

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

و البحث العلمي وزارة التعليم العالي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université MUSTAPHA Stambouli

Mascara



جامعة مصطفى اسطمبولي

معسكر

Faculté des Sciences Exactes

Département de Physique

Laboratoire de Géomatique, Ecologie et Environnement (LGEO2E)

## THESE DE DOCTORAT EN SCIENCES

Spécialité : Physique

Intitulée

*Etude, modélisation et simulation des caractéristiques électriques des transistors à effet de champ à modulation de dopage à base des hétéro-structures de nitrures III-N*

Présentée par : M<sup>r</sup>. HEBALI Khaled

Le 14/03/2024.....

Devant le jury :

Président	Baltach Hadj	Professeur	Université de Mascara
Examineur	Khenata Rabah	Professeur	Université de Mascara
Examineur	Boudghene Stambouli Amine	Professeur	Université de l'USTO-MB
Examineur	Ghezali Mohamed	Professeur	Université de Sidi Bel-Abbès
Encadreur	Bouguenna Driss	M.C.A	Université de Mascara
Co-Encadreur	Beloufa Abbès	M.C.A	Université de Mascara

Année Universitaire : 2023-2024





# Remerciements



# Remerciements

Ce travail de thèse a été réalisé au sein du **Laboratoire de Géomatique, Ecologie et Environnement (LGEO2E)** de l'Université de Mascara. Nous remercions le Professeur **BENYOUCEF Madani** de nous avoir autorisé l'accès au laboratoire.

Je remercie chaleureusement Monsieur **BOUGUENNA Driss**, Maître de Conférences à l'Université de Mascara, pour avoir dirigé cette thèse, fait bénéficier de ses connaissances scientifiques, pour ses précieux conseils, ainsi que pour les encouragements lors de la rédaction de cette thèse.

Je remercie tout particulièrement mon Co-encadreur Monsieur **BELOUFA Abbès**, Maître de Conférences à l'Université de Mascara, pour ses conseils et suggestions avisés qui m'ont aidés à mener à bien ce travail.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à Monsieur **BALTACH Hadj**, Professeur à l'Université de Mascara, pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury.

J'adresse aussi mes remerciements à Monsieur **KHENATA Rabah**, Professeur à l'Université de Mascara, qui a accepté d'examiner ce travail, en participant au jury de cette thèse.

Mes respectueuses reconnaissances s'adressent également à Monsieur **BOUDGHENE STAMBOULI Amine**, Professeur à l'Université de USTO-MB, d'avoir accepté d'examiner mon travail de thèse.

Je remercie également Monsieur **GHEZALI Mohamed**, Professeur à l'Université de Sidi Bel Abbés d'avoir accepté de faire partie du jury de cette thèse.

Je souhaite aussi remercier tous les enseignants du Département de Physique, Faculté des Sciences Exactes, de l'Université de Mascara.

Enfin, un remerciement particulier s'adresse à ma famille, à mes amis et à tous qui me sont chères.

*Merci à tout le monde !!!*  
M. HEBALI Khaled

## ملخص:

في الوقت الحالي، تعد المواد العازلة عالية السماحية مثل  $\text{HfO}_2$  و  $\text{ZrO}_2$  عامل حاسم في أجهزة النترادات III-N التي تعمل باستطاعة ترددات ميكروويف عالية ودرجة حرارة عالية. كما يعتبر  $\text{HfO}_2$  من بين المواد العازلة عالية السماحية لكنه غير مستقر حرارياً في الأجهزة الإلكترونية. بينما أن  $\text{ZrO}_2$  هو من بين المواد العازلة ذات سماحية  $\kappa$  عالية بشكل خاص، لأنه يتميز بفجوة ممنوعة واسعة، وانقطاع واسع في نطاق التوصيل، واستقرار حراري جيد.

في هذا العمل، قمنا بدراسة تأثير المواد العازلة لتحسين أداء السكوني والديناميكي للترانزستورات MODFETs بناءً على  $\text{GaN}/\text{AlGaN}/\text{AlN}/\text{GaN}$  أو  $\text{InAlN}/\text{AlN}/\text{GaN}$ ، الأمر الذي يتطلب تحسين الخصائص المختلفة. من خلال هذه الدراسة نرغب في البحث عن نماذج تحليلية لترانزستورات MODFETs التي تولد محاكاة بالاتفاق مع تجارب البحث الحالي. كما قدمنا نماذج تحليلية للخصائص السكونية والديناميكية للترانزستورات التقليدية (MODFETs) والبوابة المعزولة (MIS-MODFETs) بناءً على البنية الغير المتجانسة  $\text{GaN}/\text{AlGaN}/\text{AlN}/\text{GaN}$ . تشير نتائجنا إلى أن استعمال المادة العازلة  $\text{ZrO}_2$  عالية السماحية والمستقرة عند درجة حرارة عالية تؤدي أداء كهربائي جيد لترانزستورات MIS-MODFETs بناءً على البنية الغير المتجانسة  $\text{InAlN}/\text{AlN}/\text{GaN}$ . كما أن هذا الأخير يعطي تركيز عالي للإلكترونات مقارنة مع البنية الغير المتجانسة  $\text{GaN}/\text{AlGaN}/\text{AlN}/\text{GaN}$  وذلك بسبب شحنة الاستقطاب التلقائي العالي للبنية الغير المتجانسة  $\text{InAlN}/\text{AlN}/\text{GaN}$ .

في الختام، تظهر الترانزستورات MIS-MODFETs  $\text{InAlN}/\text{AlN}/\text{GaN}$  أداء سكوني وديناميكي أفضل خاصة عندما تكون مغطاة بطبقة رقيقة من غطاء GaN عالي التنشيط ومادة عازلة عالية السماحية والمستقرة عند درجة حرارة عالية، حتى عندما نأخذ في الاعتبار التسخين الذاتي والتأثيرات الحرارية.

**الكلمات المفتاحية:** النترادات III-N، البنية الغير المتجانسة، سماحية عالية، ترانزستورات، MODFETs، استطاعة عالية، تردد عالي، استقرار حراري، Atlas-TCAD، Matlab.

## Résumé :

Actuellement, les matériaux isolants à forte permittivité tels que  $\text{HfO}_2$  et  $\text{ZrO}_2$  ont un facteur critique dans les dispositifs à base des nitrures III-N qui fonctionnent à haute puissance microondes et à haute température. Cependant, l'isolant  $\text{HfO}_2$  est instable thermiquement dans les dispositifs électroniques, mais l'isolant  $\text{ZrO}_2$  est particulièrement prometteur, car il présente une large bande interdite, une large discontinuité de la bande de conduction, une forte permittivité, et une bonne stabilité thermique. Dans ce travail, nous avons mené une étude de l'influence des matériaux isolants pour l'amélioration des performances statiques et dynamiques des MODFETs  $\text{GaN}/\text{AlGaN}/\text{AlN}/\text{GaN}$  ou  $\text{InAlN}/\text{AlN}/\text{GaN}$ , qui nécessite une optimisation des différents paramètres. A travers cette étude nous souhaitons à rechercher des modèles analytiques des MODFETs engendrant des simulations en accord avec les expériences pour la recherche actuelle. Des modèles analytiques des caractéristiques statiques et dynamiques des MODFETs et MIS-MODFETs  $\text{GaN}/\text{AlGaN}/\text{AlN}/\text{GaN}$  ont été présentés. Nos résultats indiquent que le matériau isolant  $\text{ZrO}_2$  à forte permittivité et stable à haute température présente de meilleures performances pour les transistors MIS-MODFETs  $\text{InAlN}/\text{AlN}/\text{GaN}$ , la concentration des électrons est plus élevée que dans les transistors MIS-MODFETs  $\text{GaN}/\text{AlGaN}/\text{AlN}/\text{GaN}$ , en raison de la charge de polarisation spontanée plus élevée de l'hétérostructure  $\text{InAlN}/\text{AlN}/\text{GaN}$ .

En conclusion, les MIS-MODFETs  $\text{InAlN}/\text{AlN}/\text{GaN}$  présentent de meilleures performances statiques et dynamiques, notamment lorsqu'ils sont recouverts d'une fine couche de cap GaN fortement dopée et d'un matériau isolant à forte permittivité et stable à haute température, même lorsque les effets d'auto-échauffement et thermiques sont pris en compte.

**Mots clés :** Nitrures III-N, hétérostructure, forte permittivité, transistors, MODFETs, haute puissance, haute fréquence, stabilité thermique, Atlas-TCAD, Matlab.

## Abstract:

Recently, the high- $\kappa$  permittivity materials insulators such as  $\text{HfO}_2$  and  $\text{ZrO}_2$  have a critical factor in III-nitrides devices that are operated at high power microwave and high temperature. However,  $\text{HfO}_2$  is a thermally unstable  $\text{HfO}_2$  in electronic devices, but  $\text{ZrO}_2$  is particularly promising, due to a large band gap, a large conduction band offset, high permittivity, and a good thermal stability. In this work, we carried out to study the influence of the materials insulator for improving statics and dynamics performances of  $\text{GaN}/\text{AlGaN}/\text{AlN}/\text{GaN}$  or  $\text{InAlN}/\text{AlN}/\text{GaN}$  MODFETs, which requires optimization of the various parameters. Through this study, we wish to search for analytical models of MODFETs with high electron mobility generating simulations in agreement with experiments for current research. Analytical models for the statics and dynamics characteristics of  $\text{GaN}/\text{AlGaN}/\text{AlN}/\text{GaN}$  MODFETs and MIS-MODFETs have been presented. Our results indicate that the  $\text{ZrO}_2$  high- $\kappa$  permittivity material insulator stable at high temperature present high performance of  $\text{InAlN}/\text{AlN}/\text{GaN}$  MIS-MODFETs, due to the higher spontaneous polarization charge and conduction band-offset of  $\text{InAlN}/\text{AlN}/\text{GaN}$  heterostructure.

In conclusion,  $\text{InAlN}/\text{AlN}/\text{GaN}$  MIS-MODFETs exhibit better statics and dynamics performances, especially when covered with a thin highly-doped capping layer and high- $\kappa$  permittivity material insulator stable at high temperature, even when self-heating and thermal effects are taken into account.

**Keywords :** III-nitrides, heterostructure, high permittivity, transistors, MODFETs, high power, high frequency, thermal stability, Atlas-TCAD, Matlab.



# Table des matières



TABLE DES MATIERES

Liste des figures.....	ii
Liste des tableaux.....	vi
Introduction générale.....	2

# Chapitre I

## Propriétés physiques des nitrures III-N et leurs applications

I.1. Introduction.....	7
I.2. Propriétés des matériaux massifs de nitrures III-N	7
<i>I.2.1. Propriétés structurales des composés binaires InN, GaN et AlN</i> .....	7
a) Nitrure d'indium :InN .....	7
b) Nitrure de gallium:GaN.....	7
c) Nitrure d'aluminium : AlN .....	8
<i>I.2.2. Bande interdite (gap) et champ critique</i> .....	8
<i>I.2.3. Densité de porteurs des charges intrinsèques</i> .....	10
<i>I.2.4. Mobilité et vitesse des porteurs</i> .....	11
<i>I.2.5. Conductivité thermique</i> .....	12
I.3. Propriétés des composés ternaires $Al_xGa_{1-x}N$ et $In_xAl_{1-x}N$ .....	13
<i>I.3.1. Variation de paramètre de maille en fonction de composition d'alliage x</i> .....	13
<i>I.3.2. Variation du gap en fonction de composition d'alliage x</i> .....	14
<i>I.3.3. Variation de la mobilité des électrons en fonction de composition d'alliage x</i> .....	16
<i>I.3.4. Vitesse de saturation en fonction de la composition d'alliage x</i> .....	17
<i>I.3.5. Variation de la permittivité en fonction de la composition d'alliage x</i> .....	18
I.4. Dopage et polarités des nitrures .....	18
<i>I.4.1. Choix des dopants</i> .....	18
<i>I.4.2. Polarités de faces gallium et azote croissantes</i> .....	19
I.5. Propriétés des hétérostructures $Al_xGa_{1-x}N/GaN$ et $In_xAl_{1-x}N/GaN$ .....	20

## TABLE DES MATIERES

---

---

<i>I.5.1. Formation d'un gaz d'électrons bidimensionnel 2DEG</i> .....	20
<i>I.5.2. Polarisation spontanée et piézoélectrique dans les nitrures</i> ...	21
a) <i>Polarisation spontanée</i> .....	21
b) <i>Polarisation piézoélectrique</i> .....	21
<i>I.5.3. Hétérostructure de type <math>Al_xGa_{1-x}N/GaN</math> et <math>In_xAl_{1-x}N/GaN</math></i> ..	23
<b>I.6. Propriétés des couches épitaxiées</b> .....	23
<b>I.6.1. Croissance des couches épitaxiées</b> .....	23
a) <i>Epitaxie en Phase Vapeur aux Organo Métalliques (MOCVD)</i> ..	24
b) <i>Epitaxie par Jets Moléculaire (MBE)</i> .....	24
<b>I.6.2. Choix d'un substrat pour les nitrures</b> .....	25
a) <i>Silicium (Si)</i> .....	25
b) <i>Saphir (<math>Al_2O_3</math>)</i> .....	25
c) <i>Carbure de silicium (SiC)</i> .....	25
<b>I.7. Conclusion</b> .....	26
<b>Références du chapitre I</b> .....	27

# Chapitre II

Généralités sur les différents transistors à effet de champ à base de matériaux semi-conducteurs à faible et à grand gap.

<b>II.1. Introduction</b> .....	32
<b>II.2. Comparaison entre les matériaux à faible et à grand gap</b> .....	32
<b>II.3. Transistors à effet de champ à base de matériaux à faible gap</b> .....	32
<b>II.3.1. Historique des transistors</b> .....	32
<b>II.3.2. Principe de fonctionnement des transistors FETs</b> .....	33
<b>II.3.3. Réseau de caractéristiques des transistors FETs</b> .....	33
a) <i>Régime ohmique</i> .....	33
b) <i>Régime saturé</i> .....	33
<b>II.3.4. Transistors JFETs à base de Ge</b> .....	34
<b>II.3.5. Transistors MOSFETs à base de Si</b> .....	35
<b>II.3.6. Transistors MESFETs à base de GaAs</b> .....	35
<b>II.3.7. Transistors HFETs à base de l'hétérostructure AlGaAs/GaAs</b> .....	36

## TABLE DES MATIERES

---

---

II.4. Transistors à effet de champ à base de matériaux à grand gap.....	37
II.4.1. <i>Transistors FETs à base de ZnO</i> .....	37
II.4.2. <i>Transistors FETs à base de SiC</i> .....	38
II.4.3. <i>Transistors FETs à base de C-diamant</i> .....	38
II.4.4. <i>Transistors FETs à base de nitrure de gallium GaN</i> .....	38
II.5. Transistors à effet de champ à base de nitrure de gallium (GaN).....	38
II.5.1. <i>Transistors à hétérojonction (HFETs)</i> .....	38
II.5.2. <i>Transistors à haute mobilité électronique (HEMTs)</i> .....	39
II.5.3. <i>Transistors à haute mobilité électronique à grille isolée (MOS-HEMTs)</i> .....	40
II.6. Comparaison entre les transistors FETs et bipolaires à base de GaN.....	43
II.7. Conclusion.....	44
Références du chapitre II.....	45

## Chapitre III

### Transistors à effet de champ à modulation de dopage MODFETs.

III.1. Introduction.....	50
III.2. Transistors MODFETs à base des matériaux III-V.....	50
III.3. Caractéristiques fonctionnelles et structurelles des transistors MODFETs AlGaIn/GaN et InAlN/GaN.....	52
III.4. Etude de la structure particulière des transistors MODFETs.....	54
III.4.1. <i>Structure physique des transistors MODFETs</i> .....	54
III.4.2. <i>Représentation électrique des transistors MODFETs</i> ...	55
III.4.3. <i>Caractéristiques électriques des transistors MODFETs</i> ...	56
a) <i>Eléments intrinsèques</i> .....	57
b) <i>Eléments extrinsèques</i> .....	58

## TABLE DES MATIERES

---

---

III.5. Effets limitatifs des performances des transistors MODFETs.....	58
<i>III.5.1. Effet d’effondrement du courant «current collapse».....</i>	58
<i>III.5.2. Origine des pièges et leurs conséquences sur les performances des transistors MODFETs.....</i>	59
a) Pièges responsables du «drain-lag» .....	60
b) Pièges responsables du «gate-lag» .....	60
c) Courants de fuite.....	61
<i>III.5.3. Tension de claquage.....</i>	61
<i>III.5.4. Effet thermique.....</i>	62
III.6. Mécanismes de dégradation .....	62
<i>III.6.1. Dégradations liées aux pièges de surface.....</i>	63
<i>III.6.2. Dégradations liées aux états d’interfaces.....</i>	63
<i>III.6.3. Dégradations liées aux pièges dans la couche tampon GaN.....</i>	64
III.7. Etat de l’art-Performances actuelles .....	65
III.8. Conclusion.....	65
Références du chapitre III.....	66

## Chapitre IV

Modélisation physique des propriétés électriques des transistors à modulation de dopage à base des hétérostructures de nitrures III-N.

IV.1. Introduction.....	71
IV.2. Présentation des transistors MIS-MODFETs à base de l’hétérostructure de type GaN/AlGaN/AlN/GaN et InAlN/AlN/GaN .....	71
<i>IV.2.1. Structures étudiées.....</i>	71
<i>IV.2.2. Diagramme énergétique de la bande de conduction.....</i>	72

## TABLE DES MATIERES

---

---

<b>IV.3. Modèles analytiques des propriétés électriques des MIS-MODFETs</b> .....	75
<b>IV.3.1. Modèle de la tension de seuil</b> .....	75
<b>IV.3.2. Modèle de la densité de charges d'un 2DEG</b> .....	80
<b>IV.3.3. Modèles des caractéristiques statiques (DC)</b> .....	83
a) <i>Modèle de courant de fuite</i> .....	83
b) <i>Modèle des caractéristiques courant-tension</i> .....	84
c) <i>Modèle de la transconductance <math>g_m</math></i> .....	85
d) <i>Modèle de la charge totale de grille <math>Q_g</math></i> .....	86
e) <i>Modèle des capacités grille-source <math>C_{gs}</math> et grille-drain <math>C_{gd}</math></i> .....	86
<b>IV.3.4. Modèles des caractéristiques dynamiques (AC)</b> .....	87
a) <i>Modèle de la fréquence de coupure <math>f_T</math></i> .....	87
b) <i>Modèle de la fréquence d'oscillation maximale <math>f_{max}</math></i> .....	88
<b>IV.4. Conclusion</b> .....	88
<b>Références du chapitre IV</b> .....	89

# Chapitre **V**

## Simulation et interprétation des résultats

<b>V.1. Introduction</b> .....	93
<b>V.2. Simulation des transistors MIS-MODFETs par Atlas-TCAD</b> .....	93
<b>V.3. Différents étapes de simulation</b> .....	94
<b>V.3.1. Présentation du logiciel de simulation par Atlas-TCAD</b> .....	94
<b>V.3.2. Logique de programmation</b> .....	95
a) <i>Spécification de la structure étudiée</i> .....	96
b) <i>Spécification des modèles des couches</i> .....	98
c) <i>Sélection de la méthode numérique</i> .....	98

## TABLE DES MATIERES

---

---

<i>d) Spécification des solutions.....</i>	99
<i>V.3.3. Equations de base de semiconducteurs en Atlas-TCAD.....</i>	99
<i>V.3.4. Organigramme du programme de simulation par Atlas-TCAD.....</i>	101
<b>V.4. Organigramme de simulation décrit en langage Matlab .....</b>	101
<b>V.5. Permittivité des matériaux isolants utilisés.....</b>	103
<i>V.5.1. Oxyde d'hafnium (HfO<sub>2</sub>).....</i>	104
<i>V.5.2. Oxyde de zirconium (ZrO<sub>2</sub>).....</i>	104
<b>V.6. Influence des matériaux isolants sur les caractéristiques statiques (DC) et dynamiques (AC) des transistors MIS-MODFETs à base de GaN.....</b>	104
<i>V.6.1. Caractéristiques statiques (DC).....</i>	105
<i>a) Caractéristiques du courant de fuite .....</i>	105
<i>b) Caractéristiques de sortie <math>I_{ds}(V_{ds})</math> .....</i>	107
<i>c) Caractéristiques de transfert <math>I_{ds}(V_{gs})</math> et la transconductance <math>g_m</math>.....</i>	110
<i>d) Caractéristiques des capacités grille-source <math>C_{gs}</math> et grille-drain <math>C_{gd}</math>.....</i>	113
<i>V.6.2. Caractéristiques dynamiques (AC).....</i>	115
<b>V.7. Conclusion.....</b>	119
<b>Références du chapitre V.....</b>	121
<b>Conclusion générale .....</b>	125
<b>Liste des publications et communications.....</b>	130



# Liste des figures



## Liste des figures

Figure I-1 :	<i>Structures cristallines de GaN würtzite et zinc blende .....</i>	8
Figure I-2 :	<i>Différents diagrammes de bandes d'énergie.....</i>	9
Figure I-3 :	<i>(a) Bande interdite et paramètre de maille des nitrures d'éléments III. Les substrats utilisés dans la fabrication des composants à base de GaN sont également présentés, (b) Extrait du tableau périodique des éléments II-VI, IV et III-V.....</i>	9
Figure I-4 :	<i>Variation de la vitesse de dérive en fonction du champ électrique pour différents matériaux.....</i>	12
Figure I-5 :	<i>Domaines d'application des semiconducteurs à grand gap.....</i>	12
Figure I-6 :	<i>Performances du matériau GaN par rapport à ses propriétés.....</i>	13
Figure I-7 :	<i>Evolution du paramètre de maille en fonction de la composition d'alliage (x) des composés ternaires <math>Al_xGa_{1-x}N</math> et <math>In_xAl_{1-x}N</math>. (a) a et (b) c .....</i>	14
Figure I-8 :	<i>Variation du gap dans <math>Al_xGa_{1-x}N</math> et <math>In_xAl_{1-x}N</math> en fonction de la composition(x) .....</i>	15
Figure I-9 :	<i>Energie de bande interdite en fonction du paramètre de maille des matériaux III-N.....</i>	15
Figure I-10 :	<i>Mobilité des électrons dans <math>Al_xGa_{1-x}N</math> en fonction de x .....</i>	16
Figure I-11 :	<i>Vitesse de saturation des électrons dans <math>Al_xGa_{1-x}N</math>, en fonction de la fraction molaire x .....</i>	18
Figure I-12 :	<i>Position des dopants dans le réseau cristallin du GaN, (a) Mg accepteur, (b) Si donneur.....</i>	19
Figure I-13 :	<i>Polarisation des couches de GaN hexagonales, (a) polarité gallium, (b) polarité azote.....</i>	19
Figure I-14 :	<i>Hétérostructure AlGaN/AlN/GaN.....</i>	20
Figure I-15 :	<i>Polarisation spontanée et piézoélectrique.....</i>	22
Figure I-16 :	<i>Direction et sens des polarisations spontanées et piézoélectriques dans une hétérostructure InAlN/GaN en compression et en tension sur le GaN face-Ga et face-N.....</i>	22
Figure II-1 :	<i>Premier transistor fabriqué à base de germanium à deux contacts d'or.....</i>	33
Figure II-2 :	<i>Réseau caractéristique d'un transistor à effet de champ.....</i>	34
Figure II-3 :	<i>Schéma de principe des transistors à effet de champ à jonction pn JFETs.....</i>	34
Figure II-4 :	<i>Structure des transistors MOSFETs .....</i>	35
Figure II-5 :	<i>Schéma de principe des transistors MESFETs à base de GaAs.....</i>	36
Figure II-6 :	<i>Structure des transistors HFETs à base de l'hétérostructure AlGaAs/GaAs.....</i>	37
Figure II-7 :	<i>Structure des transistors FETs à base de ZnO.....</i>	38
Figure II-8 :	<i>Schématique des transistors HEMTs à base de l'hétérostructure <math>Al_xGa_{1-x}N(In_xAl_{1-x}N)/GaN</math> identifiant les zones critiques qui peuvent</i>	39

## Liste des figures

	<i>subir des dégradations.....</i>	
Figure II-9 :	<i>Structure physique des transistors MOS-HEMTs à base de l'hétérostructure <math>Al_xGa_{1-x}N/AlN/GaN</math> étudiée.....</i>	41
Figure III-1 :	<i>Schéma d'une structure de bande d'une hétérojonction <math>AlGaAs/GaAs</math>, (a)avant et (b) après contact.....</i>	51
Figure III-2 :	<i>Niveaux d'énergie des matériaux mis en jeu dans l'hétérojonction.....</i>	53
Figure III-3 :	<i>diagramme de la bande de conduction de l'hétérojonction <math>Al_xGa_{1-x}N/GaN</math> à l'équilibre thermodynamique pour une tension appliquée nulle.....</i>	53
Figure III-4 :	<i>Structure schématique des transistors MODFETs <math>Al_xGa_{1-x}N/GaN</math> sur substrat saphir.....</i>	54
Figure III-5 :	<i>Localisation des éléments du circuit équivalent des transistors MESFETs, applicable aux transistors MODFETs.....</i>	55
Figure III-6 :	<i>Modèle non-linéaire équivalent des transistors à effet de champ intégrant les effets thermiques et les effets de pièges.....</i>	55
Figure III-7 :	<i>Coupe d'un composant mettant en évidence les traitements de surface tels que la passivation et la plaque de champ de source.....</i>	61
Figure III-8 :	<i>Coupe schématique des transistors MODFETs <math>Al_xGa_{1-x}N/GaN</math> identifiant les zones critiques qui peuvent subir des dégradations.....</i>	62
Figure III-9 :	<i>Différentes zones des courants de fuite dans la structure des transistors MODFETs <math>Al_xGa_{1-x}N/GaN</math>.....</i>	64
Figure IV-1 :	<i>Coupe des transistors à base de l'hétérostructure <math>GaN/AlGaN/AlN/GaN</math>, avec <math>d_{ox}</math>, <math>d_{GaN}</math>, <math>d_{AlGaN}</math>, et <math>d_{AlN}</math> sont respectivement les épaisseurs des couches : isolant, superficielle (cap layer), barrière <math>AlGaN</math> dopé n et espaceur <math>AlN</math> non dopé. (a) MODFETs et (b) MIS-MODFETs.....</i>	72
Figure IV-2 :	<i>Coupe des transistors à base de l'hétérostructure <math>InAlN/AlN/GaN</math>, avec <math>d_{ox}</math>, <math>d_{InAlN}</math>, et <math>d_{AlN}</math> sont respectivement l'épaisseur de la couche oxyde, l'épaisseur de la couche barrière <math>InAlN</math> dopé n et l'épaisseur de la couche espaceur <math>AlN</math> non dopé. (a) MODFETs et (b) MIS-MODFETs.....</i>	72
Figure IV-3 :	<i>Profil de la distribution de charges et diagramme énergétique de la bande de conduction de la structure des transistors MIS-MODFETs à base de l'hétérostructure <math>GaN/AlGaN/AlN/GaN</math>.....</i>	73
Figure IV-4 :	<i>Profil de la distribution de charges et diagramme énergétique de la bande de conduction de la structure des transistors MIS-MODFETs à base de l'hétérostructure <math>InAlN/AlN/GaN</math>.....</i>	74
Figure V-1 :	<i>Entrées et sorties du simulateur Atlas-TCAD.....</i>	94
Figure V-2 :	<i>Schéma synoptique dans la simulation par une société américaine Silvaco.....</i>	95
Figure V-3 :	<i>Ordre de groupe des commandes dans un programme Atlas-TCAD..</i>	95
Figure V-4 :	<i>Structures des transistors MIS-MODFETs à base de différents types des hétérostructures <math>GaN/AlGaN/AlN/GaN</math> et <math>InAlN/AlN/GaN</math> simulées par Atlas-TCAD pour différents types de matériaux isolants. (a) <math>HfO_2</math> et (b) <math>ZrO_2</math>.....</i>	96

## Liste des figures

Figure V-5 :	<i>Maillage de la structure des transistors MIS–MODFETs simulé par Atlas–TCAD.....</i>	96
Figure V-6 :	<i>Définition des régions des transistors MIS–MODFETs simulées par Atlas–TCAD.....</i>	97
Figure V-7 :	<i>Définition des électrodes des transistors MIS–MODFETs simulés par Atlas–TCAD.....</i>	97
Figure V-8 :	<i>Définition de dopage simulé par Atlas–TCAD.....</i>	98
Figure V-9 :	<i>Organigramme du programme de simulation par Atlas–TCAD.....</i>	101
Figure V-10 :	<i>Organigramme général du programme de simulation numérique par Matlab.....</i>	103
Figure V-11 :	<i>Résultats de simulation calibrés de caractérisation du courant de fuite des transistors MODFETs et MIS–MODFETs à base de l'hétérostructure. a) GaN/AlGaN/AlN/GaN et b) InAlN/AlN/GaN.....</i>	106
Figure V-12 :	<i>Comparaison des caractéristiques de sortie des transistors à base de différents types des hétérostructures GaN/AlGaN/AlN/GaN et InAlN/AlN/GaN.....</i>	108
Figure V-13 :	<i>Comparaison du courant de saturation maximal des trois types des transistors MODFETs et MIS–MODFETs à base de différents types des hétérostructures de nitrures. a) GaN/AlGaN/AlN/GaN et b) InAlN/AlN/GaN.....</i>	109
Figure V-14 :	<i>Caractéristiques de transfert et de la transconductance des transistors à base de différents types des hétérostructures GaN/AlGaN/AlN/GaN et InAlN/AlN/GaN.....</i>	111
Figure V-15 :	<i>Comparaison des transconductances maximales des transistors MODFETs et MIS–MODFETs à base de différents types des hétérostructures. a) GaN/AlGaN/AlN/GaN et b) InAlN/AlN/GaN.....</i>	112
Figure V-16 :	<i>Caractéristiques capacitives des transistors MODFETs et MIS–MODFETs à base de GaN/AlGaN/AlN/GaN et InAlN/AlN/GaN pour différents matériaux isolants (<math>\text{HfO}_2</math> et <math>\text{ZrO}_2</math>). (a) et (b) capacité grille–source <math>C_{gs}</math>. (c) et (d) capacité grille–drain <math>C_{gd}</math>.....</i>	114
Figure V-17 :	<i>Comparaison de la capacité grille–source des transistors MODFETs et MIS–MODFETs à base de différents types des hétérostructures. a) GaN/AlGaN/AlN/GaN et b) InAlN/AlN/GaN.....</i>	115
Figure V-18 :	<i>Fréquences de coupure et maximale d'oscillation pour les différents topologies des transistors MODFETs à base de GaN avec des matériaux isolants (<math>\text{HfO}_2</math> et <math>\text{ZrO}_2</math>) .....</i>	116
Figure V-19 :	<i>Influence de la variation des caractéristiques fréquentielles des transistors MODFETs à base de GaN avec des différents matériaux isolants (<math>\text{HfO}_2</math> et <math>\text{ZrO}_2</math>) .....</i>	117



# Liste des tableaux



---

---

## Liste des tableaux

Tableau I-1 :	<i>Principales propriétés des nitrures III-N, à température ambiante (300 K).....</i>	8
Tableau I-2 :	<i>Propriétés des différents matériaux semiconducteurs.....</i>	10
Tableau I-3 :	<i>Les valeurs des constantes a, b, c et d pour différentes valeurs de température.....</i>	17
Tableau I-4 :	<i>Les valeurs des constantes a, b et c pour différentes concentrations du dopage.....</i>	17
Tableau I-5 :	<i>Comparaison des propriétés du gaz 2D entre des deux hétérostructures AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> et InAlN/Ga<sub>N</sub> à 300 K.....</i>	23
Tableau I-6 :	<i>Principales caractéristiques des trois techniques de croissance généralement utilisées pour l'épithaxie de nitrures d'éléments III.....</i>	24
Tableau I-7 :	<i>Caractéristiques des substrats les plus utilisés pour la croissance du Ga<sub>N</sub>.....</i>	25
Tableau II-1 :	<i>Comparaison entre les constantes diélectriques des plusieurs matériaux diélectriques et leurs utilisations.....</i>	42
Tableau V-1 :	<i>Liste des valeurs des paramètres utilisés dans notre simulation.....</i>	102
Tableau V-2 :	<i>Paramètres technologiques utilisés dans les calculs de simulations calibrés des performances électriques DC et AC des transistors MODFETs et MIS-MODFETs à base de différents types des hétérostructures Ga<sub>N</sub>/AlGa<sub>N</sub>/AlN/Ga<sub>N</sub> et InAlN/AlN/Ga<sub>N</sub>.....</i>	105
Tableau V-3 :	<i>Résultats des caractéristiques DC et AC des transistors MODFETs et MIS-MODFETs à base de Ga<sub>N</sub>/AlGa<sub>N</sub>/AlN/Ga<sub>N</sub> et InAlN/AlN/Ga<sub>N</sub> pour les deux différents types des matériaux isolants.....</i>	118



# Introduction générale



# Introduction générale

Ces dernières années, la technologie des dispositifs électroniques et optoélectroniques à base de matériaux nitrures d'éléments III est devenue une partie essentielle de la vie quotidienne qui présentent des performances bien supérieures à celles des matériaux à faible gap (Ge, Si, GaAs, ...), grâce aux avancées scientifiques majeures. Le développement des dispositifs à base de nitrures a permis le développement d'une multitude d'applications essentiellement dans l'espace des télécommunications à très haut débit TV, internet, téléphonie, un nouvel enjeu technologique: les charges utiles de télécommunications flexibles, des communications aéronautiques sécurisées de la défense et du spatial nécessitant des densités de puissance élevées à des hautes fréquences.

De plus, le développement de la technologie de fabrication des transistors à effet de champ (TECs) ou FETs en anglais à base de nitrures dans les applications en microélectronique de puissance et haute fréquence au niveau industriel ont accentué aussi la demande pour ce type de matériaux. Ainsi, les transistors à modulation de dopage (MODFETs) à base de nitrure de gallium (GaN) démarrent une seconde révolution pour confirmer le grand potentiel pour cette filière.

Au cours de deux dernières décennies, l'hétérostructure AlGaN/GaN a permis d'atteindre des performances électriques remarquables et une certaine maturité technologique, passant de la recherche à la production. Elle est maintenant adaptée à certaines applications commerciales tout en offrant un meilleur compromis puissance-fréquence.

En outre, la question essentielle pour le fonctionnement des transistors MODFETs fabriqués était l'isolation insuffisante du contact de grille. Pour améliorer les caractéristiques de contact Schottky de grille; une couche isolante est nécessaire pour réduire la densité des pièges des interfaces métal-isolant-semi-conducteur sont très faibles (MIS-MODFETs) sont essentiels et permet de réduire les courants de fuites de grille pour les applications spécifiques de l'amplification de haute puissance hyperfréquence.

De plus, l'utilisation de l'hétérostructure InAlN/GaN pourrait améliorer les performances des transistors à celle système AlGaN/GaN. Afin de développer le potentiel des transistors MODFETs à base de l'hétérostructure InAlN/GaN, il est important de résoudre les problèmes liés à des facteurs majeurs tels que les fuites du courant de grille élevées et l'effondrement du courant de drain limitant le courant maximal du canal et la tension de claquage qui pourraient donc atteindre et ainsi limiter les performances et la fiabilité des transistors MODFETs InAlN/GaN pour les applications haute puissance et haute fréquence.

## Introduction générale

---

---

Nous utiliserons aussi dans ce travail une couche supplémentaire fortement dopée (cap layer) dans l'hétérostructure GaN/AlGaN/AlN/GaN afin de mettre en avant la plus value de structure en termes de densité de porteurs et mobilité élevées et une faible résistance d'accès.

De plus, l'insertion d'une couche de transition binaire AlN entre la couche barrière AlGaN ou InAlN et la couche tampon GaN pour réaliser les hétérostructures AlGaN/AlN/GaN et InAlN/AlN/GaN, qui permet d'augmenter la discontinuité de la bande de conduction (large band offset). Par conséquent, d'augmenter la densité 2DEG formée à l'interface de l'hétérojonction AlN/GaN et d'améliorer la mobilité des porteurs dans le canal du transistor (la zone d'accumulation). La couche AlN permet aussi notamment d'améliorer la qualité du cristal.

Actuellement, les transistors à effet de champ à modulation de dopage à grille isolée (MIS–MODFETs) sont l'une des solutions qui suppriment les problèmes du courant de fuite. Cependant, la transconductance maximale des transistors MIS–MODFETs est faible en raison de la réduction de la capacité grille et de l'augmentation de la distance de modulation effective entre la grille et le canal et d'un décalage important de la tension de seuil. Dans l'ordre, l'utilisation d'un isolant de grille à forte permittivité pourrait résoudre ces problèmes. Sinon, divers matériaux isolants à forte permittivité tels que  $\text{HfO}_2$  et  $\text{ZrO}_2$  ont été proposés comme couche isolante de la grille dans les MODFETs qui ont été rapportés dans la littérature.

De nos jours, un matériau isolant de grille à forte permittivité thermiquement stable est un facteur critique dans les dispositifs à base de GaN tel que le  $\text{ZrO}_2$  fonctionnant à haute puissance et à haute température. En effet, le  $\text{ZrO}_2$  est un matériau isolant thermiquement stable. Néanmoins, la qualité du matériau diélectrique  $\text{HfO}_2$  thermiquement instable doit encore être améliorée. Ces dernières années, le  $\text{ZrO}_2$  a été exploré en tant que couche de matériau isolant de grille pour les transistors MIS–MODFETs à base de GaN. Il a montré d'excellentes performances des dispositifs et a également fait l'objet d'études approfondies. Le matériau de couche isolante  $\text{ZrO}_2$  est particulièrement prometteur en raison de sa bonne stabilité thermique et des excellents problèmes de fiabilité des transistors MIS–MODFETs. Ainsi également, l'insertion du  $\text{ZrO}_2$  pourrait permettre d'obtenir une fuite de courant de grille ultra faible, un excellent contrôle de grille sur le canal et pourrait également utiliser une bonne technique pour améliorer les performances des transistors MODFETs à base de GaN. Il est rapporté que  $\text{ZrO}_2$  est utilisé pour supprimer la réduction de la transconductance maximale.

De plus, le développement de la technologie de fabrication des transistors à effet de champ à base de nitrures dans les applications en microélectronique de puissance et haute fréquence au niveau industriel ont accentué aussi la demande pour ce type de matériaux. Ainsi, les transistors

## Introduction générale

---

---

MODFETs à base de nitrure de gallium (GaN) démarrent une seconde révolution pour confirmer le grand potentiel pour cette filière. Au cours de deux dernières décennies, l'hétérostructure AlGaN/GaN a permis d'atteindre des performances électriques remarquables et une certaine maturité technologique, passant de la recherche à la production. Elle est maintenant adaptée à certaines applications commerciales tout en offrant un meilleur compromis puissance–fréquence. L'objectif principal de ce travail de thèse est la modélisation et simulation des performances statiques et dynamiques des transistors MODFETs et MIS–MODFETs à base de différents types des hétérostructures GaN/AlGaN/AlN/GaN et InAlN/AlN/GaN et d'analyser influence des matériaux isolants de forte permittivité tels que HfO<sub>2</sub> et ZrO<sub>2</sub> et valider les résultats de simulation des modèles analytiques des caractéristiques statiques et dynamiques des transistors par des mesures expérimentales publiées en littératures.

En outre, la question essentielle pour le fonctionnement des transistors MODFETs fabriqués était l'isolation insuffisante du contact de grille. Pour améliorer les caractéristiques de contact Schottky de grille ; une couche isolante est nécessaire pour réduire la densité des pièges des interfaces métal–isolant–semiconducteur sont très faibles (MIS–MODFETs) sont essentiels et permet de réduire les courants de fuites de grille pour les applications spécifiques.

Les simulateurs existants sur le marché (nextnano, ISE, Synopsys, PC1D, Atlas–TCAD,...) ont le même principe de fonctionnement. Ils résolvent les équations différentielles qui gèrent le fonctionnement des hétérostructures par des méthodes numériques (éléments finis, moindre carré, Monté Carlo, etc...). Le simulateur Atlas–TCAD a été développé par la société américaine Silvaco qui permet de concevoir, modéliser et simuler les performances des dispositifs à semiconducteurs, avant la fabrication des prototypes d'essais. Il est très utile dans les projets de recherche-développement, car il optimise le temps des essais et par conséquent réduit le coût de conception et de fabrication des dispositifs électroniques.

Le travail qui fait l'objet de cette thèse est l'étude des propriétés physiques des nitrures, modélisation et simulation des transistors MODFETs à base de GaN. Une étude par simulation d'analyse de l'influence des matériaux isolants à forte permittivité sur des caractéristiques statiques et dynamiques des transistors MODFETs et MIS–MODFETs à base de différents types des hétérostructures GaN/AlGaN/AlN/GaN et InAlN/AlN/GaN, ce qui nécessite une optimisation des différents paramètres, avec l'utilisation Matlab et Atlas–TCAD basé sur la modélisation 2D.

Ce manuscrit s'articule ainsi en cinq chapitres qui permettent de présenter le contexte, la topologie de la structure MODFETs et MIS–MODFETs, les modèles analytiques utilisés, résultats de simulation obtenus et validés par les mesures expérimentales publiées dans littératures.

## Introduction générale

---

---

Le but du premier chapitre est d'introduire les propriétés physiques des matériaux III–N en vue de leur utilisation dans la fabrication des transistors MODFETs à base de GaN. Comme nous expliquerons, le choix de ces matériaux qui a été motivé par les propriétés particulières et qui les caractérisent et les promettent à des très fortes potentialités d'applications : en particulier dans les applications microondes à l'électronique ultra-rapide et de haute puissance. Dans ce chapitre nous présenterons les différentes techniques d'épitaxie, les choix des substrats utilisés pour les nitrures d'éléments III, ainsi également nous étudierons les propriétés des différents types des hétérostructures tels que : AlGaIn/GaN, AlGaIn/AlN/GaN, InAlN/GaN et InAlN/AlN/GaN pour la fabrication des transistors MODFETs.

Le second chapitre sera concerné à la présentation brièvement l'historique des transistors à effet de champ, puis on expliquera le principe de fonctionnement ainsi que leurs différents types à base de matériaux à faible et à grand gap. Après nous donnerons une description de la structure et les différentes couches des transistors MIS–MODFETs à base GaN. Ce chapitre sera clos par un état de l'art en fréquence et en densité de puissance en sortie, en vue de cerner l'évolution des investigations sur les transistors MODFETs à base de GaN. A partir des résultats des caractérisations systématiques, nous allons choisir la structure optimale pour la suite de travail.

Le troisième chapitre nous étudierons les transistors unipolaires particuliers tels que les transistors MODFETs à base de nitrures. Ainsi également, nous expliquerons les effets limitatifs des performances électriques des transistors, qui sont liées aux états de pièges dans la couche tampon, aux états d'interfaces et de surface qui sont responsables de la non-idéalité du comportement des transistors MODFETs.

Dans le chapitre quatre, nous développerons des modèles analytiques des caractéristiques statiques et dynamiques des transistors MODFETs et MIS–MODFETs à base de différents types des hétérostructures. Nous présenterons dans le cinquième chapitre les résultats de simulation des modèles analytiques et celles extraits par le simulateur Atlas–TCAD. Le dernier chapitre sera dédié à la présentation des résultats de simulation des caractéristiques électriques statiques et dynamiques des transistors MODFETs et MIS–MODFETs à base de GaN. L'analyse de l'influence des matériaux isolants à forte permittivité sur les performances électriques des transistors MIS–MODFETs à base de GaN sera effectuée. Ensuite, nous cherchons à comprendre les mécanismes physiques qui régissent les propriétés électriques du contact Schottky. Pour cela, l'étude du courant de fuite de grille en direct et en inverse sera présenté en première partie.

Enfin, nous terminerons ce manuscrit par une conclusion générale et des perspectives qui pourraient apporter un complément d'information de ce travail de thèse.



# Chapitre I

Propriétés physiques des nitrures III-N  
et leurs hétérostructures



## I.1. Introduction

Ce chapitre sera consacré à montrer les propriétés physiques des nitrures InN, GaN et AlN et leurs alliages ternaires  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  et  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$  et aussi leurs applications. L'intérêt de ces matériaux massifs réside dans leurs propriétés comme : de larges gaps, conductivités thermiques élevées (stabilité thermique), hautes mobilités électroniques, fortes champs électriques, hautes tensions de claquages, et une extrême dureté [1], pour les applications électroniques de très hautes puissances en hyperfréquences et optoélectroniques associées [2]. Ainsi également, nous allons étudier les propriétés structurales et électroniques des composés binaires des nitrures, ainsi que leurs ternaires  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  et  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ .

A la fin de ce chapitre nous présentons les différents techniques d'épitaxie, les choix d'un substrat utilisés pour les nitrures, ainsi que le dopage de ces matériaux comme les polarités de faces gallium et azote croissantes, en plus nous étudierons les propriétés des hétérostructures  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ ,  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ ,  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  et  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$  pour la fabrication des transistors à hautes mobilités électroniques.

## I.2. Propriétés des matériaux massifs de nitrures III-N

### *I.2.1. Propriétés structurales des composés binaires InN, GaN et AlN*

#### *a) Nitrure d'indium : InN*

Les chercheurs ont indiqué l'effet de la température sur la concentration des porteurs et la mobilité des électrons dans le composé binaire InN. A la température ambiante, la concentration des porteurs est de  $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  et diminue à  $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  à 150 K. La mobilité d'électrons à la température ambiante, est de  $2700 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ , et elle atteint une valeur maximale de  $5000 \text{ cm}^2/\text{V.s}$  à 150 K [3], comme illustre dans le tableau (I-1).

#### *b) Nitrure de gallium : GaN*

Le nitrure de gallium (GaN) cristallise sous deux formes différentes intéressantes pour la microélectronique, mais également pour l'optoélectronique. La première forme cristalline correspond à la structure stable würtzite [4] et l'autre forme métastable zinc blende comme l'illustre dans la figure (I-1) [5].

Nous nous intéresserons principalement à la structure würtzite qui reste la plus stable et donc la plus utilisable, elle est composée de deux sous réseaux hexagonaux imbriqués l'un dans l'autre, où chaque type d'atome est décalé suivant l'axe  $c$  de 62% de la maille élémentaire [6]. Voir le

tableau (I-1).

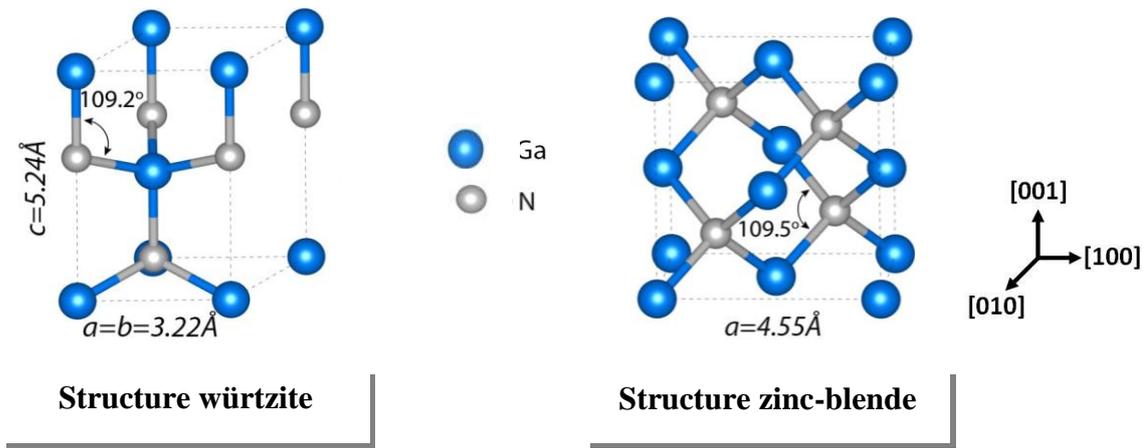


Figure I-1: Structures cristallines de GaN würtzite et zinc blend [7].

### c) Nitride d'aluminium : AlN

Le nitrure d'aluminium en phase hexagonale a un gap direct de l'ordre de 6.28 eV. AlN assure une bonne nucléation de la croissance et dans les alliages où il assure un ajustement du gap [8]. Les structures de bandes de ces matériaux, se ressemblent qualitativement, la seule différence réside dans les valeurs des gaps d'énergies directs en  $\Gamma$  et indirect est de l'ordre de 5.10 eV au minimum de point X dans la phase cubique [9]. Voir le tableau (I-1).

Tableau I-1: Principales propriétés des nitrures III-N, à température ambiante (300 K) [10].

Matériau	$E_{int}(MV/cm)$	$P_{sp}(C/m^2)$	$a(\text{Å})$	$c(\text{Å})$	$u(\text{Å})$
InN	280	-0,032	3,538	5,703	0.377
GaN	370	-0,029	3,189	5,185	0.376
AlN	1000	-0,081	3,112	4,982	0.380

### I.2.2. Bande interdite (gap) et champ critique

La figure (I-2) illustre les différentes bandes interdites des matériaux isolants, semiconducteurs et conducteurs. L'énergie de la bande interdite ( $E_g$ ) est l'écart énergétique qui sépare le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande de conduction. C'est la quantité d'énergie nécessaire pour qu'un électron traverse cette bande énergétique, lorsqu'il est soumis à une excitation. L'énergie de gap est un facteur de la capacité du matériau à supporter une forte température, elle définit la température maximale de fonctionnement des transistors à effet de

champ (TEC) en anglais Field Effect Transistors (FETs).

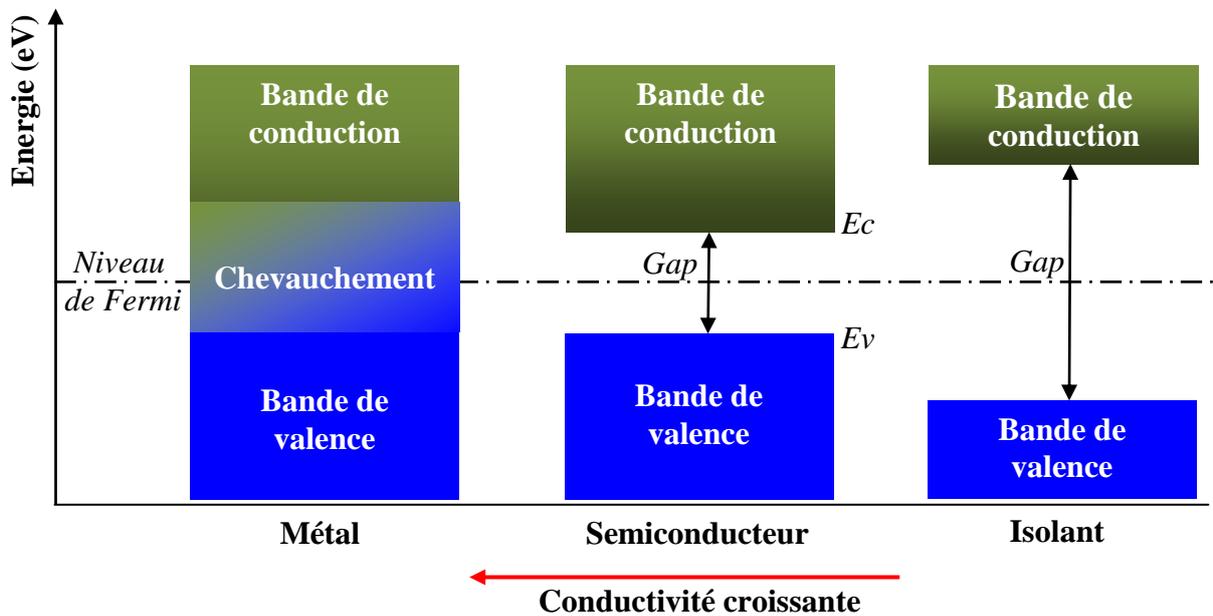


Figure I-2: Différents diagrammes de bandes d'énergie [10].

Les nitrures d'éléments III sont considérés comme des matériaux semiconducteurs à grand gap pour des valeurs comprises entre 1.9 eV et 6.2 eV [11], comme montre dans la figure (I-3a).

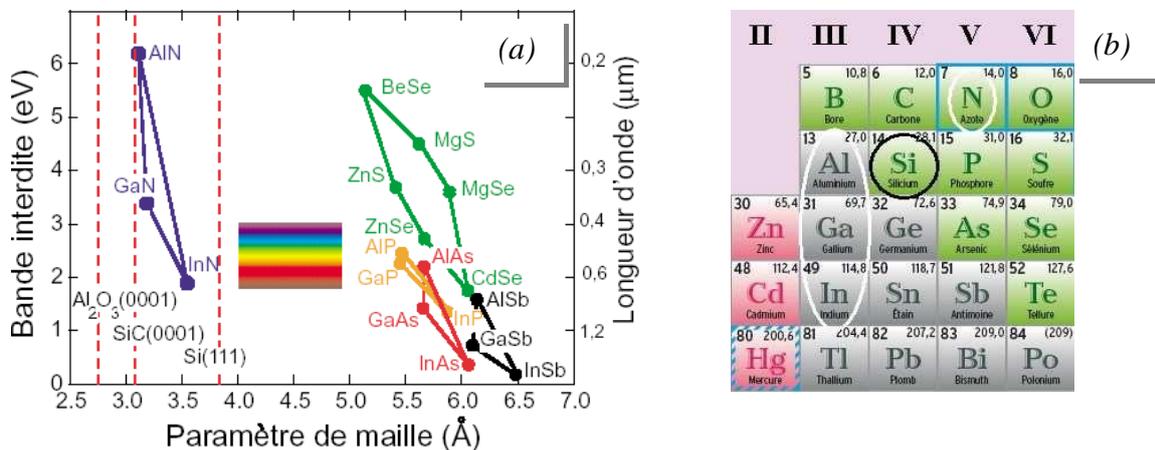


Figure I-3: (a) Bande interdite et paramètre de maille des nitrures d'éléments III. Les substrats utilisés dans la fabrication des composants à base de GaN sont également présentés, (b) Extrait du tableau périodique des éléments II-VI, IV et III-V [12].

Le champ de claquage (noté  $E_c$ , unité  $V/cm$ ) est la valeur du champ ou de la tension maximum que peut supporter le composant. Les matériaux à grands gap ont un champ de claquage très

important. La valeur de ce champ est directement liée à la largeur de la bande interdite. Ce paramètre est un des plus importants à prendre en compte pour les performances en puissance des transistors [13].

Le tableau (I-2) regroupe les propriétés électriques des différents matériaux semiconducteurs à faible et à grand gap.

**Tableau I-2:** Propriétés des différents matériaux semiconducteurs [12].

	Matériaux à faible gap			Matériaux à grand gap			
	Si	GaAs	InP	InN	GaN	AlN	SiC
Bande interdite (eV)	1.1	1.4	1.3	0.7~1.9	3.4	6.2	3.2
Mobilité électronique (cm <sup>2</sup> /Vs)	1500	8500	5400	2700	990	1350	650
Champ de claquage (MV/cm)	0.3	0.4	0.5	1.2	3.3	8.4	3.5
Vitesse de saturation (10 <sup>7</sup> cm/s)	1	1	1	4.2	2.5	2.1	2.0
Conductivité thermique (W/cmK)	1.5	0.5	0.7	0.45	1.3	2	4.5
Permittivité relative ( $\epsilon_r$ )	11.8	11.5	12.5	15.3	9.5	9.14	10

### I.2.3. Densité de porteurs des charges intrinsèques

La densité intrinsèque de porteurs des charges est la quantité d'électrons et trous à l'état intrinsèque du semiconducteur. C'est la concentration d'électrons qui font le passage de la bande de valence à la bande de conduction, ou bien le nombre de trous qui se retrouvent dans la bande de valence, dans le semiconducteur à l'état pur sans défauts cristallins, à des températures supérieures à 0 K. Cette quantité est rigoureusement la même pour les électrons et trous, elle est notée par  $n_i$ , et son unité est cm<sup>-3</sup>.

$$n_i^2 = AT^3 e^{-\frac{E_g(0)}{k_B T}} \quad (\text{I-1})$$

où A est une constante indépendante de la température, mais qui dépend de la nature du matériau,  $E_g(0)$  est la valeur de la bande interdite à 0 K,  $k_B$  est la constante de Boltzmann (  $1.38 \times 10^{-23} \text{ J / K}$  ). La valeur de  $n_i^2$  est une fonction exponentielle de la température, donc la valeur de  $T^3$  peut être négligée devant le facteur de  $e^{-\frac{E_g(0)}{KT}}$ . Ainsi également, les matériaux à grande gap ayant une faible valeur  $n_i$  auront un faible courant de fuite pour des valeurs de

température très grandes. Ce qui les rendent un excellent choix pour les applications à hautes températures [14].

#### *1.2.4. Mobilité et vitesse des porteurs*

La mobilité est par définition une grandeur positive notée  $\mu$  ( $cm^2/V.s$ ), elle mesure l'aptitude des porteurs à se déplacer dans le réseau cristallin. Ainsi que la mobilité plus grande que le cristal est pur et que la masse effective des porteurs est faible [15]. L'élévation de température, crée des perturbations dans le cristal et affecte la mobilité [16].

$$\mu = \frac{q\tau}{m^*} \quad (I-2)$$

$$\text{Avec : } \tau = \frac{\tau_c}{2} \quad (I-3)$$

Où  $\tau$  est le temps de relaxation et  $\tau_c$  est le temps de collision.

Dans le domaine des faibles champs électriques, les porteurs libres sont en équilibre thermodynamique avec le réseau, et leur vitesse moyenne est proportionnelle au champ électrique. En d'autres termes, la mobilité des porteurs est indépendante du champ électrique et la vitesse de dérive ou d'entraînement des électrons et des trous, notée  $v$  ( $cm/s$ ) s'écrit :

$$\vec{v}_n = -\mu_n \vec{E} \quad (I-4)$$

$$\vec{v}_p = \mu_p \vec{E} \quad (I-5)$$

Lorsque le champ devient important, les interactions des porteurs avec les vibrations de réseau, phonons acoustiques d'abord phonons optiques ensuite, entraînent une diminution de mobilité des porteurs. Cette diminution de mobilité se traduit par une variation sous-linéaire de la vitesse de dérive des porteurs [15].

Lorsque le champ électrique devient important, les interactions des porteurs avec les vibrations du réseau entraînent une diminution de la mobilité des porteurs, la vitesse sature et tend vers la vitesse thermique  $v_{th} = \sqrt{3k_B T/m^*}$ . La mobilité varie en fonction de champ électrique d'un matériau à l'autre et en fonction de la nature de la structure de bandes du semiconducteur, elle se traduit par une variation non linéaire de la vitesse de dérive des porteurs [8].

$$\vec{v} = \mu(\vec{E})\vec{E} \quad (I-6)$$

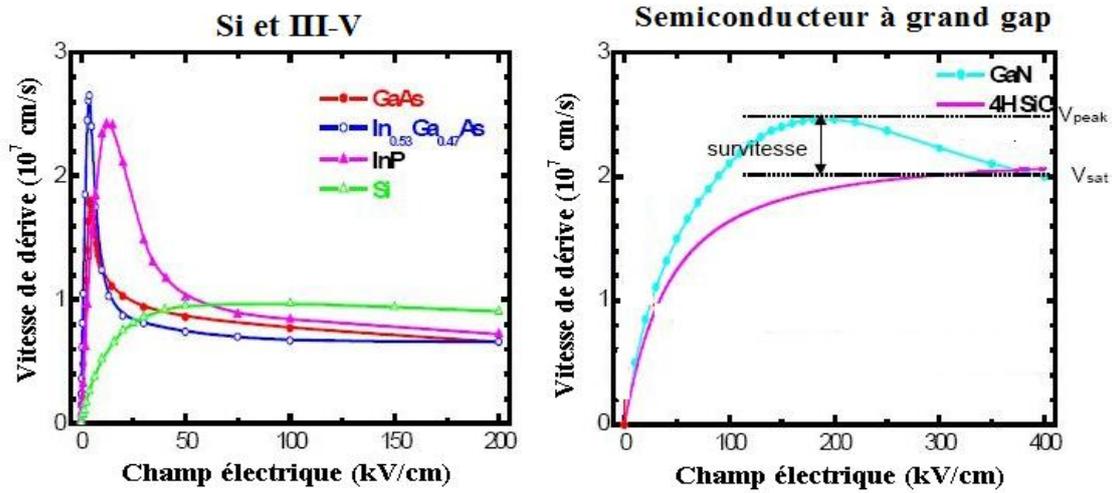


Figure I-4: Variation de la vitesse de dérive en fonction du champ électrique pour différents matériaux [10].

### I.2.5. Conductivité thermique

La conductivité thermique d'un matériau traduit sa capacité à dissiper la chaleur. Or, la résistance thermique (notée  $R_{th}$ ) est inversement proportionnelle à la conductivité thermique est donnée par la relation suivante:

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{P_{diss}} \tag{I-7}$$

Où  $\Delta T$  est l'élévation de la température en Kelvin,  $P_{diss}$  est la puissance dissipée en Watts.

On voit donc que la résistance thermique est directement liée à la puissance dissipée. Cela signifie qu'une forte conductivité thermique du matériau permet l'évacuation de la puissance dissipée (sous forme de chaleur) sans échauffement important de celui-ci [17].

Certains marchés commerciaux, militaires et aérospatiaux, qui peuvent être ciblés par les matériaux à grand gap sont présentés sur la figure (I-5).

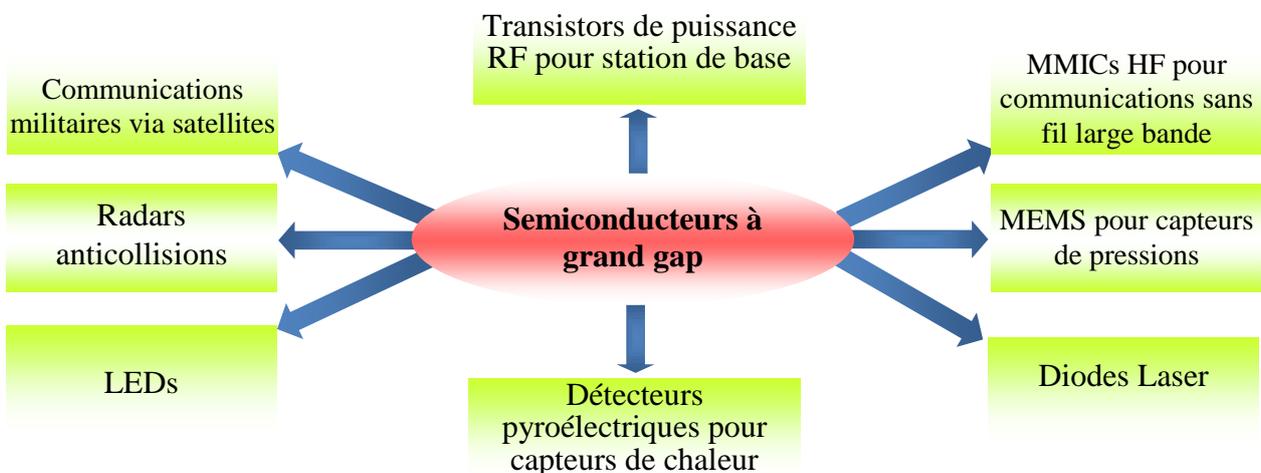


Figure I-5: Domaines d'application des semiconducteurs à grand gap [11].

Ci-dessous un récapitulatif illustré sur la figure (I-6), qui donne la relation entre les propriétés des matériaux III-N, et les performances relatives à chaque propriété.

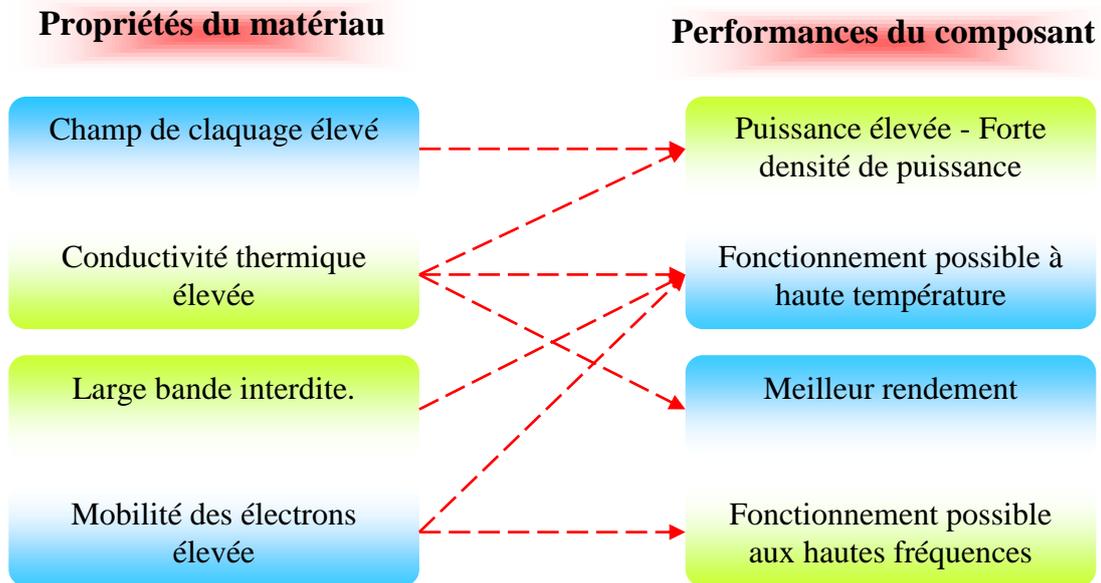


Figure I-6: Performances du matériau GaN par rapport à ses propriétés [18]

### I.3. Propriétés des composés ternaires $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ et $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$

Les composés ternaires  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  et  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$  sert souvent de barrière de confinement dans les structures électroniques et optoélectroniques à base de nitrures. La connaissance de ses propriétés et la maîtrise de sa croissance sont donc des objectifs impératifs pour développer de nouveaux composants, en particulier dans le domaine de l'UV lointain.

#### I.3.1. Variation de paramètre de maille en fonction de composition

##### d'alliage $x$

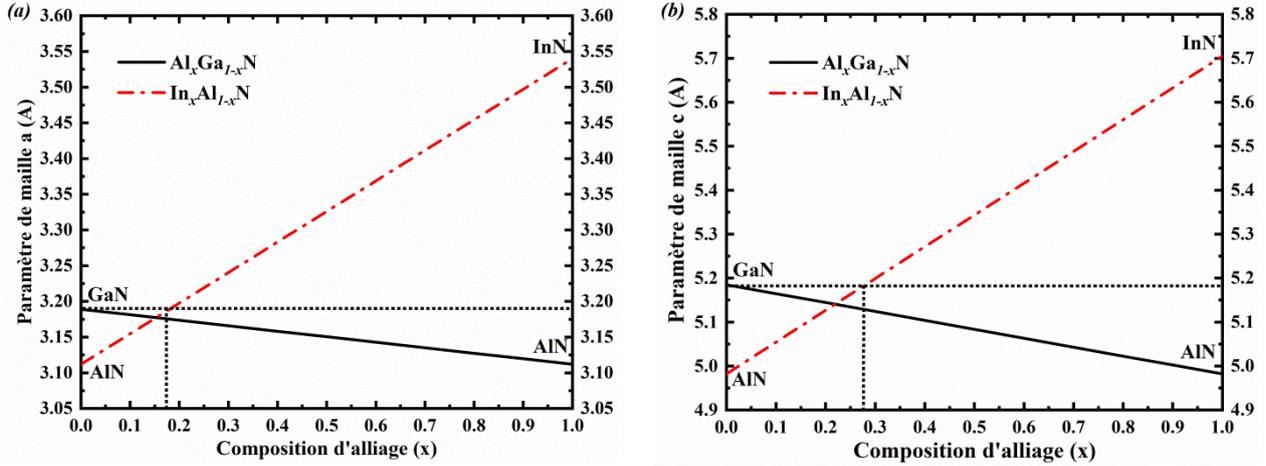
Les valeurs de paramètre de maille  $a$ ,  $c$  et  $u$  pour les matériaux III-N sont reportées dans le tableau (I-1). En ce qui concerne les alliages ternaires AlGaN et InAlN, les paramètres de maille obéissent à une loi linéaire selon la loi de Vegard [19] en fonction de la composition d'alliage  $x$  :

$$Y^{A_xB_{1-x}N} = xY^{AN} + (1-x)Y^{BN} \quad (\text{I-8})$$

Où  $A$  et  $B$  représentent les éléments chimiques In, Ga ou Al et  $Y$  représente les paramètres de maille.

Les figures (I-7a) et (I-7b) représentent la relation entre la composition d'alliage  $x$  et ses paramètres de maille  $a$  et  $c$ . Comme on peut le voir sur la figure (I-7a), l'alliage ternaire InAlN avec une composition d'indium de 17% présente l'intérêt d'avoir le même paramètre de maille

que GaN. En d'autres termes, il est en accord de maille avec le GaN dans le plan de croissance [0001]. Ceci a pour effet d'annuler les contraintes et par conséquent produit une polarisation piézoélectrique nulle [20].



**Figure I-7:** Evolution du paramètre de maille en fonction de la composition d'alliage ( $x$ ) des composés ternaires  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  et  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ . (a)  $a$  et (b)  $c$ .

### I.3.2. Variation du gap en fonction de composition d'alliage $x$

La modulation de la bande interdite ou l'énergie de gap en fonction de la composition d'alliage permet facilement de former des alliages ternaires. Les énergies de bande interdite des alliages sont données par la relation suivante :

$$E_g^{A_xB_{1-x}N} = xE_g^{AN} + (1-x)E_g^{BN} - b^{ABN}x(1-x) \quad (\text{I-9})$$

Avec  $b$  est un paramètre de non linéarité (bowing paramter), il représente la déviation par rapport à la loi linéaire. Il vaut 1.0 eV pour alliage ternaire AlGaIn [21] et 5.36 eV pour alliage InAlN proposée par Sakalauskas *et al.* [22], est en bon accord avec les valeurs expérimentales des bandes interdites.

L'énergie du gap augmente, et le sommet de la bande de valence au point  $\Gamma$ , se déplace vers le bas quand le taux d'aluminium augmente. Dans la figure (I-8), nous représentons la variation de l'énergie de gap des matériaux ternaires  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  et  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$  en fonction de composition d'alliage  $x$ . Pour le gap direct, il ya une variation linéaire par rapport à la composition, tandis que pour le gap indirect, il ya une variation non linéaire [19].

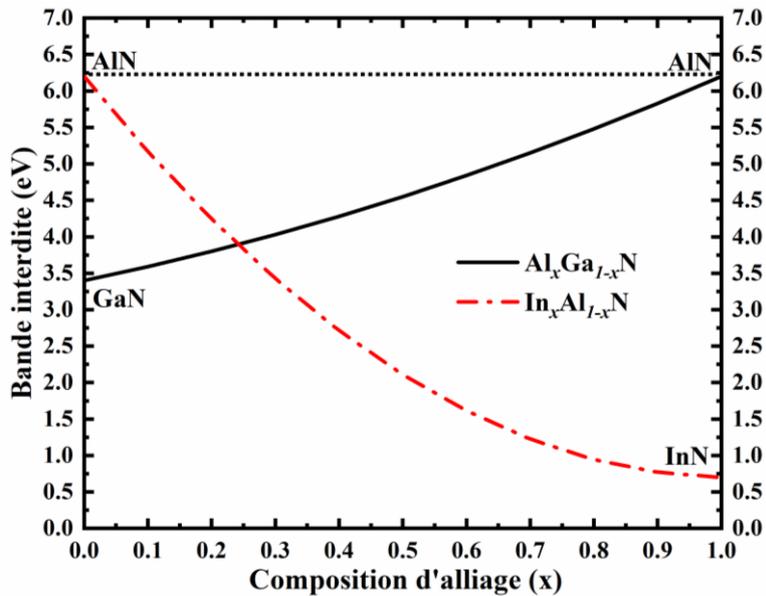


Figure I-8: Variation du gap dans  $Al_xGa_{1-x}N$  et  $In_xAl_{1-x}N$  en fonction de la fraction molaire  $x$ .

La figure (I-9) représente la variation d'énergie de la bande interdite en fonction du paramètre de maille pour les deux matériaux ternaires  $Al_xGa_{1-x}N$  et  $In_xAl_{1-x}N$ . Il en résulte que le composé ternaire  $In_{0.17}Al_{0.83}N$  peut croître sans contrainte sur le GaN car ces deux matériaux sont parfaitement accordés en maille.

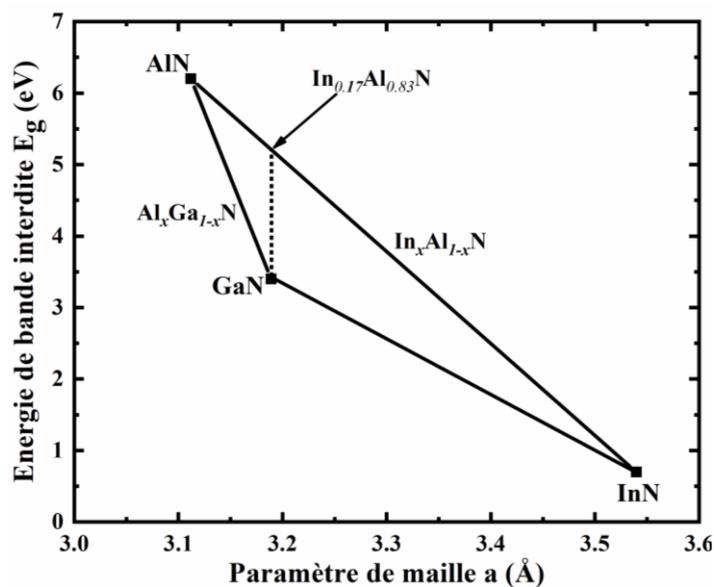


Figure I-9: Energie de bande interdite en fonction du paramètre de maille des matériaux III-N.

### I.3.3. Variation de la mobilité des électrons en fonction de composition d'alliage $x$

Sous condition faible champ, en augmentant la composition d'alliage  $x$  les composés ternaires  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  et  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ , la mobilité diminue, comme illustré dans la figure (I-10). Cela est dû en partie à la masse effective qui est plus grande dans la vallée centrale dans  $\text{AlN}$  et  $\text{InN}$  comparée au  $\text{GaN}$ . De plus, quand la composition d'alliage  $x$  augmente, la dispersion des phonons acoustique augmentent pendant que la dispersion des phonons optiques polaires décroît. La dispersion des impuretés ionisées reste le troisième processus compétitif [19].

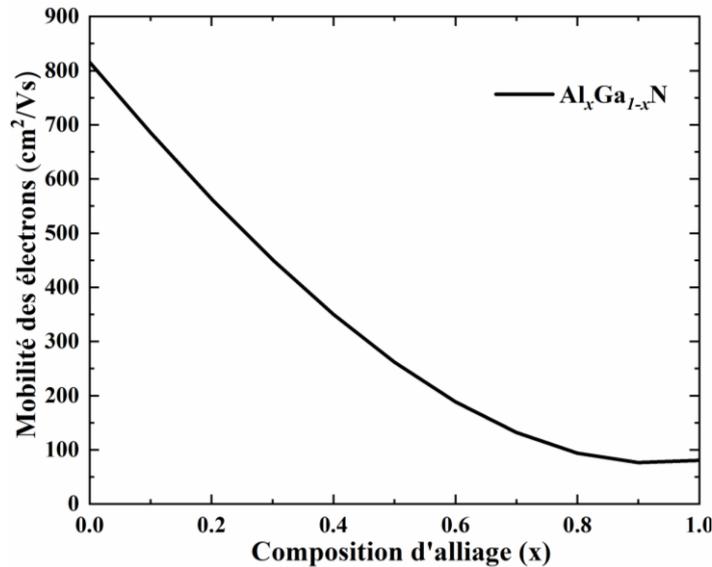
À faible champ, la courbe décrivant la mobilité des électrons dans l'alliage  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  est approchée par l'équation (I-10), voir le tableau (I-3).

$$\mu(x) = a + bx + cx^2 + dx^3 \quad (\text{I-10})$$

Où  $a, b, c$  et  $d$  sont des constantes dépendent de la température.

La mobilité des électrons en fonction de la fraction molaire  $x$  d'indium du composé ternaire  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$  est donnée par interpolation linéaire selon la loi de Vegard, s'écrite:

$$\mu(x) = x\mu_{\text{InN}} + (1 - x)\mu_{\text{AlN}} \quad (\text{I-11})$$



**Figure I-10:** Mobilité des électrons dans  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  en fonction de la composition d'alliage  $x$  [19].

**Tableau I-3:** les valeurs des constantes  $a$ ,  $b$ ,  $c$  et  $d$  pour différentes valeurs de température [23].

$\mu(x)$ (cm/Vs)				
$T$	$Al_xGa_{1-x}N$			
	$a$	$b$	$c$	$d$
100 K	1787.9	-1925.6	1071.4	-520.8
300 K	1157.9	-1329.6	-283.7	671.3
400 K	815.6	-1331.6	427.6	298.4

### I.3.4. Vitesse de saturation en fonction de la composition d'alliage $x$

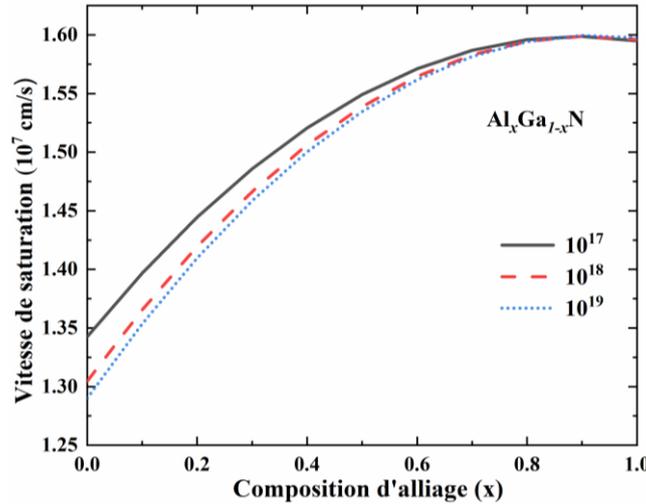
La vitesse de saturation pour les alliages ternaires  $Al_xGa_{1-x}N$  et  $In_xAl_{1-x}N$  est donnée par l'équation (I-12), où les constantes  $a$ ,  $b$  et  $c$  dépendent du dopage, voir tableau (I-3):

$$v(x) = a + bx + cx^2 \quad (I-12)$$

Sous condition du fort champ, la vitesse tend vers une stabilisation définie comme étant la vitesse de saturation. Avec l'augmentation de la composition d'alliage  $x$ , la vitesse de saturation augmente indépendamment de la température. Elle décroît brutalement de  $10^6$  cm/s pour une montée de 100 K dans la gamme de température (100-500 K). Elle montre une faible dépendance sur la concentration de dopage [10]. La figure (I-11) représente la vitesse de saturation des électrons dans  $Al_xGa_{1-x}N$ , en fonction de la composition d'alliage  $x$  d'aluminium.

**Tableau I-4:** Les valeurs des constantes  $a$ ,  $b$  et  $c$  pour différentes concentrations du dopage [10].

$v(x) = a + bx + cx^2$ ( $10^7$ cm/s)			
Dopage ( $N_d$ )	$Al_xGa_{1-x}N$		
	$a$	$b$	$c$
$10^{17}$ ( $cm^{-3}$ )	1.3425	0.574	-0.3215
$10^{18}$ ( $cm^{-3}$ )	1.3045	0.646	-0.3545
$10^{19}$ ( $cm^{-3}$ )	1.290	0.6708	-0.3632



**Figure I-11:** Vitesse de saturation des électrons dans  $Al_xGa_{1-x}N$ , en fonction de composition d'alliage ( $x$ ) [10].

### *1.3.5. Variation de la permittivité en fonction de la composition d'alliage $x$*

Le semiconducteur à faible permittivité permet d'avoir des capacités beaucoup plus faibles d'où la possibilité d'augmenter la taille de ces dispositifs et d'obtenir une puissance de sortie plus importante sans dégrader les fréquences de coupures des composants [24]. La permittivité relative en basse fréquence du composé ternaire  $Al_xGa_{1-x}N$  formé à partir des matériaux binaires GaN et AlN, peut être calculée à partir de l'équation (I-13) obtenues par interpolation linéaire selon la loi de Vegard [25].

$$\varepsilon_{Al_xGa_{1-x}N} = 0.3x + 10.28 \quad (\text{I-13})$$

La permittivité relative basse fréquence du composé ternaire  $In_xAl_{1-x}N$  formé à partir des composés binaires InN et AlN, peut être calculée à partir de l'équation (I-14) obtenue par interpolation linéaire [24] selon la loi de Vegard [25].

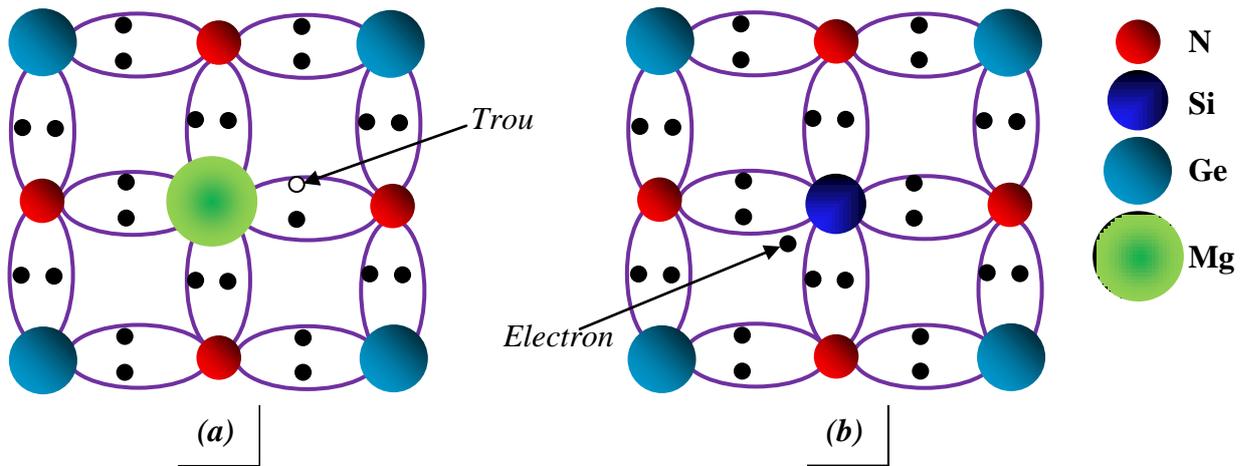
$$\varepsilon_{In_xAl_{1-x}N} = 2.14x + 2.78. \quad (\text{I-14})$$

## **I.4. Dopage et polarités des nitrures**

### *1.4.1. Choix des dopants*

Pour le dopage des semiconducteurs III-V, on utilise généralement des éléments du groupe II en substitution des atomes III, qui agissent alors comme des accepteurs et des éléments du groupe VI en substitution des atomes V qui agissent comme des donneurs. Les éléments du groupe IV, connus par leur comportement amphotère, peuvent soit se substituer aux atomes du sous-réseau III et agir comme des donneurs, soit se substituer aux atomes du sous-réseau V et agir comme des accepteurs. La figure (I-12) illustre le cas idéal d'incorporation des atomes dopants des groupes

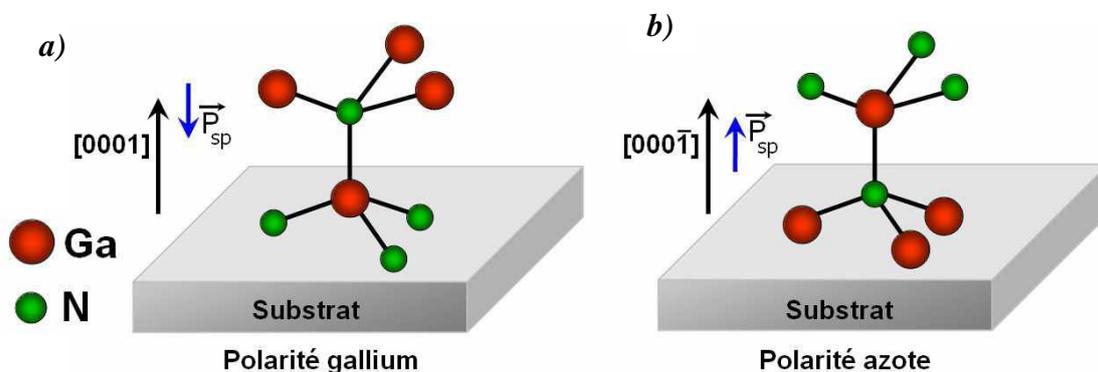
II et IV utilisés dans les nitrures d'éléments III [10].



**Figure I-12:** Position des dopants dans le réseau cristallin du GaN, (a) Mg accepteur, (b) Si donneur [10].

#### I.4.2. Polarités de faces gallium et azote croissantes

La symétrie de la structure cristalline d'un matériau a des conséquences très importantes sur les propriétés de polarisation. Les nitrures d'éléments III cristallisent à la phase stable hexagonale (würtzite), la distribution des densités électroniques autour des différents atomes fait que les barycentres des charges positives et négatives ne coïncident pas nécessairement [10]. La polarisation totale dans la couche de nitrure en phase hexagonale sera alors la résultante de la somme des deux types de polarisation : la polarisation spontanée et la polarisation piézoélectrique [26]. Dans les nitrures une phase hexagonale l'orientation est très importante : il s'agit du sens de la liaison atomique gallium (Ga) et azote (N) suivant la direction (0001). Cette orientation est appelée polarité de la couche [27], comme on le voit sur la figure (I-13).



**Figure I-13:** Polarisation des couches de GaN hexagonales, (a) polarité gallium, (b) polarité azote [28].

## I.5. Propriétés des hétérostructures $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ et $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$

L'hétérostructure formée par la juxtaposition de deux matériaux de différents gaps comme illustrée dans la figure (I-14), l'un présentant un large gap « $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ » et l'autre a un plus faible gap « $\text{GaN}$ », entraînant la formation d'une discontinuité de la bande de conduction à l'interface [12].

L'utilisation d'une faible épaisseur de la couche de transition AlN entre l'hétérojonction AlGaN/GaN ou InAlN/GaN proposée en 2001 par Smorchkova *et al* [29] permet d'augmenter la discontinuité de la bande de conduction et par conséquent d'augmenter la densité et la mobilité des porteurs à l'interface de l'hétérojonction AlN/GaN pour les deux différents types des hétérostructures, ainsi que permet notamment d'améliorer la qualité du cristal [25].

### I.5.1. Formation d'un gaz d'électrons bidimensionnel 2DEG

Le principe de base des hétérostructures AlGaN/GaN et InAlN/GaN est le transfert d'électrons des atomes donneurs de la couche à large gap (couche barrière) AlGaN ou InAlN vers l'interface AlGaN/GaN ou InAlN/GaN, permet la création d'un gaz d'électrons bidimensionnel et aussi appelé 2DEG «Two-Dimensional Electron Gas». Les hétérostructures possèdent une grande densité de charges  $n_s$  du gaz d'électrons bidimensionnel 2DEG qu'on ne peut attribuer cela uniquement à la grande discontinuité de bande entre les deux couches GaN et AlGaN, mais surtout à la présence d'une forte polarisation à l'hétérointerface [26], comme illustré dans la figure (I-14).

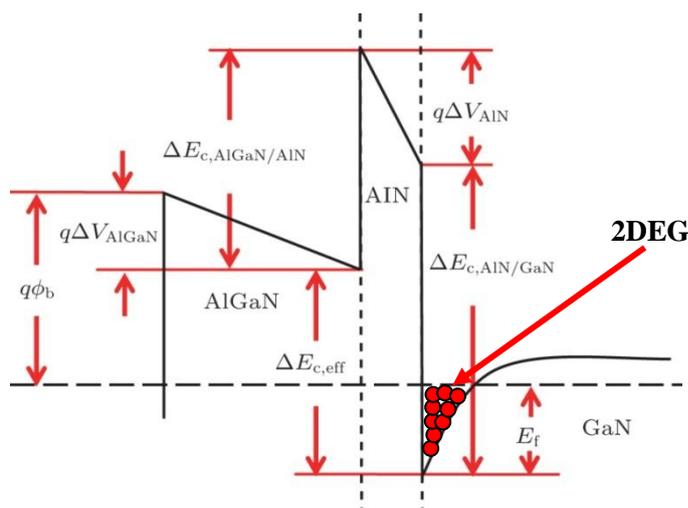


Figure I-14: Hétérostructure de type AlGaN/AlN/GaN [30].

### ***1.5.2. Polarisation spontanée et piézoélectrique dans les nitrures***

L'hétérojonction de type AlGa<sub>x</sub>N/GaN ou InAlN/GaN présente une forte polarisation interne. Cette polarisation modifie les propriétés électriques de l'hétérostructure : création d'un gaz d'électrons bidimensionnel; dû aux champs électriques internes très intenses résultant à la fois de la polarisation spontanée des interfaces et des effets piézoélectriques dans les couches contraintes [8].

#### ***a) Polarisation spontanée***

Dans une couche de nitrure würtzite, il apparaît une polarisation macroscopique non nulle. La structure würtzite est la structure de plus haute symétrie permettant ce phénomène. Dans la maille cristalline hexagonale, les barycentres des charges positives et négatives ne coïncident pas toujours, créant ainsi un ensemble de dipôles orientés selon une même direction. Il apparaît dès lors dans le cristal une polarisation spontanée en l'absence de toute contrainte externe, cet effet est appelé «*polarisation spontanée*». La polarisation spontanée  $P_{sp}$  ne se manifeste pas dans le volume mais aux interfaces du matériau binaire GaN et ternaire (AlGa<sub>x</sub>N ou InAlN). Elle crée une charge mono-polaire à l'interface qui vaut  $P_{sp}$  entre le puits GaN et la barrière AlGa<sub>x</sub>N ou InAlN et qui s'exprime par:

$$\Delta P_{sp}^{A_x B_{1-x} N} = P_{sp}^{BN} - P_{sp}^{ABN} \quad (\text{I-15})$$

Où  $A$  et  $B$  représentent les éléments chimiques In, Ga ou Al.

Dans les nitrures, le vecteur de polarisation  $P_{sp}$  est orienté suivant la direction polaire [0001].

#### ***b) Polarisation piézoélectrique***

Sous l'action d'une contrainte bi-axiale dans le plan (0001), la maille cristalline se déforme et brise la symétrie hexagonale. Il apparaît alors une polarisation appelée «*polarisation piézoélectrique*».

Le champ électrique dépend de la composition d'alliage  $x$  d'aluminium ou d'indium des matériaux ternaires AlGa<sub>x</sub>N et InAlN. Ce paramètre joue à la fois sur la polarisation spontanée créée à l'interface (une simple interpolation spontanée linéaire entre les valeurs de GaN et AlN ou InN utilisée pour d'écrire l'alliage), et sur le champ électrique piézoélectrique dû à la contrainte d'interface (la contrainte résulte de la différence de pas de réseau entre (GaN et AlGa<sub>x</sub>N ou InAlN)).

L'amplitude du champ électrique est fixée par la différence de polarisation totale entre le puits GaN et barrière AlGa<sub>x</sub>N ou InAlN, et la conservation du vecteur déplacement électrique ( $\vec{D} = \vec{0}$ ,

avec :  $\vec{D} = \epsilon \vec{E} + \vec{P}$ ) à l'interface des hétérostructures AlGaN/GaN et InAlN/GaN.

D'autres effets de polarisation, dans lesquels le champ électrique résulte en un gradient de température de la jonction dû à l'anisotropie du gap des semiconducteurs : cet effet est appelé «*effet pyroélectrique*», est comparable à celui d'une tension appliquée dans les composants de puissance comme les transistors à effet de champ à base de nitrures. Cet effet n'est pas étudié en détail dans les nitrures.

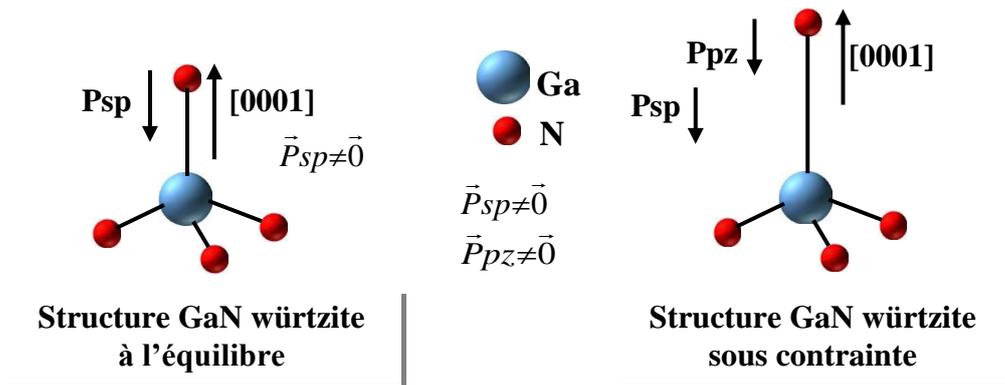


Figure I-15: Polarisation spontanée et piézoélectrique [31].

Grâce à ce champ piézoélectrique, les dispositifs à base de l'hétérostructure AlGaN/GaN ou InAlN/GaN sont conçus pour utilisation en hautes puissances [19].

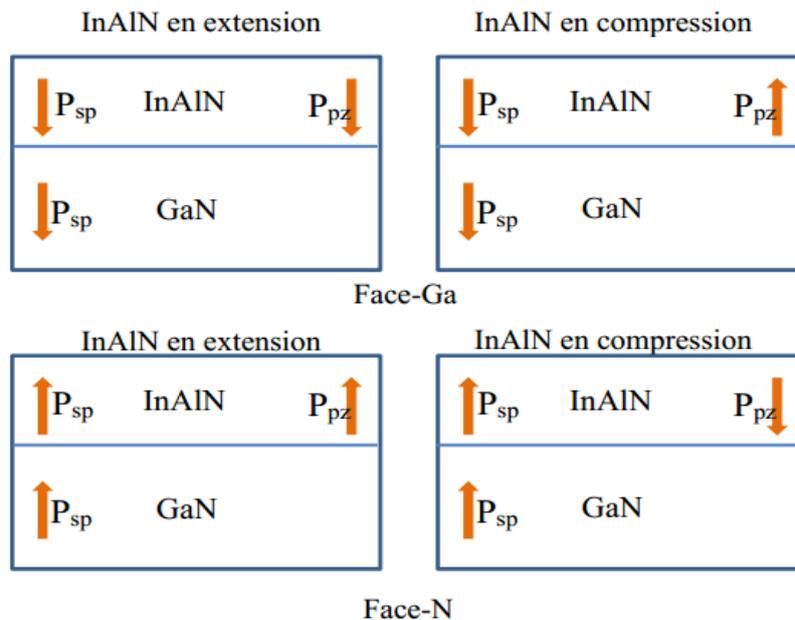


Figure I-16: direction et sens des polarisations spontanées et piézoélectriques dans une hétérostructure InAlN/GaN en compression et en tension sur le GaN face-Ga et face-N [22].

### I.5.3. Hétérostructure de type $Al_xGa_{1-x}N/GaN$ et $In_xAl_{1-x}N/GaN$

Une nouvelle hétérostructure de type  $In_xAl_{1-x}N/GaN$  fournit une discontinuité de bandes de conduction  $\Delta E_c$  sont respectivement de 1.31 eV au lieu de 0.37 eV pour l'hétérostructure  $Al_xGa_{1-x}N/GaN$  pour de la composition d'alliage d'indium  $x = 19\%$  et d'aluminium  $x = 25\%$ . De plus, la polarisation spontanée est beaucoup plus important pour une hétérostructure de type  $In_xAl_{1-x}N/GaN$  [31]. C'est pourquoi la densité du gaz d'électron bidimensionnel est au moins deux fois plus élevée, comme on le voit sur le tableau (I-5).

**Tableau I-5:** Comparaison des propriétés du gaz 2D entre des deux hétérostructures  $AlGaN/GaN$  et  $InAlN/GaN$  à 300 K [32, 33].

Propriétés du gaz d'électrons 2D	$Al_xGa_{1-x}N/GaN$	$In_xAl_{1-x}N/GaN$
Polarisation spontanée ( $C/cm^2$ )	$2.62 \times 10^{13}$	$4.54 \times 10^{13}$
Discontinuité des bandes $\Delta E_c$ (eV)	0.37	1.31
Densité de charge superficielle $n_s$ ( $cm^{-1}$ )	$1 \times 10^{13}$	$2.6 \times 10^{13}$
Mobilité des électrons $\mu$ ( $cm^2/V.s$ )	1500	1170
$R_c$ résistance carrée	300 – 500	210

Un autre point particulièrement attractif est l'accord de maille qui est réalisé entre  $InAlN$  et  $GaN$ , lorsque le taux d'indium est de 17% [33] ainsi le transistor est plus stable thermiquement, car il y a une absence de contrainte [34].

## I.6. Propriétés des couches épitaxiées

### I.6.1. Croissance des couches épitaxiées

Pour fabriquer des dispositifs électroniques à partir des matériaux nitrures, l'élaboration des couches minces de bonne qualité est nécessaire. L'épitaxie des matériaux nitrures se fait en général par des techniques d'élaboration bien précises telles que l'Épitaxie en Phase Vapeur aux Organo Métalliques (MOCVD) et technique l'Épitaxie par Jets Moléculaire (MBE) [35].

**Tableau I-6:** Principales caractéristiques des trois techniques de croissance généralement utilisées pour l'épitaxie de nitrures d'éléments III [10].

Epitaxie	EPVH	EPVOM	EJM
Pression dans le réacteur	$3,7 \cdot 10^{-4}$ – $7,5 \cdot 10^{-4}$ Torr	20 – 500 Torr	$10^{-5}$ – $10^{-11}$ Torr
Température du substrat	900 – 1100°C	500 – 1200 °C	500 – 900 °C
Vitesse de croissance	10 – 100 $\mu\text{m/h}$	0,2 – 5 $\mu\text{m/h}$	0,1 – 1 $\mu\text{m/h}$
Précurseurs	HCl, NH <sub>3</sub> , bain métallique (Ga, Al)	NH <sub>3</sub> , Triméthyl–Ga, –Al, –In Triéthyl–Ga	NH <sub>3</sub> , N <sub>2</sub> , sources solides métallique (Ga, Al, In).
Remarques	<ul style="list-style-type: none"> <li><input checked="" type="checkbox"/> Couches épaisses de substrats</li> <li><input checked="" type="checkbox"/> GaN autosupportés.</li> <li><input checked="" type="checkbox"/> Production industrielle.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><input checked="" type="checkbox"/> Croissance rapide.</li> <li><input checked="" type="checkbox"/> Plateau multi-substrats et substrats grande dimension.</li> <li><input checked="" type="checkbox"/> Production industrielle.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><input checked="" type="checkbox"/> Contrôle des épaisseurs, des compositions et maîtrise des interfaces.</li> <li><input checked="" type="checkbox"/> Contrôle in situ de la croissance (RHEED).</li> <li><input checked="" type="checkbox"/> Phase de développement.</li> </ul>

### a) Epitaxie en Phase Vapeur aux Organo Métalliques (MOCVD)

L'épitaxie en phase vapeur aux organométalliques est la méthode industrielle généralement la plus utilisée. Elle consiste à réaliser une pyrolyse de l'ammoniac et d'un composé organométallique (triméthylgallium (TMGa) ou triéthylgallium (TEGa)) à la surface du substrat chauffé. La vitesse de croissance est de quelques  $\mu\text{m/h}$ . Les dispositifs réalisés avec cette méthode de croissance ont jusqu'à présent donnée des meilleures performances [36] et [37].

### b) Epitaxie par Jets Moléculaire (MBE)

Dans le cas du GaN, la voie la plus employée consiste à utiliser une source solide pour le gallium, et une source gazeuse comme précurseur de l'azote. Le gaz utilisé est soit NH<sub>3</sub> ou N<sub>2</sub> auquel cas une source plasma RF (Radio Fréquence) ou ECR (Résonance Electron–Cyclotron) est nécessaire pour dissocier les molécules d'azote très stables. La température du substrat, comprise entre 450°C et 850°C permet la condensation des atomes [35].

### I.6.2. Choix d'un substrat pour les nitrures

La croissance des couches hexagonales de bonne qualité est conditionnée par le choix du substrat. Les candidats susceptibles d'être utilisés pour l'hétérostructure AlGaIn/GaN sont le saphir ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), le carbure de silicium (SiC de type 4H) et le silicium (Si). Les caractéristiques de ces substrats sont répertoriées dans le tableau (I-7) [17].

**Tableau I-7:** Caractéristiques des substrats les plus utilisés pour la croissance du GaN [17].

Substrat		Si	$\text{Al}_2\text{O}_3$	SiC
Structure cristalline		Cubique	Hexagonale	Wûrtzite
Paramètres de maille (Å)		$a= 5.4301$	$a= 4.758$ $c=12.99$	$a=3.08$ $c=15.12$
Conductivité thermique (W/cmK)		1.5	0.5	4.9
Coefficients de dilatation thermique	$\Delta a/a$ ( $10^{-1}/\text{K}$ )	3.59	7.5	4.2
	$\Delta c/c$ ( $10^{-1}/\text{K}$ )	3.59	8.5	4.68

#### a) Silicium (Si)

Contrairement aux substrats saphir ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) et carbure de silicium (SiC), le silicium (Si) possède une maille plus importante que celle du GaN. Le substrat Si est très attractif non seulement parce qu'il présente une bonne morphologie de surface et est disponible à coût bas, mais également parce qu'il permet une intégration des dispositifs à base de GaN dans la microélectronique Si. Néanmoins, le GaN montre un désaccord de maille avec le Si (111) d'environ 17% associé à un désaccord de coefficients de dilatation thermique supérieur à 35% [17].

#### b) Saphir ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )

La majorité des couches élaborées étaient déposées sur substrat saphir. Ce substrat présente l'avantage d'un coût relativement faible, d'être facilement disponible, d'être semi-isolant et d'avoir une grande stabilité thermique. Les inconvénients sont : sa faible conductivité thermique  $\sigma=0.5 \text{ W/cm.K}$  et un fort désaccord en maille. Ce désaccord en maille entre les plans de base du GaN hexagonale et du saphir est de 14% [17].

#### c) Carbure de silicium (SiC)

Le substrat SiC(4H) de structure wûrtzite d'orientation (0001), les conditions d'épitaxie sont bien plus favorable. Le désaccord de maille et les coefficients de dilatation thermique sont respectivement de 3.5% et 25% avec le GaN. Le SiC possède également une conductivité thermique environ sept fois plus élevée que celle du saphir, ce qui en fait un candidat sérieux

pour des applications de puissance en hyperfréquences. Par contre, l'inconvénient majeur est que ce matériau très coûteux [17].

## I.7. Conclusion

Dans ce premier chapitre nous avons étudié les propriétés physiques des nitrures et des leurs hétérostructures. Les nitrures sont d'excellents candidats pour la réalisation des transistors à effet de champ à haute mobilité électronique tels que : les transistors à effet de champ à modulation de dopage (MODFETs) qui devient le composant dominant dans le régime de puissance de très hautes fréquences pour les applications de l'électronique de puissance en hyperfréquences.

Par ailleurs, l'hétérostructure à base des nitrures outre leurs spécificités de posséder un grand gap, elles permettent d'atteindre : des champs électriques internes très intenses, résultant à la fois de la polarisation spontanée à l'interface et les effets piézoélectriques résultant de la contraintes entre les couches. Ces champs électriques internes dans les hétérostructures  $Al_xGa_{1-x}N/GaN$  et  $In_xAl_{1-x}N/GaN$  présentent une polarisation permettant de modifier les propriétés électriques des hétérostructures. En particulier, la création d'un gaz d'électrons bidimensionnel de très haute mobilité aux interfaces de l'hétérostructure.

En outre, les avantages intrinsèques de ces hétérostructures à base des nitrures résident dans les points suivants:

- ☑ Grandes mobilités électroniques, entraînant des vitesses de saturation élevées,
- ☑ Champs électriques très intenses ( $\sim 1$  M.V/cm, car superposition des effets de polarisation spontanée et piézoélectrique) génère l'apparition de gaz 2D d'électrons,
- ☑ Hautes tensions de claquages,
- ☑ Bonne tenue thermique; stabilité thermique, et
- ☑ Large band-offset (discontinuité de bande) lui conférant de très bonnes propriétés de confinement.

## Références du chapitre I

- [1] J. Konik, I.H. Oguzman, K.F. Brean, R. Wang, P.P. Ruden, Y. Wang, "Electronic transport studies of bulk zinc-blende and würtzite phases of GaN based on an ensemble Monte Carlo calculation including a full zone band structure"., J. Appl. Phys. **78**(2), 1033–1038 (1995).
- [2] S. Strite, M.E. Lin. and H. Morkoç, "Progress and prospects for GaN and the III–V nitride semiconductors"., Thin Solid Films. **231**(1–2), 197–210 (1993).
- [3] Gil Bernard, "Group III nitride semiconductor compounds"., Edition. Oxford Science Publication, 492 pages (1998).
- [4] Chu Rongming, "AlGaIn/GaN single and double channel high electron mobility transistors"., These de Doctorat, Université de Science et Technologies MSC Hong Kong, 88 pages (2004).
- [5] Tschumak Elena, "Cubic Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/GaN heterojunction field effect transistors fabrication and characterization"., Thèse de Doctorat en Physique, Université de Paderborn, 113 pages (2010).
- [6] Philippon – Martin, A, "Étude d'une nouvelle filière de composants sur technologie nitrure de gallium. Conception et réalisation d'amplificateurs distribués de puissance large bande à cellules cascades en montage flip–chip et technologie MMIC"., Thèse de Doctorat en Électronique des Hautes Fréquences et Optoélectronique. Université de Limoges, 205 pages (2007).
- [7] Stéphanie Rennesson, "Développement de nouvelles hétérostructures HEMTs à base de nitrure de gallium pour des applications de puissance en gamme d'ondes millimétriques"., Thèse de Doctorat en Sciences. Université de Nice-Sophia Antipolis, 159 pages (2013).
- [8] Henry Mathieu, "Physique des semiconducteurs et des composants électroniques"., 6th Edition. Masson, Paris, 853 pages (2009).
- [9] W.J. Fan, M.F. Li, T.C. Chong, and J.B Xia.: "Band structure parameters of zinc-blende GaN, AlN and their alloys Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N"., Centre for Optoelectronics, Department of Electrical Engineering, National University of Singapore, Singapore 511. Solid State Communications, **97** (5), 381–384 (1996).
- [10] Bouguenna Driss, "Etude comparative et modélisation des transistors à effet de champ MODFETs et MOS-MODFETs à base de nanostructure de nitrures III-V Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/GaN cubique"., Thèse de Doctorat en Electronique. Université USTO, 157 pages (2014).
- [11] Bouzid-Driad Soumia, "Realisation et caracterisation de transistors HEMTs GaN pour des applications dans le domaine millimétrique"., Thèse de Doctorat en Micro et Nanotechnologies, Acoustique et Télécommunications, Université Sciences et Technologies de Lille, 197 pages (2013).
- [12] Baptiste Giroire, "Élaboration en continu de nitrures d'éléments III en conditions

*supercritiques et caractérisation de leurs propriétés optiques*"., Thèse de Doctorat en Physico–Chimie de la Matière Condensée, Université de Bordeaux, 225 pages (2016).

[13] M Alshaikh–Eid Majdi, "*Etude par simulation des propriétés électriques des Transistors HEMTs à base d'AlGa<sub>x</sub>N/GaN*"., Thèse de Doctorat Es-Sciences. Université Mentouri Constantine 1, 113 pages (2016).

[14] Christophe Charbonniaud, "*Caractérisation et modélisation électrothermique non linéaire de transistors à effet de champ GaN pour l'amplification de puissance microonde*"., Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Université de Limoges, 191 pages (2005).

[15] Henry Mathieu, "*Physique des semiconducteurs et des composants électroniques*"., ISBN 2 10 048633 0, 5<sup>th</sup> Edition. Dunod, 826 pages (2004).

[16] Donald .A. Neamen.: "*Semiconductor physics and devices basic principles*"., Published by McGraw-Hill, ISBN 0–07–232107–5, New York, 209 pages (2003).

[17] Kaddeche Mourad, "*Modélisation et analyse de l'effet du field plate avec couche diélectrique high- $\kappa$  due les propriétés électriques des HEMTs Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/GaN*"., Thèse de Doctorat en Electronique. Université Mentouri Constantine 1, 113 pages (2014).

[18] Meyer Sandra, "*Étude d'une nouvelle filière de composants HEMTs sur technologie nitrure de gallium, conception d'une architecture flip–chip d'amplificateur distribué de puissance à très large bande*"., Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Université de Limoges, 216 pages (2005).

[19] Tewfik Baghdadli, "*Etude des propriétés structurales et électroniques de nouveaux matériaux à base d'alliages III–N pour l'optoélectronique*"., Thèse de Doctorat en Physique énergétique et matériaux, Université Paul Verlaine–Metz, 144 pages (2018).

[20] Latrach Soumaya, "*Optimisation et analyse des propriétés de transport électroniques dans les structures à base des matériaux AlInN/GaN*"., Thèse de Doctorat en Micro–Optoélectronique et Nanostructures, Université Côte d'Azur et de l'Université de Monastir (2018).

[21] I. Vurgaftman, and J. R. Meyer, "*Band parameters for nitrogen-containing Semiconductors*"., J. Appl. Phys. , **94**, 3675–3696 (2003).

[22] E. Sakalauskas, H. Behmenburg, C. Hums, P. Schley, G. Rossbach, C. Giesen, M. Heuken, H. Kalisch, R. H. Jansen, J. Blasing, A. Dadgar, A. Krost, and R. Goldhahn, "*Dielectric function and optical properties of Al–rich AlInN alloys pseudomorphically grown on GaN*"., J. Phys. D: Appl. Phys., **43**, 1-10 (2010).

[23] M. Anwar, S. Wu, and R.T. Webster, "*Temperature dependent transport properties in GaN, Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N and In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N semiconductors*"., IEEE Trans. Electron Devices, **48**(3), 567–572 (2001).

- [24] Dieudonné Nsele, Séraphin, "Analyse électrique et en bruit basse fréquence et haute-fréquence des technologies InAlN/GaN HEMTs en vue de la conception d'amplificateurs robustes faible bruit en bande Ka", Thèse de Doctorat en Électromagnétisme et Systèmes Haute Fréquence, Université de Toulouse, 185 pages (2014).
- [25] F. Bernardini, V. Fiorentini, "Polarization-Based Calculation of the Dielectric Tensor of Polar Crystals", Phys. Rev. Lett. **79**(30), 3958–3961 (1997).
- [26] F. Bernardini, V. Fiorentini, and D. Vanderbilt, "Spontaneous polarization and piezoelectric constants in III-V nitrides", Phys. Rev B. **56**(16), 10024–10027 (1997).
- [27] R. Cingolani, A. Botchkarew, H. Tang, H. Morkoç, G. Tracha, Dicarolo M. Lomascolo, F. Della, F. Sala, and P. Laghi, "Spontaneous polarization and piezoelectric field in GaN/Al<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>N quantum wells : Impact on the optical spectra", Phys. Rev B. **61**(4), 2711–2715 (2000).
- [28] Nguyen Thi Dak Ha, "Réalisation et caractérisation de HEMTs AlGaIn/GaN sur silicium pour applications à haute tension", Thèse de Doctorat en Electronique, Université Paris Sud, 186 pages (2013).
- [29] I.P. Smorchkova, L. Chen, T. Mates, L. Shen, S. Heikman, B. Moran, S. Keller, S.P. DenBaars, J.S. Speck, and U.K. Mishra, "AlN/GaN and (Al,Ga)N/AlN/GaN two dimensional electron gas structures grown by plasma assisted molecular beam epitaxy", J. Appl. Phys. **90**(10), 5196–5201(2001).
- [30] X.G. He, D.G. Zhao, and D.S. Jiang, "Formation of two dimensional electron gas at AlGaIn/GaN heterostructure and the derivation of its sheet density expression", Chin. Phys. B, **24**(6), 067301 (2015).
- [31] W.J. Fan, M.F. Li, T.C. Chong, and J.B. Xia, "Band structure parameters of zinc-blende GaN, AlN and their alloys Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N", Centre for Optoelectronics, Department of Electrical Engineering, National University of Singapore, Singapore 511. Solid State Communications, **97** (5), 381–384 (1996).
- [32] K. Lee, M.S. Shur, T.J. Drummond, H. Morkoc, "Current voltage and capacitance voltage characteristics of modulation doped field effect transistors", IEEE Transaction Devices. **30**(3), 207–212 (1983).
- [33] J. Kuzmik, "Power Electronics on InAlN/(In)GaN : prospect for a record Performance", IEEE Electron. Device letters, **22**(11), 51–512 (2001).
- [34] Touati Salim, "Conception, réalisation et caractérisation de composants de puissance hyperfréquence de la filière nitrure de gallium", Thèse de Doctorat en Microondes & Microtechnologies, Université de Lille1, 224 pages (2007).

[35] Ophélie Lancry, "*Etude par microspectrométrie Raman de matériaux et de composants microélectroniques à base de semi-conducteurs III-V grand gap*", Thèse de Doctorat en Sciences de la Matière, 194 pages (2010).

[36] Nicolas Vellas, "*Etudes expérimentales de transistors HFETs de la filière nitrure de gallium pour des applications de puissance hyperfréquences*", Thèse de Doctorat en Électronique. Université de Lille1, 345 pages (2003).

[37] Nicolas Baron, "*Optimisation de l'épitaxie sous jets moléculaires d'hétérostructures à base de GaN application aux transistors à haute mobilité d'électrons sur substrat silicium*", Thèse de Doctorat en Physique, Université de Nice–Sophia Antipolis, 263 pages (2009).



# Chapitre II

Généralités sur les transistors à effet de champ  
à base de matériaux à faible et à grand gap



## II.1. Introduction

Les transistors constituent sans doute la plus large part de l'activité microélectronique moderne. L'objectif de ce chapitre est de présenter les différents types des transistors à effet de champ à base de matériaux à faible gap tels que le germanium est un matériau instable et fragile pour la réalisation des transistors FETs pour l'amplification de puissance en radiofréquences, ainsi que le silicium cesse d'être compétitif au-delà de quelques GHz, et de faible puissance, mais les matériaux III–V (GaAs, InP et GaP) permettent le régime hyperfréquence de faible puissance dans les conditions ordinaires. Par contre, les matériaux à grand gap tels que l'oxyde de zinc (ZnO), le carbure de silicium (SiC), le carbone–Diamant (C–diamant), et les nitrures III–N [1]. Ces matériaux permettent d'atteindre le régime thermique (bonne tenue thermique) de puissance pour les applications en électronique de puissance et de très haute fréquence (hyperfréquence) pour les applications de télécommunication à très haute débit dans les conditions extrêmes [2].

Tout d'abord, nous proposerons une description sur les différents types des transistors à effet de champ à base de matériaux à faible gap tels que : JFETs, MOSFETs, MESFETs, et HFETs à base de l'hétérostructure AlGaAs/GaAs. De plus, sur les transistors à effet de champ à base de matériaux à grand gap.

La dernière partie de ce chapitre est consacrée à la description des transistors HFETs et HEMTs à base de GaN. Après, nous présentons la structure des transistors MOS–HEMTs à base de hétérostructures AlGaN/AlN/GaN et InAlN/AlN/GaN.

## II.2. Comparaison entre les matériaux à faible et à grand gap

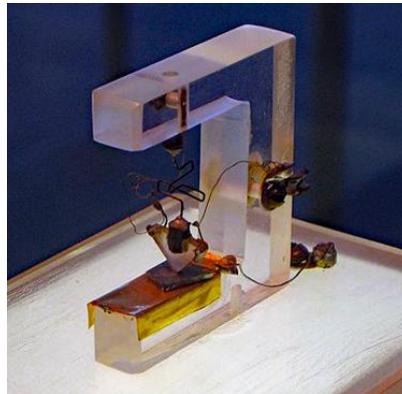
Les matériaux semiconducteurs se différencient par leurs valeurs du gap, si les valeurs sont inférieures à 2 eV, on parle des matériaux à faible gap tels que Ge, Si, GaAs, InP et GaP par exemple, ils sont préférables pour les applications ordinaires. Par contre, les matériaux à grand gap ont des valeurs de la bande interdite comprises entre 1.9 eV et 6.2 eV et sont favorisés pour les applications extrêmes : hautes pressions, contraintes mécaniques, hautes températures, et rayonnements cosmiques [3].

## II.3. Transistors à effet de champ à base de matériaux à faible gap

### *II.3.1. Historique des transistors*

John Bardeen et Walter Brattain ont été intégrés dans l'équipe de William Shockley, ils ont commencés à travailler un nouveau dispositif, qui sera nommé par la suite «*transistor* », le mot

transistor désignant «*transfer resistor*» [4], il a été développé en 1947. La figure (II–1) représente le premier transistor fabriqué à base de germanium à deux contacts d’Or [5].



**Figure II–1:** Premier transistor fabriqué à base de germanium à deux contacts d’Or [6].

### ***II.3.2. Principe de fonctionnement des transistors FETs***

Les transistors à effet de champ dénommés **TEC** ou **FETs** (**F**ield **E**ffect **T**ransistors) sont des composants unipolaires, contient trois contacts : un contact Schottky (appelé grille, noté G) entre deux contacts ohmiques appelés source (noté S) et drain (noté D). Par convention, la source est reliée à la masse ( $V_s = 0$  V). Les tensions appliquées à la grille et le drain sont respectivement notés  $V_{gs}$  et  $V_{ds}$  [7]. Le principe de fonctionnement des transistors FETs est basé sur la modulation de la conductivité du canal (la densité des porteurs) par un champ électrique transversal (tension de commande) appliqué à la grille [8].

### ***II.3.3. Réseau de caractéristiques des transistors FETs***

La figure (II–2) représente le réseau de caractéristiques des transistors à effet de champ constitué les caractéristiques de sortie  $I_{ds}=f(V_{ds})$  et les caractéristiques de transfert  $I_{ds}=f(V_{gs})$  [9].

#### ***a) Régime ohmique***

Régime ohmique pour lequel le composant se comporte comme un barreau résistif et dont on peut extraire le paramètre de  $R_{on}$  qui est fonction de la tension  $V_{ds}$  avec une tension de grille constante. Ce mode est souvent utilisé dans les transistors à effet de champ pour les applications de résistance commandée.

#### ***b) Régime saturé***

Régime pour lequel la résistance du canal est très élevée et ne varie pas ou peu en fonction de la tension de drain. C’est le régime d’utilisation du composant pour les applications de type amplification.

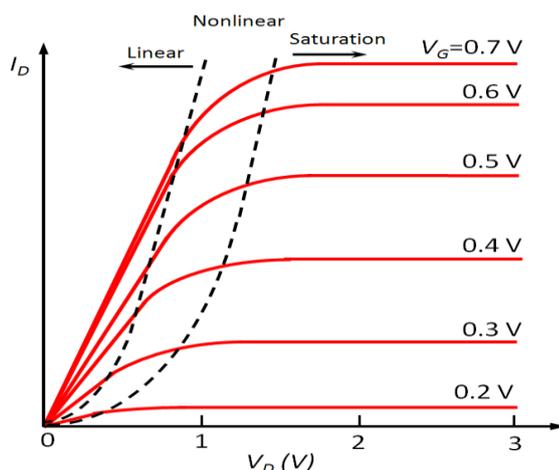


Figure II–2: Réseau caractéristique d'un transistor à effet de champ [10].

### II.3.4. Transistors JFETs à base de Ge

Les transistors à effet de champ à jonction  $pn$  **JFETs** (**J**unction **F**ield **E**ffect **T**ransistors) sont des composants de structure plane. Ils sont constitués par une couche mince de matériau semiconducteur de type  $n$  (pour les transistors **JFETs** canal  $n$ ), sur un substrat de type  $p$  [1]. Dans les transistors à effet de champ à jonction (JFETs), la variation de la tension de polarisation permet la modulation de la largeur de la zone de charge d'espace de la jonction latérale " $p^+n$ ". Autrement dit, la variation de la polarisation module la variation de la section conductrice du canal. Sans polarisation, il peut y avoir une zone de désertion (déplétion) sur une certaine profondeur dans le canal. La désertion est liée à différents paramètres tels que le matériau de la grille et les propriétés d'interface [1].

En outre, dans le domaine de l'électronique de puissance hyperfréquences, le germanium est instable et fragile pour la réalisation des transistors FETs de puissance hyperfréquences [8].

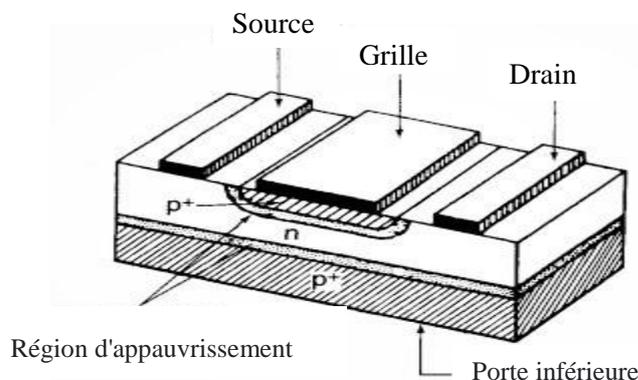


Figure II–3: Schéma de principe des transistors à effet de champ à jonction  $pn$  JFETs [11].

### II.3.5. Transistors MOSFETs à base de Si

Les transistors **MOSFETs**, acronyme anglais de **Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistors**, en français Transistors à Effet de Champ à grille isolée, comme tous les transistors ou même les tubes à vide. Les transistors MOSFETs module le courant qui le traverse à l'aide d'une tension appliqué sur la grille.

Les premiers transistors furent élaborés en silicium. Cependant, bien que ce matériau possède de nombreuses qualités (structure simple, peu onéreux, facile à réaliser) [12].

La réduction des dimensions des transistors FETs permet une croissance du nombre de transistors par puce électronique pour les applications de la microélectronique. Cependant, la diminution de la taille des transistors à base de silicium est limitée par les propriétés physiques de ce matériau, par exemple la mobilité électronique.

Par conséquent, la technologie des transistors MOSFETs à base de silicium ne permettra pas de suivre la loi de réduction d'échelle et donc de préserver une autonomie des systèmes électriques [13]. Le silicium cesse d'être compétitif au-delà de quelques GHz, et de faible puissance dans les conditions ordinaires [8].

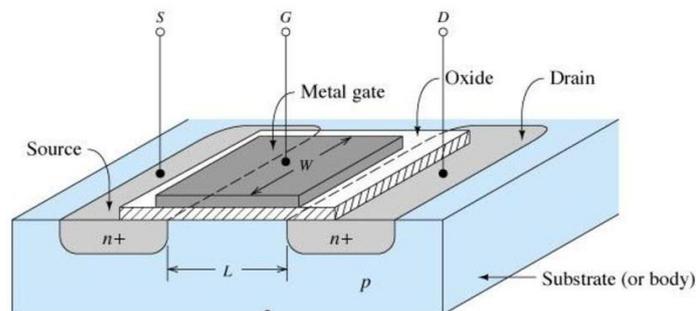


Figure II-4: Structure des transistors MOSFETs [11].

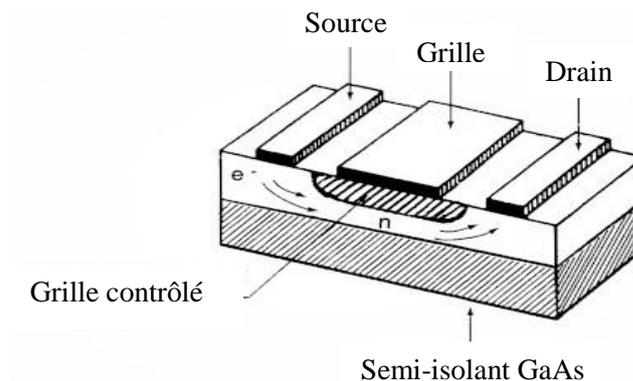
### II.3.6. Transistors MESFETs à base de GaAs

Les transistors **MESFETs**, acronyme anglais de **Metal Semiconductor Field Effect Transistors**, en français transistors à effet de champ à barrière Schottky.

Les transistors à barrière Schottky à base de l'arséniure de gallium (GaAs) sont les plus anciens transistors à effet de champ des fréquences très élevées et son technologie sont maintenant bien établie [14]. Le remplacement du silicium des premiers transistors FETs par un semiconducteur III-V tel que l'arséniure de gallium (GaAs). Cette évolution au niveau du matériau a permis l'utilisation des transistors MESFETs aux fréquences microonde; en raison de leur mobilité très élevée. En effet, les propriétés de transport électronique de GaAs permettent d'obtenir des

densités de porteurs dont la vitesse moyenne dans le canal est bien supérieure à celle du silicium. La technologie des transistors MESFETs à base de GaAs présente de meilleures performances pour des applications de hautes fréquences [15].

La base du fonctionnement des transistors MESFETs est la possibilité de moduler l'épaisseur du canal sous le champ électrique appliqué à la grille. Une couche dépeuplée d'électrons libres, appelée zone de charge d'espace (ZCE), se crée sous la grille. Aucun courant ne peut traverser cette couche. La région où le courant peut circuler est donc réduite à la fraction de la couche active non dépeuplée [1].



**Figure II-5:** Schéma de principe des transistors MESFETs à base de GaAs [11].

### ***II.3.7. Transistors HFETs à base de l'hétérostructure AlGaAs/GaAs***

Dans les transistors MESFETs à base de GaAs, les électrons assurant la conduction ont une mobilité limitée par des interactions avec les atomes donneurs, pour dépasser ce problème, il fut créé des transistors à hétérostructure qu'on appelle HFETs.

Par définition les hétérostructures en générale résultent de l'ajustaposition de deux matériaux différents : métal/semiconducteur, semiconducteur-1/semiconducteur-2 et emiconducteur/Isolant, et HFETs

Dans les transistors HFETs (**H**eterostructure **F**ield **E**ffect **T**ransistors) à base de l'hétérostructure AlGaAs/GaAs, les centres pièges présentés à l'interface de l'hétérojonction AlGaAs/GaAs créent des courants de fuites qui sont responsables de la réduction des performances des transistors, car la réduction de la mobilité des porteurs qui résulte d'une réduction du courant est due aux défauts et aux imperfections et à une réduction de la fréquence de fonctionnement [16].

Parmi les avantages de l'hétérostructure AlGaAs/GaAs est la mobilité électronique élevée qui permet d'atteindre de bonnes performances des transistors FETs pour les applications hautes fréquences [17].

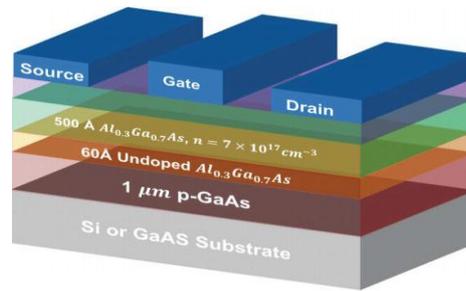


Figure II–6: Structure des transistors HFETs à base de l'hétérostructure AlGaAs/GaAs [18].

## II.4. Transistors à effet de champ à base de matériaux à grand gap

### II.4.1. Transistors FETs à base de ZnO

L'oxyde de zinc (ZnO) est un matériau à grand gap très attractif. Il est utilisé comme substrat dans des structures GaN, car il présente un désaccord de maille de 2% qui peut être accommodé dans ces systèmes [1]. Généralement, l'oxyde de zinc (ZnO) permet de fabriquer facilement des capteurs, en utilisant l'avantage de sa très grande constante piézoélectrique et son coefficient de couplage électromécanique. Cependant, la technologie de composants plus sophistiqués et totalement basés sur ZnO n'est pas encore mure. Bien que, certains travaux ont rapporté la possibilité de fabriquer des composants optoélectroniques de type photo-détecteurs UV [19], les photoconducteurs [20], les photodétecteurs à barrière de Schottky [21], et les structures MSM [22].

Les difficultés essentielles résident dans la maîtrise de la technologie ZnO et concernent trois aspects fondamentaux:

- ☑ la difficulté de fabriquer des couches épitaxiées très minces, à cause de la tendance naturelle de ZnO de croître sous forme de fils quantiques (nanorods) et ce par toutes les techniques de croissance élaborées (OMVPE, MBE, MOCVD),
- ☑ la difficulté de contrôler les couches barrières, à cause de sa difficile miscibilité avec des matériaux à plus grand gap tels que MgO,
- ☑ la difficulté de doper de type *p* les couches de ZnO et ZnMgO.

Ces difficultés commencent à être progressivement résolues. En effet, des travaux récents [23, 24] rapportent la réalisation de transistors ZnO à couches minces, qui permettent d'envisager la réalisation de transistors à effet de champ ; comme illustre dans la figure (II–6). Cependant, il reste encore très difficile de pouvoir réaliser des composants viables tels que les transistors à effet de champ de type HFETs.

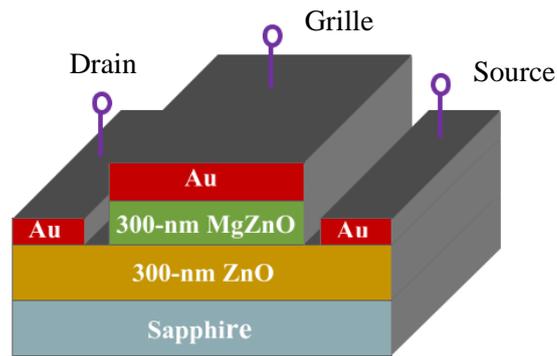


Figure II-7: Structure des transistors FETs à base de ZnO [25].

### II.4.2. Transistors FETs à base de SiC

Le carbure de silicium (SiC) permet d'atteindre une meilleure conductivité thermique, une vitesse de saturation des électrons très élevée et une haute tension de claquage pour les applications hautes puissances [8]. En rapport avec la valeur élevée du gap de SiC, les courants de fuites sont très faibles même à haute température [2].

### II.4.3. Transistors FETs à base de C-diamant

Le C-diamant permet d'atteindre une conductivité thermique très élevée (bonne tenue thermique), grande mobilité, fort champ électrique de claquage, mais l'impossibilité de dopage de type  $n$  interdit de réaliser des jonctions  $pn$  à base de C-diamant [8].

### II.4.4. Transistors FETs à base de nitrure de gallium GaN

L'intérêt des nitrures III-N réside dans leurs propriétés, comme une conductivité thermique élevée (stabilité thermique), présentent une forte densité de puissance, hautes mobilités électroniques, fortes champs électriques, hautes tensions de claquage, et une extrême dureté. Ainsi également, permettent de réaliser les hétérostructures AlGaN/GaN utilisés pour la réalisation des transistors à haute mobilité électronique HEMTs et à haute mobilité de puissance en hyperfréquences de l'ordre de THz, et de haute température (conditions extrêmes, car résistant à des hautes pressions, des contraintes mécaniques,...etc) [8].

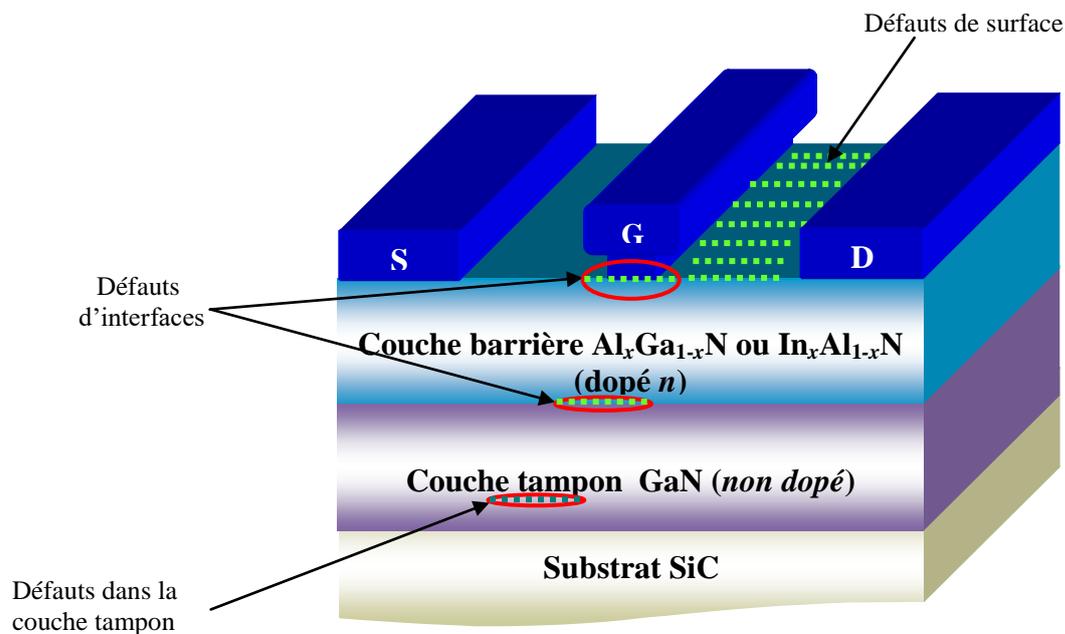
## II.5. Transistors à effet de champ à base de nitrure de gallium (GaN)

### II.5.1. Transistors à hétérojonction (HFETs)

L'hétérojonction utilisée pour les transistors à effet de champ de type HFETs (Heterojunction Field Effect Transistors) [26], est à l'heure actuelle conçue à partir des matériaux à grand gap pour former des hétérostructures de type  $Al_xGa_{1-x}N/GaN$  ou  $In_xAl_{1-x}N/GaN$  afin de générer des

puissances importantes. L'augmentation d'une manière significative de la tension de claquage de 50 V à 160 V des transistors HFETs en optimisant la forme de son contact de grille [27]. La force du champ électrique sur la grille côté drain a pu être réduite, permettant aussi une polarisation de drain élevée sans risque de destruction du composant [28].

Il y a plusieurs avantages intrinsèques liés à l'utilisation du matériau GaN, mais il y a aussi des défauts sont localisés en volume, en surface et à l'interface peuvent être fixes, comme montre la figure (II-8). Un des moyens utilisé pour réduire les défauts est l'utilisation d'une couche oxyde. La diffusion des porteurs du canal vers la couche tampon GaN traduit une faible résistivité de cette dernière par un dopage de type accepteur permet d'améliorer la résistivité de la couche tampon et donc d'améliorer le confinement des porteurs dans le canal. L'utilisation de la couche espaceur AlN permet de séparer spatialement les porteurs du gaz 2D sur les ions donneurs bloqués dans la couche barrière [29].



**Figure II-8:** Schématisation des transistors HEMTs à base de l'hétérostructure  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/(\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N})/\text{GaN}$  identifiant les zones critiques qui peuvent subir des dégradations [30].

### II.5.2. Transistors à haute mobilité électronique (HEMTs)

Les transistors à haute mobilité électronique (HEMTs) appelé également **MODFETs** (**MO**dulation **D**oped **F**ield **E**ffect **T**ransistors), **TEGFETs** (**T**wo-dimensional **E**lectron **G**as **F**ield **E**ffect **T**ransistors) ou encore HFETs [31].

Les transistors **HEMTs** (**H**igh **E**lectron **M**obility **T**ransistors) à base de nitrure de gallium, qui est un semiconducteur à grand gap ( $E_g = 3.4$  eV), fait l'objet des nombreux travaux des recherches [32].

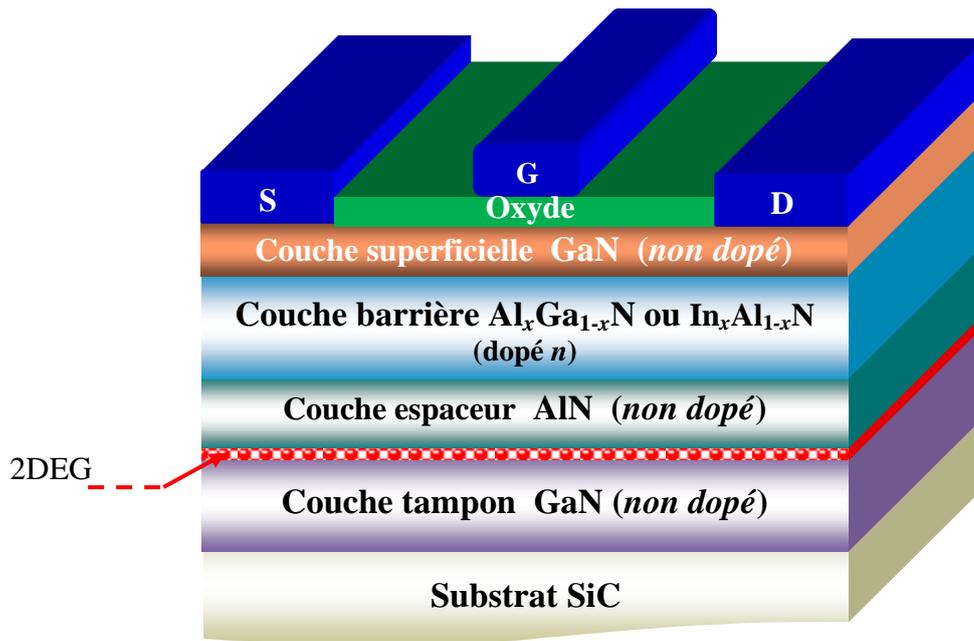
Contrairement aux autres transistors à effet de champ, dans les transistors HEMTs le transfert du courant se fait grâce à la formation à l'hétérojonction d'un «*puits de potentiel*» qui tiendra le rôle de canal. L'hétérojonction permet la séparation des atomes donneurs ionisés (dopants) des électrons libres. Ces électrons sont alors confinés dans le puits de potentiel sous forme d'un gaz d'électrons bidimensionnel (2DEG), où ils peuvent atteindre des mobilités importantes. Son nom HEMTs provient de cette propriété. Ce concept des composants est utilisé principalement avec des technologies III–V [33].

### ***II.5.3. Transistors à haute mobilité électronique à grille isolée (MOS-HEMTs)***

Les transistors HEMTs présentent un courant de grille élevée à température élevée, Ils sont donc nécessaire de déterminer les mécanismes de transport qui sont responsables de cette augmentation du courant de grille. Dans cette optique, des progrès significatifs ont été réalisés sur AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> metal–oxide–semiconductor high electron mobility transistors (MOS–HEMTs) en utilisant un matériau oxyde parmi les autres matériaux indiqués dans le tableau (II–1).

Le but de la couche mince d'oxyde insérée ci-dessous du contact Schottky (la grille) dans la structure des transistors HEMTs permet de réduire le courant de fuite de la grille. La structure des transistors à haute mobilité électronique à grille isolée (MOS–HEMTs) est illustrée sur la figure (II–9) [34].

La structure des transistors MOS–HEMTs à base des matériaux nitrures utilisant un canal en Ga<sub>N</sub> et une barrière en AlGa<sub>N</sub> ou InAl<sub>N</sub> pour créer l'hétérojonction est la plus répandue. Pour mieux comprendre le rôle de chacune des couches de la structure ainsi que leur impact sur les performances du transistor, une description de ces différentes couches est détaillée ci-dessous.



**Figure II-9:** Structure physique des transistors MOS–HEMTs à base de l'hétérostructure  $Al_xGa_{1-x}N/AlN/GaN$  étudiée.

☑ **Substrat** : cette couche permet également d'avoir un matériau de base de bonne qualité cristallographique nécessaire à la croissance des autres couches [35].

☑ **Couche tampon** : également appelée «*buffer layer*», elle permet d'améliorer le confinement des électrons dans le canal en réduisant l'injection des porteurs vers le substrat. Cette couche permet également d'éliminer les imperfections du substrat, afin d'avoir un matériau de bonne qualité cristallographique nécessaire à la croissance des couches supérieures. En effet, le paramètre essentiel qui conditionne une épitaxie de qualité est la différence de maille entre le substrat et le cristal de GaN [36].

☑ **Canal** : le canal du transistor est formé à l'interface de l'hétérojonction AlN/GaN. Elle est importante dans la mesure où reçoit le gaz d'électrons bidimensionnel (2DEG) qui déterminera les performances du composant à travers les propriétés de transport des électrons dans le matériau [14].

☑ **Couche espaceur** : est également appelée «*spacer layer*», formée par un matériau à grand gap non intentionnellement dopé, permettant de séparer spatialement les atomes donneurs fixés dans la couche barrière sur les électrons du canal. Les interactions à distance électrons–impuretés sont ainsi réduites (réduire la force Colombienne). Plus l'épaisseur de cette couche ne sera très étroite, la mobilité des électrons dans le canal devient plus élevée [37].

☑ **Couche barrière** : cette couche est formée par  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  ou  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$  qui fournit des électrons libres à l'interface de l'hétérojonction  $\text{AlN}/\text{GaN}$  et son dopage est généralement volumique réalisé par un plan de dopage silicium.

☑ **Couche superficielle** : est appelée «*cap layer*», a pour rôle l'optimisation de la résistance des contacts ohmiques de drain et de source. Cette fine couche de nitrure de gallium permet également de réduire les résistances d'accès.

☑ **Couche oxyde** : parmi les problèmes des performances dans les transistors à effet de champ HEMTs sont les courants de fuites dû aux les états d'interfaces. Pour améliorer les performances des transistors en insérant une couche oxyde entre le contact Schottky (la grille) et la couche barrière ( $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  ou  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ ), cette couche permet la construction des transistors MOS–HEMTs. Parfois on dépose une couche superficielle (cap layer) au-dessus de la couche barrière au lieu de la couche oxyde [8]. Le tableau (II–1) ci-dessous représente une comparaison entre les différents matériaux oxyde.

**Tableau II–1:** Comparaison entre les constantes diélectriques des plusieurs matériaux diélectriques et leurs utilisations [38].

Matériaux	Permittivité ( $\kappa$ )	Utilisation	Commentaires
$\text{SiO}_2$	3.9	Passivation	Réduire le courant de fuite et effondrement
$\text{SiN}_x$	7.5	Passivation	Réduire le courant de fuite et effondrement
GaN	9.5	Passivation	Réduire le courant d'effondrement
$\text{Al}_2\text{O}_3$	10	Passivation/isolation de la grille	Réduire le courant de fuite et effondrement
$\text{Gd}_2\text{O}_3$	11.4	Isolation de la grille	Faible réduction du courant de fuite
$\text{Pr}_2\text{O}_3$	14	Isolation de la grille	Faible courant de fuite
$\text{HfO}_2$	20-25	Passivation/isolation de la grille	Réduire le courant de fuite et effondrement
$\text{Ta}_2\text{O}_5$	25	Isolation de la grille	Faible courant de fuite
$\text{ZrO}_2$	25-30	Passivation/isolation de la grille	Réduire le courant de fuite et effondrement
$\text{TiO}_2$	24-96	Passivation/isolation de la grille	Réduire le courant de fuite et effondrement

☑ **Contacts Schottky et Ohmiques** : la grille du transistor est réalisée par un dépôt métallique sur le semiconducteur, formant ainsi ce qu'on appelle une jonction de type Schottky.

Une courbure de la bande de conduction est formée entre le métal et le semiconducteur, résultant des affinités électriques si différentes entre eux. Cette courbure de la bande de conduction crée sous le dépôt métallique une zone de charge d'espace [8].

Les transistors à haute mobilité électronique (HEMTs) à base de nitrures sont une technologie largement reconnue pour les applications de haute puissance en hyperfréquences, du fait des propriétés exceptionnelles des matériaux III-N [39].

## **II.6. Comparaison entre les transistors FETs et bipolaires à base de GaN**

Les transistors bipolaires à hétérojonction TBHs à base de GaN sont également être étudiés actuellement. Ils présentent plusieurs avantages sur les transistors à effet de champ (meilleure intégration et linéarité et plus faible bruit de phase). Le développement de ce type du composant est resté cependant longtemps limité pour les problèmes de dopage de type  $p$ , ce qui explique la réalisation récente du premier TBH à base de GaN [40].

Le GaN intéressant pour la réalisation des transistors bipolaires à hétérojonction (HBTs) haute température  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}(n)/\text{GaN}(p)/\text{GaN}(n)$  plus performant que les transistors à base de  $\text{AlGaAs}(n)/\text{GaAs}(p)/\text{GaAs}(n)$  [1]. En fait, plusieurs difficultés limitent les performances de ce type de réalisation. L'une d'autre elle est la densité encore trop importante des défauts, qui limite la mobilité des porteurs à des valeurs très inférieures à celle de GaAs. Mais le principal problème est lié à la difficulté de doper GaN de type  $p$  au-delà de  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . Ceci interdit la réalisation des transistors de type  $np^+n$ . Le principal problème est d'utiliser une base très étroite, parce que très dopé, pour augmenter la fréquence du transistor [41].

## II.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté brièvement l’historique des transistors, puis on introduire leurs principe de fonctionnement et leurs différents types à base de matériaux à faible et à grand gap, notés successivement JFETs, MESFETs, MOSFETs, HFETs, HEMTs et MOS–HEMTs. Alors que, les transistors à haute mobilité (HEMTs) sont des dispositifs électroniques opérant à des hautes fréquences avec des vitesses très élevées grâce aux propriétés du matériau de base et leur principe de base consistent à mettre à profit les propriétés de haute mobilité d’un gaz d’électrons bidimensionnel (2DEG) à partir de la séparation physique des électrons libres sur les donneurs ionisés dont ils proviennent. En outre, nous avons insisté sur le choix de la technologie des nitrures qui intervient dans la réalisation des transistors.

Après, nous avons donné une description de la structure et les différentes couches des transistors MOS–HEMTs à base de l’hétérostructure AlGa<sub>N</sub>/AlN/GaN, pour les applications de télécommunication à très haut débit et l’électronique de puissance.

## Références du chapitre II

- [1] Henry Mathieu, "*Physique des semiconducteurs et des composants électroniques*", 6<sup>ème</sup> Edition. Masson, Paris, 853 pages (2009).
- [2] H. Morkoç, S. Strite, G.B. Gao, M.E. Lin, B. Sverdlov, and M. Burns, "*Large band gap SiC, III–V nitride, and II–VI ZnSe based semiconductor device Technologies*", J. Appl. Phys., **76**, 1363–98 (1994).
- [3] B.G. Yacobi, "*Semiconductor materials, an introduction to basic principles*". Kluwer Academic Publishers, University de Toronto, Canada, 228 pages (2003).
- [4] S.M. Sze, "*Semiconductor Devices Physics and Technology*", Bell. Marry Hill. New Jersey, 523 pages (1985).
- [5] Derrouiche Soufiane, "*Étude, modélisation et simulation des transistors HEMTs à base de l'InAlAs/InGaAs/InAsP*", Thèse de Doctorat en Microélectronique, Université de Aboubakr Belkaïd Tlemcen, 182 pages (2019).
- [6] Cezar Bogdan Zota, "*III–V MOSFETs for High-Frequency and Digital Applications*", Université de Lund, Thèse de Doctorat en électronique, 148 pages (2017).
- [7] Thi Dak Ha Nguyen, "*Réalisation et caractérisation de HEMTs AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> sur silicium pour applications à haute tension*", Thèse de Doctorat en Electronique, Université Paris Sud, 186 pages (2013).
- [8] Bouguenna Driss, "*Etude comparative et modélisation des transistors à effet de champ MODFETs et MOS–MODFETs à base de nanostructure de nitrures III–V Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/GaN cubique*", Thèse de Doctorat en Electronique. USTO, 157 pages (2014).
- [9] Belarbi Abdelmalik, "*Transistor DHFET à base d'InGa<sub>N</sub> simulation et optimisation de ses performances DC et RF par le logiciel Silvaco*", Mémoire de Magister en Nanophysique et Nanotechnologie, Université Abou Bakr Belkaïd Tlemcen, 156 pages (2014).
- [10] Tschumak Elena, "*Cubic Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/GaN heterojunction field effect transistors fabrication and characterisation*", Thèse de Doctorat en Physique, Université de Paderborn, 113 pages (2010).
- [11] S.M Sze, K.Ng. Kwok, "*Physics of semiconductor devices*", 3<sup>ème</sup> Edition. Wily Interscience, Canada , 832 pages (2006).
- [12] S.M. Sze, "*Physics of semiconductor devices*", 2<sup>nd</sup> Edition, 868 pages (1981).
- [13] Mohamed Ridaoui, "*Fabrication et caractérisation de MOSFET III–V à faible bande interdite et canal ultra mince*", Thèse de Doctorat en Électronique, Microélectronique,

- Manotechnologie et Microondes, Université des Sciences et Technologies de Lille, 144 pages (2017).
- [14] Kourdi Zakarya, "*Transistors à haute mobilité électronique InAlN/GaN et AlGaAs/InGaAs: Simulation et comparaison des performances électriques*"., Thèse de Doctorat en Electronique, Université de Aboubakr Belkaïd Tlemcen, 147 pages (2016).
- [15] Kaddeche Mourad, "*Modélisation et analyse de l'effet du field plate avec couche diélectrique high- $\kappa$  sur les propriétés électriques des HEMTs  $Al_mGa_{1-m}N/GaN$* "., Thèse de Doctorat en Microélectroniques et Microondes, Université de Constantine 1, 113 pages (2014).
- [16] R. Oberhuber, G. Zandler, and P. Vogl, "*Mobility of two-dimensional electrons in  $Al_xGa_{1-x}N/GaN$  modulation doped field effect transistors*"., J. Appl. Phys. Lett., **73**, 818–820 (1998).
- [17] Gassoumi Malek, "*Etude des défauts électriquement actifs dans les composants hyperfréquences de puissance dans les filières SiC et GaN*"., Thèse de Doctorat en Matière condensée, Surface et Interface, Université de Monastir, 170 pages (2006).
- [18] Momčilo Pejović, Milić M. Pejovic, "*Different types of field effect transistors – theory and applications*"., IntechOpen, 192 pages (2017).
- [19] Y. Liu. C.R. Gorla. S. Liang. N. Emanetoglu. Y. Lu. H. Shen. M. Wraback, "*Ultraviolet detectors based on epitaxial ZnO films grown by MOCVD*"., J. Electron. Mater, **29**, 69–74 (2000).
- [20] H. Fabricius, T. Skettrup and P. Bisgaard, "*Ultraviolet detectors in thin sputtered ZnO films*"., Applied Optics, **25**, 2764–2767 (1986).
- [21] S. Liang, H. Sheng, Y. Liu, H. Huo, Y.Lu and H. Shen, "*ZnO Schottky Ultraviolet Photodetectors*"., J. Cryst. Growth 225, 110–113 (2001).
- [22] W. Nuri, Emanetoglu, Jun Zhu, Ying Chen, Jian Zhong, Yimin Chen, and Yicheng Lu, "*Surface acoustic wave ultraviolet photodetectors using epitaxial ZnO multilayers grown on r-plane sapphire*"., Appl. Phys. Lett. **85**, 3702–3704 (2004).
- [23] R.L. Hoffman, "*ZnO-channel thin-film transistors: Channel mobility*"., J. Appl. Phys, 95, 5813–5819 (2004).
- [24] Y. Kwon, Y. Li. Y.W. Heo. M. Jones. P.H. Holloway and D.P. Norton, "*Enhancement mode thin film field effect transistor using phosphorus-doped (Zn,Mg)O channel*"., Appl. Phys. Lett. **84**, 2685–2687 (2004).
- [25] J.D. Hwang, C.M. Chu., "*Post oxidation in improving the Schottky gate MgZnO/ZnO heterojunction field effect transistors fabricated by RF sputtering*"., Materials Science and Engineering B, 266, 115063 (2021).

- [26] M. Asif Khan, A. Bhattacharai, J.N. Kuznia, and D.T. Olsen, "*High Electron Mobility Transistor based on  $Al_xGa_{1-x}N/GaN$  heterojunction*", Appl. Phys. Lett., **63**, 1214–15 (1993).
- [27] M. Asif Khan, Q. Chen, and C.J. Sun, "*Tow dimensionel electron gas in  $Al_xGa_{1-x}N/GaN$  heterostructutre deposited using trimethylamine–alane as the aluminium source in low pressure metalorganic chemical vapor deposition*", Appl. Phys. Lett., **67**, 1429–1431 (1995).
- [28] Y. Okamoto, Y. Ando, H. Miyamoto, T. Nakayama, T. Inoue, M. Kuzuhara, "*An 80W  $Al_xGa_{1-x}N/GaN$  heterojunction FET with a field–modulating plate*", Microwave Symposium Digest, IEEE MTT–S Internationl, **1**, 225–228 (2003).
- [29] Séraphin Dieudonné Nsele, "*Analyse électrique et en bruit basse fréquence et haute-fréquence des technologies InAlN/GaN HEMTs en vue de la conception d'amplificateurs robustes faible bruit en bande Ka*", Thèse de Doctorat en Électromagnétisme et Systèmes Haute Fréquence, Université de Toulouse, 185 pages (2014).
- [30] G. Meneghesso, G. Verzellesi, F. Danesin, F. Rampazzo, F. Zanon, A. Tazzoli, M. Meneghini, and E. Zanoni, "*Reliability of GaN high electron mobility transistors: state of the Art and Perspectives*", IEEE Trans. Device Mater. Reliab, **8**, 332–343 (2008).
- [31] Stéphanie Rennesson, "*Développement de nouvelles hétérostructures HEMTs à base de nitrure de gallium pour des applications de puissance en gamme d'ondes millimétriques*", Thèse de Doctorat en Physique, Université de Nice – Sophia Antipolis, 159 pages (2013).
- [32] El Makoudi Ikram, "*Etude et fabrication de transistors a enrichissement de la filière InAlAs/InGaAs pour applications millimétrique faible bruit*", Thèse de Doctorat en Micro et Nanotechnologies, Université de Lille 1, 179 pages (2010).
- [33] Callet Guillaume, "*Caractérisation et modélisation de transistors HEMT AlGaN/GaN et InAlN/GaN pour l'amplification de puissance en radiofréquences*", Thèse de Doctorat en Electronique des Hautes Fréquences, Photonique et Systèmes, Université de Limoges, 190 pages (2011).
- [34] Touati Zine-eddine, "*Contribution à la modélisation non linéaire et l'optimisation des transistors à effet de champ à hétérojonction par des méthodes intelligentes*", Thèse de Doctorat en Électronique, Université de Mohamed Khider Biskra, 152 pages (2019).
- [35] Nifa Iliass, "*Caractérisation et modélisation du gaz 2D des dispositifs MISHEMTs sur GaN*", Thèse de Doctorat en Nano électronique et nano technologie, Université Grenoble Alpes, 209 pages (2016).
- [36] Mouetsi Souheil, "*Contribution à l'étude du bruit basse fréquence dans des hétérostructures AlGaAs/GaAs/AlGaAs*", Thèse de Doctorat en Electronique, Université de Mentouri Constantine, 156 pages (2010).

- [37] N. Maeda, T. Saitoh, K. Tsubaki, T. Nishida, N. Kobayashi, "Two dimensional electron gas transport properties in AlGa<sub>N</sub>/(In)Ga<sub>N</sub>/AlGa<sub>N</sub> double heterostructure field effect transistors"., MIJ–NSR, **5**, 362–368 (2000).
- [38] Manzanera Teresa Partida, "Atomic layer deposition of tantalum doped aluminium oxide as a gate dielectric for GaN based power transistors"., Thèse de Doctorat en Philosophie, Université de Liverpool, 269 pages (2017).
- [39] Linh Trinh Xuan, "Fonction normally–on, normally–off compatible de la technologie HEMT GaN pour des applications de puissance, hyperfréquences"., Thèse de Doctorat en Sciences et Ingénierie pour l'Information–Électronique des Hautes Fréquences, Photonique et systèmes Université de Limoges, 215 pages (2018).
- [40] F. Wuy, B.P. Keller, P. Fini, S. Keller, T.J. Jenkins, L.T. Kehias, "Hight Al content Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/GaN MODFETs for ultra high performance"., IEEE Electron Dev. Lett., **19**(2), 50–53 (1998).
- [41] L.S. Mecarthy, P. Kozodoy, M.J.W. Rodwell, S.P. DenBaars, and U.K. Mishra, "Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/GaN hetojunction bipolar transistor"., IEEE Electron Dev. Lett., **20**(6), 277–279 (1999).



# Chapitre III

## Transistors à effet de champ à modulation de dopage MODFETs



### III.1. Introduction

Dans les transistors MESFETs, les électrons assurant la conduction ont une mobilité limitée par des interactions avec les atomes donneurs, pour dépasser ce problème, il fut créé des transistors à hétérostructures qu'on appelle les transistors à modulation de dopage MODFETs.

Les transistors **MODFETs** (**MO**dulation **D**oped **F**ield **E**ffect **T**ransistors) encore appelés dans la littérature **TEGFETs** (**T**wo **E**lectron **G**as **F**ield **E**ffect **T**ransistors) ou **HEMTs** (**H**igh **E**lectron **M**obility **T**ransistors), ou encore **SDHTs** (**S**electively **D**oped **H**eterojunction **T**ransistors) [1].

La réduction de la mobilité des porteurs dans les transistors MODFETs à base de l'hétérostructure AlGaAs/GaAs c'est les centres pièges présents dans à l'interface, les défauts de surface et les imperfections qui sont résulte une réduction des performances électriques statiques et dynamiques des transistors à haute mobilité électronique [2].

L'utilisent des matériaux à grand gap tel que le nitrure de gallium GaN permet de réaliser différents types des hétérostructures tels que  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  et  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  présente des conductances du canal élevées, de grandes mobilités de porteurs, et des fréquences de coupures très importantes qui sont limitées par la densité de porteurs et les résistances séries de parasite [3] et pour améliorer les performances électriques en terme de puissance hyperfréquences des transistors MODFETs [4].

L'objectif de la modulation de dopage de la couche barrière dans les transistors MODFETs permet de séparer spatialement les électrons du canal par rapport aux ions donneurs localisées dans la couche barrière  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  ou  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$  (minimiser la force Colombienne) et pour augmenter la densité de porteurs. La réduction de la densité de défauts dans la couche qui forme le canal des transistors et améliorer la mobilité des porteurs est ce fait aussi par cette méthode [5], qui permet d'atteindre un bon confinement des électrons dans le canal et de réduire le courant de fuite dans la diode de Schottky de grille [6].

Enfin, nous évoquerons les limites des performances des composants tels que l'effet d'effondrement du courant. Nous citerons les origines des pièges et leurs conséquences sur les performances des transistors MODFETs. Suivant cette problématique, exposerons la stratégie choisie au cours de ce travail pour déterminer les mécanismes physiques responsables de la non-idéalité du comportement des transistors MODFETs.

### III.2. Transistors MODFETs à base des matériaux III-V

Les premiers transistors MODFETs sont apparus en 1980 (Fujitsu, Thomson) [7, 8]. Ces hétérostructures à haute mobilité électronique constituent une évolution majeure des transistors

MESFETs (FETs à hétérojonction métal/semiconducteur) et ont pris le pas sur ces derniers depuis les années 1990 [9, 10].

Le principe des transistors MODFETs est basé sur l'hétérojonction formé par un semiconducteur à faible gap et à grand gap. Les premiers transistors MODFETs à base de l'hétérojonction AlGaAs/GaAs, où on fait croître une couche tampon non intentionnellement dopée de GaAs suivie d'une couche barrière AlGaAs fortement dopée  $n^+$ . A l'interface métal/semiconducteur apparaît une barrière de potentiel pour les électrons qui correspond à la différence de travail de sortie entre le métal et le semiconducteur. Le comportement électrique de ce contact est celui d'une diode et en polarisation inverse, cette jonction se comporte comme un condensateur.

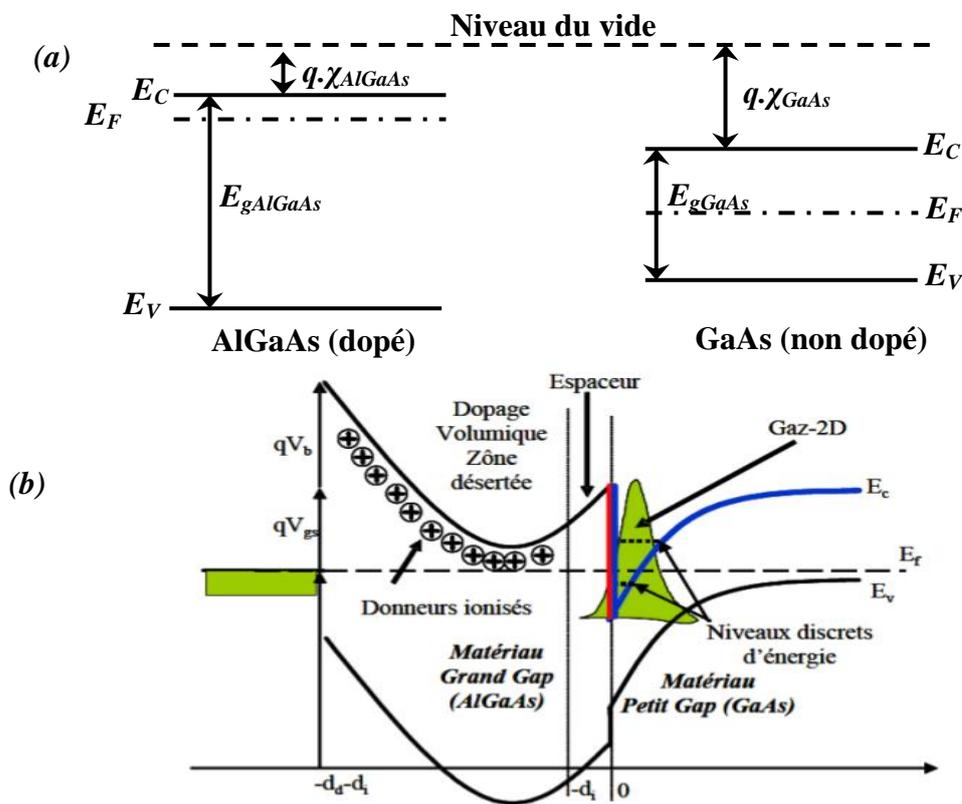


Figure III-1: Schéma d'une structure de bande d'une hétérojonction AlGaAs/ GaAs, (a) avant et (b) après contact [11].

La commande de grille étant de type Schottky, sa tension de diffusion et sa polarisation mettent la couche AlGaAs en dépletion totale [5]. Les électrons libérés par les donneurs sont transférés alors depuis le matériau ayant le plus grand gap vers celui ayant le plus faible gap GaAs, où ils forment un gaz d'électrons bidimensionnel comme illustré dans la figure (III-1b). On découvre alors que les électrons pouvaient y atteindre une très grande vitesse en raison de l'absence d'ions donneurs. Dès lors de telle structures ont été à l'origine des transistors à effet de champ à

hautes performances. Ainsi, ses propriétés de faible bruit et faible consommation d'énergie font de ce composant l'élément essentiel pour les applications d'amplification de puissance en hyperfréquences. Son effet fondamental est une source de courant contrôlée en tension. Le principe des transistors MODFETs repose sur la création d'un gaz d'électrons à mobilité élevée au sein d'un matériau non dopé GaAs et de très faibles résistances d'accès. En effet, ce gaz d'électrons se situe au cœur d'une hétérojonction entre deux matériaux de gap différents faisant partie de la structure des transistors MODFETs. L'effet fondamental est lié au phénomène de variation de la densité de porteurs de ce gaz d'électrons bidimensionnel sous l'influence d'une tension appliquée à la grille des transistors [12].

Plusieurs types de transistors à effet de champ à hétérojonction ont été élaborés :

- ☑ **HFETs** : *Heterostructure Field Effect Transistors*,
- ☑ **TEGFETs** : *Two dimensional Electron Gas Field Effect Transistors*,
- ☑ **HEMTs**: *High Electron Mobility Transistors*.
- ☑ **PHEMTs**: *Pseudomorphic High Electron Mobility Transistors*,
- ☑ **MODFETs**: *MODulation Doped Field Effect Transistors*.

Les appellations HFETs, TEGFETs, HEMTs et MODFETs indiquent des transistors à hétérojonction à maille cristalline accordées ou quasi-accordées, c'est-à-dire que tous les matériaux épitaxiés sont en accord de maille sur le substrat, le paramètre cristallin est alors identique pour tous les matériaux. Les transistors PHEMTs sont élaborés à l'aide de deux composés III-V à tailles de maille cristalline différentes mais peu éloignées, ils représentent la filière pseudo-morphique [13].

Il est préférable d'avoir deux matériaux à propriétés cristallines semblables ou quasi proches pour former une bonne hétérojonction, le désaccord de maille joue un rôle important sur la qualité du produit. Les transistors HEMTs à base de l'hétérojonction AlGaAs/GaAs ont été étudiés et exploités à leurs limites dans des domaines de fréquences allant de 50 GHz à 60 GHz et plus encore pour les transistors PHEMTs à base de l'hétérostructure AlGaAs/InGaAs/GaAs. Dans ce travail de thèse on s'intéresse alors à des nouvelles hétérostructures AlGaN/GaN et InAlN/GaN à base des matériaux nitrures.

### III.3. Caractéristiques fonctionnelles et structurelles des transistors MODFETs AlGaN/GaN et InAlN/GaN

Afin de mieux comprendre le fonctionnement des transistors MODFETs à base de l'hétérostructure  $Al_xGa_{1-x}N/GaN$  ou  $In_xAl_{1-x}N/GaN$ , nous allons décrire les différentes structures de bande des matériaux constituant ce dernier. La juxtaposition d'un matériau à large

gap  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  ou  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ , et un autre à faible gap GaN, forme une hétérojonction entraînée par la discontinuité de la bande de conduction à l'interface ( $\Delta E_c$ ). La figure (III-2) représente les niveaux d'énergie de chaque matériau avant contact [14].

Lors de leurs juxtaposition, leurs niveaux de Fermi s'alignent (règles d'Anderson), ce qui va engendrer une discontinuité dans la bande d'énergie à l'interface. La figure (III-2) illustre bien ce détail, et ce pour une tension nulle appliquée à la grille.

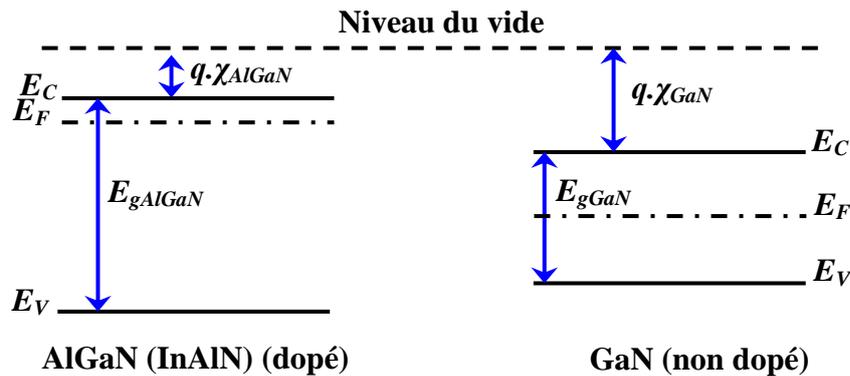


Figure III-2: Niveaux d'énergie des matériaux mis en jeu dans l'hétérojonction [15].

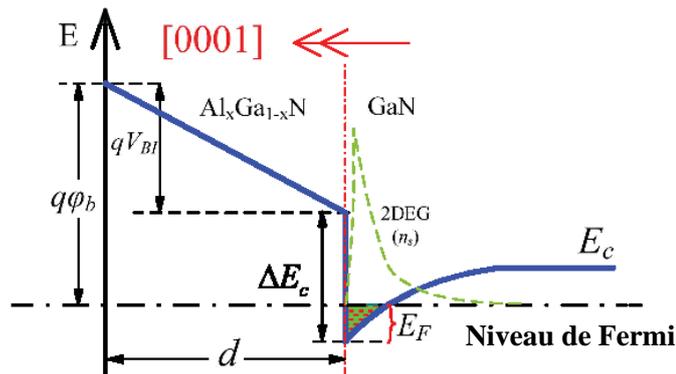


Figure III-3: Diagramme de la bande de conduction de l'hétérojonction  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  à l'équilibre thermodynamique pour une tension appliquée nulle [16].

Comme nous pouvons l'observer, un puits de potentiel quasi-triangulaire est formé à l'interface, et qui va rester écartelé dans le côté supérieur du matériau à plus faible gap, car le matériau de grande gap forme à son tour la barrière énergétique de ce puits. Les charges libres vont se regrouper à l'intérieur de ce puits, formant ainsi un gaz d'électrons bidimensionnel. Cela va donc entraîner le phénomène de conduction. Ce puits quantique n'est tout simplement que le canal.

La concentration des électrons dans ce canal dépend donc du niveau de Fermi et de la différence de largeur de bandes interdites ( $\Delta E_g$ ) entre les deux matériaux.

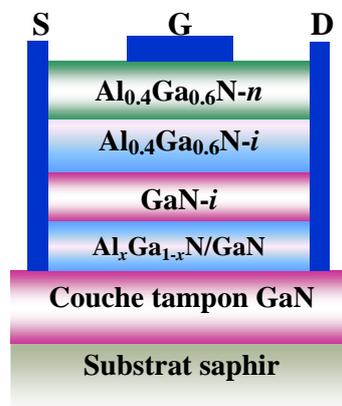
Il faut noter qu'en appliquant une tension sur la grille des transistors, on peut ainsi contrôler l'intensité du courant qui circule dans le canal. Cette tension va moduler le gaz d'électrons bidimensionnel, qui va augmenter la densité des porteurs dans le canal.

#### III.4. Etude de la structure particulière des transistors MODFETs

##### III.4.1. Structure physique des transistors MODFETs

L'amélioration des performances des transistors HEMTs, réside dans la méthode de dopage de la barrière de l'hétérojonction  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  ou  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ . Dans le cas des transistors MODFETs; la méthode utilisée consiste à moduler le dopage dans la couche barrière  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  ou  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$  [17].

Dans les transistors MODFETs à base de l'hétérostructure  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  ou  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ , les électrons du canal sont fournis par la couche  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  ou  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$  à dopage modulé. La structure schématique de ces transistors à modulation de dopage est représentée sur la figure (III-4). Le canal des transistors est constitué d'une couche de GaN avec une densité résiduelle d'électrons estimée à  $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . Les transistors sont façonnés par structure *mesa* par érosion ionique réactive (RIE) pour augmenter le champ électrique entre les contacts ohmiques (drain-source). La barrière est conçue pour recevoir le contact supérieur de Schottky de la grille ainsi que les deux contacts latéraux de la source et du drain.



**Figure III-4:** Structure schématique des transistors MODFETs  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  sur substrat saphir [18].

Un autre phénomène qui caractérise également le fonctionnement des transistors MODFETs, c'est la jonction Schottky créée par la jonction du métal de la grille et du semiconducteur du substrat.

Les transistors MODFETs  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  possèdent une grande densité de charges  $n_s$  du gaz d'électrons bidimensionnel qu'on ne peut attribuer cela uniquement à la grande discontinuité de

bande de conduction (bande offset) entre GaN et  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  mais surtout à la présence d'une forte polarisation à l'hétérointerface, comme montre dans la figure (III-3).

### III.4.2. Représentation électrique des transistors MODFETs

La figure (III-5) permet de localiser les éléments du circuit électrique équivalent dans le cas des transistors MODFETs [19]. Les valeurs des différents éléments dépendent des paramètres technologiques et de la répartition des porteurs dans le composant pour un point de polarisation donné.

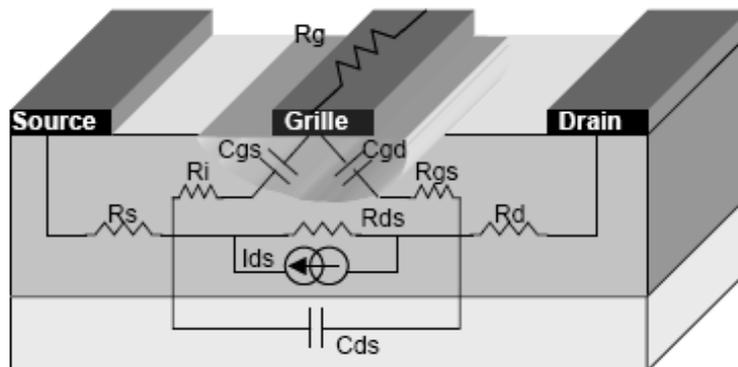


Figure III-5: Localisation des éléments du circuit équivalent des transistors MESFETs, applicable aux transistors MODFETs [20].

Les valeurs des éléments représentant le fonctionnement des transistors sont non-linéaires et dépendent des variables électriques que sont les tensions « grille-source » et « drain-source ». La figure (III-6) est la représentation électrique des transistors à effet de champ plus réaliste tenant compte des principaux effets non linéaires parasites.

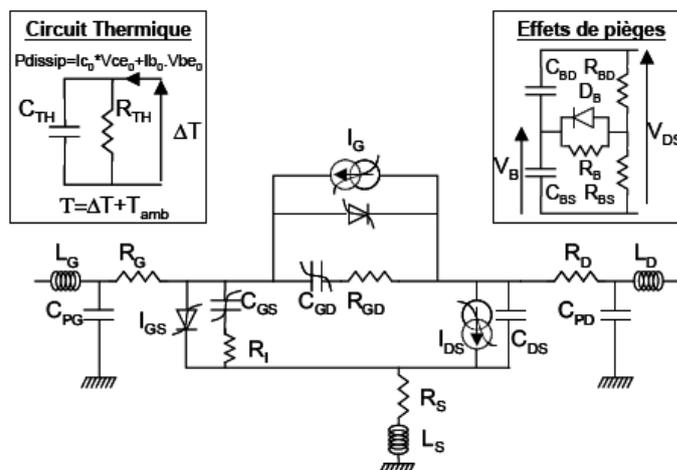


Figure III-6: Modèle non-linéaire équivalent des transistors à effet de champ intégrant les effets thermiques et les effets de pièges [11].

La structure complexe des transistors MODFETs rend très difficile une modélisation analytique complète du composant. Le recours au calcul numérique en est obligatoire, ce qui pose de façon récurrente le problème de définition des facteurs de qualité. Dans cette section, nous allons définir les paramètres décrivant le comportement global des transistors MODFETs [21].

#### III.4.3. Caractéristiques électriques des transistors MODFETs

Le modèle du courant drain-source des transistors MODFETs doit prendre en compte la contribution de trois effets :

☑ Le courant est engendré par l'effet des transistors MODFETs : c'est le courant du gaz d'électrons calculé sous la grille à l'interface de l'hétérojonction. On définit  $n_s$  la densité surfacique équivalente des électrons dans le puits quasi-triangulaire formé à l'interface de l'hétérojonction [18].

$$I_{MODFET_{int}} = qWn_s v(E(x)) \quad (III-1)$$

avec :  $x$  est la position sur l'axe source-drain,  $W$  est la largeur de grille du composant,  $E(x)$  est le champ électrique longitudinal à une abscisse donnée sous la grille,  $v(E(x))$  est la vitesse des électrons dans le canal et  $n_s(x)$  est la densité surfacique de charge du 2DEG.

La densité de charges dans le puits peut être augmentée en augmentant le dopage de la couche barrière de type AlGaN ou InAlN. La limite est fixée par le champ électrique à la jonction Schottky qui devient de plus en plus important à mesure que le dopage augmente: et induit des risques de claquage.

Le courant de l'effet de parasite des transistors MESFETs: en considérant la barrière comme un canal des transistors FETs classiques partiellement obstrué par la ZCE de la jonction Schottky [18]

$$I_{MESFET} = qWN_D v(E(x)) \quad (III-2)$$

avec :  $N_D$  est la densité volumique de dopant dans la barrière,  $h(x)$  est l'épaisseur du canal MESFETs à une abscisse  $x$  sous la grille et  $v(E(x))$  est la vitesse des électrons dans la barrière.

☑ Les éléments parasites résistifs: ce sont les éléments parasites des chemins d'alimentations des drains, grille et source du transistor. Ils induisent des chutes des tensions  $V_{ds}$ , et donc une diminution du courant  $I_{ds}$  et de la transconductance extrinsèque.

Les éléments de ce circuit équivalent peuvent être classés en deux catégories: les éléments intrinsèques et les éléments extrinsèques.

a) *Eléments intrinsèques*

Ils représentent les éléments spécifiques à la fonction «*transistor*», c'est le cœur des transistors:  $I_{ds}$  représente la source convective de courant de drain non-linéaire. Elle dépend des variables intrinsèques  $V_{gs}$  et  $V_{ds}$ . Elle permet de définir les éléments différentiels non-linéaires suivants [12].

La transconductance intrinsèque  $g_m$  est définie comme la variation du courant  $I_{DS}$  en fonction de la tension  $V_{gs}$  intrinsèque à  $V_{ds}$  constant [12]

$$g_m(V_{gs}, V_{ds}) = \left. \frac{\partial I_{ds}}{\partial V_{gs}} \right|_{V_{ds}=Cte} \quad (\text{III-3})$$

La transconductance traduit le mécanisme de contrôle du courant dans le canal par la commande de grille.

La conductance de sortie  $g_d$  est définie comme la variation du courant  $I_{ds}$  en fonction de  $V_{ds}$  à  $V_{gs}$  constant [12]

$$g_d(V_{gs}, V_{ds}) = \left. \frac{\partial I_{ds}}{\partial V_{ds}} \right|_{V_{gs}=Cte} \quad (\text{III-4})$$

La conductance de sortie  $g_d$  traduit la conduction drain-source parasite de la structure. Elle peut servir d'indicateur de régime de saturation. Elle est principalement due aux états énergétiques introduits dans la bande interdite et aux effets de canal court.

$g_d$ , conductance de sortie, qui représente les effets d'injection des électrons dans le canal suite à une commande  $V_{gs}$  constante.

$R_{gd}$  et  $R_i$  sont liées à des effets distribués sous la grille,  $\tau$  correspond à un retard associé à la transconductance  $g_m$  et  $C_{ds}$  prend en compte les effets parasites de couplage électrostatique entre l'électrode de drain et celle de la source.

$C_{gs}$  et  $C_{gd}$ , les capacités non linéaires grille-source et grille-drain, représentent les variations de charges accumulées sous la grille sous l'effet des tensions  $V_{gs}$  et  $V_{gd}$

$$C_{gs}(V_{gs}, V_{ds}) = \left. \frac{\partial I_{ds}}{\partial V_{gs}} \right|_{V_{gd}=Cte} \quad (\text{III-5})$$

$$C_{gd}(V_{gs}, V_{ds}) = \left. \frac{\partial I_{ds}}{\partial V_{gd}} \right|_{V_{gs}=Cte} \quad (\text{III-6})$$

Avec :  $C_{gs}$ ,  $C_{gd}$ ,  $g_m$  et  $g_d$  sont les éléments différentiels non-linéaires intrinsèques des transistors. Ce sont les non-linéarités dites «*fondamentales*» des transistors, à prendre en compte dans l'analyse d'intermodulation.

Les éléments  $I_{gs}$  et  $I_g$  représentent respectivement le courant de fuite de la diode grille canal et les phénomènes d'avalanche. Tout comme les effets de pièges, ces phénomènes physiques sont de nature non-linéaire.

#### *b) Eléments extrinsèques*

La partie extrinsèque est constituée des éléments d'accès suivants qui parasitent le fonctionnement de la partie intrinsèque des transistors:

$R_D$  et  $R_S$  représentent les résistances parasites dues aux contacts ohmiques et aux zones conductrices inactives du canal entre les métallisations de drain et source, et la limite de la zone déserte.  $R_G$  représente la résistance dynamique de grille liée au métal qui constitue le contact Schottky.

$L_G$ ,  $L_S$  et  $L_D$  sont des inductances parasites liées à la topologie des transistors (trous métallisés ou «Via-Holes», pont à air, peigne d'accès pour les transistors multi-doigts), comme montrer dans la figure (III-6).

L'environnement de mesure (fils thermo-soudés, lignes d'accès, positionnement des pointes) peut être modélisé comme des inductances parasites supplémentaires.

Les capacités  $C_{pG}$  et  $C_{pD}$  représentent les capacités de plot des transistors.

### III.5. Effets limitatifs des performances des transistors MODFETs

#### *III.5.1. Effet d'effondrement du courant «current collapse»*

L'effondrement du courant de drain «*current collapse*» dans les transistors MODFETs  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  est la principale cause limitant les performances des composants. Cet effet limite les performances en puissance de ces composants surtout pour des applications hautes fréquences. Il se traduit par un effondrement des caractéristiques de sortie des transistors lorsque celui-ci fonctionne en conditions radiofréquences. Ainsi, il en résulte une diminution du courant de drain, une augmentation de la tension de coude, une excursion du point de repos moindre comparée à un fonctionnement statique, et une diminution de la puissance et du gain de sortie [22].

A l'heure actuelle, les performances des transistors MODFETs à base de GaN n'ont pas atteint les prédictions théoriques que promettent les propriétés physiques des matériaux à base de GaN. Une des principales raisons est l'effet de piégeage des porteurs au cours du fonctionnement qui engendre des anomalies dans les caractéristiques de sortie des transistors. En général, le mécanisme de piégeage consiste en la capture d'électrons par des défauts présents dans la structure et qui correspondent à un niveau énergétique dans la bande interdite.

Les électrons capturés réduisent la densité de porteurs dans le canal bidimensionnel qui maintient la neutralité de la charge globale dans la structure. La conséquence directe de cet effet se manifeste par la réduction du courant de drain  $I_{ds}$  et par la variation de la tension de coude.

En général, le piégeage de porteurs responsable de ces effets peut se produire à différents endroits de la structure tels qu'à l'interface métal/barrière, dans la zone d'accès grille-drain, à l'interface barrière/couche tampon ou bien dans la couche tampon de GaN. La plupart des modèles présentés pour expliquer les origines de ces phénomènes parasites sont classés en deux catégories: le piégeage par les états de surface [23, 24] et le piégeage dans la couche tampon GaN [25, 26].

#### *III.5.2. Origine des pièges et leurs conséquences sur les performances des transistors MODFETs*

Les différents types de défauts présents dans l'épitaxie, de type cristallographique (impuretés, dislocations), associé à l'existence de liaisons pendantes aux surfaces libres des transistors, sont à l'origine des pièges qui peuvent être responsables d'effets parasites de fonctionnement.

Les pièges altèrent considérablement les performances électriques des transistors MODFETs à base de GaN. Les défaillances électriques proviennent du fait que ces pièges peuvent capturer ou émettre des charges avec des constantes de temps différentes des signaux appliqués. Ainsi, si par exemple des électrons du canal sont capturés, ils ne participent plus au courant de sortie qui diminue donc, avec une forme transitoire exponentielle due à la constante de temps de capture.

De même, si des électrons sont émis vers le canal, le courant augmente jusqu'à son niveau permanent, et le transitoire de courant observé est caractéristique de la constante de temps d'émission des pièges. Une partie des charges du canal ne réagit plus immédiatement suite aux commutations de tension appliquées, mais interagit avec les pièges avec des constantes de temps propres.

On a alors

$$I_{ds} = f(V_{gs}, V_{ds}, \text{états des pièges}). \quad (\text{III-7})$$

Les pièges ajoutent donc des composantes basses fréquences aux grandeurs  $I$  et  $V$ , et c'est pourquoi on parle de dispersion radiofréquences pour traduire leurs effets.

Les transistors MODFETs idéalement linéaires serait des transistors pour lequel le courant de drain serait proportionnellement commandé par la tension de grille et de drain pour n'importe

quelle fréquence du signal. Bien entendu, cette perspective reste utopique car un certain nombre d'effets non linéaires viennent perturber cette fonction.

Les pièges jouent également un très grand rôle dans la dégradation des performances. Ils peuvent introduire une constante de temps relativement importante. Ces pièges résultent de l'existence d'impuretés ou de défauts localisés à la surface de la structure et également dans le réseau cristallin [27]. On évalue ainsi l'influence des pièges sur le comportement électrique des transistors MODFETs.

Le «*gate-lag*» et le «*drain-lag*» sont deux phénomènes résultant de l'existence des pièges. L'effet «*drain-lag*» est observé dans le cas où l'effondrement du courant de drain est observé lors d'une variation brusque de la tension appliquée sur le drain. L'autre effet, appelé «*gate-lag*», se manifeste lorsque la réduction du courant est liée à une variation brusque de la tension appliquée sur la grille.

#### **a) Pièges responsables du «*drain-lag*»**

Ce phénomène est lié à la présence de pièges dans le substrat semi-isolant et en surface dans l'espace grille-drain lors d'une variation rapide du champ électrique entre le drain et la source, les électrons provenant du canal peuvent alors être piégés. Ces électrons peuvent être ensuite réémis avec des constantes de temps plus longues. Au niveau du substrat l'équilibrage des charges implique alors l'apparition d'une zone chargée positivement à l'interface GaN/substrat. Le gaz d'électrons bidimensionnel est alors momentanément pincé par une deuxième grille au niveau de cette interface. Ce phénomène est appelé également «*self-backgating*» [28]. Ce phénomène dépend de la qualité résistive du substrat et de la qualité cristallographique du GaN «*couche tampon*». Afin de minimiser l'impact de ces pièges, des améliorations considérables ont été apportées aussi bien au niveau des techniques d'élaboration du matériau, permettant de réduire ainsi l'impact des pièges en volume.

#### **b) Pièges responsables du «*gate-lag*»**

Les pièges qui sont responsables du «*gate-lag*» sont généralement situés en dessous de la grille. L'interface entre metal/semiconducteur doit être de très bonne qualité. Cette zone est très sensible aux effets de surface qui sont liés à la fois à la nature du cristal et à la technologie utilisée pour le dépôt métallique du contact Schottky. Ces effets de pièges de surface [29] sont causés par les effets de surface, eux même créés par des défauts et dislocations dans le cristal proches de la surface. Des électrons sont alors piégés à la surface de la couche barrière  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  ou  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ . Ces électrons, piégés à la surface, affectent les caractéristiques du composant et dégradent les performances en puissance. Pour réduire ces effets de *gate-lag*

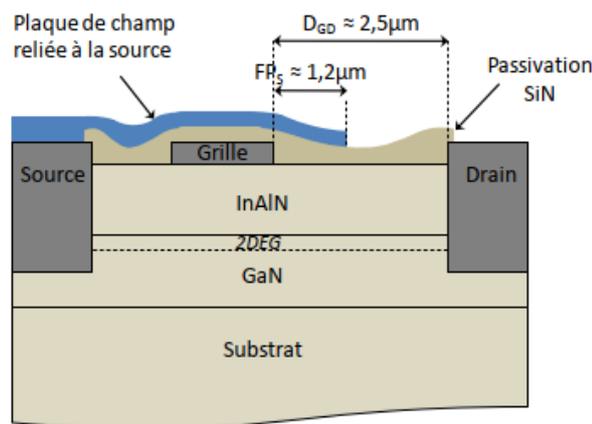
consiste à rajouter un film ( $\text{SiO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) au-dessus de la couche  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  [30–31]. nommée passivation.

#### *c) Courants de fuite*

Les courants de fuite sont dus à la conduction de la diode « grille–canal ». Pour des courants et des tensions de drain élevés, au bord de la grille coté drain, un champ électrique de composante horizontale et proche de la surface du semiconducteur apparaît. Quand celui-ci devient suffisamment puissant, il peut alors engendrer le percement d'un tunnel d'électrons de la métallisation de grille vers le contact de drain à travers la surface du semiconducteur. Cela donne naissance à un courant de fuite qui peut devenir très significatif [11].

#### *III.5.3. Tension de claquage*

C'est un paramètre important des technologies MODFETs à base de GaN, qui dépend principalement de la distance entre la grille et le drain du transistor. Il est possible de trouver dans la littérature du champ de claquage compris entre 40 et 100V/ $\mu\text{m}$  dans le cas de l'hétérostructure AlGaN/GaN [32]. La distance entre la grille et le drain étant un des paramètres majeurs de la tension de claquage elle est généralement déterminée en fonction du type d'applications souhaitées. Un recul de la tension de claquage de 50V pour l'ajout d'une plaque de champ reliée à la source de 1,7  $\mu\text{m}$  sur les transistors MODFETs à base de l'hétérostructure InAlN/GaN a été présenté par G. Lecoustre [33]. Cependant, l'ajout de la plaque de champ augmente les capacités de parasites et réduit les performances dynamiques des composants [34].



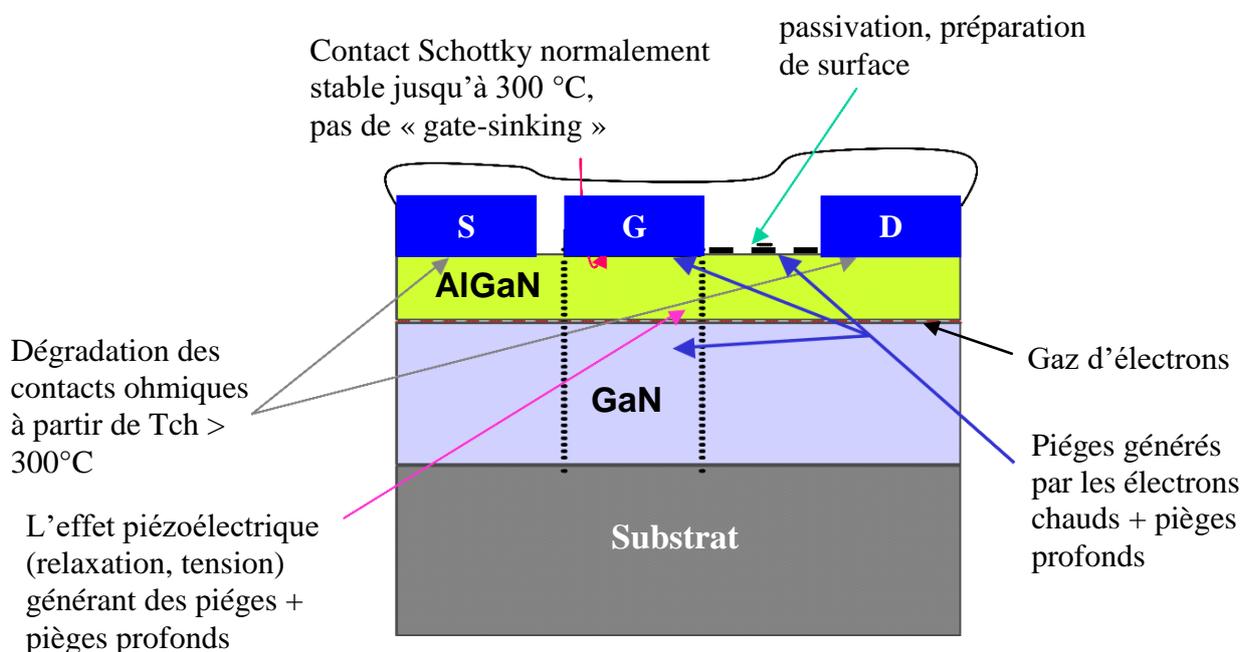
**Figure III–7 :** Coupe d'un composant mettant en évidence les traitements de surface tels que la passivation et la plaque de champ de source.

### III.5.4. Effet thermique

L'augmentation de température dans les transistors à base de GaN a un impact négatif important sur les caractéristiques électriques de ces composants. La température ambiante et l'auto-échauffement des transistors contribuent à l'état thermique des composants. L'augmentation de la température interne de ce dernier se traduit par une puissance électrique dissipée due à l'effet Joule lors de son fonctionnement, entraîne une diminution de la vitesse et la mobilité des porteurs dans le canal des transistors [35] et par conséquent une chute du courant de drain, entraînant une chute de la transconductance, ainsi qu'une limitation de la fréquence d'utilisation. Il est donc important d'évaluer précisément la température du composant.

### III.6. Mécanismes de dégradation

L'évolution de la fiabilité des composants semiconducteurs, dépend fortement de la compréhension des mécanismes de dégradation. Les transistors MODFETs à base de GaN sont sujets à des études importantes de leur fiabilité visant l'amélioration de ces composants, comme les technologies MODFETs ont pu l'être à leur début. La fiabilité est donc le point clé pour atteindre la maturité souhaitée sur les composants à base de GaN qui ont déjà montré des performances électriques inégalées [36, 37].



**Figure III–8:** Coupe schématique des transistors MODFETs  $Al_xGa_{1-x}N/GaN$  identifiant les zones critiques qui peuvent subir des dégradations [38].

La figure (III-8) montre les différentes zones critiques dans une structure des transistors MODFETs à base de GaN; les mécanismes de dégradations concernent la stabilité des contacts ohmiques et des contacts Schottky, les défauts à la surface et à l'interface passivation/semi-conducteur, les défauts induits par les électrons chauds, les effets dus à l'effet piézoélectrique inverse, et les défauts liés à la qualité des couches constituant la structure épitaxiale; ces derniers participent à l'augmentation des courants de fuite dans ce type de structure.

#### ***III.6.1. Dégradations liées aux pièges de surface***

Le modèle de piégeage des porteurs à la surface du composant est connu pour être lié aux donneurs ionisés localisés à la surface. Ces pièges qui sont à l'origine du gaz d'électrons 2D peuvent aussi être une cause principale dans la limitation des performances des transistors.

#### ***III.6.2. Dégradations liées aux états d'interfaces***

La réduction des états d'interfaces dans la structure des transistors MODFETs à base de GaN, constitue un point clé pour l'existence de cette filière ; les états d'interfaces critiques sont situés à l'interface de:

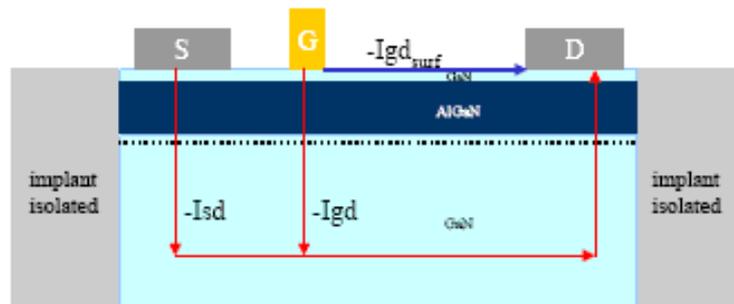
- ☑ *couche de passivation et la couche barrière  $Al_xGa_{1-x}N$ ,*
- ☑ *contact Schottky et la couche barrière,*
- ☑ *la couche espaisseur  $Al_xGa_{1-x}N$  et la couche tampon GaN, et*
- ☑ *la couche tampon GaN et le substrat.*

L'origine de ces états est variable, selon l'interface considérée, mais ils génèrent généralement des effets parasites dus à des mécanismes de piégeage, qui peuvent induire des dégradations importantes au niveau des caractéristiques électriques statiques et radiofréquence [39].

Pour l'interface couche tampon GaN/substrat, le mécanisme de dégradation correspondant est l'augmentation du *courant de fuite*. Pour résoudre le problème du courant de fuite dans la couche tampon GaN, il faut améliorer la qualité des couches épitaxiales, et optimiser la couche de nucléation AlN pour réduire le nombre de dislocations dans la couche GaN. Un procédé par dopage Fe de la couche tampon GaN, permet d'optimiser la qualité de cette dernière avec une réduction de la densité de dislocations de plusieurs ordres de grandeurs jusqu'à  $10^9 \text{ cm}^{-2}$  et une résistivité importante de  $7 \text{ G}\Omega/\square$  [40]. Ce type de dopage permet de contrôler voire d'éliminer les impuretés natives dans la couche GaN, qui devient plus isolant, ce qui réduit les courants de fuite dans la couche tampon GaN. Il y a plusieurs zones de courants de fuite de grille ou de drain dans la structure des transistors MODFETs à base de GaN, comme le montre la coupe

schématique de la figure (III–9). Ces courants de fuite sont liés directement à la qualité du matériau constituant la structure épitaxiale, ainsi qu'à la qualité des différentes interfaces.

La qualité de l'isolation des zones actives joue un rôle important dans la réduction des courants de fuite dans la structure des transistors MODFETs à base de GaN. Il existe deux types d'isolation : par implantation ou par mesa [41].



**Figure III–9:** Différentes zones des courants de fuite dans la structure des transistors MODFETs  $Al_xGa_{1-x}N/GaN$  [41].

#### III.6.3. Dégradations liées aux pièges dans la couche tampon GaN

Le piégeage des électrons dans la couche tampon GaN a été considéré comme l'une des principales causes des effets parasites dans les caractéristiques de sortie des composants [26] et [42]. En effet, sous de fortes tensions de polarisation du drain, les électrons chauds du canal sont injectés et capturés par les pièges dans la couche GaN. Cet effet provoque une désertion du canal et réduit le courant de sortie  $I_{ds}$ . Klein *et al.* [42] ont effectué une étude comparative entre les défauts dans les structures des transistors MODFETs et MESFETs à base de GaN. Ces travaux ont montré que le piégeage de porteurs dans les deux types de structures pourrait être dû aux dopants (carbone) qui se comportent comme des niveaux accepteurs. Ces dopants sont généralement utilisés pour la compensation de la couche tampon afin d'obtenir une couche de GaN semi-isolante. Pour quantifier l'effet des pièges de la couche tampon sur la réduction du courant  $I_{ds}$ , plusieurs travaux ont opté pour les mesures du taux du drain-lag. Binari *et al.* [43] ont montré, en utilisant des couches de GaN avec des résistivités différentes, que le taux du drain-lag varie en fonction de la qualité de la couche tampon.

La localisation des pièges dans la couche tampon n'élimine pas l'hypothèse que certains porteurs peuvent aussi être piégés dans la couche barrière. Khan *et al.* [43] ont suggéré que sous un champ électrique moyennement fort ( $V_{ds} < 20$  V), appliqué entre la grille et le drain, les électrons du canal peuvent être injectés dans la couche barrière  $Al_xGa_{1-x}N$ . Piégés dans cette

couche, les porteurs désertent davantage le canal et conduisent à une réduction du courant  $I_{ds}$  [44, 45].

### III.7. Etat de l'art-Performances actuelles

Les composants MODFETs à base de l'hétérostructure InAlN/AlN/GaN sont prometteurs pour le développement d'application de puissance en hyperfréquences. Ils supportent naturellement d'importantes tensions de polarisation ainsi que de fortes puissances. De plus, leurs spécificités propre à l'utilisation du composé ternaire InAlN utilisé comme une couche barrière dans les transistors MODFETs à base de GaN pour des applications à des fréquences supérieures à celles développées avec l'hétérostructure AlGaIn/AlN/GaN.

### III.8. Conclusion

Nous avons étudié dans ce chapitre les transistors à effet de champ à modulation de dopage MODFETs à base de nitrures pour les applications l'amplification de puissance en hyperfréquences. Ainsi également, nous avons expliqué le principe de fonctionnement et les effets limitatifs des performances électriques des transistors MODFETs qui liées aux défauts de surface, d'interface et les imperfections en volume. Pour diminuer le nombre de défauts qui proviennent des couches croissantes différent architectures des transistors FETs à base de l'hétérojonction à base de GaN selon la méthode de modulation de dopage et leurs propriétés électriques. Nous avons étudié aussi leurs structures physiques et évoquées les limites des performances des composants tels que le courant d'effondrement du courant «*current collapse*» pour des faibles tensions et le courant de fuite pour des tensions de claquage très élevées. Nous citées les origines des pièges et leurs conséquences sur les performances des transistors MODFETs. Suivant cette problématique, exposerons la stratégie choisie au cours de ce travail pour déterminer les mécanismes physiques des dégradations sont liées aux pièges dans la couche tampon, aux états d'interfaces critiques situés à l'interface de: couche de passivation/couche barrière  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ , couche de transition AlN/couche tampon GaN, couche tampon GaN/substrat sont responsables de la non-idéalité du comportement des transistors MODFETs.

## Références du chapitre III

- [1] Dimitri Bertrand, "Etude des mécanismes de formation des contacts ohmiques pour des transistors de puissance sur nitrure de gallium", Thèse de Doctorat en Matériaux, Mécanique, Génie civil, Electrochimie., Université de Grenoble Alpes, 231 pages (2016).
- [2] R. Oberhuber, G. Zandler, and P. Vogl, "Mobility of two-dimensional electrons in  $Al_xGa_{1-x}N/GaN$  modulation-doped field-effect transistors", Appl. Phys. Lett., **73**(2), 818–820 (1998).
- [3] F. Wuy, B.P. Keller, P. Fini, S. Keller, T.J. Jenkins, L.T. Kehias, *et al.*, "High Al-content AlGaN/GaN MODFETs for ultra-high-performance", IEEE Electron Dev. Lett., **19**(2), 50–53 (1998).
- [4] Y.F. Wu, D. Kapolnck, P.J. Ibbetson, P. Parikh, B.P. Kellor, and U.K. Mishra, "Very-high power density AlGaN/GaN HFETs", IEEE Trans. Electron Devices, **48**(3), 586–590 (2001).
- [5] K. Lee, M.S. Shur, T.J. Drummond, H. Morkoç, "Parasitic MESFET in (Al,Ga)As/GaAs modulation doped FETs and MODFET characterization", IEEE Trans. Electron Devices, **31**(1), 29–35 (1984).
- [6] M.E. Lin, S. Strite, A. Agarwal, A. salvador, G.L. Zhou, N. Teraguchi, *et al.*, "GaN grown on hydrogen plasma cleaned 6H-SiC substrates", Appl. Phys. Lett., **62**(7), 702–704 (1993).
- [7] D. Delagebeaudeuf, P. Delescluse, P. Etienne, M. Laviron, J. Chaplart, N.T. Linh, "Two-dimensional electron gas M.E.S.F.E.T. structure", Electron. Lett., **16**, 667–668 (1980).
- [8] T. Mimura, S. Hiyamizu, T. Fujii, K. Nanbu, "A new field-effect transistor with selectively doped GaAs/n- $Al_xGa_{1-x}As$  heterojunctions", Jpn. J. Appl. Phys., **19**, L225–L227 (1980).
- [9] Y.F. Wu, B.P. Keller, S. Keller, D. Kapolnek, S.P. Denbaars, U.K. Mishra, "Measured microwave power performance of AlGaN/GaN MODFET", IEEE Electron Device Lett., **17**(9), 455–457 (1996).
- [10] S.T. Sheppard, K. Doverspike, W.L. Pribble, "High power microwave AlGaN/GaN HEMTs on semi-insulating silicon carbide substrates", IEEE Electron Device Lett., **20**(4), 161–163 (1999).
- [11] Julien Lhortolary, "Modèle prédictif de transistor HEMT pour la simulation précise de l'intermodulation à très bas niveau de puissance et aux hautes fréquences. Evaluation des performances en linéarité de différentes filières technologiques pHEMT AsGa", Thèse de Doctorat en Electronique des Hautes Fréquences et Optoélectroniques, Université de Limoges, pp.137 (2007).

- [12] Elmazova Flavie, "*Contribution à l'étude de l'amplification de puissance en technologie GaN par la technique de suivi d'enveloppe*", Thèse de Doctorat en Electronique des Hautes Fréquences, Photonique et Systèmes, Université de Limoges, 158 pages (2011).
- [13] Hadis Morkoç, "*Nitride semiconductors and devices*", Materials Science, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 485 pages (1999).
- [14] F. Bernardini, V. Fiorentini, "*Spontaneous polarization and piezoelectric constants of III-V nitrides*", Phys. Rev. B, **56**, 10024–10027 (1997).
- [15] Sandra De Meyer, "*Étude d'une nouvelle filière de composants HEMTs sur technologie nitrure de gallium, conception d'une architecture flip-chip d'amplificateur distribué de puissance à très large bande*", Thèse de Doctorat en Electronique des Hautes-Fréquences et Optoélectroniques, Université de Limoges, 217 pages (2005).
- [16] Z. Wang, B. Zhang, Z. Li, "*A closed form charge control model for the threshold voltage of depletion and enhancement-mode AlGaIn/GaN devices*", IEEE Trans. Electron Devices, **60**(5), 1607–1612 (2013).
- [17] A.T. Ping, Q. Chen, J.W. Yang, M.A. Khan, I. Adesida, "*DC and microwave performance of high-current AlGaIn/GaN heterostructures field effect transistors grown on p-type SiC substrates*", IEEE Electron Device Lett., **19**(2), 54–56 (1998).
- [18] Henry Mathieu, "*Physique des semiconducteurs et des composants électroniques*", 6<sup>ème</sup> Edition. Dunod, Paris, 853 pages (2009).
- [19] C.A. Leichti, "*Microwave field effect transistors*", IEEE Trans. Microw. Theory Tech, **24**(6), 279–300 (1976).
- [20] Olivier Jardel, "*Contribution à la modélisation des transistors pour l'amplification de puissance aux fréquences microondes. Développement d'un nouveau modèle électrothermique de HEMT  $Al_xGa_{1-x}N/GaN$  incluant les effets de pièges*", Thèse de Doctorat en Electronique des Hautes Fréquences et Optoélectronique, Université de Limoges, 197 pages (2008).
- [21] Meliani Chafik, "*Circuit intégrés amplificateurs à base de transistors HEMT pour les transmissions numériques à très haut débit*", Thèse de Doctorat en Electronique, Université de Paris VII denis diderot, 165 pages (2003).
- [22] D. Pavlidis, P. Valizadeh, and S.H. Hsu, "*AlGaIn/GaN high electron mobility transistor (HEMT) reliability*", 13<sup>th</sup> GAASR Symposium-Paris, 265–268 (2005).
- [23] R. Vetury, N. Zhang, S. Keller, and U. Mishra, "*The impact of surface states on the DC and RF characteristics of  $Al_xGa_{1-x}N/GaN$  HFETs*", IEEE Trans. Electron Devices, **48**(3), 560–566 (2001).

- [24] N.Q. Zhang, B. Moran, S. DenBaars, U. Mishra, X. Wang, and T. Ma, "Effects of surface traps on breakdown voltage and switching speed of GaN power switching HEMTs"., International Electron Devices Meeting, IEEE, 25.5.1–25.5.4 (2001).
- [25] M. Khan, M. Shur, Q. Chen, and J. Kuznia, "Current/voltage characteristic collapse in  $Al_xGa_{1-x}N/GaN$  heterostructure insulated gate field effect transistors at high drain bias"., Electron. Lett, **30**(25), 2175–2176 (1994).
- [26] A. Koudymov, M. Shur, G. Simin, K. Chu, P. Chao, C. Lee, J. Jimenez, and A. Balistreri, "Analytical HFET I/V model in presence of current collapse"., IEEE Trans. Electron Devices, **55**(3), 712–720 (2008).
- [27] K. Horio *et al.*, "Two dimensional analysis of substrate-trap effect on turn-on characteristics in GaAs MESFETs"., IEEE Trans. Electron Devices, **47**(3), 617–624 (2000).
- [28] Ouarch Zineb, "Caractérisation et modélisation des effets de pièges et thermiques des transistors à effets de champ sur AsGa : Application à la simulation de la dynamique lente des circuits non linéaires microondes"., Thèse de Doctorat en Électronique des hautes fréquences et optoélectronique, Université de Limoges, 203 pages (1999).
- [29] Touati Salim, "Conception, réalisation et caractérisation de composants de puissance hyperfréquence de la filière nitrure de gallium"., Thèse de Doctorat en Micro-ondes et microtechnologies, Université de Lille 1, 207 pages (2007).
- [30] W. Lu, V. Kumar, R. Schwindt, E. Piner, I. Adesida, "A comparative study of surface passivation on AlGaIn/GaN HEMTs"., Solid State Electron, **46**(9), 1441–1444 (2002).
- [31] W.S. Tan, P.A. Houston, P.J. Parbrook, G. Hill and R.J. Airey, "Comparison of different surface passivation dielectrics in AlGaIn/GaN hétérostructure field effect transistors"., J. Phys. D, Appl. Phys, **35**, 595–598 (2002).
- [32] T. Nanjo, M. Takeuchi, M. Suita, T. Oishi, Y. Abe, Y. Tokuda, and Y. Aoyagi, "Remarkable breakdown voltage enhancement in algan channel high electron mobility transistors"., Applied Physics Letters, **92** (26), 263502 (2008).
- [33] Gwenaél Le Coustre, "Contribution au d'éveloppement d'une filière de transistor de forte puissance à base de technologie hemt gan pour applications télécoms et radar"., Thèse de doctorat en Micro et Nano Technologies, Acoustique et Télécommunications, 181 pages (2009).
- [34] J. Dufraisse, G. Callet, O. Jardel, C.E., N. Sarazin, S. Piotrowicz, M.A. Di Forte Poisson, D.S. L., P. Bouysse, R. Quéré, "Characterizations of inaln/aln/gan transistors for S-band applications"., Proc. European Microwave Integrated Circuits Conf. (EuMIC), (2011).

- [35] J. D. Albrecht, R. P. Wang, P. P. Ruden, M. Farahmand, and K. F. Brennan, "Electron transport characteristics of gan for high temperature device modeling", J. Appl. Phys, **83** (9), 4777–4781, (1998).
- [36] S.L. Delage, C. Dua, "Wide band gap semiconductor reliability: status and trends", Microelectron. Reliab, **43**(9–11), 1705–1712 (2003).
- [37] A. Sozza, C. Dua, E. Morvan, B. Grimbert, V. Hoel, S.L. Delage, N. Chaturvedi, R. Lossy, J. Wuerfl, "Reliability investigation of gallium nitride HEMT", Microelectron. Reliab, **44**(9–11), 1369–1373 (2004).
- [38] G. Meneghesso, G. Verzellesi, F. Danesin, F. Rampazzo, F. Zanon, A. Tazzoli, M. Meneghini, and E. Zanoni, "Reliability of GaN high-electron-mobility transistors: state of the Art and perspectives", IEEE Trans. Device Mater. Reliab., **8**(2), 332–343 (2008).
- [39] D. Pavlidis, P. Valizadeh, and S. H. Hsu, "AlGaIn/GaN high electron mobility transistor (HEMT) reliability", 13<sup>th</sup> GAASR Symposium–Paris, 265–268, (2005).
- [40] S. Heikman, S. Keller, S.P. DenBaars, and U.K. Mishra, "Growth of Fe doped semiinsulating GaN by metalorganic chemical vapor deposition", Appl. Phys. Lett., **81**, 439–441(2002).
- [41] K. Matsushita, S. Teramoto, H. Sakurai, Y. Takada, J. Shim, H. Kawasaki, K. Tsuda, and K. Takagi, "Reliability study of AlGaIn/GaN HEMTs device", CS MANTECH Conference, Austin, Texas, USA, 87-89, 14–17 (2007).
- [42] P.B. Klein and S.C. Binari., "Photoionization spectroscopy of deep defects responsible for current collapse in nitride-based field effect transistors", J. Condens. Matter Phys., **15**, R1641–R1662 (2003).
- [43] S. Binari, K. Ikossi, J. Roussos, W. Kruppa, D. Park, H. Dietrich, D. Koleske, A. Wickenden, and R. Henry, "Trapping effects and microwave power performance in AlGaIn/GaN HEMTs", IEEE Trans. Electron Devices, **48**(3), 465–471 (2001).
- [44] H. Zhang, E.J. Miller, and E.T. Yu, "Analysis of leakage current mechanisms in Schottky contacts to GaN and Al<sub>0.25</sub>Ga<sub>0.75</sub>N/GaN grown by molecular beam epitaxy", J. Appl. Phys, **99**(2), 023703–023708 (2006).
- [45] W. Chikhaoui, J.M. Bluet, M.A. Poisson, N. Sarazin, C. Dua, and C. Bru–Chevallier, "Current deep level transient spectroscopy analysis of Al<sub>x</sub>In<sub>1-x</sub>N/GaN high electron mobility transistors: mechanism of gate leakage", Appl. Phys. Lett., **96**(7), 072107–072109 (2010).



# Chapitre IV

Modélisation physique des propriétés électriques  
des transistors à modulation de dopage



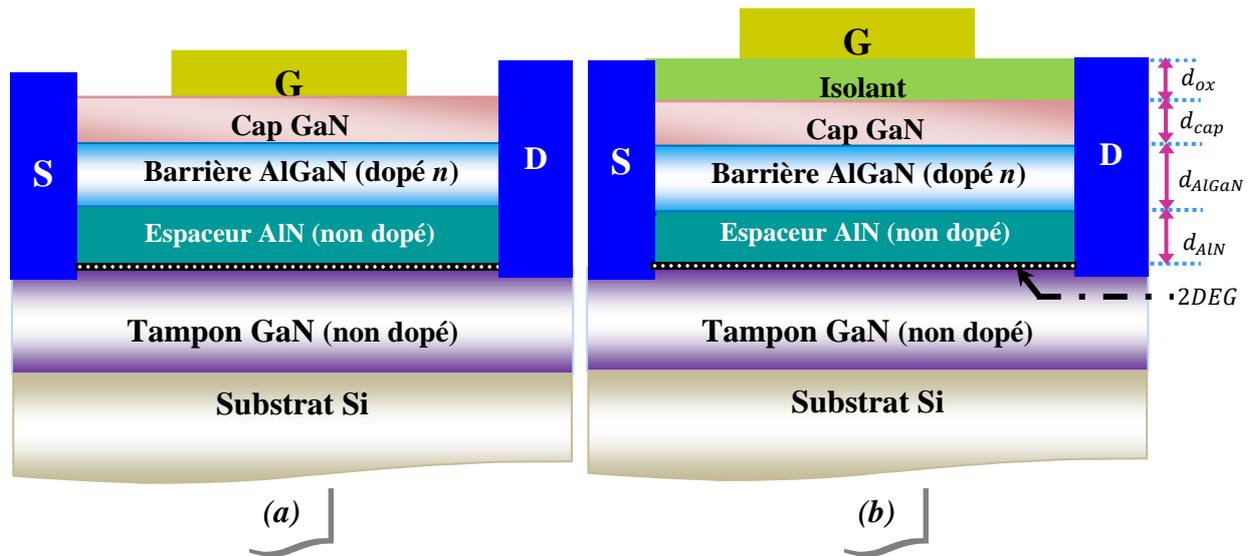
## **IV.1. Introduction**

Ce chapitre est consacré à l'étude générale sur la topologie de la structure des transistors MODFETs conventionnels et des transistors MODFETs à grille isolée (MIS–MODFETs) à base de hétérostructures GaN/AlGa<sub>N</sub>/AlN/GaN et InAlN/AlN/GaN et leurs diagrammes énergétiques de la bande de conduction, puis nous allons développer aussi les modèles analytiques des caractéristiques électriques statiques et dynamiques de notre composant à base de nitrures III–N. Enfin, nous terminerons le chapitre IV par une conclusion.

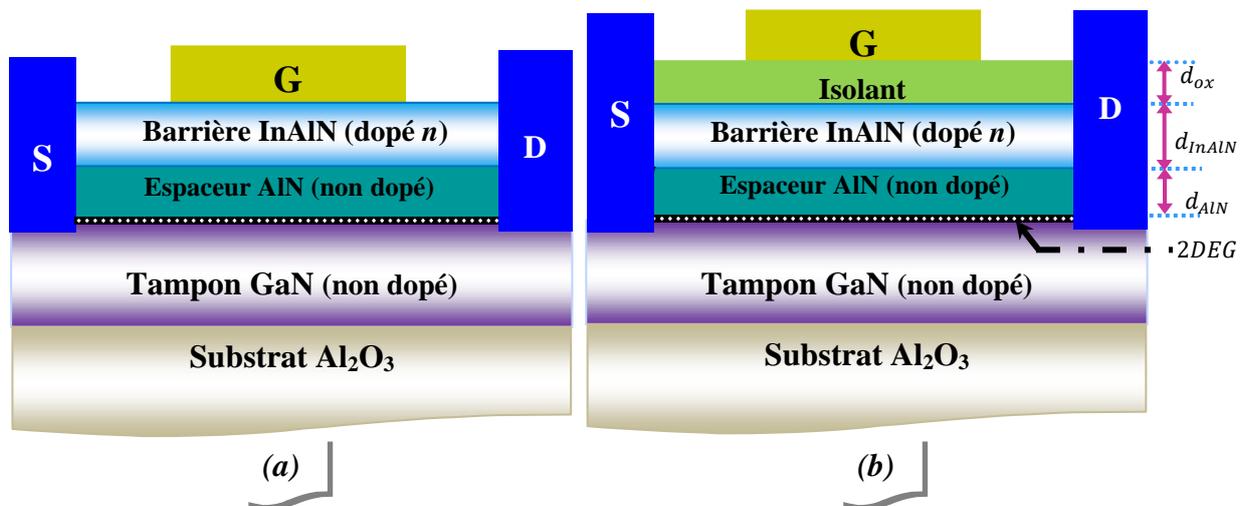
## **IV.2. Présentation des transistors MIS-MODFETs à base de l'hétérostructure de type GaN/AlGa<sub>N</sub>/AlN/GaN et InAlN/AlN/GaN**

### ***IV.2.1. Structures étudiées***

Les figures (IV–1) et (IV–2) montre vue en coupe des transistors MODFETs conventionnels et MIS–MODFETs à base de l'hétérostructure de type GaN/AlGa<sub>N</sub>/AlN/GaN et InAlN/AlN/GaN. La séquence des couches, du haut jusqu'en bas, métal/isolant/GaN/AlGa<sub>N</sub> dopé *n*/AlN non dopé/GaN non dopé et métal/oxyde/InAlN dopé *n*/AlN non dopé/GaN non dopé. Un gaz d'électrons 2D est formé à l'interface de l'hétérojonction AlN/GaN pour les deux différents types des hétérostructures étudiés dans notre travail de thèse. On faire croître épitaixialement une couche tampon GaN sur un substrat silicium (Si) pour l'hétérostructure de type GaN/AlGa<sub>N</sub>/AlN/GaN et un substrat saphir (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) pour l'hétérostructure de type InAlN/AlN/GaN.



**Figure IV–1 :** Coupe des transistors à base de l'hétérostructure GaN/AlGaN/AlN/GaN, avec  $d_{ox}$ ,  $d_{GaN}$ ,  $d_{AlGaN}$ , et  $d_{AlN}$  sont respectivement les épaisseurs des couches : isolant, superficielle (cap layer), barrière AlGaN dopé  $n$  et espaceur AlN non dopé. (a) MODFETs et (b) MIS–MODFETs.



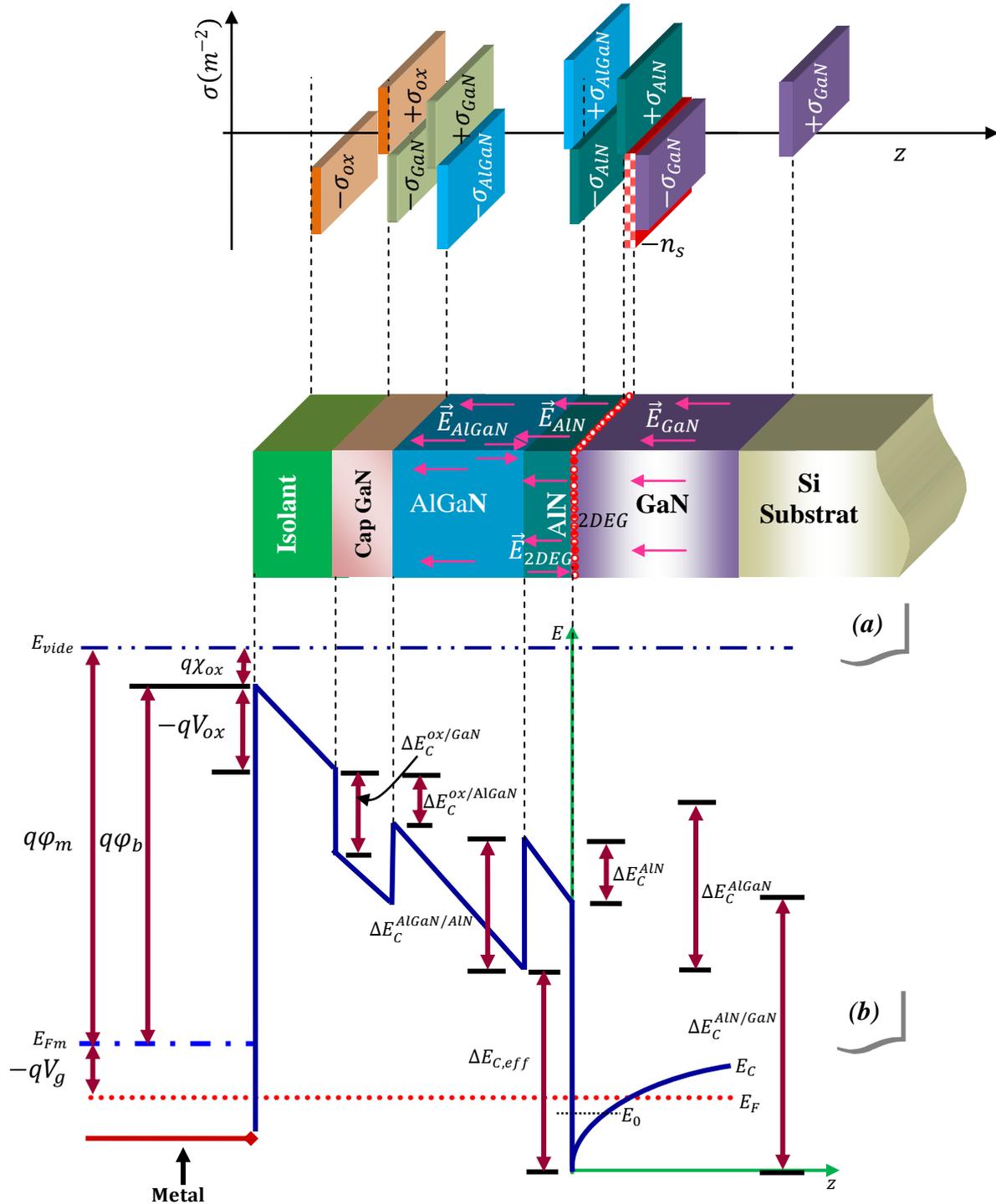
**Figure IV–2 :** Coupe des transistors à base de l'hétérostructure InAlN/AlN/GaN, avec  $d_{ox}$ ,  $d_{InAlN}$ , et  $d_{AlN}$  sont respectivement l'épaisseur de la couche oxyde, l'épaisseur de la couche barrière InAlN dopé  $n$  et l'épaisseur de la couche espaceur AlN non dopé. (a) MODFETs et (b) MIS–MODFETs.

#### IV.2.2. Diagramme énergétique de la bande de conduction

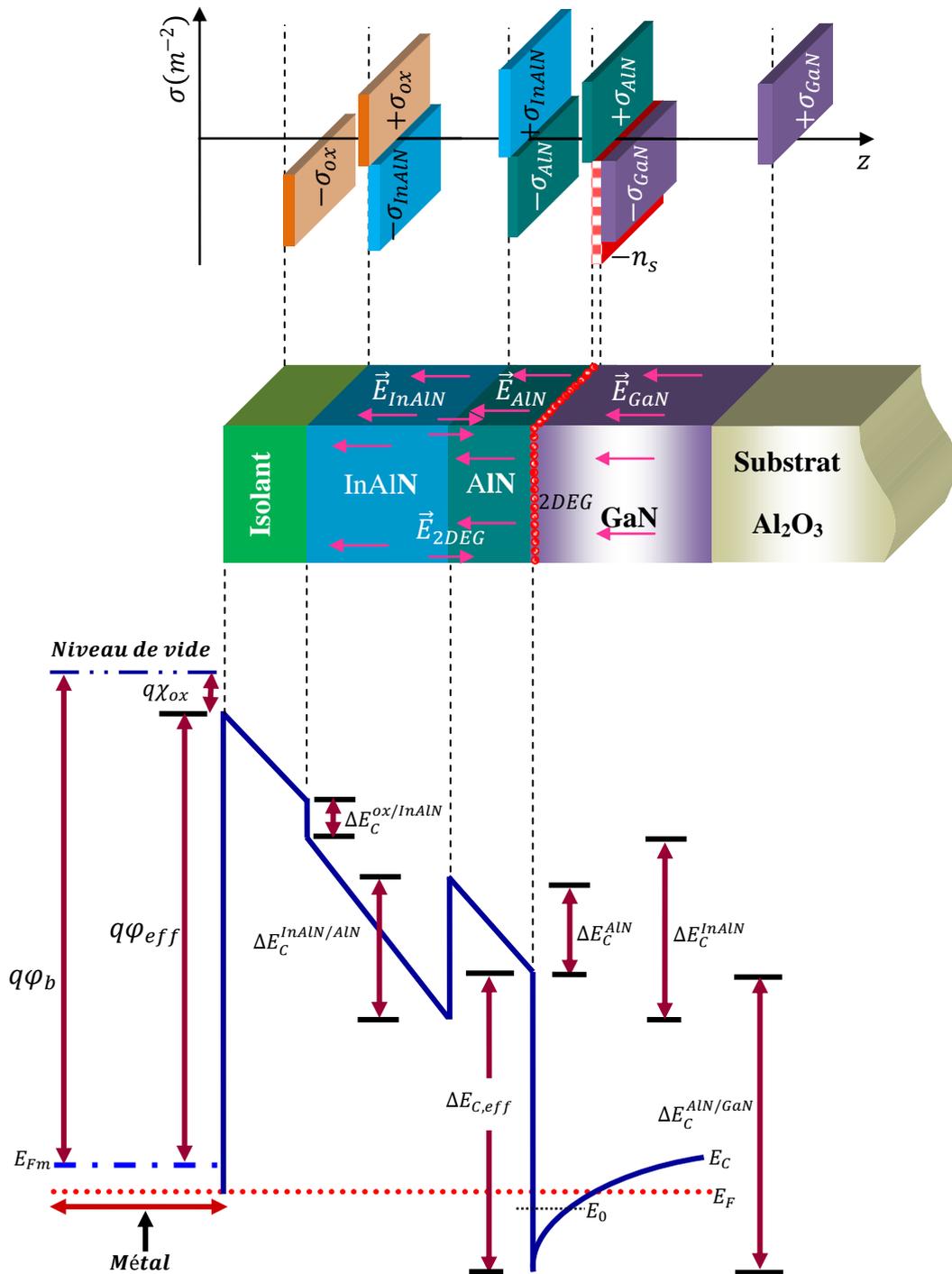
Le profile de la distribution de charges et le diagramme énergétique de la bande de conduction de la structure des transistors MIS–MODFETs à base de l'hétérostructure de type

GaN/AlGaN/AlN/GaN et InAlN/AlN/GaN, sont respectivement illustrés sur les figures (IV–3) et (IV–4).

Pour insérer une faible épaisseur de la couche d'oxyde entre le contact Schottky (grille) et la couche barrière permet de réduire le courant de fuite de grille [1].



**Figure IV–3 :** Profile de la distribution de charges et diagramme énergétique de la bande de conduction de la structure des transistors MIS–MODFETs à base de l’hétérostructure GaN/AlGaN/AlN/GaN.



**Figure IV-4 :** Profile de la distribution de charges et diagramme énergétique de la bande de conduction de la structure des transistors MIS-MODFETs à base de l'hétérostructure InAlN/AlN/GaN.

### IV.3. Modèles analytiques des propriétés électriques des MIS-MODFETs

La variation de la composition d'alliage entraîne une variation importante des propriétés électriques tels que : la hauteur de la barrière de Schottky, la constante diélectrique de la couche barrière, la discontinuité de bande d'énergie de conduction, la polarisation totale, et la tension de seuil.

#### IV.3.1. Modèle de la tension de seuil

L'équation d'équilibre peut être configurée en commençant de la gauche vers la droite selon le diagramme énergétique de la bande de conduction de la structure des transistors MIS-MODFETs à base de l'hétérostructure GaN/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/AlN/GaN et In<sub>x</sub>Al<sub>1-x</sub>N/AlN/GaN, comme illustre respectivement dans les figures (IV-3) et (IV-4).

L'équation de neutralité de l'hétérostructure de type GaN/AlGaN/AlN/GaN peut s'écrire de la façon suivante [2] :

$$q\varphi_m - qV_g = qV_{ox} + q\chi_{ox} + \Delta E_C^{ox/GaN} + qV_{GaN} - \Delta E_C^{GaN/AlGaN} + qV_{AlGaN} - \Delta E_C^{AlGaN/AlN} + qV_{AlN} + \Delta E_C^{AlN/GaN} + E_F \quad (IV-1)$$

où  $q\varphi_m - qV_g$  est la hauteur de la barrière Schottky effective du contact de grille,  $\chi_{ox}$  est l'affinité électronique de la couche oxyde, et  $\Delta E_C$  est la discontinuité de bande d'énergie de conduction à l'interface des hétérojonctions telles que : isolant/GaN, GaN/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N, Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/AlN, et AlN/GaN.

Les expressions des potentiels électriques des couches : isolante, GaN, AlGaN et AlN s'écrivent :

$$V_{ox} = \frac{Q_f}{\varepsilon_{ox}} \times d_{ox} \quad (IV-2)$$

Avec  $Q_f = Q_{ox} + Q_{it}$ , et  $Q_{it}$  est la charge équivalente à l'interface de isolant/GaN.

$$V_{GaN} = \left( \frac{\sigma_{GaN/AlGaN} + \sigma_{AlGaN/AlN} + \sigma_{AlN/GaN} - n_s}{\varepsilon_{GaN}} \right) \times d_{GaN} \quad (IV-3)$$

$$V_{AlGaN} = \left( \frac{\sigma_{AlGaN/AlN} + \sigma_{AlN/GaN} - n_s}{\varepsilon_{AlGaN}} \right) \times d_{AlGaN} \quad (IV-4)$$

$$V_{AlN} = \left( \frac{\sigma_{AlN/GaN} - n_s}{\varepsilon_{AlN}} \right) \times d_{AlN} \quad (IV-5)$$

Le champ électrique à travers la couche isolante (oxyde), s'écrit:

$$E_{ox} = \left[ (Q_{it} + \sigma_{ox/GaN} + \sigma_{GaN/Al_xGa_{1-x}N} + \sigma_{Al_xGa_{1-x}N/AlN} + \sigma_{AlN/GaN} - n_s) / \varepsilon_0 \varepsilon_{ox} \right] \quad (IV-6)$$

Avec :  $\sigma_{ox/GaN}$ ,  $\sigma_{GaN/Al_xGa_{1-x}N}$ ,  $\sigma_{Al_xGa_{1-x}N/AlN}$  et  $\sigma_{AlN/GaN}$  sont respectivement les densités de polarisation à l'interface des hétérojonctions isolant/GaN, GaN/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N, Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/AlN,

et AlN/GaN.  $n_s$  est la densité de charges d'un gaz d'électrons bidimensionnel à l'interface de l'hétérojonction AlN/GaN (canal des transistors).

$\epsilon_0$  et  $\epsilon_{ox}$  sont respectivement les constantes diélectriques du vide et de la couche isolante.

La permittivité relative du matériau ternaire  $Al_xGa_{1-x}N$  est approximée par l'interpolation linéaire de la loi de Vegard des permittivités relatives des matériaux binaires GaN et AlN sont s'exprimés par [3]:

$$\epsilon_{Al_xGa_{1-x}N} = -0.5x + 9.5 . \quad (IV-7)$$

La discontinuité de bande d'énergie de conduction effective s'écrit [4]:

$$\Delta E_{C,eff}(x) = \Delta E_C^{AlN/GaN} + \Delta E_C^{AlN} - \Delta E_C^{Al_xGa_{1-x}N/AlN} . \quad (IV-8)$$

En outre, la discontinuité de bandes d'énergies de conduction  $\Delta E_C^{Al_xGa_{1-x}N/AlN}$  à l'interface de l'hétérojonction  $Al_xGa_{1-x}N/AlN$  s'exprimer par [5]:

$$\Delta E_C^{Al_xGa_{1-x}N/BN} = 0.7[E_g^{Al_xGa_{1-x}N} - E_g^{BN}] . \quad (IV-9)$$

Où BN est GaN ou AlN et  $E_g^{Al_xGa_{1-x}N}$  est l'énergie de gap de la couche barrière  $Al_xGa_{1-x}N$  en fonction de la composition d'alliage d'aluminium, est donnée par [5]:

$$E_g^{Al_xGa_{1-x}N} = xE_g^{AlN} + E_g^{GaN}(1-x) - (1-x)x . \quad (IV-10)$$

Avec:  $E_g^{AlN} = 6.13 \text{ eV}$  et  $E_g^{GaN} = 3.42 \text{ eV}$ .

Trois effets de polarisation inhérente dans les quatre couches de l'hétérostructure GaN/ $Al_xGa_{1-x}N$ /AlN/GaN. La densité de polarisation totale de charge ( $\sigma_{total}$ ) induite par la somme des polarisations (spontanée et piézoélectrique) est donnée par:

$$\sigma_{total} = \sigma_{Al_xGa_{1-x}N} - \sigma_{AlN} . \quad (IV-11)$$

La densité de polarisation à l'interface de l'hétérojonction  $Al_xGa_{1-x}N/AlN$  s'exprimer par [3]

$$\sigma_{Al_xGa_{1-x}N/AlN} = (P_{sp}^{AlN} + P_{pz}^{AlN}) - (P_{sp}^{Al_xGa_{1-x}N} + P_{pz}^{Al_xGa_{1-x}N}) . \quad (IV-12)$$

La polarisation spontanée linéaire pour l'alliage nitrure  $Al_xGa_{1-x}N$  en  $C/m^2$ , s'exprimer par [3]:

$$P_{sp}^{Al_xGa_{1-x}N} = -0.052x - 0.029 . \quad (IV-13)$$

La polarisation piézoélectrique dans la couche tampon GaN est négligeable pour une épaisseur de 2  $\mu m$  et impliquée seulement la polarisation spontanée.

La polarisation piézoélectrique dans la couche barrière  $P_{pz}^{Al_xGa_{1-x}N}$  est considérable, ce qui signifie la présence des contraintes, s'exprimer par [3]:

$$P_{pz}^{Al_xGa_{1-x}N} = [xP_{pz}^{AlN} + (1-x)P_{pz}^{GaN}]\epsilon(x) . \quad (IV-14)$$

Avec  $P_{pz}^{Al_xGa_{1-x}N}$ ,  $P_{pz}^{AlN}$  et  $P_{pz}^{GaN}$  sont respectivement les polarisations piézoélectriques dans les

matériaux  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ,  $\text{AlN}$  et  $\text{GaN}$ .

Les polarisations piézoélectriques dans les composés binaires  $\text{GaN}$  et  $\text{AlN}$ , peuvent être écrites:

$$P_{pz}^{AlN} = [5.624\epsilon(x) - 1.808]\epsilon(x) \quad (\text{IV-15a})$$

$$P_{pz}^{GaN} = [9.541\epsilon(x) - 0.918]\epsilon(x) \quad (\text{IV-15b})$$

Où  $\epsilon(x)$  est la déformation bi-axiale de l'alliage ternaire  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  définie par l'expression :

$$\epsilon(x) = \frac{(a_{GaN} - a_{Al_xGa_{1-x}N})}{a_{Al_xGa_{1-x}N}} \quad (\text{IV-16a})$$

$$\epsilon(x) = \frac{(a_{AlN} - a_{Al_xGa_{1-x}N})}{a_{Al_xGa_{1-x}N}} \quad (\text{IV-16b})$$

$a_{GaN}$ ,  $a_{AlN}$  et  $a_{Al_xGa_{1-x}N}$  sont respectivement correspondent les paramètres de réseau des composés binaires  $\text{GaN}$ ,  $\text{AlN}$  et ternaire  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ .

Le paramètre de réseau  $a_{Al_xGa_{1-x}N}$  sans contrainte est approximé par une interpolation linéaire selon la loi de Vegard donné par l'équation (IV-17) [6]:

$$a_{Al_xGa_{1-x}N} = xa_{AlN} + (1 - x)a_{GaN} . \quad (\text{IV-17})$$

Finalement, l'expression de la tension de seuil est dépend de la composition d'alliage ( $x$ ) d'aluminium de la couche barrière  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ , en vu des transistors atteindre le régime de pincement, il est nécessaire de rendre le système d'un gaz d'électrons bidimensionnel doit être suffisante par une tension appliquée sur la grille. En supposant  $n_s = 0 \text{ cm}^{-2}$  dans l'équation (IV-3) et résolu la tension de seuil, s'écrit:

$$V_{th} = q[\varphi_m - V_g - V_{ox} - \chi_{ox} - V_{GaN} - V_{AlGaN} - V_{AlN}] - \Delta E_C^{ox/GaN} + \Delta E_C^{GaN/AlGaN} + \Delta E_C^{AlGaN/AlN} - \Delta E_C^{AlN/GaN} \quad (\text{IV-18})$$

La tension de pincement  $V_{off}$  est définie par [6]:

$$V_{off} = V_{th} - E_F. \quad (\text{IV-19})$$

L'équation de neutralité de l'hétérostructure de type  $\text{InAlN}/\text{AlN}/\text{GaN}$  peut s'écrire de la façon suivante

$$q\varphi_{eff}(x) - \left(\frac{qQ_f}{C_{ox}}\right) - qE_C^{In_xAl_{1-x}N} \times d_{InAlN} + \Delta E_C^{In_xAl_{1-x}N/AlN} - qE_C^{AlN} \times d_{AlN} - \Delta E_C^{AlN/GaN}(x) + E_F = 0 \quad (\text{IV-20})$$

où  $\varphi_{eff}(x)$  est la hauteur de la barrière Schottky effective du contact de grille et dans le cas de la couche barrière  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ , approximée par l'interpolation linéaire de la loi de Vegard [7] :

$$\varphi_{eff}(x) = 3.05 - 3.7x . \quad (\text{IV-21})$$

$Q_f = E_C^{ox} \times \varepsilon_0 \varepsilon_{ox} - (\sigma_{ox/In_xAl_{1-x}N} + \sigma_{In_xAl_{1-x}N/AlN} + \sigma_{AlN/GaN} - n_s)$  est la charge équivalente à l'interface de Oxyde/ $In_xAl_{1-x}N$  et  $E_C^{ox}$  est le champ électrique à travers la couche diélectrique.

$C_{ox}$  est la capacité de la couche d'oxyde,  $d_{InAlN}$  et  $d_{AlN}$  sont respectivement les épaisseurs des couches barrière et espaceur AlN.

Le champ électrique à travers la couche barrière, s'exprimer par :

$$E_C^{In_xAl_{1-x}N} = [(\sigma_{In_xAl_{1-x}N/AlN} + \sigma_{AlN/GaN} - n_s) / \varepsilon_0 \varepsilon_{In_xAl_{1-x}N}]. \quad (IV-22)$$

La densité de polarisation totale de charge ( $\sigma_{total}$ ) induite par la somme des polarisations (spontanée et piézoélectrique) et à l'interface de l'hétérostructure donnée par [3] :

$$\begin{aligned} \sigma_{total} &= P_{sp} + P_{pz} \\ &= P_{GaN} - P_{In_xAl_{1-x}N} \\ &= P_{sp}^{GaN} - (P_{sp}^{In_xAl_{1-x}N} + P_{pz}^{In_xAl_{1-x}N}) \end{aligned} \quad (IV-23)$$

La densité de polarisation à l'interface de l'hétérojonction  $In_xAl_{1-x}N/AlN$  est donnée par :

$$\sigma_{In_xAl_{1-x}N/AlN} = (P_{sp}^{AlN} + P_{pz}^{AlN}) - (P_{sp}^{In_xAl_{1-x}N} + P_{pz}^{In_xAl_{1-x}N}) \quad (IV-24)$$

La polarisation piézoélectrique dans la couche tampon GaN est négligeable pour une épaisseur de 2  $\mu m$  et impliquée seulement la polarisation spontanée.

La polarisation spontanée non-linéaire pour l'alliage ternaire  $In_xAl_{1-x}N$  en  $C/m^2$ , s'exprimer par [8] :

$$P_{sp}^{In_xAl_{1-x}N} = -0.042x - 0.090(1-x) + 0.071x(1-x). \quad (IV-25)$$

La polarisation piézoélectrique dans la couche barrière  $P_{pz}^{In_xAl_{1-x}N}$  est considérable, ce qui signifie l'absence des contraintes, s'exprimer par [9] :

$$P_{pz}^{In_xAl_{1-x}N} = [xP_{pz}^{InN} + (1-x)P_{pz}^{AlN}] \varepsilon(x), \quad (IV-26)$$

où  $P_{pz}^{In_xAl_{1-x}N}$ ,  $P_{pz}^{InN}$  et  $P_{pz}^{AlN}$  sont respectivement les polarisations piézoélectriques dans les matériaux  $In_xAl_{1-x}N$ , InN et AlN.

Les polarisations piézoélectriques dans les composés binaires InN et AlN, peuvent être écrites:

$$P_{pz}^{InN} = [7.559\varepsilon(x) - 1.373]\varepsilon(x) \quad (IV-27a)$$

$$P_{pz}^{AlN} = [5.624\varepsilon(x) - 1.808]\varepsilon(x) \quad (IV-27b)$$

où  $\varepsilon(x)$  est la déformation bi-axiale de l'alliage ternaire  $In_xAl_{1-x}N$  définie par l'expression :

$$\varepsilon(x) = \frac{(a_{AlN} - a_{In_xAl_{1-x}N})}{a_{In_xAl_{1-x}N}}, \quad (IV-28)$$

$a_{AlN}$  et  $a_{In_xAl_{1-x}N}$  sont respectivement correspondent les paramètres de réseau des composés

binaires AlN et ternaire  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ . La contrainte dans le plan de la couche barrière de l'hétérostructure  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ , indique que le paramètre de réseau de la couche barrière  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$  sous une contrainte de compression de grille est d'environ 1.31% [10].

Le paramètre de réseau  $a_{\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}}$  sans contrainte est approximé par une interpolation linéaire selon la loi de Vegard donné par l'équation (IV-29) [11] :

$$a_{\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}} = xa_{\text{InN}} + (1-x)a_{\text{AlN}}, \quad (\text{IV-29})$$

La permittivité relative du composé ternaire  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$  est approximée par l'interpolation linéaire de la loi de Vegard des permittivités relatives des composés binaires InN et AlN [6] :

$$\varepsilon_{\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}} = 4.12x + 2.78. \quad (\text{IV-30})$$

Le champ électrique à travers la couche intermédiaire AlN déterminé en utilisant le théorème de Gauss, s'exprimer par l'équation (IV-31) [2] :

$$E_C^{\text{AlN}} = \left( \frac{\sigma_{\text{AlN}/\text{GaN}} - n_s}{\varepsilon_0 \varepsilon_{\text{AlN}}} \right). \quad (\text{IV-31})$$

où  $\sigma_{\text{AlN}/\text{GaN}}$  est la densité de polarisation totale,  $n_s$  est la densité de charges à l'interface de l'hétérojonction AlN/GaN et  $d_{\text{AlN}}$  l'épaisseur de la couche espaceur AlN.

En outre, la discontinuité de bandes d'énergies de conduction  $\Delta E_C^{\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}}$  à l'interface de l'hétérojonction  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}$  est s'exprimer par :

$$\Delta E_C^{\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}} = 0.63[E_g^{\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}} - E_g^{\text{AlN}}], \quad (\text{IV-32})$$

où  $E_g^{\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}}$  est l'énergie de gap de la couche barrière  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$  en fonction de la fraction molaire d'indium, est donnée par [12] :

$$E_g^{\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}} = E_g^{\text{InN}}x + E_g^{\text{AlN}}(1-x) - bx(1-x), \quad (\text{IV-33})$$

Avec  $E_g^{\text{InN}} = 0.95 \text{ eV}$ ,  $E_g^{\text{AlN}} = 6.06 \text{ eV}$  et  $b = 3.4x + 1.2$  est le paramètre de non-linéarité (bowing parameter) de la bande interdite [11].

Finalement, l'expression de la tension de seuil est dépend de la composition d'alliage ( $x$ ) d'indium de la couche barrière  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ , en vu de les transistors atteindre le régime de pincement, il est nécessaire de rendre le système d'un gaz d'électrons bidimensionnel doit être suffisante par une tension appliquée sur la grille. En supposant  $n_s = 0 \text{ cm}^{-2}$  dans l'équation (IV-20) et résolu la tension de seuil, s'écrit:

$$V_{th} = q[\varphi_{eff}(x) - E_C^{ox} \times d_{ox} - E_C^{\text{InAlN}} \times d_{\text{InAlN}} - E_C^{\text{AlN}} \times d_{\text{AlN}}] - \Delta E_C^{ox/\text{InAlN}} + \Delta E_C^{\text{InAlN}/\text{AlN}} + \Delta E_C^{\text{AlN}/\text{GaN}}. \quad (\text{IV-34})$$

### IV.3.2. Modèle de la densité de charges d'un 2DEG

L'expression de la densité d'un gaz d'électrons bidimensionnel (2DEG) dans la couche active (canal des transistors) pour l'hétérostructure GaN/AlGaN/AlN/GaN correspond à une élévation de région calculée comme dans [2], s'exprimer par:

$$n_s = \frac{\varepsilon(x)}{q(d_{ox}+d_b)} (V_g - V_{off} - V_p - E_F) \quad (IV-35)$$

Où  $q$  montre la charge élémentaire,  $\varepsilon(x)$  est la constante diélectrique de la couche oxyde,

$$d_b = \frac{\varepsilon(x)}{\varepsilon_{GaN}} d_{GaN} + \frac{\varepsilon_{ox}}{\varepsilon_{AlGaN}} d_{AlGaN} + \frac{\varepsilon_{ox}}{\varepsilon_{AlN}} d_{AlN} \text{ et } d_{ox} + d_b \text{ est l'épaisseur totale.}$$

Où  $V_{off}$  est la tension de pincement,  $V_g$  est le potentiel de la grille et  $V_p$  est le potentiel dans le canal au point  $p$  considéré, avec :  $V_{g0} = V_g - V_{off} - V_p$ .

En outre, l'expression de la densité  $n_s$  pour l'hétérostructure InAlN/AlN/GaN, s'exprimer par:

$$n_s = \frac{\varepsilon(x)}{q d_T} (V_g - V_{off} - V_p - E_F) \quad (IV-36)$$

où  $\varepsilon(x) = \varepsilon_0(\varepsilon_{InAlN} + \varepsilon_{AlN})$  est la constante diélectrique totale,  $\varepsilon_0$  est permittivité du vide,  $\varepsilon_{InAlN}$  et  $\varepsilon_{AlN}$  sont respectivement des constantes diélectriques des couches barrière InAlN et espaceur AlN,  $d_T = d_{ox} + d_{InAlN} + d_{AlN}$  l'épaisseur totale.

La relation de la position d'un quasi-niveau de Fermi et la densité d'un gaz d'électrons 2D formée à l'interface AlN/GaN pour les deux hétérostructures peut être calculée par l'utilisation du modèle de self-consistent qui est lié à la résolution de l'équation de Schrödinger-Poisson dans un puits quantique quasi-triangulaire donnée par [13]:

$$n_s = DV_T \sum_{i=0}^1 \ln \left\{ 1 + \exp \left[ \frac{E_F - E_i}{V_T} \right] \right\}. \quad (IV-36)$$

$D = 4\pi \times m^*/h^2$  est la densité d'état d'un puits quantique triangulaire,  $m^*$  la masse effective de l'électron,  $h$  la constante de Planck,  $V_T = k_B T/q$  la tension thermique,  $k_B$  la constante de Boltzmann,  $T$  la température ambiante.

On considère maintenant seulement le premier niveau d'énergie en terme  $E_0$ , l'équation (IV-36) devient:

$$n_s = DV_T \ln \left\{ 1 + \exp \left[ \frac{E_F - E_0}{V_T} \right] \right\} \quad (IV-37)$$

Nous utilisons l'approximation de la fonction  $\ln(1+x) \approx x$  pour  $x \ll 1$  par théorème de Taylor dans l'équation (IV-37) donc, on peut simplifier:

$$\ln \left[ \exp \left( \frac{E_F - E_0}{V_T} \right) + 1 \right] \approx \exp \left( \frac{E_F - E_0}{V_T} \right) \quad (IV-38)$$

Par conséquent, on obtient :

$$\frac{n_s}{DV_T} = \exp \left( \frac{E_F - E_0}{V_T} \right) \quad (IV-39)$$

De l'équation (IV-39) on peut écrire :

$$V_T \ln \left( \frac{n_s}{DV_T} \right) = E_F - E_0 \quad (IV-40)$$

L'objectif de la modélisation de la densité de charges d'un gaz d'électrons 2D confiné dans un puits quantique quasi triangulaire (canal du transistor) est de développer un niveau de Fermi  $E_F$  par rapport à l'expression de la tension de grille  $V_{g0}$  est lié à la résolution précise possible, ce qui est adapté pour le courant de drain et le développement d'autres modèles.

$$E_F = E_0 + V_T \ln \left( \frac{n_s}{DV_T} \right). \quad (IV-41)$$

En substituant  $E_0$  par l'expression suivante :

$$E_0 = \gamma_0 n_s^{2/3}, \quad (IV-42)$$

Ainsi, l'équation (IV-20) devient:

$$E_F = \gamma_0 n_s^{2/3} + V_T \ln \left( \frac{n_s}{DV_T} \right), \quad (IV-43)$$

$$E_F = \gamma_0 n_s^{2/3} + V_T \ln(n_s) - \ln(DV_T), \quad (IV-44)$$

où  $\gamma_0$  est une constante estimée par Shubnikov De Hass ou expérimentalement par la résonance cyclotronique [14].

Ensuite, en supposant que le chevauchement des déplétions de grille et du canal d'un transistor donne une déplétion totale (la couche de AlGaN ou InAlN est complètement ionisée), pour éliminer le terme  $n_s$ , et on remplace  $n_s$  dans l'équation (IV-43).

Pour l'hétérostructure de type GaN/AlGaN/AlN/GaN  $E_F$  s'exprimer par:

$$E_F = \gamma_0 \left[ \frac{\varepsilon_{ox}}{q(d_{ox}+d_b)} (V_{g0} - E_F) \right]^{2/3} + V_T \left[ \ln \frac{\varepsilon_{ox}}{q(d_{ox}+d_b)} (V_{g0} - E_F) \right] - \ln(DV_T) \quad (IV-45)$$

$$E_F = \gamma_0 \left( \frac{\varepsilon_{ox}}{q(d_{ox}+d_b)} \right)^{2/3} (V_{g0})^{2/3} \left( 1 - \frac{E_F}{V_{g0}} \right)^{2/3} + V_T \ln \frac{\varepsilon_{ox} V_{g0}}{q(d_{ox}+d_b)} + V_T \ln \left( 1 - \frac{E_F}{V_{g0}} \right) - V_T \ln(DV_T), \quad (IV-46)$$

Pour l'hétérostructure de type InAlN/AlN/GaN, l'énergie de Fermi  $E_F$  s'exprimer par :

$$E_F = \gamma_0 \left[ \frac{\varepsilon(x)}{qd_T} (V_{g0} - E_F) \right]^{2/3} + V_T \left[ \ln \frac{\varepsilon(x)}{qd_T} (V_{g0} - E_F) \right] - \ln(DV_T) \quad (IV-47)$$

Nous étendons sur le côté droit des deux termes au premier ordre sous la forme de  $(E_F/V_{g0})$ .

Ensuite, nous pouvons obtenir l'expression du niveau de Fermi :

$$E_F = \gamma_0 \left( \frac{\varepsilon(x)}{qd_T} \right)^{2/3} (V_{g0})^{2/3} \left( 1 - \frac{E_F}{V_{g0}} \right)^{2/3}$$

$$+V_T \ln \frac{\varepsilon(x)V_{g0}}{qd_T} + V_T \ln \left(1 - \frac{E_F}{V_{g0}}\right) - V_T \ln(DV_T), \quad (IV-48)$$

En utilisant l'approximation de l'inégalité de Bernoulli  $(1+x)^n \approx 1+nx$  et l'approximation de la fonction  $\ln(1+x) \approx x$  par théorème de Taylor dans l'équation (IV-46) et (IV-48), il peut être simplifié comme:

$$E_F = \gamma_0 \left(\frac{\varepsilon_{ox}}{q(d_{ox}+d_b)}V_{g0}\right)^{2/3} \left(1 - \frac{2E_F}{3V_{g0}}\right) + V_T \ln \frac{\varepsilon_{ox}V_{g0}}{q(d_{ox}+d_b)} - V_T \frac{E_F}{V_{g0}} - V_T \ln(DV_T) \quad (IV-49)$$

$$E_F = \gamma_0 \left(\frac{\varepsilon(x)}{qd_T}V_{g0}\right)^{2/3} \left(1 - \frac{2E_F}{3V_{g0}}\right) + V_T \ln \frac{\varepsilon(x)V_{g0}}{qd_T} - V_T \frac{E_F}{V_{g0}} - V_T \ln(DV_T), \quad (IV-50)$$

On peut simplifier les équations (IV-48) et (IV-49) comme suit :

$$\frac{V_{g0}}{V_{g0}} E_F + \frac{2}{3} \gamma_0 \frac{E_F}{V_{g0}} \left(\frac{\varepsilon_{ox}}{q(d_{ox}+d_b)}V_{g0}\right)^{2/3} + V_T \frac{E_F}{V_{g0}} = \gamma_0 \left(\frac{\varepsilon_{ox}}{q(d_{ox}+d_b)}\right)^{2/3} + V_T \ln \left(\frac{\varepsilon_{ox}}{q(d_{ox}+d_b)}V_{g0}\right) - V_T \ln(DV_T) \quad (IV-51)$$

$$\frac{V_{g0}}{V_{g0}} E_F + \frac{2}{3} \gamma_0 \frac{E_F}{V_{g0}} \left(\frac{\varepsilon(x)}{qd_T}V_{g0}\right)^{2/3} + V_T \frac{E_F}{V_{g0}} = \gamma_0 \left(\frac{\varepsilon(x)}{qd_T}V_{g0}\right)^{2/3} + V_T \ln \frac{\varepsilon(x)V_{g0}}{qd_T} - V_T \ln(DV_T), \quad (IV-52)$$

Ainsi,  $E_F$  s'exprimer par:

$$E_F = V_{g0} \frac{\gamma_0 \left(\frac{\varepsilon(x)}{q(d_{ox}+d_b)}\right)^{2/3} + V_T \ln \left(\frac{\varepsilon(x)}{q(d_{ox}+d_b)}V_{g0}\right) - V_T \ln(DV_T)}{\frac{2}{3} \gamma_0 \left(\frac{\varepsilon(x)}{q(d_{ox}+d_b)}V_{g0}\right)^{2/3} + V_{g0} + V_T} \quad (IV-53)$$

$$E_F = V_{g0} \frac{\gamma_0 \left(\frac{\varepsilon(x)}{qd_T}V_{g0}\right)^{2/3} + V_T \ln \frac{\varepsilon(x)V_{g0}}{qd} - V_T \ln(DV_T)}{\frac{2}{3} \gamma_0 \left(\frac{\varepsilon(x)}{qd_T}V_{g0}\right)^{2/3} + V_{g0} + V_T}. \quad (IV-54)$$

Sur le site d'accumulation d'un gaz 2DEG, la capacité totale de grille est la capacité équivalente des capacités en séries s'exprimer par:

$$\frac{1}{C_g} = \frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_{MODFETS}}. \quad (IV-55)$$

La capacité équivalente  $C_{MODFETS}$  pour l'hétérostructure GaN/AlGaN/AlN/GaN est donnée par [15]:

$$\frac{1}{C_{MODFETS}} = \frac{1}{C_{GaN}} + \frac{1}{C_{Al_xGa_{1-x}N}} + \frac{1}{C_{AlN}} \quad (IV-56a)$$

$$C_g = \frac{C_{ox} \times C_{GaN} \times C_{Al_xGa_{1-x}N} \times C_{AlN}}{C_{Al_xGa_{1-x}N} \times C_{AlN} \times C_{GaN} + C_{ox} \times C_{Al_xGa_{1-x}N} \times C_{AlN} + C_{ox} \times C_{AlN} \times C_{GaN} + C_{ox} \times C_{Al_xGa_{1-x}N} \times C_{GaN}} \quad (IV-56b)$$

La capacité équivalente  $C_{MODFETS}$  pour l'hétérostructure InAlN/AlN/GaN devient:

$$\frac{1}{C_{MODFETS}} = \frac{1}{C_{In_xAl_{1-x}N}} + \frac{1}{C_{AlN}}. \quad (IV-57a)$$

$$C_g = \frac{C_{ox} \times C_{In_xAl_{1-x}N} \times C_{AlN}}{C_{ox} \times C_{In_xAl_{1-x}N} + C_{ox} \times C_{AlN} + C_{In_xAl_{1-x}N} \times C_{AlN}}. \quad (IV-57b)$$

$C_{ox} = \epsilon_0 \epsilon_{ox} / d_{ox}$  est la capacité de la couche d'oxyde et  $d_{ox}$  l'épaisseur de la couche oxyde,

$$C_{A_xB_{1-x}N} = \epsilon_0 \epsilon_{A_xB_{1-x}N} / d_{A_xB_{1-x}N}.$$

Où  $A$  et  $B$  représentent les éléments chimiques  $Al$ ,  $Ga$  ou  $In$ ,  $C_{AlN} = \epsilon_0 \epsilon_{AlN} / d_{AlN}$  et  $C_{GaN} = \epsilon_0 \epsilon_{GaN} / d_{GaN}$  sont respectivement représentent les capacités reliées par les épaisseurs des couches barrière  $A_xB_{1-x}N$ , espaceur AlN et supplémentaire GaN (cap layer).

En substituant  $C_g$  dans les équations (IV-53) et (IV-54) résulte :

$$E_F = V_{g0} \frac{\gamma_0 \left( \frac{C_g V_{g0}}{q} \right)^{2/3} + V_T \ln \left( \frac{C_g V_{g0}}{q D V_T} \right)}{\frac{2}{3} \gamma_0 \left( \frac{C_g V_{g0}}{q} \right)^{2/3} + V_{g0} + V_T}. \quad (IV-58)$$

On substitue l'équation (IV-43) dans les équations (IV-34) et (IV-35) on trouve:

$$n_s = \frac{\epsilon(x)}{q(d_{ox} + d_b)} \left( V_g - V_{off} - V_p - \gamma_0 n_s^{2/3} + V_T \ln \left( \frac{n_s}{D V_T} \right) \right) \quad (IV-63)$$

$$n_s = \frac{\epsilon(x)}{q d_T} \left( V_g - V_{off} - V_p - \gamma_0 n_s^{2/3} + V_T \ln \left( \frac{n_s}{D V_T} \right) \right) \quad (IV-64)$$

$$V_g - V_{off} - V_p = q \frac{(d_{ox} + d_b)}{\epsilon(x)} n_s + \gamma_0 n_s^{2/3} + V_T \ln \left( \frac{n_s}{D V_T} \right) \quad (IV-65)$$

$$-dV_p = \left[ \frac{q(d_{ox} + d_b)}{\epsilon(x)} + \frac{2}{3} \gamma_0 n_s^{-1/3} + V_T n_s^{-1} \right] dn_s \quad (IV-66)$$

### ***IV.3.3. Modèles des caractéristiques statiques (DC)***

#### ***a) Modèle de courant de fuite***

Lorsque la diode de grille est polarisée en inverse, le courant de fuite a pour effet une dégradation prématurée des transistors à effet de champ à base de GaN. Ce phénomène, est présenté pour la technologie AlGaIn/GaN par Mitrofanov [16] qui l'attribué a un effet tunnel induit par les états de pièges de grille. On observe un phénomène similaire en technologie InAlN/GaN, lié à un effet tunnel [17], dans des proportions plus importantes (pour  $V_{ds} = 20$  V et  $V_{gs} < V_p$  le courant de fuite est d'environ 1 mA/mm). Cet effet tunnel engendre un contrôle du courant par la grille (contact Schottky) moins fiable. Il en résulte un mauvais pincement du réseau pour des tensions de drains importants et par conséquent une diminution des performances de puissance, ainsi qu'une dégradation prématurée des transistors en mode

d'amplification de puissance. En mode de commutation, l'isolation se voit réduite à cause de ces courants de fuite. Cette amélioration technologique rapproche les transistors MIS–MODFETs pouvant présenter la particularité d'être normally–off et normally–on [18]. Nous avons choisi de nous intéresser aux phénomènes précédents car ils sont les plus spécifiques aux transistors MODFETs à base de l'hétérostructure InAlN/GaN. Cependant, il est possible de trouver une explication détaillée des effets intervenant dans le nitrure de gallium GaN dans les manuscrits de Vetury [19], Jardel [20], Faqir [21], et Gonshoreck [22].

En physique du solide, l'effet Poole–Frankel est un des phénomènes physiques responsables de l'existence d'un courant de fuite à travers un diélectrique. Les transistors MODFETs à base de GaN ont des caractéristiques complémentaires, présentes de faibles pertes de conduction, spécialement pour des tensions en tension de claquage élevées et présents aussi des vitesses de commutation élevés, spécialement à l'ouverture. Les transistors MODFETs à base de GaN peut être commute beaucoup plus rapidement.

Dans les transistors MIS–MODFETs à base des matériaux III–N, le courant de fuite de grille est spécialement pour les applications haute fréquence avec des temps de commutation élevés et haute puissance avec des tensions de claquages élevées. Le mécanisme du courant de fuite de grille dans les transistors MIS–MODFETs à base de GaN est analysé par le model d'émission Poole–Frenkel. Le courant Poole–Frenkel dépend fortement de la température et évolue donc en exponentiel du champ électrique à traverse la couche isolante diélectrique, peut être s'écrire selon [1] sous forme :

$$I_g = C_{PF} A E_{ox} \exp \left[ - \frac{q(Q_f - (qE_{ox}/\pi\epsilon_{ox}))}{k_B T} \right] \quad (IV-67)$$

Avec  $C_{PF}$  représente la constante de Poole–Frenkel,  $A$  est la surface du contact de grille et  $E_{ox}$  est le champ électrique à traverse la couche isolante diélectrique,  $q$  est la charge élémentaire de l'électron,  $Q_f$  montre la densité d'états d'interface, et  $\epsilon_{ox}$  est la permittivité de la couche isolante.  $k_B$  et  $T$  sont respectivement la constante de Boltzmann and et la température.

### ***b) Modèle des caractéristiques courant–tension***

En utilisant le modèle analytique de la densité de charges développé dans les équations (IV–63) et (IV–64) pour déterminer l'expression du courant de drain à travers le canal, s'écrit [23]:

$$I_{ds} = \frac{q\mu_0 W_g}{L_g} \int_{V_s}^{V_d} n_s dV_p. \quad (IV-68)$$

Avec  $\mu_0$  est la mobilité à faible champ,  $W_g$  et  $L_g$  sont respectivement la largeur et la longueur de grille.  $V_s$  et  $V_d$  sont respectivement les tensions de source et de drain.

Ainsi, on substitue l'équation (IV-66) dans les équations (IV-68) l'expression finale du courant  $I_{ds}$  est donnée par [23]:

$$I_{ds} = -\frac{q\mu_0 W_g}{L_g} \int_{n_s}^{n_D} n_s \left[ \frac{q(d_{ox}+d_b)}{\varepsilon(x)} + \frac{2}{3} \gamma_0 n_s^{-1/3} + V_T n_s^{-1} \right] dn_s \quad (IV-69)$$

L'intégration de l'équation (IV-69) de la source au drain donne une expression analytique simple du courant drain-source qui s'écrit :

$$I_{ds} = -\frac{q\mu_0 W_g}{L_g} \left\{ \left[ \frac{q(d_{ox}+d_b)}{2\varepsilon(x)} \right] (n_D^2 - n_S^2) + \frac{2}{5} \gamma_0 \left( n_D^{5/3} - n_S^{5/3} \right) + V_T (n_D - n_S) \right\} \quad (IV-70)$$

Avec  $n_D$  et  $n_S$  sont respectivement des densités de charges dans les deux cotés source et drain.

Le modèle du courant dans l'équation (IV-70) peut être utilisé de manière satisfaisante pour reproduire les caractéristiques courant-tension ( $I-V$ ) d'un dispositif à long canal.

### c) *Modèle de la transconductance $g_m$*

La transconductance intrinsèque est définie comme la variation du courant de drain en fonction de la tension de polarisation de grille (tension de commande), à une tension drain-source constante. Ainsi également, permet d'estimer les performances des composants hyperfréquences (microondes).

La transconductance d'un transistor est définie par cette équation:

$$g_m = \left. \frac{\partial I_{ds}}{\partial V_{gs}} \right|_{V_{ds}=const}. \quad (IV-71)$$

La transconductance aussi réécrire [23]:

$$g_m = \frac{\partial I_{ds}}{\partial V_g} = -\frac{q\mu_0 W_g}{L_g} \left\{ \left[ \frac{q(d_{ox}+d_b)}{2\varepsilon(x)} \right] \left( \frac{\partial n_D^2}{\partial V_g} - \frac{\partial n_S^2}{\partial V_g} \right) + \frac{2}{5} \gamma_0 \left( \frac{\partial n_D^{5/3}}{\partial V_g} - \frac{\partial n_S^{5/3}}{\partial V_g} \right) + V_{th} \left( \frac{\partial n_D}{\partial V_g} - \frac{\partial n_S}{\partial V_g} \right) \right\} \quad (IV-72)$$

L'expression de la transconductance devient :

$$g_m = -\frac{q\mu_0 W_g}{L_g} \left[ \left( \frac{q(d_{ox}+d_b)}{\varepsilon(x)} \right) n_D + \frac{2}{3} \gamma_0 n_D^{2/3} + V_{th} \right] \frac{\partial n_D}{\partial V_g} - \left[ \left( \frac{q(d_{ox}+d_b)}{\varepsilon(x)} \right) n_S + \frac{2}{3} \gamma_0 n_S^{2/3} + V_{th} \right] \frac{\partial n_S}{\partial V_g} \quad (IV-73)$$

Les dérivées partielles des densités de charge à la source et au drain sont respectivement

données par :

$$\frac{\partial n_S}{\partial V_g} = \frac{1}{\left(\frac{q(d_{ox}+d_b)}{2\varepsilon(x)}\right) + \frac{2}{3}\gamma_0 n_S^{-1/3} + V_{th} n_S^{-1}} \quad (IV-74)$$

et

$$\frac{\partial n_D}{\partial V_g} = \frac{1}{\left(\frac{q(d_{ox}+d_b)}{2\varepsilon(x)}\right) + \frac{2}{3}\gamma_0 n_D^{-1/3} + V_{th} n_D^{-1}} \quad (IV-75)$$

Les équations (IV-74) et (IV-75) sont respectivement obtenues à partir de la différenciation de l'équation (IV-63) à la source et au drain.

En substituant chaque dérivée partielle des densités de charge à la source et au drain données par les équations (IV-74) et (IV-75) respectivement dans l'équation (IV-73) et la simplification donne :

$$g_m = - \frac{q\mu_0 W_g}{L_g} [n_D - n_S] \quad (IV-76)$$

#### d) Modèle de la charge totale de grille $Q_g$

Le modèle de la charge totale de grille peut se calculer en intégrant la densité de charges dans le puits quantique quasi triangulaire (canal) sous la tension de commande appliquée sur la grille du transistor, est donné par [24]:

$$Q_g = W_g \int_0^L q n_s(V_g, V_p) dx \quad (IV-77)$$

Avec :

$$dx = \frac{W_g q \mu_0 n_s(V_g, V_p)}{I_{ds}} dV_p \quad (IV-78)$$

L'intégration de l'équation (IV-77) d'après la substituant les équations (IV-78), (IV-70) et (IV-66) respectivement dans l'équation (IV-77) on trouve :

$$Q_g = W_g L_g q \left( \frac{\frac{qd}{3\varepsilon} (n_D^3 - n_S^3) + \frac{1}{4}\gamma_0 (n_D^{8/3} - n_S^{8/3}) + \frac{1}{2}V_{th}(n_D^2 - n_S^2)}{\frac{qd}{2\varepsilon} (n_D^2 - n_S^2) + \frac{2}{5}\gamma_0 (n_D^{5/3} - n_S^{5/3}) + V_{th}(n_D - n_S)} \right) \quad (IV-79)$$

#### e) Modèle des capacités grille-source $C_{gs}$ et grille-drain $C_{gd}$

Deux principales capacités intrinsèques associées à la région de grille, grille-source  $C_{gs}$  et grille-drain  $C_{gd}$  sont déterminées par la dérivée partielle de la charge totale de grille donnée et sont respectivement exprimées par :  $C_{gs} = \partial Q_g / \partial V_{gs}$  et  $C_{gd} = \partial Q_g / \partial V_{ds}$  [14].

$$C_{gx} = WLq \frac{\partial n_D}{\partial V_d} \left( \frac{g(n_s) \frac{\partial f(n_s)}{\partial V_x} - f(n_s) \frac{\partial g(n_s)}{\partial V_x}}{(g(n_s))^2} \right) \quad (IV-80)$$

Où par exemple,  $V_x = V_s$  à la borne source et  $V_x = V_d$  à la borne drain et de même  $C_{gx} = C_{gs}$  à la source et  $C_{gx} = C_{gd}$  au drain.

Pour simplifier les différentielles partielles de  $f(n_s)$  et  $g(n_s)$ , on peut les écrire comme les différences de deux fonctions calculées aux bornes source et drain comme suit:

$$f(n_s) = f_{main}(n_D) - f_{main}(n_S) \quad (IV-81)$$

$$g(n_s) = g_{main}(n_D) - g_{main}(n_S) \quad (IV-82)$$

Avec:

$$f_{main}(n_x) = \frac{qd}{3\varepsilon} n_x^3 + \frac{1}{4} \gamma_0 n_x^{8/3} + \frac{1}{2} V_{th} n_x^2 \quad (IV-83)$$

$$g_{main}(n_x) = \frac{qd}{3\varepsilon} n_x^2 + \frac{2}{5} \gamma_0 n_x^{5/3} + \frac{1}{2} V_{th} n_x \quad (IV-84)$$

Où  $n_x = n_D$  au drain et  $n_x = n_S$  à la source. Le principal avantage d'exprimer  $f(n_s)$  et  $g(n_s)$  comme donné par les équations (IV-81) et (IV-82) en utilisant les fonctions données dans les équations (IV-83) et (IV-84) et sont dérivées directe par rapports a  $V_x$  peuvent être écrit comme suite :

$$\frac{df_{main}(n_x)}{dV_x} = \left( \frac{qd}{\varepsilon} n_x^2 + \frac{2}{3} \gamma_0 n_x^{5/3} + \frac{1}{2} V_{th} n_x \right) \frac{dn_x}{dV_x} \quad (IV-85)$$

$$\frac{dg_{main}(n_x)}{dV_x} = \left( \frac{qd}{\varepsilon} n_x + \frac{2}{3} \gamma_0 n_x^{2/3} + \frac{1}{2} V_{th} \right) \frac{dn_x}{dV_x} \quad (IV-86)$$

Où le terme  $\frac{dn_x}{dV_x}$  peut être obtenu à partir de l'équation (IV-66).

Par conséquent, les capacités de grille-source ( $C_{gs}$ ) et grille-drain ( $C_{gd}$ ) peuvent maintenant être exprimées comme suite:

$$C_{gx} = WLq \left( \frac{g(n_s) \frac{df_{main}(n_x)}{dV_x} - f(n_s) \frac{dg_{main}(n_x)}{dV_x}}{(g(n_s))^2} \right) \quad (IV-87)$$

#### IV.3.4. Modèles des caractéristiques dynamiques (AC)

##### a) Modèle de la fréquence de coupure $f_T$

La fréquence de coupure  $f_T$  est l'une des principales fréquences d'analyse des performances électriques de dispositif à régime haute fréquence, détermine que la vitesse de commutation optimale de l'appareil, qui peut être s'exprimer par [3]:

$$f_T = \frac{g_m}{2\pi(C_{gs} + C_{gd})}. \quad (\text{IV-88})$$

***b) Modèle de la fréquence d'oscillation maximale  $f_{max}$***

La fréquence d'oscillation maximale ( $f_{max}$ ) correspond à la fréquence de transition ( $f_t$ ) du gain en puissance maximal disponible est s'exprimer par [25] :

$$f_{max} = \frac{f_T}{\sqrt{4R_g(g_d + 2\pi f_T C_{gd})}}. \quad (\text{IV-89})$$

Où  $R_g$  est la résistance de grille et  $g_d$  représente la conductance de sortie.

## **IV.4. Conclusion**

Nous avons présenté dans ce chapitre les modèles analytiques pour optimiser les caractéristiques électriques statiques (DC) et dynamiques (AC) des transistors MODFETs et MODFETs à grille isolée à base de GaN (MIS-MODFETs). Ainsi également, nous avons passé en revue l'utilisation de l'interpolation linéaire de la loi de Vegard et les approximations de l'inégalité de Bernoulli et de la fonction logarithmique par théorème de Taylor pour déterminer les propriétés physiques.

## Références du chapitre IV

- [1] K. Jena, R. Swain, and T.R. Lenka, "*Physics based mathematical model of 2DEG sheet charge density and DC characteristics of AlInN/AlN/GaN MOS–HEMT*", Int. J. Numer. Model. **30**(1), (2015).
- [2] K. Jena, R. Swain, and T.R. Lenka, "*Effect of thin gate dielectrics on DC, radio frequency and linearity characteristics of lattice-matched AlInN/AlN/GaN metal–oxide–semiconductor high electron mobility transistor*", IET Circuits Devices Syst., **10**(5), 423–432 (2016).
- [3] O. Ambacher, B. Foutz, J. Smart, J.R. Shealy, N.G. Weimann, K. Chu, M. Murphy, A.J. Sierakowski, W.J. Schaff, and L.F. Eastman, "*Two dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization in undoped and doped AlGaIn/GaN heterostructures*", J. Appl. Phys. **87**, 334 (2000).
- [4] H. X. Guang, Z. D. Gang, J. D. Sheng, "*Formation of two dimensional electron gas at AlGaIn/GaN heterostructure and the derivation of its sheet density expression*", C. Phys B, **24**(6), 067301–5 (2015).
- [5] N. Sivarajan, R. Korah, K. Gnanamani, "*Relaxation rate and polarization charge density model for AlN/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/AlN heterostructures*", Turk J Elec Eng & Comp Sci, **25**(4), 3468–3474 (2017).
- [6] E. Sakalauskas, H. Behmenburg, C. Hums, P. Schley, G. Rossbach, C. Giesen, M. Heuken, H. Kalisch, H. Jansen, J. Bläsing, A. Dadgar, A. Krost, and R. Goldhahn, "*Dielectric function and optical properties of Al–rich AlInN alloys pseudomorphically grown on GaN*", J. Phys. D: Appl. Phys. **43**, 5102 (2010).
- [7] J. Kuzmik, "*InAlN/(In)GaIn high electron mobility transistors: some aspects of the quantum well heterostructure proposal*", Semicond. Sci. Technol. **17**, 540–544 (2002).
- [8] V. Fiorentini, F. Bernardini, and O. Ambacher.: "*Evidence for nonlinear macroscopic polarization in IV–V nitride alloy heterostructures*", Appl. Phys. Lett., **80**, 1204 (2002).
- [9] Y. Zhou, Z. Lin, C. Luan, J. Zhao, Q. Yang, M. Yang, Y.F.Z. Wang, and Y. Lv, "*Analysis of interface trap states in InAlN/AlN/GaN heterostructures*", Semicond. Sci. Technol., **29**, 095011 (2014).
- [10] Z.H. Wu, M. Stevens, F.A. Ponce, W. Lee, J.H. Ryou, D. Yoo, and R.D. Dupuis, "*Mapping the electrostatic potential across AlGaIn/AlN/GaN heterostructures using electron holography*", Appl. Phys. Lett., **90**, 03210 (2007).
- [11] T.C., Han, H.D. Zhao, L. Yang, and Y. Wang, "*Simulation study of InAlN/GaN high–electron mobility transistor with AlInN back barrier*", Chin. Phys. B., **26**(10), 107301 (2017).

- [12] E. Iliopoulos, A. Adikimenakis, C. Giesen, M. Heuken, and A. Georgakilas, "Energy bandgap bowing of InAlN alloys studied by spectroscopic ellipsometry"., *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 191907 (2008).
- [13] T.J. Drummond, H. Morkoc, K. Lee, M. Shur, "Model for modulation doped field effect transistor"., *IEEE Electron Device Lett.*, **3**(11), 338–341 (1982).
- [14] A. Beloufa, D. Bouguenna, N. Kermas and D.J. As, "A physics-based compact static and dynamic characteristics model for  $Al_2O_3/In_xAl_{1-x}N/AlN/GaN$  MOS–HEMTs"., *J. Electron. Mater.*, **49**, 2008–2017 (2020).
- [15] M. Lachab, M. Sultana, Q. Fareed, F. Husna, V. Adivarahan, and A. Khan, "Transport properties of  $SiO_2/AlInN/AlN/GaN$  metal–oxide–semiconductor high electron mobility transistors on SiC substrate"., *J. Phys. D: Appl. Phys.* **47**, 135108 (2014).
- [16] O. Mitrofanov, M. Manfra, "Mechanisms of gate lag in GaN/AlGaIn/GaN high electron mobility transistors", *Superlattices Microstruct.*, **34**, 33–53 (2003).
- [17] D. Donoval, A. Chvala, R. Sramaty, J. Kovac, J.F. Carlin, N. Grandjean, G. Pozzovivo, J. Kuzmik, D. Pogany, G. Strasser, and P. Kordos, "Current transport and barrier height evaluation in Ni/InAlN/GaN schottky diodes"., *Appl. Phys. Lett.*, **96**(22), 223501, (2010).
- [18] M. Alomari, F. Medjdoub, J.-F. Carlin, E. Feltin, N. Grandjean, A. Chuvilin, U. Kaiser, C. Gaquiere, and E. Kohn, "InAlN/GaN MOSHEMT with self-aligned thermally generated oxide recess"., *IEEE Electron Device Lett.* **30**(11), 1131–1133 (2009).
- [19] R. Vetury, N. Q. Zhang, S. Keller, and U. K. Mishra, "The impact of surface states on the DC and RF characteristics of AlGaIn/GaN HFETs"., *IEEE Trans. Electron Devices*, **48**(3), 560–566 (2001).
- [20] Olivier Jardel, "Contribution à la modélisation des transistors pour l'amplification de puissance aux fréquences microondes : développement d'un nouveau modèle electrothermique de HEMT AlGaIn/GaN incluant les effets de pièges"., Thèse de Doctorat en Électronique des Hautes Fréquences et Optoélectronique, Université de Limoges, 197 pages (2008).
- [21] Mustapha Faqir, "Analysis of the physical mechanisms limiting performance and reliability of GaN based HEMTs"., Thèse de Doctorat en Ingénierie électronique, Université de Modene & Université de Bordeaux1, 135 pages (2009).
- [22] Marcus Gonschorek, "Physical properties of AlInN/(AlN)/GaN ( $0.07 < x < 0.23$ ) heterostructures and their application for high power electronics"., Thèse de Doctorat en

Ingénierie électronique, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 205 pages (2010).

[23] M.F. Yigletu, S. Khandelwal, T.A. Fjeldly, B. Iñiguez, "*Compact charge-based physical models for current and capacitances in AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMTs*"., IEEE Trans. Electron Devices, **60**, 3746–3752 (2013).

[24] G. Amarnath, R. Swain, T.R. Lenka, "*Modeling and simulation of 2DEG density and intrinsic capacitances in AlInN/GaN MOSHEMT*"., Int J Numer Modell Electron Networks Devices Fields. **31**, 1–8 (2017).

[25] Y.I. Jang, S.H. Lee, J.H. Seo, Y.J. Yoon, R.H. Kwon, M.S. Cho, B.G. Kim, G.M. Yoo, J.H. Lee, and I.M. Kang, "*Design and analysis of AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> MIS HEMTs with a dual–metal gate structure*"., J Semicond Tech Sci., **17**(2), 223–229, (2017).



# Chapitre V

Simulation et interprétation des résultats



## V.1. Introduction

Les transistors à effet de champ sont des composants d'importance majeure dans les différents domaines de l'électronique et de ses dérivées. L'utilisation des technologies de la microélectronique pour la réalisation de ces composants donne la possibilité d'intégration et une production à faible coût. Cela constitue un grand intérêt pour les concepteurs et les ingénieurs en charge du suivi des modèles dans les fonderies. En raison des coûts élevés de l'expérimentation ces dernières années, les chercheurs se sont orientés vers la simulation. Elle est largement utilisée dans le domaine électronique et permet de déterminer les paramètres les plus importants pour le bon fonctionnement des dispositifs, de minimiser les pertes et d'optimiser les paramètres physiques et géométriques de ces dispositifs.

Dans la première partie de ce chapitre, nous présenterons le simulateur Atlas-TCAD, son principe de fonctionnement et ces modules de simulation : Athena pour la simulation des processus technologiques [1], et Atlas [2] pour la simulation du comportement électrique des composants. Nous allons utiliser ce logiciel pour résoudre de façon auto-cohérente les équations de continuité et de Poisson en tout point de la structure simulée. Les équations des différents modèles physiques que l'on veut prendre en compte (modèle de la mobilité, effet des pièges,...) sont résolues en s'appuyant sur les paramètres physiques des matériaux.

Nous présenterons les résultats de simulation des modèles analytiques des caractéristiques statiques (DC) et dynamiques (AC) des transistors MODFETs et MIS-MODFETs. Pour cela, nous avons utilisé le langage Matlab.

Dans ce chapitre nous allons étudier l'influence des matériaux isolants tels que  $\text{HfO}_2$  et  $\text{ZrO}_2$  à forte permittivité diélectrique sur les caractéristiques statiques (DC) et dynamiques (AC) des transistors MODFETs et MIS-MODFETs à base de différents types des hétérostructures GaN/AlGaN/AlN/GaN et InAlN/AlN/GaN, en utilisant le langage Matlab et le simulateur Atlas-TCAD et valider les résultats de simulation obtenus par des mesures expérimentales publiés dans littérature.

## V.2. Simulation des transistors MIS-MODFETs par Atlas-TCAD

La simulation est un moyen très important pour la compréhension et l'explication de certains phénomènes physiques qui régissent le fonctionnement des dispositifs électroniques et leurs performances, ce chapitre est consacré pour la simulation et l'interprétation des résultats de simulation obtenus.

Nous allons réaliser des simulations numériques des transistors MODFETs et MIS-MODFETs en 2D sous l'outil du simulateur Atlas-TCAD. La conception de la structure des transistors

MODFETs et MIS–MODFETs comprend la définition du maillage, les différentes régions, les électrodes et les dopages des couches. La résolution numérique comprend la détermination des choix des modèles physiques et des méthodes mathématique utilisés par le simulateur pour trouver la solution.

Le simulateur Atlas–TCAD est un logiciel qui admet un grand entourage des entrées et des sorties, on représente cet entourage dans la figure (V–1) et on prend en compte que l’environnement d’exécution (DeckBuild) reçoit les fichiers d’entrée, dans lesquels Atlas–TCAD a été appelé à exécuter le code, et (TonyPlot) a été utilisé pour afficher et visualiser les résultats de simulation à la sortie [3].

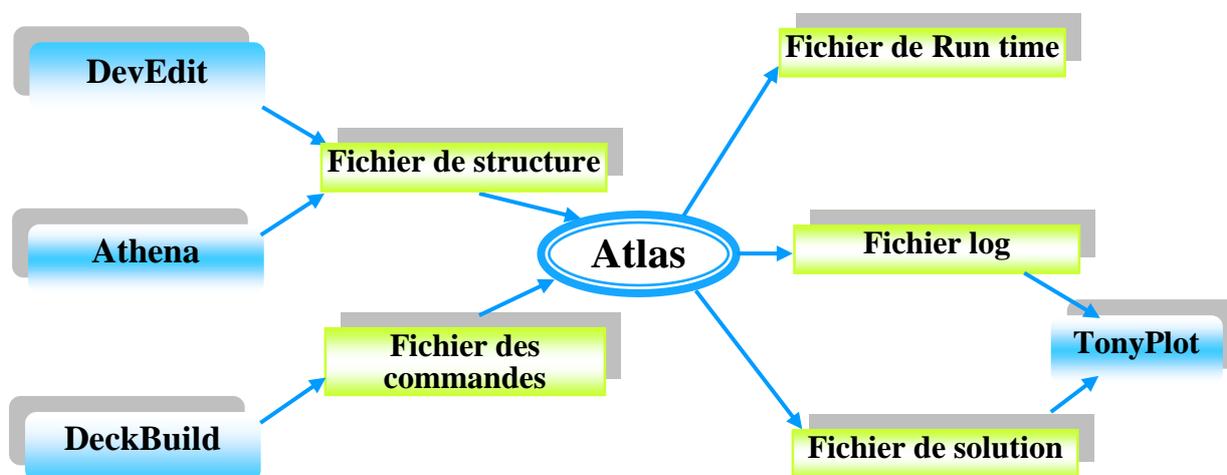


Figure V–1: Entrées et sorties du simulateur Atlas–TCAD [4].

### V.3. Différents étapes de simulation

#### V.3.1. Présentation du logiciel de simulation par Atlas–TCAD

Le Silvaco (Silicon Valley Corporation) est un environnement de logiciels qui permet de concevoir et prévoir les performances des dispositifs à semi-conducteurs. Cet outil de conception des dispositifs à semi-conducteurs avant leur fabrication. Il est très utile dans le développement de beaucoup de projets de recherches. Le simulateur Atlas–TCAD inclut de nouveaux modèles physiques qui emploient des méthodes et des algorithmes numériques efficaces, de nouvelles techniques de maillage, l’optimisation des solutions linéaires, etc..., toutes en permettant d’obtenir des résultats de simulation très proches de celles de la pratique. L’avantage majeur de ce type de simulateurs est qu’il donne la possibilité de visualiser des phénomènes physiques difficilement accessibles et donc observables. Les modules du simulateur Atlas–TCAD peuvent être utilisés pour:

- La simulation des étapes de fabrication technologique par le module Athena.

☑ La simulation électrique des dispositifs par le module Atlas–TCAD.

Le programme de simulation défini (comme entrée) des différentes étapes technologiques et les phénomènes physiques, s’établit avec le module Deckbuild du simulateur Atlas–TCAD, puis la visualisation de la structure de sortie s’effectue avec le module Tonyplot [1] comme montre le schéma ci-dessous.

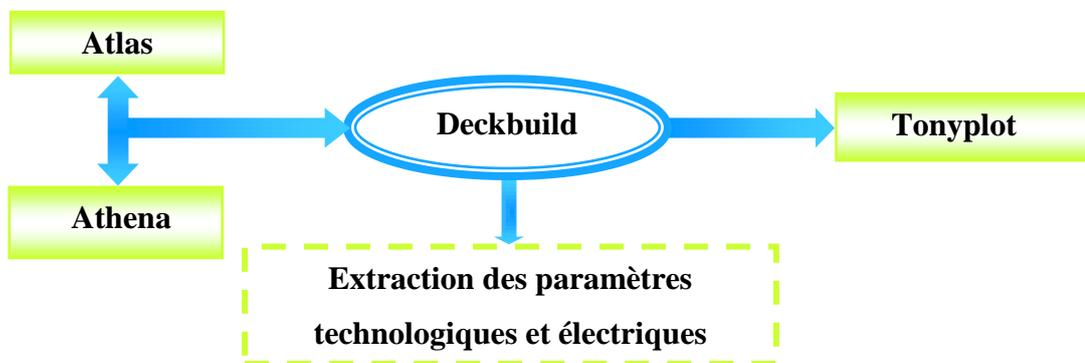


Figure V–2: Schéma synoptique dans la simulation par une société américaine Silvaco [4].

### V.3.2. Logique de programmation

Nous allons présenter l’ordre des commandes propres à logique de programmation par le simulateur Atlas–TCAD. Ainsi il existe cinq groupes de commandes, ces groupes doivent être organisés sur le schéma ci-dessous.

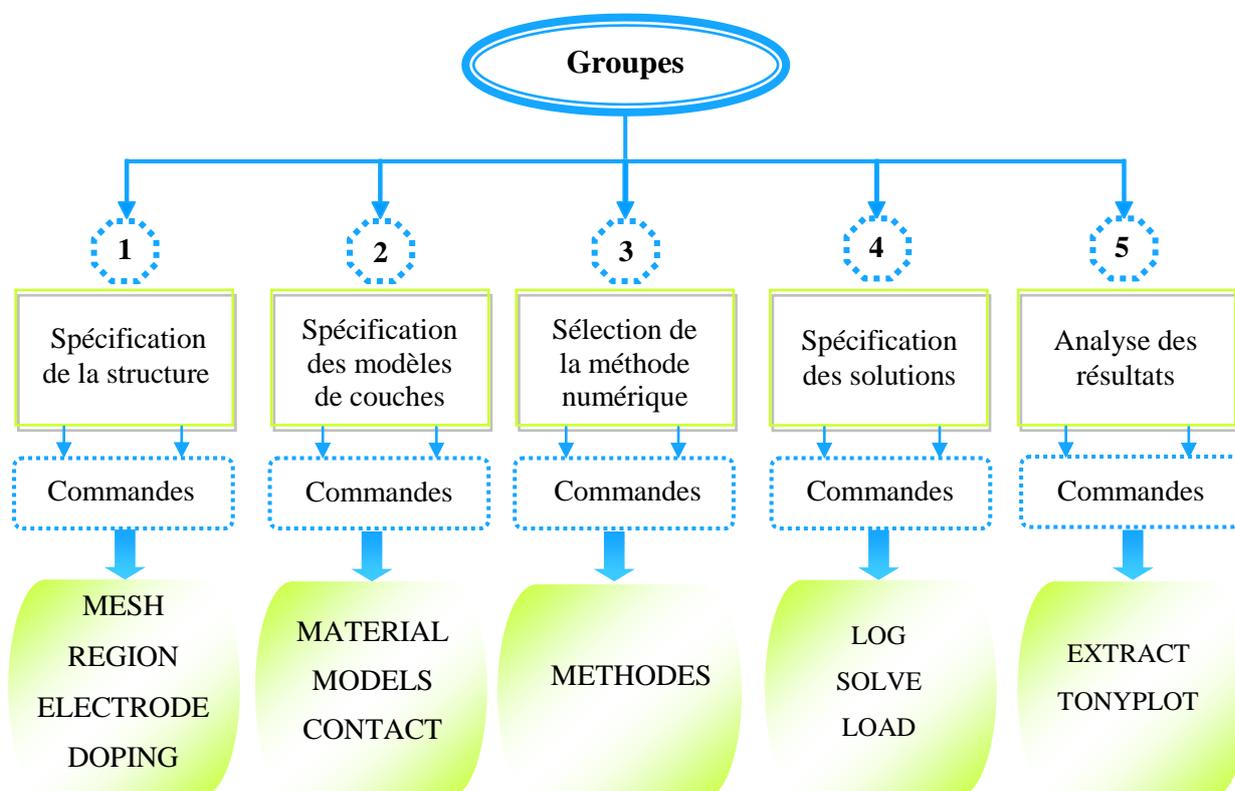
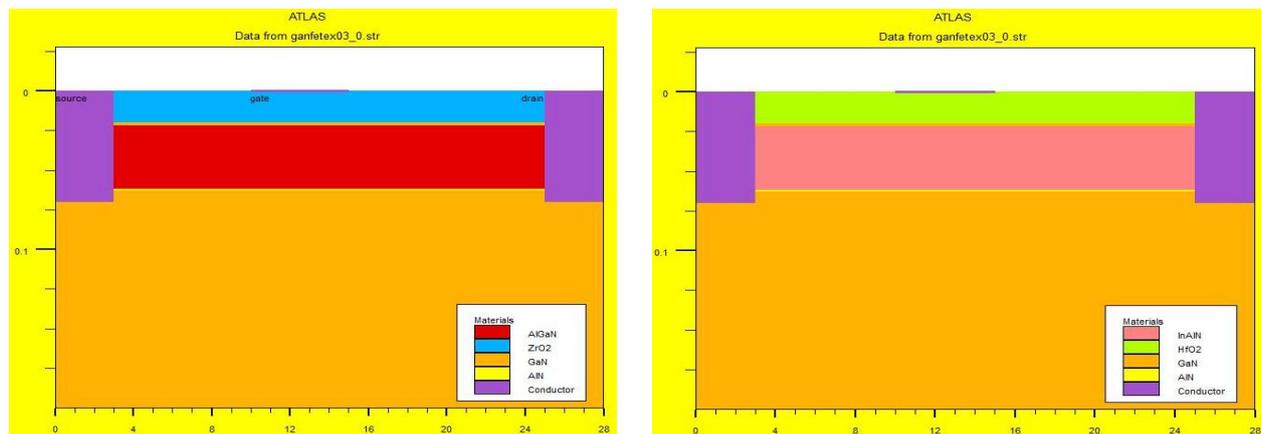


Figure V–3: Ordre de groupe des commandes dans un programme Atlas–TCAD [4].

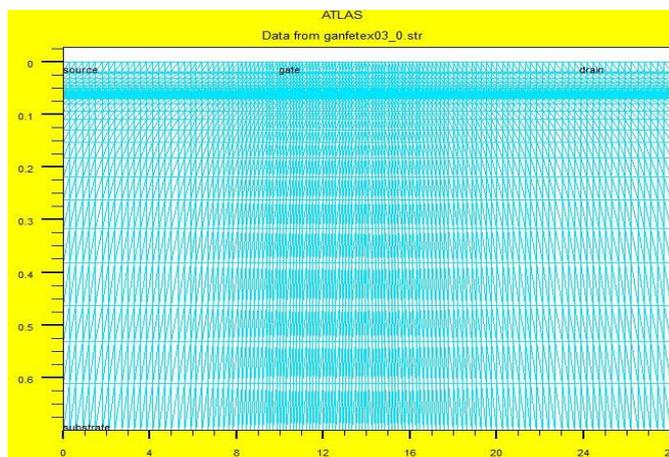
*a) Spécification de la structure étudiée*

Les structures des transistors MODFETs à base de GaN à simuler sont introduites sous forme de texte dans Deckbuild et sont présentées sur la figure (V-4). Pour construire correctement un composant dans Deckbuild l'utilisateur doit définir plusieurs paramètres clefs pour obtenir un résultat précis [5].



**Figure V-4:** Structures des transistors MIS-MODFETs à base de différents types des hétérostructures GaN/AlGaIn/AlN/GaN et InAlN/AlN/GaN simulées par Atlas-TCAD pour différents types de matériaux isolants. (a)  $HfO_2$  et (b)  $ZrO_2$ .

**MESH** : cette commande produit un maillage qui joue un rôle important pour l'obtention des bons résultats de simulations. Celui-ci doit être fait avec la plus grande attention pour garantir la fiabilité des résultats. C'est une série de lignes horizontales et verticales. Le maillage doit être dense à l'interface de l'hétérojonction AlN/GaN pour le gaz d'électrons bidimensionnel suivant l'axe y. Il est aussi très fin sous l'électrode de grille et de part et d'autre de chacune des électrodes suivant l'axe des x [6]. La maille conçue pour notre composant électronique est montrée sur la figure (V-5).



**Figure V-5:** Maillage de la structure des transistors MIS-MODFETs simulé par Atlas-TCAD.

☑ **REGION** : indique la position des matériaux dans le maillage définie précédemment. La figure (V-6) montre les régions des transistors MIS-MODFETs.

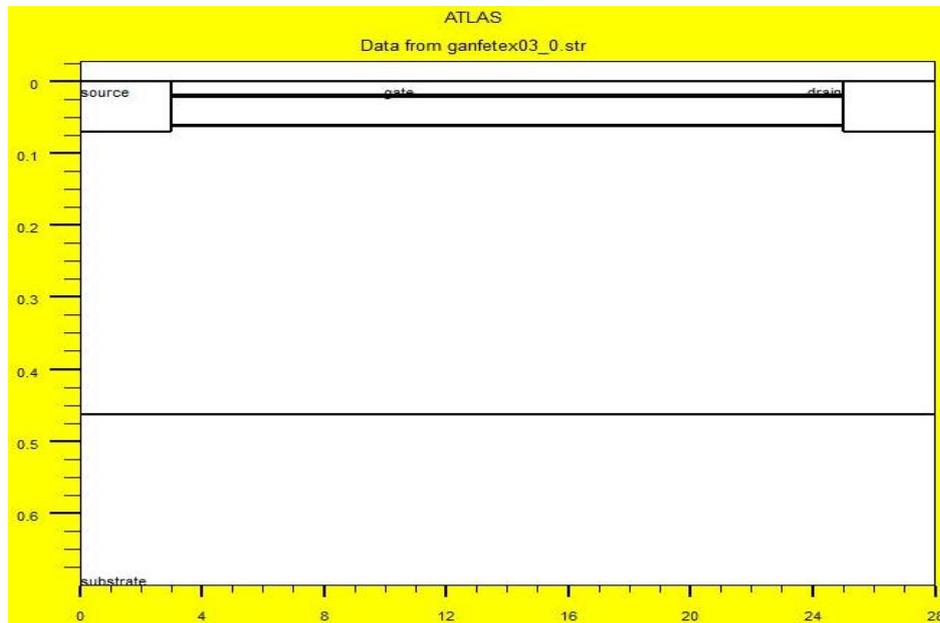


Figure V-6: Définition des régions des transistors MIS-MODFETs simulés par Atlas-TCAD.

☑ **ELECTRODE** : Atlas-TCAD a une limite de 50 électrodes qui peuvent être définies. La figure (V-7) montre la position de drain, source et grille par des valeurs de  $x$  et de  $y$  [5].

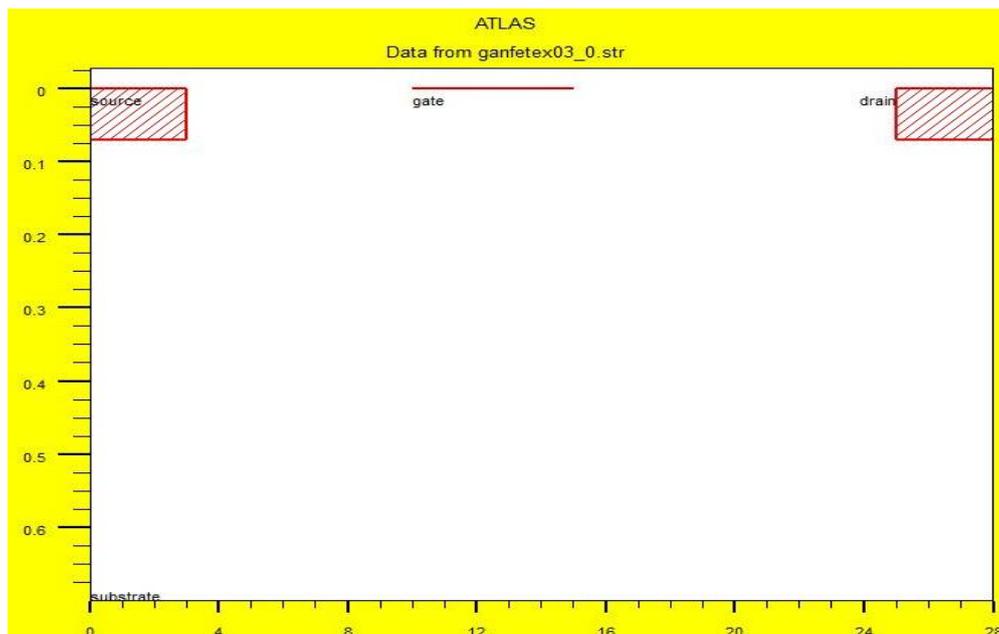


Figure V-7: Définition des électrodes des transistors MIS-MODFETs simulés par Atlas-TCAD.

☑ **DOPING** : le dernier aspect de la spécification de la structure qui doit être défini est le dopage. Dans la figure (V-8), les types de dopage et les niveaux de dopage sont définis. Le dopage peut être de type  $n$  ou  $p$ . Le type de distribution peut être uniforme ou gaussienne.

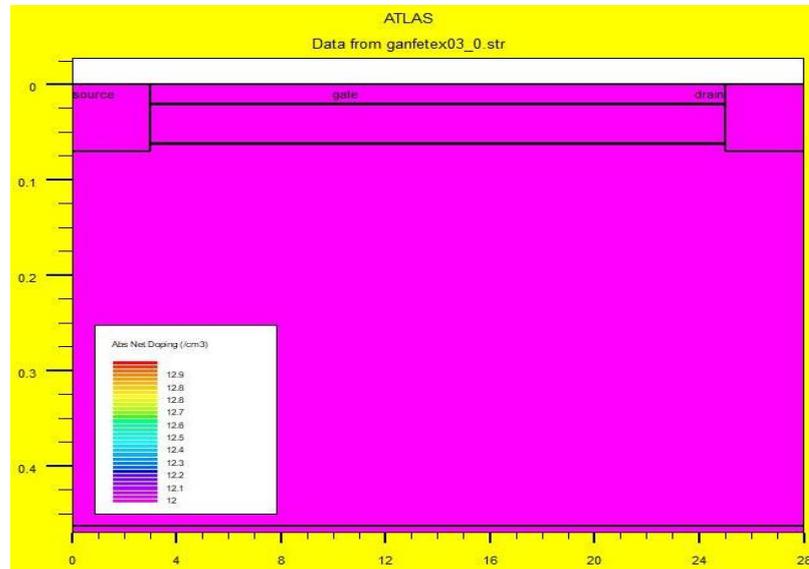


Figure V-8: Définition de dopage simulé par Atlas-TCAD.

### b) Spécification des modèles des couches [7]

☑ **MATERIAL** : cette déclaration associe des paramètres physiques aux matériaux de la structure.

☑ **MODELS** : indique les carreaux constitutifs du modèle, ils indiquent les inclusions de différents mécanismes physiques, de modèles ou des autres paramètres comme par exemple la température globale pour la simulation.

☑ **CONTACT** : indique les attributs physiques d'une électrode.

☑ **INTERFACE** : indique les paramètres d'interface aux frontières de semiconducteur/isolant. Tous les paramètres s'appliquent seulement aux nœuds de frontière exceptés la où ils sont déjà indiqués.

### c) Sélection de la méthode numérique

En fin la sélection de la méthode numérique de résolution doit être indiquée. Trois méthodes numériques sont utilisées dans le simulateur Atlas-TCAD:

- ☑ Méthode de Gummel.
- ☑ Méthode de Newton.
- ☑ Méthode des blocs.

Deux méthodes de calcul peuvent être utilisées simultanément par exemple la méthode de Newton et celle de Gummel. Tel que, les équations sont résolues par la méthode Gummel, Si la convergence n'est pas atteinte, les équations sont résolues en utilisant la méthode de Newton [6].

### *d) Spécification des solutions [4]*

**LOG** : permet à toutes les caractéristiques finales de simulation d'être sauvées dans un fichier (ouvre un fichier de type log).

**SOLVE** : ordonne à Atlas d'exécuter une solution pour un ou plusieurs points de polarisation.

**LOAD** : charge des solutions précédentes à partir des fichiers en tant que conjectures initiales à d'autres points de polarisation.

**EXTRACT** : les commandes de ce type sont utilisées pour extraire des valeurs bien précises des paramètres des deux types des fichiers log ou structure.

**TONYPLOT** : démarre le programme «TonyPlot» de post processus graphique des donnés.

En Résumé on peut dire que chacun des dispositifs à concevoir est représenté comme une structure maillée où chaque nœud a des propriétés qui lui sont associés telles que le type de matériau, la concentration en dopant, etc. Ainsi, pour chaque nœud, la concentration de porteurs, le champ électrique, etc..., peuvent être calculés. Les électrodes sont représentées par des surfaces sur lesquelles les conditions aux limites sont imposées, comme par exemple, les tensions appliquées.

### *V.3.3. Equations de base de semiconducteurs en Atlas-TCAD*

La structure du dispositif à simuler peut être complètement arbitraire. Une fois celle-ci réalisée, elle est découpée en éléments finis, formant ainsi ce qu'on appelle un maillage. Le potentiel électrostatique et les concentrations de porteurs en fonction de l'espace et du temps sont alors calculés à chaque nœud du maillage à partir des équations de Poisson (V-1) et de continuité (V-2) et (V-3).

Equation de Poisson : montre une relation entre le potentiel et la densité des porteurs [8]:

$$\varepsilon \Delta V = -q(p - n + N_D^- - N_A^+) \quad (\text{V-1})$$

où  $\varepsilon$  est le constant diélectrique,  $V$  le potentiel,  $\Delta V$  le Laplacien du potentiel,  $q$  est la charge élémentaire d'électrons  $N_D^-$  et  $N_A^+$  sont les concentrations des dopants donneurs et accepteurs ionisés.  $n$  et  $p$  sont les densités des porteurs.

☑ Equations de continuité : l'évolution temporelle des densités de porteurs obéit aux équations de continuité pour les électrons et les trous [8]:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = G_n - U_n + \frac{1}{q} \text{div}(\vec{J}_n) \quad (\text{V-2})$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = G_p - U_p + \frac{1}{q} \text{div}(\vec{J}_p) \quad (\text{V-3})$$

où  $G$  et  $U$  sont respectivement les taux de génération et de recombinaison des porteurs,  $\vec{J}_n$  et  $\vec{J}_p$  sont respectivement les densités de courant des électrons et des trous. Les dérivations basées sur la théorie de transport de Boltzmann ont prouvé que la densité des courants dans les équations de continuité peut être définie par le modèle d'entraînement-diffusion. Les densités de courants sont exprimées en deux termes. Le premier correspond à l'entraînement des charges par le champ électrique, le second correspond à la diffusion des porteurs :

$$\vec{J}_n = qn\mu_n\vec{E} + q D_n \overrightarrow{\text{grad}}(n) \quad (\text{V-4})$$

$$\vec{J}_p = qp\mu_p\vec{E} + q D_p \overrightarrow{\text{grad}}(p) \quad (\text{V-5})$$

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}}(V) \quad (\text{V-6})$$

où  $D_n$  et  $D_p$  sont les coefficients de diffusion. Ils sont directement reliés aux mobilités des porteurs par la relation d'Einstein :

$$D_n = \frac{KT}{q} \mu_n \quad (\text{V-7})$$

$$D_p = \frac{KT}{q} \mu_p \quad (\text{V-8})$$

Les modèles physiques dans les semiconducteurs ont été modélisés sous la forme d'expressions mathématiques reliant le potentiel électrostatique et la densité des porteurs. La modélisation physique est réalisée en tenant compte de la probabilité d'occupation des niveaux d'énergie, de la mobilité des porteurs et des différents types de recombinaison-génération.

### V.3.4. Organigramme du programme de simulation par Atlas-TCAD

Le programme que nous avons conçu est décrit par l'organigramme suivant :

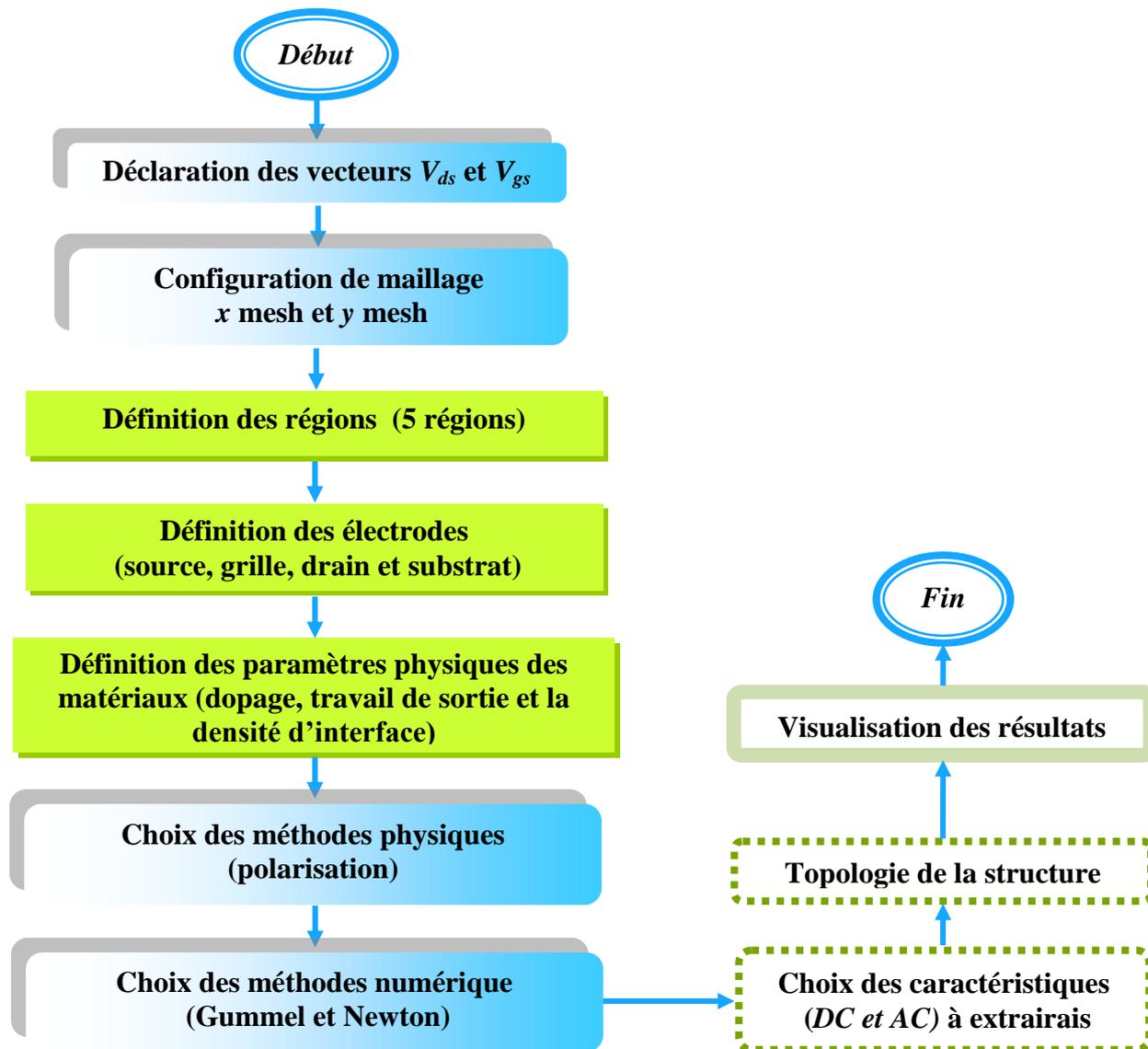


Figure V-9: Organigramme du programme de simulation par Atlas-TCAD.

### V.4. Organigramme de simulation décrit en langage Matlab

Pour compléter nos modélisations, nous avons besoin d'un autre logiciel. Ce logiciel de simulation interactif avec l'utilisateur, décrit en langage Matlab, est une application directe des expressions établies dans le chapitre précédent.

Le logiciel est conçu à partir d'équations que nous avons obtenues lors de la détermination des caractéristiques du courant de drain en fonction des tensions de polarisation et des paramètres

physiques et géométriques du composant. Il permet de déterminer [9]:

- ☑ Les caractéristiques courant-tension dans les différents régimes de fonctionnement.
- ☑ La conductance de sortie et la transconductance.
- ☑ L'effet des tensions  $V_{gs}$  et  $V_{ds}$  sur les caractéristiques statiques et dynamiques.
- ☑ L'effet des paramètres technologiques sur les performances électriques.

L'organigramme présenté sur la figure (V-10) illustre le procédé de résolution utilisé pour le développement du code de calcul. Ce programme est réalisé en langage Matlab.

Les paramètres utilisés dans notre simulation sont regroupés dans le tableau (V-1).

**Tableau V-1:** Liste des valeurs des paramètres utilisés dans notre simulation.

Paramètres	Valeurs	Unités	Réfs.
$q$	$1.6 \times 10^{-19}$	$C$	[10]
$m^*$	$0.22m_0$	$kg$	[10]
$k_B$	$1.380 \times 10^{-23}$	$J/K$	[10]
$T$	300	$K$	[10]
$E_c$	$178 \times 10^5$	$V/m$	[11]
$\varphi_s$	2.9	$V$	[12]
$\varepsilon_0$	$8.854 \times 10^{-12}$	$F/m$	[13]
$\varepsilon_{AlN}$	$10.3\varepsilon_0$	$F/m$	[14]
$\sigma_{AlN/GaN}$	$6.5 \times 10^{17}$	$m^{-2}$	[15]
$\Delta E_C^{AlN/GaN}$	1.7	$eV$	[16]
$\mu_0$	0.06	$m^2/Vs$	[13]
$\gamma_0$	$4 \times 10^{-12}$	---	[17]
$R_s$	50	$\Omega$	[12]
$R_g$	86.7	$\Omega$	[12]
$\beta$	0.2	---	[12]

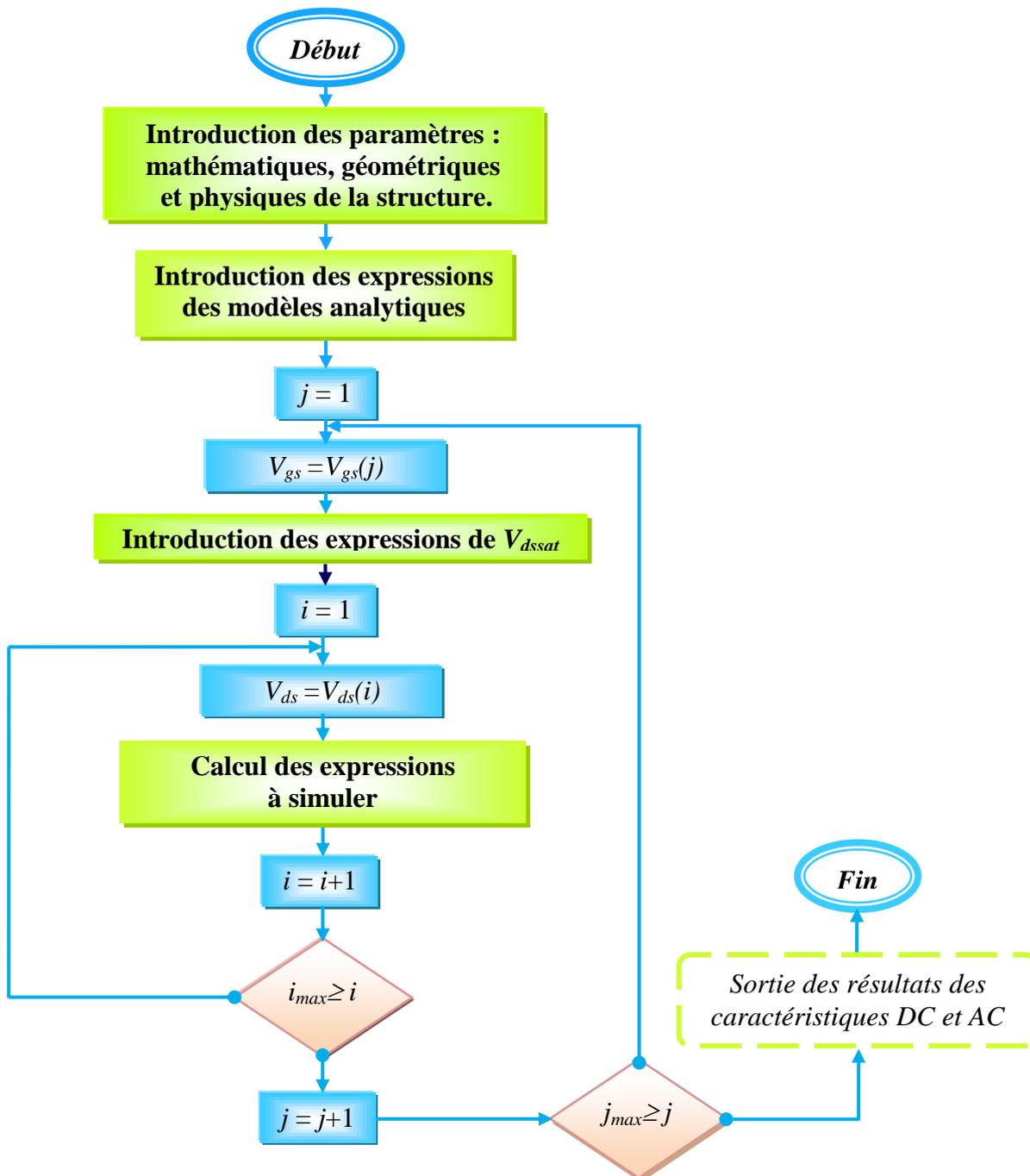


Figure V–10: Organigramme général du programme de simulation numérique par Matlab.

## V.5. Permittivité des matériaux isolants utilisés

Le développement des matériaux isolants à forte permittivité, largement dénommés dans la littérature comme «high- $\kappa$ » pour des structures avancées métal-isolant-métal (MIM) ou encore métal-isolant-semiconducteur (MIS) est un point clef pour les futurs dispositifs de télécommunications.

Une grande variété des matériaux à fortes permittivités ont été étudiés en tant que remplaçants possibles de SiO<sub>2</sub>. Comparée à il y a 7–9 ans, la liste des matériaux candidats en cours d'étude a été nettement restreinte, en raison des spécifications beaucoup plus strictes imposées à ces matériaux [18]. Parmi les matériaux candidats les plus prometteurs, HfO<sub>2</sub> et ZrO<sub>2</sub> "high-κ", représentent des solutions potentielles à moyen terme.

### V.5.1. Oxyde d'hafnium (HfO<sub>2</sub>)

Les premiers transistors à base de HfO<sub>2</sub> sortent des lignes de productions des industries des matériaux semiconducteurs (Intel, IBM, ST, ...) pour les technologies de 45 nm. Les films diélectriques à base de HfO<sub>2</sub> sont amorphes; ce sont en fait des empilements de deux oxydes :

- ☑ une couche d'interface de SiO<sub>2</sub> d'environ 0.5 nm.
- ☑ une couche de diélectrique à forte permittivité (HfO<sub>2</sub> ou plutôt HfO<sub>2</sub> et SiN) d'une épaisseur de quelques nanomètres [19].

Le dioxyde d'hafnium possède des caractéristiques intrinsèques intéressantes : sa constante diélectrique se situe aux alentours de 24 [20], sa bande interdite est de l'ordre de 5.8 eV et enfin les discontinuités de bandes de conduction et de valence entre cet oxyde et le silicium sont respectivement égales de 1.5 eV à 3.4 eV [21]. Cet oxyde a été étudié depuis la fin des années 90 [21]. C'est sous sa forme amorphe que l'oxyde d'hafnium est utilisé.

### V.5.2. Oxyde de zirconium (ZrO<sub>2</sub>)

C'est une poudre blanche, présente un point de fusion à 2677 °C et un point d'ébullition à 3500 °C. Il existe sous différentes variétés cristallines, selon la température: T > 1100 °C, c'est un matériau sous forme tétragonale, en dessous de cette température il se transforme vers une phase monoclinique. La permittivité du dioxyde zirconium se situe aux alentours de 30 [22], sa bande interdite est de l'ordre de 5.8 eV et enfin les discontinuités de bandes de conduction et de valence entre cet oxyde et le GaN sont respectivement égales de 1.1 eV à 0.99 eV [23].

## V.6. Influence des matériaux isolants sur les caractéristiques statiques (DC) et dynamiques (AC) des transistors MIS-MODFETs à base de GaN

Les paramètres physiques et géométriques utilisés dans notre calcul de simulation des transistors MODFETs et MIS-MODFETs à base de différents types des hétérostructures GaN/AlGaIn/AlN/GaN et InAlN/AlN/GaN sont rassemblés dans le tableau (V-2).

**Tableau V–2:** Paramètres technologiques utilisés dans les calculs de simulations calibrés des performances électriques DC et AC des transistors MODFETs et MIS–MODFETs à base de différents types des hétérostructures GaN/AlGaN/AlN/GaN et InAlN/AlN/GaN.

Paramètres	Signification	GaN/AlGaN/AlN/GaN		InGaN/AlN/GaN	
$V_T$ (V)	Tension thermique	$259 \times 10^{-4}$	[24]	$259 \times 10^{-4}$	[24]
$Q_f$ ( $cm^{-2}$ )	Densité des pièges d'interface	$4.6 \times 10^{11}$ (HfO <sub>2</sub> )	[25]	$9.8 \times 10^{12}$ (HfO <sub>2</sub> )	[27]
		$3.2 \times 10^{10}$ (ZrO <sub>2</sub> )	[26]	$1 \times 10^{13}$ (ZrO <sub>2</sub> )	[28]
$\epsilon_0$ (F/m)	Permittivité de vide	$8.854 \times 10^{-12}$	[13]	$8.854 \times 10^{-12}$	[13]
$\epsilon_{GaN}$ (F/m)	Permittivité de la couche superficielle (cap layer)	$9.5\epsilon_0$	[29]	$9.5\epsilon_0$	[29]
$\epsilon_{Ox}$ (F/m)	Permittivité de la couche isolant	$25\epsilon_0$ (HfO <sub>2</sub> )	[30]	$25\epsilon_0$ (HfO <sub>2</sub> )	[30]
		$30\epsilon_0$ (ZrO <sub>2</sub> )	[30]	$30\epsilon_0$ (ZrO <sub>2</sub> )	[30]
$\epsilon_{AlN}$ (F/m)	Permittivité de la couche espaceur	$10.3\epsilon_0$	[14]	$10.3\epsilon_0$	[14]
$d_{Ox}$ (nm)	Epaisseur de la couche isolant	20	[30]	10	[22]
$d_{GaN}$ (nm)	Epaisseur de la couche superficielle	2	[30]	-	
$d_{barrière}$ (nm)	Epaisseur de la couche barrière	40	[30]	12.6	[22]
$x$	Fraction molaire	30% (Al)	[30]	18% (In)	[22]
$d_{AlN}$ (nm)	Epaisseur de la couche espaceur	1	[30]	1.1	[22]
$L_g$ ( $\mu m$ )	Longueur de la grille	5	[30]	2	[22]
$W_g$ ( $\mu m$ )	Largeur de la grille	24	[30]	100	[22]
$\gamma_0$ ( $Vcm^{4/3}$ )	Paramètre de fitting	$2.12 \times 10^{-12}$	[25]	$2.12 \times 10^{-12}$	[25]

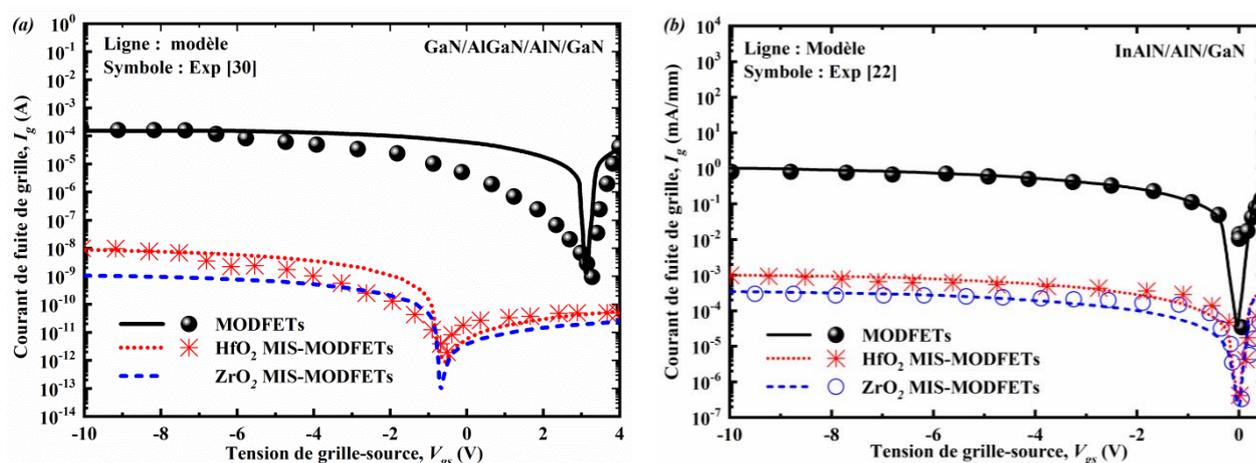
### V.6.1. Caractéristiques statiques (DC)

#### a) Caractéristiques du courant de fuite

Les caractéristiques statiques (DC) du courant de fuite de grille des transistors MODFETs et MIS–MODFETs à base de matériaux isolants HfO<sub>2</sub> et ZrO<sub>2</sub> sont présentés dans la figure (V–11). Le modèle analytique du courant de fuite est présenté dans le chapitre IV précédent. On remarque dans les deux directions des tensions de polarisation de grille-source (inverse et directe), les résultats de simulations des caractéristiques du courant de fuite du modèle analytique pour les différents types des transistors sont similaires avec les résultats expérimentales obtenus par Cui *et al.* [30] et Kuzmik *et al.* [22] pour les deux hétérostructures sont respectivement GaN/AlGaN/AlN/GaN et InAlN/AlN/GaN.

D'après les résultats de simulation calibrés du modèle analytique du courant de fuite, on observe que les transistors MIS–MODFETs présentent des réductions significatives du courant de fuite en

particulier pour l'utilisation du matériau isolant  $ZrO_2$ , ce qui caractérisé par des meilleurs propriétés électriques telles que la permittivité diélectrique élevée d'environ de 30  $F/m$  et la stabilité thermique comparable à celle de  $HfO_2$  qui est instable thermodynamiquement pour la réalisation des dispositifs électroniques de forte puissance. Le matériau isolant joue un rôle très important pour minimiser les défauts d'interfaces qui participent au courant de fuite par différents phénomènes comme l'effet d'émission de Poole–Frenkel, ce qui permet de conclure que le composant avec le matériau isolant  $ZrO_2$  présente moins de défauts d'interfaces que les transistors MODFETs. Lorsque la tension de polarisation  $V_{gs} = -10 V$  appliquée sur la grille dans la direction inverse, le courant de fuite diminue respectivement de quatre à cinq ordres de grandeurs pour les isolants  $HfO_2$  et  $ZrO_2$  comparable avec les transistors MODFETs à base de l'hétérostructure  $GaN/AlGaN/AlN/GaN$ . Par ailleurs, les transistors MIS–MODFETs à base de l'hétérostructure  $InAlN/AlN/GaN$  le courant de fuite diminue respectivement de trois à quatre ordres de grandeurs pour les isolants  $HfO_2$  et  $ZrO_2$  comparable avec les transistors MODFETs. Cela explique que l'isolant  $ZrO_2$  présente moins du courant de fuite par rapport à l'isolant  $HfO_2$  pour les deux hétérostructures et donc l'utilisation de  $ZrO_2$  comme isolant est un bon choix pour les transistors MIS–MODFETs. La validation de nos résultats numériques obtenus par langage Matlab ont été confirmés en comparant les résultats obtenus expérimentalement [30] et [22], on observe qu'il y a un bon accord.



**Figure V–11:** Résultats de simulation calibrés de caractérisation du courant de fuite des transistors MODFETs et MIS–MODFETs à base de l'hétérostructure. a)  $GaN/AlGaN/AlN/GaN$  et b)  $InAlN/AlN/GaN$ .

Pour les applications de commutation haute puissance à la tension de claquage très élevé nécessite du courant de fuite très faible, ce signifié que la saturation du courant de drain des transistors [31].

*b) Caractéristiques de sortie  $I_{ds}(V_{ds})$*

Parmi les types différents des matériaux isolants à forte permittivité insérés entre le contact Schottky et la couche barrière dans les transistors MIS–MODFETs tels que  $\text{HfO}_2$  et  $\text{ZrO}_2$  jouent un rôle primordial pour améliorer les performances électriques statiques. L'évolution du courant de drain des caractéristiques de sortie  $I_{ds}(V_{ds})$  des transistors MODFETs conventionnels et MIS–MODFETs à base de GaN pour différents valeurs de la tension de polarisation de grille  $V_{gs}$  sont illustrées dans la figure (V–12). Ainsi, la figures (V–12) montrent une validation des résultats de simulation calibrés du modèle analytique des caractéristiques de sortie des transistors MODFETs et MIS–MODFETs et extraits par le simulateur Atlas-TCAD et celles des mesures expérimentales obtenus par Cui *et al.* pour les transistors à base de l'hétérostructure GaN/AlGaN/AlN/GaN [30] et Kuzmik *et al.* pour les transistors à base de l'hétérostructure InAlN/AlN/GaN [22]. On observe que, les caractéristiques de sortie  $I_{ds}(V_{ds})$  des transistors MODFETs conventionnels et MIS–MODFETs avec un empilement du matériau isolant  $\text{HfO}_2$  à base des hétérostructures GaN/AlGaN/AlN/GaN et InAlN/AlN/GaN, présentent un bon accord pour valider le modèle analytique des caractéristiques de sortie. On peut constater que le courant de drain de saturation maximal  $I_{ds,sat}$  sont respectivement de l'ordre de 457 mA/mm, 556 mA/mm et 580 mA/mm pour les transistors MODFETs conventionnels, MIS-MODFETs avec l'utilisation des empilements des matériaux isolants  $\text{HfO}_2$  et  $\text{ZrO}_2$  à la même tension de polarisation du drain  $V_{ds} = 1 \text{ V}$  pour l'hétérostructure GaN/AlGaN/AlN/GaN.

La réduction du champ électrique dans le canal réduit également le phénomène d'ionisation par impact qui est illustré par d'excellentes courbes des caractéristiques de sortie  $I_{ds}(V_{ds})$  illustrées dans les figures (V-12c) et (V-12e). Ces caractéristiques statiques ne présentent pas d'effet Kink ni d'augmentation de la conductance de sortie à fortes valeurs de la tension de polarisation de drain  $V_{ds}$ .

En fait, le dioxyde de zirconium ( $\text{ZrO}_2$ ) possède de meilleure performance statique dû au faible courant de fuite de grille, meilleure stabilité thermique et de meilleure fiabilité pendant 48 heures [30]. Pour les applications à haute puissance et haute température comparable au matériau isolant  $\text{HfO}_2$  qui instable à haute température. Les tensions de pincement des transistors MODFETs conventionnels et MIS–MODFETs sont respectivement de  $-6.7 \text{ V}$  et  $-8,7 \text{ V}$  pour  $\text{HfO}_2$  et  $-8.2 \text{ V}$  pour l'isolant  $\text{ZrO}_2$ .

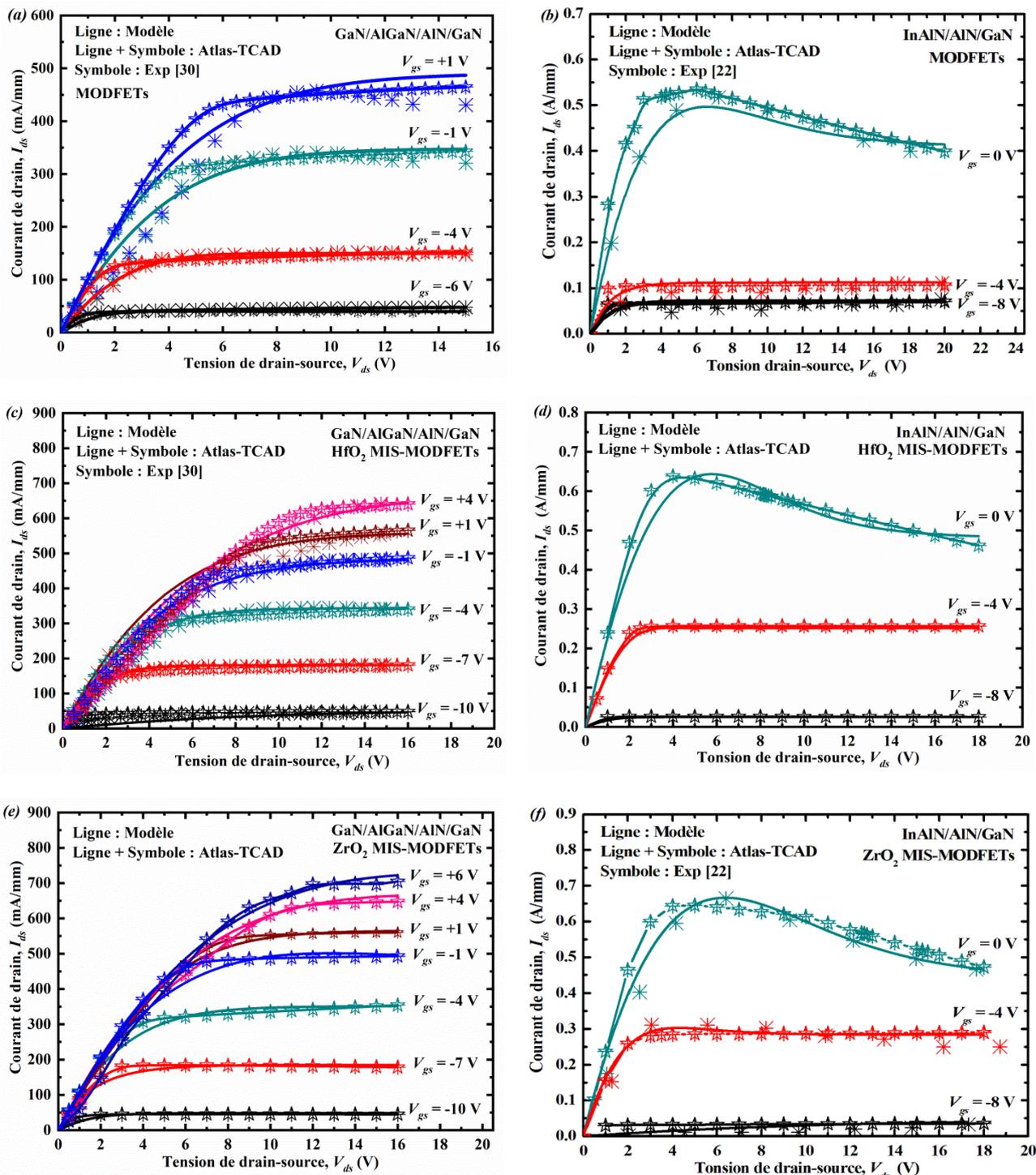
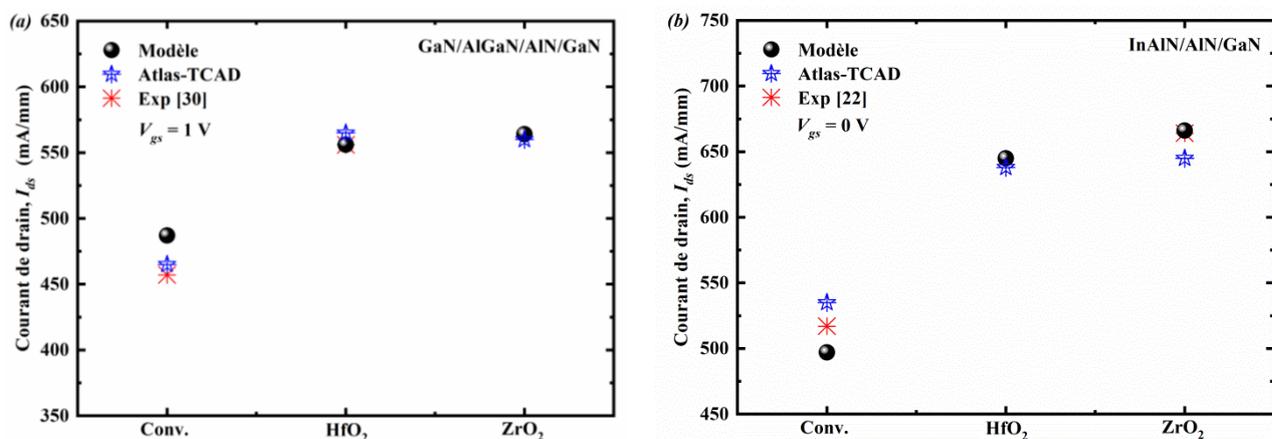


Figure V-12: Comparaison des caractéristiques de sortie des transistors à base de différents types des hétérostructures GaN/AlGaIn/GaN et InAlN/AlN/GaN.

En outre, concernant les transistors MIS-MODFETs à base de l'hétérostructure InAlN/AlN/GaN, nous remarquons une bonne coïncidence entre les résultats expérimentaux et celles de la simulation de notre modèle analytique et le simulateur Atlas-TCAD obtenus pour les deux matériaux isolants. On peut aussi constater que pour la même tension de polarisation de grille

$V_{gs} = 0$  V, le courant de drain maximum est approximativement d'environ 666 mA/mm dans les transistors  $ZrO_2$  MIS–MODFETs InAlN/AlN/GaN. La pente négative des caractéristiques de sortie, résultent d'une diminution de la mobilité des porteurs dans le canal associées à l'échauffement des transistors, à cause de la faible conductivité thermique du matériau utilisé pour le substrat.

De plus, nous concluons que le courant de drain de saturation maximal des transistors  $ZrO_2$  MIS–MODFETs sont très élevées à celles des transistors MODFETs et  $HfO_2$  MIS–MODFETs à partir des résultats des caractéristiques de sortie, cela dû aux faible courant de fuite de grille et de meilleure stabilité thermique du matériau isolant  $ZrO_2$  pour les applications à haute puissance et haute température.



**Figure V–13:** Comparaison du courant de saturation maximal des trois types des transistors MODFETs et MIS–MODFETs à base de différents types des hétérostructures de nitrures. a) GaN/AlGaIn/AlN/GaN et b) InAlN/AlN/GaN.

Comme montre dans la figure (V–13a), les courants de drain de saturation maximaux extraits à partir des résultats des caractéristiques de sortie du modèle analytique des transistors MODFETs et MIS–MODFETs avec des matériaux isolants à forte permittivité  $HfO_2$  et  $ZrO_2$  sont respectivement approximatives 466 mA/mm, 525 mA/mm et 547 mA/mm à des tensions de polarisations positives respectivement  $V_{gs}=1$  V et  $V_{ds}=10$  V pour les transistors GaN/AlGaIn/AlN/GaN. Par ailleurs, les transistors MODFETs,  $HfO_2$  MIS–MODFETs et  $ZrO_2$  MIS–MODFETs à base de l'hétérostructure InAlN/AlN/GaN, le courant de drain de saturation maximal des résultats de simulation obtenus du modèle analytique à des tensions de polarisations  $V_{gs}=0$  V,  $V_{ds}=8$  V sont respectivement 487 mA/mm, 600 mA/mm et 646 mA/mm comme illustre dans la figue (V–13b).

*c) Caractéristiques de transfert  $I_{ds}(V_{gs})$  et la transconductance  $g_m$*

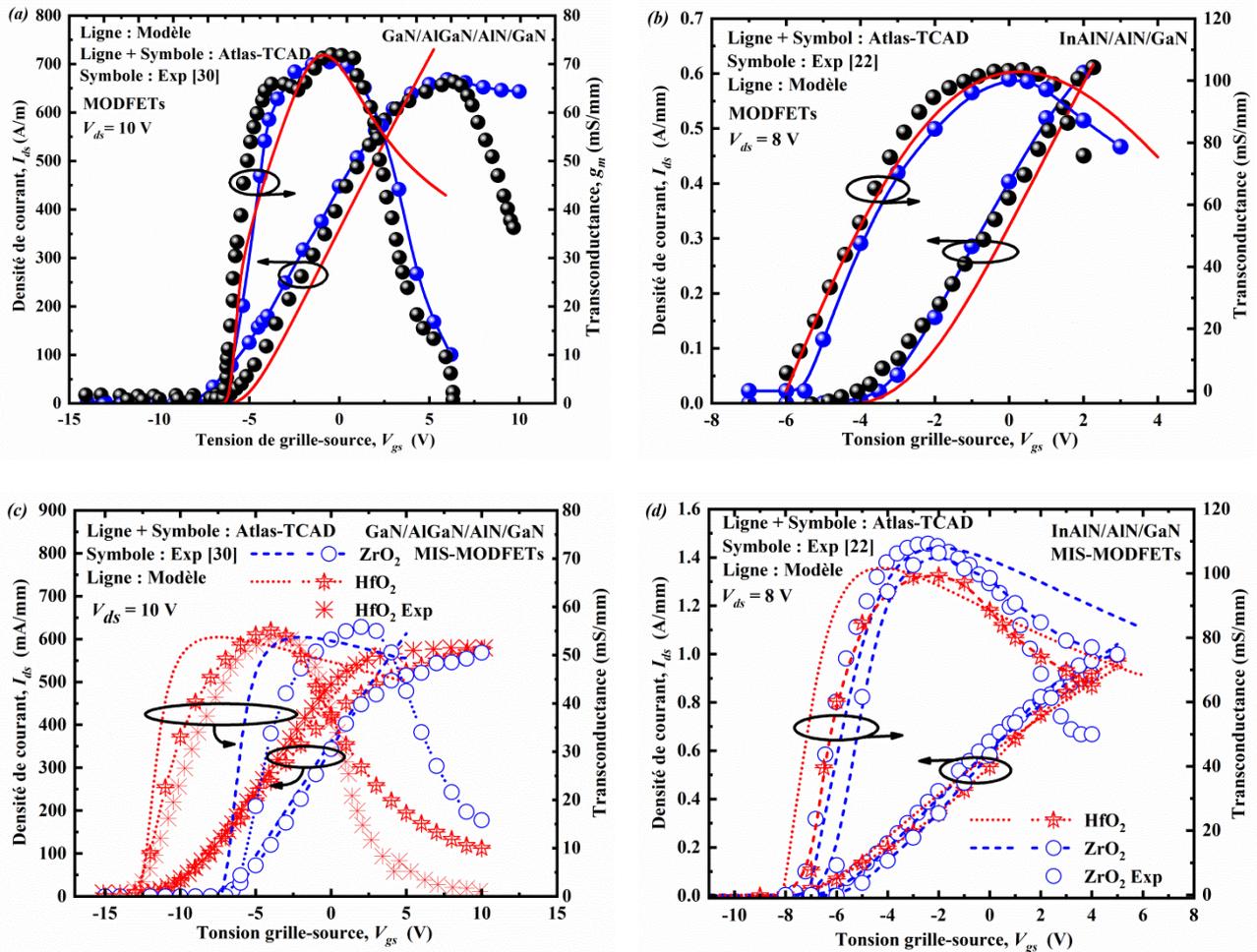
La figure (V-14) montre les variations des caractéristiques de transfert  $I_{ds}(V_{gs})$  et de la transconductance ( $g_m$ ) en fonction de la tension de polarisation de grille  $V_{gs}$  pour les transistors MODFETs et MIS-MODFETs à base des matériaux isolants ( $\text{HfO}_2$  et  $\text{ZrO}_2$ ) pour les deux différents types des hétérostructures GaN/AlGaN/AlN/GaN et InAlN/AlN/GaN. Ces résultats de simulation obtenus sont comparés respectivement avec les mesures expérimentales obtenus par Cui *et al.* [30] et Kuzmik *et al.* [22].

De plus, on observe dans la figure (V-14) un bon accord entre les mesures expérimentales et les résultats de simulation du modèle analytique et celles extraits par le simulateur Atlas-TCAD des caractéristiques de transfert et de la transconductance pour les transistors MODFETs et MIS-MODFETs.

La valeur maximale obtenue du pic de la transconductance ( $g_{m,max}$ ) atteint 63 mS/mm pour les transistors MODFETs conventionnels à base de l'hétérostructure de type GaN/AlGaN/AlN/GaN. La valeur correspond du courant de drain de saturation maximal  $I_{ds,max}$  est de l'ordre de 581 mA/mm avec une tension de polarisation  $V_{ds} = 10$  V pour les transistors MODFETs conventionnels comparable avec les deux autres types des transistors MIS-MODFETs à base de  $\text{HfO}_2$  et  $\text{ZrO}_2$ . Les tensions de pincement et les valeurs maximales du pic de la transconductance ( $g_{m,max}$ ) sont respectivement  $-7$  V et 63 mS/mm pour les transistors MODFETs conventionnels,  $-12$  V [30] et 54 mS/mm pour les transistors  $\text{HfO}_2$  MIS-MODFETs,  $-8$  V [29] et 56 mS/mm pour les transistors  $\text{ZrO}_2$  MIS-MODFETs.

Dans l'hétérostructure de type InAlN/AlN/GaN, les transistors  $\text{ZrO}_2$  MIS-MODFETs ont également présentés des densités de courant de drain maximales plus élevées de  $I_{ds,max} = 666$  mA/mm comparable à celles des transistors MODFETs et  $\text{HfO}_2$  MIS-MODFETs sont respectivement de 535 mA/mm et 638 mA/mm.

Comme prévu que les tensions de seuil des transistors MODFETs et  $\text{ZrO}_2$  MIS-MODFETs à base de l'hétérostructure InAlN/AlN/GaN sont respectivement  $-4.2$  V et  $-6$  V, ce qui permet d'améliorer la transconductance de  $g_{m,max} = 105$  mS/mm pour des transistors MODFETs et de  $g_{m,max} = 110$  mS/mm pour les transistors MIS-MODFETs. Une comparaison des résultats de simulation calibrés du modèle analytique des caractéristiques de transfert entre les transistors MODFETs et MIS-MODFETs confirme que pour le dernier type des dispositifs électroniques (MODFETs), malgré ses variation de la tension de seuil après l'isolation de la grille, la transconductance  $g_m$  pour ces transistors reste constante, une distribution large et uniforme est observée par rapport à celle des transistors MODFETs.



**Figure V–14:** Caractéristiques de transfert et de la transconductance des transistors à base de différents types des hétérostructures GaN/AlGaN/AlN/GaN et InAlN/AlN/GaN.

Nous pensons qu'il y a une amélioration de la mobilité électronique des transistors MODFETs qui conduit à l'insertion d'un matériau isolant de grille à forte permittivité et à l'augmentation la distance entre la grille et le canal des transistors [32].

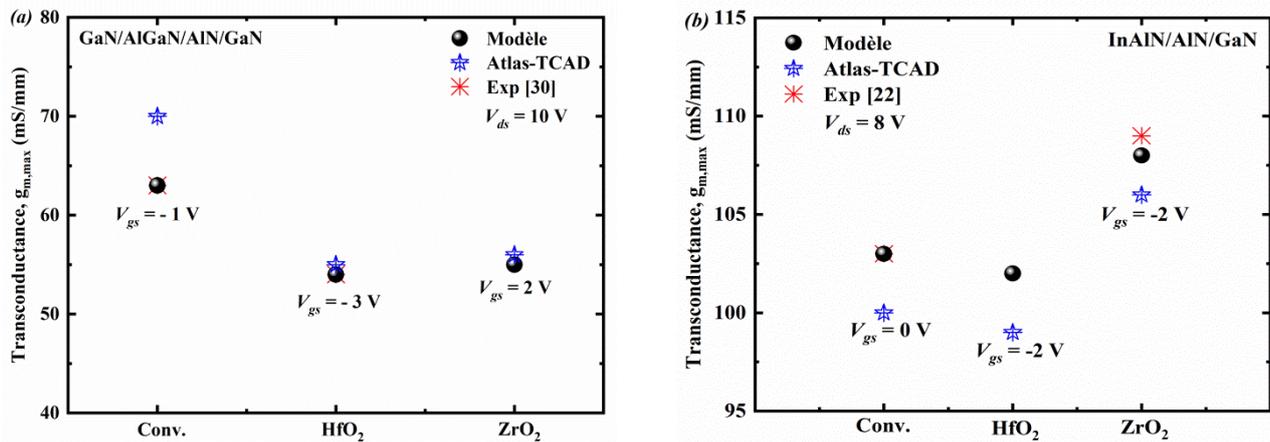
La réduction de la transconductance maximale  $g_{m,max}$  dans les transistors MIS–MODFETs est nécessaire et principalement causée par la plus grande distance entre la grille et le canal [32]. Cependant, la réduction de la transconductance est respectivement ne sont que de 14% et 16% dans les transistors MIS–MODFETs à base des matériaux isolants HfO<sub>2</sub> et ZrO<sub>2</sub>, comparable à celui des MIS–MODFETs avec des matériaux isolants de la grille à faible permittivité diélectrique [33].

Dans les figures (V–14c) et (V–14d), la variation de la tension de seuil ( $\Delta V_{Th}$ ) des deux types des transistors est significativement différente en raison des mécanismes de décalage de tension de seuil, jusqu'à présent se sont concentrés sur la permittivité d'un matériau isolant peut être exprimée comme [32].

$$\Delta V_{Th} = V_{off} \times d_{ox} \times \epsilon_{AlGaN} / (d_{AlGaN} \times \epsilon_{ox}) \quad (V-9)$$

où  $V_{off}$  est la tension de pincement des transistors.

L'insertion d'une couche isolant de type  $ZrO_2$  a légèrement réduit la capacité de grille, laquelle les résultats obtenus montrent le décalage de tension de seuil et minimisation du maximum de transconductance. L'augmentation d'épaisseur de la couche isolante peut entraîner moins du courant de fuite de grille. Cependant, il faut également prendre en compte la dégradation de la transconductance. En particulier, le dioxyde de zirconium ( $ZrO_2$ ) qui s'exprime par une légère augmentation du courant de drain  $I_{ds}$  que celui des transistors MODFETs et  $HfO_2$  MIS-MODFETs, dû à la forte permittivité du matériau isolant  $ZrO_2$  utiliser.



**Figure V-15:** Comparaison des transconductances maximales des transistors MODFETs et MIS-MODFETs à base de différents types des hétérostructures. a)  $GaN/AlGaN/AlN/GaN$  et b)  $InAlN/AlN/GaN$ .

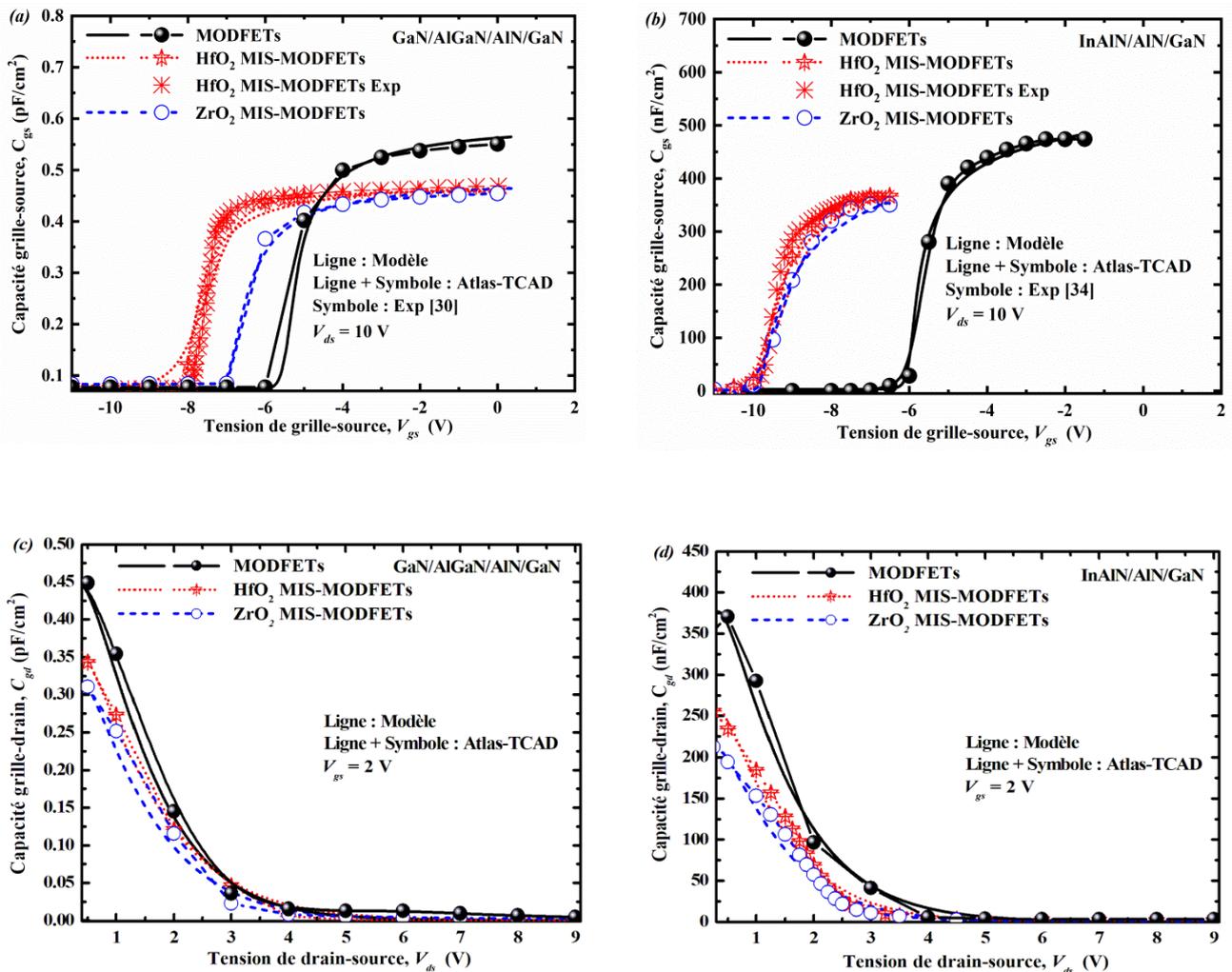
La figure (V-15) montre une comparaison des résultats des transconductances intrinsèques maximales pour différents transistors à base de GaN, on retrouve des résultats de simulations du modèle analytique et extraits par le simulateur Atlas-TCAD obtenus sont similaires aux mesures expérimentales pour les deux différents types des hétérostructures. On obtient ainsi une excellente transconductance est de 110 mS/mm pour les transistors  $ZrO_2$  MIS-MODFETs à base de l'hétérostructure  $InAlN/AlN/GaN$  dû à la réduction de la distance du contact Schottky de grille et le canal. Cette augmentation du rapport d'aspect entraîne un meilleur contrôle des charges dans le canal par la grille, et donc une augmentation de la transconductance.

*d) Caractéristiques des capacités grille-source  $C_{gs}$  et grille-drain  $C_{gd}$*

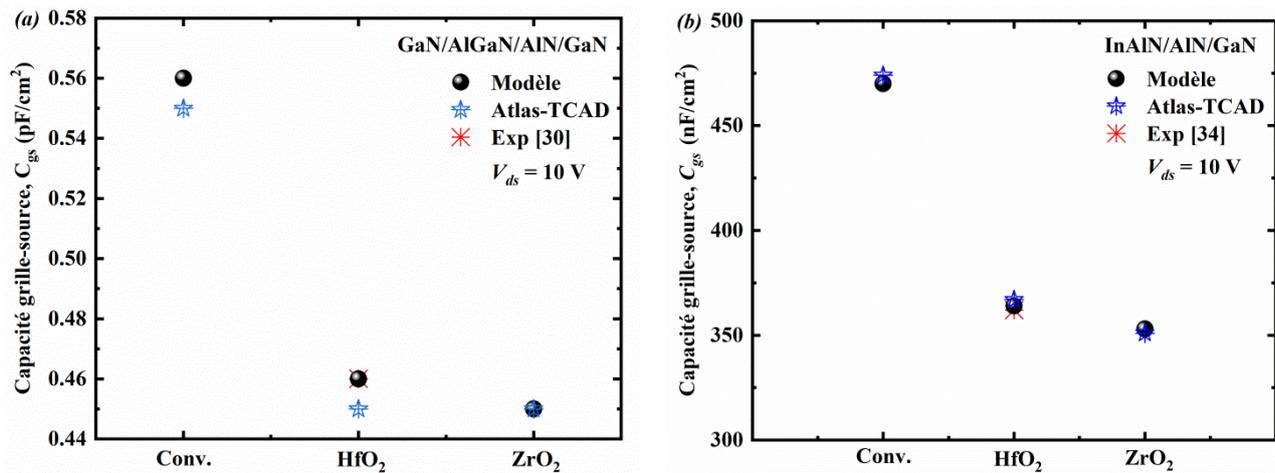
Les caractéristiques capacité-tension ( $C-V$ ) des transistors MIS-MODFETs à base de l'hétérostructure GaN/AlGaIn/AlN/GaN à la tension de polarisation  $V_{ds} = 10$  V sont présentées sur la figure (V-16) pour les deux matériaux isolants HfO<sub>2</sub> et ZrO<sub>2</sub>. Les résultats de simulation calibrés des modèles analytiques obtenus de la capacité grille-source ( $C_{gs}$ ) du modèle analytique sont comparées avec celles extraits par le simulateur Atlas-TCAD et par des mesures expérimentales obtenus par Cui *et al.* [30] utilisés un matériau isolant HfO<sub>2</sub> comme une couche isolante pour réduire le courant de fuite de grille. L'extraction des valeurs de la capacité grille-source  $C_{gs}$  à partir de la figure (V-16) sont respectivement 0.46 pF et 0.45 pF dans la région de déplétion polarisée, pour les transistors MIS-MODFETs à base de l'hétérostructure GaN/AlGaIn/AlN/GaN et avec différents matériaux isolants HfO<sub>2</sub> et ZrO<sub>2</sub>. Les résultats de simulation des caractéristiques capacitives de grille  $C_{gs}$  et  $C_{gd}$  des transistors MODFETs et MIS-MODFETs pour différents types des matériaux isolants (HfO<sub>2</sub> et ZrO<sub>2</sub>) des modèles analytiques en comparaison avec les résultats de simulation extraits par le simulateur Atlas-TCAD et les mesures expérimentales obtenus par Cui *et al.* [30] pour hétérostructure GaN/AlGaIn/AlN/GaN et Abermann *et al.* [34] pour hétérostructure InAlN/AlN/GaN. Un bon accord a été réalisé par une comparaison avec les résultats de simulations et les mesures expérimentales. Une réduction significative des capacités de grille  $C_{gs}$  et  $C_{gd}$  avec l'augmentation de la permittivité du matériau isolant de grille.

De plus, on observe que, la capacité grille-drain  $C_{gd}$  variée graduellement avec l'augmentation de la tension de drain lorsque le transistor devient saturé, de sorte que la tension de drain puisse affecter la charge dans le canal du transistor.

Dans ce travail de thèse nous avons étudié l'influence des matériaux diélectriques isolants (HfO<sub>2</sub> et ZrO<sub>2</sub>) sur les performances électriques des transistors MODFETs à base de GaN/AlGaIn/AlN/GaN et InAlN/AlN/GaN. Les caractéristiques électriques des transistors ZrO<sub>2</sub> MIS-MODFETs, atteindre des meilleures propriétés d'isolation comparable avec les autres transistors MODFETs conventionnels et MIS-MODFETs à base de HfO<sub>2</sub>. En outre, l'oxyde de zirconium ou zircone (ZrO<sub>2</sub>) est l'un des matériaux diélectriques à forte permittivité (high- $\kappa$ ) et thermodynamiquement stable pour remplacer le matériau dioxyde d'hafnium ou hafnie (HfO<sub>2</sub>) thermiquement instable utilisé comme une couche isolante dans les transistors à effet de champ à haute mobilité électronique à grille isolée (MIS-MODFETs) et réduire le courant de fuite pour les applications des fortes puissances hyperfréquences et à hautes températures.



**Figure V-16:** Caractéristiques capacitives des transistors MODFETs et MIS-MODFETs à base de GaN/AlGaIn/AlN/GaN et InAlN/AlN/GaN pour différents matériaux isolants (HfO<sub>2</sub> et ZrO<sub>2</sub>). (a) et (b) capacité grille-source  $C_{gs}$ . (c) et (d) capacité grille-drain  $C_{gd}$ .



**Figure V–17:** Comparaison de la capacité grille-source des transistors MODFETs et MIS–MODFETs à base de différents types des hétérostructures. a) GaN/AlGaIn/GaN et b) InAlN/AlN/GaN.

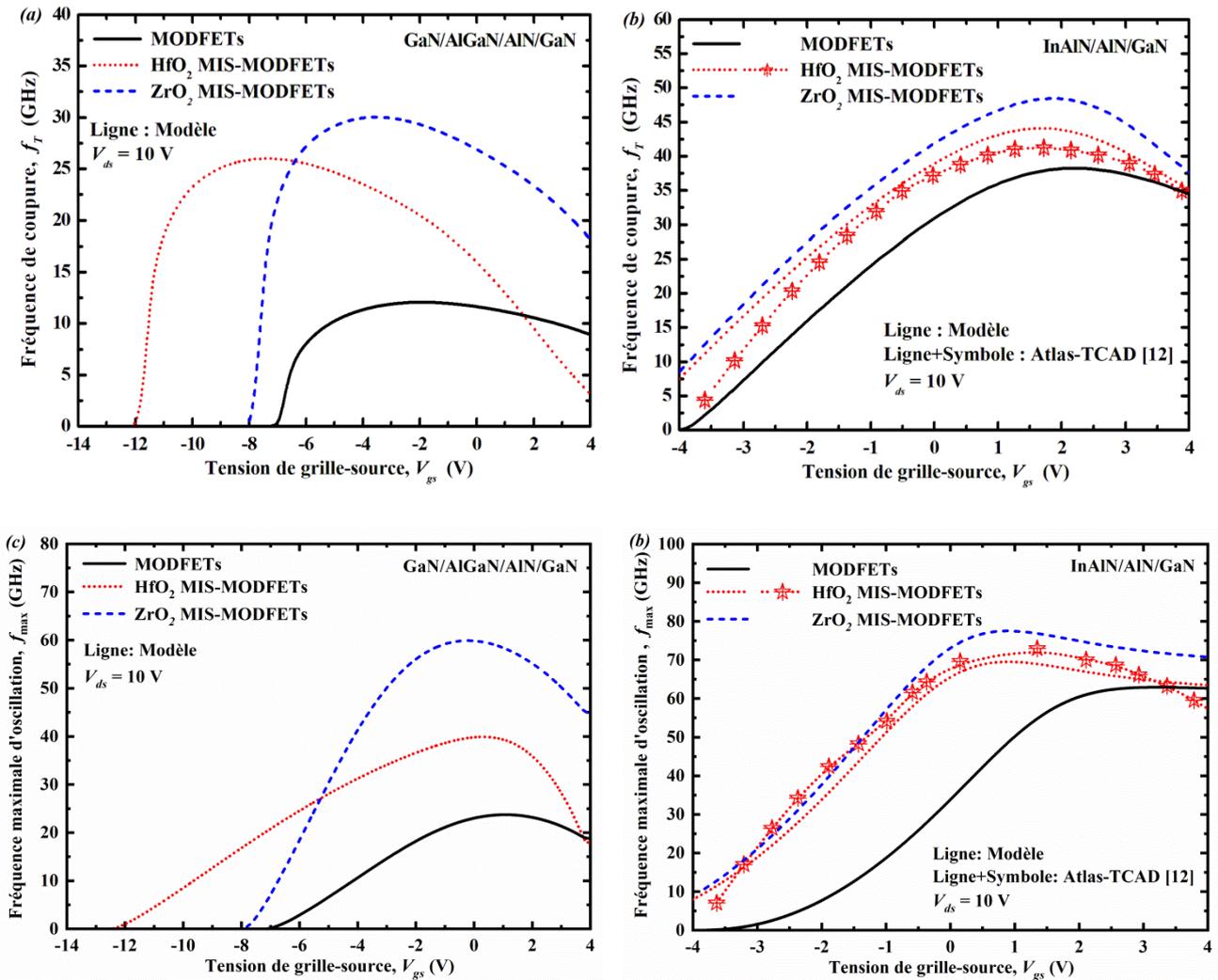
### V.6.2. Caractéristiques dynamiques (AC)

Deux paramètres sont les figures de mérite des transistors tels que la fréquence de transition (fréquence de coupure)  $f_T$  et fréquence maximale d’oscillation  $f_{max}$  qui sont permettent respectivement de déterminer le gain en courant et le gain en puissance des dispositifs électroniques. Les deux paramètres fréquentielles permettant de caractériser les performances hautes fréquences des transistors MODFETs.

En terme de performances fréquentielles (dynamiques), nos objectifs se porteront sur les fréquences coupure  $f_T$  et unilatéral (maximale d’oscillation  $f_{max}$ ). Notre objectif sera d’améliorer les paramètres fréquentielles pour des applications faible bruit à forte puissance microonde enfin, les meilleurs compromis puissance – vitesse – faible bruit – stabilité thermique sont obtenus par des transistors MODFETs à base de GaN avec l’utilisation ZrO<sub>2</sub> comme un matériau isolant de grille. L’objectif de ce travail est d’obtenir les performances d’écrites précédemment des transistors MIS–MODFETs à base de l’hétérostructure InAlN/AlN/GaN.

Pour les deux fréquences sont inversement proportionnelles à des capacités grille-source et grille-drain des modèles analytiques des caractéristiques dynamiques présentées dans le chapitre IV précédent. L’augmentation de la valeur de la fréquence de coupure peut être également obtenue par la réduction des valeurs des capacités des transistors.

Nous avons étudiés les variations de ces deux paramètres en fonction de la tension de grille  $V_{gs}$  à  $V_{ds} = 10$  V, comme illustrés dans la figure (V-18) pour les deux types des hétérostructures et différents types des matériaux isolants  $HfO_2$  et  $ZrO_2$ . Les figures (V-18a) et (V-18b) présentes les fréquences de coupures  $f_T$  pour les trois types des transistors étudiés.



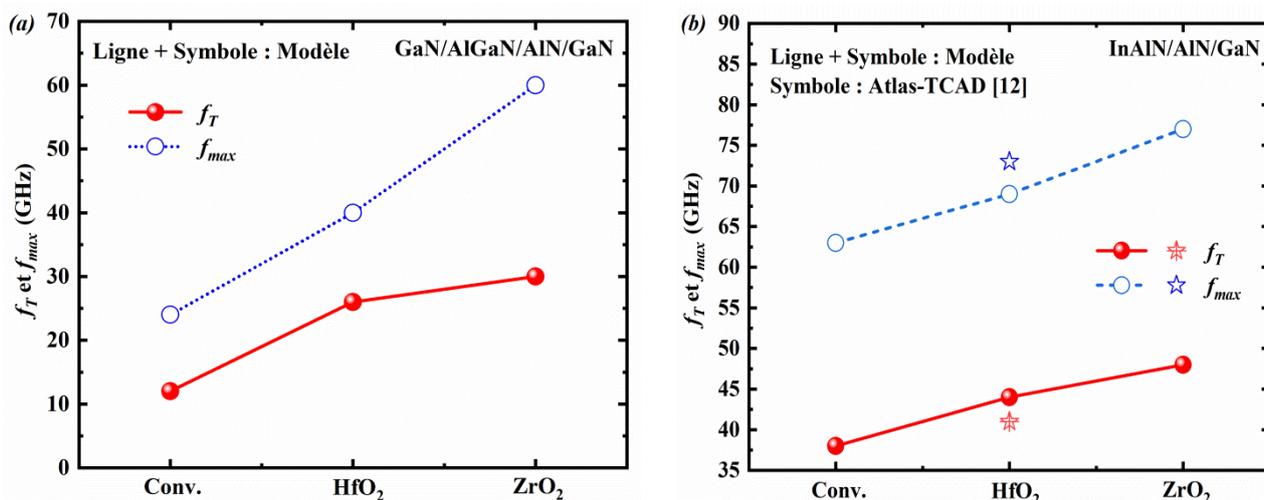
**Figure V-18:** Fréquences de coupure et maximale d'oscillation pour les différents topologies des transistors MODFETs à base de GaN avec des matériaux isolants ( $HfO_2$  et  $ZrO_2$ ).

On observe, qu'on a une augmentation de la fréquence de coupure avec une augmentation de la permittivité des matériaux isolants pour une valeur plus élevée de la fréquence de coupure de l'ordre de 48 GHz à la tension de polarisation  $V_{gs} = 2$  V et  $V_{ds} = 10$  V avec l'utilisation du matériau isolant  $ZrO_2$  et l'hétérostructure InAlN/AlN/GaN comparable à celle de l'hétérostructure GaN/AlGaN/AlN/GaN.

La même remarque pour la fréquence maximale d'oscillation  $f_{max}$ , comme montre dans les figures (V-18c) et (V-18d) leur valeur maximale est de l'ordre de 77 GHz à  $V_{gs}=1$  V avec le

dioxyde de zirconium ( $ZrO_2$ ). On distingue clairement que la fréquence maximale d'oscillation est supérieure à la fréquence de coupure à 30%. Par conséquent, les résultats de simulations des modèles analytiques et le simulateur Atlas-TCAD publiés confirment que les MIS-MODFETs à base des isolants à forte permittivité diélectrique sont plus performants par rapport à celles des transistors MODFETs.

**Figure V-19:** Influence de la variation des caractéristiques fréquentielles des transistors



MODFETs à base de GaN avec des différents matériaux isolants ( $HfO_2$  et  $ZrO_2$ ).

La figure (V-19) représente l'influence des matériaux isolants ( $HfO_2$  et  $ZrO_2$ ) sur les paramètres fréquentielles des transistors MODFETs et MIS-MODFETs à base de différents types des hétérostructures de nitrides. On remarque que, l'utilisation d'un matériau isolant de grille  $ZrO_2$  à forte permittivité diélectrique permet d'améliorer les performances fréquentielles des transistors MIS-MODFETs à base de nitrides.

Les résultats des caractéristiques statiques et dynamiques sont regroupés dans le tableau (V-3) pour des différentes topologies étudiées des transistors MODFETs à base de GaN. Comme on peut constater aussi dans le tableau (V-3) ci-dessus, les matériaux isolants qui ont une permittivité diélectrique élevée sont caractérisés par des meilleures performances électriques des transistors MODFETs et MIS-MODFETs par rapport aux matériaux qui ont une faible permittivité ( $SiO_2$ ). On peut conclure que les meilleurs résultats fournis par les MIS-MODFETs à base de l'hétérostructure  $InAlN/AlN/GaN$  avec l'utilisation d'un matériau isolant de grille  $ZrO_2$ .

**Tableau V–3:** Résultats des caractéristiques DC et AC des transistors MODFETs et MIS–MODFETs à base de GaN/AlGaN/AlN/GaN et InAlN/AlN/GaN pour les deux différents types des matériaux isolants.

Hétérostructure GaN/AlGaN/AlN/GaN	$I_{ds,max}$ (mA/mm)	$g_{m,max}$ (mS/mm)	$C_{gs}$ (pF/cm <sup>2</sup> )	$C_{gd}$ (pF/cm <sup>2</sup> )	$f_T$ (GHz)	$f_{max}$ (GHz)
MODFETs	487 <sup>a</sup>	63 <sup>a</sup>	0.56 <sup>a</sup>	0.45 <sup>a</sup>	12 <sup>a</sup>	24 <sup>a</sup>
	465 <sup>b</sup>	70 <sup>b</sup>	0.55 <sup>b</sup>	0.44 <sup>b</sup>	---	---
	457 <sup>c</sup>	63 <sup>c</sup>	---	---	---	---
HfO <sub>2</sub> MIS–MODFETs	556 <sup>a</sup>	54 <sup>a</sup>	0.46 <sup>a</sup>	0.35 <sup>a</sup>	26 <sup>a</sup>	40 <sup>a</sup>
	565 <sup>b</sup>	55 <sup>b</sup>	0.45 <sup>b</sup>	0.34 <sup>b</sup>	---	---
	556 <sup>c</sup>	54 <sup>c</sup>	0.46 <sup>c</sup>	---	---	---
ZrO <sub>2</sub> MIS–MODFETs	564 <sup>a</sup>	55 <sup>a</sup>	0.45 <sup>a</sup>	0.32 <sup>a</sup>	30 <sup>a</sup>	60 <sup>a</sup>
	560 <sup>c</sup>	56 <sup>b</sup>	0.45 <sup>b</sup>	0.31 <sup>b</sup>	---	---
	---	---	---	---	---	---
Hétérostructure InAlN/AlN/GaN	$I_{ds,max}$ (mA/mm)	$g_{m,max}$ (mS/mm)	$C_{gs}$ (nF/cm <sup>2</sup> )	$C_{gd}$ (nF/cm <sup>2</sup> )	$f_T$ (GHz)	$f_{max}$ (GHz)
MODFETs	497 <sup>a</sup>	103 <sup>a</sup>	470 <sup>a</sup>	375 <sup>a</sup>	38 <sup>a</sup>	63 <sup>a</sup>
	535 <sup>b</sup>	100 <sup>b</sup>	474 <sup>b</sup>	370 <sup>b</sup>	---	---
	517 <sup>c</sup>	103 <sup>c</sup>	---	---	---	---
HfO <sub>2</sub> MIS–MODFETs	645 <sup>a</sup>	102 <sup>a</sup>	364 <sup>a</sup>	254 <sup>a</sup>	44 <sup>a</sup>	69 <sup>a</sup>
	638 <sup>b</sup>	99 <sup>b</sup>	367 <sup>b</sup>	252 <sup>b</sup>	41 <sup>b</sup>	73 <sup>b</sup>
	---	---	362 <sup>c</sup>	---	---	---
ZrO <sub>2</sub> MIS–MODFETs	666 <sup>a</sup>	108 <sup>a</sup>	353 <sup>a</sup>	220 <sup>a</sup>	48 <sup>a</sup>	77 <sup>a</sup>
	645 <sup>b</sup>	106 <sup>b</sup>	351 <sup>b</sup>	212 <sup>b</sup>	---	---
	664 <sup>c</sup>	109 <sup>c</sup>	---	---	---	---

Avec :

- <sup>a</sup> est les résultats de simulations des modèles analytiques calibrés obtenus par Matlab,
- <sup>b</sup> est les résultats de simulations extraits par le simulateur Atlas–TCAD,
- <sup>c</sup> est les mesures expérimentales.

## V.7. Conclusion

Les demandes grandissantes de transistors fonctionnant à des fortes puissances hyperfréquences, à des températures très élevées et en milieu hostile, nécessitent des recherches sur de nouvelles technologies de composants plus adaptées. Les transistors  $ZrO_2$  MIS-MODFETs à base de nitrure de gallium GaN apparaît comme une solution aux limites atteintes par ces facteurs de mérite rencontrés avec des transistors MODFETs conventionnels. L'influence des matériaux isolants de grille de forte permittivité diélectrique tels que  $HfO_2$  et  $ZrO_2$  sur les performances électriques des transistors MODFETs à base de GaN pour les deux hétérostructures a été étudié. Les caractéristiques électriques statiques (DC) et dynamiques (AC) des transistors MODFETs à base de l'hétérostructure InAlN/AlN/GaN utilisant le  $ZrO_2$  à forte permittivité utilisé comme isolant diélectrique de grille présentent d'excellentes propriétés d'isolation et des meilleures performances électriques des transistors à base de l'hétérostructure GaN/AlGaN/AlN/GaN si on compare à celles des transistors MODFETs à base de  $HfO_2$ . Les transistors MODFETs et MIS-MODFETs à base de  $HfO_2$  ont été analysés. En outre, le  $ZrO_2$  est l'un des matériaux diélectriques potentiels à forte permittivité et thermodynamiquement stable pour remplacer le  $HfO_2$  thermiquement instable. De plus, pour valider les résultats de simulation calibrés du modèle analytique physique qui ont été montrés un bon accord avec les résultats extraits par le simulateur Atlas-TCAD et les mesures expérimentales des transistors MODFETs et MIS-MODFETs à base de  $HfO_2$  et  $ZrO_2$  pour l'hétérostructure InAlN/AlN/GaN.

Nous avons fait figurer des comparaisons représentatives, compte tenu du large nombre de simulations effectuées. Ainsi également, nous avons fait modéliser les différents types de la topologie des transistors MODFETs à base de GaN avec des différents matériaux isolants à forte permittivité. On voit que l'on a une bonne correspondance dans l'ensemble, entre simulation et les mesures expérimentales, quelle que soit la structure des transistors, ce qui conforte la justesse des modèles analytiques des caractéristiques statiques et dynamiques.

Le fonctionnement des transistors  $ZrO_2$  MIS-MODFETs à base de GaN est similaire à celui des transistors MODFETs, sauf que les transistors  $ZrO_2$  MIS-MODFETs à base de l'hétérostructure GaN/AlGaN/AlN/GaN ou à base de l'hétérostructure InAlN/AlN/GaN ont des avantages parmi lesquels :

- ☑ faible résistance d'accès et de forte tension de claquage, les dispositifs sont appropriés à l'application en forte puissance et haute température.
- ☑ les capacités de la grille-source et grille-drain sont réduites ; les performances en hyperfréquences sont très satisfaisants pour les transistors  $ZrO_2$  MIS-MODFETs comme la

fréquence de transition et la fréquence maximale d'oscillation, et cela grâce à la valeur élevée de la transconductance et la faible valeur de la capacité de grille.

Enfin, les transistors  $\text{ZrO}_2$  MIS–MODFETs à base de GaN à forte permittivité comme isolant diélectrique de grille pourraient s'avérer être un candidat très prometteur pour les applications de dispositifs de commutation à haute puissance telles que les automobiles électriques économiques.

## Références du chapitre V

- [1] Athena User's Manual, Silvaco International (2011).
- [2] Silvaco Atlas, I & II, User's manual, Silvaco International, (2013).
- [3] Atlas User's "Manual-device simulation software"., **1**, (2013).
- [4] Rzvan Negru, "*Conception et modélisation de pixels de photodétection*"., Thèse de Doctorat en Electronique grandes surfaces, (LPICM) Ecole polytechnique, France, 214 pages (2008).
- [5] Gélinas Robert, "*A novel approach to modeling tunnel junction diodes using Silvaco Atlas Software*"., Thesis Naval postgraduate School Monterey California, 127 pages (2005).
- [6] Mordi Nasserredine, "*Simulation, modélisation et caractérisations électriques des transistors HEMT's à base de composés III-V nitrures*"., Thèse de Doctorat en Microélectronique, Université de Djillali Liabes de Sidi Bel Abbes, 123 pages (2018).
- [7] Henry Mathieu, "*Physique des semiconducteurs et des composants électroniques*", 6<sup>ème</sup> Edition. Masson, Paris, 853 pages (2009).
- [8] Henry Mathieu, "*Physique des semiconducteurs et des composants électroniques*"., 5<sup>ème</sup> Edition. Masson, Paris, 848 pages (2004).
- [9] Guiza Douadi, "*Analyse des transistors à effet de champ MESFET GaAs*"., Mémoire de Magister en Electronique, Université de Mentouri Constantine, 88 pages (2009).
- [10] A. Teke, S. Gökden, R. Tülek, J.H. Leach, Q. Fan, , J. Xie, , Ü. Özgür, H. Morkoç, S.B. Lisesivdin, and E. Özbay, "*The effect of AlN interlayer thicknesses on scattering processes in lattice-matched AlInN/GaN two-dimensional electron gas heterostructures*"., New Journal of Physics, **11**(6), 063031 (2009).
- [11] S. Khandelwal, and T.A. Fjeldly, "*A physics based compact model of I–V and C–V characteristics in AlGaN/GaN HEMT devices*"., Solid-State Electron, **76**, 60–66 (2012).
- [12] K. Jena, R. Swain, and T.R. Lenka, "*Effect of thin gate dielectrics on DC, radio frequency and linearity characteristics of lattice-matched AlInN/AlN/GaN metal–oxide–semiconductor high electron mobility transistor*"., IET Circuits Devices Syst, **10**(5), 423–432 (2016).
- [13] Y. Wang, Y.T. Chen, H. Zhao, F. Xue, F. Zhou, and J.C. Lee, "*Improved electrical properties of HfO<sub>2</sub>-based gate dielectrics on InP substrate using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/HfO<sub>2</sub> and SF<sub>6</sub> plasma treatment*"., Electrochem. Solid-State Lett., **14**(7), H291 (2011).
- [14] G. Amarnath, R. Swain, T.R. Lenka, "*Modeling and simulation of DC and microwave characteristics of AlInN(AlGaN)/AlN/GaN MOSHEMTs with different gate lengths*"., Int J Numer Model, **32**, 1–11 (2018).
- [15] G. Amarnath, R. Swain, T.R. Lenka, "*Modeling and simulation of 2DEG density and*

*intrinsic capacitances in AlInN/GaN MOSHEMT*"., Int J Numer Modell Electron Networks Devices Fields, **31**(1), 1–8 (2017).

[16] M. Gonschorek, J.F. Carlin, E. Feltin, M.A. Py and N. Grandjean, "Exact determination of electrical properties of wurtzite  $Al_{1-x}In_xN/(AlN)/GaN$  heterostructures ( $0.07 \leq x \leq 0.21$ ) by means of a detailed charge balance equation"., International Journal of Microwave and Wireless Technologies, **2**(1), 13–20 (2010).

[17] K. Jena, R. Swain and T.R. Lenka "Physics-based mathematical model of 2-DEG sheet charge density and DC characteristics of AlInN/AlN/GaN MOS-HEMT"., Int. J. Numer. Model, **30**(1), (2015).

[18] Simon M. Sze, "High speed semiconductor devices"., Ed., J. Wiley & Sons, 656 pages (1990).

[19] Alban Laloue, "Modélisation non linéaire distribuée des transistors à effet de champ: application à l'analyse de la stabilité des transistors et des caractéristiques en bruit dans les circuits millimétriques"., Thèse de Doctorat en Électronique des hautes fréquences et optoélectronique. Télécommunications, Université de Limoges, 277 pages (2001).

[20] M. Balog, M. Schieber, M Michman and S. Patai, "Chemical vapor deposition and characterization of  $HfO_2$  films from organo-hafnium compounds"., Thin Sol. Films, **41**, 247–259 (1977).

[21] J. Robertson "Band offsets of wide band gap oxydes and implications for future electronic devices"., J. Vac. Sci. Technol B., **18**(3), 1785–1791 (2000).

[22] J. Kuzmik, G. Pozzpvivo, S. Abermann, T.F. Carlin, M. Gonschorek, E. Feltin, N. Grandjean, E. Bertagnolli, G. Stasser, D. Pogany, "Technology and performance of InAlN/AlN/GaN HEMTs with gate insulation and current collapse suppression using  $ZrO_2$  or  $HfO_2$ "., IEEE Transactions on Electron Devices, **55**(3), 937–941 (2008).

[23] J. Robertson and B. Falabretti, "Band offsets of high-k gate oxides on III-V semiconductors"., J. Appl. Phys. **100**(1), 014111 (2006).

[24] M.F. Yigletu, S. Khandelwal, T.A. Fjeldly, B. Iñiguez, "Compact charge based physical models for current and capacitances in AlGaIn/GaN HEMTs"., IEEE Trans. Electron. Devices. **60**(11), 3746–3752 (2013).

[25] R. Rodríguez, B. González, J. García, G. Toulon, F. Morancho, A. Núñez, "DC gate leakage current model accounting for trapping effects in AlGaIn/GaN HEMTs"., Electronics, MDPI. **7**(10), 210–219 (2018).

[26] P. Von Hauff, A. Afshar, A. Foroughi-Abari, K. Bothe, K. Cadien, D. Barlage, " $ZrO_2$  on GaN

- metal oxide semiconductor capacitors via plasma assisted atomic layer deposition*"., Appl. Phys. Lett. **102**(25), 251601 (2013).
- [27] M. H. S. Owen, M. A. Bhuiyan, Z. Zhang, J. S. Pan, E. S. Tok, Y. C. Yeo, "Band alignment of  $HfO_2/In_{0.18}Al_{0.82}N$  determined by angle-resolved x-ray photoelectron spectroscopy"., Appl. Phys. Lett. **105**, 031602 (2014).
- [28] M. Tapajna, J. Kuzmík, K. Cico, D. Pogany, G. Pozzovivo, G. Strasser, S. Abermann, E. Bertagnolli, J. F. Carlin, N. Grandjean and K. Frohlich, "Interface states and trapping effects in  $Al_2O_3$  and  $ZrO_2/InAlN/AlN/GaN$  metal–oxide–semiconductor heterostructures"., Jpn. J. Appl. Phys. **48**, 1–3 (2009).
- [29] B.S. Eller, J. Yang, R.J. Nemanich, "Electronic surface and dielectric interface states on  $GaN$  and  $AlGaN$ "., J. Vac. Sci. Technol. A. **31**(5), 050807–050829 (2013).
- [30] X. Cui, W. Cheng, Q. Hua, R. Liang, W. Hu, "Enhanced performances of  $AlGaN/GaN$  HEMTs with dielectric engineering of  $HfZrO_x$ "., Nano Energy. **68**, 104361 (2020).
- [31] K. Balachander, S. Arulkumaran, H. Ishikawa, K. Baskar, T. Egawa, "Studies on electron beam evaporated  $ZrO_2/AlGaN/GaN$  metal–oxide–semiconductor high–electron–mobility transistors"., Phys. Status Solidi a. **202**(2), R16–R18 (2005).
- [32] J. Kuzmík, G. Konstantinidis, S. Harasek, Š Haščík, E. Bertagnolli, A. Georgakilas, D. Pogany, "ZrO<sub>2</sub>/(Al)GaN Metal-oxide-semiconductor structures: characterization and application"., Semicond. Sci. Technol, **19**(12), 1364–1368 (2004).
- [33] E.P. Gusev, V. Narayanan, M.M. Frank, "Advanced high- $\kappa$  dielectric stacks with polysi and metal gates: recent progress and current challenges"., IBM J. Res. Dev. **50**(45), 387–410 (2006).
- [34] S. Abermann, G. Pozzovivo, J. Kuzmík, G. Strasser, D. Pogany, J.F. Carlin, N. Grandjean, and E. Bertagnolli, "MOCVD of  $HfO_2$  and  $ZrO_2$  high- $k$  gate dielectrics for  $InAlN/AlN/GaN$  MOS-HEMTs"., Semicond. Sci. Technol., **22**, 1–4, (2007).



# Conclusion générale



# Conclusion générale

Ces dernières années, les transistors à modulation de dopage MODFETs (Modulation Doped Field Effect Transistors) à base de nitrures d'éléments III ont fait l'objet d'une recherche intense. Ce type de transistors a montré l'efficacité de ces composants pour toute une série d'applications nécessitant des tensions et des puissances élevées en hyperfréquences. Afin d'effectuer les meilleurs choix technologiques pour l'optimisation d'une hétérostructure, il est nécessaire d'étudier l'influence des différents paramètres physiques et géométriques internes des transistors sur les caractéristiques électriques statiques et dynamiques afin d'obtenir un dispositif d'une meilleure performance.

Dans cette thèse, on a étudié l'influence des matériaux isolants ( $\text{HfO}_2$  et  $\text{ZrO}_2$ ) à forte permittivité sur les caractéristiques électriques statiques et dynamiques des transistors MODFETs conventionnels et les transistors MODFETs à grille Schottky isolée (MIS-MODFETs) à base de différents types des hétérostructures  $\text{GaN}/\text{AlGaIn}/\text{AlN}/\text{GaN}$  et  $\text{InAlN}/\text{AlN}/\text{GaN}$ , en utilisant comme outils de simulations les logiciels Matlab et Atlas-TCAD basé sur la modélisation bidimensionnelle, pour les applications spécifiques de hautes puissances en hyperfréquences.

Ce manuscrit est divisé en cinq chapitres, le premier chapitre a permis d'introduire la technologie, l'intérêt et les potentialités des matériaux III-N. Nous avons rappelé brièvement les propriétés physiques des nitrures composés binaires ( $\text{InN}$ ,  $\text{GaN}$  et  $\text{AlN}$ ) et leurs alliages ternaires  $\text{AlGaIn}$  et  $\text{InAlN}$ , puis nous avons présenté les différentes techniques d'épitaxie et les choix des substrats utilisés pour les nitrures. En effet, les dispositifs à base de nitrures présentent de bonnes performances dans les applications de hautes puissances et hautes fréquences. Ceci est principalement dû au large gap direct des matériaux binaires III-N et des meilleures propriétés physiques pour les applications extrêmes. De plus, l'effet de la polarisation spontanée et piézoélectrique existant toutes les deux au sein des matériaux ternaires  $\text{AlGaIn}$  et  $\text{InAlN}$  et également la polarisation spontanée pour le matériau  $\text{GaN}$ , elles s'ajoutent à ses qualités.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté le principe de fonctionnement et la structure des transistors à effet de champ à base des matériaux à faible et à grand gap et nous avons aussi donné une description de chaque structure et les différentes couches des transistors à effet de champ.

En suite, les chapitres trois et quatre présentent une étude générale de la topologie de la structure

## Conclusion générale

---

---

et de son diagramme énergétique de la bande de conduction des transistors MODFETs et MIS-MODFETs à base de différents types des hétérostructures GaN/AlGaN/AlN/GaN et InAlN/AlN/GaN, nous a conduit à développer aussi les modèles analytiques des caractéristiques statiques (DC) et dynamiques (AC) des nôtres composants.

Dans le chapitre cinq, nous avons présenté les résultats de simulation avec l'interprétation des performances des transistors MODFETs et MIS-MODFETs à base de deux différents types des hétérostructures GaN/AlGaN/AlN/GaN et InAlN/AlN/GaN. Les modèles analytiques développés ont permis d'étudier les performances électriques des transistors MODFETs et MIS-MODFETs, et en particulier de montrer l'influence des matériaux isolants ( $\text{HfO}_2$  et  $\text{ZrO}_2$ ) à forte permittivité sur les caractéristiques DC et AC des transistors MODFETs à base de GaN et à l'aide des logiciels de simulations Matlab et Atlas-TCAD.

De plus, notre étude montre que pour améliorer les performances des transistors MODFETs à base de l'hétérostructure AlGaN/GaN on peut :

- ☑ utiliser une autre hétérostructure InAlN/GaN pourrait améliorer les performances des transistors a celle système AlGaN/GaN. Afin de développer le potentiel des transistors MODFETs à base de l'hétérostructure InAlN/GaN, il est important de résoudre les problèmes liés aux facteurs majeurs tels que les courants de fuites de grille élevées et l'effondrement du courant de drain limitant le courant maximal du canal et la tension de claquage qui pourraient donc atteindre et ainsi limiter les performances et la fiabilité des MODFETs à base de l'hétérostructure InAlN/GaN pour les applications haute puissance et haute fréquence.

- ☑ utiliser une couche de transition AlN d'épaisseur de 1 nm insérée entre la couche barrière AlGaN et la couche tampon (GaN) pour réaliser l'hétérostructure AlGaN/AlN/GaN permet d'augmenter la bande offset à l'interface AlN/GaN. Par conséquent, d'augmenter la densité 2DEG formée à l'interface de l'hétérojonction AlN/GaN et d'améliorer la mobilité des porteurs dans le canal des transistors (la zone d'accumulation du transistor) et permet aussi notamment d'améliorer la qualité d'interface, mais l'hétérostructure InAlN/AlN/GaN offre des performances supérieures par rapport aux MODFETs de point déjà établis, en raison de la couche barrière InAlN très mince présente une forte densité de porteurs et une forte polarisation spontanée du 2DEG par rapport à la couche barrière AlGaN et permet d'avoir une structure plus stable mécaniquement et réduire les contraintes d'interface.

- ☑ utiliser une couche supplémentaire fortement dopée (cap layer) dans l'hétérostructure GaN/AlGaN/AlN/GaN afin de mettre en avant la plus-value de structure en termes de densité de

## Conclusion générale

---

---

porteurs et mobilité élevées et une faible résistance d'accès.

☑ utiliser un matériau isolant à forte permittivité et stable à haute température inséré entre le matériau métallique qui forme le contact Schottky (la grille) et la couche barrière AlGa<sub>N</sub> ou InAlN permet de réduire les pièges d'interfaces, en conséquence réduire le courant de fuite et d'améliorer les performances des transistors MODFETs, pour les applications de puissance en hyperfréquences et à haute température (stabilité thermique).

☑ élaborer des nouveaux dispositifs électroniques, des transistors MODFETs AlInN/AlN/GaN sur des substrats tels que le Saphir et le Silicium et d'établir des corrélations entre défauts électriques, défauts structuraux et procédés de fabrication. Ce point est important surtout pour un développement industriel de ces technologies sur des substrats comme le silicium.

☑ nous avons signalé que les résultats de simulation des modèles analytiques des caractéristiques statiques et dynamiques des transistors MODFETs à base de GaN ont été développées dans ce manuscrit sont en un bon accord avec extraits par le simulateur Atlas-TCAD et ceux publiés expérimentalement.

Ce travail ouvre plusieurs perspectives des études complémentaires de caractérisations de la structure des transistors MIS-MODFETs à base de GaN plus accomplis permettrais de :

- ☑ maîtriser la technologie de réalisation des transistors,
- ☑ contrôler l'ensemble des phénomènes associés aux propriétés des transistors MIS-MODFETs In<sub>x</sub>Al<sub>1-x</sub>N/AlN/GaN,
- ☑ trouver un compromis entre les grandeurs statiques et dynamiques pour ne pas améliorer une performance en dépit d'une autre,
- ☑ étudier des topologies plus complexes à partir du modèle proposé pour les transistors MIS-MODFETs,
- ☑ éventuellement utiliser d'autres matériaux et comparer ainsi les performances des différentes structures conçues,
- ☑ diminuer les dimensions des transistors afin d'obtenir une nanostructure,
- ☑ essayer d'obtenir une meilleure linéarité de la transconductance et un gain en courant plat quelle que soit la tension de grille,
- ☑ valider les résultats de simulations en régime statique et dynamique des transistors MIS-MODFETs In<sub>x</sub>Al<sub>1-x</sub>N/AlN/GaN à canal composite, par des résultats expérimentaux publiés dans la littérature,
- ☑ pouvoir augmenter au maximum les performances en fréquences et en puissances,

## Conclusion générale

---

---

☑ conception des transistors MIS-MODFETs avec l'empilement d'un matériau isolant à forte permittivité et stable à haute température.

☑ dopage du matériau isolant  $\text{HfO}_2$  à forte permittivité diélectrique par (Si, Y, Al, Gd, Sr, La, Dy, Sc, et Zr) pour améliorer la qualité d'interface et la stabilité thermique.

☑ modulation de la composition d'alliage  $x$  des matériaux ternaires à forte permittivité tels que :  $\text{Hf}_{1-x}\text{Si}_x\text{O}_2$ ,  $\text{Hf}_{1-x}\text{Al}_x\text{O}_2$ ,  $\text{La}_{1-x}\text{Zr}_x\text{O}_2$  et  $\text{Hf}_{1-x}\text{Zr}_x\text{O}_2$ .

☑ utiliser des alliages (stacks) à des fortes permittivités diélectriques tels que :  $\text{HfO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ , et  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$  et  $\text{ZrO}_2/\text{La}_2\text{O}_3$ .

☑ validation des résultats de simulations des caractéristiques électriques des transistors MIS-MODFETs à base de nitrures d'éléments III par des résultats expérimentaux publiés dans la littérature.



# Liste des publications et communications



### Liste des publications

1. **Khaled Hebali**, Driss Bouguenna, Abbès Beloufa and Sajad Ahmad Loan, "*Performance analysis of GaN/AlGaN/AlN/GaN MIS-MODFETs with high- $\kappa$  as gate dielectric insulator layer*", Transactions on Electrical and Electronic Materials., **24**(2), 250–257 (2023).
2. Driss Bouguenna, Abbès Beloufa, **Khaled Hebali**, Sajad Ahmad Loan, "*Investigation of the electrical characteristics of AlGaN/AlN/GaN heterostructure MOS-HEMTs with TiO<sub>2</sub> high-k gate insulator*", International Journal of Nanoelectronics and Materials., **16**(3), (2023)

### Liste des communications

1. **Hebali Khaled**, Bouguenna Driss and Beloufa Abbès, "*Etude des matériaux ferroélectriques sur les Caractéristiques I-V des transistors MFIS-MODFETs à base de GaN*", 2<sup>d</sup> International seminar on science of matter (physics and chemistry), University of Science and Technology (USTO), Bir El Djir, Oran, 31000, Algeria, organised by Algerian Journal of Engineering, Architecture and Urbanism, 17-18 September 2021.
2. Abbès Beloufa, Driss Bouguenna and **Khaled Hebali**, "*High spin polarization and mechanic stability of half-Heusler metal compounds: CrFeSn and CrFeGe as a potential candidate in the spin field effect transistors for spintronic applications*", 1<sup>st</sup> International Conference on Computational & Applied Physics ICCAP 2021, Blida, Algeria, 26-28 September 2021.
3. **Hebali Khaled**, contribution and outstanding performance as member of the Scientific/Technical Committees of the First International Conference on Geo-Sciences & Environment, Mascara, Algeria, **September 25 & 26, 2021**.
4. A. Bouguenna, D. Bouguenna, **K. Hebali**, Mouffoki Faiza and A. Boudghene Stambouli "*Impact of Oxide Layer on AlGaN/GaN Heterostructures MOS-HEMTs Biosensor*", 1<sup>st</sup> National Conference on Applied Science and Advanced Materials, NCASAM-2021, ENSET-Skikda, Algeria, **December 20-22, 2021**.
5. A. Bouguenna, D. Bouguenna, **K. Hebali**, Mouffoki Faiza and A. Boudghene Stambouli, "*Effect of Geometrical Parameters on Electrical Characteristics of AlGaN/GaN MOS-HEMTs Biosensor*", 1<sup>st</sup> National Conference on Science & Technology (1<sup>st</sup> NCST22), Mascara, Algeria, June 27-28 (2022).
6. **Hebali Khaled**, Bouguenna Driss and Beloufa Abbès, "*Investigation of the Electrical Characteristics of InAlN/GaN Heterostructure HEMTs with HfO<sub>2</sub> and ZrO<sub>2</sub> high- $\kappa$  as Gate Insulator Material Layers*", 1<sup>st</sup> National Conference on Science & Technology (1<sup>st</sup> NCST22), Mascara, Algeria, June 27-28 (2022).
7. Bouguenna Abdellah, Bouguenna Driss, Mouffoki Faiza, **Khaled Hebali**, Boudghene

## Liste des publications & communication

---

---

Stambouli Amine, “*Study and analytical simulation of AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMT based biosensor for biomolecule detection*”, 2<sup>nd</sup> National Conference on Applied Science and Advanced Materials, October 23-25, 2023 - ENSET-Skikda.

8. **Hebali Khaled**, Beloufa Abbès and Bouguenna Driss, “*Device Performance of AlGa<sub>N</sub>/AlN/GaN MIS-HEMTs with La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> high- $\kappa$  Gate Dielectric Insulator Layer*”, The 1<sup>st</sup> International Conference on Advances in Electronics, Control and Computer Technologies, October 25<sup>th</sup>-26<sup>th</sup>, 2023, Mascara, Algeria.