

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et De la Recherche Scientifique
Université Djillali LIABES De Sidi Bel Abbès
Faculté de Génie Electrique
Département d'Électronique



THESE

Présentée pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT EN SCIENCES

Option : microélectronique

PAR

M^r MORDI NASSEREDINE

THEME

Simulation, modélisation et caractérisations électriques des transistors HEMT's à base de composés III-V nitrurés

Soutenue le *17 Décembre 2018*

devant le jury :

M ^r Amrani Mohammed	Professeur	Université UDL-SBA	Président
M ^r Chellali Mohammed	Professeur	Université UDL-SBA	Promoteur
M ^{me} H. Mansour-Mazari	Professeur	Université UDL-SBA	Examinatrice
M ^{me} A. OuldAbbas-Bensaoula	Professeur	Université UAB-Tlemcen	Examinatrice
M ^r Sahnoun Mohammed	Professeur	Université U. Mascara	Examineur
M ^r Lasri Boumediène	Professeur	Université UMT. Saida	Examineur
M ^{me} Benamara Zineb	Professeur	Université UDL-SBA	Invitée

Remerciements

Le travail, présenté dans cette thèse de doctorat, a été réalisé au laboratoire de la Micro-Electronique Appliquée AMEL de l'université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbès.

Je voudrais tout particulièrement exprimer mes sincères reconnaissances et ma profonde gratitude à Madame Z. BENAMARA, Professeur à l'Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbès et directrice du laboratoire AMEL, de m'avoir accueilli dans ce laboratoire de recherche.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à Monsieur M. AMRANI, Professeur à l'Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbès, qui m'a fait l'honneur d'accepter la présidence du jury de cette thèse

Je tiens aussi à remercier, Madame H. MANSOURMAZARI, Professeurs à l'Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbès, qui m'a fait un grand honneur en acceptant de juger le travail de cette thèse.

Je remercie vivement Madame OuldAbbas-Bensaoula Ammaria, Professeur à l'Université de Tlemcen, qui m'a fait un grand honneur en acceptant de juger le travail de cette thèse.

Je remercie vivement Monsieur Sahnoun Mohammed, Professeur à l'Université de Tlemcen, qui m'a fait un grand honneur en acceptant de juger le travail de cette thèse.

Je remercie vivement Monsieur Lasri Boumediène, Professeur à l'Université de Saida, qui m'a fait un grand honneur en acceptant de juger le travail de cette thèse.

Je voudrais tout particulièrement exprimer mes sincères reconnaissances et ma profonde gratitude à Monsieur CHALLALI Mohammed Professeurs à l'Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbès, d'avoir accepté de diriger les travaux de cette thèse. Il m'a fait bénéficier de son expérience et de son rigueur scientifique. Il m'a apporté une aide considérable tout au long de ce travail, ces conseils judicieux et ces encouragements ont été bénéfiques dans la réalisation de cette thèse.

Que Madame Z. BENAMARA, Professeur à l'Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbès, trouve ici le témoignage de ma grande gratitude, je la remercie d'avoir accepté de faire partie du jury de thèse.

Je tiens à remercier tous les membres du laboratoire de Microélectronique Appliquée AMEL, et tous mes collègues.

En fin mes derniers remerciements sont adressés à mes parents, ma famille et mes amis pour leur soutien moral

À ma famille

Table des matières

Introduction Générale	8
------------------------------------	---

Chapitre I

Les transistors à haute mobilité, structure et matériau GaN

I.1 Introduction	12
I.2 Généralités sur les transistors à haute mobilité (HEMT)	12
I.2.1 Structure générale d'un transistor HEMT	13
I.2.2 Description des couches	14
I.2.2.1 Le substrat	14
I.2.2.2 Cap layer	14
I.2.2.3 La couche à grand gap non dopée	15
I.2.2.4 La couche à grand gap dopée	15
I.2.2.6 Le canal	15
I.2.2.7 La couche tampon	15
I.2.3 Principe de fonctionnement d'un HEMT	16
I.3 Le nitrure de Gallium matériau approprié à un HEMT	17
I.3.1 Présentation des composés III-V	18
I.3.2 La bande interdite	19
I.3.2 Le champ de claquage	20
I.3.3. La vitesse de saturation	21
I.3.4. La mobilité des électrons	23
I.3.5. La conductivité thermique	23
I.4. Les propriétés de GaN	23
I.4.1. Les propriétés structurales	23
I.4.2. Les propriétés électroniques du GaN.....	25
I.4.3. Les propriétés électriques du GaN.....	25
I.4.3.1. La Polarisation.	26
I.4.3.2. La Polarisation spontanée	26
I.4.3.3. Polarisation piézoélectrique.....	27
I.5. Substrats utilisés pour la croissance du nitrure de gallium	30
I.5.1. Le silicium (Si)	31
I.5.2. Le saphir Al_2O_3	31
I.5.3. Le carbure de silicium (SiC)	32
I.6. Conclusion	33

Chapitre II

L'hétérojonction $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}/\text{GaN}$

II.1. Introduction	39
II.2. Hétérojonction et gaz 2D	40
II.2.1. Principe de l'hétérojonction.....	40
II.2.2. Gaz bidimensionnel.....	41
II.2.3. Formation du puits de potentiel.....	41
II.2.4. Densité d'électrons dans le canal.....	42
II.2.5. Calcul de la densité de charge dans l'hétéro-structure $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}/\text{GaN}$	43
II.2.5.1. Face Ga.....	43
II.2.5.2. Face N.....	45
II.2.6. Calcul de la concentration n_S dans le 2DEG pour l'hétérojonction $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}/\text{GaN}$	46
II.3. Le HEMT $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}/\text{GaN}$	47
II.3.1. Structure classique du HEMT $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$	47
II.3.2. Le contact de grille.....	47
II.3.3 La fonction de transfert.....	48
II.3.1 Le courant Drain-Source.....	48
II.3.2 La transconductance.....	50
II.4. Effets restrictif des performances des transistors HEMTs	51
II.4.1. L'effet Kink.....	51
II.4.2. L'effet drain-lag.....	51
II.4.3. L'effet gate-lag.....	52
II.4.5. L'effet d'auto-échauffement.....	52
II.5. Conclusion	52

Chapitre III

Technologie des composants et présentation du logiciel de simulation

III.1. Introduction	56
III.2. Présentation technologique des transistors étudiés	57
III.2.1. Premier transistor.....	57
III.2.2. deuxième transistor.....	58

III.3. Technologie des composants	59
III.3.1. Nettoyage	59
III.3.2. Isolation inter-composant.....	59
III.3.3. Contact ohmique drain-source	60
III.3.4. Contact Schottky	60
III.3.5. Passivation	60
III.3.6. Interconnexions	61
III.3.7. Assemblage	61
III.4. L’outil de simulation – Silvaco	61
III.5. Présentation du paquet des programmes SILVACO	62
III. 5.1. Les outils de simulation ATLAS (de la société SILVACO)	62
III.5.1.1. DEVEDIT	63
III.5.1.2 DECKBUILD	63
III.5.1.3 TONYPLOT	63
III.5.1.4 MASKVIEW.....	64
III.5.1.5 OPTIMIZER	64
III.5.2. Présentation d’Atlas	64
III.5.3. Logique de programmation.....	67
III.6. Modélisation 2D du transistor HEMT	70
III.7. Conclusion	72

Chapitre IV

Résultats et discussions

IV.1. Introduction	75
IV.2. Spécification des structures étudiées	76
IV.2.1. Le maillage.....	77
IV.2.2. Régions	78
IV.2.3. Electrodes	79
IV.2.4. Dopage	80
IV.2.5. Spécification du modèle et du matériau	80
IV.2.6. Matériau	80
IV.2.7. Modèles	80
IV.2.8. Contact	81
IV.2.9. Interface	81
IV.2.10. Méthodes numérique à sélectionner	81
IV.3. Unités de courants dans les fichiers journaux (file log)	82
IV.4 Résultat et interprétation	82

IV.4.1. Caractérisations expérimentales	82
IV.4.2. Premier transistor	83
IV.4.2.1. Caractéristiques statiques.....	83
IV.4.2.1.a Caractéristique de sortie.....	83
IV.4.2.1.b. Caractéristique de transfert	85
IV.4.2.1.c. Transconductance	86
IV.4.3. Deuxième transistor	87
IV.4.3.1. Caractéristiques statiques.....	88
IV.4.3.1.a. Caractéristique de sortie.....	88
IV.4.3.1.b. Caractéristique de transfert	89
IV.4.3.1.c. Transconductance	90
IV.4.3.1.d. Courant de la grille	91
IV.4.3.2. Caractéristiques capacité- tension.....	92
IV.4.4. Résultats de Simulation	93
IV.4.4.1. Comparaison entre les caractéristiques électriques mesurés et simulés.....	94
IV.4.4.1.a. Caractéristiques de sortie Ids-Vds	94
IV.4.4.1.b. Caractéristiques de transfert Ids-Vgs	98
IV.4.4.2. Influence de l'épaisseur de la couche d' $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}$	99
IV.4.4.3. Influence de la largeur de grille	102
IV.4.4.4. Influence de la longueur source-drain Lsd	104
IV.4.4.5. Influence de la densité de charge n_s	106
IV.4.4.6. Influence du dopage de la couche barrière $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}$	108
 IV.5. Conclusion	 111
 Conclusion Générale	 115
 Annexe	 119

Introduction Générale

Durant les dernières années, le développement des composées **III-N** a été spectaculaire. En effet, ces composés présentent des performances bien supérieures par rapport à d'autres composés tel que leur large bande interdite. Ce sont des matériaux de choix pour toutes les applications microélectroniques et optoélectroniques. Or les caractéristiques de ces matériaux et de leurs composants sont sensibles à l'état de surface et à l'interface. L'étude du fonctionnement des différents types de composants électroniques passe par une maîtrise préalable des phénomènes physiques régissant les propriétés des électrons dans le semi-conducteur. Il est donc essentiel de comprendre les mécanismes de formation des hétéro-structures et des nanostructures pour maîtriser au mieux la technologie des composants réalisés, à l'heure où les nanotechnologies ouvrent de nouvelles voies. Cependant, de nos jours, la microélectronique et l'optoélectronique ne cessent de se développer et de nombreuses études sont effectuées afin de disposer de semi-conducteurs toujours plus performants.

Le nitrure de gallium **GaN** a une bande interdite large et directe, une grande stabilité chimique et thermique, de très bonnes propriétés mécaniques, et des propriétés physiques très intéressantes pour opérer en haute température, haute puissance et haute fréquence. Il est très prometteur pour des applications en microélectronique et en optoélectronique, maintenant l'intérêt de cette technologie était tourné vers les applications militaires des micro-ondes. Les propriétés physiques intéressantes du **GaN** permettent de réaliser des transistors **HEMT** de type **Al_xGa_(1-x)N/GaN** dont la densité d'électrons à l'interface peut aisément dépasser 1.10^{13}cm^{-2} , sans dopage intentionnel de la barrière **Al_xGa_(1-x)N**. Il s'agit d'un transistor à effet de champ mettant à profit les propriétés singulières des gaz d'électrons bidimensionnels (**2DEG**). Ces derniers sont obtenus par confinement des porteurs à l'interface d'une hétérojonction semi-conductrice. Ce type de dispositif possède des mobilités supérieures à celles des dispositifs **CMOS**

classiques et commute plus rapidement à haute fréquence que les Si-MOSFETs classiques. Ces transistors à haute mobilité électronique (**HEMT**) se sont recentrés sur les communications, ainsi que vers d'autres domaines de l'électronique de puissance.

Ce travail présente une caractérisation structurale et électrique des transistors **HEMTs** à base des hétéro-structure d' $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}/\text{GaN}$. Nous présentons la caractérisation et une modélisation du courant de drain en fonction de la tension de polarisation drain-source et grille source du transistor HEMT ainsi que d'autres paramètres électriques. Dans cet objectif, la simulation physique de type **TCAD**, avec le logiciel **SILVACO**, est utilisée. Il est donc nécessaire de définir les modèles qui décrivent au mieux les mécanismes impliqués dans le transport des porteurs tout en prenant en compte les spécificités des **HEMTs** et des matériaux nitrurés.

Dans le premier chapitre nous présenterons des notions générales sur les transistors à haute mobilité d'électrons **HEMTs** avec une description de leurs différentes couches. Puis on passe à définir son principe de fonctionnement basé sur les propriétés de haute mobilité d'un gaz d'électron bidimensionnel 2DEG (Two Dimensional Electron Gaz.), puis on passe à présenter les propriétés des matériaux afin de connaître leurs intérêts.

Dans le deuxième chapitre, on se concentrera sur la caractérisation des propriétés électriques des hétéro-structures à base de **GaN** telles que $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}/\text{GaN}$ et $\text{GaN}/\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}$ à face **Ga** et à face **N** pour mieux comprendre l'effet de la polarisation spontanée et piézoélectrique sur la formation et la localisation du **2DEG** en l'absence de modulation de dopage et de polarisation externe.

Dans le troisième chapitre nous présenterons la technologie de fabrication des composés étudiés, puis en passe à définir l'outil de simulation utiliser. Pour moduler nos transistors **HEMTs** à base des hétéro-structures **Al_xGa_(1-x)N/GaN**, nous avons utilisés le logiciel **SILVACO-TCAD**.

Dans le dernier chapitre, nous présentons, dans un premier temps, les mesures des caractéristiques électriques telles que : **Ids (Vds)**, **Ids (Vgs)**, la transconductance et la capacité pour deux types de transistor avec des longueurs de grilles différentes. Puis en passe à présentés les résultats simulés dans l'environnement Atlas de **Silvaco-TCAD**.

Enfin ; nous terminons notre travail par une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre I
Les transistors à haute mobilité, structure
et matériau GaN

I.1 Introduction

Durant plusieurs années, les recherches ont été consacrées aux HEMTs (High Electron Mobility Transistors) à base de GaAs, à cause de ses propriétés électriques et physiques, son utilisation dans les applications à haute puissance limite ses performances, ce qui a poussé les chercheurs à s'intéresser à d'autres matériaux tel que les nitrures III-N, ces matériaux ont une grande stabilité chimique, et des propriétés mécaniques et physiques remarquables et indispensables pour les applications de puissance et en hyperfréquence.

Dans la première partie de ce chapitre nous présenterons des notions générales sur les transistors à haute mobilité HEMTs avec une description de leurs différentes couches. Puis on passe à définir son principe de fonctionnement basé sur les propriétés de haute mobilité d'un gaz d'électron bidimensionnel 2DEG (Two Dimensional Electron Gaz.).

Les performances des HEMTs sont liées à l'utilisation des matériaux présentant des mobilités électroniques élevées. Ces propriétés sont présentées dans la deuxième partie de ce chapitre afin de connaître l'intérêt du matériau.

I.2 Généralités sur les transistors à haute mobilité (HEMT)

Les transistors HEMTs (height electron mobility transistor) sont des dérivés des MESFET (Metal Semi-conductor Field Effect Transistor) Ces composants possèdent plusieurs dénominations dans la terminologie anglo-saxonne, TEGFET (Two-dimensional Electron Gas Field Effect Transistor), MODFET (Modulation Doped Field Effect Transistor) mais également HFET (Heterojunction Field Effect Transistor). Ce dernier terme est toutefois généralement plutôt réservé à un autre composant à hétéro-structure dans lequel le transport s'effectue dans un matériau dopé alors qu'il est non dopé pour le HEMT. Vu le problème de la mobilité des porteurs dans le canal du MESFET ou les électrons assurent la conduction dans le canal, voient leur mobilité limitée par des interactions avec les atomes donneurs, donc pour résoudre ce problème il fut créé des

transistors à hétérojonction. Durant les années 1960, les chercheurs (**IBM**) [1] ont montré que les électrons pouvaient atteindre une très grande vitesse dans la partie GaAs de l'hétérojonction AlGaAs/GaAs. Les électrons dans une telle structure sont transférés du matériau ayant le plus grand gap (AlGaAs) vers celui ayant le plus petit gap (GaAs). La première démonstration expérimentale est due à **Digle** et **Stormer** (**laboratoire Bell**) en 1978 [2]. En rendant compte que de telles structures pouvaient être à l'origine de transistors à effet de champ à hautes performances. Une invention conjointe entre **Thomson CSF** (France) et **Fujitsu** (Japon) [3] permet, par la suite, la conception des premiers transistors HEMT en 1980.

I.2.1 Structure générale d'un transistor HEMT

Le principe de base d'un HEMT consiste à mettre en profit les propriétés de haute mobilité d'un gaz d'électron bidimensionnel 2DEG. La structure d'un HEMT (figure I.1) est constituée essentiellement de trois matériaux différents : le substrat, un matériau à large bande interdite et un matériau à plus faible bande interdite. La structure des couches épitaxiales des HEMTs est réalisée de façon à séparer physiquement les électrons libres des atomes donneurs ionisés dans le canal, ceci pour augmenter la mobilité des électrons et cela par la réduction des impuretés ionisés.

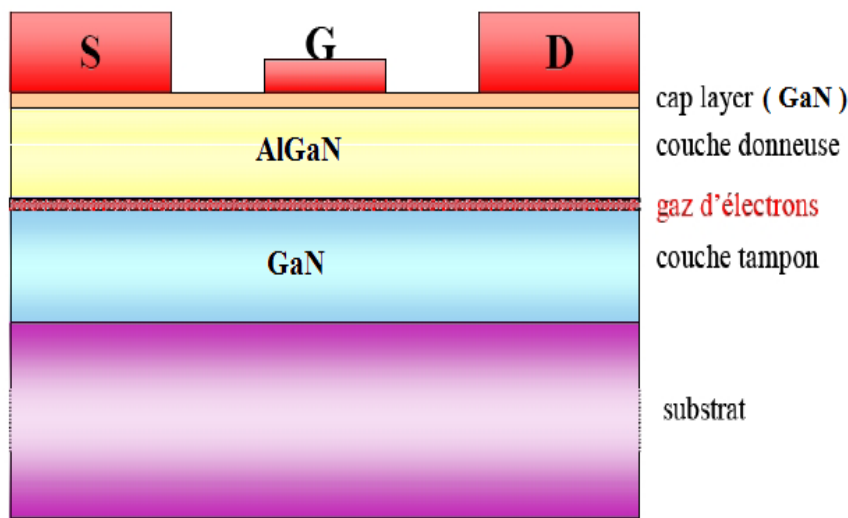


Figure I.1 : structure générale d'un HEMT classique.

La différence entre les MESFETs et les HEMTs se situe au niveau du principe de contrôle du courant dans le canal. Dans le cas du MESFET, l'électrode de la grille contrôle la section du canal disponible pour la conduction, alors que dans le cas du HEMT, elle contrôle la densité d'un gaz d'électron libres dans une zone non dopée sous l'hétéro interface qui constitue le canal du transistor. On retrouve aussi les électrodes métalliques de source, grille et drain. La jonction de ces deux derniers matériaux engendre la formation du gaz bidimensionnel d'électrons à l'interface, ainsi la jonction Schottky créée par la jonction métal de grille et semi-conducteur du substrat.

I.2.2 Description des couches

I.2.2.1 Le substrat

Cette couche permet également d'avoir un matériau de base de bonne qualité cristallographique nécessaire à la croissance des autres couches. Un mauvais choix de substrat peut causer lors de la croissance, des dislocations qui peuvent rendre le composant non fonctionnel. Les matériaux souvent utilisés sont le silicium, le saphir et le carbure de silicium.

I.2.2.2 Cap layer

C'est la couche superficielle, elle est formée d'un matériau de faible Gap pour réaliser les contacts ohmiques de source et de drain. Cette couche est généralement fortement dopée afin de diminuer la valeur des résistances de contact.

I.2.2.3 La couche à grand gap non dopée

Elle est destinée à la réalisation du contact Schottky de grille.

I.2.2.4 La couche à grand gap dopée

Appelée la couche donneuse, son rôle est de fournir les électrons libres à la structure,

I.2.2.5 Espaceur (spacer)

Cette couche est réalisée par le matériau de plus large gap ($\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}$), permettant de séparer les atomes donneurs d'électrons de la couche donneuse des électrons du canal. Plus cette couche ne sera moins épaisse, plus la mobilité des électrons dans le canal sera meilleure.

I.2.2.6 Le canal

Le canal est situé dans la couche de matériau à petit gap non intentionnellement dopée (la plus importante partie du HEMT). C'est là où se crée le gaz bidimensionnel d'électrons. C'est la couche qui détermine les performances du composant à travers les propriétés de transport des électrons dans le matériau.

I.2.2.7 La couche tampon

Appelée aussi buffer, permet d'améliorer le confinement des électrons dans le canal en réduisant l'injection des porteurs vers le substrat.

I.2.3 Principe de fonctionnement d'un HEMT

La structure du transistor HEMT est principalement composée par trois couches de matériaux : un contact de Schottky pour la grille et deux contacts ohmiques pour les électrodes de source et de drain. Le principe de fonctionnement du HEMT est identique à celui d'un transistor à effet de champ à grille Schottky de type MESFET. Il est basé sur la modulation de la conductance entre deux contacts ohmiques appelés "Source" et "Drain", par l'action électrostatique d'une électrode de commande dénommée "Grille". La variation de cette conductance est proportionnelle au nombre de porteurs libres dans le canal, et donc au courant entre source et drain [4,5,6]. Le transfert de 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 des électrons libres. Ces électrons sont confinés dans le puits sous forme d'un gaz bidimensionnel (noté 2DEG), où ils peuvent atteindre des mobilités élevées. La tension de grille VGS affecte la position énergétique de la bande de conduction sous la grille par rapport au niveau de Fermi, la tension de grille doit être négative pour désertir le canal, ce dernier agit directement sur la densité de courant n_s [7].

Afin d'augmenter les performances des dispositifs à base d'hétéro-structures $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N} / \text{GaN}$, une solution serait d'accroître la fraction molaire d'aluminium dans la couche barrière d' $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}$, comme illustré dans la figure I.2. Cependant, cette méthode a quelques limites. Au-delà de 30% d'aluminium, la résistance du canal augmente beaucoup en raison de la diffusion de l'alliage où de la rugosité de l'interface.

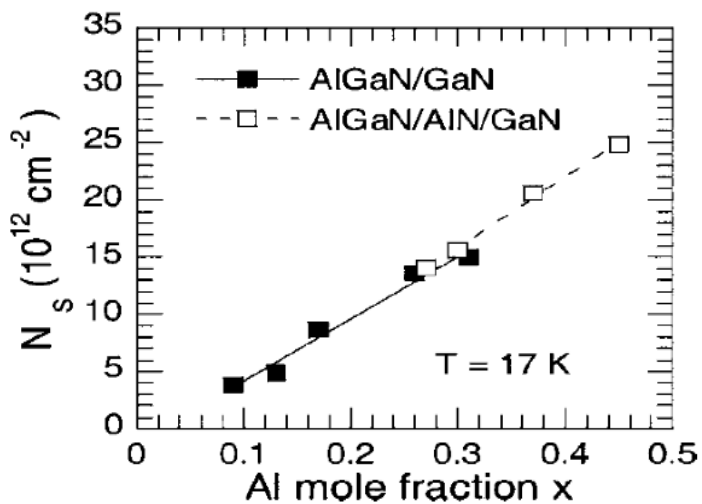


Figure 1.2 : Variation de la densité de porteurs en fonction de la fraction molaire d'aluminium pour les hétéro-structures $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N} / \text{GaN}$ et $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N} / \text{AlN/GaN}$

I.3 Le nitride de Gallium matériau approprié à un HEMT

Les composés III-V nitrurés présentent un intérêt fondamental pour les applications à haute puissance, haute température et haute fréquence ; ainsi qu'en optoélectronique dans les domaines spectraux (LEDs, Lasers, Photo détecteurs...), du fait de leurs exceptionnelles propriétés électroniques, physiques et optique, le développement du nitride de gallium et de ses alliages a longtemps été limité par la mauvaise qualité du matériau obtenu et par les échecs dans les tentatives de dopage p. Le GaN présente les avantages d'une bande interdite large et directe, une grande stabilité thermique, ses propriétés physiques intéressantes le rendent non seulement attractif pour les émetteurs bleus, mais également pour l'électronique haute température, haute puissance et haute fréquence.

I.3.1 Présentation des composés III-V

Les semi-conducteurs de la famille des matériaux III-V sont constitués d'un élément de la colonne III et d'un autre de la colonne V du tableau périodique. Les énergies de leurs bandes interdites sont inférieures à $100kBT$. Ils ont prouvé leur importance dans tous les domaines de l'électronique et l'optoélectronique où ils trouvent un champ d'application très vaste, en raison de leurs propriétés physiques et électriques telles qu'une bonne conductivité thermique, un fort champ de claquage et une grande vitesse de saturation comparés aux semi-conducteurs classiques [17]. En combinant les éléments III et V, il est possible de former des composés binaires (GaN, GaAs, ...), ternaires ($Al_xGa_{(1-x)}N$, GaInAs, ...) et quaternaires (AlGaInN, GaInAsP, ...) dont les propriétés physiques, électriques et optiques sont diverses et peuvent être ajustées avec le choix des éléments et des compositions. Parmi eux, les semi-conducteurs nitrurés tels que le nitrure de gallium (GaN). La figure I.3 représente la variation de l'énergie du gap en fonction du paramètre de mailles de certains matériaux [17-18].

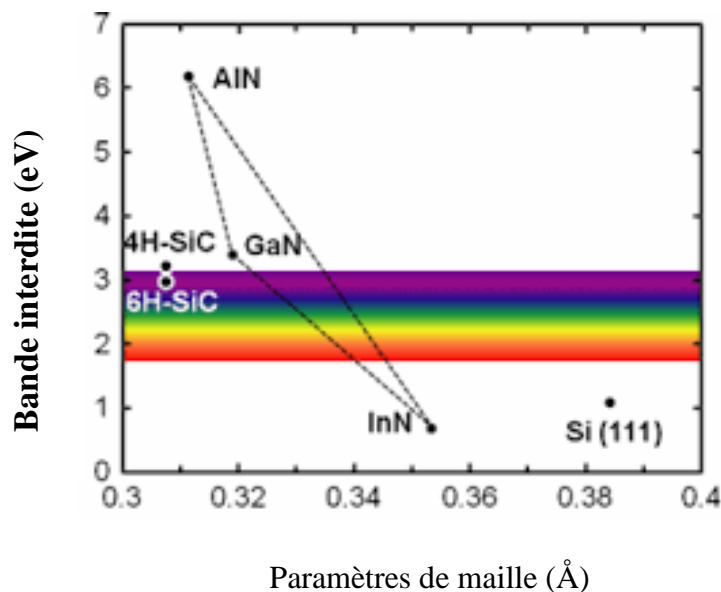


Figure I.3 : Variation de la valeur de bande interdite en fonction du paramètre de maille de différents matériaux semi-conducteurs [19]

Le tableau I.1 regroupe les propriétés fondamentales des semi-conducteurs les plus importants pour les performances des dispositifs électroniques à 300 K

Propriétés	Si	GaN	AlN	InN	SiC	GaAs	InP
Bande interdite (eV)	1.1	3.4	6.2	0.7	3.2	1.4	1.3
Champ de claquage (MV/cm)	0.3	3.3	8.4	1.2	3.5	0.4	0.5
Vitesse de saturation (cm/s)	10^7	$2.5 \cdot 10^7$	$2.1 \cdot 10^7$	$1.8 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^7$	10^7	10^7
Mobilité des électrons ($\text{cm}^2/\text{V.s}$)	1500	990	300	4400	650	8500	5400
Permittivité relative	11.8	9.5	8.5	15.3	10	11.5	12.5
Conductivité thermique ($\text{W}/\text{cm.K}$)	1.5	1.3	2	0.45	4.5	0.5	0.7

Tableau I.1 Propriétés physiques des différents matériaux semi-conducteurs [20,21]

I.3.2 La bande interdite

Le gap d'énergie, notée E_g , (eV) correspond à la différence d'énergie entre le bas de la bande de conduction et le haut de bande de valence. Cette différence correspond à l'énergie nécessaire à un électron pour passer de la bande de valence à la bande de conduction lorsque celui-ci est soumis à une excitation. Si la valeur de cette énergie est supérieure à 2eV, le matériau est alors considéré comme un semi-conducteur à grand gap. L'équation (I.1) présente la variation de l'énergie de la bande interdite en fonction de la température [16, 18,25, 26].

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T+\beta} \quad (\text{I.1})$$

Les valeurs des paramètres α et β sont données dans le tableau I.2 pour différents matériaux.

Semi-conducteur	$E_g(0)(\text{eV})$	$\alpha(\text{eV/K})$	$\beta(\text{K})$
Si	1.17	4.73	636
GaN	3.509	7.32	700
AlN	6.118	17.99	1432
InN	0.69	0.41	454

Tableau I.2: Paramètres de la variation de l'énergie de la bande interdite en fonction de la température [26,27, 28].

I.3.2 Le champ de claquage

Il correspond à la valeur du champ maximale que peut supporter le composant. Les matériaux à grands gap ont un champ de claquage très important, qui leur permet de supporter des tensions de fonctionnement élevées. La valeur du champ de claquage est proportionnelle au gap par la relation suivante :

$$\xi_c = K E_g(T)^{3/2} \quad (\text{I.2})$$

Où K est un facteur de proportionnalité et E_g l'énergie du gap [29].

I.3.3. La vitesse de saturation

Elle est notée V_{sat} (cm/s) elle correspond à la vitesse maximale qu'un porteur de charge dans un semi-conducteur atteint en présence d'un champ électrique très élevé[30-31].

I.3.4. La mobilité des électrons

Elle est notée μ_n (cm²/V.s) elle mesure l'aptitude des porteurs à se déplacer dans le réseau cristallin, sa valeur change s'il y a une modification du réseau cristallin. En effet, l'ajout d'atomes dopants diminue la mobilité des porteurs (figure I.4), ainsi que le changement de la température l'élévation de température créent des perturbations dans le cristal et affectent la mobilité (figure I.5) [32].

La mobilité des porteurs est calculée par la relation suivante [33] :

$$\mu = |q\tau/m^*| \quad (I.3)$$

Avec τ le temps de relaxation et m^* La masse effective des porteurs de charge.

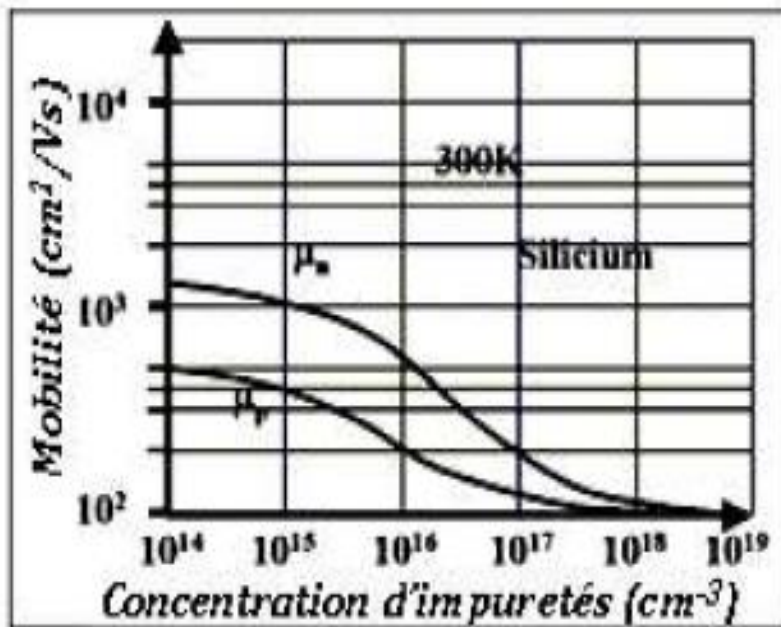


Figure I.4: Variation de la mobilité des électrons et des trous dans le silicium en fonction de la concentration d'impuretés [16].

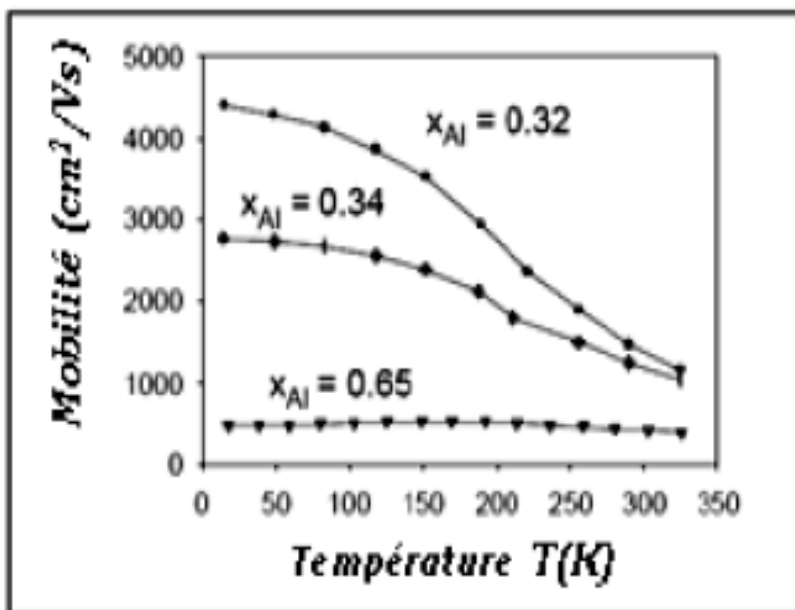


Figure I.5: Variation de la mobilité des électrons en fonction de la température pour différentes concentrations d'aluminium (x) dans une couche d'Al_xGa_(1-x)N [16]

I.3.5. La conductivité thermique

Elle définit la capacité de dissipation de la chaleur dans le composant. Une faible résistivité des substrats provoque des courants de fuites importants, ce qui augmente la puissance dissipée du dispositif c'est-à-dire une augmentation de la température du composant ce qui engendre une chute de la mobilité des électrons et une diminution des performances.

I.4. Les propriétés du GaN

Les nombreuses propriétés mécaniques, thermodynamiques, optiques, électroniques, structurales, thermiques et électriques du GaN, font de ce semi-conducteur un élément attractif dans plusieurs domaines d'utilisation.

I.4.1. Les propriétés structurales

Le nitrure de gallium se cristallise sous deux formes différentes [8], intéressantes pour la microélectronique et l'optoélectronique. Le polytype thermo dynamiquement stable c'est la phase hexagonale (structure Wurtzite) et le polytype thermo dynamiquement métastable c'est le cubique (structure blende de zinc). La forme hexagonale (Wurtzite) est constituée de deux réseaux hexagonaux étroitement espacés, l'un avec les atomes de gallium Ga (cation), l'autre avec les atomes d'azote (anion), interpénétrés et décalés suivant l'axe c de $5/8^{\text{ème}}$ de la maille élémentaire (l'hexagonal simple avec une base de quatre atomes). Chaque atome de Ga est lié à quatre atomes de Nitrogène et vis versa comme montré à la figure suivante.

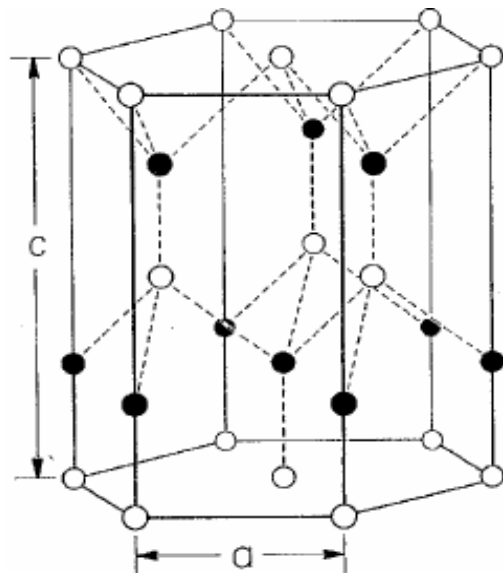


Figure I.6 : la structure hexagonale du GaN

Le GaN a deux faces distinguées : la face Ga si les atomes de Ga sont placés à la surface supérieure du cristal et correspondant à une polarité [0001], alors que si les atomes de Ga sont remplacés par les atomes N on dit que c'est la face N et elle a une polarité [0001]

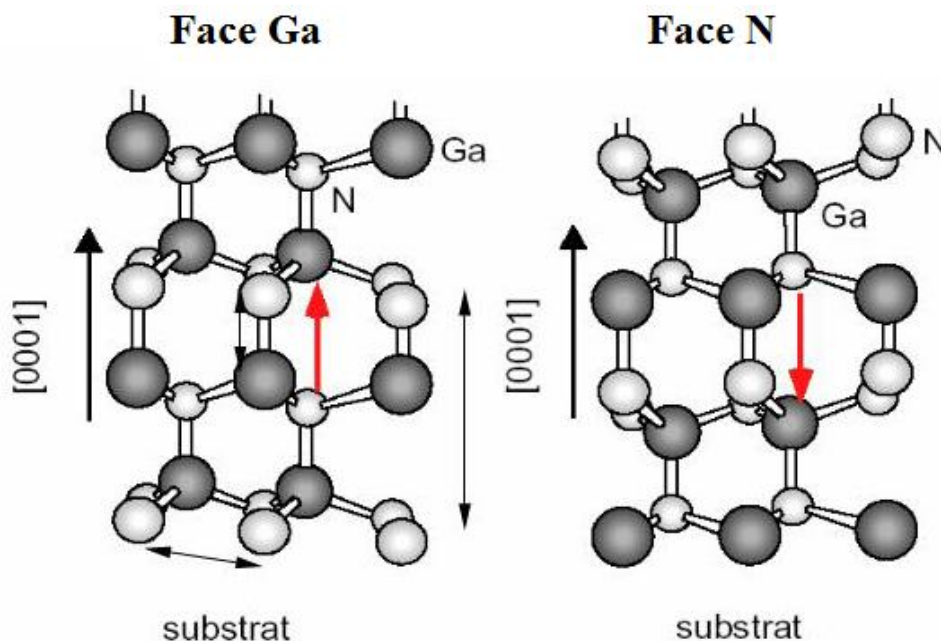


Figure I.7 : l'arrangement atomique suivant les deux faces de croissance du GaN.

I.4.2. Les propriétés électroniques du GaN

Le tableau I.3 présente Les propriétés électroniques du matériau GaN comparé avec d'autres matériaux usuellement utilisés [7]. Le nitrure de gallium GaN est un semi-conducteur à large gap direct de 3.4eV, ce qui permet aux dispositifs à base de GaN tel que les HEMTs de supporter un champ électrique interne cinq fois supérieur que le Si et le GaAs, sa tension de claquage élevée qui est supérieure à 70V est un attribut souhaité pour les applications de haute puissance.

Matériau	Si	GaAs	SiC	GaN
Energie de gap (eV)	1.11	1.43	3.2	3.4
Champ de claquage (V/cm)	$6.0 \cdot 10^5$	$6.5 \cdot 10^5$	$3.5 \cdot 10^6$	$3.5 \cdot 10^6$
Vitesse de saturation (cm/s)	$1.0 \cdot 10^7$	$2.0 \cdot 10^7$	$2.0 \cdot 10^7$	$2.5 \cdot 10^7$
Mobilité électronique (cm ² /V.s)	1350	6000	800	1600
Conductivité thermique (W/cm.K)	1.5	0.46	3.5	1.7
hétérostructures	SiGe/Si	AlGaAs/GaAs InGaP/GaAs AlGaAs/InGaAs	-	AlGaN/GaN InGaN/GaN

Tableau I.3 : Propriétés électroniques du GaN comparées à d'autres matériaux utilisés.

I.4.3. Les propriétés électriques du GaN

I.4.3.1. La Polarisation.

Le champ électrique dû aux charges induites par la polarisation joue un rôle important dans les propriétés électriques et optiques des hétéro-structures à base de nitrure d'où la croissance est suivant l'orientation [0001]. Ce champ est une source de gaz d'électron bidimensionnel accumulé à l'interface de l'hétérojonction. La compréhension et le contrôle de la source des électrons du transistor HEMT sont importants pour l'optimisation de ses performances.

I.4.3.2. La Polarisation spontanée

On dit qu'une liaison est polarisée, si elle agit comme si elle possédait un pôle positif et un autre négatif, pour le GaN et cause de la nature ionique de la liaison métal-azote [8], et vu que Le Nitrogène possède une forte électronégativité par rapport aux autres éléments du groupe tels que Al (1.5 eV), Ga (1.6eV), et In (1.7eV). Ce qui permet d'attirer les électrons plus fortement vers lui dans la liaison Ga-N, donc une charge négative $-q$ apparaît autour des atomes d'azote et une charge positive $+q$ apparaît autour des atomes de gallium et par la suite l'apparition d'une succession de dipôles orientés dans la direction [0001] et la création d'un champ électrique dans le sens opposé à cette polarisation (Figure I.8). Le matériau possède ainsi une polarisation suivant l'axe c à une contrainte nulle appelée **polarisation spontanée P_{SP}** [9] donnée dans le tableau I.4 [10].

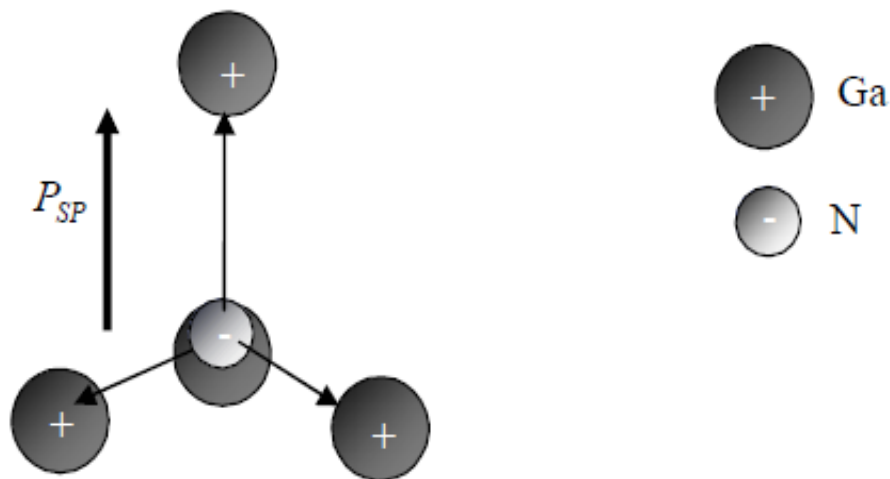


Figure I-8 : la polarisation spontanée dans le GaN.

La structure cristalline du GaN possède une symétrie suivant l'axe c faisant que le gradient de polarisation ($\nabla \vec{P} = -\sigma = 0$) et la densité de charges en volume sont nuls.

Matériaux	AlN	GaN	InN	$\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}$
c/a	1.6010	1.6259	1.6116	$1,6259-0,0249x$
P_{SP} (C/m ²)	- 0.081	- 0.029	- 0.032	$- 0,052x - 0,029$

Tableau I.4 : Valeurs de polarisation spontanée dans l'AlN, le GaN, l'InN et l' $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}$.

I.4.3.3. Polarisation piézoélectrique

L'effet piézoélectrique peut se définir comme l'apparition d'une polarisation électrique dans une couche semi-conductrice lorsque celle-ci est soumise à une contrainte se qui modifie la maille du cristal en brisant sa symétrie. Donc cette polarisation est due au mécanisme de contrainte présenté dans le cristal. C'est à dire si le facteur d'idéalité des mailles c_0/a_0 de matériau GaN a changé suivant un impact extérieur, un changement

dramatique aura lieu dans la polarisation du cristal à cause de la forte ionisation de la liaison Ga-N. Alors, si une pression est appliquée, les paramètres de la maille idéale c_0 et a_0 changent pour accommoder cette pression, ce qui implique une variation dans la polarisation. Cette polarisation est appelée **polarisation piézoélectrique** P_{PZ} .

Comme nous l'avons déjà vu, les nitrures peuvent se cristalliser sous deux formes: zinc blende (cubique) et wurtzite (hexagonale) qui sont non centraux-symétriques, ceci induit l'existence d'un effet piézoélectrique dans ces structures. L'apparition du champ électrique peut être représentée par un modèle ionique simple faisant intervenir le déplacement, sous l'effet de la contrainte, des barycentres des charges positives et négatives à l'intérieur des tétraèdres formant la maille cristalline comme on peut le voir à la figure I.9.

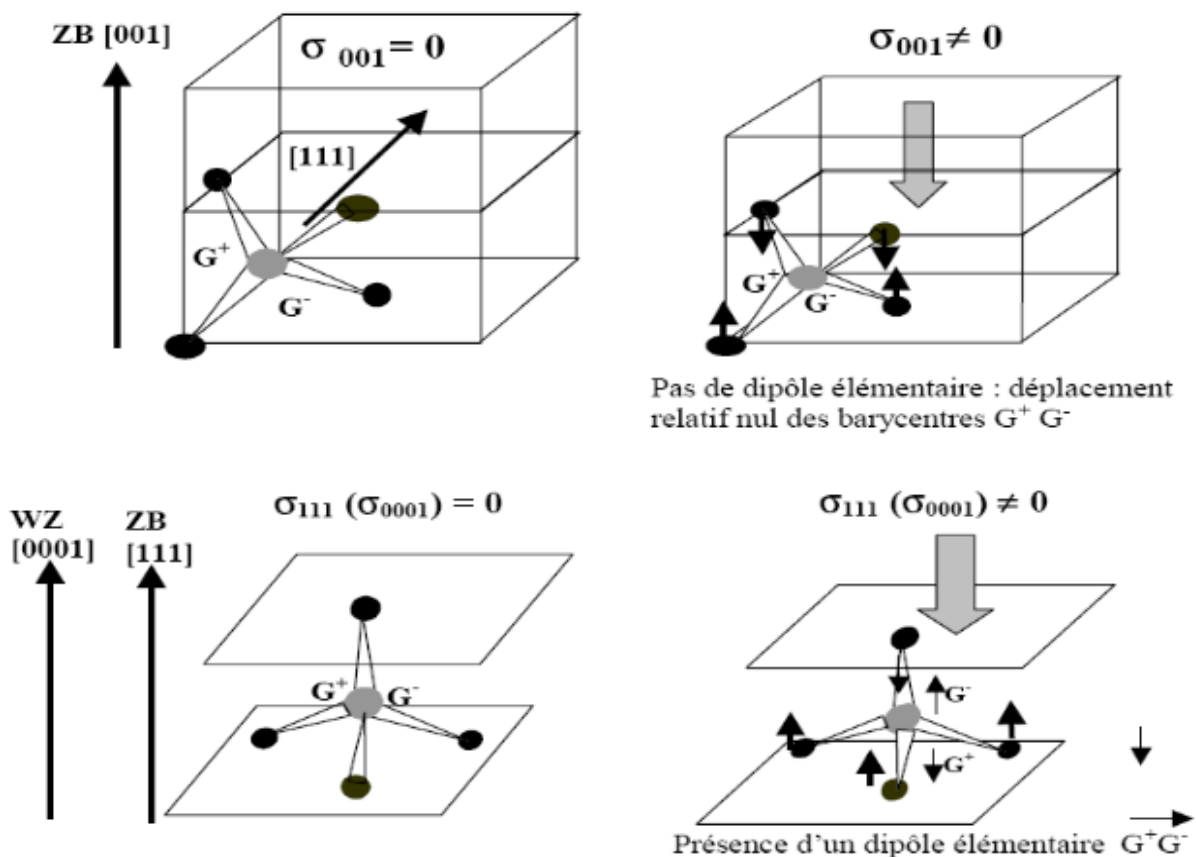


Figure I.9 : Mise en évidence de l'effet de la contrainte s dans la phase zinc-blende suivant les directions (001) et (111) ainsi que dans la phase wurtzite suivant la direction (0001) [12]

Aucune polarisation n'est engendrée dans la phase cubique par contre dans la phase hexagonale une contrainte suivant la direction (0001) engendrera une polarisation piézoélectrique [12].

Dans les HEMTs étudiés, la couche GaN est entre environ 100 fois plus épaisse que la couche $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}$, au point de la considérer relaxée de toute contrainte mécanique. La polarisation piézoélectrique des alliages ternaires $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}$ est modélisée selon le formalisme de Hooke [10]. On en retient l'équation (I-4)

$$P_{\text{PZ}} = 2 \frac{a-a_0}{a_0} \left(e_{31} - e_{33} \frac{C_{13}}{C_{33}} \right) \quad (\text{I.4})$$

a le paramètre de maille du matériau contraint et a_0 le paramètre de maille du matériau relaxé ; e_{31} et e_{33} sont des constantes piézoélectriques; C_{13} et C_{33} sont des constantes élastiques.

Le tableau I.5 présente les paramètres de polarisation piézoélectrique pour les matériaux à base de semi-conducteur III-N à large bande interdite [11].

Constantes	AlN	GaN	$\text{Al}_x \text{Ga}_{(1-x)} \text{N}$
$a_0(\text{nm})$	0.3112	0.3189	
$e_{31}(\text{C}/\text{m}^2)$	-0.60	-0.49	$-0.11x - 0.49$
$e_{33}(\text{C}/\text{m}^2)$	1.46	0.73	$0.73x + 0.73$
$C_{13}(\text{GPa})$	99	106	$5x + 106$
$C_{33}(\text{GPa})$	389	398	$-32+398$

Tableau I.5 : Paramètres de polarisation piézoélectrique pour les matériaux à base de semi-conducteur III-N à large bande interdites.

I.5. Substrats utilisés pour la croissance du nitrure de gallium

La croissance des couches hexagonales de bonne qualité est conditionnée par le choix du substrat. En effet, le principal problème rencontré pour l'épitaxie du Nitrure de Gallium est qu'il n'existe pas de substrat accordé en maille pour ces matériaux. Les candidats susceptibles d'être utilisés pour l'hétérostructure $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}/\text{GaN}$ sont le saphir (Al_2O_3), le silicium (Si) et le carbure de silicium (H_4SiC). Le tableau I.6 représente les caractéristiques physiques de ces substrats [13, 14,15,16]

Substrats	Structure cristalline	Paramètre de maille (Å°)	Conductivité thermique ($\text{W cm}^{-1} \text{K}^{-1}$)	Coefficients de dilatation thermique α	
Al_2O_3	Hexagonale	a = 4.758 c = 12.99	0.5	7.5	8.5
4H-SiC	Wurtzite	a = 3.08 c = 15.12	3.3	4.2	4.68
Si(111)	Cubique	a = 5.4301	1.5	3.59	

Tableau I.6 : Caractéristiques cristallographiques des substrats utilisés pour la croissance.

I.5.1. Le silicium (Si)

Le substrat silicium est très attractif non seulement parce qu'il présente une bonne morphologie de surface ainsi que son coût bas, mais également parce qu'il permet une intégration des dispositifs à base de GaN. Le GaN montre un désaccord de maille avec le Si d'environ 17% associé à un désaccord de coefficients de dilatation thermique supérieur à 35%. Les substrats en silicium doivent être orientés dans la direction [111] [22]. En revanche, le procédé de fabrication des substrats de silicium est mûre puisqu'il est utilisé depuis des années dans l'univers de la RF. Les épitaxies de GaN réalisées sur les substrats de silicium intègrent une couche de nucléation complexe, composée d'un empilement. Cet empilement est constitué d'une succession de couches GaN/AlN épitaxies dans des conditions de croissance optimisées [23].

I.5.2. Le saphir Al_2O_3

A l'origine des premières élaborations du matériau GaN, la majorité des couches élaborées étaient déposées sur substrat saphir. Ce substrat présente l'avantage d'un coût relativement faible, facilement disponible, semi isolant et il présente une grande stabilité en température. Malheureusement il présente des inconvénients tel que : sa faible conductivité thermique ($\kappa = 0.5 \text{ W/cm.k}$) et un fort désaccord en maille avec le GaN de l'ordre de 17% [24], cependant lors de l'épitaxie, la maille est tournée de 30° par rapport à la maille des atomes d'Aluminium du saphir et le désaccord réel est dans ces conditions inférieur à 15%, comme le montre la figure I.10; malgré ce désaccord de maille important et la différence de coefficients de dilatation thermique de l'ordre de 35%, le saphir est utilisé pour des raisons de coûts. Cependant, ce matériau atteint aujourd'hui ses limites du fait de sa mauvaise conductivité thermique.

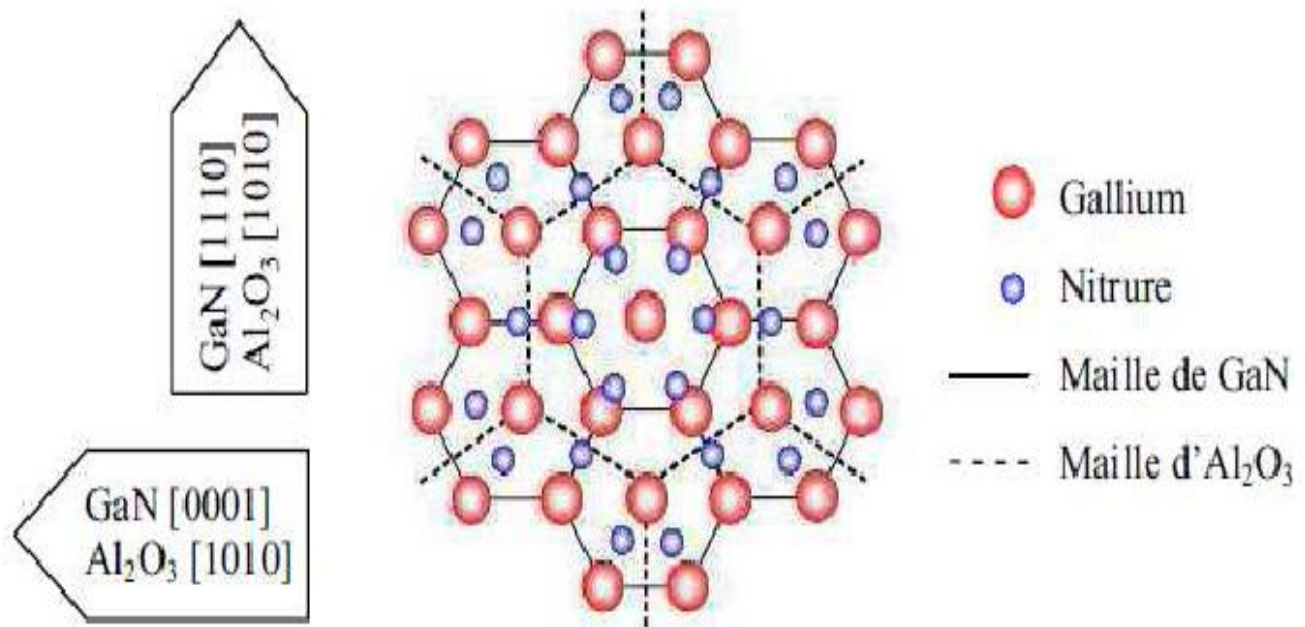


Figure I.10 : Orientation prise lors de l'épitaxie du GaN sur saphir.

I.5.3. Le carbure de silicium (SiC)

Le SiC est le substrat le plus prometteur pour la réalisation des dispositifs de puissance. Il présente un désaccord de maille de 4 % avec le GaN. Il est très stable thermiquement, avec une excellente conductivité thermique. Les conditions d'épitaxie sont bien plus favorables, par conséquent, les couches épitaxiales sur ce substrat présentent une meilleure qualité cristalline que celle élaborée sur Saphir. Afin d'améliorer encore la qualité cristalline du GaN sur SiC, une couche de nucléation en AlN de 100nm environ est déposée dans un premier temps sur le substrat. Le SiC possède également une conductivité thermique environ sept fois plus élevée que celle du Saphir.

Les inconvénients des substrats en SiC sont d'une part le coût très élevé, et d'autre part la rugosité de surface, qui est en moyenne de 1 nm, contre 0,1 nm pour le saphir.

I.6. Conclusion

Dans cette partie nous avons présentés le principe de base d'un transistor à haute mobilité (HEMT) qui consiste à mettre à profit les propriétés de haute mobilité d'un gaz d'électron bidimensionnel 2DEG à partir de la séparation physique des électrons libres, des donneurs ionisés dont ils proviennent. Ainsi que nous avons rappelé les caractéristiques physiques de nitrure de gallium et les différents substrats de croissance. Le matériau GaN de (phase wurtz) est un bon candidat pour ces transistors grâce à ses propriétés physiques très intéressantes telles que la largeur de la bande d'énergie interdite, la vitesse de saturation des porteurs, et les stabilités thermique et chimique...

Références du Chapitre I

- [1] Stephane Augaudy, caractérisation et modélisation des transistors micro ondes, application à l'étude de la linéarité des amplificateurs à fort rendement, thèse de Doctorat, Université de Limoges, (2002).
- [2] R. Dingle ; H.L. Stormer ; A.C. Gossard ; and W. Wiegmann « Electron mobility's in modulation-doped semiconductor heterojunction superlattices» Applied Physics Letters, vol. 33, no. 7, pp. 665–667, 1978.
- [3] T. Mimura, S. Hiyamizu, T. Fujii, and K. Nanbu « A new field-effect transistor with selectively doped GaAs/n-Al_xGa_{1-x}As heterojunctions » Japanese Journal of Applied Physics, vol. 19, pp. L225–227, May 1980.
- [4] O.Lancry «Etude par microspectrometrie raman de matériaux et de composants microélectronique à base de semi-conducteur III-V grand gap» thèse, Univ. Lille Déc. 2009.
- [5] D. Nicolas «Caractérisation et modélisation de dispositif de la filière Nitrure pour la conception de circuits intégrés de puissance Hyperfréquences» thèse, Université de Lille décembre 2007.
- [6] M. Audrey Philippe « Etude d'une nouvelle filière de composants sur technologie nitrure de gallium. Conception et réalisation d'amplificateurs distribués de puissance large bande à cellules cascode en montage flip-chip et technologie MMIC » thèse, Université Limoges Décembre 2007.
- [7] Mustafa Avcu Caractérisation des effets parasites dans les HEMTs GaN : développement d'un banc de mesure 3ω , thèse de Doctorat, Université de Limoges, 2014. Français

- [8] S. Yu. Davydov, *Semiconductors*, 36, 1, 41 (2002).
- [9] O. Ambacher, J. Smart, J. R. Shealy, N. G. Weimann, K. Chu, M. Murphy, W. J. Schaff, L. F. Eastman, R. Dimitrov, L. Wittmer, M. Stutzmann, W. Rieger, J. Hilsenbeck, *J. Appl. Phys.* 85, 3222 (1999).
- [10] H. Morkoc, *Handbook of Nitride Semiconductors and Devices*. Wiley-VCH, 1(2008) ISBN: 978-3-527-40838-2
- [11] Rongming Chu, *AlGaIn/GaN single and double channel high electron mobility transistors hétérostructures*, thèse M.Sc., Hong Kong University of science and technology (2004).
- [12] J-M. Bethoux. « Relaxation des contraintes dans les hétérostructures épaisses (Al,Ga)N: une piste originale pour la réalisation de diodes électroluminescentes à cavité résonante ». Thèse soutenue, à l'université de Nice Sophia-Antipolis, le 24 septembre 2004.
- [13] D. Ducatteau, A. Minko, V. Hoel, E. Morvan, E. Delos, B. Grimbert, H. Lahreche, P. Bove, C. Gaquiere, J. C. D. Jaeger and S. Delage, *IEEE Electron Device Letters* 27, 7 (2006).
- [14] F. Semond, Y. Cordier, N. Grandjean, F. Natali, B. Damilano, S. Vézian and J. Massies, *Physica Status Solidi (a)* 188, 501 (2001).
- [15] S. Joblot, F. Semond, Y. Cordier, P. Lorenzini and J. Massies, *Applied Physics Letters* 87, 133505 (2005).
- [16] N. Benseddik, thèse de doctorat : "Etude et caractérisation de nano-composants à base de semiconducteur III-N pour des applications en puissance et hyperfréquence", Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbes, 2013
- [17] N. Sarazin, thèse de doctorat: "HEMTs à base de Nitrure de Gallium : évolution vers un nouveau système de matériaux, une nouvelle génération de composants", Université des Sciences et Technologies de Lille, 2007.
- [18] S. M. Sze, "Physics of Semiconductor Devices", third edition, Wiley, 2006.
- [19] S. W. Kaun, M. H. Wong, U. K. Mishra, J. S. Speck, "Molecular beam epitaxy for high-performance Ga-face GaN electron devices", *Semiconductor Science and Technology*, 2013.

- [20] W. Chikhaoui, thèse de doctorat : " Etude des mécanismes physiques responsables des dysfonctionnements des transistors HEMTs à base d'hétérostructures AlGaN/GaN et AlInN/GaN", Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Lyon, 2011.
- [21] S. Rennesson, thèse de doctorat : " Développement de nouvelles hétérostructures HEMTs à base de nitrure de gallium pour des applications de puissance en gamme d'ondes millimétriques", Université de Nice, 2013.
- [22] L. Liu, J.H. Edgar. Substrates for Gallium Nitride epitaxy. Materials Science and Engineering, R37, pp 112, 2002.
- [23] F. Semond, Y. Cordier, N. Grandjean, F. Natali, B. Damilano, S. Vezian, J. Massies, Phys Status Solidi A, 188, 501 (2001).
- [24] M. Tchounkeu, "Optical Properties of GaN Epilayers on Sapphire", J. Appl. Phys., 80, 352(1996).
- [25] V. Gorge, thèse de doctorat : " Caractérisations de matériaux et tests de composants des cellules solaires à base des nitrures des éléments III-V", Université Paris-sud 1, 2012.
- [26] Y. Douvry, thèse de doctorat : "Etude de HEMTs AlGaN/GaN à grand développement pour la puissance hyperfréquence :- conception et fabrication- caractérisation et fiabilité", Université des Sciences et Technologies de Lille, 2012.
- [27] U. K. Mishra, J. Singh, " Semiconductor Device Physics and Design", Springer, 2008.
- [28] J. Wu, "When group-III nitrid go infrared : new properties and perspectives", journal of Applied Physics, vol.106, 2009.
- [29] S. Bouzid -Driad, thèse de doctorat : "Réalisation et caractérisation de transistors HEMTs GaN pour des applications dans le domaine millimétrique", Université des Sciences et Technologies de Lille, 2013.
- [30] J. P. Colinge, C. A. Colinge, "Physics of semiconductor devices", Kluwer academic publishers, 2002.
- [31] R. Quay, "Gallium nitride electronics", Springer, 2008 .

[32] O. Bonnaud, "Physique des solides des semi-conducteurs et dispositifs", Institut d'Electronique et de Télécommunications de Rennes, 2003.

[33] H. Mathieu, "Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques", 6^e édition, Dunod, 2009.

Chapitre II

L'hétérojonction $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}/\text{GaN}$

II.1. Introduction

Les transistors à effet de champ à base d'hétéro-structure $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}/\text{GaN}$ sont considérés comme candidats attractifs opérant aux fréquences micro ondes (70GHz). Le premier HEMT a été réalisé en 1993 par Khan et al [1], ce type de transistor à hétérojonction $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}/\text{GaN}$ a deux particularités essentielles [2], un large gap qui rend la structure adaptée aux applications de haute puissance et haute fréquence et un matériau fortement polaire (GaN) , la contrainte résultante de la croissance de la couche $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}$ sur la couche GaN induit la charge piézoélectrique qui s'ajoute aux électrons du canal pour avoir une concentration du 2DEG de l'ordre de 10^{13} cm^{-2} approximativement plus élevée de 4 à 5 fois de celle obtenue pour les HEMTs à base de GaAs. Cette propriété piézoélectrique est un facteur d'amplification de puissance unique pour ces hétéro-structures [3].

Dans ce chapitre, on se concentrera sur la caractérisation des propriétés électriques des hétéro-structures à base de GaN telles que $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}/\text{GaN}$ et $\text{GaN}/ \text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}$ à face Ga et à face N pour mieux comprendre l'effet de la polarisation spontanée et piézoélectrique sur la formation et la localisation du 2DEG en l'absence de modulation de dopage et de polarisation externe

II.2. Hétérojonction et gaz 2D

II.2.1. Principe de l'hétérojonction

Une hétérojonction entre deux semi-conducteurs peut être obtenue en faisant croître une couche épitaxiée d'un semi-conducteur sur un autre semi-conducteur. Cette croissance exige que les deux matériaux aient, dans le plan interfacial, les mêmes symétries cristallines et des paramètres cristallins ou des distances interatomiques voisines commensurables. En outre, puisque l'épitaxie est réalisée à température élevée, il faut que les deux matériaux aient des coefficients de dilatation thermique voisins. Ces conditions sont à peu près réalisées pour de très nombreux systèmes. Si les deux semi-conducteurs sont de même type, la jonction est dite isotype dans le cas contraire elle est anisotype [3].

La mise en contact d'un matériau à grand gap et d'un matériau à petit gap crée une discontinuité de bande de conduction (ΔE_c) à l'interface entre les deux matériaux, cette discontinuité entraîne la formation d'un puits de potentiel dans le matériau à petit gap créant ainsi un gaz bidimensionnel d'électrons (2DEG) [4]. La figure II.1 présente la juxtaposition de deux matériaux à gap différents avant et après contact [5,6].

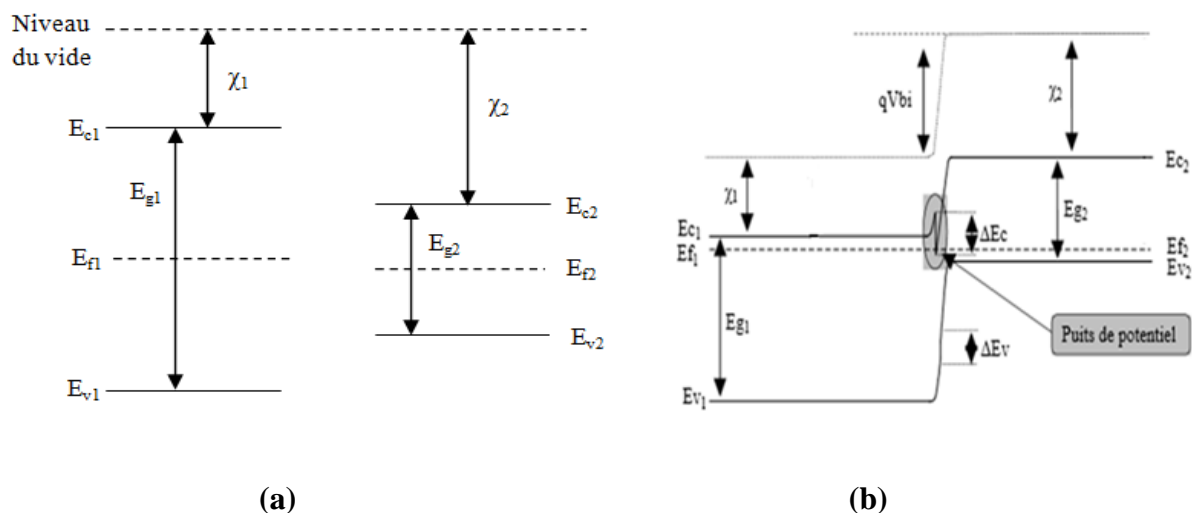


Figure II.1: Diagramme de bandes d'énergie de deux matériaux à gap différents avant contact (a), après contact (b).

Avec la considération des paramètres des deux matériaux qui sont définis par :

χ_1 : Affinité électronique du semi-conducteur 1.

E_{g1} : Largeur de la bande interdite du semi-conducteur 1.

χ_2 : Affinité électronique du semi-conducteur 2.

E_{g2} : Largeur de la bande interdite du semi-conducteur 2.

ΔE_c : Discontinuité des bandes de conduction.

ΔE_v : Discontinuité des bandes de valence.

qV_{bi} : Tension de diffusion.

II.2.2. Gaz bidimensionnel

La structure d'un HEMT est constituée essentiellement de trois matériaux différents : le substrat, un matériau à large bande interdite et un matériau à plus faible bande interdite. La jonction de ces deux derniers matériaux engendre la formation du gaz bidimensionnel d'électrons à l'interface, dont la densité est modulée par la tension appliquée à la grille du composant. Les électrons séparés des atomes donneurs ont une grande mobilité et peuvent uniquement se mouvoir dans un plan bidimensionnel parallèle à l'interface [6, 8, 9].

II.2.3. Formation du puits de potentiel

Un puits de potentiel est créé à l'interface lors de la jonction des deux matériaux à cause de la différence des énergies de bande interdite. Les électrons provenant de la couche donneuse sont confinés dans ce puits et participant au courant de conduction dans la structure (figure II.2)[6, 9].

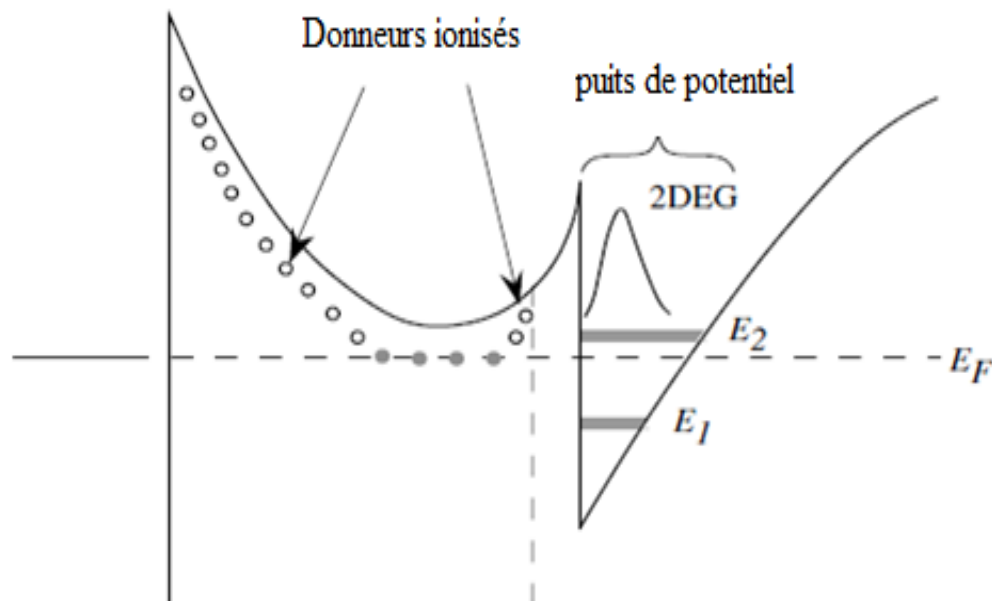


Figure II.2: Création d'un puits de potentiel dans un transistor HEMT [9].

Sous l'effet d'une polarisation le bas du puits quantique passe sous le niveau de Fermi, qui en général est assez proche de milieu de bande interdite du matériau de plus faible gap.

II.2.4. Densité d'électrons dans le canal

Dans le cas transistors, HEMT a base des hétéro-structures $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}/\text{GaN}$, la couche donneuse $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}$ est non-intentionnellement dopée. Une densité d'électrons, très élevée est présente dans le canal : $2,23 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ [10], 10^{13} cm^{-2} [11]. La qualité cristallographique de la couche $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}$ suite aux processus de fabrication entraîne un dopage résiduel de type N variant de 10^{15} à $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, mais celui-ci n'est pas suffisant pour expliquer la forte densité d'électrons dans le canal. **Ibbetson** [11] démontre la présence d'une forte densité d'états de surface, à la surface de la couche AlGaIn , qui se

comportent comme des états donneurs et jouent le rôle de dopants. Ces pièges de surface forment une charge positive, puisqu'ils ont émis leur électron. Ces électrons se retrouvent confinés dans le canal à l'interface $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}/\text{GaN}$ [12]. Donc les électrons présents, formant la densité de charge dans le canal, dans le puits quantique proviennent essentiellement des états donneurs situés en surface de la couche $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}$.

II.2.5. Calcul de la densité de charge dans l'hétéro-structure $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}/\text{GaN}$

II.2.5.1. Face Ga

La figure suivante représente l'hétéro-structure $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}/\text{GaN}$ face **Ga** ainsi que le sens des polarisations spontanée et piézoélectrique.

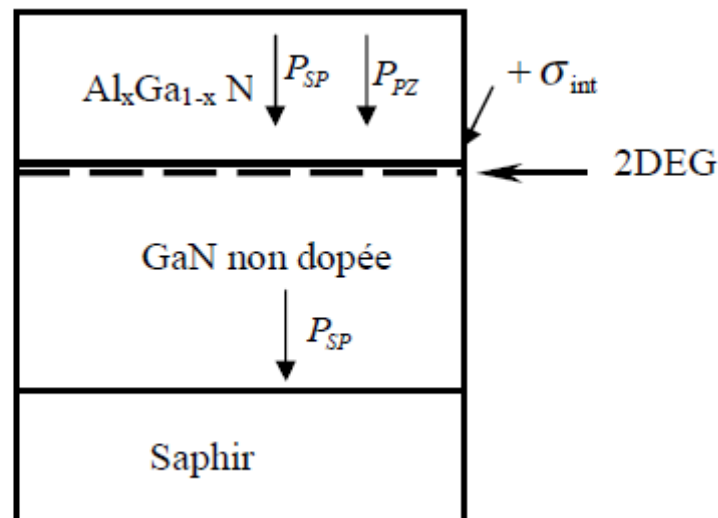


Figure II-3 : La densité de charge induite par polarisation dans l'hétéro-structure $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}/\text{GaN}$ (face Ga)

Le diagramme de bande de conduction, ainsi que la densité de charge à l'interface d' $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}/\text{GaN}$ sont représentés sur la figure II-4. La bande de conduction coté $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}$ est poussée vers le niveau de Fermi, alors que du coté GaN , est poussée au-dessous du niveau de Fermi, le puits quantique se forme et le **2DEG** se crée.

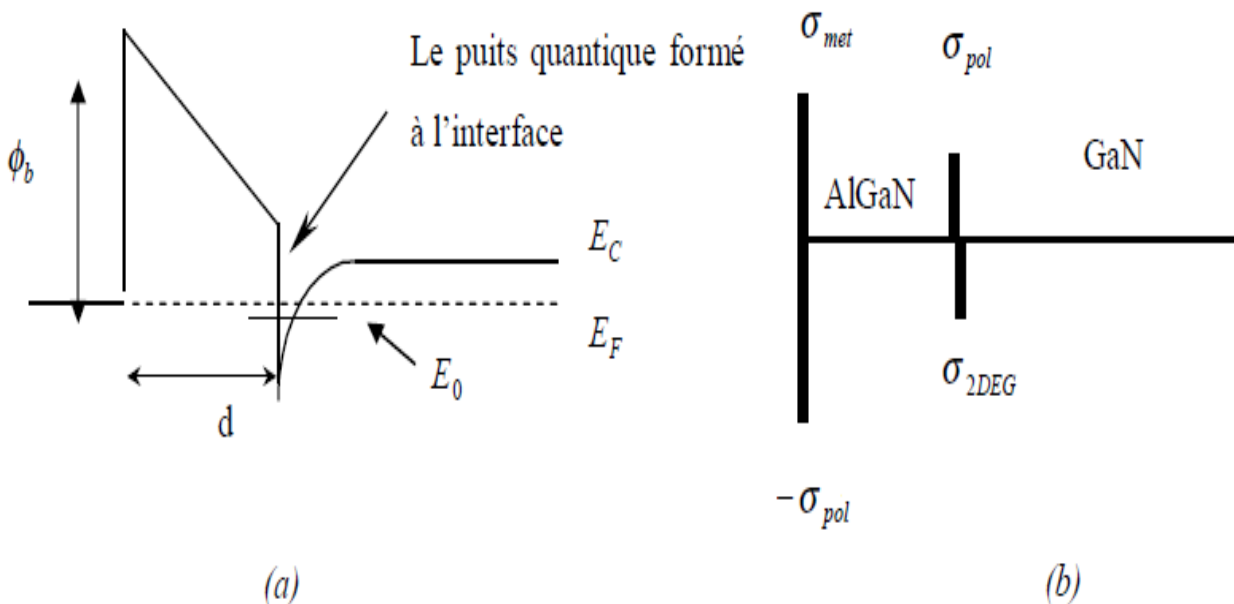


Figure II-4 : (a) diagramme de bande d'énergie de l'hétéro-structure $\text{Al GaN}/\text{GaN}$. (b) la densité de charge à l'interface et à la surface

En général, la variation de la polarisation dans l'espace induit une densité de charge donnée par [13,14] :

$$S = -\nabla P \quad (\text{II.1})$$

Pour la structure Wurtzite, la polarisation est dirigée le long de l'axe c perpendiculaire à l'interface de l'hétéro-structure. Une densité de charge σ_{int} est formée à cette interface suivant la relation (II.2) [13,15,16] :

$$\sigma = [P_{SP} + P_{PZ}]_{\text{couche 1}} - [P_{SP} + P_{PZ}]_{\text{couche 2}} \quad (\text{II.2})$$

Couche 1 : GaN ,

Couche 2 : $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}$

Cette charge *fixe* induite par la différence de polarisation entre deux couches attirera la charge *mobile* compensatrice à l'interface. Si la charge fixe est positive, elle créera une charge mobile négative, et vice versa. On suppose que la couche GaN est complètement relaxée, donc elle a une $P_{PZ}(\text{GaN}) = 0$. Donc la relation précédente devient :

$$\sigma = [P_{SP}(\text{GaN})] - [P_{SP}(\text{AlGaN}) + P_{PZ}(\text{AlGaN})] \quad (\text{II.3})$$

II.2.5.2 Face N

Dans l'hétéro-structure $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}/\text{GaN}$ face N, les polarisations spontanée et piézoélectrique changent de signes elles ont un sens opposé par rapport à la face Ga (figure II.5). La densité de charge induite par cette polarisation est négative, ce qui permet une accumulation des trous à l'interface

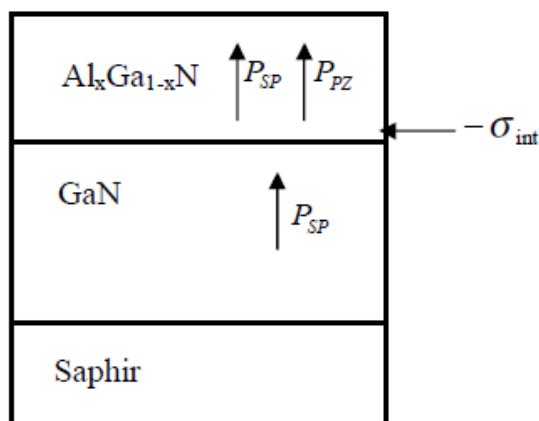


Figure II-5 : La densité de charge présentée à l'interface de l'hétéro-structure $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}/\text{GaN}$ face N

L'hétérostructure	ϵ_{\perp}	P_{SP} (C/cm^2)	P_{PZ} (C/cm^2)	E (V/cm)	σ_{int} (cm^{-2})
$\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.70}\text{N}/\text{GaN}$ Face N	$7.3 \cdot 10^{-3}$	$4.5 \cdot 10^{-6}$	$1.1 \cdot 10^{-6}$	$3.248 \cdot 10^6$	$-1.68 \cdot 10^{13}$

Tableau II-1 : évaluation de la densité de charge σ_{int} dans l'hétéro-structure $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}/\text{GaN}$ face N pour $x=0.3$.

II.2.6. Calcul de la concentration n_s dans le 2DEG pour l'hétérojonction $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}/\text{GaN}$

L'expression de n_s en fonction de la tension de polarisation de la grille déduite de l'équation de Poisson est donnée par l'équation II.4 [4].

$$n_s = \frac{\epsilon(x)}{qd} \left(V_{gs} - \frac{E_F}{q} - V_{th}(x) \right) \quad (\text{II.4})$$

L'expression de n_s en fonction des niveaux d'énergie déduite de l'équation de Schrödinger est donnée par la relation II.5 [4].

$$n_s = \frac{m_e^*}{\pi \cdot \hbar^2} K_B T \ln \left[\left(1 + \exp \left(\frac{E_F - E_0}{K_B T} \right) \right) \cdot \left(1 + \exp \left(\frac{E_F - E_1}{K_B T} \right) \right) \right] \quad (\text{II.5})$$

La concentration totale n_s du 2-DEG sera obtenue par la résolution des deux équations en même temps [4,16], elle est donnée en fonction de la tension de polarisation de grille par l'équation suivante (II.6).

$$n_s(V_{GS}) = \frac{\epsilon_s}{qd} (V_{GS} - V_{th}) \quad (\text{II.6})$$

Avec ϵ_s est la permittivité relative de la couche barrière, q la charge de l'électron, d est l'épaisseur de la couche donneuse, V_{GS} la tension grille-source et V_{th} la tension de seuil.

II.3. Le HEMT $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}/\text{GaN}$

II.3.1. Structure classique du HEMT $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}/\text{GaN}$

Il est constitué d'une hétérojonction $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}/\text{GaN}$. Sur celle-ci un contact Schottky est déposé afin de former le contact de Grille. Deux contacts ohmiques sont déposés de part et d'autre de la Grille afin de former les contacts de Drain et de Source. L'épaisseur de la couche $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}$ est très fine [12].

II.3.2. Le contact de grille

Dans le transistor HEMT un contact de grille est nécessaire pour contrôler la charge du canal et donc le courant. Ce contact est de type Schottky. Il est constitué d'un métal déposé sur la couche $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}$ dont le travail de sortie est supérieur à celui du semi-conducteur. Cette différence des travaux de sortie induit une différence de potentiel électrostatique et la formation d'une zone de déplétion ZCE [12.17].

II.3.3 La fonction de transfert

La fonction de transfert représente la variation du courant de drain en fonction de la tension grille-source [6, 19], cette caractéristique de transfert est présentée sur la figure II.6.

I_{ds} représente le courant drain-source en fonction de V_{gs} et g_m représente la transconductance en fonction de V_{gs}

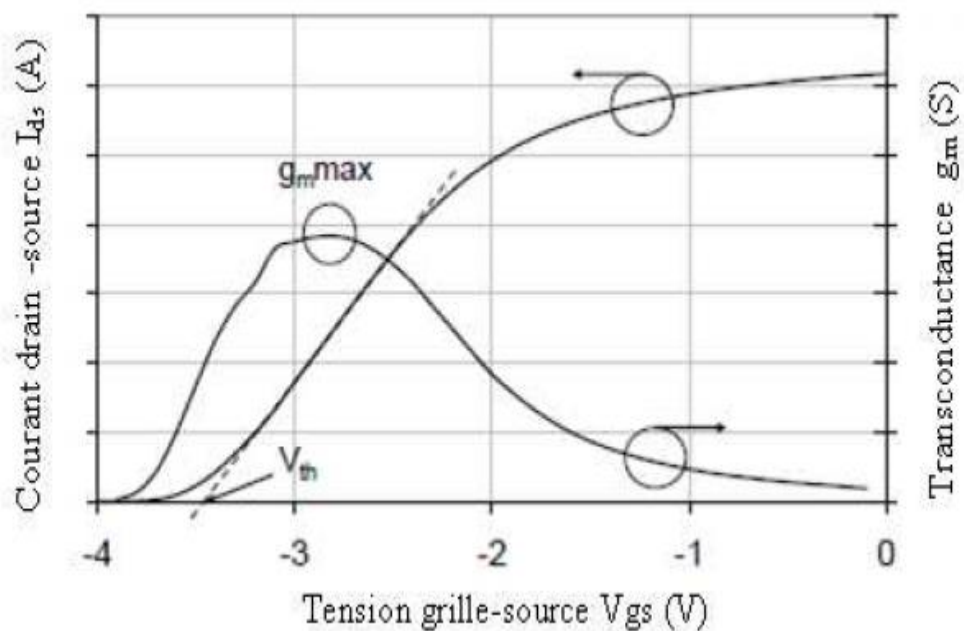


Figure II.6: Caractéristique de transfert d'un transistor HEMT [6, 16].

II.3.1 Le courant Drain-Source

Le courant Drain-Source est localisé dans le canal, c'est un courant de dérive et son évolution en fonction du champ latéral est décrite par l'équation (II.7)[12].

$$I_{DS} = W Q_{2\text{DEG}}(x) v(x) \quad (\text{II.7})$$

Où W représente la largeur de grille, $Q_{2\text{DEG}}(x)$ la charge dans le canal est donnée par l'équation (II.8)[12],

$$Q_{2\text{DEG}}(x) = qN_{2\text{DEG}}(x) = \frac{\epsilon_{\text{AlGa}}}{d_{\text{AlGa}}} (V_{GS} - V(x) - V_{th}) \quad (\text{II.8})$$

$v(x)$ la vitesse de déplacement des électrons à la position x , Aux faibles polarisations de drain, la vitesse de déplacement est inférieure à la vitesse de saturation électronique v_{sat} , elle donné par l'équation (II.9)[4].

$$v_{sat} = \frac{\mu_0 \frac{dV_c(x)}{dx}}{1 + \frac{\mu_0}{v_{sat}} \frac{dV_c(x)}{dx}} \quad (\text{II.9})$$

μ_0 : la mobilité à faible champ électrique, $V_c(x)$ est le potentiel du canal à la position x .

Ainsi I_{DS} est l'intégrale de l'équation (II.7) le long de la grille, L

$$I_{DS} = \frac{W_G}{L} \int_0^L Q_{2\text{DEG}}(x) v(x) dx = \frac{W \mu_e}{L} \int_0^L Q_{2\text{DEG}} \frac{dV(x)}{dx} \quad (\text{II.10})$$

Le mode linéaire est obtenu pour des tensions $V_{ds} \ll (V_{gs} - V_{th})$, est donné par l'équation (II.11) :

$$I_{ds \text{ Lin}} = \frac{W_g \mu_n C_0}{L_{ds}} [(V_{gs} - V_{th}) V_{ds}] \quad (\text{II.11})$$

Pour le régime de saturation ($V_{DS} = V_{GS} - V_{th}$) l'équation (II.12) devient :

$$I_{DS \text{ Sat}} = \frac{W_G \mu_N C_0}{L_{DS}} (V_{GS} - V_{th})^2 \quad (\text{II.12})$$

Avec V_{th} est donné par

$$V_{th} = \frac{\varphi_B}{q} - \frac{\Delta E_c}{q} - \frac{d_{\text{AlGa}} Q_{\text{inter}}}{\epsilon_{\text{AlGa}}} - \frac{q d_{\text{AlGa}} N_{\text{surf}}}{\epsilon_{\text{AlGa}}} \quad (\text{II.13})$$

II.3.2 La transconductance

On définit la transconductance comme étant la pente de la caractéristique définie par l'équation [6]

$$g_m = \left. \frac{dI_{ds}}{dV_{ds}} \right|_{V_{ds}=\text{Const}} \quad (\text{II.15})$$

Pour le régime linéaire la transconductance est égale à :

$$g_{m \text{ Lin}} = \frac{dI_{ds \text{ Lin}}}{dV_{gs}} = \frac{W_g \mu_n C_0}{L_{ds}} V_{ds} \quad (\text{II.16})$$

Pour le régime de saturation la transconductance est égale à :

$$g_{m \text{ Sat}} = \frac{dI_{ds \text{ Sat}}}{dV_{gs}} = \frac{W_g \mu_n C_0}{L_{ds}} (V_{gs} - V_T) \quad (\text{II.17})$$

La figure II.6 présente également la variation de la transconductance en fonction de la tension grille-source V_{GS} d'un transistor HEMT.

II.4. Effets restrictif des performances des transistors HEMTs

Plusieurs phénomènes limitent les performances des transistors HEMTs [6,17,18]

II.4.1. L'effet Kinck

C'est l'augmentation brusque du courant de drain à une certaine tension drain-source faible ce qui engendre une haute conductance du drain et une réduction de g_m , il est généralement dû à l'ionisation par impact dans le canal de conduction, ou aux pièges de surface ou du buffer.

II.4.2. L'effet drain-lag

Le phénomène de drain-lag apparait lors d'un changement brusque de la tension de drain, Il en résulte une chute brutale du courant de drain, l'origine de ce phénomène est due aux électrons-chauds (hot-electron) piégés dans la couche buffer de GaN.

II.4.3. L'effet gate-lag

Egalement appelé courant de collapse ou courant de compression, il apparaît lors d'une variation brusque de la tension appliquée à la grille, il est dû aux pièges localisés en surface du composant en particulier entre la grille et le drain. Il peut être réduit en ajoutant une couche de passivation entre le drain et la source mais ceci peut réduire considérablement les performances du dispositif, on peut également ajouter des plaques de champs (Field plates) cependant ces plaques ont tendance à augmenter la tension de claquage.

II.4.5. L'effet d'auto-échauffement

L'auto-échauffement est dû à la dissipation de puissance par effet joule lors du fonctionnement du transistor, l'augmentation de température du dispositif entraîne une chute de la mobilité des porteurs de charge dans le canal et par la suite une diminution du courant de drain [6, 19].

II.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'hétéro-structure $\text{AlGaIn}/\text{GaInN}$ et formation du puits de potentiel à l'hétérojonction ainsi que le gaz bidimensionnel, la différence des polarisations spontanée et piézoélectrique induit une densité de charge positive remarquable à l'interface de hétéro-structures. Nous avons présentés aussi le HEMT réalisés sur des hétéro-structures à base de GaInN capables de fournir de fortes densités de courant dans le domaine des hyper-fréquences et nous avons défini le courant qui circule dans le transistor ainsi que la transconductance, finalement nous avons cités les effets qui limitent et dégradent les performances des transistors HEMTs.

Références du Chapitre II

- [1] Ricardo. Borges, GaN high electron mobility transistor (HEMT), www.rfdesign.com.
- [2] Rongming Chu, AlGaN/GaN single and double channel high electron mobility transistors hétérostructures, thèse M.Sc., Hong Kong University of science and technology (2004).
- [3] R. L. Anderson «Experiments on Ge-GaAs heterojunctions » Solide State Electronis Vol. 5(1962), pp. 341-351.
- [4] N. Benseddik, thèse de doctorat : "Etude et caractérisation de nano-composants à base de semiconducteur III-N pour des applications en puissance et hyperfréquence", Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbes, 2013
- [5] C. Charbonniaud, " Caractérisation et modélisation électrothermique non linéaire de transistors à effet de champ GaN pour l'amplification de puissance micro-onde", Université de Limoges, 2005.
- [6] N. Benyahia "Caractérisation et simulation des transistors HEMTs de la filière InAlN/GaN " , Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbes, 2017
- [7] D. Bimberg, "Semiconductor Nanostructures", Springer, 2008.
- [8] J. P. Colinge, C.A.Colinge, "Physics of semiconductor devices", Kluwer academic publishers, 2002.
- [9] U. K. Mishra, J. Singh, "Semiconductor Device Physics and Design", Springer, 2008.
- [10] I. Smorchkova, C. R. Elsass, J. P. Ibbetson, and R. Vetury, "Polarization-induced charge and electron mobility in AlGaN/GaN heterostructures grown by plasma-assisted molecular-beam epitaxy, J. Appl. Phys., no. 86, pp. 4520_4526, 1999.
- [11] J.P. Ibbetson, P.T. Fini, K.D. Ness, S.P. DenBaars, J.S. Speck, and U.K. Mishra. Polarization effects, surface states, and the source of electrons in AlGaN/GaN heterostructures grown _field_effect transistors. Appl. Phys. Lett., (77):250_252, 2000.

- [12] L. Lacheze, thèse doctorat, Université Bordeaux 1, n°3975 (2009).
- [13] Rashmi, Abhinav Kranti, S. Haldar, R.S.Gupta, An accurate charge control model for spontaneous and piezoelectric polarization dependent two-dimensional electron gas sheet charge density of lattice-mismatched AlGa_xN/GaN HEMTs, Solid-State Electronics 46 (2002) 621-630.
- [14] E.T.Yu, O.Manasresh, spontaneous and piezoelectric polarization in nitride heterostructures, book chapter for inclusion in III-V Nitride Semiconductors: Application and Devices, university of California at San Diego la jolla, CA 92093-0407.
- [15] O. Ambacher, J. Smart, J. R. Sherly, N.G.Weimann, K.Chu, M. Murphy, W.J. Schaff, et L.F. Eastman, Two dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric Polarization charges in N- and Ga-face AlGa_xN/GaN heterostructures. Journal of applied Physics, (1999).
- [16] Djimli Charaazad mémoire de magister Etude par simulation des phénomènes de polarisations et les contacts ohmiques dans les transistors HEMTS base de GAN, Université de Constantine (2005)
- [17] A. Mimoni, thèse de doctorat: "Estudio y Modelado de la Fiabilidad y Estrés Térmicos en Transistores GaN para Aplicaciones de Microondas ", Université de Cantabria, 2012.
- [18] A. Chini, thèse de doctorat: "Fabrication, characterisation and reliability of AlGa_xN/GaN HEMTs for power microwave applications", University of Padova, 2003.
- [19] G. Callet, thèse de doctorat: "Caractérisation et Modélisation de Transistors HEMT AlGa_xN/GaN et InAlN/GaN pour l'Amplification de puissance en Radio-fréquence", Université de Limoges, 2011.

Chapitre III
Technologie des composants et présentation du
logiciel de simulation

III.1. Introduction

Durant ces dernières années, et à cause des coûts élevés de l'expérimentation, 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 la technologie de fabrication des composés étudiés, puis en passe à définir l'outil de simulation utiliser. Pour moduler nos transistors HEMTs a base des hétéro-structures AlGa_xN/GaN, nous avons utilisés le logiciel SILVACO-TCAD. Le terme TCAD est l'acronyme anglo-saxon de «Technology Computer Aided Design». Cet outil de conception assistée par ordinateur permet dans notre cas, de simuler le comportement électrique du composant électronique en tenant compte de sa structure (dopage, nature des matériaux, géométrie,...). La TCAD permet donc d'aider à la conception des composants et/ou de comprendre les mécanismes physiques qui régissent leur fonctionnement. Nous utilisons 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 (modèles de mobilité, effet des pièges,...) sont résolues en s'appuyant sur les paramètres des matériaux tels que la mobilité, la largeur de bande interdite, les densités d'états, etc...

La précision quantitative des simulations dépend de la finesse du maillage que l'on applique à la structure. Cependant le temps de calcul de ces simulations est proportionnel au nombre de nœuds composant le maillage. Les limites des simulations TCAD sont donc liées au maillage ainsi qu'aux approximations induites par les modèles utilisés. SILVACO propose un large choix de modèles pré-implémentés; malheureusement, ceux-ci ont été développés principalement pour le silicium et l'arséniure de gallium. Il est donc nécessaire d'adapter ces modèles et de les choisir avec justesse pour le nitrure de gallium (GaN) et le nitrure de gallium-aluminium (Al_xGa_(1-x)N) utilisés dans notre dispositif. Comme la

résolution des équations, est effectuée par la méthode de Newton ; la convergence et donc la résolution de nos équations, se complique grandement avec un élargissement du maillage [1].

III.2. Présentation technologique des transistors étudiés

III.2.1. Premier transistor

La figure III.1 présente une vue en coupe u premier type de transistor HEMT a base d' $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}/\text{GaN}$ sur substrat SiC. Ce transistor est réalisé par la technique MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition). Il se compose d'une couche non intentionnellement dopée de GaN d'épaisseur $1.2\ \mu\text{m}$, d'une couche d' $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}$ de 25 nm d'épaisseur et d'une couche de cap layer d'épaisseur 3 nm. Ce transistor à été passivé avec une couche diélectrique Si_3N_4 ($1500\ \text{\AA}$). La largeur de grille W_g de l'ordre de $100\ \mu\text{m}$ avec deux doigts de grille et la longueur de grille $L_g = 70\ \mu\text{m}$.

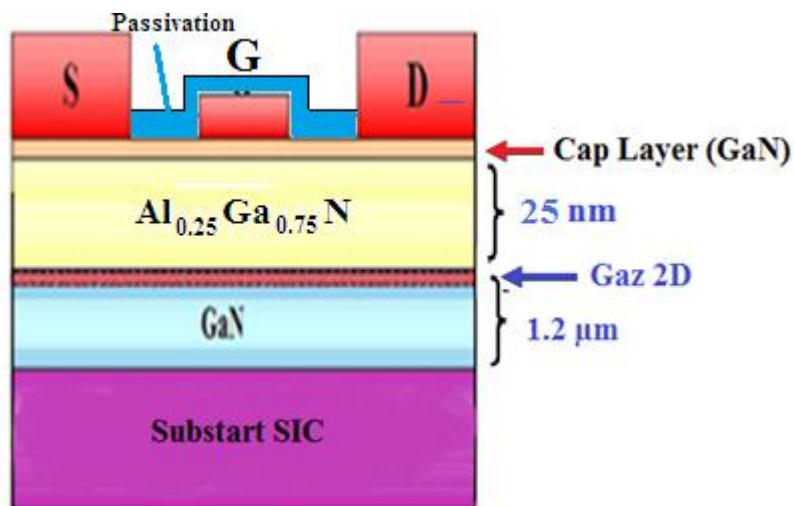


Figure III.1. : Vue en coupe schématique du premier transistor HEMT.

III.2.2. Deuxième transistor

Ce type de transistor est constitué d'une couche $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}$ de 30 nm d'épaisseur et d'une couche non dopée GaN de 3 μm d'épaisseur, la structure épitaxiale étant réalisée par la technique de dépôt MOCVD sur un substrat SiC . Ce transistor est sans cap layer. Les contacts ohmiques de source et de drain sont réalisés à partir de couches composites de type $\text{Ti}/\text{Al}/\text{Ni}/\text{Au}$. La diode Schottky est réalisée par une couche de type Pt/Au (figure III.2.)[5].

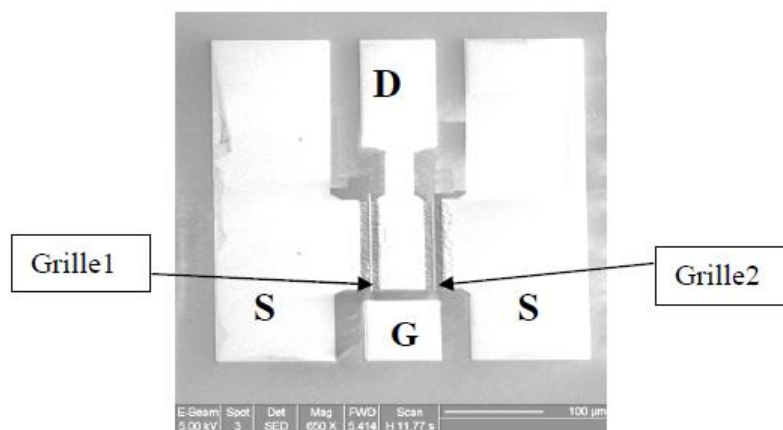


Figure III.2. : Vue de dessus d'un transistor bigrille. G=grille, S=source, D=drain.

Ce transistor est passivé par dépôt d'une couche de diélectrique SiO_2 (100 nm) suivi d'une couche de Si_3N_4 (50 nm). Il possède deux doigts de grille ou bigrilles et présente une longueur de grille ($L_g = 20 \mu\text{m}$) et une largeur de grille ($W_g = 75 \mu\text{m}$), la figure (III.3.), présente une vue transversale du transistor.

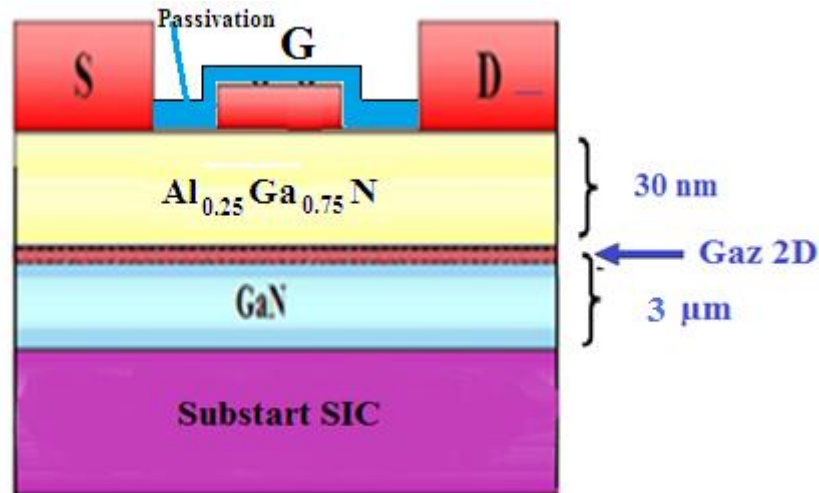


Figure III.3. : Vue en coupe schématique du deuxième transistor HEMT.

III.3. Technologie des composants

La technologie des composants étudiés dans ces travaux de thèse peut être résumée en sept étapes, depuis la réalisation de la plaquette épitaxiale jusqu'à la mise en boîtier des transistors [5].

III.3.1. Nettoyage

Cette méthode utilise les solvants acétone et méthanol, chacun pendant 10 mn, afin de nettoyer la surface des résidus organiques. Ces traitements sont alternés par des bains de $\text{HNO}_3/\text{H}_2\text{O}$ et de $\text{HCl}/\text{H}_2\text{O}$.

III.3.2. Isolation inter-composant

L'isolation de chaque composant est nécessaire afin de délimiter la zone de fonctionnement du transistor. Cette isolation peut s'effectuer de deux manières différentes

- gravure physico-chimique (Mesa)
- implantation ionique (technologie planaire)

III.3.3. Contact ohmique drain-source

Pour avoir de bonnes performances en puissance et en fréquence, il faut réaliser des contacts ohmiques de source et de drain de faible résistivité. Une étape de lithographie est réalisée pour définir ces contacts ohmiques. Les contacts ohmiques sont réalisés par des structures multicouches, utilisant des métaux comme le titane, l'aluminium, l'or, le nickel, le platine, le molybdène ou le tantale. Le dépôt des contacts ohmiques est suivi d'un recuit thermique rapide. La réalisation de composants performants passe donc par l'optimisation de la résistivité des contacts ohmiques. Celle-ci est définie par la résistivité spécifique de contact (ρ_c en $\Omega.cm^2$).

III.3.4. Contact Schottky

Les grilles sont déposées au masqueur électronique avec les longueurs demandées, ou par photolithographie optique. Les contacts Schottky les plus couramment réalisés sont Pt/Au, Ni/Au, Pt/Ti/Au, ou encore Pd/Au [2,3,4,5].

III.3.5. Passivation

La passivation est réalisée à partir d'une couche diélectrique déposée en surface du transistor pour la protection de notre composant des agressions extérieures. En effet, les semi-conducteurs à base de GaN sont des matériaux polaires très sensibles à l'environnement extérieur [5]. L'oxydation naturelle en surface du semi-conducteur à température ambiante et l'absorption d'atomes étrangers entre autres, constituent les principaux défauts de surface à neutraliser. Cette couche doit présenter une densité d'états d'interface la plus petite possible pour limiter les fuites de courant en surface, une

résistivité électrique et un champ de claquage élevé et une permittivité élevée. Les diélectriques les plus utilisés pour les HEMT à base de GaN, sont SiO₂/SiN (1000Å/500Å) ou du SiN standard (1000Å). Le dépôt est réalisé par PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) à une température de 340°C [5,6].

III.3.6. Interconnexions

Les plots de contacts ohmiques sont prolongés et épaissis ainsi que le plot de connexion de grille par un dépôt de Ti/Pt/Au (50nm/50nm/600nm) d'épaisseur totale de 700 nm.

III.3.7. Assemblage

Les étapes finales sont la métallisation de la face arrière des composants, la découpe de la plaquette et le montage des composants en boîtier. Les composants sont brasés à l'or/étain dans le boîtier et le composant est connecté par des fils d'or thermo compressés.

III.4. L'outil de simulation – Silvaco

L'environnement SILVACO est largement exploité, tant dans l'industrie que dans les laboratoires de recherche.

SILVACO (Silicon Valley Corporation) est une société Américaine, « Silvaco International » ayant son siège à Santa Clara en Californie. Elle est un des principaux fournisseurs de chaînes professionnelles de logiciels de simulation par éléments finis et de conception assistée par ordinateur pour les technologies de l'électronique TCAD (Technology Computer Aided Design). Ces outils sont employés par les compagnies de microélectronique dans le domaine de la recherche, du développement et de la conception

des dispositifs. Le développement de SILVACO, les ventes et les équipements de soutien sont stratégiquement localisés dans le monde entier pour soutenir la clientèle.

Le produit initial a été le système d'extraction des paramètres UTMOST (Universal Transistor Modeling SofT ware) qui est devenu un standard industriel pour l'extraction des paramètres, la caractérisation des dispositifs et la modélisation. L'entrée de SILVACO dans la technologie TCAD a eu lieu en 1989, et elle a été basée sur une recherche du Département des Dispositifs Physiques de l'Université de Stanford, ainsi apparaissent dans SILVACO « Athena » comme simulateur des processus et « Atlas » comme simulateur des dispositifs (2D et 3D). A l'aide d'un projet de recherche de l'Université de California, Berkeley, en 1992 SILVACO a conçu son propre logiciel de simulation comportementale SPICE. Ainsi « SmartSpice » devient partie de la chaîne TCAD de SILVACO, il permet des simulations des circuits électroniques avec les modèles physiques des composants créés à l'aide d'Atlas tout en utilisant une logique SPICE. « SmartSpice » écrit en C++ permet facilement l'introduction des modèles nouveaux de simulation et permet une amélioration des algorithmes numériques pour une meilleure convergence [11].

III.5. Présentation du paquet des programmes SILVACO

III. 5.1. Les outils de simulation ATLAS (de la société SILVACO)

Le logiciel de simulation ATLAS est un simulateur de modélisation bidimensionnelle des composants, il permet la résolution des équations différentielles issues de la physique des composants comme celles de la diffusion ou du transport pour des géométries discrètes il est donc capable de prédire les caractéristiques électriques de la plupart des composants semi-conducteurs en régime continu, transitoire ou fréquentiel. En plus du comportement électrique "externe". ATLAS a été conçu de façon à pouvoir utiliser d'autres outils qui facilitent son utilisation, ces outils sont les suivants [7.10.11].

III.5.1.1. DEVEDIT

Environnement où sont dessinés les structures des dispositifs (dimension, dopage, ...) et son maillage, Il peut être employé pour produire une nouvelle maille sur une structure existante, pour modifier un dispositif ou pour créer un dispositif à partir de zéro. Ces dispositifs peuvent alors être employés par les simulateurs 2D et 3D de SILVACO.

III.5.1.2 DECKBUILD

Environnement où est défini le programme de simulation. La structure et son maillage peuvent également être définis dans Deckbuild, C'est un environnement où on peut inviter les simulateurs, à tour de rôle, pour définir le programme de simulation : La structure, le maillage et les calculs électriques nécessaires peuvent également être définis dans DECKBUILD.

III.5.1.3 TONYPLOT

Environnement où sont visualisés les résultats des simulations (structure du composant, distributions de grandeurs diverses dans celui-ci, caractéristiques électriques...). Tonyplot est donc conçu pour visualiser les structures 1D et 2D produits par les simulateurs de SILVACO, Il fournit également beaucoup de fonctions spécifiques de visualisation de TCAD telles que les lignes de la coupe 1D, l'animation des marqueurs pour exposer la variation des vecteurs, intégration des fichiers de données 1D ou les fichiers (.log). Il y a aussi un autre outil similaire à celui-là, sauf qu'il conçu pour visualiser les structures 3D, nommé TonyPlot3D.

III.5.1.4 MASKVIEW

Editeur de layout,

III.5.1.5 OPTIMIZER

Optimise les paramètres de la structure de façon à obtenir en final la valeur du paramètre que nous lui avons définie au préalable. Cet outil permet donc l'optimisation pour la calibration des simulateurs de procès et de dispositifs. Il permet donc d'ajuster automatiquement les paramètres électriques ou les paramètres du procès en jouant sur un ou plusieurs paramètres d'entrée.

III.5.2. Présentation d'Atlas

Le logiciel de simulation Atlas est basé sur la physique des semi-conducteurs, Il prédit le comportement électrique des structures semi-conductrices spécifiées et fournit des aperçus des mécanismes physiques internes associés au fonctionnement des dispositifs.

Atlas est capable de prédire les caractéristiques électriques de la plupart des composants semi-conducteurs en régime continu, transitoire ou fréquentiel. En plus du comportement électrique "externe", il fournit des informations sur la distribution interne de variables telles que les concentrations des porteurs, les lignes de courant, le champ électrique ou le potentiel, etc. Ceci est réalisé en résolvant numériquement l'équation de Poisson et les équations de continuité des électrons et des trous en deux dimensions en un nombre fini de points formant le maillage de la structure défini par l'utilisateur ou par le programme.

ATLAS a été conçu de façon à pouvoir utiliser les autres outils qui facilitent son utilisation tel que : ATHENA, DEVEDIT, TONYPLOT, DECKBUILD. Notons qu'ATHENA, incontournable en conception via SILVACO permet de simuler les processus de fabrication des composants intégrés. C'est un simulateur des procédés de fabrication [7.10].

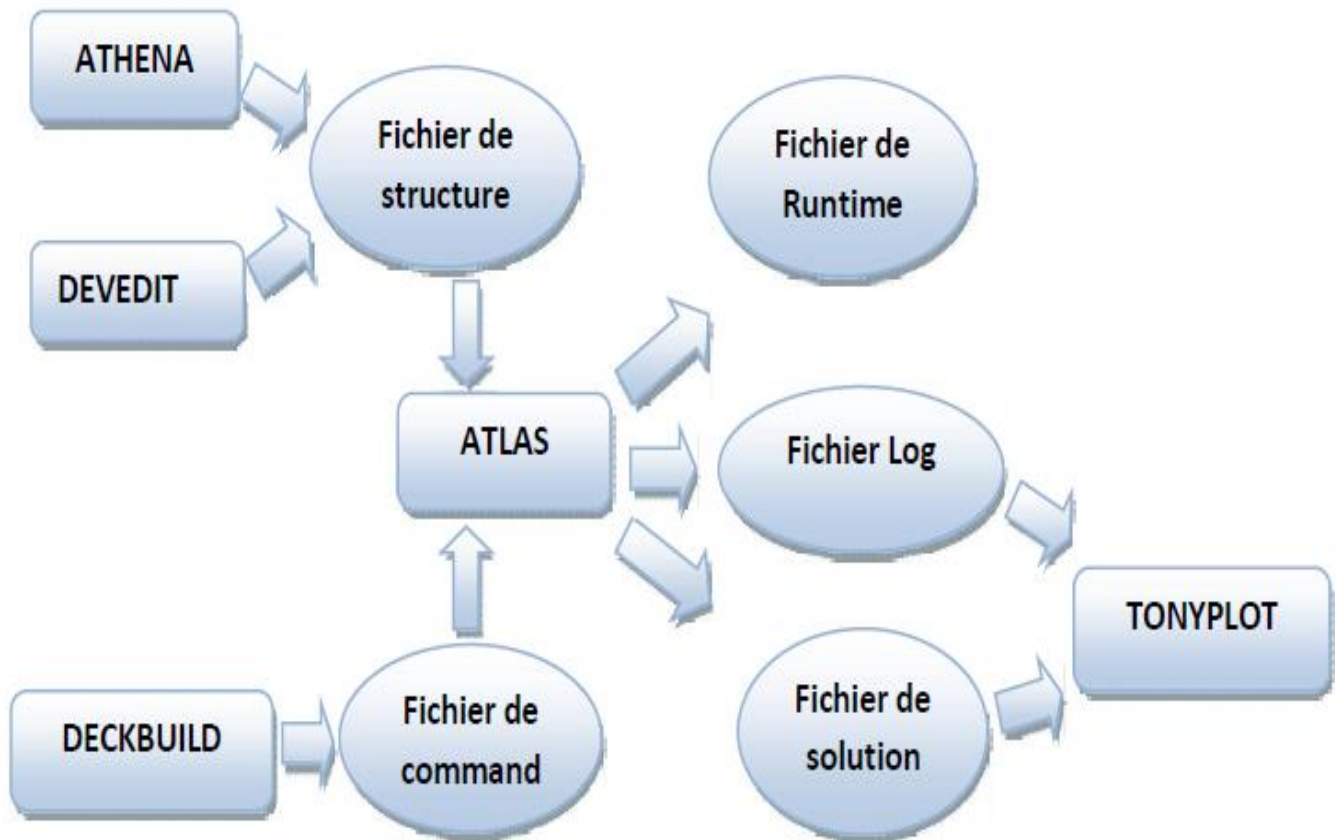


Figure III.4. Entrées et sorties d'Atlas.

Dans le schéma de la figure III.4, nous distinguons les différents types d'informations qui circulent en entrée comme en sortie « d'Atlas ».

La plupart des simulations réalisées par « Atlas » utilisent deux fichiers d'entrée. Le premier fichier est un fichier script contenant les commandes pour qu'Atlas s'exécute et le second fichier est un fichier qui définit la structure qui va être simulée. A la sortie d'Atlas,

nous avons trois types de fichiers. Le premier fichier est la sortie « Runtime » qui donne la progression, les erreurs et les messages d'avertissements pendant la simulation. Le deuxième fichier est le fichier « log » qui stocke toutes les valeurs de tensions et des courants provenant de l'analyse du dispositif simulé. Le troisième fichier de sortie est le fichier de solution, ce fichier stocke les données 2D ou 3D concernant les valeurs des variables solutions dans le dispositif en un point donné. Les deux derniers fichiers sont traités par l'outil de visualisation « TonyPlot ».

Le fonctionnement d'un dispositif à semi-conducteur est modélisé dans « Atlas » par un ensemble couplé d'équations (jusqu'à six équations différentielles partielles EDP). Dans notre modélisation nous avons utilisé trois EDP couplées (l'équation de Poisson et les équations de continuités des trous et des électrons). « Atlas » produit des solutions numériques en calculant les valeurs des inconnues sur un maillage des points dans le dispositif. Une procédure interne de discrétisation convertit le modèle original continu en un système algébrique non linéaire discret qui a un comportement approximativement identique. L'ensemble des EDP, le maillage et la procédure de discrétisation déterminent le problème algébrique discret à résoudre.

Le système algébrique discret est résolu en utilisant une procédure itérative qui raffine des évaluations successives de la solution. L'itération continue jusqu'à ce que les corrections soient assez petites pour satisfaire les critères de convergence, ou jusqu'à ce qu'il soit clair que le procédé n'arrive plus à converger (nombre limite de pas de convergence).. Les deux aspects principaux de la convergence sont, l'obtention d'une solution et la rapidité de convergence. Sous Atlas, en fonction du système des équations EDP à résoudre nous pouvons définir à l'aide d'une commande bien précise la méthode non linéaire de résolution et les paramètres associés tels que les critères d'itération et de convergence. Dans notre cas la méthode de résolution de systèmes non linéaires est l'optimisation de Newton.

III.5.3. Logique de programmation [8]

Nous allons maintenant présenter l'ordre des commandes propres à la logique de programmation d'Atlas. Ainsi il existe cinq groupes de commandes, ces groupes doivent être organisés correctement comme suit.

Groupes	Commandes
Spécification de la structure	MESH. REGION. ELECTRODE. DOPING.
<i>Spécification des modèles de couches.</i>	MATERIAL. MODEL. CONTACT. INTERFACE
<i>Sélection de la méthode numérique.</i>	METHOD.
Spécification des solutions.	LOG. SOLVE. SAVE. LOAD.
Analyse des résultats.	EXTRACT. TONYPLOT.

Tableau III.1. Ordre des groupes des commandes dans un programme Atlas

Les commandes fondamentales sont :

- **MESH** : cette commande produit un maillage ou lit un maillage qui a été défini auparavant. L'élément de maille utilisé est le triangle.

- **REGION** : indique l'endroit des matériaux dans une maille précédemment définie. Chaque triangle doit être défini comme matériel.
- **ELECTRODE** : indique l'endroit et les noms des électrodes dans une maille précédemment définie.
- **DOPING** : indique analytiquement des profils de dopage ou prend de tels profils déjà prédéfinis dans les fichiers dédiés.
- **MATERIAL** : associe des paramètres physiques aux matériaux dans la maille. (Il faut faire attention parce que le logiciel a des paramètres de matériau définis par défaut pour les semi-conducteurs standard)
- **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 semi-conducteur/isolant. Tous les paramètres s'appliquent seulement aux noeuds de frontière exceptés la où ils sont déjà indiqués.
- **METHOD** : place les méthodes numériques à employer pour résoudre les équations et les paramètres liés à ces algorithmes.
- **LOG** : permet à toutes les caractéristiques finales de simulation d'être sauvées dans un fichier (ouvre un fichier de type log (log en minuscule veut dire le type de fichier, LOG en

majuscule veut dire la commande dans le programme)). N'importe quel type de donnée, qu'elle soit courant continue, transitoire ou courant alternative, générée par la commande SOLVE et sauvée après la commande LOG. Si dans le programme il y a plusieurs commandes LOG, chaque fois le fichier log qui a été ouvert avant est fermé et un nouveau fichier log est ouvert.

- **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.
- **SAVE** : sauve toutes les informations d'un point nœud du maillage dans un fichier de sortie (les fichiers de sortie sont de type structure). Les informations sauvées correspondent à un état électrique bien précis.
- **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.

Les principaux avantages de ce simulateur de composants est tout d'abord la possibilité offerte de visualisation de phénomènes physiques difficilement accessible et donc observable.

III.6. Modélisation 2D du transistor HEMT

Nous avons réalisé des simulations numériques du transistor HEMT en 2D sous l'outil Atlas. Notre simulation numérique est consistée tout d'abord à concevoir la structure, puis à faire une résolution numérique. La conception de la structure comprend la définition du maillage, la définition des différentes régions du dispositif, des électrodes et des dopages. La résolution numérique comprend la détermination des choix des modèles physiques et des méthodes mathématique utilisés par le simulateur pour trouver la solution Ce qui est bien illustré sur la figure qui suit.

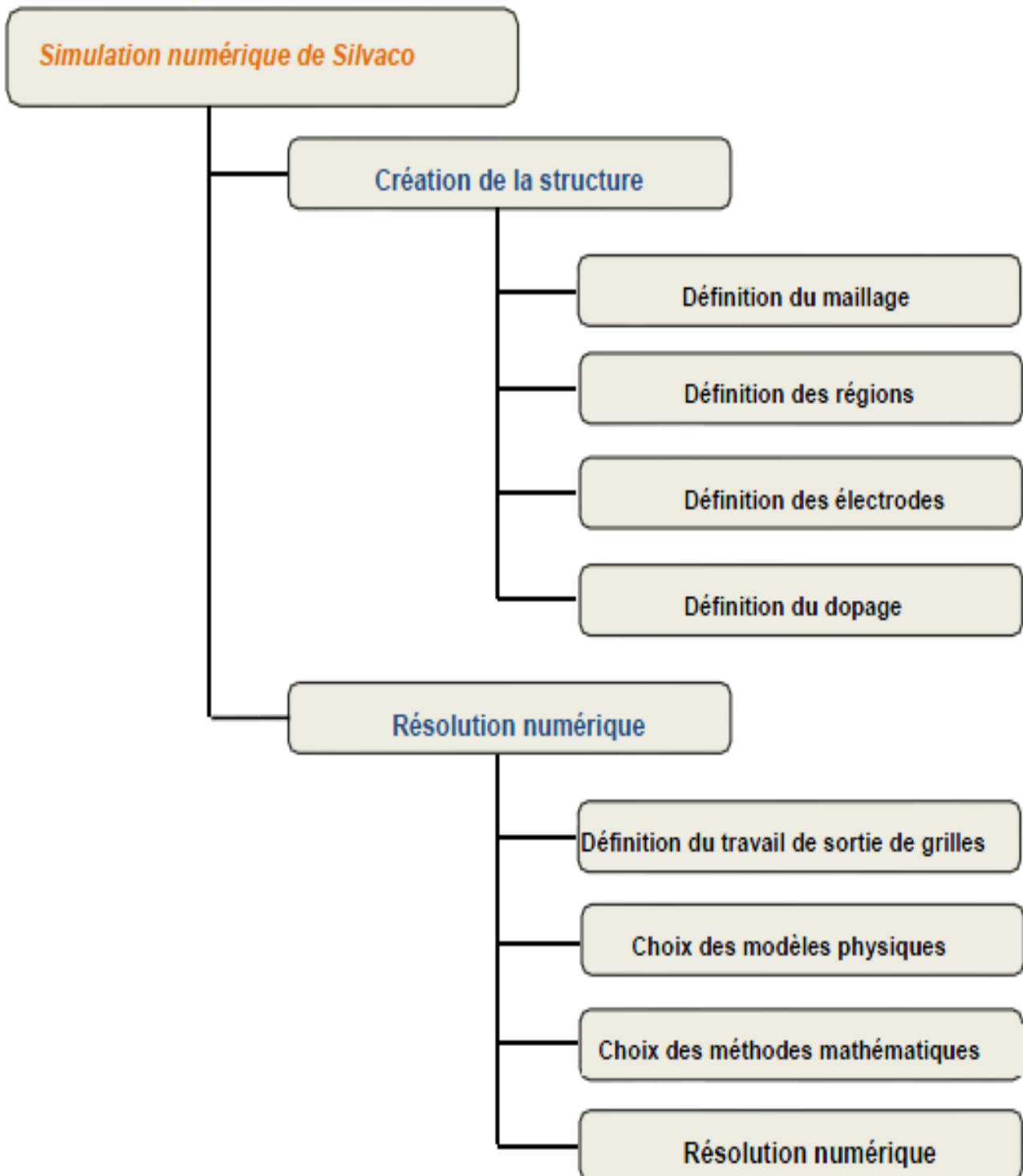


Figure III.5 : Diagramme de la simulation numérique via Silvaco[9]

III.7 conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la technologie des composants et le module de simulation ATLAS, l'environnement où est défini le programme de simulation (DECKBUILD), et l'outil de visualisation (TONYPLOT) du logiciel TCAD-SILVACO. Puis nous avons décrit les étapes de simulation réalisée par ce logiciel, en présentant le modèle physique utilisé pour cette simulation.

Références du Chapitre III

- [1] M. Abdelmoumen, mémoire de magister « Etude et modélisation d'un transistor HEMT AlGaN/GaN » Université Abou-Bakr Belkaïd-Tlemcen 2012.
- [2] D. Qiao, L. Jia, L. S. Yu, P. M. Asbeck, S. S. Lau, S.-H. Lim, Z. Liliental-Weber, T. E. Haynes and J. B. Barner. Journal of Applied Physics, 89, 5543 (2001).
- [3] N. E. Monroy, F. Calle, R. Ranchal, T. Palacios, M. Verdu, F.J. Sanchez, M.T. Montojo, M. Eickhoff, F. Omnès, Z. Bougrioura, and I. Moerman. Semicond. Sci. Technol.1,47(2002).
- [4] A. M. Malik, thèse, Université de Stuttgart, Allemagne, 2003.
- [5] N. Benseddik, thèse de doctorat : "Etude et caractérisation de nano-composants à base de semiconducteur III-N pour des applications en puissance et hyperfréquence", Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbes, 2013
- [6] M. H. Wong "GaN materials and applications" School of Electrical and Computer Engineering, Cornell University, 2004.
- [7] Atlas User's Manual, Silvaco International, 2010.
- [8] Ràzvan Negru, "Conception et modélisation de pixels de photodétection", thèse de doctorat, 2008.
- [9] Tang Mingchum, "Etudes Et Modélisation Compacte Du Transistor Finfet", thèse de doctorat, université de Stasbourg, 2009.
- [10] Silvaco International, http://www.silvaco.com/products/device_simulation/atlas.html.
- [11] Y. Benhamida "Etude des caractéristiques physiques et électriques d'un MOSFET nanométrique" mémoire de magister, Université Abou-Bakr Belkaïd-Tlemcen , 2012

Chapitre IV
Résultats et discussions

IV.1. Introduction

Les hétéro-structures $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}$ et GaN ont attirées une large attention pour leur haute puissance et leur capacité à haute fréquence même dans des conditions difficiles (de températures ou tension drain élevé). Récemment les $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}/\text{GaN}$ sur des substrats semi-isolantes comme le SiC ont été rapportés avec une haute efficacité de puissance et une puissance élevée à la bande K [1]. Donc ces propriétés physiques permettent de réaliser des transistors **HEMTs** présentant des densités de courant de drain supérieures à 1,4 (A/mm), des fréquences de coupure élevées autour de 100 GHz et des tensions drain-source de claquage de l'ordre de 100V [2.3].

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 [4].

Dans ce chapitre, nous présentons, dans un premier temps, la mesure des caractéristiques électriques telles que : I_{ds} (V_{ds}), I_{ds} (V_{gs}), la transconductance et la capacité pour deux types de transistor avec des longueurs de grilles différentes. Puis en passe à présentés les résultats simulés dans l'environnement Atlas. Les effets dus aux propriétés du matériau comme la charge d'interface (ns), le dopage de la couche $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}$ vont être étudié ainsi que d'autres paramétrés. En plus, sur le point de vue technologique, on va voir l'influence des dimensions de la grille sur les caractéristiques du transistor **HEMT**.

IV.2. Spécification des structures étudiées

Comme nous l’avons vu précédemment, Silvaco-Atlas reçoit les fichiers d’entrée à travers « DeckBuild ». Le code écrit dans le fichier d’entrée appel « Atlas » pour fonctionner avec la commande suivante:-Go Atlas Suite à cette commande, le fichier d’entrée doit suivre un modèle. Les groupes de commandes sont indiqués sur la figure (IV.1). La spécification de la structure est effectuée en définissant le maillage, les régions, les électrodes et le niveau de dopage.

<i>Group</i>		<i>Statements</i>
1. Structure Specification	—————	MESH REGION ELECTRODE DOPING
2. Material Models Specification	—————	MATERIAL MODELS CONTACT INTERFACE
3. Numerical Method Selection	—————	METHOD
4. Solution Specification	—————	LOG SOLVE LOAD SAVE
5. Results Analysis	—————	EXTRACT TONYPLOT

Figure IV.1 : Groupes de commandes [5,6].

IV.2.1. Le maillage

Le maillage joue un rôle important pour l'obtention de bonnes 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. Dans notre étude, le maillage utilisé est à deux dimensions, par conséquent, seuls les paramètres x et y sont définis. Le format général de définition de maillage est:

MESH X.LOCATION = <VALEUR> ESPACEMENT = <VALEUR>

MESH Y.LOCATION = <VALEUR> ESPACEMENT = <VALEUR>

La figure (IV.2) montre le maillage d'une structure HEMT.

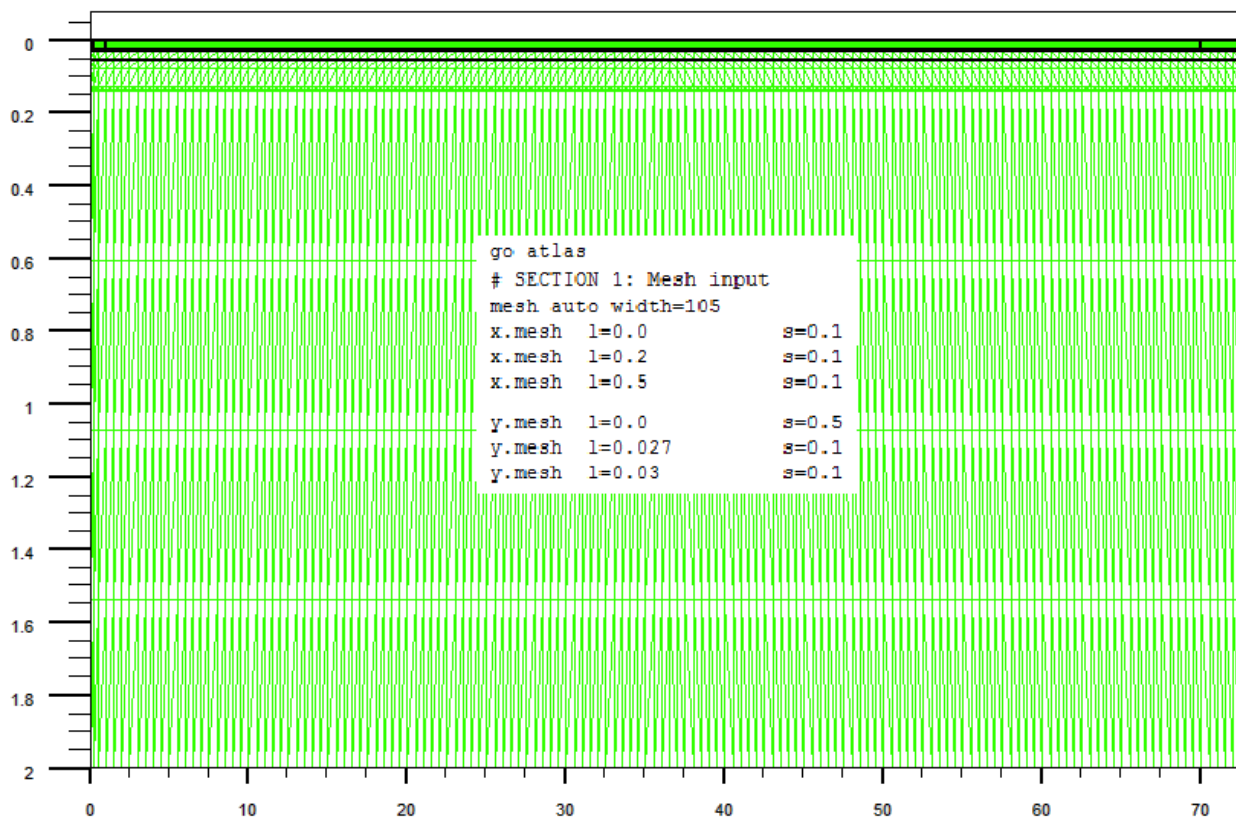


Figure IV.2 : Maillage à deux dimensions (x,y).

IV.2.2. Régions

Après avoir défini le maillage, il est nécessaire de définir les régions dont le format de définition des régions est le suivant:

REGION nombre = < integer > < material_type > / < position des paramètres >

La figure (IV.3), montre la façon de définition des matériaux pour chaque région. Notons que le code de couleur indique la matière. Les régions ont des lignes verticales et horizontales pour marquer leurs limites.

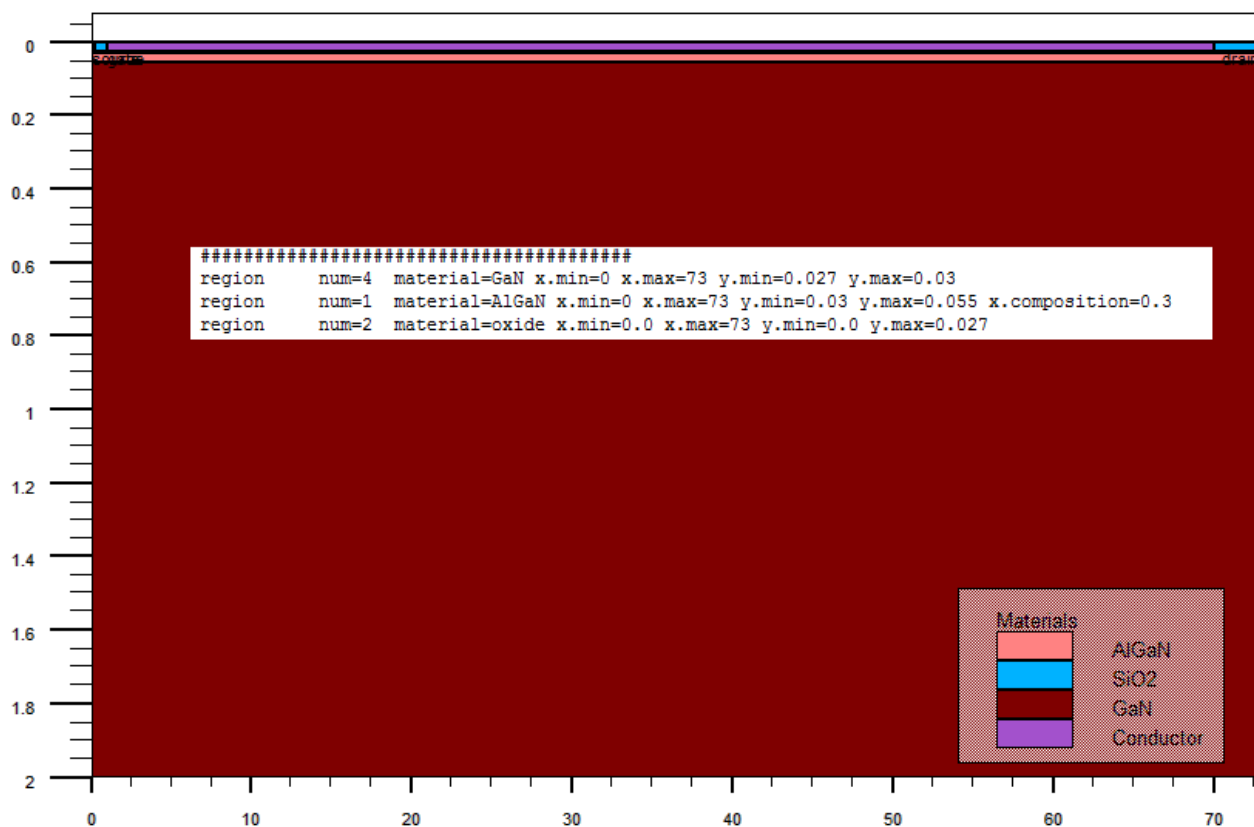


Figure IV.3 : Définition des régions.

IV.2.3. Electrodes

« Atlas » a une limite de 50 électrodes qui peuvent être définies. Le format de définition d'électrodes est comme suit:

ELECTRODE NAME = < nom de l'électrode > < position des paramètres >

La figure (IV.4) montre la position de la grille, le drain et la source.

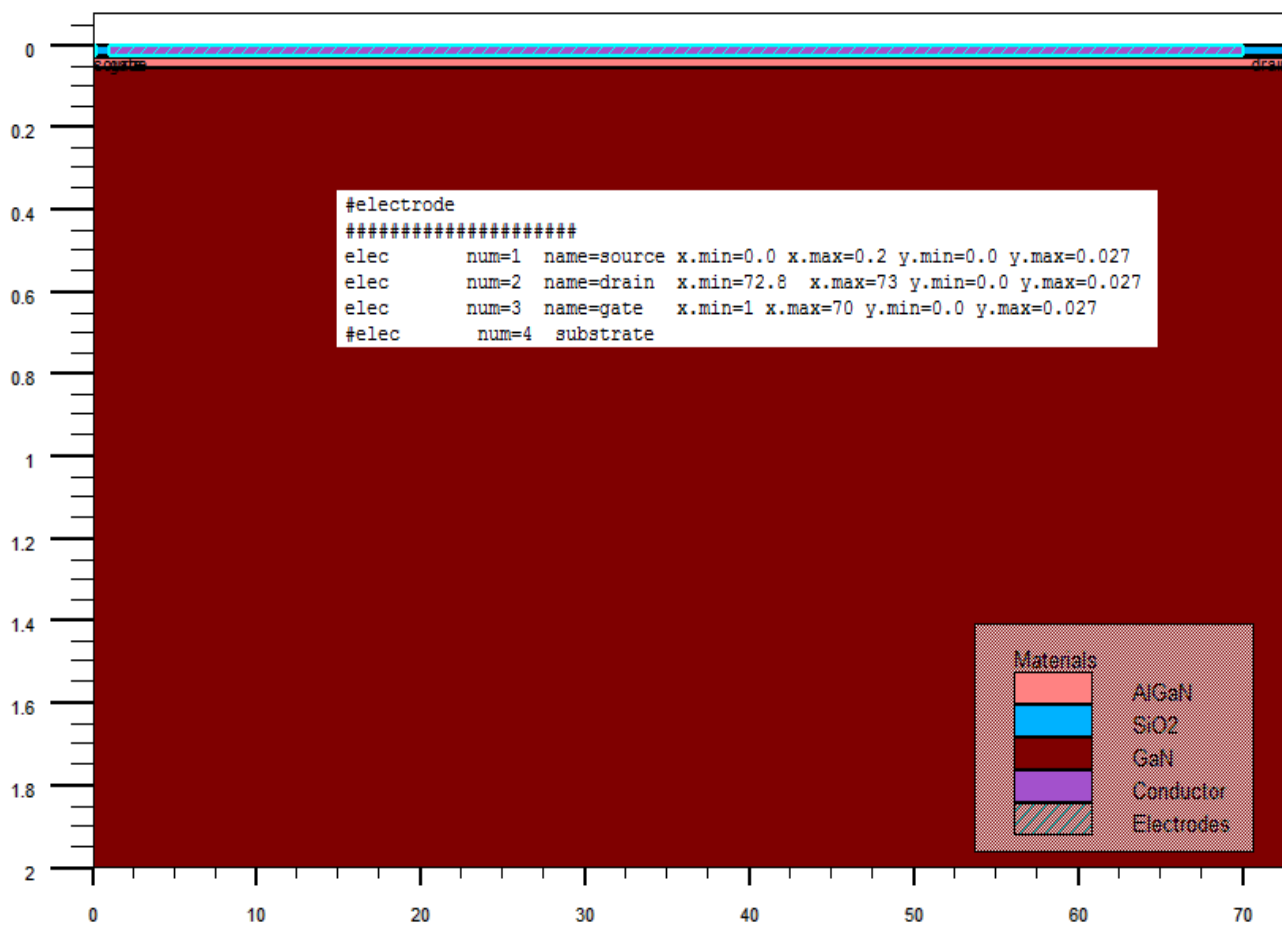


Figure IV.4 : Définition des électrodes.

IV.2.4. Dopage

Le dernier aspect de la spécification de la structure qui doit être défini est le dopage. Le format de la déclaration de dopage dans « Atlas » se présente comme suit:

DOPONG < type de distribution > < type de dopant > / < position des paramètres >

Le dopage peut être de type N ou P et le type de distribution peut être uniforme ou gaussienne.

IV.2.5. Spécification du modèle et du matériau

Après la définition de la structure, il faut spécifier les modèles des matériaux, elle se compose de quatre parties : matériau, modèles, contact et interface.

IV.2.6. Matériau

Le format de la déclaration du matériau est le suivant :

MATERIAL <localisation > <définition du matériau >

Exemple :

```
material material=AlGaN mun=825 mup=153 affinity=3.14 nc300=2.07e18 eg300=4.049
```

IV.2.7. Modèles

Les modèles physiques sont classés en cinq catégories: Mobilités des porteurs de charges, mécanismes de génération-recombinaison, les statistiques de transport, l'ionisation par impact et l'effet tunnel. La syntaxe de la déclaration du modèle est la suivante:

MODEL<paramètres générales > / < paramètres du modèle >

Le choix du modèle dépend des matériaux choisis pour la simulation.

IV.2.8. Contact

Le contact détermine les attributions des électrodes. La syntaxe du contact est la suivante :

Contact nombre = < n > | NOM = <ename> | ALL

Cette expression montre la déclaration « contact », Exemple :

contact num=3 name=gate workfun=5.2

IV.2.9. Interface

Les limites du semi-conducteur ou de l'isolant sont déterminées dans la déclaration d'interface. La syntaxe est la suivante:

INTERFACE [<parameters>]

Exemple :

interface charge=2.5e12 x.min=0 x.max=73 y.min=0.055 y.max=0.056 s.s

IV.2.10. Méthodes numérique à sélectionner

En fin la sélection de la méthode numérique de résolution doit être indiquée [6].

Trois méthodes numériques sont utilisées dans ATLAS -SILVACO

- 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.

IV.3. Unités des courants dans les fichiers journaux (file log)

Généralement, les unités de courant sont écrites dans le fichier journal (file log). En TONYPLOT, il s'agit d'Ampères par micron. C'est parce qu'ATLAS est un simulateur bidimensionnel. Il définit la troisième dimension (ou direction Z) à un micron. Ainsi, si nous avons une largeur 20 microns, nous devons multiplier le courant dans le fichier journal par 20. Des règles similaires s'appliquent à la capacité et à la conductance produites par les simulations AC. Ceux-ci sont généralement en **1/(ohms.microns)** et **Farads/micron** respectivement [6].

IV.4 Résultats et interprétations

IV.4.1. Caractérisations expérimentales

Dans cette partie nous présentons les caractéristiques électriques expérimentales pour les deux types de transistor étudiés. Ces mesures sont réalisées à température ambiante, à l'aide d'un banc de mesure **HP mètre semiconducteur Parameter Analyser 4155B** qui permet des saisies automatiques de la tension et du courant, Cependant la caractéristique capacité C_{gs} en fonction de V_{gs} est mesuré grâce à un **HP mètre LF Impedance Analyser 4192A** [3].

IV.4.2. Premier transistor

La définition de ce transistor est donné dans le chapitre précédent, la figure **IV.5** présente une vue transversale du transistor.

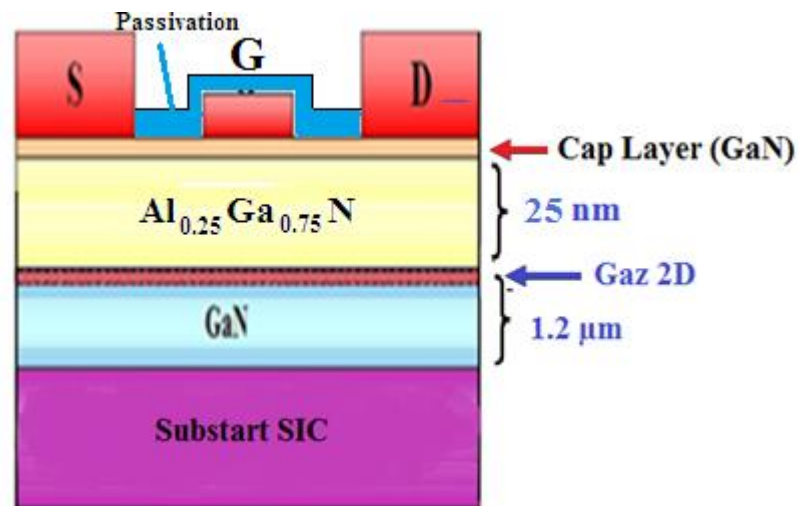


Figure IV.5 : Vue transversale du premier transistor.

IV.4.2.1. Caractéristiques statiques

IV.4.2.1.a Caractéristique de sortie

La figure **IV.6** présente la caractéristique de sorties $I_{ds} = f(V_{ds})$, la tension V_{gs} vraie de -1.75 V jusqu'à 0V avec un pas de 0.25 V.

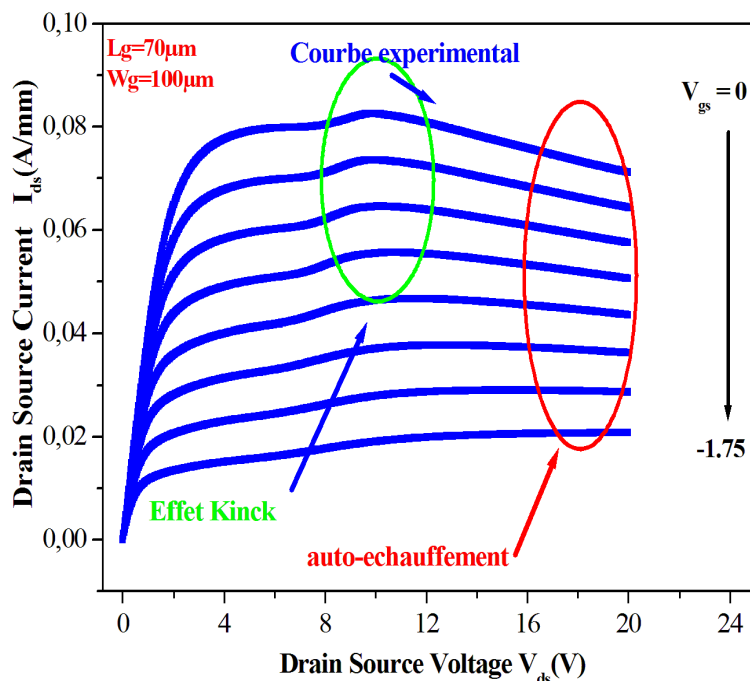


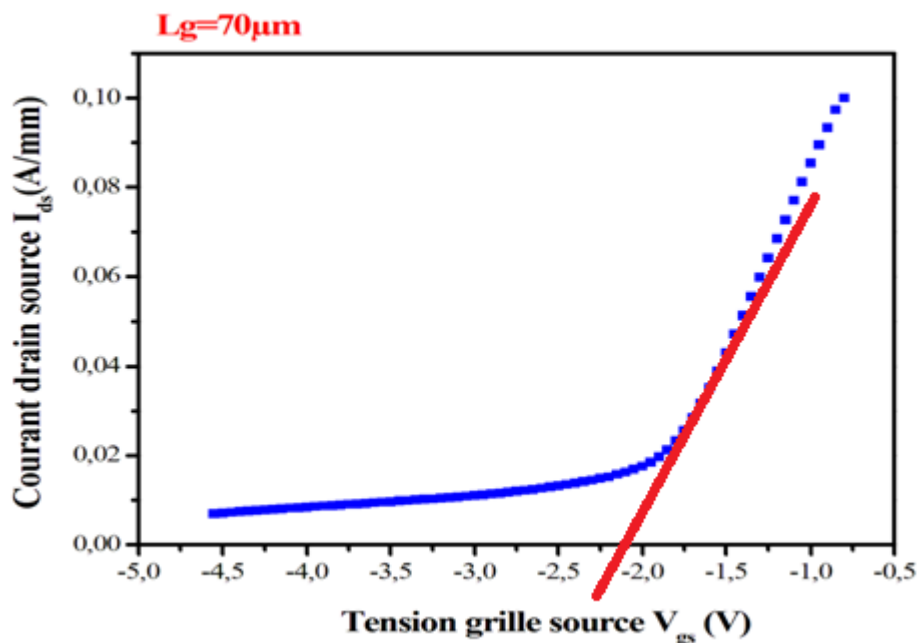
Figure IV.6 : Caractéristique de sorties $I_{ds}(V_{ds})$ du premier transistor HEMT

On remarque bien les deux modes classiques de fonctionnement, régime linéaire pour les faibles valeurs de la tension drain-source V_{ds} et le régime de saturation pour les fortes valeurs, on voit aussi un effondrement qui apparaît pour les grandes valeurs de V_{ds} , dû à l'auto échauffement qui est critère majeur limitant les performances du transistor HEMT sous polarisation électrique. En effet, les densités de charges étant très élevées au-delà d'une dizaine de volts en V_{ds} , la caractéristique $I_{ds}(V_{ds})$ en régime continu, présente une décroissance due à la dégradation des propriétés de transport (la résistance carré augmente et la mobilité chute drastiquement) suite à une élévation de la température dans le canal. Cette élévation en température se réalise en fonctionnement transistor, à la sortie de la grille côté drain et s'accompagne par conséquent souvent d'un claquage de grille [7], notons que Le choix du substrat et de la couche de passivation sont alors fondamentaux pour dissiper au mieux cette chaleur [8]. Un autre effet est observé c'est l'effet Kinck, c'est est une déformation spécifique de la caractéristique $I_{ds}(V_{ds})$, il se traduit par une saturation

anormale de I_{ds} à faible V_{ds} . Cet effet est lié aux trous créés lors de l'ionisation des atomes [9,10], qui s'accumulent dans le canal, qui implique une génération d'électrons pour assurer la neutralité dans le canal, qui viennent s'ajouter au courant drain. L'accumulation des trous côté source vient ouvrir le canal. C'est ce qui explique l'augmentation du courant à faible V_{ds} [10,11]. L'accumulation de ces trous se fait essentiellement dans la zone désertée côté source, ce qui lie fortement la résistance d'accès de source à cet effet [7,12].

IV.4.2.1.b. Caractéristique de transfert

La figure ci-dessous présente la caractéristique courant drain - tension grille $I_{ds}(V_{gs})$ avec $V_{ds}=7V$.



Figures IV.7 : Caractéristiques courant-tension $I_{ds}(V_{gs})$ avec $V_{ds}=7V$ pour le premier transistor

On remarque que La tension de seuil est de l'ordre de -2.1V

IV.4.2.1.c. Transconductance

Le générateur de courant $I_{ds} = g_m V_{gs} e^{-j\omega t}$ représente l'effet fondamental du transistor. Il constitue une source de courant contrôlée en tension, modélisant le phénomène de gain au sein du composant. Le retard t imposé à la source traduit le temps de transit des électrons dans le canal. La transconductance g_m , est une caractéristique fondamentale d'un transistor, représente la variation du courant dans le canal en fonction de la polarisation de grille, à tension drain-source constante. Les HEMTs se distinguent de tous les autres transistors à effets de champ par leur transconductance élevée. Elle est définie comme suit :

$$g_m = \left. \frac{\partial I_{ds}}{\partial V_{gs}} \right|_{V_{ds} = \text{const}} \quad (\text{IV.1})$$

La figure suivante montre la variation de la transconductance en fonction de la tension V_{gs} à une tension $V_{ds}=7V$

On remarque que la transconductance est maximale pour $V_{gs}=-1.2V$, puis elle diminue avec l'augmentation de la polarisation V_{gs}

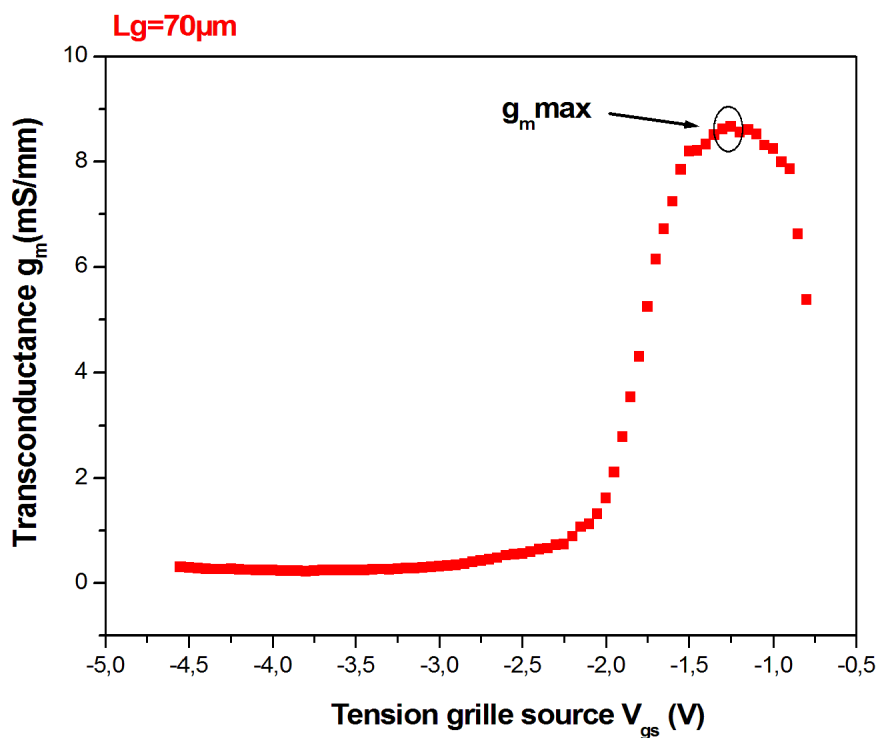


Figure IV.8 la variation de la transconductance à $V_{ds}=7V$.

IV.4.3. Deuxième transistor

La figure IV.9 présente une vue transversale du deuxième transistor.

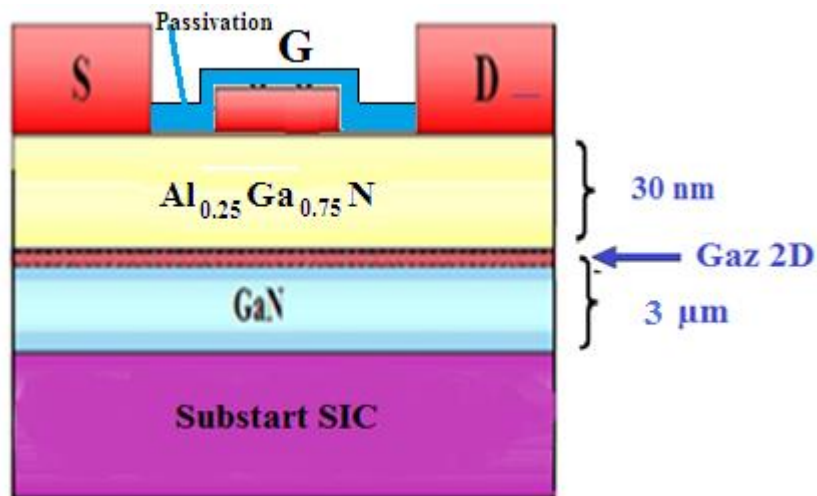


Figure IV.9 : Vue transversale du deuxième transistor.

IV.4.3.1. Caractéristiques statiques

IV.4.3.1.a. Caractéristique de sortie

La figure IV.10 présente la caractéristique de sorties $I_{ds} = f(V_{ds})$, la tension V_{gs} varie de -7 V jusqu'à 0 V avec un pas de 1 V .

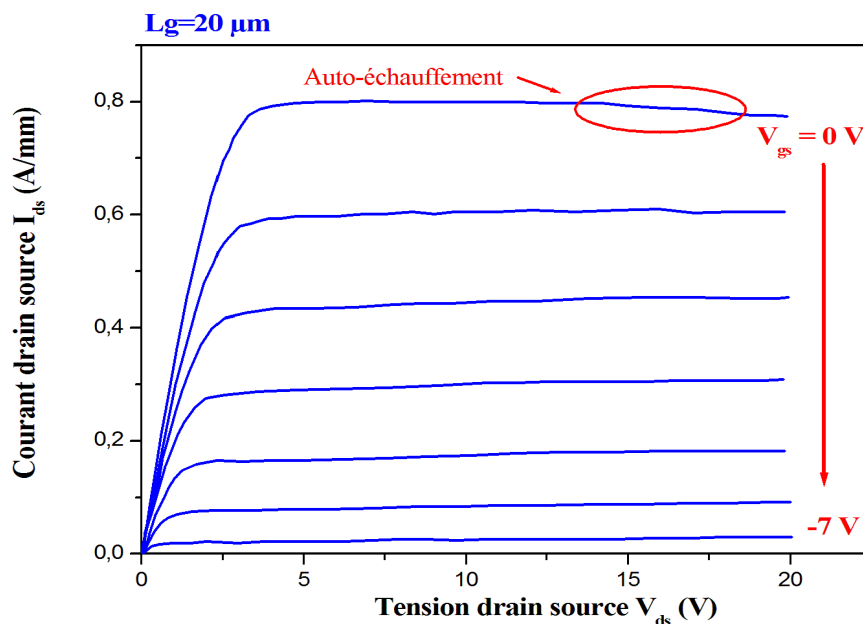
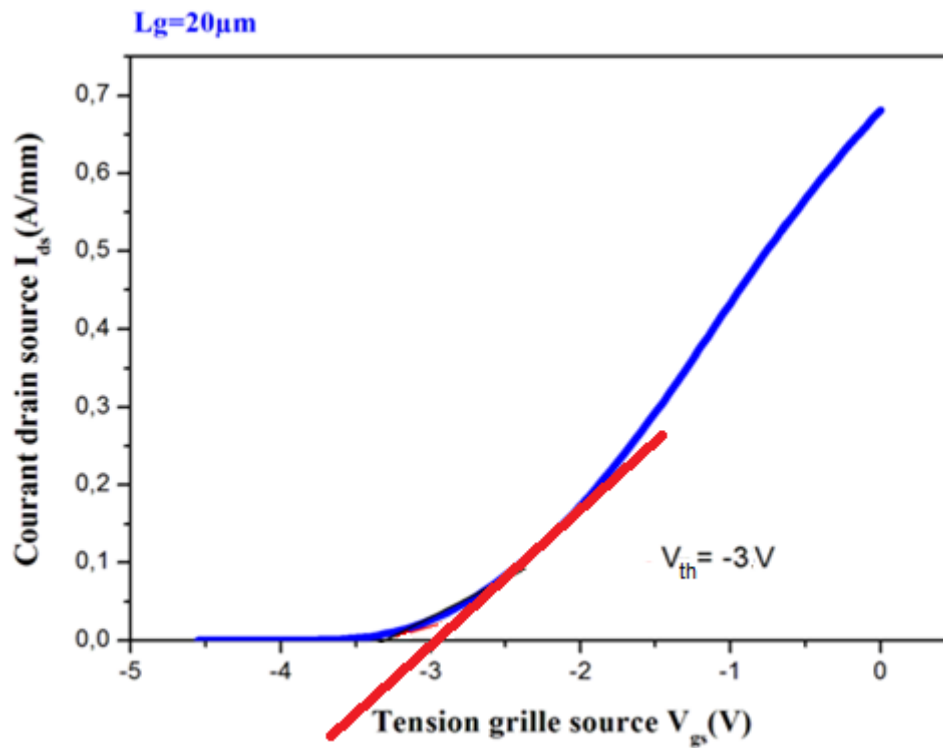


Figure IV.10 : Caractéristique de sorties $I_{ds}(V_{ds})$ du deuxième transistor HEMT.

On remarque les deux modes classiques de fonctionnement, régime linéaire pour les faibles valeurs de V_{ds} et le régime de saturation pour les fortes valeurs, on voit aussi un léger effondrement qui apparaît pour les grandes valeurs de V_{ds} , dû à l'auto échauffement. On remarque aussi que ce transistor présente un courant maximum I_{dss} de l'ordre de 750 mA/mm , cette forte valeur est dû à l'absence de la couche dopée en surface (cap layer)[3].

IV.4.2.1.b. Caractéristique de transfert

La figure IV.11 présente la caractéristique $I_{ds}(V_{gs})$ avec $V_{ds}=2.5V$.



Figures IV.11 : Caractéristiques courant-tension $I_{ds}(V_{gs})$ avec $V_{ds}=2.5V$ du deuxième transistor

On remarque que la tension de seuil est de l'ordre de -3 V

IV.4.3.1.c. Transconductance

La figure suivante présente la transconductance mesuré à $V_{ds}=2.5V$, ca valeur est maximale pour une tension $V_{gs}=-1 V$ puis elle diminue et cela est dû à la diminution de la mobilité à cause de l'augmentation de la densité de charges dans la barrière [3 ,19]

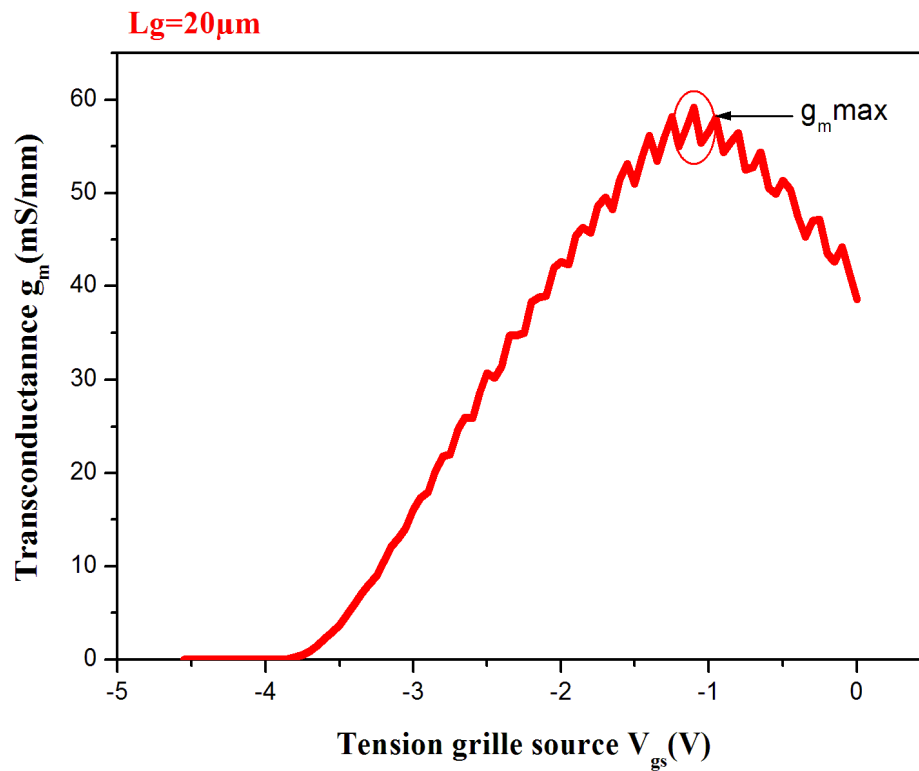


Figure IV.12 La transconductance Caractéristiques en fonction de V_{gs} a $V_{ds}=2.5V$ du deuxième transistor

IV.4.3.1.d. Courant de la grille

La figure IV.13 montre La variation du courant de la grille en fonction de la tension de la grille I_g (V_{gs}) en direct et en inverse.

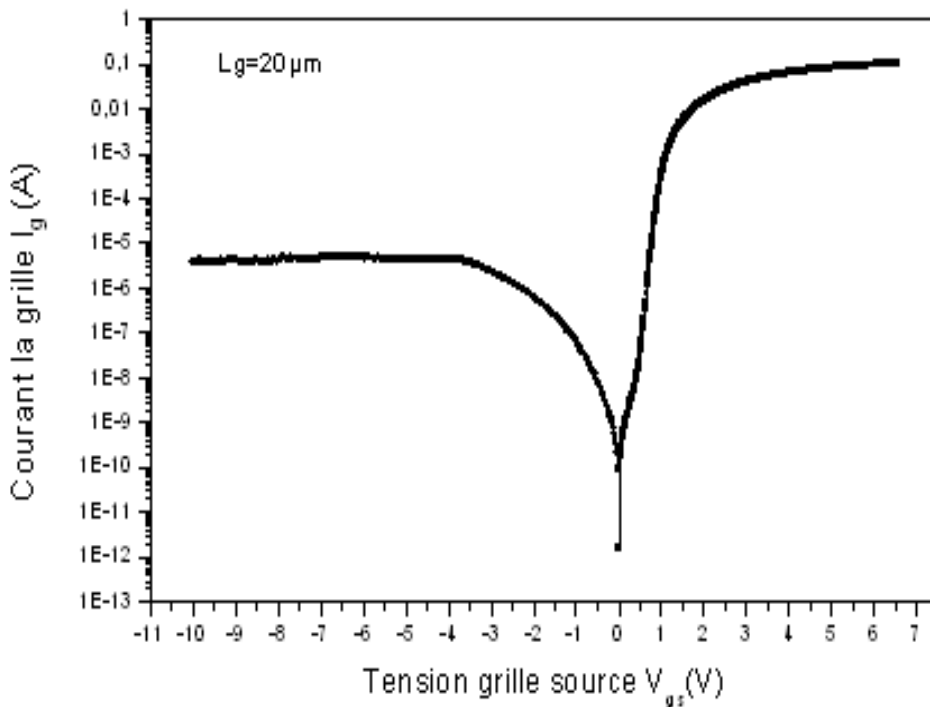


Figure IV.13: Courant de la grille I_g (V_{gs}) en direct et en inverse.

En polarisation direct on voit que le courant varie d’une façon exponentiellement et donc les structures présentent un contact Schottky. Pour la polarisation inverse On remarque que le transistor a un courant de fuite I_g de l’ordre de $5 \mu\text{A}$ pour une tension inférieure a -4 V. Les mécanismes physiques responsables de ce courant de fuite sont l’effet Tunnel [21,22] ou l’effet des pièges engendrés par des dislocations [3 ,20]

IV.4.3.2. Caractéristiques capacité- tension

La figure IV.14 présente la caractéristique $C(V)$ du contact Schottky. L'analyse de cette caractéristique permet de déterminer la distribution de la densité n_s des électrons dans le gaz 2D.

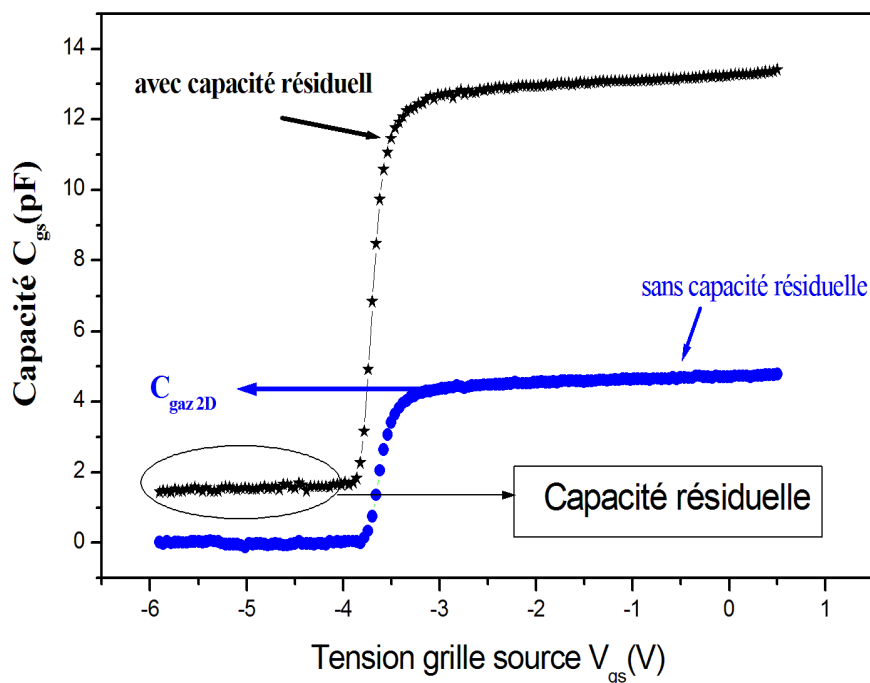


Figure IV.14: La caractéristique capacité grille source $C_{gs}(V)$ mesurée.

On remarque une chute importante de la capacité à la tension de pincement (c'est la tension V_{gs} qui annule le courant I_{ds}), Ceci est dû à la désertion du gaz 2D d'électrons situé sous la grille [3,19,20]

IV.4.4. Résultats de Simulation

Pour simuler le fonctionnement du transistor on utilise le simulateur Atlas T-cad défini précédemment. Les paramètres de simulation pris en compte pour nos transistors étudiés sont présentés dans le tableau IV.1 [15,23].

	Al_{2.5}Ga_{0.75}N	GaN
Mobilité des électrons (μ_n)	825cm ² V ⁻¹ s ⁻¹	900 cm ² V ⁻¹ s ⁻¹
Mobilité des trous (μ_p)	153cm ² V ⁻¹ s ⁻¹	200 cm ² V ⁻¹ s ⁻¹
Affinité	3.14 eV	3.4eV
Energie de la bande de conduction (N _c)	2.07x10 ¹⁸ cm ⁻³	2.07x10 ¹⁸ cm ⁻³
Energie de la bande de valance (N _v)	1.16x10 ¹⁹ cm ⁻³	1.16x10 ¹⁹ cm ⁻³
Gap d'énergie (E _g)	4.049 eV	3.39 eV
Permittivité	10.32	10.32

Tableau IV.1 paramètres physiques de simulation.

Nous avons simulés les caractéristiques $I_{ds}(V_{ds})$, $I_{ds}(V_{gs})$ ainsi que la transconductance pour différentes épaisseurs de la couche **Al_xGa_(1-x)N** (d), différentes largeurs de grille (W_g), et différents longueurs source-drain (L_{sd}). Sachant que le courant I_{ds} est lié à la tension de drain par l'expression suivante [13]:

$$I_d = \frac{W_g \mu_n C_0}{L_{ds}} \left[(V_{gs} - V_{th}) V_{ds} - \frac{V_{ds}^2}{2} \right] \quad (\text{IV.2})$$

Où W_g est la largeur de grille; μ_n la mobilité des électrons et C_0 est la capacité surfacique, et L_{ds} est la distance entre la source et le drain.

C_0 et V_{th} sont données par les formules suivantes :

$$C_0 = q \frac{2 \varepsilon_s m_e}{2 d q^2 m_e + \varepsilon_s \pi \hbar^2} \quad (\text{IV.3})$$

Où m_e : la masse effective des électrons, ε et d sont respectivement la permittivité et l'épaisseur de la couche $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}$.

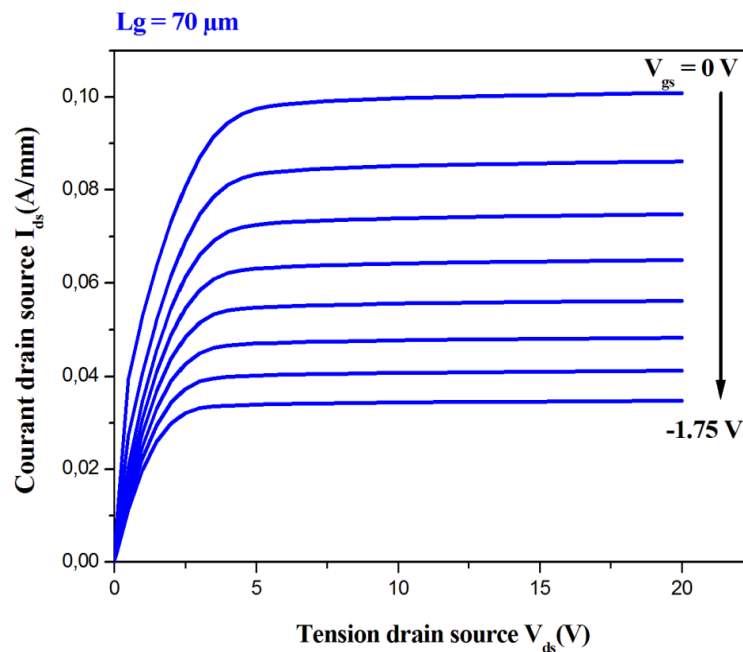
$$V_{th} = \frac{\Phi_B}{q} - \frac{\Delta E_C}{q} - \frac{d_{\text{ALGaN}} Q_{\text{inter}}}{\varepsilon_{\text{ALGaN}}} - \frac{q d_{\text{ALGaN}} N_{\text{surf}}}{\varepsilon_{\text{ALGaN}}} \quad (\text{IV.4})$$

IV.4.4.1. Comparaison entre les caractéristiques électriques mesurés et simulés

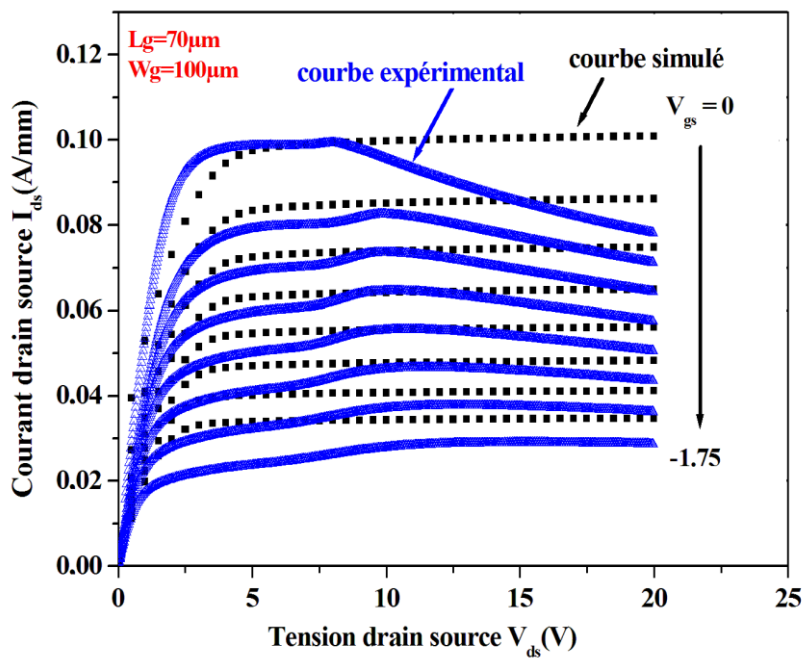
IV.4.4.1.a. Caractéristiques de sortie $I_{ds}(V_{ds})$

➤ Premier transistor

La figure ci-dessous présente la caractéristique de sortie simulée (figure IV.15.a), ainsi une comparaison entre la caractéristique de sortie simulée et mesurée (figure IV.15.b), la tension V_{gs} vraie de -1.75 V jusqu'à 0V avec un pas de 0.25 V



(a)



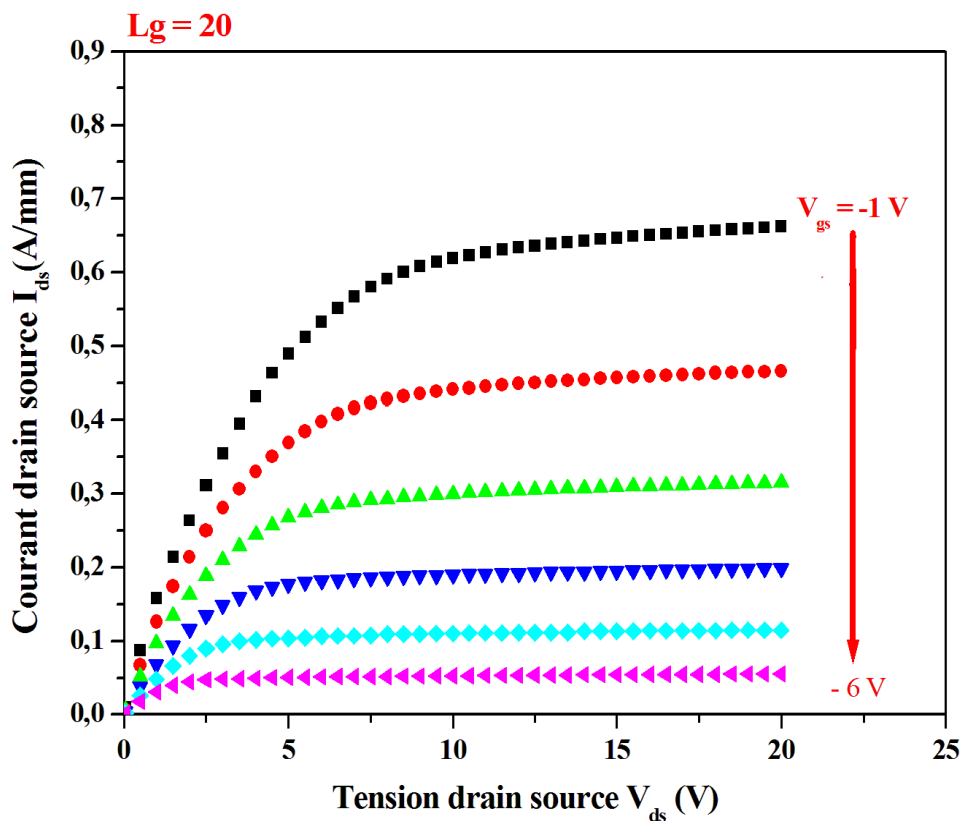
(b)

Figure IV.15 : (a) la caractéristique de sortie $I_{ds}(V_{ds})$ simulée et (b) la caractéristique $I_{ds}(V_{ds})$ expérimentale et simulée.

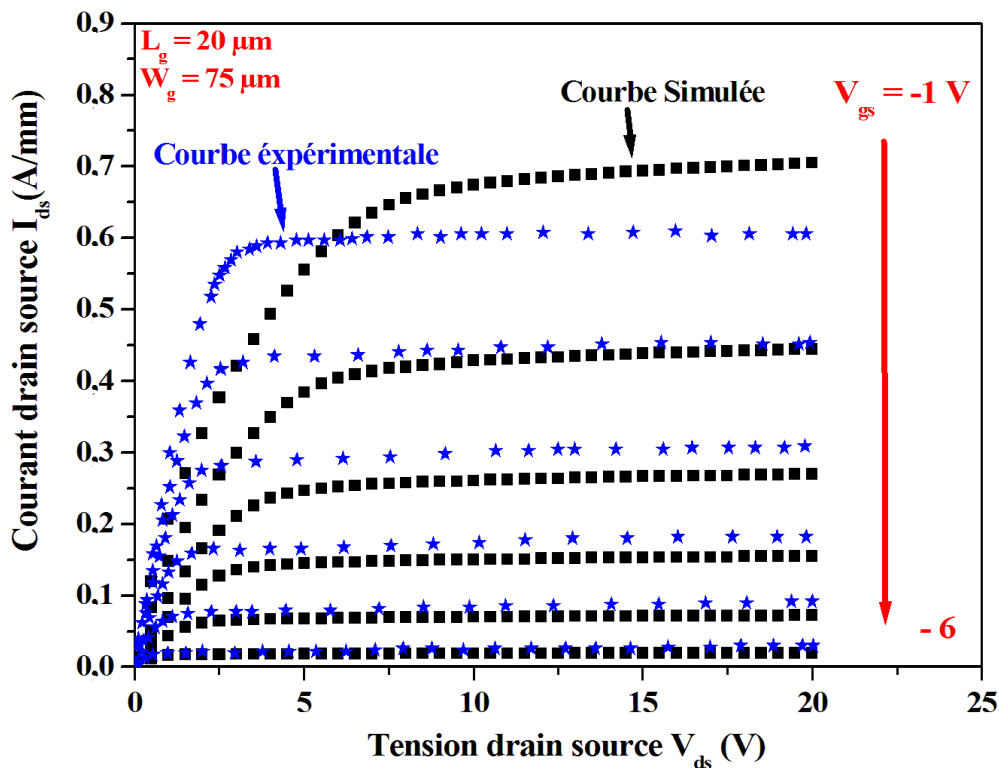
Nous constatons pour la caractéristique I_{ds} (V_{ds}) un décalage de la tension de coude entre la courbe expérimentale et la courbe théorique cela est dû à la résistance carré [16]. Pour le régime de saturation on remarque que le courant est légèrement plus élevé avec la présence de l'effondrement sur la caractéristique mesuré, cela est dû à l'auto-échauffement de la structure (mauvaise dissipation thermique). Cette diminution peut également provenir de la présence de pièges qui capturent des électrons [16-17].

➤ Deuxième transistor

La figure ci-dessous présente la caractéristique de sortie simulée (figure IV.16.a), ainsi une comparaison entre la caractéristique de sortie simulée et mesurée ((figure IV.16.b), la tension V_{gs} vraie de -6V jusqu'à -1V avec un pas de 1 V



(a)



(b)

Figure IV.16 : (a) la caractéristique de sortie $I_{ds}(V_{ds})$ simulée et (b) la caractéristique $I_{ds}(V_{ds})$ expérimentale et simulée.

On a ici aussi la même remarque pour la tension de coude entre la courbe expérimentale et la courbe théorique. Pour le régime de saturation on remarque que le courant est plus élevé avec la présence de l'effondrement sur la caractéristique mesuré pour la tension de grille $V_{gs} = -1 \text{ V}$, cela est dû à l'auto-échauffement de la structure, par contre on remarque pour les tensions de grille les plus basses une convergence entre les deux courbes.

IV.4.4.1.b. Caractéristiques de transfert $I_{ds}-V_{gs}$

Les caractéristiques $I_{ds}(V_{gs})$ mesurée et simulée pour les deux types de transistor sont représentées sur les figures IV.17 et IV.18.

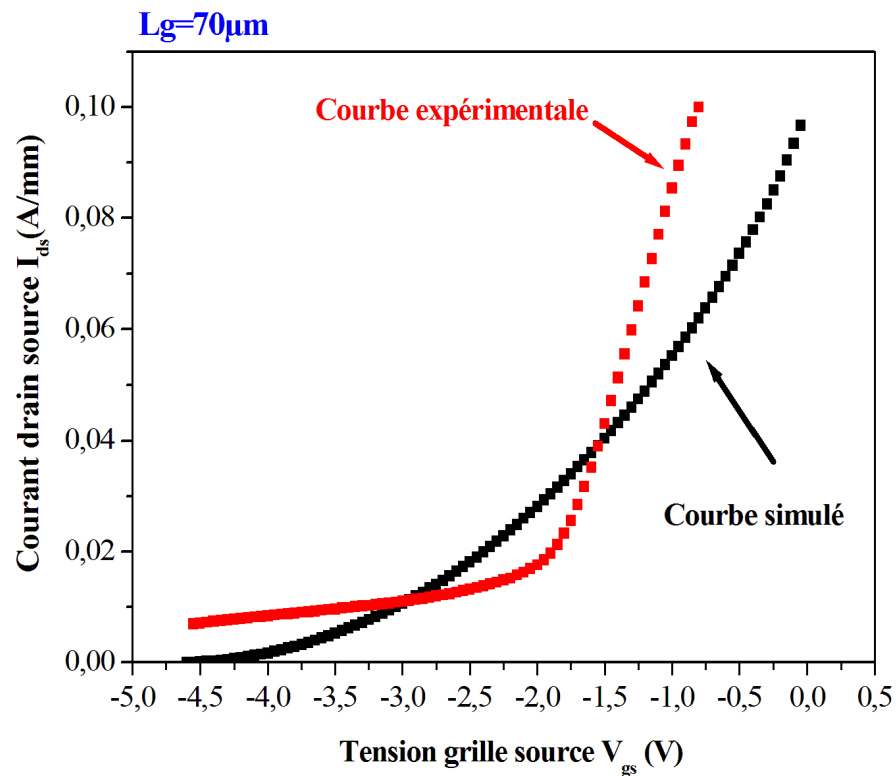


Figure IV.17 : La caractéristique $I_{ds}(V_{gs})$ expérimental et simulée avec $V_{ds} = 7$ V, pour le premier transistor.

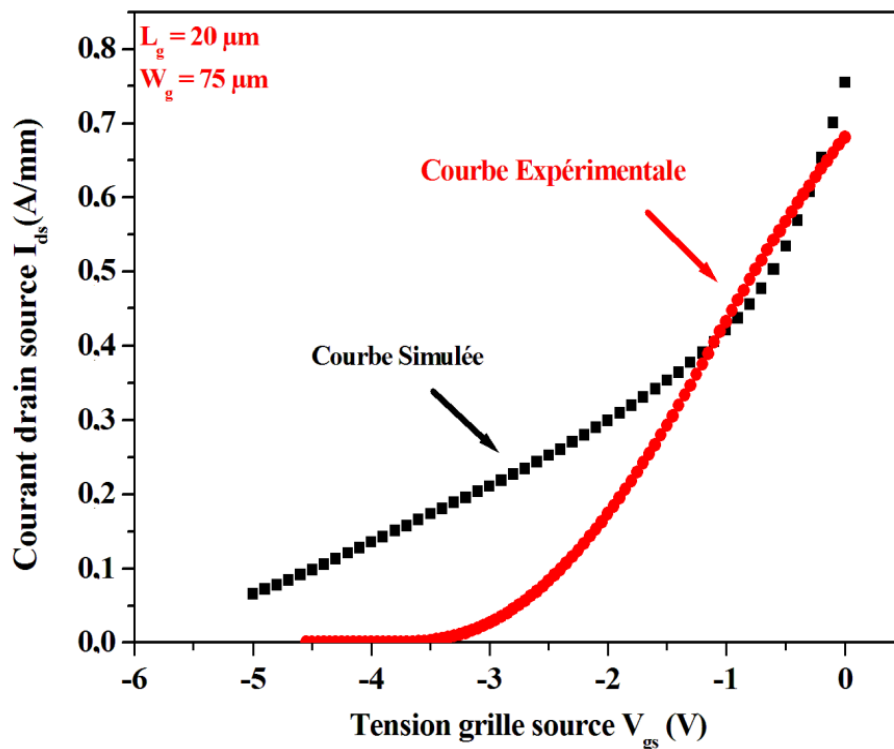


Figure IV.18 : La caractéristique $I_{ds}(V_{gs})$ expérimental et simulée avec $V_{ds} = 2.5\text{V}$, pour le deuxième transistor.

On remarque un décalage entre les deux courbes du probablement à la présence de pièges ainsi que le courant de fuite assisté par ces pièges. On remarque aussi une différence entre la tension de seuil expérimentale et simulée.

IV.4.4.2. Influence de l'épaisseur de la couche d' $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}$

Nous avons simulés La variation du courant de drain I_{ds} en fonction de la tension de drain V_{ds} (la tension Grille-Source nulle), le courant I_{ds} en fonction de la tension V_{gs} et la transconductance pour différentes épaisseurs de la couche AlGa_N (d), Avec les mêmes paramètres donnés précédemment, le taux d'Aluminium égal à 0.25, Les résultats obtenus sont représentés sur les figures (IV.19, IV.20, IV.21).

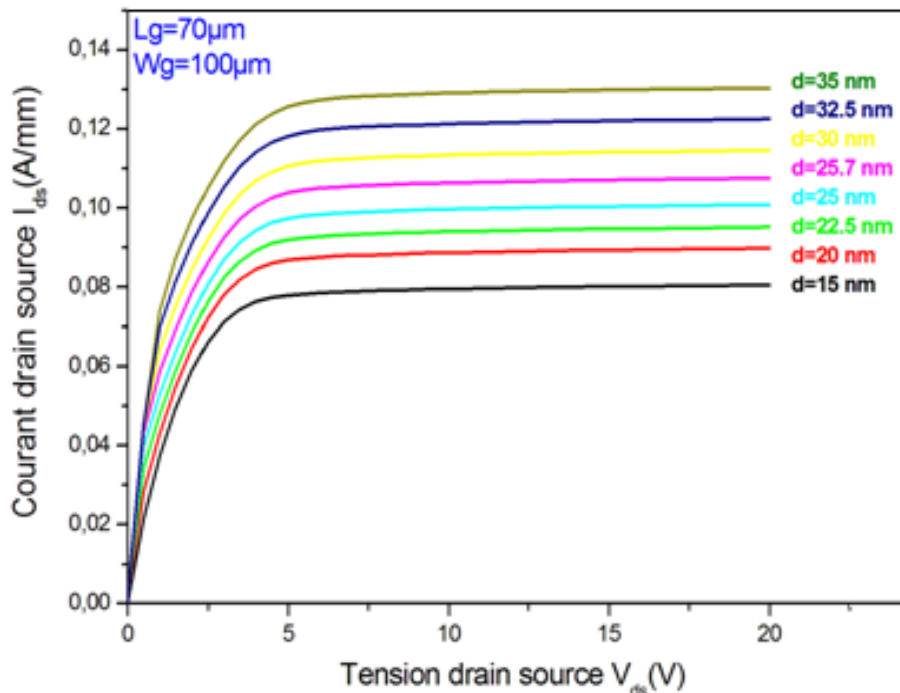


Figure IV.19 : La variation du courant de drain I_{ds} en fonction de la tension de drain V_{ds} pour différentes épaisseurs de la couche AlGaN (d)

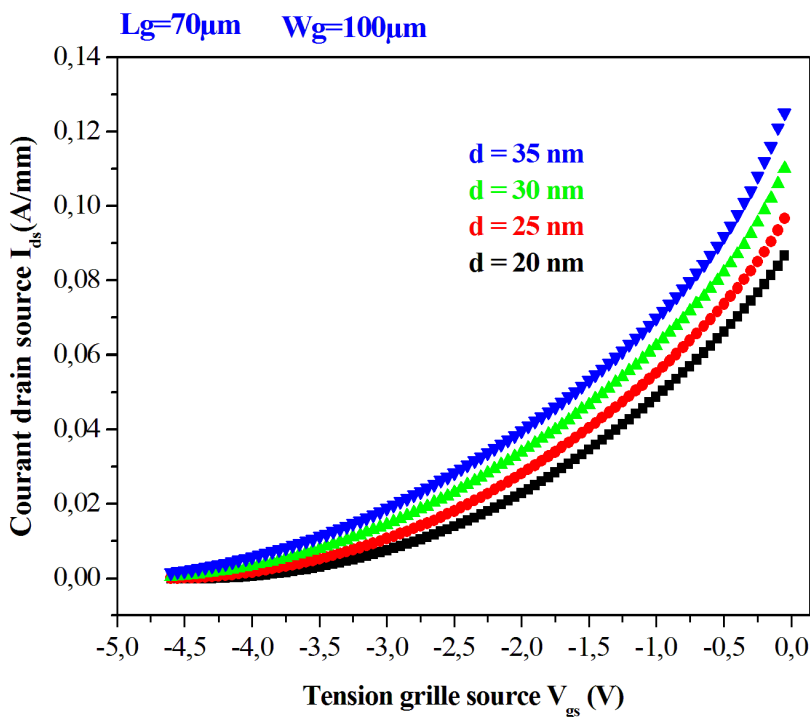


Figure IV.20 : La variation du courant de drain I_{ds} en fonction de la tension de grille V_{gs} pour différentes épaisseurs de la couche AlGaN (d)

On Remarque que plus on augmente l'épaisseur de la couche AlGaN plus le courant Ids augmente, puisque l'augmentation de l'épaisseur de la couche donneuse AlGaN conduit a l'augmentation de la concentration du gaz bidimensionnelle.

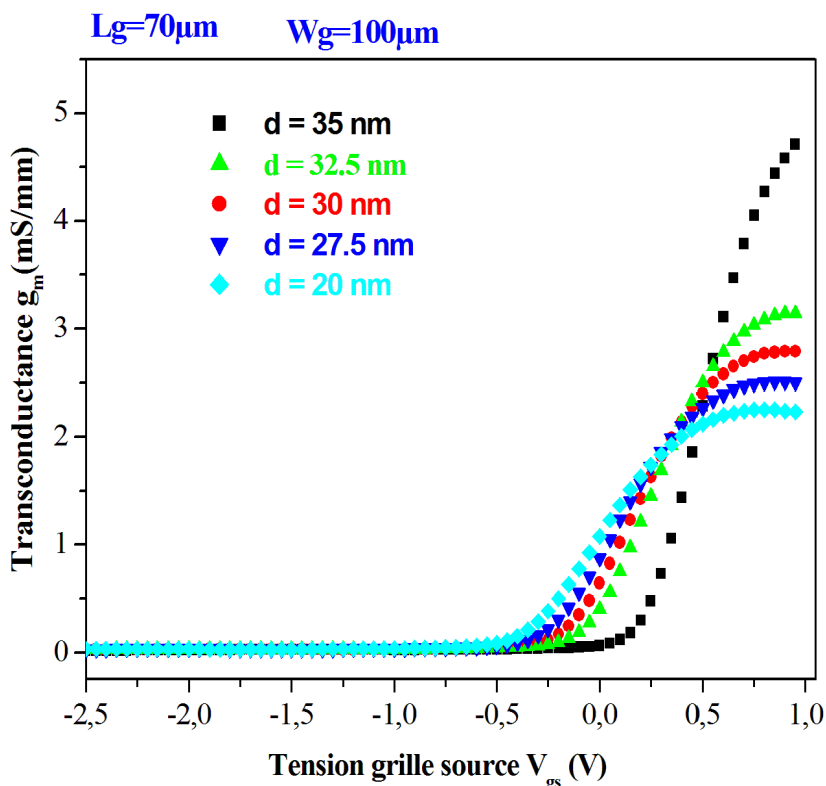


Figure IV.21 : Variation de la transconductance g_m en fonction de V_{gs} pour différentes épaisseurs de la couche AlGaN (d)

On observe une diminution légère dans la transconductance maximale. Donc pour améliorer la transconductance du composant, il est nécessaire de réduire l'épaisseur de la barrière, cela est dû à la variation de la position relative de l'énergie de niveau des états de surface et les bandes d'énergie du AlGaN et puisque la couche AlGaN constitue la couche barrière de la structure HEMT étudié [18].

IV.4.4.3. Influence de la largeur de grille

Le courant de drain est également influencé par la largeur de grille, les figures (IV.22, IV.23, IV.24) montrent les variations du courant $I_{ds}(V_{ds})$, $I_{ds}(V_{gs})$ et la transconductance en fonction de V_{gs} pour différentes largeurs de grille (W_g).

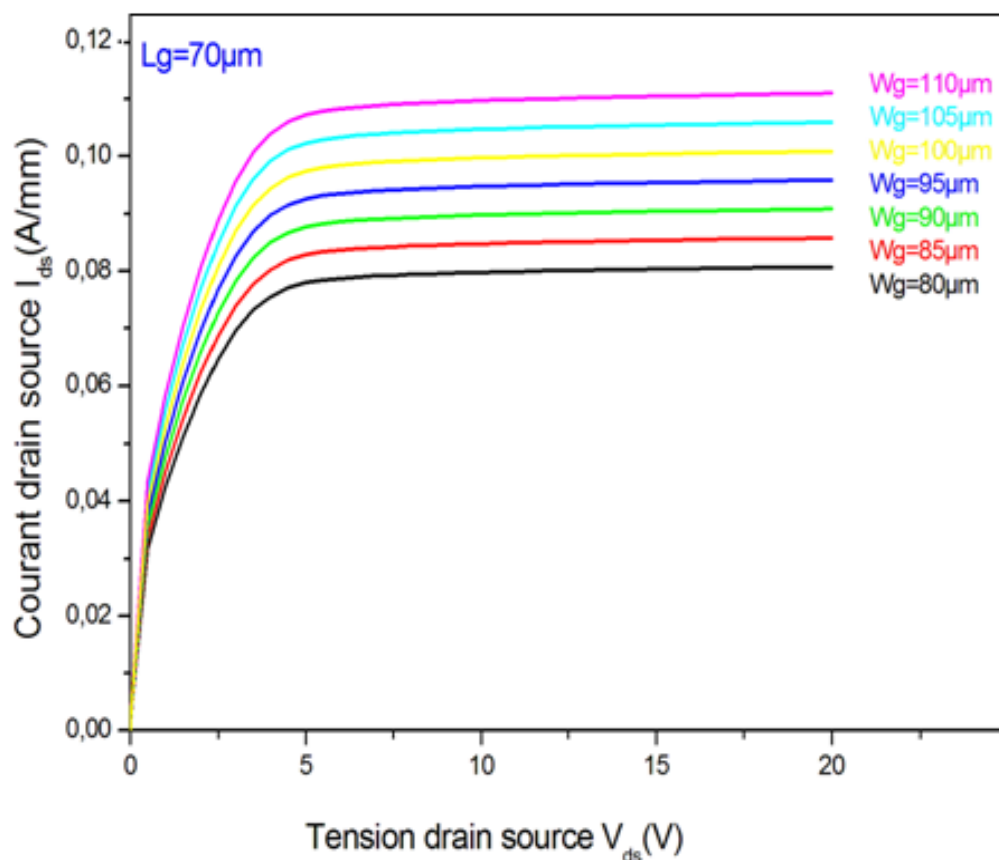


Figure IV.22 La variation du courant de drain source I_{ds} en fonction de la tension de drain V_{ds} pour différentes largeurs de grille (w_g)

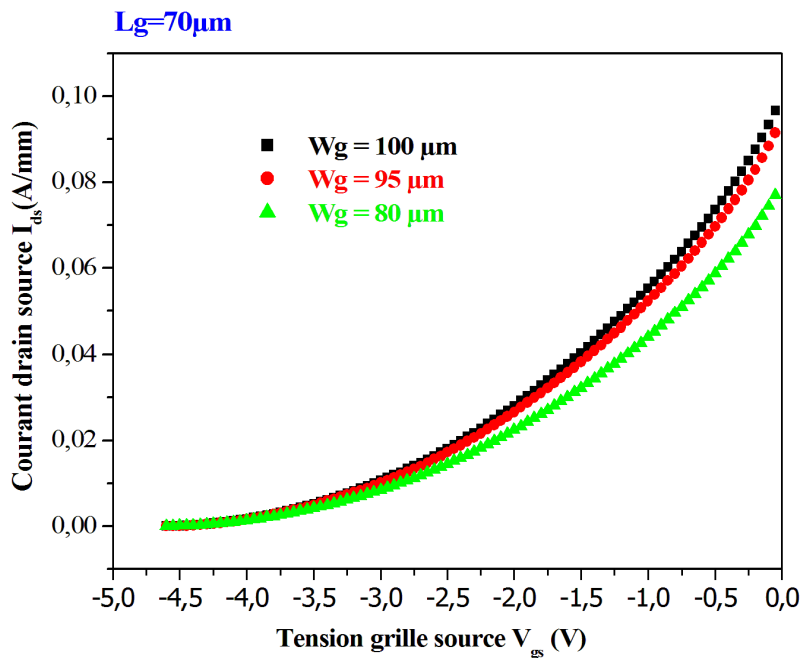


Figure IV.23: La variation du courant de drain source I_{ds} en fonction de la tension de drain V_{gs} pour différentes largeurs de grille (w_g)

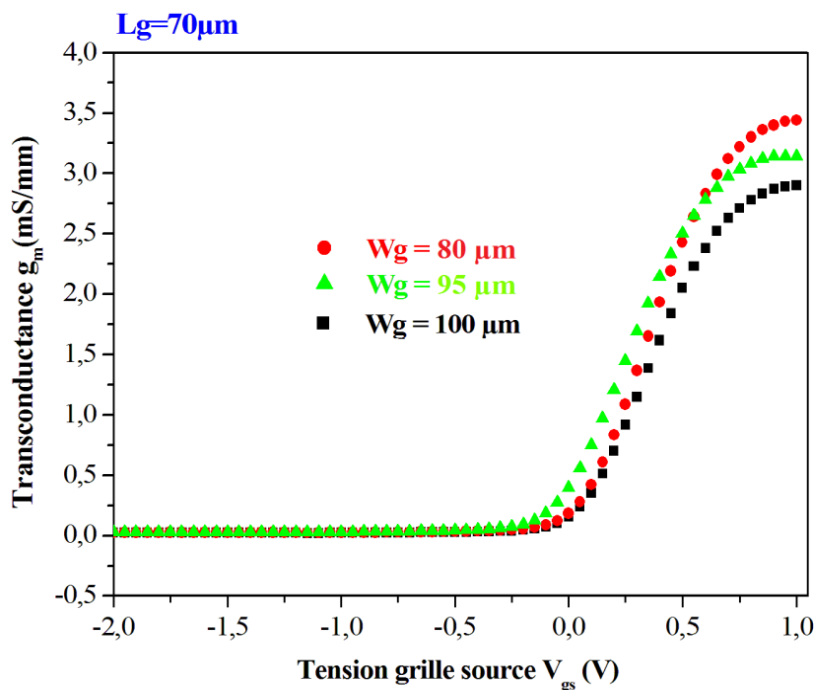


Figure IV.24: Variation de la transconductance g_m en fonction de V_{gs} pour différentes largeur W_g

On remarque bien que le courant diminue quand la longueur de grille w_g diminue, même remarque pour la transconductance.

IV.4.4.4. Influence de la longueur source-drain L_{sd}

Nous faisons varier la longueur drain source L_{ds} et nous simulons le courant de drain en fonction de la tension de drain V_{ds} , le courant de drain en fonction de tension de grille V_{gs} ainsi que la transconductance. Les figures ci-dessous illustrent les variations courant de drain I_{ds} en fonction de V_{ds} , le courant I_{ds} et la transconductance g_m en fonction de V_{gs} pour différentes valeurs de la longueur L_{sd} ;

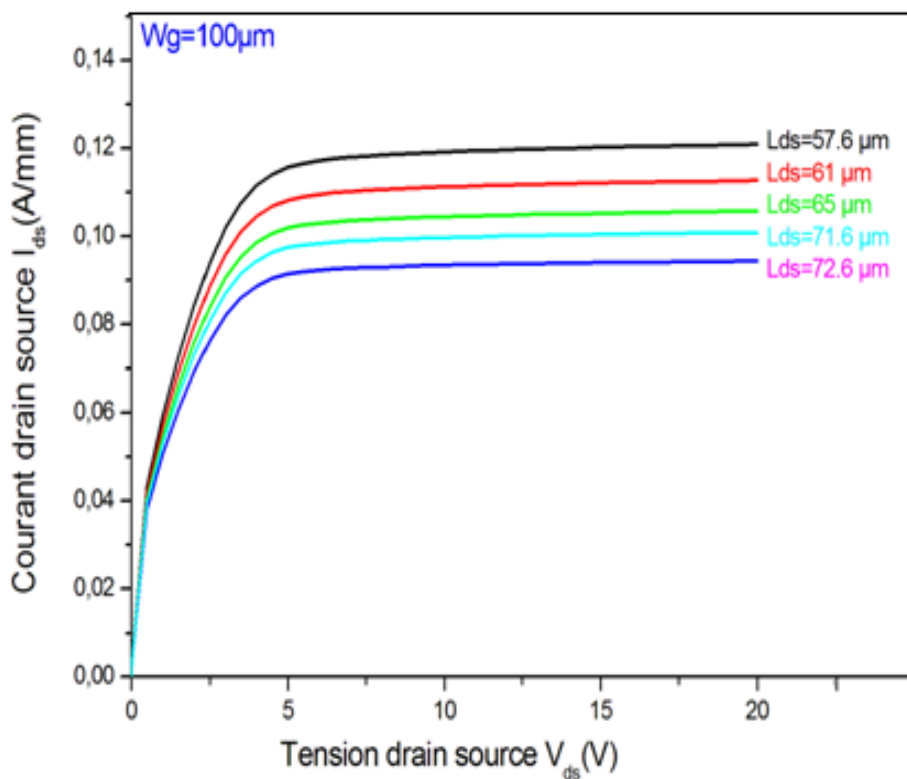


Figure IV.25 : La variation du courant de drain I_{ds} en fonction de la tension de drain V_{ds} pour différentes longueurs source-drain L_{sd}

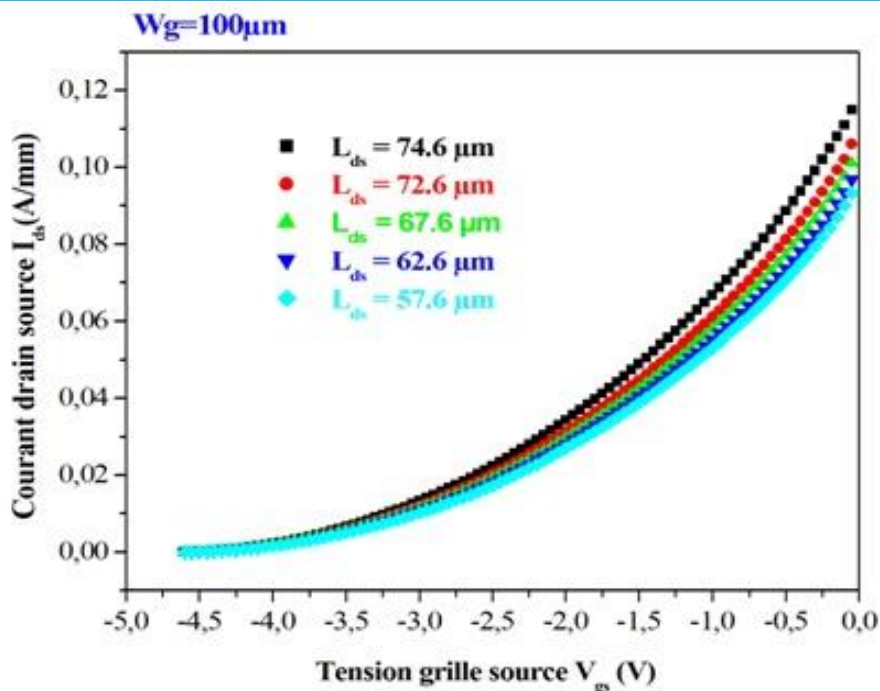


Figure IV.26 : La variation du courant de drain I_{ds} en fonction de la tension de grille V_{gs} pour différentes longueurs source-drain L_{sd}

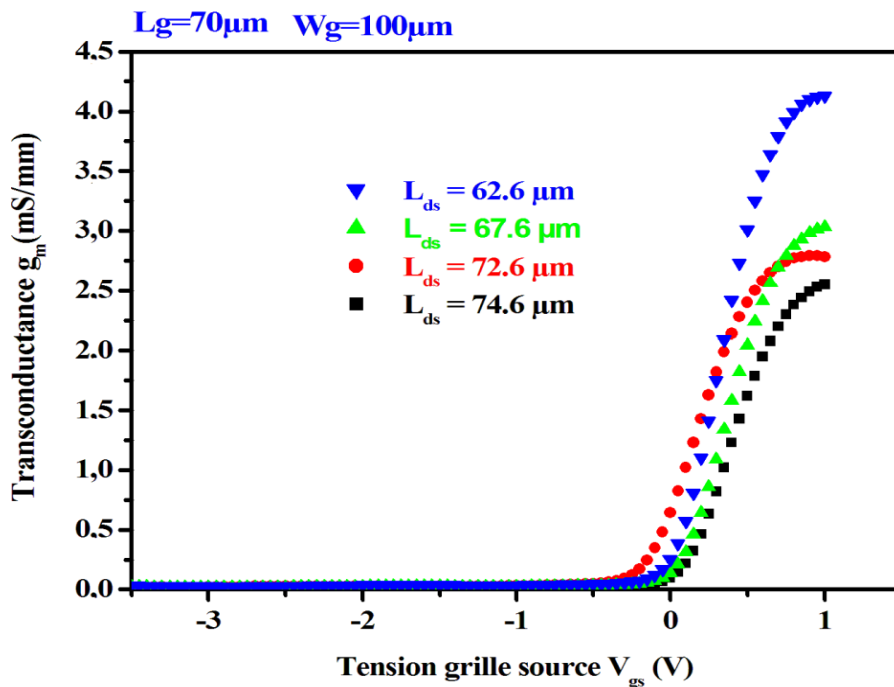


Figure IV.27 : Variation de la transconductance g_m en fonction de V_{gs} pour différentes longueurs source-drain L_{sd}

On remarque dans la courbe $I_{ds}(V_{ds})$ que le courant de saturation diminue avec l'augmentation de la longueur source-drain. En effet, l'extension latérale de la zone de charge d'espace conduit à un allongement du canal conducteur tout en s'amincissant, ce qui limite le passage des électrons d'une part et d'autre part dû à l'augmentation du champ électrique latéral qui est inversement proportionnel à la longueur de la grille. Cette montée du champ E augmente le courant du canal I_{ds} , sachant que ce dernier est principalement un courant d'entraînement. La transconductance g_m diminue aussi puisqu'elle est liée au courant. On constate qu'il n'y a pas un changement important dans la tension de pincement.

IV.4.4.5. Influence de la densité de charge n_s

Nous avons simulés la variation du courant de drain I_{ds} en fonction de la tension de drain V_{ds} (la tension Grille-Source nulle), le courant I_{ds} en fonction de la tension V_{gs} et la transconductance ($V_{ds} = 7V$) pour différentes valeurs de la densité d'électrons dans le canal 2DEG (n_s). Avec les mêmes paramètres donnés précédemment, les résultats obtenus sont représentés sur les figures (IV.28, IV.29, IV.30).

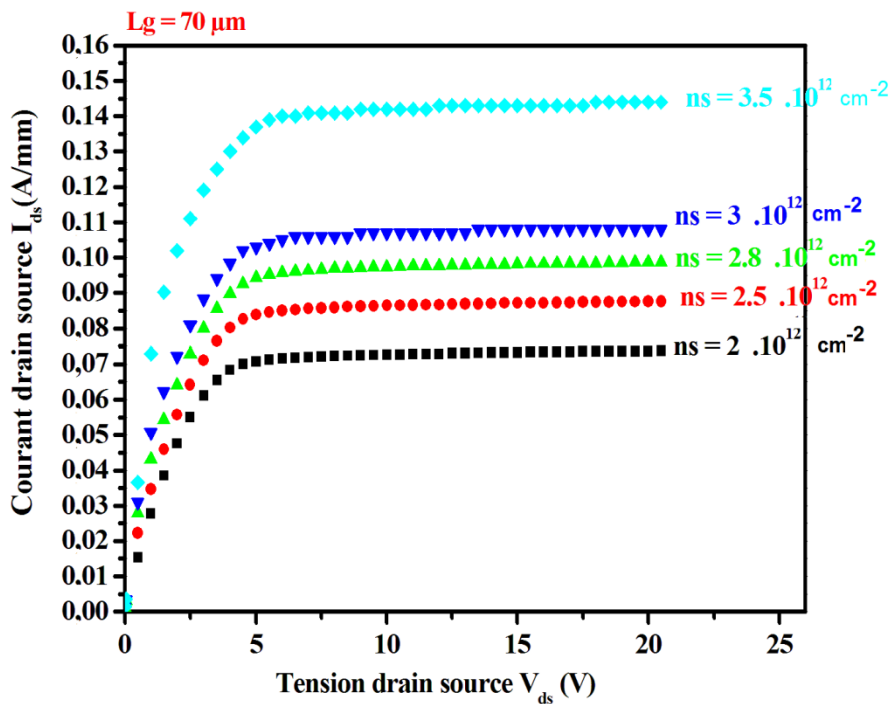


Figure IV.28 : La variation du courant de drain I_{ds} en fonction de la tension de drain V_{ds} pour différentes densité de charge n_s .

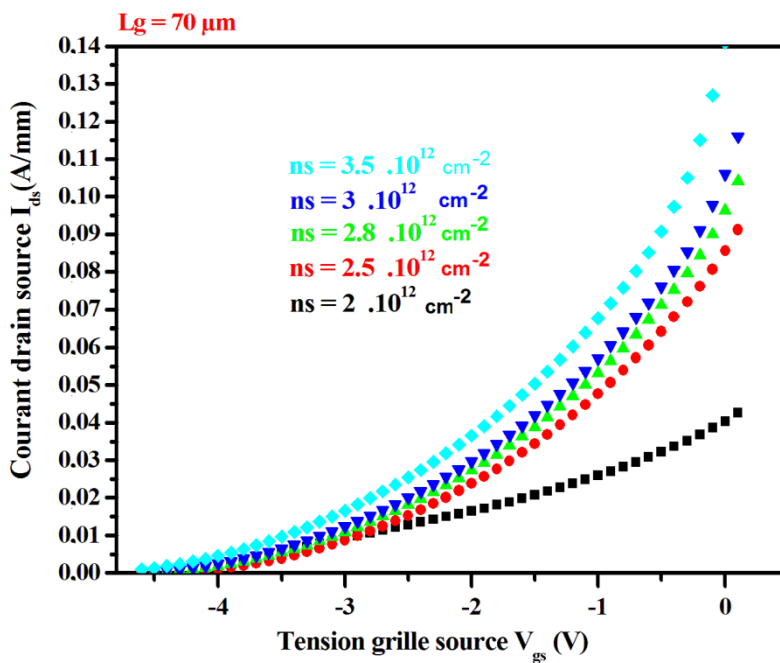


Figure IV.29 : La variation du courant de drain I_{ds} en fonction de la tension de grille V_{gs} pour différentes densité de charge n_s .

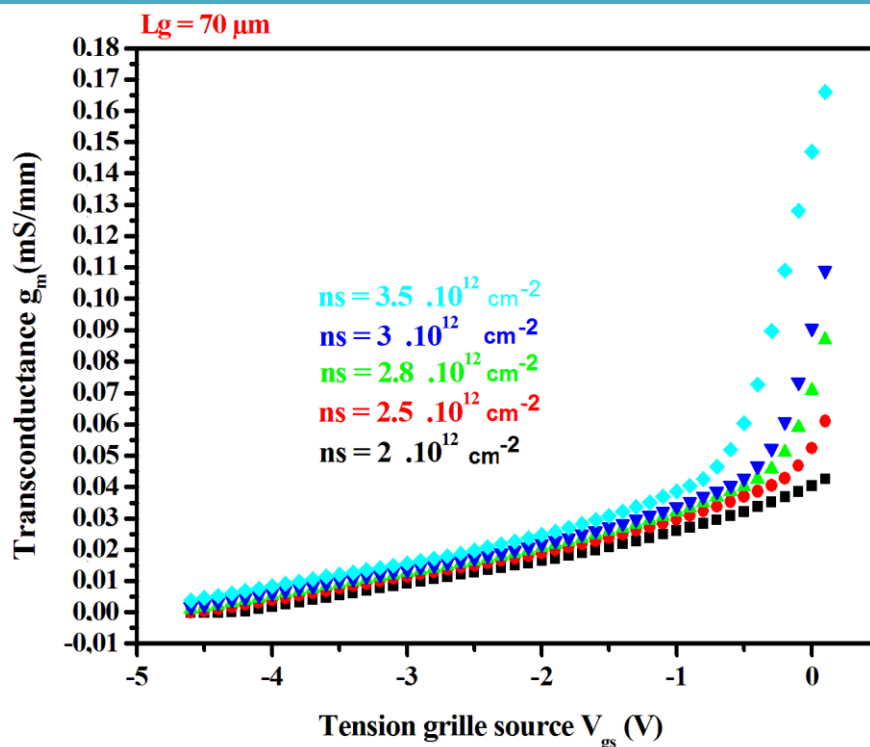


Figure IV.30 : Variation de la transconductance g_m en fonction de V_{gs} pour différentes densité de charge n_s .

L'augmentation de la densité d'électrons dans le canal 2DEG, conduit à un courant plus élevé ce qui explique l'augmentation du courant I_{ds} . On constate aussi que la transconductance augmente, l'augmentation de n_s induit un déplacement vers les valeurs les plus négatives de la tension de seuil.

IV.4.4.6. Influence du dopage de la couche barrière $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}$

Nous avons simulés La variation du courant de drain I_{ds} en fonction de la tension de drain V_{ds} (la tension Grille-Source nulle), le courant I_{ds} en fonction de la tension V_{gs} et la transconductance ($V_{ds} = 7\text{V}$) pour différentes valeurs du dopage de la couche $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}$ (sachons que cette couche est intentionnellement dopée). Les résultats obtenus sont représentés sur les figures (IV.31, IV.32, IV.33).

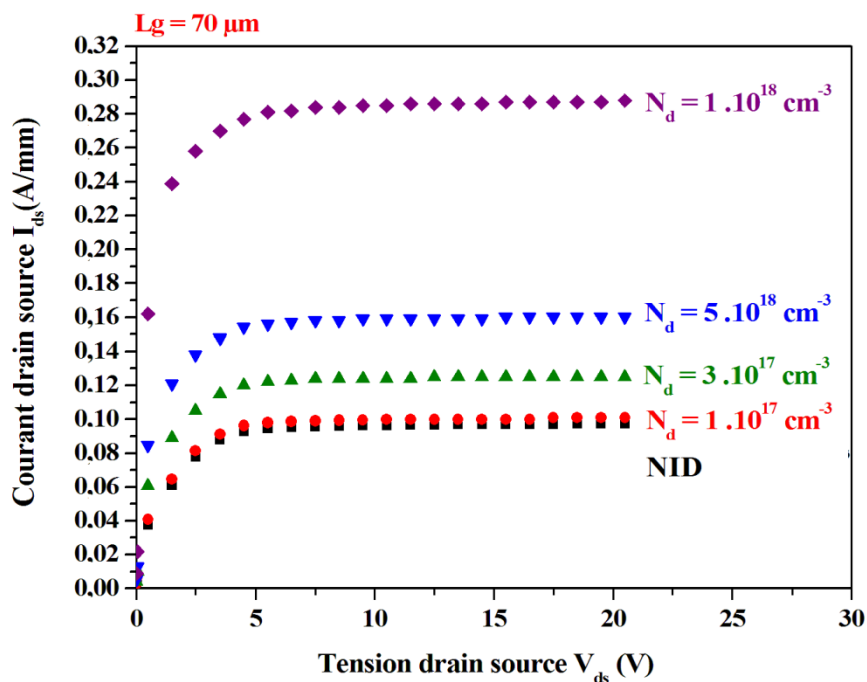


Figure IV.31 : La variation du courant de drain I_{ds} en fonction de la tension de drain V_{ds} pour différentes de la couche barrière $Al_{0.25}Ga_{0.75}N$.

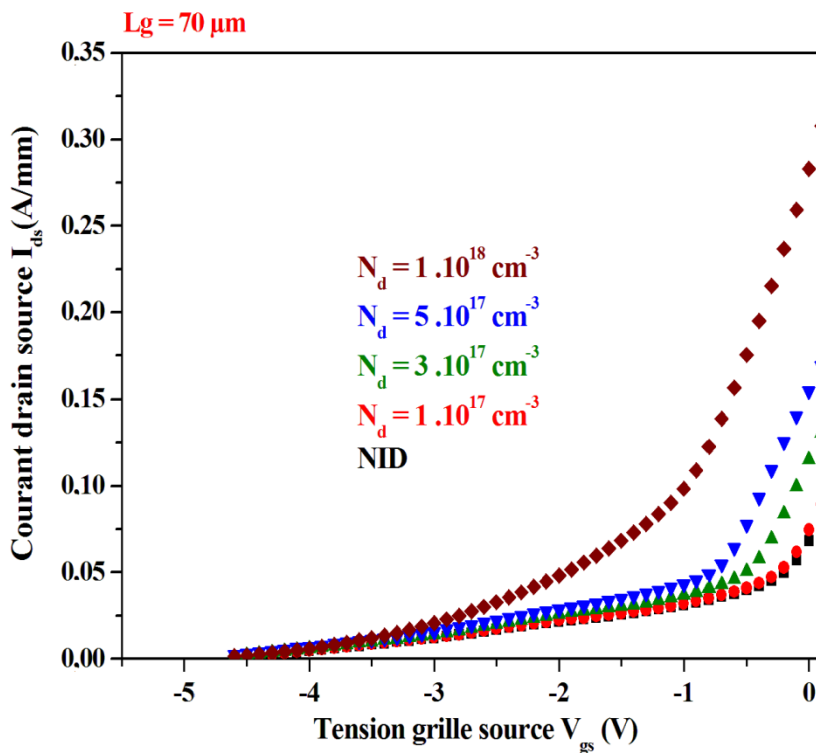


Figure IV.32 : La variation du courant de drain I_{ds} en fonction de la tension de grille V_{gs} pour différentes de la couche barrière $Al_{0.25}Ga_{0.75}N$.

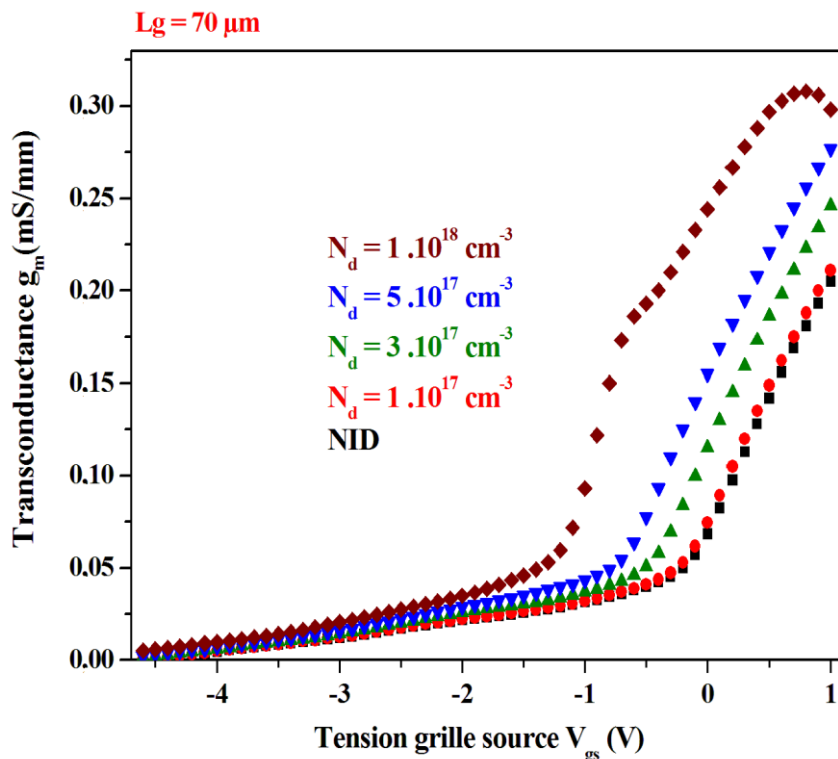


Figure IV.33 : Variation de la transconductance g_m en fonction de V_{gs} pour différentes de la couche barrière $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}$.

L'augmentation de du dopage de la couche $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}$ induit une grande valeur de la densité n_s du 2DEG, cette densité prend des valeurs plus importantes quand N_d augmente. Cette augmentation est due à l'accroissement des polarisations spontanée et piézoélectrique qui existent à l'interface de l'hétérojonction $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}/\text{GaN}$ et au meilleur confinement d'électrons dans le puits de potentiel. Cela explique bien l'augmentation du courant I_{ds} ainsi que l'augmentation de la transconductance g_m [3], on remarque aussi le déplacement vers les valeurs les plus négatives de la tension de seuil.

La couche donneuse $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}$ est non-intentionnellement dopée. Une densité d'électrons, très élevée est pourtant présente dans le canal : $2,33 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$, l'ajout des atomes dopants entraîne des perturbations dans le réseau cristallin qui affecte la mobilité. Dans un HEMT à base de GaN, les porteurs qui forment le canal 2DEG dans le matériau de plus petite bande interdite, sont donnés par le matériau à plus grande largeur de bande interdite.

IV.5. Conclusion

L'étude menée dans ce chapitre consiste à explorer le transistor HEMT à base des composés III-N. L'utilisation de matériaux à grand gap, et tout particulièrement l'emploi du nitrure de gallium semble être une solution intéressante pour la fabrication de ce type de transistor.

L'étude menée dans ce chapitre nous a permis de mieux comprendre plusieurs aspects technologiques liés à la performance des transistors HEMTs $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}/\text{GaN}$, ceci à partir de la caractérisation expérimentale d'une part et d'autre part la simulation et la modalisation de ces caractéristiques électriques nous a permis de tirer quelques remarques telles que : plus la longueur de la grille est grande, plus la valeur de la tension de seuil V_{th} et la valeur du courant de saturation I_{dss} diminuent ; notons ici l'existence de quelques anomalies telles que l'effet Kinck qui est une déformation spécifique de la caractéristique $I_{ds}(V_{ds})$, il se traduit par une saturation anormale de I_{ds} à faible V_{ds} , cet effet est lié aux trous créés lors de l'ionisation des atomes, un autre effet observé c'est l'auto-échauffement qui est un critère majeur limitant les performances du transistor HEMT sous polarisation électrique.

L'étude de l'influence des propriétés structurales (largeur de la grille, distance drain-source et l'épaisseur de la couche $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}$, ainsi que les effets dus aux propriétés du matériau comme la charge d'interface (n_s) et le dopage de la couche barrière a été faite par la simulation physique bidimensionnelle. Les résultats obtenus dans cette section prouvent que ces paramètres affectent intensivement les performances d'un transistor HEMT à base de $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}/\text{GaN}$ et que Atlas-Silvaco nous a offert un outil de simulation à la fois physique et électrique expert. Il serait souhaitable d'approfondir encore plus l'étude du transistor HEMT, en quête de meilleurs résultats. On pourrait utiliser d'autres composés nitrurés tel que le ternaire AlInN qui admet un meilleur accord de maille avec le GaN , et diminuer les dimensions du dispositif pour aller vers la « Nanotechnologie ».

Références du Chapitre IV

- [1] Maeda, N., et al.: 'Enhanced electron mobility in AlGa_N=InGa_N=AlGa_N double heterostructures by piezoelectric effect', Jpn., J. Appl. Phys., 1999, 38, (7B), pp. L799–L801
- [2] Y. Pei, F. Recht, N. Fichtenbaum, S. Keller, S. P. DenBaars and U. K. Mishra, IEEE Electronics Letters 43, 1466 (2007).
- [3] N. Benseddik, thèse de doctorat : "Etude et caractérisation de nano-composants à base de semiconducteur III-N pour des applications en puissance et hyperfréquence", Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbes, 2013
- [4] N. Benyahia "Caractérisation et simulation des transistors HEMTs de la filière InAlN/GaN", Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbes, 2017
- [5] Silvaco International, http://www.silvaco.com/products/device_simulation/atlas.html.
- [6] Atlas User's Manual, Silvaco International, 2010.
- [7] U. Radhakrishna; D. Piedra; Y. Zhang; T. Palacios and D. Antoniadis., High voltage GaN HEMT compact model: Experimental verification, field plate optimization and charge trapping, in Proc. *IEEE Int. Electron Devices Meeting*, pp. 32.7.1–32.7.4, Dec. (2013).
- [8] Vetury R, Zhang NQ, Keller S, Mishra UK. The impact of surface states on the DC and RF characteristics of AlGa_N/Ga_N HFETs. *IEEE TED*; 48:560–6. (2001).
- [9] T. Zimmer, D. O. Bodi, J. M. Dumas, N. Labat, A. Touboul, and Y. Danto, Kink effect in HEMT structures: A trap-related semi-quantitative model and an empirical approach for spice simulation, *Solid State Electron.*, 35, 10, 1543, (1992).
- [10] M.H. Somerville ; J.A. del Alamo ; W. Hoke, Direct correlation between impact ionization and the kink effect in InAlAs/InGaAs HEMTs, *IEEE Electron Device Letters*, 17, 10, (1996).
- [11] M.H. Somerville, A. Ernst, J.A. del Alamo, A physical model for the Kink effect in InAlAs/InGaAs HEMTs, *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 47, n°5, may (2000).
- [12] T. Suemitsu, T. Enoki, N. Sano, M. Tomizawa, Y. Ishii, An analysis of the kink phenomena in InAlAs/InGaAs HEMT's using two-dimensional device simulation. *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 45, No. 12,

- [13] N. Sarazain "HEMT à base de nitrure de gallium :evolution vrs un nouveau système de matériaux , une nouvelle génération de composant",Université des sciences et technologie de Lille(2007).
- [15] High voltage GaN HEMTs with low on-resistance for switching applications these for Doctor of Philosophy in Electrical and Computer Engineering by Naiqian Zhang UNIVERSITY
- [16] Y.-F. Wu, D. Kapolnek, J. P. Ibbetson, P. Parikh, B. P. Keller, and U. K. Mishra, "Very-high power density AlGaIn/GaN HEMTs," IEEE Trans. Elect. Dev. , vol. 48, pp. 586-90, 2001.
- [17] Sahoo, D.K.; Lal, R.K.; Hyungtak Kim; Tilak, V.; Eastman, L.F., "High-field effects in silicon nitride passivated GaN MODFETs," Electron Devices, IEEE Transactions on, vol.50, no.5, pp.1163,1170, May 2003
- [18] A. Kadid « étude et simulation des paramètres technologiques et électriques des structures réaliser à base de composés nitrurés » mémoire de magister université de sidi bel abbess 2015
- [19] N.Vellas, thèse doctorat, université de Lille n° 3405 (2003)
- [20] H. Zhang, E. Miller, and E. Yu, Journal of Applied Physics, 99, 2,1(2006).
- [21] H. Mazari, N. Benseddik, Z. Benamara, K. Ameer, B. Soudini, H. Dib. Sensor Letters, 7, 905, (2009).
- [22] H. Hasegawa, T. Inagaki, S. Ootomo, and T. Hashizume, Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures. 21, 4, 1844 (2003).
- [23] Ludovic LACHEZE « Etude et simulation physique des effets parasites dans les HEMTs AlGaIn/GaN » thèse doctorat, Université Bordeaux 1, (2009).

Conclusion Générale

L'utilisation des matériaux à grand gap, et tout particulièrement l'emploi du nitrure de gallium **GaN** semble être une solution intéressante pour la fabrication des transistors **HEMT**, grâce à ses propriétés physiques et électriques remarquables. Les **HEMTs** réalisés à partir du matériau **GaN** présentent actuellement les meilleures performances mondiales pour la génération de puissance RF, et malgré le manque de substrat en **GaN** à grande échelle et l'introduction de défauts structuraux lors des différentes phases de fabrication, ce matériau bénéficie d'un effort de recherche mondial important.

Nous avons exposé dans ce manuscrit les résultats de l'optimisation de la technologie des transistors **HEMTs** $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N} / \text{GaN}$ afin de fabriquer des composants performants.

Dans le premier chapitre nous avons rappelés les notions générales du transistor à haute mobilité d'électrons **HEMTs** avec une description de leurs différentes couches. Puis nous avons définis son principe de fonctionnement basé sur les propriétés de haute mobilité d'un gaz d'électron bidimensionnel **2DEG** (Two Dimensional Electron Gaz.),

Dans le deuxième chapitre, on se concentrera sur la caractérisation des propriétés électriques des hétéro-structures à base de **GaN** telles que $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ et $\text{GaN}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ à face **Ga** et à face **N** pour mieux comprendre l'effet de la polarisation spontanée et piézoélectrique sur la formation et la localisation du **2DEG** en l'absence de modulation de dopage et de polarisation externe.

Dans le troisième chapitre nous avons présentés la technologie de fabrication des composés étudiés, puis nous avons donnés des définitions de

l'outil de simulation utilisé. Pour moduler nos transistors **HEMTs** à base des hétéro-structures $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{GaN}$, nous avons utilisé le logiciel SILVACO-TCAD.

Dans le dernier chapitre, nous avons présentés, dans un premier temps, les mesures des caractéristiques électriques telles que: $\mathbf{I_{ds}(V_{ds})}$, $\mathbf{I_{ds}(V_{gs})}$, la transconductance et la capacité pour deux types de transistor avec des longueurs de grilles différentes nous avons remarqués des anomalies tels que l'effet Kinck qu'est une déformation spécifique de la caractéristique $\mathbf{I_{ds}(V_{ds})}$, il se traduit par une saturation anormale de $\mathbf{I_{ds}}$ à faible $\mathbf{V_{ds}}$, cet effet est lié aux trous créés lors de l'ionisation des atomes, un autre effet observé c'est l'effet d'auto échauffement qu'est critère majeur limitant les performances du transistor **HEMT** sous polarisation électrique. Puis nous avons modélisé notre dispositif qui est le HEMT $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{GaN}$, nous avons calculé et interprété les différentes grandeurs en utilisant le logiciel de simulation: SILVACO. Puis nous avons présentés une comparaison entre les caractéristiques expérimentales et simulés nous avons constatés un désaccord entre ces caractéristique due à la présence des pièges et à la dégradation des propriétés de transport (la résistance carré augmente et la mobilité chute drastiquement) suite à une élévation de la température dans le canal. Cette élévation en température se réalise en fonctionnement transistor, à la sortie de la grille côté drain et s'accompagne par conséquent souvent d'un claquage de grille, notons que Le choix du substrat et de la couche de passivation sont alors fondamentaux pour dissiper au mieux cette chaleur.

L'étude de l'influence des propriétés structurales (largeur de la grille, distance drain-source et l'épaisseur de la couche $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}$, ainsi que les effets dus aux propriétés du matériau comme la charge d'interface (\mathbf{ns}), le dopage de la couche barrière a été faite par la simulation physique bidimensionnelle. Les

Conclusion Générale

résultats obtenus dans cette section prouvent que ces paramètres affectent intensivement les performances d'un transistor HEMT a base de $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{GaN}$ et que Atlas-Silvaco nous à offert un outil de simulation a la fois physique et électrique expert. Il serait souhaitable d'approfondir encore plus l'étude du transistor **HEMT**, en quête de meilleurs résultats. On pourrait utiliser d'autres composés nitrurés tel que le ternaire $\text{Al}_x\text{In}_{(1-x)}\text{N}$ qui admet un meilleur accord de maille avec le **GaN**, et diminuer les dimensions du dispositif pour aller vers la « Nanotechnologie ».

Annexe

Code de simulation sous l'énerverment Atlas T-cad de Silvaco

```

go atlas
#
#SILVACO International 1996
#
#SECTION 1: Mesh input
#
mesh auto width=75
x.mesh l=0.0      s=0.1
x.mesh l=0.2      s=0.1
x.mesh l=0.5      s=0.1
x.mesh l=1.0      s=0.1
x.mesh l=1.5      s=0.1
x.mesh l=19.5     s=0.1
x.mesh l=21       s=0.1
x.mesh l=21.8     s=0.005
x.mesh l=22.8     s=0.1
#####
y.mesh l=0.0      s=0.6
y.mesh l=0.027    s=0.15
y.mesh l=0.03     s=0.15
y.mesh l=0.032    s=0.008
#y.mesh l=0.19    s=0.09
#y.mesh l=0.2     s=0.09
y.mesh l=0.057    s=0.003
y.mesh l=0.058    s=0.003
#y.mesh l=0.128   s=0.002
#y.mesh l=0.138   s=0.1
#y.mesh l=0.14    s=0.1
y.mesh l=1.407    s=0.9
#y.mesh l=20      s=1.5
#####
#SECTION 2: Structure Specification
#####
#region  num=4  material=GaN  x.min=0  x.max=58  y.min=0.027  y.max=0.03
region   num=1  material=AlGaN  x.min=0  x.max=22.8  y.min=0.027  y.max=0.058
x.composition=0.25
region   num=2  material=oxide  x.min=0.0  x.max=22.8  y.min=0.0  y.max=0.027
#region  num=3  material=oxide  x.min=0.0  x.max=0.5  y.min=0.027  y.max=0.03
#region  num=4  material=oxide  x.min=72.0  x.max=73  y.min=0.027  y.max=0.03
region   num=5  material=GaN  x.min=0  x.max=22.8  y.min=0.058  y.max=1.407

```

```

#region num=3 material=Sapphire x.min=0.0 x.max=73 y.min=2.0 y.max=20
#####
#### electrode
#####
elec num=1 name=source x.min=0.0 x.max=0.2 y.min=0.0 y.max=0.027
elec num=2 name=drain x.min=22.55 x.max=22.8 y.min=0.0 y.max=0.027
elec num=3 name=gate x.min=1 x.max=21 y.min=0.0 y.max=0.027
#elec num=4 substrate
#####
#DOPING region=4 uniform n.type conc=1e15
DOPING region=1 uniform n.type conc=9e16
DOPING region=5 uniform n.type conc=3.1e15
#####Inserts polarization effects#####
interface charge=2.8e12 x.min=0 x.max=22.8 y.min=.057 y.max=.059 s.s
#####
# SECTION 3: Material Models
material taun0=1.e-9 taup0=1.e-9
material material=AlGaN mun=825 mup=153 affinity=3.14 nc300=2.07e18 eg300=4.049
material material=GaN mun=900 mup=200 affinity=3.4 nc300=2.07e18 eg300=3.39
#####
model fldmob srh
model material=GaN conmob
model material=ALGaN conmob
#####
contact num=3 name=gate workfun=4.52
#####
#SECTION 3: Bias gate
method gummel newton trap itlim=35 maxtrap=4 vsatmod.inc=0.01 carriers=2 elect
#SECTION 4: Initial solution
#Initial solution
Solve init
output con.band val.band flowlines
Save outf=N0aaahemt_1.str
tonyplot N0aaahemt_1.str -set
#Apply a set of biases at the gate and save solutions
Solve vgate=-1 outf=N0aaahemt-0001.bin
Solve vgate=-2 outf=N0aaahemt-01.bin
Solve vgate=-3 outf=N0aaahemt-02.bin
Solve vgate=-4 outf=N0aaahemt-03.bin
Solve vgate=-5 outf=N0aaahemt-04.bin
Solve vgate=-6 outf=N0aaahemt-05.bin
#####Calculate ID-VD characteristic at VG=-1#####

```

```
Load inf=N0aaahemt-0001.bin
log outf=N0aaahemt-0001.log
solve outf=N0aaahemt-0001.str master
solve vdrain=0.02
solve vdrain=0.05
solve vdrain=0.5 vstep=0.5 vfinal=20 name=drain
save outf=N0aaahemt-0001_A.str master
tonyplot N0aaahemt-0001.log -set
# Calculate ID-VD characteristic at VG=-2
Load inf=N0aaahemt-01.bin
log outf=N0aaahemt-01.log
solve outf=N0aaahemt-01.str master
solve vdrain=0.02
solve vdrain=0.05
solve vdrain=0.5 vstep=0.5 vfinal=20 name=drain
save outf=N0aaahemt-01_A.str master
tonyplot N0aaahemt-01.log -set
# Calculate ID-VD characteristic at VG = -3
Load inf=N0aaahemt-02.bin
log outf=N0aaahemt-02.log
solve outf=N0aaahemt-02.str master
solve vdrain=0.02
solve vdrain=0.05
solve vdrain=0.5 vstep=0.5 vfinal=20 name=drain
save outf=N0aaahemt-02_A.str master
tonyplot N0aaahemt-02.log -set
tonyplot -overlay N0aaahemt-0001.log N0aaahemt-01.log N0aaahemt-02.log -set
# Calculate ID-VD characteristic at VG=-4
Load inf=N0aaahemt-03.bin
log outf=N0aaahemt-03.log
solve outf=N0aaahemt-03.str master
solve vdrain=0.02
solve vdrain=0.05
solve vdrain=0.5 vstep=0.5 vfinal=20.0 name=drain
save outf=N0aaahemt-03_A.str master
tonyplot N0aaahemt-03.log -set
# Calculate ID-VD characteristic at VG=-5
Load inf=N0aaahemt-04.bin
log outf=N0aaahemt-04.log
solve outf=N0aaahemt-04.str master
solve vdrain=0.02
solve vdrain=0.05
```

```

solve vdrain=0.5 vstep=0.5 vfinal=20.0 name=drain
save outf=N0aaahemt-04_A.str master
tonyplot N0aaahemt-04.log -set
# Calculate ID-VD characteristic at VG=-6
Load inf=N0aaahemt-05.bin
log outf=N0aaahemt-05.log
solve outf=N0aaahemt-05.str master
solve vdrain=0.02
solve vdrain=0.05
solve vdrain=0.5 vstep=0.5 vfinal=20.0 name=drain
save outf=N0aaahemt-05_A.str master
tonyplot N0aaahemt-05.log -set
Tonyplot -overlay N0aaahemt-03.log N0aaahemt-04.log N0aaahemt-05.log -set
# Id-Vg calculation
#####
solve init
solve vgate=-0.9 vdrain=0
solve vdrain=0 vstep=0.5 vfinal=3 name=drain
#####
log outf=N0aaahemt_2.log master
solve vgate=-5 vstep=0.1 vfinal=0 name=gate ac freq=1e6
save outf=N0aaahemt_2.str master
#####
#####
#####
extract init inf="N0aaahemt_2.log"
extract name="Vt" (xintercept(maxslope(curve(v."gate",i."drain"))))
# Maximum saturation current
extract name="Idss" max(i."drain")
# Gate voltage Vg@Idss*0.3 at Id=0.3Idss
extract name="Vgs@0.3Idss" x.val from curve (v."gate", i."drain")where y.val=$"Idss"*0.3
extract name="cv" curve(c."gate""source", v."gate")
extract name="gv" curve(g."drain""source", v."gate")
#####
# Plot ID-VG characteristic
Tonyplot N0aaahemt_2.log -set
quit..

```

Résumé :

L'apparition de matériau à large bande interdite et en particulier la technologie à base de nitrure constitué une avancée sérieuse pour l'électronique d'hyperfréquences, de haute puissance et haut température. Les premiers transistors **HEMTs** (High Electron Mobility Transistor) sont apparus en 1980 comme une évolution du **MESFET**, pour contourner le problème de transport dans un matériau dopé. Le transport électronique dans le **HEMT** s'effectue au voisinage d'une interface entre un matériau à grande bande interdite fortement dopé et un matériau faiblement dopé. Les transistors **HEMTs** à base de **GaN** présentent de nombreux avantages (tension de claquage élevée, fonctionnant dans le domaine des hyperfréquences, excellente conductivité thermique...). Nous nous proposons d'étudier les différents paramètres électriques dans ces transistors pour cela, nous effectuons des caractérisations électriques d'une part et d'une autre part nous faisons une modélisation et des simulations en utilisant le logiciel **Silvaco-Tcad** a fin de comprendre les mécanismes de transports. Finalement des interprétations et des discussions viendront compléter ce travail.

Abstract:

The appearance of wide band gap material and in particular the nitride technology is a serious advance for microwave, high power and high temperature electronics. The first **HEMT** (High Electron Mobility Transistor) transistors appeared in 1980 as an evolution of **MESFET**, to circumvent the transport problem in a doped material. The electronic transport in the **HEMT** is carried out in the vicinity of an interface between a highly doped large band gap material and a lightly doped material. **GaN**-based **HEMTs** transistors have many advantages (high breakdown voltage, operating in the microwave range, excellent thermal conductivity, etc.). We propose to study the different electrical parameters in these transistors, for this we carry out electrical characterizations in the first time then we do a modeling and simulations using the **Silvaco-Tcad** software in order to understand the transport mechanisms. Finally interpretations and discussions will complete this work.

ملخص:

تعتبر الترانزستورات عالية الحركة الالكترونية غير متجانسة البنية (**HEMT**) ذات أساس آزوتي من نوع $(Al_xGa_{(1-x)}/GaN)$ من بين أفضل الأنواع المستخدمة في الترددات المرتفعة، الاستطاعة المرتفعة و الحرارة المرتفعة. هذا المركب له فوائد ذاتية تتمثل في توتر الانفصام و سرعة التشبع العاليتين كما له ثبات عالي في المجالين الحراري و الكيميائي. يعتمد عملنا على دراسة عملية بالإضافة إلى المحاكاة للترانزستور **HEMT** مع الأخذ بعين الاعتبار جميع التركيبات التي تؤثر على النتائج. مما يمكننا من تحسين أداء هذا العنصر.