1007/978-0-387-68319-5\_8 (cf. p. 23).

- [23] O. AMBACHER et al. « Two dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization in undoped and doped AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> heterostructures ». en. In : *Journal of Applied Physics* 87.1 (jan. 2000), p. 334-344. ISSN : 0021-8979, 1089-7550. DOI : 10.1063/1.371866 (cf. p. 23, 28, 57).
- [24] J K SHEU et G C CHI. « The doping process and dopant characteristics of GaN ». In : *Journal of Physics : Condensed Matter* 14.22 (2002), R657. DOI : 10.1088/0953-8984/14/22/201 (cf. p. 24).
- [25] T TANAKA et al. « p-type conduction in Mg-doped GaN and Al<sub>0.08</sub>Ga<sub>0.92</sub>N grown by metalorganic vapor phase epitaxy ». In : *Applied physics letters* 65.5 (1994), p. 593-594 (cf. p. 24).
- [26] JZ LI et al. « Nature of Mg impurities in GaN ». In : *Applied physics letters* 69.10 (1996), p. 1474-1476 (cf. p. 24).
- [27] Mamoru MIYACHI et al. « The activation of Mg in GaN by annealing with minority-carrier injection ». In : *Applied physics letters* 72.9 (1998), p. 1101-1103 (cf. p. 24).
- [28] BA HULL et al. « Influence of oxygen on the activation of p-type GaN ». In : *Applied Physics Letters* 76.16 (2000), p. 2271-2273 (cf. p. 24).
- [29] B. JOGAI. « Influence of surface states on the two-dimensional electron gas in AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> heterojunction field-effect transistors ». In : *Journal of Applied Physics* 93.3 (fév. 2003), p. 1631-1635. ISSN : 0021-8979. DOI : 10.1063/1.1530729 (cf. p. 25, 26, 58).
- [30] Giorgia LONGOBARDI et al. « Modelling 2DEG charges in AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> heterostructures ». In : *CAS 2012 (International Semiconductor Conference)*. Sinaia, Romania : IEEE, oct. 2012, p. 363-366. ISBN : 978-1-4673-0738-3 978-1-4673-0737-6. DOI : 10.1109/SMICND.2012.6400760 (cf. p. 25).
- [31] M. POSTERNAK et al. « Ab initio study of the spontaneous polarization of pyroelectric BeO ». In : *Phys. Rev. Lett.* 64 (15 1990), p. 1777-1780. DOI : 10.1103/PhysRevLett.64.1777 (cf. p. 25).
- [32] Daniel BALAZ. « Current Collapse and Device Degradation in AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> Heterostructure Field Effect Transistors ». Thèse de doct. University of Glasgow, 2010 (cf. p. 28).
- [33] A. ASGARI et M. KALAFI. « The control of two-dimensional-electron-gas density and mobility in AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> heterostructures with Schottky gate ». In : *Materials Science and Engineering : C* 26.5 (2006). Current Trends in Nanoscience - from Materials to Applications, p. 898-901. ISSN : 0928-4931. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.msec.2005.09.002> (cf. p. 29).
- [34] M. Asif KHAN et al. « Enhancement and depletion mode GaN/AlGa<sub>N</sub> heterostructure field effect transistors ». In : *Applied Physics Letters* 68.4 (22 jan. 1996), p. 514-516. ISSN : 0003-6951, 1077-3118. DOI : 10.1063/1.116384 (cf. p. 30).

- [35] V. KUMAR et al. « High transconductance enhancement-mode AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMTs on SiC substrate ». In : *Electronics Letters* 39.24 (2003), p. 1758. ISSN : 00135194. DOI : 10.1049/e1:20031124 (cf. p. 32).
- [36] W. SAITO et al. « Recessed-gate structure approach toward normally off high-Voltage AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMT for power electronics applications ». In : *IEEE Transactions on Electron Devices* 53.2 (fév. 2006), p. 356-362. ISSN : 0018-9383. DOI : 10.1109/TED.2005.862708 (cf. p. 32).
- [37] W.B. LANFORD et al. « Recessed-gate enhancement-mode Ga<sub>N</sub> HEMT with high threshold voltage ». In : *Electronics Letters* 41.7 (2005), p. 449. ISSN : 00135194. DOI : 10.1049/e1:20050161 (cf. p. 32).
- [38] Shawn D. BURNHAM et al. « Gate-recessed normally-off Ga<sub>N</sub>-on- Si HEMT using a new O<sub>2</sub>-BCl<sub>3</sub> digital etching technique ». In : *physica status solidi c* 7.7 (juill. 2010), p. 2010-2012. ISSN : 1862-6351, 1610-1642. DOI : 10.1002/pssc.200983644 (cf. p. 32).
- [39] K. OTA et al. « A normally-off Ga<sub>N</sub> FET with high threshold voltage uniformity using a novel piezo neutralization technique ». In : *2009 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)*. Baltimore, MD, USA : IEEE, déc. 2009, p. 1-4. ISBN : 978-1-4244-5639-0. DOI : 10.1109/IEDM.2009.5424398 (cf. p. 32, 33).
- [40] W. HUANG et al. « Enhancement-mode gan hybrid mos-hemts with r on,sp of 20 mΩ-cm<sup>2</sup> ». In : *2008 20th International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's ISPSD*. Orlando, FL : IEEE, mai 2008, p. 295-298. ISBN : 978-1-4244-1532-8. DOI : 10.1109/ISPSD.2008.4538957 (cf. p. 33).
- [41] Tohru OKA et Tomohiro NOZAWA. « AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> Recessed MIS-Gate HFET With High-Threshold-Voltage Normally-Off Operation for Power Electronics Applications ». In : *IEEE Electron Device Letters* 29.7 (juill. 2008), p. 668-670. ISSN : 0741-3106. DOI : 10.1109/LED.2008.2000607 (cf. p. 33).
- [42] Hiroshi KAMBAYASHI et al. « High field-effect mobility normally-off AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> hybrid MOS-HFET on Si substrate by selective area growth technique ». In : *Solid-State Electronics* 56.1 (fév. 2011), p. 163-167. ISSN : 00381101. DOI : 10.1016/j.sse.2010.10.001 (cf. p. 33).
- [43] Naeemul ISLAM et al. « Reliability, Applications and Challenges of Ga<sub>N</sub> HEMT Technology for Modern Power Devices : A Review ». In : *Crystals* 12.11 (7 nov. 2022), p. 1581. ISSN : 2073-4352. DOI : 10.3390/cryst12111581 (cf. p. 33).
- [44] Huaxing JIANG, Chak Wah TANG et Kei May LAU. « Enhancement-Mode Ga<sub>N</sub> MOS-HEMTs With Recess-Free Barrier Engineering and High-  $\epsilon$  ZrO<sub>2</sub> Gate Dielectric ». In : *IEEE Electron Device Letters* 39 (2018), p. 405-408 (cf. p. 33).
- [45] YONG CAI et al. « High-performance enhancement-mode AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMTs using fluoride-based plasma treatment ». In : *IEEE Electron Device Letters* 26.7 (juill. 2005), p. 435-437. ISSN : 0741-3106. DOI : 10.1109/LED.2005.851122 (cf. p. 34, 35).



- [46] Y. CAI et al. « Control of Threshold Voltage of AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMTs by Fluoride-Based Plasma Treatment : From Depletion Mode to Enhancement Mode ». In : *IEEE Transactions on Electron Devices* 53.9 (sept. 2006), p. 2207-2215. ISSN : 0018-9383, 1557-9646. DOI : 10.1109/TED.2006.881054 (cf. p. 34).
- [47] Kevin J. CHEN et al. « Physics of fluorine plasma ion implantation for Ga<sub>N</sub> normally-off HEMT technology ». In : *2011 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)*. Washington, DC, USA : IEEE, déc. 2011, p. 19.4.1-19.4.4. ISBN : 978-1-4577-0505-2 978-1-4577-0506-9 978-1-4577-0504-5. DOI : 10.1109/IEDM.2011.6131585 (cf. p. 34).
- [48] Zhili ZHANG et al. « Normally Off AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> MIS-High-Electron Mobility Transistors Fabricated by Using Low Pressure Chemical Vapor Deposition Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Gate Dielectric and Standard Fluorine Ion Implantation ». In : *IEEE Electron Device Letters* 36.11 (nov. 2015), p. 1128-1131. ISSN : 0741-3106, 1558-0563. DOI : 10.1109/LED.2015.2483760 (cf. p. 35).
- [49] Hongwei CHEN, Maojun WANG et Kevin J. CHEN. « Self-aligned enhancement-mode AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMTs using 25 keV fluorine ion implantation ». In : *2010 68th Annual Device Research Conference (DRC)*. Notre Dame, IN, USA : IEEE, juin 2010, p. 137-138. ISBN : 978-1-4244-6562-0. DOI : 10.1109/DRC.2010.5551879 (cf. p. 35).
- [50] C.-T. CHANG et al. « Normally-off operation AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> MOS-HEMT with high threshold voltage ». In : *Electronics Letters* 46.18 (2010), p. 1280. ISSN : 00135194. DOI : 10.1049/e1.2010.1939 (cf. p. 35).
- [51] Chia-Hsun WU et al. « Normally-OFF Ga<sub>N</sub> MIS-HEMT With F<sup>-</sup> Doped Gate Insulator Using Standard Ion Implantation ». In : *IEEE Journal of the Electron Devices Society* 6 (2018), p. 893-899. ISSN : 2168-6734. DOI : 10.1109/JEDS.2018.2859769 (cf. p. 35).
- [52] Zhihua DONG et al. « 5.3A/400V normally-off AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>-on-Si MOS-HEMT with high threshold voltage and large gate swing ». In : *Electronics Letters* 49.3 (jan. 2013), p. 221-222. ISSN : 0013-5194, 1350-911X. DOI : 10.1049/e1.2012.3153 (cf. p. 35).
- [53] Zhikai TANG et al. « 600-V Normally Off  $\text{Si}_x\text{N}_y$ /AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> MIS-HEMT With Large Gate Swing and Low Current Collapse ». In : *IEEE Electron Device Letters* 34.11 (nov. 2013), p. 1373-1375. ISSN : 0741-3106, 1558-0563. DOI : 10.1109/LED.2013.2279846 (cf. p. 35).
- [54] T. PALACIOS et al. « High-performance E-mode AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMTs ». In : *IEEE Electron Device Letters* 27.6 (juin 2006), p. 428-430. ISSN : 0741-3106. DOI : 10.1109/LED.2006.874761 (cf. p. 35).
- [55] Soo Cheol KANG et al. « Charging Effect by Fluorine-Treatment and Recess Gate for Enhancement-Mode on AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> High Electron Mobility Transistors ». In : *Nanomaterials* 10.11 (24 oct. 2020), p. 2116. ISSN : 2079-4991. DOI : 10.3390/nano10112116 (cf. p. 35).

- [56] D. BISI et al. « Influence of fluorine-based dry etching on electrical parameters of AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>-on-Si High Electron Mobility Transistors ». In : *2013 - 43rd European Solid State Device Research Conference ESSDERC*. Bucharest, Romania : IEEE, sept. 2013, p. 61-64. ISBN : 978-1-4799-0649-9. DOI : 10.1109/ESSDERC.2013.6818819 (cf. p. 35).
- [57] Anne LORENZ et al. « Influence of thermal anneal steps on the current collapse of fluorine treated enhancement mode Si<sub>N</sub>/AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMTs ». In : *physica status solidi c* 6.S2 (2009), S996-S998. DOI : <https://doi.org/10.1002/pssc.200880838>. eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/pssc.200880838> (cf. p. 35).
- [58] Takahiro FUJII et al. « Control of threshold voltage of enhancement-mode Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/Ga<sub>N</sub> junction heterostructure field-effect transistors using p-Ga<sub>N</sub> gate contact ». In : *Japanese journal of applied physics* 46.1R (2007), p. 115 (cf. p. 37).
- [59] X. HU et al. « Enhancement mode AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HFET with selectively grown pn junction gate ». In : *Electronics Letters* 36.8 (2000), p. 753. ISSN : 00135194. DOI : 10.1049/e1:20000557 (cf. p. 37, 38, 41).
- [60] C. SUH et al. « p-Ga<sub>N</sub>/AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> Enhancement-Mode HEMTs ». In : *2006 64th Device Research Conference DRC*. State College, PA, USA : IEEE, juin 2006, p. 163-164. ISBN : 978-0-7803-9748-4 978-0-7803-9749-1. DOI : 10.1109/DRC.2006.305167 (cf. p. 37, 38).
- [61] O HILT et al. « Normally-off AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HFET with p-type Ga<sub>N</sub> Gate and AlGa<sub>N</sub> Buffer ». In : (juin 2010) (cf. p. 37).
- [62] Injun HWANG et al. « 1.6kV, 2.9 mΩ cm<sup>2</sup> normally-off p-Ga<sub>N</sub> HEMT device ». In : *2012 24th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs*. 2012, p. 41-44. DOI : 10.1109/ISPSD.2012.6229018 (cf. p. 37, 39).
- [63] Injun HWANG et al. « Source-Connected p-Ga<sub>N</sub> Gate HEMTs for Increased Threshold Voltage ». In : *IEEE Electron Device Letters* 34.5 (mai 2013), p. 605-607. ISSN : 0741-3106, 1558-0563. DOI : 10.1109/LED.2013.2249038 (cf. p. 37, 39).
- [64] Injun HWANG et al. « p-Ga<sub>N</sub> Gate HEMTs With Tungsten Gate Metal for High Threshold Voltage and Low Gate Current ». In : *IEEE Electron Device Letters* 34.2 (fév. 2013), p. 202-204. ISSN : 0741-3106, 1558-0563. DOI : 10.1109/LED.2012.2230312 (cf. p. 37, 39).
- [65] Liang-Yu SU, Finella LEE et Jian Jang HUANG. « Enhancement-Mode Ga<sub>N</sub>-Based High-Electron Mobility Transistors on the Si Substrate With a P-Type Ga<sub>N</sub> Cap Layer ». In : *IEEE Transactions on Electron Devices* 61.2 (fév. 2014), p. 460-465. ISSN : 0018-9383, 1557-9646. DOI : 10.1109/TED.2013.2294337 (cf. p. 37).
- [66] Ronghui HAO et al. « Normally-off p -Ga<sub>N</sub>/AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> high electron mobility transistors using hydrogen plasma treatment ». In : *Applied Physics Letters* 109.15 (10 oct. 2016), p. 152106. ISSN : 0003-6951, 1077-3118. DOI : 10.1063/1.4964518 (cf. p. 37, 42).

- [67] Yasuhiro UEMOTO et al. « Gate Injection Transistor (GIT)—A Normally-Off AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> Power Transistor Using Conductivity Modulation ». In : *IEEE Transactions on Electron Devices* 54.12 (2007), p. 3393-3399. ISSN : 0018-9383. DOI : 10.1109/TED.2007.908601 (cf. p. 38).
- [68] Hiroshi CHONAN et al. « Effect of hole injection in AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMT with GIT structure by numerical simulation ». In : *physica status solidi c* 9.3 (mars 2012), p. 847-850. ISSN : 1862-6351, 1610-1642. DOI : 10.1002/pssc.201100330 (cf. p. 39).
- [69] Hitoshi AOKI et al. « Drain Current Characteristics of Enhancement Mode Ga<sub>N</sub> HEMTs ». In : *2020 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. New Orleans, LA, USA : IEEE, mars 2020, p. 1942-1948. ISBN : 978-1-72814-829-8. DOI : 10.1109/APEC39645.2020.9124203 (cf. p. 39).
- [70] JONGSEOB KIM et al. « High threshold voltage p-Ga<sub>N</sub> gate power devices on 200 mm Si ». In : *2013 25th International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's (ISPSD)*. Kanazawa : IEEE, mai 2013, p. 315-318. ISBN : 978-1-4673-5134-8 978-1-4673-5136-2. DOI : 10.1109/ISPSD.2013.6694412 (cf. p. 39).
- [71] PANASONIC. *GaN Power Transistors*. URL : [https://eu.industrial.panasonic.com/sites/default/pidseu/files/pan\\_18047\\_whitepaper\\_gan\\_web.pdf](https://eu.industrial.panasonic.com/sites/default/pidseu/files/pan_18047_whitepaper_gan_web.pdf) (visité le 02/2024) (cf. p. 39).
- [72] Ga<sub>N</sub> SYSTEMS. *GN001 Application Note : An Introduction to Ga<sub>N</sub> Enhancement-mode HEMTs*. URL : [https://gansystems.com/wp-content/uploads/2022/03/GN001\\_An-Introduction-to-GaN-E-HEMTs\\_220308.pdf](https://gansystems.com/wp-content/uploads/2022/03/GN001_An-Introduction-to-GaN-E-HEMTs_220308.pdf) (visité le 02/2024) (cf. p. 39).
- [73] Xiaoming YUAN et al. « Selective area epitaxy of III-V nanostructure arrays and networks : Growth, applications, and future directions ». In : *Applied Physics Reviews* 8.2 (avr. 2021), p. 021302. ISSN : 1931-9401. DOI : 10.1063/5.0044706. eprint : [https://pubs.aip.org/aip/apr/article-pdf/doi/10.1063/5.0044706/14576605/021302\\_1\\_online.pdf](https://pubs.aip.org/aip/apr/article-pdf/doi/10.1063/5.0044706/14576605/021302_1_online.pdf) (cf. p. 41, 42).
- [74] Tom VAN CAENEEM, Ingrid MOERMAN et Piet DEMEESTER. « Selective area growth on planar masked InP substrates by metal organic vapour phase epitaxy (MOVPE) ». In : *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials* 35.2 (1997), p. 263-288. ISSN : 0960-8974. DOI : [https://doi.org/10.1016/S0960-8974\(98\)00003-5](https://doi.org/10.1016/S0960-8974(98)00003-5) (cf. p. 41).
- [75] Yuliang HUANG et al. « AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> high electron mobility transistors with selective area grown p-Ga<sub>N</sub> gates ». In : *Journal of Semiconductors* 37.11 (nov. 2016), p. 114002. ISSN : 1674-4926. DOI : 10.1088/1674-4926/37/11/114002 (cf. p. 42).
- [76] Shuji NAKAMURA et al. « Hole Compensation Mechanism of P-Type Ga<sub>N</sub> Films ». In : *Japanese Journal of Applied Physics* 31 (1992), p. 1258 (cf. p. 42).

- [77] A. Y. POLYAKOV et al. « Hydrogen plasma passivation effects on properties of p-GaN ». In : *Journal of Applied Physics* 94.6 (sept. 2003), p. 3960-3965. ISSN : 0021-8979. DOI : 10.1063/1.1603343. eprint : [https://pubs.aip.org/aip/jap/article-pdf/94/6/3960/18704987/3960\\\_1\\\_online.pdf](https://pubs.aip.org/aip/jap/article-pdf/94/6/3960/18704987/3960\_1\_online.pdf) (cf. p. 42).
- [78] B. DAMILANO et al. « Selective Area Sublimation : A Simple Top-down Route for GaN-Based Nanowire Fabrication ». In : *Nano Letters* 16.3 (2016). PMID : 26885770, p. 1863-1868. DOI : 10.1021/acs.nanolett.5b04949. eprint : <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.5b04949> (cf. p. 43).
- [79] Thi Huong NGO et al. « Combination of selective area sublimation of p-GaN and regrowth of AlGaN for the co-integration of enhancement mode and depletion mode high electron mobility transistors ». In : *Solid-State Electronics* 188 (fév. 2022), p. 108210. ISSN : 00381101. DOI : 10.1016/j.sse.2021.108210 (cf. p. 43, 165).
- [80] Takahiro TAMURA et al. « Nearly Temperature-Independent Saturation Drain Current in a Multi-Mesa-Channel AlGaN/GaN High Electron Mobility Transistor ». In : *Applied Physics Express* 1 (15 fév. 2008), p. 023001. ISSN : 1882-0778, 1882-0786. DOI : 10.1143/APEX.1.023001 (cf. p. 44).
- [81] Kota OHI et Tamotsu HASHIZUME. « Drain Current Stability and Controllability of Threshold Voltage and Subthreshold Current in a Multi-Mesa-Channel AlGaN/GaN High Electron Mobility Transistor ». In : *Japanese Journal of Applied Physics* 48.8 (20 août 2009), p. 081002. ISSN : 0021-4922, 1347-4065. DOI : 10.1143/JJAP.48.081002 (cf. p. 44).
- [82] Mohamed A. ALSHAREF, Ralf GRANZNER et Frank SCHWIERZ. « Theoretical Investigation of Trigate AlGaN/GaN HEMTs ». In : *IEEE Transactions on Electron Devices* 60.10 (2013), p. 3335-3341. DOI : 10.1109/TED.2013.2279264 (cf. p. 44).
- [83] Kailin REN, Yung C. LIANG et Chih-Fang HUANG. « Physical mechanism of fin-gate AlGaN/GaN MIS-HEMT : Vth model ». In : 2016 IEEE 4th Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA). Fayetteville, AR, USA : IEEE, nov. 2016, p. 319-323. ISBN : 978-1-5090-1576-4. DOI : 10.1109/WiPDA.2016.7799960 (cf. p. 44).
- [84] Kailin REN, Yung C. LIANG et Chih-Fang HUANG. « Compact Physical Models for AlGaN/GaN MIS-FinFET on Threshold Voltage and Saturation Current ». In : *IEEE Transactions on Electron Devices* 65.4 (avr. 2018), p. 1348-1354. ISSN : 0018-9383, 1557-9646. DOI : 10.1109/TED.2018.2809517 (cf. p. 44).
- [85] Dong-Hyeok SON et al. « Fabrication of high performance AlGaN/GaN FinFET by utilizing anisotropic wet etching in TMAH solution ». In : *ESSDERC 2015 - 45th European Solid-State Device Research Conference*. Graz, Austria : IEEE, sept. 2015, p. 130-133. ISBN : 978-1-4673-7133-9 978-1-4673-7135-3. DOI : 10.1109/ESSDERC.2015.7324730 (cf. p. 44, 45, 122, 166).

- [86] Jun MA et al. « Impact of Fin Width on Tri-Gate GaN MOSHEMTs ». In : *IEEE Transactions on Electron Devices* 66.9 (sept. 2019), p. 4068-4074. ISSN : 0018-9383, 1557-9646. DOI : 10.1109/TED.2019.2925859 (cf. p. 44, 45).
- [87] Cheng-Yen CHIEN et al. « Breaking Through the Multi-Mesa-Channel Width Limited of Normally Off GaN HEMTs Through Modulation of the Via-Hole-Length ». In : *Nanoscale Research Letters* 12.1 (déc. 2017), p. 420. ISSN : 1931-7573, 1556-276X. DOI : 10.1186/s11671-017-2189-3 (cf. p. 44).
- [88] Minghua ZHU et al. « P-GaN Tri-Gate MOS Structure for Normally-Off GaN Power Transistors ». In : *IEEE Electron Device Letters* 42.1 (jan. 2021), p. 82-85. ISSN : 0741-3106, 1558-0563. DOI : 10.1109/LED.2020.3037026 (cf. p. 45, 46).
- [89] Saleem HAMADY. « New concepts for normally-off power Gallium Nitride (GaN) High Electron Mobility Transistor (HEMT) ». Thèse de doct. Toulouse : Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier). 140 p. (cf. p. 46, 47).
- [90] Chaymaa HALOUI. « Développement et réalisation technologique de composants HEMTs en Nitrure de Gallium (GaN) présentant la fonctionnalité "Normally-Off" ». Thèse de doct. Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier) (cf. p. 46, 48, 49, 137, 148).
- [91] Frédéric MORANCHO, Saleem HAMADY et Bilal BEYDOUN. *Heterojunction-based HEMT transistor*. Patent FR3011981B1. 2017 (cf. p. 46).
- [92] Audrey CHAPELLE et al. « Première démonstration expérimentale d'un interrupteur HEMT normally-off en GaN avec une région P-GaN enterrée ». In : *Symposium de Génie Electrique (SGE 2018)*. Université de Lorraine [UL]. Nancy, France, juill. 2018, p. 3 -5 (cf. p. 47, 137).
- [93] Gaetan TOULON et Matthew CHARLES. *Transistor hemt de type normalement ouvert presentant une tension de seuil eleve et une resistance de conduction reduite*. Patent FR3047609A1. Jan. 2017 (cf. p. 48).
- [94] Houqiang FU et al. « Selective area regrowth and doping for vertical gallium nitride power devices : Materials challenges and recent progress ». In : *Materials Today* 49 (oct. 2021), p. 296-323. ISSN : 13697021. DOI : 10.1016/j.mattod.2021.04.011 (cf. p. 50, 169).
- [95] Kai FU et al. « Demonstration of 1.27 kV Etch-Then-Regrow GaN  $\text{p-n}$  Junctions With Low Leakage for GaN Power Electronics ». In : *IEEE Electron Device Letters* 40.11 (nov. 2019), p. 1728-1731. ISSN : 0741-3106, 1558-0563. DOI : 10.1109/LED.2019.2941830 (cf. p. 50, 122).

- [96] Ming XIAO et al. « Lateral p-GaN/2DEG junction diodes by selective-area p-GaN trench-filling-regrowth in AlGaIn/GaN ». In : *Applied Physics Letters* 116.5 (fév. 2020), p. 053503. ISSN : 0003-6951. DOI : 10.1063/1.5139906. eprint : [https://pubs.aip.org/aip/apl/article-pdf/doi/10.1063/1.5139906/14531342/053503\\\_1\\\_online.pdf](https://pubs.aip.org/aip/apl/article-pdf/doi/10.1063/1.5139906/14531342/053503\_1\_online.pdf) (cf. p. 50).
- [97] SYNOPSIS. *Sentaurus<sup>TM</sup> Device User Guide*. 2021 (cf. p. 54).
- [98] Gema MARTINEZ-CRIADO et al. « Residual strain effects on the two-dimensional electron gas concentration of AlGaIn/GaN heterostructures ». In : *Journal of Applied Physics*, 2001, vol. 90, no. 9 90 (nov. 2001). DOI : 10.1063/1.1408268 (cf. p. 57).
- [99] S. HASHIMOTO et al. « High-purity GaN epitaxial layers for power devices on low-dislocation-density GaN substrates ». In : *Journal of Crystal Growth* 298 (2007). Thirteenth International Conference on Metal Organic Vapor Phase Epitaxy (ICMOVPE XIII), p. 871-874. ISSN : 0022-0248. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2006.10.117> (cf. p. 58).
- [100] Susai Lawrence SELVARAJ et al. « 1.4-kV Breakdown Voltage for AlGaIn/GaN High-Electron-Mobility Transistors on Silicon Substrate ». In : *IEEE Electron Device Letters* 33.10 (2012), p. 1375-1377. DOI : 10.1109/LED.2012.2207367 (cf. p. 58).
- [101] Giorgia LONGOBARDI et Florin UDREA. « On the variation of the 2DEG charge density with the density of the surface donor traps in AlGaIn/GaN transistors ». In : (), p. 4 (cf. p. 58, 59).
- [102] Giorgia LONGOBARDI et al. « Impact of Donor Traps on the 2DEG and Electrical Behavior of AlGaIn/GaN MISFETs ». In : *IEEE Electron Device Letters* 35.1 (jan. 2014), p. 27-29. ISSN : 0741-3106, 1558-0563. DOI : 10.1109/LED.2013.2290471 (cf. p. 59).
- [103] S. KARMALKAR et al. « Field-Plate Engineering for HFETs ». In : *IEEE Transactions on Electron Devices* 52.12 (déc. 2005), p. 2534-2540. ISSN : 0018-9383. DOI : 10.1109/TED.2005.859568 (cf. p. 60).
- [104] Kyu-Heon CHO et al. « Design of AlGaIn/GaN HEMTs employing mesa field plate for breakdown voltage enhancement ». In : *Solid-State Electronics* 54.4 (avr. 2010), p. 405-409. ISSN : 00381101. DOI : 10.1016/j.sse.2009.12.034 (cf. p. 60).
- [105] L. HEUKEN et al. « Analysis of an AlGaIn/AlN Super-Lattice Buffer Concept for 650-V Low-Dispersion and High-Reliability GaN HEMTs ». In : *IEEE Transactions on Electron Devices* 67.3 (2020), p. 1113-1119. DOI : 10.1109/TED.2020.2968757 (cf. p. 60).
- [106] Alaleh TAJALLI et al. « High Breakdown Voltage and Low Buffer Trapping in Superlattice GaN-on-Silicon Heterostructures for High Voltage Applications ». In : *Materials* 13.19 (2020). ISSN : 1996-1944. DOI : 10.3390/ma13194271 (cf. p. 60).
- [107] N. ZAGNI et al. « Insights into the off-state breakdown mechanisms in power GaN HEMTs ». In : *Microelectronics Reliability* 100-101 (sept. 2019), S0026271419304263. ISSN : 00262714. DOI : 10.1016/j.microrel.2019.06.066 (cf. p. 60).

- [108] O. HILT et al. « Normally-off high-voltage p-GaN gate GaN HFET with carbon-doped buffer ». In : *2011 IEEE 23rd International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's (ISPSD)*. San Diego, CA, USA : IEEE, mai 2011, p. 239-242. ISBN : 978-1-4244-8425-6. DOI : 10.1109/ISPSD.2011.5890835 (cf. p. 60).
- [109] G. MASETTI, M. SEVERI et S. SOLMI. « Modeling of carrier mobility against carrier concentration in arsenic-, phosphorus-, and boron-doped silicon ». In : *IEEE Transactions on Electron Devices* 30.7 (1983), p. 764-769. DOI : 10.1109/T-ED.1983.21207 (cf. p. 63).
- [110] Tigran T MNATSAKANOV et al. « Carrier mobility model for GaN ». In : *Solid-State Electronics* 47.1 (2003), p. 111-115. ISSN : 0038-1101. DOI : [https://doi.org/10.1016/S0038-1101\(02\)00256-3](https://doi.org/10.1016/S0038-1101(02)00256-3) (cf. p. 63).
- [111] I. VURGAFTMAN, J. R. MEYER et L. R. RAM-MOHAN. « Band parameters for III-V compound semiconductors and their alloys ». In : *Journal of Applied Physics* 89.11 (juin 2001), p. 5815-5875. ISSN : 0021-8979, 1089-7550. DOI : 10.1063/1.1368156 (cf. p. 63).
- [112] I. VURGAFTMAN et J. R. MEYER. « Band parameters for nitrogen-containing semiconductors ». In : *Journal of Applied Physics* 94.6 (15 sept. 2003), p. 3675-3696. ISSN : 0021-8979, 1089-7550. DOI : 10.1063/1.1600519 (cf. p. 63).
- [113] Ioffe INSTITUTE. *New Semiconductor Materials. Characteristics and Properties*. URL : <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/GaN/> (visité le 01/2024) (cf. p. 63).
- [114] Catherine Madjiguène NGOM. « Développement d'une méthodologie par rayons X et laser impulsionnel pour l'évaluation des effets des radiations sur les composants semi-conducteurs avancés ». Thèses. Université Montpellier, déc. 2021 (cf. p. 63, 64).
- [115] GaN Systems INC. *GS66508P Bottom-side cooled 650 V E-mode GaN transistor Preliminary Datasheet*. 2018 (cf. p. 63).
- [116] Andres ECHEVERRI DUARTE. « Etude de la Fiabilité des Transistors HEMTs AlGaIn/GaN de puissance en condition opérationnelle ». Thèse de doctorat dirigée par Latry, Olivier Physique Normandie 2018. Thèse de doct. 2018 (cf. p. 63).
- [117] Jun MA. « Tri-gate technologies for high-performance power GaN devices ». In : (2019), p. 154. DOI : <https://doi.org/10.5075/epfl-thesis-9652> (cf. p. 64).
- [118] Don DISNEY et Gary DOLNY. « JFET Depletion in SuperJunction Devices ». In : *2008 20th International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's*. Orlando, FL, USA : IEEE, mai 2008, p. 157-160. ISBN : 978-1-4244-1532-8. DOI : 10.1109/ISPSD.2008.4538922 (cf. p. 65).
- [119] Philippe LETURCQ et Gérard REY. *Physique des composants actifs à semi-conducteurs*. Dunod, 1978 (cf. p. 70).
- [120] Henry MATHIEU et Hervé FANET. *Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques-6ème édition : Cours et exercices corrigés*. Dunod, 2009 (cf. p. 70).



- [121] D. CUCAK et al. « Physical modeling and optimization of a GaN HEMT design with a field plate structure for high frequency application ». In : *2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. 2014, p. 2857-2864. DOI : 10.1109/ECCE.2014.6953786 (cf. p. 95).
- [122] D. PARK et al. « Characterization of hydrogen silsesquioxane as a Cl<sub>2</sub>/BCl<sub>3</sub> inductively coupled plasma etch mask for air-clad InP-based quantum well waveguide fabrication ». In : *Journal of Vacuum Science & Technology B : Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena* 24.6 (déc. 2006), p. 3152-3156. ISSN : 1071-1023. DOI : 10.1116/1.2395952. eprint : <https://pubs.aip.org/avs/jvb/article-pdf/24/6/3152/14924238/3152\1\online.pdf> (cf. p. 107).
- [123] Denis LAUVERNIER et al. « Realization of sub-micron patterns on GaAs using a HSQ etching mask ». In : *Microelectronic Engineering* 77.3 (avr. 2005), p. 210-216. ISSN : 01679317. DOI : 10.1016/j.mee.2004.11.002 (cf. p. 107).
- [124] Qianghua YUAN, Guiqin YIN et Zhaoyuan NING. « Effect of Oxygen Plasma on Low Dielectric Constant HSQ (Hydrogensilsesquioxane) Films ». In : *Plasma Science and Technology* 15.1 (jan. 2013), p. 86-88. ISSN : 1009-0630. DOI : 10.1088/1009-0630/15/1/14 (cf. p. 107).
- [125] Hideo NAMATSU. « Three-dimensional siloxane resist for the formation of nanopatterns with minimum linewidth fluctuations ». In : *Journal of Vacuum Science & Technology B : Microelectronics and Nanometer Structures* 16.1 (jan. 1998), p. 69. ISSN : 0734211X. DOI : 10.1116/1.589837 (cf. p. 107).
- [126] Mathieu LANNIEL et al. « Patterning the mechanical properties of hydrogen silsesquioxane films using electron beam irradiation for application in mechano cell guidance ». In : *Thin Solid Films* 519.6 (jan. 2011), p. 2003-2010. ISSN : 00406090. DOI : 10.1016/j.tsf.2010.10.054 (cf. p. 107).
- [127] C MADDALON et al. « Planarization properties of hydrogen silsesquioxane (HSQ) influence on CMP ». In : *Microelectronic Engineering* 50.1 (jan. 2000), p. 33-40. ISSN : 01679317. DOI : 10.1016/S0167-9317(99)00261-0 (cf. p. 108).
- [128] T. WAHLBRINK et al. « Supercritical drying process for high aspect-ratio HSQ nanostructures ». In : *Microelectronic Engineering* 83.4 (2006). Micro- and Nano-Engineering MNE 2005, p. 1124-1127. ISSN : 0167-9317. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.mee.2006.01.026> (cf. p. 112).
- [129] Chang QI, Feng JIANG et Shu YANG. « Advanced honeycomb designs for improving mechanical properties : A review ». In : *Composites Part B : Engineering* 227 (2021), p. 109393. ISSN : 1359-8368. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109393> (cf. p. 113).

- [130] Zhiqiang ZHANG et al. « Improving the adhesion of hydrogen silsesquioxane (HSQ) onto various substrates for electron-beam lithography by surface chemical modification ». In : *Microelectronic Engineering* 128 (2014), p. 59-65. ISSN : 0167-9317. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.mee.2014.05.027> (cf. p. 114).
- [131] D.S. MACINTYRE et al. « High resolution e-beam lithography using a thin titanium layer to promote resist adhesion ». In : *Microelectronic Engineering* 83.4 (2006). Micro- and Nano-Engineering MNE 2005, p. 1128-1131. ISSN : 0167-9317. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.mee.2006.01.103> (cf. p. 114).
- [132] S.J. PEARTON, R. J. SHUL et Fan REN. « A Review of Dry Etching of GaN and Related Materials ». In : *Materials Research Society Internet Journal of Nitride Semiconductor Research* 5.1 (2000), e11. DOI : 10.1557/S1092578300000119 (cf. p. 116).
- [133] Erica A. DOUGLAS et al. « Inductively coupled BCl<sub>3</sub>/Cl<sub>2</sub>/Ar plasma etching of Al-rich AlGa<sub>N</sub> ». In : *Journal of Vacuum Science & Technology A : Vacuum, Surfaces, and Films* 35.2 (mars 2017), p. 021305. ISSN : 0734-2101, 1520-8559. DOI : 10.1116/1.4971245 (cf. p. 116).
- [134] Yanjun HAN et al. « Nonselective and smooth etching of GaN/AlGa<sub>N</sub> heterostructures by Cl<sub>2</sub>/Ar/BCl<sub>3</sub> inductively coupled plasmas ». In : *Journal of Vacuum Science & Technology A : Vacuum, Surfaces, and Films* 22.2 (mars 2004), p. 407-412. ISSN : 0734-2101, 1520-8559. DOI : 10.1116/1.1641054 (cf. p. 116).
- [135] D. BUTTARI et al. « Origin of etch delay time in Cl<sub>2</sub> dry etching of AlGa<sub>N</sub>/GaN structures ». In : *Applied Physics Letters* 83.23 (déc. 2003), p. 4779-4781. ISSN : 0003-6951. DOI : 10.1063/1.1632035. eprint : [https://pubs.aip.org/aip/apl/article-pdf/83/23/4779/12231098/4779\\_1\\_online.pdf](https://pubs.aip.org/aip/apl/article-pdf/83/23/4779/12231098/4779_1_online.pdf) (cf. p. 116).
- [136] Shengjun ZHOU, Bin CAO et Sheng LIU. « Dry etching characteristics of GaN using Cl<sub>2</sub>/BCl<sub>3</sub> inductively coupled plasmas ». In : *Applied Surface Science* 257.3 (2010), p. 905-910. ISSN : 0169-4332. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.07.088> (cf. p. 116).
- [137] R.S QHALID FAREED et al. « Structural studies on MOCVD grown GaN and AlGa<sub>N</sub> using atomic force microscopy ». In : *Materials Chemistry and Physics* 64.3 (2000), p. 260-264. ISSN : 0254-0584. DOI : [https://doi.org/10.1016/S0254-0584\(99\)00234-5](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(99)00234-5) (cf. p. 118).
- [138] Kai FU et al. « The impact of interfacial Si contamination on GaN-on-GaN regrowth for high power vertical devices ». In : *Applied Physics Letters* 118.22 (juin 2021), p. 222104. ISSN : 0003-6951. DOI : 10.1063/5.0049473 (cf. p. 122).
- [139] Jumpei TAJIMA et al. « Improvement of electrical characteristics in regrown AlGa<sub>N</sub>/GaN MOSFETs by suppression of the residual interface charge ». In : *Journal of Crystal Growth* 509 (mars 2019), p. 129-132. ISSN : 00220248. DOI : 10.1016/j.jcrysgro.2018.10.051 (cf. p. 122).

- [140] Nadia EL BONDY. « Epitaxie d'hétérostructures innovantes pour la montée en fréquence des HEMTs à base de GaN ». Thèses. Université Côte d'Azur, déc. 2020 (cf. p. 122).
- [141] M. DIALE et al. « Analysis of GaN cleaning procedures ». In : *Applied Surface Science* 246.1 (juin 2005), p. 279-289. ISSN : 01694332. DOI : 10.1016/j.apsusc.2004.11.024 (cf. p. 122).
- [142] Nedal AL TARADEH et al. « Characterization of m-GaN and a-GaN Crystallographic Planes after Being Chemically Etched in TMAH Solution ». In : *Energies* 14.14 (14 juill. 2021), p. 4241. ISSN : 1996-1073. DOI : 10.3390/en14144241 (cf. p. 122, 167).
- [143] Ki-Sik IM et al. « Lateral GaN nanowire prepared by using two-step TMAH wet etching and HfO<sub>2</sub> sidewall spacer ». In : *Journal of Crystal Growth* 441 (mai 2016), p. 41-45. ISSN : 00220248. DOI : 10.1016/j.jcrysgro.2016.01.038 (cf. p. 122).
- [144] Junlei HE et al. « Recovery of p-GaN surface damage induced by dry etching for the formation of p-type Ohmic contact ». In : *Applied Physics Express* 12.5 (1<sup>er</sup> mai 2019), p. 055507. ISSN : 1882-0778, 1882-0786. DOI : 10.7567/1882-0786/ab13d7 (cf. p. 122).
- [145] Julia WINNERL et al. « Selectively grown GaN nanowalls and nanogrids for photocatalysis : growth and optical properties ». In : *Nanoscale* 11 (10 2019), p. 4578-4584. DOI : 10.1039/C8NR09094G (cf. p. 125, 127).
- [146] Syed M. N. HASAN et al. « Selective Area Epitaxy of GaN Nanostructures : MBE Growth and Morphological Analysis ». In : *Crystal Growth & Design* 23.6 (7 juin 2023), p. 4098-4104. ISSN : 1528-7483, 1528-7505. DOI : 10.1021/acs.cgd.2c01506 (cf. p. 127).
- [147] Sonachand ADHIKARI et al. « Selective Area Growth of GaN Nanowire : Partial Pressures and Temperature as the Key Growth Parameters ». In : *Crystal Growth & Design* 22.9 (7 sept. 2022), p. 5345-5353. ISSN : 1528-7483, 1528-7505. DOI : 10.1021/acs.cgd.2c00453 (cf. p. 127).
- [148] Bruno DAUDIN et al. « The role of surface diffusion in the growth mechanism of III-nitride nanowires and nanotubes ». In : *Nanotechnology* 32.8 (19 fév. 2021), p. 085606. ISSN : 0957-4484, 1361-6528. DOI : 10.1088/1361-6528/abc780 (cf. p. 127).
- [149] Marion GRUART, Gwénolé JACOPIN et Bruno DAUDIN. « Role of Ga Surface Diffusion in the Elongation Mechanism and Optical Properties of Catalyst-Free GaN Nanowires Grown by Molecular Beam Epitaxy ». In : *Nano Letters* 19.7 (10 juill. 2019), p. 4250-4256. ISSN : 1530-6984, 1530-6992. DOI : 10.1021/acs.nanolett.9b00023 (cf. p. 127, 136).
- [150] A. BENGOCHEA-ENCABO et al. « Understanding the selective area growth of GaN nanocolumns by MBE using Ti nanomasks ». In : *Journal of Crystal Growth* 325.1 (juin 2011), p. 89-92. ISSN : 00220248. DOI : 10.1016/j.jcrysgro.2011.04.035 (cf. p. 127).

- [151] T SCHUMANN et al. « Selective-area catalyst-free MBE growth of GaN nanowires using a patterned oxide layer ». In : *Nanotechnology* 22.9 (4 mars 2011), p. 095603. ISSN : 0957-4484, 1361-6528. DOI : 10.1088/0957-4484/22/9/095603 (cf. p. 127).
- [152] Y. CORDIER et al. « Selective area growth of GaN-based structures by molecular beam epitaxy on micrometer and nanometer size patterns ». In : *Materials Science in Semiconductor Processing* 12.1 (2009). 7th International Workshop on Epitaxial Semiconductors on Patterned Substrates and Novel Index Surfaces (ESPS-NIS), p. 16-20. ISSN : 1369-8001. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2009.07.003> (cf. p. 136).
- [153] Fabian SCHUSTER et al. « Position-Controlled Growth of GaN Nanowires and Nanotubes on Diamond by Molecular Beam Epitaxy ». In : *Nano Letters* 15.3 (11 mars 2015), p. 1773-1779. ISSN : 1530-6984, 1530-6992. DOI : 10.1021/nl504446r (cf. p. 136).
- [154] Giuseppe GRECO, Ferdinando IUCOLANO et Fabrizio ROCCAFORTE. « Ohmic contacts to Gallium Nitride materials ». In : *Applied Surface Science* 383 (oct. 2016), p. 324-345. ISSN : 01694332. DOI : 10.1016/j.apsusc.2016.04.016 (cf. p. 148).
- [155] Wojciech MACHERZYŃSKI et al. « Microanalysis of the Ti/Al and Ti/Al/Mo/Au ohmic contacts metallization to AlGaIn/GaN heterostructures : Ti/Al and Ti/Al/Mo/Au ohmic contacts metallization ». In : *physica status solidi (a)* 213.5 (mai 2016), p. 1145-1149. ISSN : 18626300. DOI : 10.1002/pssa.201532684 (cf. p. 148).
- [156] Minmin HOU et Debbie G. SENESKY. « Operation of ohmic Ti/Al/Pt/Au multilayer contacts to GaN at 600 °C in air ». In : *Applied Physics Letters* 105.8 (25 août 2014), p. 081905. ISSN : 0003-6951, 1077-3118. DOI : 10.1063/1.4894290 (cf. p. 148).
- [157] Mudassar MEER et al. « Interface dynamics in ohmic contact optimization on AlGaIn/GaN heterostructure by the formation of TiN ». In : *Microelectronic Engineering* 219 (jan. 2020), p. 111144. ISSN : 01679317. DOI : 10.1016/j.mee.2019.111144 (cf. p. 148).
- [158] Sandeep DHAKAD et al. « Optimization of ohmic contacts on thick and thin AlGaIn/GaN HEMTs structures ». In : *Superlattices and Microstructures* 111 (nov. 2017), p. 922-926. ISSN : 07496036. DOI : 10.1016/j.spmi.2017.03.060 (cf. p. 148).
- [159] K. SHINOHARA et al. « Self-aligned-gate GaN-HEMTs with heavily-doped n<sup>+</sup>-GaN ohmic contacts to 2DEG ». In : *2012 International Electron Devices Meeting*. 2012, p. 27.2.1-27.2.4. DOI : 10.1109/IEDM.2012.6479113 (cf. p. 148).
- [160] Tansel KARABACAK et Toh-Ming LU. « Enhanced step coverage by oblique angle physical vapor deposition ». In : *Journal of Applied Physics* 97.12 (15 juin 2005), p. 124504. ISSN : 0021-8979, 1089-7550. DOI : 10.1063/1.1937476 (cf. p. 151).
- [161] Ngo THI HUONG et al. « Selective GaN sublimation and local area regrowth for co-integration of enhancement mode and depletion mode Al(Ga)N/GaN high electron mobility transistors ». In : *Semiconductor Science and Technology* 36.2 (1<sup>er</sup> fév. 2021), p. 024001. ISSN : 0268-1242, 1361-6641. DOI : 10.1088/1361-6641/abcdb3 (cf. p. 165).

- [162] Luca NELA et al. « A perspective on multi-channel technology for the next-generation of GaN power devices ». In : *Applied Physics Letters* 120.19 (9 mai 2022), p. 190501. ISSN : 0003-6951, 1077-3118. DOI : 10.1063/5.0086978 (cf. p. 170).
- [163] Christian CAMEL. « Nouvelles fonctions interrupteurs intégrées pour la conversion d'énergie ». Thèse de doct. Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2007 (cf. p. 172).
- [164] Zahraa ZAIDAN et al. « Toward an Innovative Monolithic Integration of Vertical and Lateral GaN Devices ». In : *Conférence Euro-méditerranéenne Matériaux, Composants et Systèmes EMCM-DS. 2022* (cf. p. 172).

# PUBLICATIONS

- Daniel Rouly, Patrick Austin, Josiane Tasselli Frédéric Morancho Karine Isoird, J, Brault and Y Cordier. "Normally-Off AlGaN/GaN HEMTs based on selective area regrowth of a P-GaN gate in nanostructured patterns." . **In EMRS-2022 Fall Meeting European Materials Research Society 2022.**
- Daniel Rouly, Josiane Tasselli, Patrick Austin, Chaymaa Haloui, Karine, Isoird, and Frédéric Morancho. "Design Optimization of a New Nanostructured P-GaN Gate for Normally-off GaN HEMTs." . **In 29th International Conference on Mixed Design of Integrated Circuits and Systems (MIXDES 2022).**
- Daniel Rouly, Josiane Tasselli, Patrick Austin, Karine Isoird, Frédéric Morancho, and Yvon Cordier. "Conception et réalisation technologique de structures HEMTs AlGaN/GaN normally-off a grille P-GaN." **In EP 2022 : Journées des Electroniques de Puissance (2022).**
- Daniel Rouly, Josiane Tasselli, Patrick Austin, Karine Isoird, and Frédéric Morancho. "Design and Fabrication of AlGaN/GaN normally-off HEMTs." **In 10th IRP NextPV International workshop (2023).**
- Daniel Rouly, "Développement d'une nouvelle technologie de HEMTs AlGaN/GaN normally-off à multipuits P-GaN sur la grille" présenté à **conférence on Green Energy and Environmental technology (GEET 2023)**
- Daniel Rouly, Josiane Tasselli, Patrick Austin, Yvon Cordier, Aimeric Courville, Francois Vaurette, Aurélie Lecestre, Benjamin Reig, Karine Isoird, and Frédéric Morancho. "Epi-taxie localisée de P-GaN par EJM pour la fabrication de HEMTs AlGaN/GaN normally-off." **In Symposium de génie électrique SGE 2023 (2023).**





# RÉSUMÉ

La gestion de l'énergie constitue l'un des plus importants défis que notre société va devoir relever au cours du XXI<sup>e</sup> siècle. Dans ce contexte, il est indispensable de concevoir de nouveaux **interrupteurs de puissance à semi-conducteurs** afin d'assurer une meilleure gestion de l'énergie électrique. Les **matériaux à large bande interdite** tels que le **GaN** sont les candidats adéquats pour répondre à ce nouveau défi. L'inconvénient actuel et majeur des transistors à haute mobilité (**High Electron Mobility Transistor - HEMT -**) en **Nitride de Gallium (GaN)** conventionnels est que leur blocage se fait à des tensions négatives ; c'est ce que l'on appelle un composant normally-on (« normalement fermé »). Or, la plupart des applications de puissance requièrent l'utilisation d'interrupteurs normally-off (« normalement ouverts »). Plusieurs architectures de HEMT en **GaN** normally-off ont été proposées dans la littérature (« recess gate » partiel ou total, grille P-GaN, cascode associant un HEMT en **GaN** et un transistor MOS en Si, etc...) mais chacune de ces solutions présente des inconvénients aussi bien technologiques qu'en termes de performances.

Nos travaux se proposent d'explorer une nouvelle voie pour obtenir des interrupteurs HEMT AlGaN/GaN normally-off. L'idée générale repose sur le principe de fonctionnement d'un JFET dans lequel la largeur de la région de conduction N serait tellement étroite que les **Zones de Charge d'Espace (ZCE)** de déplétion des jonctions PN se rejoignent naturellement de manière à assurer la déplétion totale de la zone de type N. Le développement des zones de charge d'espace à l'équilibre thermodynamique étant faible, la conception des grilles doit obligatoirement passer par une nano-structuration. La grille du HEMT développée est donc constituée d'une succession de caissons ou "puits" GaN de type P dont la profondeur doit traverser le canal **2DEG** et l'espacement entre deux puits permettre le recouvrement naturel des zones de charge d'espace.

Après avoir dressé un état de l'art des structures **HEMT AlGaN/GaN normally-off**, nous avons dans un premier temps effectué des **simulations** physiques à éléments finis à l'aide de **SENTAURUS TCAD**, en **2D** et **3D**, afin de définir la meilleure structure de grille permettant d'obtenir la fonctionnalité normally-off désirée. Nous avons ainsi optimisé les paramètres

géométriques et technologiques des caissons P-GaN (profondeur, largeur, espacement et dopage P du GaN) ainsi que le taux d'aluminium de la couche d'AlGa<sub>N</sub>. A partir des résultats obtenus, nous avons simulé la structure HEMT dans sa globalité et nous avons ainsi pu valider ce nouveau concept. Nous avons ensuite développé et optimisé les différentes étapes technologiques critiques permettant d'obtenir la **nano-structuration** de la grille à savoir : la lithographie électronique de la résine HSQ afin de réaliser des caissons P-GaN à des dimensions nanométriques, la gravure plasma des puits et leur remplissage avec du GaN dopé Magnésium par **épitaxie localisée par jets moléculaires**. Nous décrivons par la suite le procédé de fabrication complet du HEMT à grille P-GaN nano-structurée. Nous présentons enfin les différentes **caractérisations physiques et électriques** de la structure HEMT ainsi réalisée.

# ABSTRACT

Energy management is one of the biggest challenges facing our society in the 21st century. In this context, it is essential to design new semiconductor power switches to ensure better management of electrical energy. **Wide bandgap materials** such as **GaN** are ideal candidates for meeting this new challenge. The current major disadvantage of conventional Gallium Nitride (GaN) **High Electron Mobility Transistors (HEMTs)** is that they are blocked at negative voltages (normally-on device). However, most power applications require the use of **normally-off** switches. Several normally-off GaN HEMT architectures have been proposed in the literature (partial or total recess gate, P-GaN gate, cascode combining a GaN HEMT and a Si MOS transistor, etc.), but each of these solutions has drawbacks in terms of both technology and performance.

The aim of our work is to explore a new way of obtaining **normally-off AlGaN/GaN HEMT switches**. The general idea is based on the operating principle of a JFET in which the width of the N conduction region is so narrow that the depletion **Space Charge Regions (SCRs)** of the PN junctions naturally come together to ensure total depletion of the N-type region. Since the development of space charge regions at thermodynamic equilibrium is low, the design of grids must necessarily involve **nano-structuring**. The HEMT gate developed therefore consists of a succession of P-type GaN 'wells' whose depth must cross the 2DEG channel and the spacing between two wells must allow the space charge zones to overlap naturally.

After reviewing the state of the art in AlGaN normally-off HEMT structures, we first carried out physical finite-element **simulations** using **SENTAURUS TCAD**, in **2D** and **3D**, to define the best gate structure for achieving the desired normally-off functionality. We optimised the geometric and technological parameters of the P-GaN wells (depth, width, spacing and P-doping of the GaN) as well as the aluminium content of the AlGaN layer. Based on the results obtained, we simulated the entire HEMT structure, enabling us to validate this new concept. We then developed and optimised the various critical technological steps required to achieve the **nano-structuring** of the gate, namely : electron lithography of the HSQ resin to produce P-GaN wells with nanometric dimensions, **plasma etching** of the wells and filling them with GaN

doped with magnesium by localised molecular beam epitaxy. We then describe the complete manufacturing process for the nano-structured P-GaN HEMT. Finally, we present the various **physical and electrical characterisations** of the resulting HEMT structure.

**Titre :** Conception et réalisation d'interrupteurs de puissance avancés HEMTs AlGaIn/GaN normally-off

**Mots clés :** TCAD, Micro-électronique, GaN/AlGaIn, HEMT, Composant de puissance, Technologie

**Résumé :** La gestion de l'énergie constitue l'un des plus importants défis que notre société va devoir relever au cours du XXI<sup>e</sup> siècle. Dans ce contexte, il est indispensable de concevoir de nouveaux interrupteurs de puissance à semi-conducteurs afin d'assurer une meilleure gestion de l'énergie électrique. Les matériaux à large bande interdite tels que le GaN sont les candidats adéquats pour répondre à ce nouveau défi.

L'inconvénient actuel et majeur des transistors à haute mobilité (High Electron Mobility Transistor — HEMT —) en Nitrure de Gallium (GaN) conventionnels est que leur blocage se fait à des tensions négatives ; c'est ce que l'on appelle un composant normally-on (« normalement fermé »). Or, la plupart des applications de puissance requièrent l'utilisation d'interrupteurs normally-off (« normalement ouverts »). Plusieurs architectures de HEMT en GaN normally-off ont été proposées dans la littérature (« recess gate » partiel ou total, grille P-GaN, cascade associant un HEMT en GaN et un transistor MOS en Si, etc...) mais chacune de ces solutions présente des inconvénients aussi bien technologiques qu'en termes de performances.

Nos travaux se proposent d'explorer une nouvelle voie pour obtenir des interrupteurs HEMT AlGaIn/GaN normally-off. L'idée générale repose sur le principe de fonctionnement d'un JFET dans lequel la largeur de la région de conduction N serait tellement étroite que les Zones de Charge d'Espace (ZCE) de déplétion des jonctions PN se rejoignent naturellement de manière à assurer la déplétion totale de la zone de type N. Le développement des zones de charge d'espace à l'équilibre thermodynamique étant faible, la conception des grilles doit obligatoirement passer par une nano-structuration.

La grille du HEMT développée est donc constituée d'une succession de caissons ou "puits" GaN de type P dont la profondeur doit traverser le canal 2DEG et l'espacement entre deux puits permettre le recouvrement naturel des zones de charge d'espace.

Après avoir dressé un état de l'art des structures HEMT AlGaIn normally-off, nous avons dans un premier temps effectué des simulations physiques à éléments finis à l'aide de SENTAURUS TCAD, en 2D et 3D, afin de définir la meilleure structure de grille permettant d'obtenir la fonctionnalité normally-off désirée. Nous avons ainsi optimisé les paramètres géométriques et technologiques des caissons P-GaN (profondeur, largeur, espacement et dopage P du GaN) ainsi que le taux d'aluminium de la couche d'AlGaIn. A partir des résultats obtenus, nous avons simulé la structure HEMT dans sa globalité et nous avons ainsi pu valider ce nouveau concept.

Nous avons ensuite développé et optimisé les différentes étapes technologiques critiques permettant d'obtenir la nano-structuration de la grille à savoir : la lithographie électronique de la résine HSQ afin de réaliser des caissons P-GaN à des dimensions nanométriques, la gravure plasma des puits et leur remplissage avec du GaN dopé Magnésium par épitaxie localisée par jets moléculaires. Nous décrivons par la suite le procédé de fabrication complet du HEMT à grille P-GaN nano-structurée. Nous présentons enfin les différentes caractérisations physiques et électriques de la structure HEMT ainsi réalisée.

**Title:** Design and fabrication of advanced normally-off AlGaIn/GaN HEMTs power switches

**Key words:** Normally Off, TCAD, microelectronics, Power Device, GaN/AlGaIn, HEMT

**Abstract:** Energy management is one of the biggest challenges facing our society in the 21st century. In this context, it is essential to design new semiconductor power switches to ensure better management of electrical energy. Wide bandgap materials such as GaN are ideal candidates for meeting this new challenge.

The current major disadvantage of conventional Gallium Nitride (GaN) High Electron Mobility Transistors (HEMTs) is that they are blocked at negative voltages (normally-on device). However, most power applications require the use of normally-off switches. Several normally-off GaN HEMT architectures have been proposed in the literature (partial or total recess gate, P-GaN gate, cascade combining a GaN HEMT and a Si MOS transistor, etc.), but each of these solutions has drawbacks in terms of both technology and performance.

The aim of our work is to explore a new way of obtaining normally-off AlGaIn/GaN HEMT switches. The general idea is based on the operating principle of a JFET in which the width of the N conduction region is so narrow that the depletion Space Charge Regions (SCRs) of the PN junctions naturally come together to ensure total depletion of the N-type region. Since the development of space charge regions at thermodynamic equilibrium is low, the design of grids must necessarily involve nano-structuring.

The HEMT gate developed therefore consists of a succession of P-type GaN 'wells' whose depth must cross the 2DEG channel and the spacing between two wells must allow the space charge zones to overlap naturally.

After reviewing the state of the art in AlGaIn normally-off HEMT structures, we first carried out physical finite-element simulations using SENTAURUS TCAD, in 2D and 3D, to define the best gate structure for achieving the desired normally-off functionality. We optimised the geometric and technological parameters of the P-GaN wells (depth, width, spacing and P-doping of the GaN) as well as the aluminium content of the AlGaIn layer. Based on the results obtained, we simulated the entire HEMT structure, enabling us to validate this new concept.

We then developed and optimised the various critical technological steps required to achieve the nano-structuring of the gate, namely: electron lithography of the HSQ resin to produce P-GaN wells with nanometric dimensions, plasma etching of the wells and filling them with GaN doped with magnesium by localised molecular beam epitaxy. We then describe the complete manufacturing process for the nano-structured P-GaN HEMT. Finally, we present the various physical and electrical characterisations of the resulting HEMT structure.