

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



**UNIVERSITE ABOU BAKR BELKAID - TLEMCEM**  
FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE TELECOMMUNICATION



**MEMOIRE**  
Pour l'obtention du

**DIPLOME DE MASTER**

**RESEAUX MOBILES ET SERVICES DE TELECOMMUNICATIONS**

***THEME***

**Etude du comportement DC du transistor  $\text{La}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{GaN}$   
MOS-HEMT**

Présenté par :

Melle BELBACHIR Soumia  
Melle MANSOURI Ines

Soutenu en mai 2016 devant le jury composé de :

Mr BAHRI Sidi Mohammed	M.C. à l'Université de Tlemcen	président
Melle BELHADEF Yamina	M.C. à l'Université de Tlemcen	Examinatrice
Melle DJELTI Hamida	M.C. à l'Université de Tlemcen	Encadreur

*Année universitaire : 2015 - 2016*

# DEDICACE

*Ce mémoire est dédié à*

*Nos parents,*

*Nos familles,*

*Nos ami(e)s,*

*Tous ceux qui nous aiment et qu'on aime.*

# REMERCIEMENTS

Nous tenons particulièrement à remercier ALLAH le tout puissant, ce mémoire n'aurait jamais été réalisé sans sa bénédiction.

Nous adressons nos remerciements à notre encadreur Melle **Djelti Hamida**, Maître de Conférences au Département de Télécommunication de la Faculté de Technologie de l'Université de Tlemcen, pour son aide consistante, ses conseils judicieux, pour ses remarques objectives et pour son encadrement afin de mener à bien ce modeste travail.

Nous exprimons notre profonde gratitude à Monsieur **Bahri Sidi Mohamed** Maître de Conférences au Département de Télécommunication de la Faculté de Technologie de l'Université de Tlemcen, pour l'intérêt qu'il a accordé à ce travail en acceptant de le juger et de présider le jury.

Nous sommes très honorées de la présence dans ce jury de mémoire de Melle **Belhadef Yamina**, Maître de Conférences au Département de Télécommunication de la Faculté de Technologie de l'Université de Tlemcen, qu'elle trouve ici le témoignage de nos sincères remerciements pour avoir accepté de juger et d'évaluer ce travail.

Nous profitons de cette opportunité pour exprimer notre gratitude à tous les enseignants qui ont contribué par leur collaboration, disponibilité et sympathie, à notre formation.

# Table de des matières

Remerciements .....	i
Table des matières .....	ii
Liste des figures .....	v
Liste des tableaux .....	viii
Introduction générale.....	1

## **Chapitre I : Filières technologiques du High Electron Mobility Transistor**

I.1 Introduction.....	4
I.2 Propriétés structurales et électroniques des matériaux III-N .....	4
I.2.1 Structure cristallographique .....	4
I.2.2 Structure de bande .....	5
I.2.3 Densité de porteurs.....	6
I.2.4 Le champ de claquage .....	7
I.2.5 Mobilité électronique et champ électrique critique.....	8
I.3 Effet de polarisation.....	9
I.3.1 La polarisation spontanée.....	9
I.3.2 La polarisation piézoélectrique .....	11
I.4 Propriétés de diélectriques $Al_2O_3$ et $La_2O_3$ .....	12
I.4.1 L'Alumine $Al_2O_3$ .....	12
I.4.2 L'oxyde d'aluminium $La_2O_3$ .....	15
I.5 Les filières technologiques du transistor HEMT .....	15
I.5.1 Historique du transistor HEMT.....	15
I.5.2 Evolution de HEMT vers une structure a base de GaN .....	15
I.5.3 Etude du transistor HEMT a base de GaN .....	16
I.5.3.1 Présentation du HEMT en GaN.....	16
I.5.3.2 Définition de la structure par couche du transistor HEMT GaN.....	17
I.5.4 Diagramme des bandes de la structure HEMT AlGaIn/GaN et fonctionnement de celui-ci .....	19
I.6 Le transistor HEMT pseudomorphique (PHEMT) .....	20
I.6.1 Structure d'un PHMT conventionnel .....	21
I.7 Le transistor HEMT AlInAs/GaInAs métamorphique sur GaAs.....	22
I.7. 1 Paramètres clés du transistor .....	25

I.7.2 Influence des paramètres technologiques et de procès sur les grandeurs caractéristiques des transistors.....	26
I.8 Le transistor MOS-HEMT :.....	27
I.8.1 Topologie de la structure étudiée .....	28
I.8.2 Applications du transistor MOS-HEMT .....	28
I.9 Conclusion .....	29

## **Chapitre II : Modèle physico- électrique du transistor $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{La}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ MOS-HEMT**

II.1 Introduction .....	31
II.2 Effets de polarisations dans le GaN.....	31
II.2.1 Polarisation dans les HEMTsAlGaIn/GaIn.....	31
II.2.2 Polarisation spontanée .....	31
II.2.3 Effets piézoélectriques .....	33
II.2.4 Les différents types d'interface.....	34
II.2.5La polarisation résultante .....	36
II.3 Modèle physico-électrique du MOS-HEMT .....	38
II.3.1 La loi de continuité .....	39
II.3.2 La loi de poisson .....	39
II.4 Rappels de base sur le fonctionnement du MOSFET.....	40
II.5 Caractéristiques C-V.....	42
II.6 Résolution numérique par la méthode des éléments finis .....	45
II.7 paramètres d'entrée du modèle numérique.....	46
II.8 Configuration de la densité de charges qui constitue le 2DEG .....	46
II.9 Configuration des couches d'oxyde .....	48
II.10 Conclusion.....	48

## **Chapitre III : Analyse DC et AC du transistor $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{La}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ MOS-HEMT**

III.1 Introduction .....	50
III.2 Description du logiciel SILVACO.....	50
III.2.1 Présentation du paquet des programmes SILVACO .....	50
III.2.2 Présentation de l'outil « Atlas » .....	51
III.3 Topologie de la Structure étudiée.....	53

III.3.1 Le maillage .....	53
III.3.2 Diagramme de bandes d'énergie .....	55
III.4 Résultats et interprétations .....	56
III.4.1 Résultats statiques.....	56
III.4.1.1 caractéristique de sortie Ids-Vds .....	56
III.4.1.2 Caracteristeqes de transfert Ids-Vgs .....	58
III.4.2 Effe d'oxyde sur les caracteristique statique du MOS-HEMT .....	60
III.5 Parametrage RF du transistor MOS-HEMT.....	62
III.6 Evolution du champ électrique.....	63
III.7 Cartographie des grandeurs électriques.....	64
III.7.1 Carte du potentiel.....	64
III.7.2 Carte de courant.....	65
III. 8 Conclusion.....	68
Conclusion générale .....	69

# Liste des figures

## Chapitre I : Filières technologiques du High Electron Mobility Transistor

Figure I.1 : Structure hexagonale würtzite idéale de nitru de Gallium .....	5
Figure I.2 : Structure de bande de Ga würtzite selon les lignes à haute symétrie dans la zone de Brillouin.....	6
Figure I.3 : Evolution de la vitesse des électrons en fonction du champ électrique, à 300K dans GaN . La structure Wurtzite est représentée par la courbe 1 et la structure Zinc-Blende par la courbe 2 .....	9
Figure I.4 : Contribution des différents moments dipolaires pour la génération de la polarisation spontanée .....	10
Figure I.5 : Polarités gallium et azote dans Ga hexagonal .....	10
Figure I.6 : Génération d'un champ électrique $E_r$ et de la charge surfacique par la polarisation spontanée dans un cristal Ga würtzite polarité gallium.....	11
Figure I.7 : Effet de contrainte sur la polarisation et la charge surfacique d'une couche Ga polarité gallium. ....	12
Figure I.8 : Performances fréquences pour différent filières.....	16
Figure I.9: Structure d'un transistor HEMT AlGa <sub>N</sub> /Ga <sub>N</sub> .....	18
Figure I.10 : Diagrammes des bandes d'énergie des matériaux constituant .....	19
Figure I.11 : Diagrammes des bandes après jonction des deux couches qui .....	20
Figure I.12 : Technologie PHEMT .....	22
Figure I.13 : Structure du HEMT métamorphique .....	23
Figure I.14 : Evolution de la largeur de la bande interdite $E_g$ et de la bande de conduction $\Delta E_c$ et de valence $\Delta E_v$ en fonction du taux d'Induim.....	24
Figure I.15 : Coupe schématique du MOS-HEMT. ....	28

## Chapitre II : Modèle physico- électrique du transistor Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>

### MOS-HEMT

Figure II.1 : <i>Wurtzite</i> . ....	32
Figure II.2 : Valeur expérimentale de $N_s$ en fonction de la fraction molaire d'Aluminium pour différentes techniques d'épitaxie des structures HFET AlGa <sub>N</sub> /Ga <sub>N</sub> .....	34

Figure II.3 : Représentation des deux polarités différentes d'une structure GaN :a) Ga-face, b) N-face .....	36
Figure II.4 : Bilan des polarisations spontanées et piézoélectriques.a) GaN de type Ga-face, b) GaN de type N-face .....	36
Figure II.5 : Polarité des couches de GaN hexagonales(a) : polarité gallium (b) polarité azote. ....	37

Figure II.6:Orientation des polarisations spontanée et piézoélectrique pour les nitrures de polarité gallium suivant la contrainte : (1) la couche A est en tension sur la couche B, (2) la couche A est en compression sur la couche .....	38
---	----

Figure II.7: Représentation schématique des bandes d'énergie d'un N-MOSFET, bandes plates (à gauche) et régime d'inversion faible (à droite).....	41
---	----

Figure II.8: Coupe transversale et le potentiel de diagramme de bande du condensateur MOS-HEMT.....	43
---	----

FigureII.9 : Capacité d'un condensateur MOS-HEMT pour différentes conditions de polarisation.....	45
---	----

### **Chapitre III : Analyse DC et AC du transistor $Al_2O_3/La_2O_3/AlGaN/GaN$ MOS-HEMT**

Figure III.1: Fichiers d'entrées et sorties d'Atlas .....	52
---	----

Figure III.2 : Les composants (ou les modules) d'Atlas .....	52
--	----

Figure III.3 : Topologie de la structure MOS-HEMT .....	53
---	----

Figure III.4 : Structure maillée du transistor MOS-HEMT, (a) structure entière,(b)zoom autour des régions $La_2O_3/Al_2O_3/AlGaN/GaN$ .....	54
---	----

Figure III.5 : Diagramme de bande d'énergie du MOS-HEMT.....	55
--	----

Figure III.6 : Caractéristiques de sortie $I_{ds}-V_{ds}$ pour $T = 300 K, V_{gs}$ variant de 4 à -1V avec un pas de 1V .....	57
---	----

Figure III.7 : Caractéristiques de sortie $I_{ds}-V_{ds}$ pour $T = 500 K, V_{gs}$ variant de 4 à -1V avec un pas de 1V .....	57
---	----

Figure III.8 : caractéristiques de sortie $I_{ds}-V_{ds}$ pour $T = 600 K, V_{gs}$ variant de 4 à -1V avec un pas de 1V .....	58
---	----

Figure III.9 :Caracteristiques de transfert $I_{ds}-V_{gs}$ d'un MOS-HEMT .....	59
---	----

Figure III.10 :Caracteristiques de transfert $I_{ds}-V_{gs}$ d'un MOS-HEMT .....	59
--	----



Figure III.11 : Caractéristiques de sortie avec empilement d'un seul diélectriques et deux diélectriques. ....	61
Figure III.12 : Caractéristiques de transfert avec empilement d'un seul diélectriques et deux diélectriques. ....	61
Figure III.13 : Evolution du champ électrique le long du MOS-HEMT.(a)T=300K (b) T=600K .....	63
Figure III .14: Carte 2D de potentiel pour une tentions appliquée de 20 V (a)V <sub>gs</sub> =-1 V et T=300K (b) V <sub>gs</sub> =4 V T=300K(c) V <sub>gs</sub> =-1 V et T=500K (d) V <sub>gs</sub> =4 V T=500K .....	64
Figure III.15 : Carte 2D de la densité du courant(c) T = 500K, V <sub>gs</sub> =-1 V (d) T = 500K, V <sub>gs</sub> = 4 V .....	66
Figure III.16 : Carte 2D de champ électrique. (a) T=300K (b) T=600K .....	67

## Liste des tableaux

### **Chapitre I : Filières technologiques du High Electron Mobility Transistor**

Tableau I.1 : Les propriétés physiques, électriques et thermiques du silicium, et quelques matériaux III-V. [3] ..... 8

Tableau I.2 : Quelques propriétés: mécaniques, physiques, thermiques, électriques pour l'alumine [6]. ..... 14

### **Chapitre III : Analyse DC et AC du transistor $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{La}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ MOS-HEMT**

Tableau III.1 : Fréquence de transition dans le MOS-HEMT ..... 62

# **Introduction**

## **générale**

# Introduction générale

Les télécommunications sont une priorité incontournable pour tous les pays. Les rapides développements de la recherche et de l'industrialisation ont permis à un large public d'accéder aux moyens modernes de communication. Les applications civiles telles que les télécommunications par satellites, les téléphones mobiles, l'automobile avec le radar anticollision, les transmissions de données connaissent un essor rapide grâce à la maîtrise des techniques à mettre en œuvre.

Ainsi, le développement spectaculaire notamment des communications mobiles au cours des dernières années a conduit à une recherche de technologies robustes et fiables, à des coûts relativement raisonnables dans le domaine de l'électronique.

Les études développées dans le cadre de nouveaux marchés militaires et civils sont à l'origine d'une évolution importante de tous les secteurs d'activités de l'électronique hyperfréquence. Cette évolution est essentiellement dirigée vers le choix de nouvelles technologies autorisant en particulier des densités de puissance importantes et l'optimisation des composants actifs, intégrés dans de nombreux systèmes.

Ces dernières années, les transistors MOSFET (*Metal Oxyde Semiconductor Field Effect Transistor*) ont bénéficié d'énormes investissements autant au plan de la technologie que de la publicité, reléguant les transistors bipolaires dans l'ombre à un point tel que de nombreux concepteurs considèrent le bipolaire comme une vieille technologie. Cependant les MOSFETs, malgré la miniaturisation, ne permettent pas aujourd'hui de répondre aux besoins croissants en communications liés au développement des nouvelles technologies, en particulier au développement des systèmes de grande rapidité et de grande capacité nécessitant des bandes passantes beaucoup plus larges comme par exemple les communications très haut débit au delà de 40 Gb/s, les scanners des aéroports, les radars anti collisions,.... Le développement de ces applications nécessite de disposer de composants plus rapides c'est-à-dire ayant des performances en fréquence largement supérieures à celles des MOSFETs.

Les matériaux semiconducteurs binaires du type III-V comme le GaAs (*Arséniure de gallium*), l'InP (*Phosphore d'indium*) ou le GaN (*Nitride de gallium*), offrent une très bonne alternative et un choix très varié de matériaux avec des propriétés électriques, thermiques et

optiques dépassant largement celles du silicium. Ces matériaux sont utilisés aujourd'hui dans les circuits électroniques rapides fonctionnant à des débits allant jusqu'à 80 Gb/s et voire 112 Gb/s.

Pour les applications de puissance en gamme d'ondes millimétriques, les composants MOS-HEMT/GaN qui sont des composants à hétérojonction ont montré leur capacité à répondre aux besoins de ces applications. Dans ce cadre nous nous sommes intéressés à l'étude du transistor MOSHEMT (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor High Electron Mobility Transistor*) sur substrat SiC avec empilement des diélectriques  $\text{La}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  qui a fait l'objet de nombreux travaux de recherche.

L'un des facteurs à prendre en compte lors de la conception du composant est la température. Cette dernière a une influence directe sur ses caractéristiques statiques et dynamiques ainsi que sur le vieillissement de ce composant. De ce fait, il devient alors indispensable, de prendre en compte non seulement les aspects électriques qui ne peuvent plus être considérés seuls, mais aussi les aspects thermiques dans la conception des circuits MOS-HEMT.

Ce mémoire se divise en trois chapitres :

Le premier chapitre présente les principales caractéristiques physiques, électriques et thermiques des matériaux III-N ainsi que les polarisations dans ces matériaux. Aussi, il discute les atouts de ces différents matériaux pour la réalisation des composants à hétérojonction en insistant sur les caractéristiques permettant de concevoir des transistors destinés aux applications hyperfréquences.

Le second chapitre, porte sur l'étude du transistor MOS-HEMT en termes de modélisation, en fait, il propose un modèle physico-électrique développé pour le transistor MOS-HEMT  $\text{La}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  AlGaN/GaN pour comprendre le comportement statique du composant et analyser les effets liés à l'augmentation de la température sur leurs performances statiques.

Le troisième chapitre consacré à la présentation du logiciel de simulation utilisé, il présente aussi les résultats de simulation obtenus en paramétrage statique et dynamique. Cette modélisation permet une caractérisation DC fournissant des informations sur le comportement statique du MOS-HEMT sur substrat SiC telles, ainsi que l'influence de certains paramètres du réseau, ainsi que l'influence de certains paramètres technologiques tels que l'épaisseur du diélectrique, la température du socle sur le fonctionnement des transistors.

# Chapitre I :

**Filières technologiques du High Electron Mobility  
Transistor**

# Chapitre I : filières technologiques du High Electron Mobility Transistor

## I.1 Introduction

La demande croissante de circuits de plus en plus performants, c'est-à-dire fonctionnant à des fréquences toujours plus hautes et capables de délivrer des puissances toujours plus élevées, a favorisé la création de composants dotés d'une hétérojonction (HBT, HEMT, MOS-HEMT, etc.), et plus récemment, le développement de filières technologiques à base de nouveaux matériaux semi-conducteurs à grand gap comme le GaN ou le SiC.

La modélisation des transistors à effet de champ et plus précisément le transistor MOS-HEMT constitue le thème principal de notre étude, bien comprendre le principe de fonctionnement physique et la méthode de conception de ce transistor s'avère donc primordiale. Une des nombreuses voies à l'étude pour améliorer le fonctionnement des semi-conducteurs vers les fortes puissances consiste à modifier les caractéristiques géométriques des MOS-HEMT.

Ce chapitre présente les principales caractéristiques physiques, électriques et thermiques des matériaux III-N ainsi que les polarisations dans ces matériaux. Aussi, il discute les atouts de ces différents matériaux pour la réalisation des composants à hétérojonction en insistant sur les caractéristiques permettant de concevoir des transistors destinés aux applications hyperfréquences.

## I.2 Propriétés structurales et électroniques des matériaux III-N

Les matériaux III-N présentent un intérêt fondamental pour les applications en microélectronique de puissance, haute fréquence et pour l'optoélectronique dans les domaines spectraux bleu et ultra-violet (LEDs, Lasers, Photodétecteurs), du fait de leurs exceptionnelles propriétés électroniques, physiques et optiques [1].

### I.2.1 Structure cristallographique

Le Nitrure de Gallium est l'un des matériaux semi-conducteurs formés d'éléments de la colonne III du tableau périodique des éléments (Gallium Ga, Aluminium Al, Indium In) associés à l'élément azote (N) de la colonne V. Ces matériaux, communément appelés « matériaux III-N » comme par exemple le GaN, AlN, InN et leurs alliages, cristallisent suivant

deux types de structure : la structure cubique dite blende de zinc (ZnS) et la structure hexagonale dite würtzite. Le GaN würtzite est noté h-GaN ou  $\alpha$ -GaN, le GaN cubique est noté c-GaN ou  $\beta$ -GaN. La forte ionicité des liaisons III-N fait que la phase würtzite est la plus stable du point de vue de la thermodynamique. Dans cette thèse nous nous intéressons exclusivement à cette phase. La structure de type hexagonale würtzite se compose de deux sous réseaux hexagonaux compacts, l'un contenant les atomes de gallium (Ga) et l'autre les atomes d'azote (N), interpénétrés et décalés de  $u \cdot c$  suivant l'axe  $c$ . La structure est idéale quand elle est composée de tétraèdres réguliers, ce qui est le cas lorsque, le rapport  $c / a = 3/8 = 1,633$  et  $u = 8/3 = 0,375$  [2] (Figure I.1).

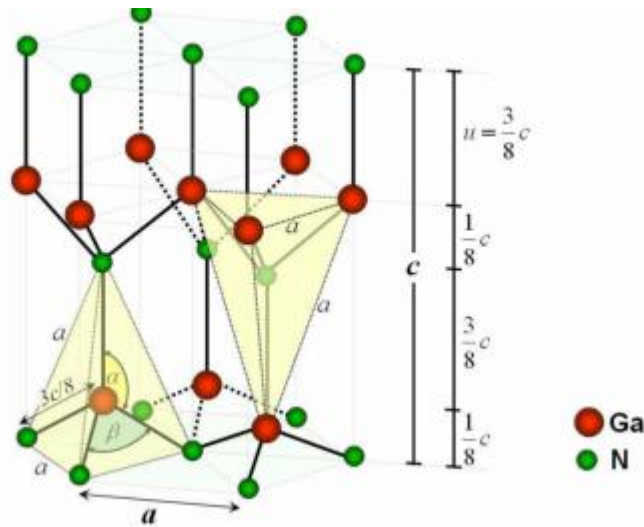
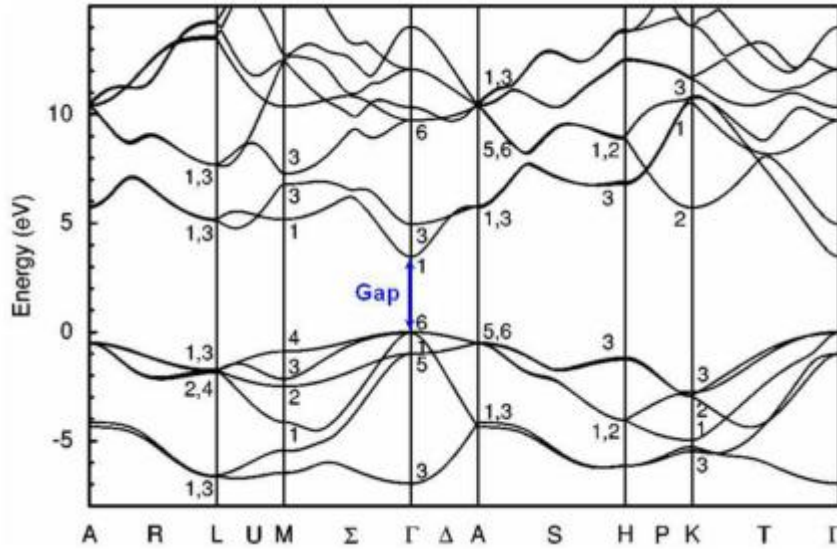


Figure I.1 : Structure hexagonale würtzite idéale de nitrure de Gallium [2]

### I.2.2 Structure de bande

La figure I.2 représente le diagramme de bandes d'énergie du GaN würtzite suivant des lignes de haute symétrie de la zone irréductible de Brillouin calculé par Empirical pseudopotential méthode. Ce diagramme montre la nature de gap direct du GaN würtzite. Le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence sont situés au centre de la zone de Brillouin. À 300 K, la largeur du gap généralement admise est autour de 3,4 eV.





**Figure I.2 :** Structure de bande de Ga würtzite selon les lignes à haute symétrie dans la zone de Brillouin [2]

### I.2.3 Densité de porteurs

Théoriquement, avec un gap de 3,4 eV, la densité de porteurs intrinsèque dans le GaN est extrêmement faible ( $\sim 10^{-6} \text{ cm}^{-3}$ ). En pratique, le matériau non intentionnellement dopé se trouve toujours de type n, avec des densités électroniques évoluant de  $10^{16}$  à  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  (suivant les modes et les conditions de croissance), résultant de défauts survenant durant la croissance (l'incorporation d'impuretés, lacunes de gallium ou d'azote, gallium en position antisite ...). Des densités résiduelles plus faibles peuvent parfois être mesurées: elles résultent alors de la compensation des impuretés donneuses par une implantation d'accepteurs profonds.

Le GaN peut également être dopé intentionnellement et de manière contrôlée. Plusieurs atomes dopants de type n (Si, Ge, O) se sont, à ce jour, révélés efficaces. Le plus couramment retenu est le silicium, dont le niveau donneur se situe à 30 meV sous la bande de conduction. On peut ainsi, de cette manière parfaitement reproductible, obtenir des dopages aussi denses que  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  [2].

Le dopage de type p est en revanche beaucoup plus difficile à réaliser. L'élément le plus approprié à ce dopage est le magnésium (Mg). Par ailleurs, la qualité cristallographique de GaN étant fortement dégradée pour des concentrations de Mg supérieures à  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$ , il est extrêmement difficile d'obtenir des couches avec des densités de trous supérieures à  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  [2].

### I.2.4 Le champ de claquage

Le champ de claquage est la valeur du champ électrique maximum que peut supporter le matériau. On peut supposer que la forte valeur de la bande interdite doit engendrer un champ maximum relativement élevé. Effectivement, si en théorie  $E_c = (E_g)^{\frac{3}{2}}$  il est estimé à 2 Mv/cm, les mesures le situent à des valeurs localisées entre 1 et 3 Mv/cm. Notons que ces valeurs sont comparables à celles qui sont obtenues dans le SiC [2].

Le tableau I.1 présente les principales caractéristiques du GaN comparées à celles des matériaux Si, SiGe, GaAs, InP, AlGaAs et AlGaA à la température  $T = 300$  K [3].

Le GaN étant un matériau à grand gap, la tension d'avalanche sera plus élevée que pour les autres matériaux (Si, SiGe, GaAs et InP). L'effet avalanche apparaît lorsque les électrons ont suffisamment de vitesse pour générer des paires électrons-trous par collisions, entraînant ainsi une multiplication des porteurs et le claquage de la jonction [4]. De plus, son champ électrique critique élevé permet de polariser les transistors à des tensions plus élevées et donc à des puissances plus fortes. Ces possibilités sont confirmées par sa conductivité thermique relativement « élevée » par rapport aux autres matériaux III-V. Tous ces éléments font de cette filière une très bonne candidate pour les applications de moyenne puissance HF.

Cependant la mobilité des électrons, dans le GaN est relativement faible ( $1000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ) mais reste suffisamment élevée pour permettre des fréquences de fonctionnement élevées. La mobilité des trous, est faible ( $<200 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ). En revanche, en comparaison avec les autres matériaux, la vitesse de saturation, est plutôt élevée, puisqu'elle est égale à  $2 \times 10^7 \text{ cm/s}$  soit le double de celle du Silicium. La fréquence de coupure des FET GaN sera donc supérieure à celle des autres filières puisque la fréquence de coupure est proportionnelle à la vitesse de saturation des porteurs.

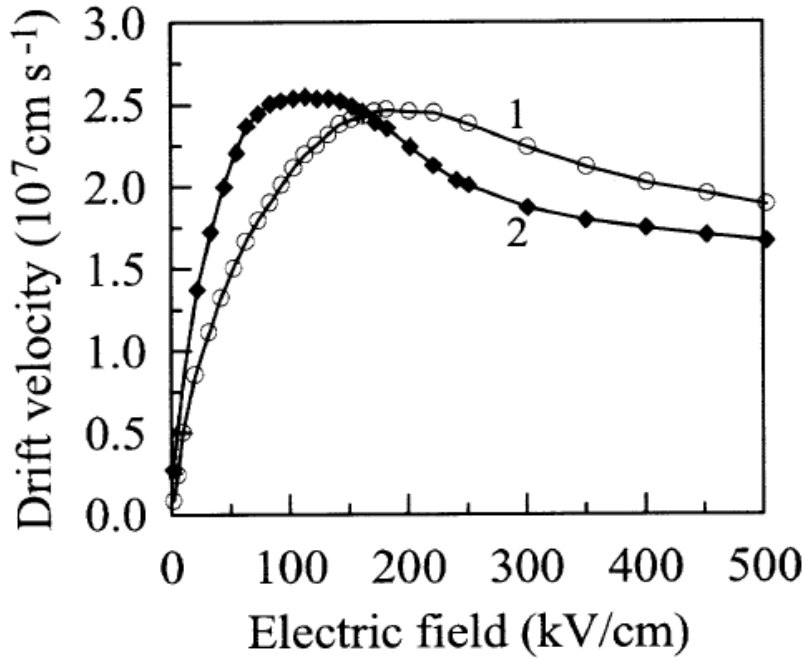
à T=300k	Si	Si <sub>1-x</sub> Ge <sub>x</sub>	GaAs	GaN	InP	Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As	Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> N
(eV)	1.12	1.12-0,41x+0.008x <sup>2</sup>	1.42	3.39	1.34	1.424+1.247x	6.026+3.39 (1-x)
$\mu_e$ (cm <sup>2</sup> .V <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> )	<1450	1450-4325x	<8500	<1000	<5400	8000-22000x+1000x <sup>2</sup>	300x+1000(1-x)
$\mu_p$ (cm <sup>2</sup> .V <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> )	<450	450-865x	<400	<200	<200	370-970x+740x <sup>2</sup>	14x+200(1-x)
V <sub>sat</sub> (cm/s)	10 <sup>7</sup>	-	10 <sup>7</sup>	2x10 <sup>7</sup>	2x10 <sup>7</sup>	-	-
k(W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	1.3	0.046+0.084x	0.55	1.3	0.68	0.55-2.12x+558x <sup>2</sup>	2.85x+1.3 (1-x)
Température de fusion (°C)	1412	1412-738x+263x <sup>2</sup>	1240	2500	1060	1240-58x+558x <sup>2</sup>	3273+2500(1-x)
Champ critique(V/cm)	3x10 <sup>5</sup>	<3x10 <sup>5</sup>	4x10 <sup>5</sup>	5x10 <sup>6</sup>	5x10 <sup>5</sup>	4x10 <sup>5</sup> à 6x10 <sup>5</sup>	1.2 à 1.6x10 <sup>6</sup>

**Tableau I.1** : Les propriétés physiques, électriques et thermiques du silicium, et quelques matériaux III-V. [3]

### I.2.5 Mobilité électronique et champ électrique critique

Une propriété électrique importante dans les semi-conducteurs est la capacité de déplacement des électrons sous l'effet d'un champ électrique, appelée mobilité électronique. La mobilité électronique dépend fortement de la qualité cristallographique du matériau. Un régime de survitesse apparaît lorsque les électrons de la vallée principale acquièrent suffisamment d'énergie pour passer dans la vallée secondaire. Dans les vallées secondaires la masse effective des électrons augmente ce qui entraîne une diminution de la vitesse des porteurs. Ce phénomène est présenté dans la figure I.3 où la vitesse des électrons est présentée en fonction du champ électrique.

Le champ critique, E<sub>cr</sub> représente le champ électrique auquel correspond une vitesse de dérive des électrons maximale. Pour le GaN, ce champ E<sub>cr</sub> est de l'ordre de 150 kV/cm.



**Figure I.3 :** Evolution de la vitesse des électrons en fonction du champ électrique, à 300K dans GaN [4]. La structure Wurtzite est représentée par la courbe 1 et la structure Zinc-Blende par la courbe 2

### I.3 Effet de polarisation

#### I.3.1 La polarisation spontanée

Il existe, dans le GaN de type wurtzite, une polarisation macroscopique non nulle. Cette polarisation est appelée polarisation spontanée. Elle résulte du non superposition des barycentres de charges positives et négatives. En effet, l'électronégativité de l'azote est plus importante que celle du gallium, la répartition du nuage électronique le long d'une liaison Ga-N est donc dirigée vers l'atome d'azote. On peut considérer que l'atome d'azote présente une charge  $-Q$  et l'atome gallium une charge  $+Q$ . Chaque liaison Ga-N présente donc un moment dipolaire.

La figure I.4 présente la contribution des différents moments dipolaires autour d'un atome de gallium. Leur somme est non nulle à cause de la non idéalité de la structure Wurtzite GaN ( $c/a < 3/8$ ). Elle forme un dipôle élémentaire parallèle à l'axe  $c$  et orienté de l'atome d'azote vers l'atome de gallium. Ces dipôles 5 élémentaires s'ajoutent pour donner dans la structure une polarisation spontanée macroscopique du matériau.

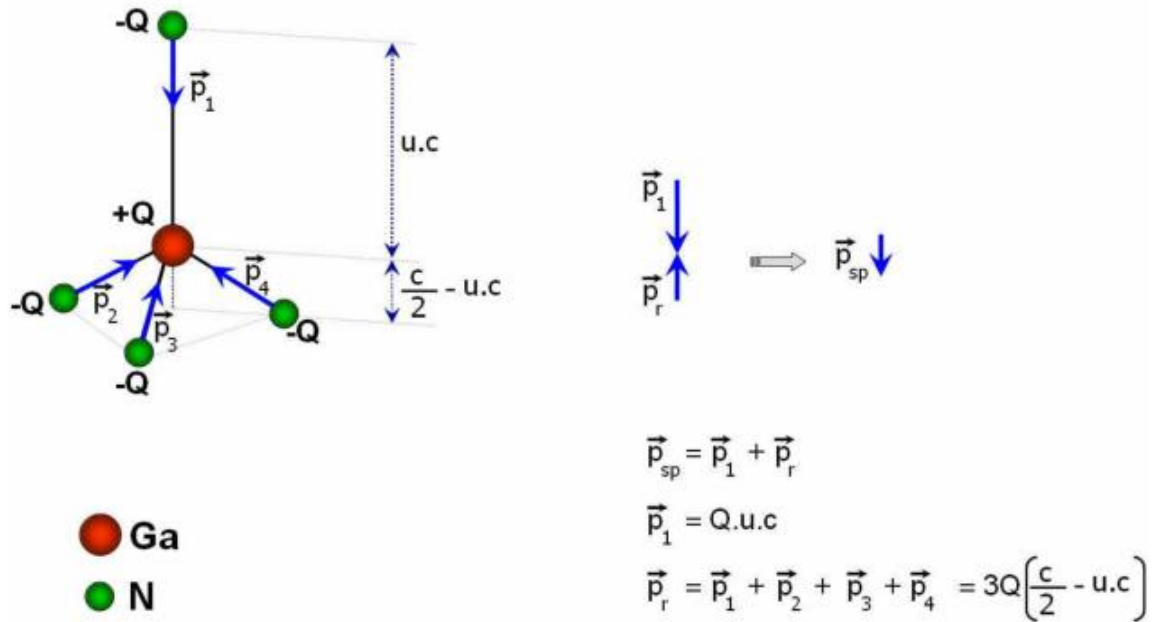


Figure I.4 : Contribution des différents moments dipolaires pour la génération de la polarisation spontanée [2]

La structure würtzite n'est pas symétrique par rapport au plan (0001). En effet, les directions [0001] et [000 $\bar{1}$ ] ne sont pas équivalentes. Pour le nitrure de gallium, il existe deux arrangements possibles des atomes de gallium et d'azote lors de la croissance. Dans le cas où la liaison orientée Ga-N pointe vers la surface, on dit que l'on a une polarité gallium ou face Ga (Figure I.5a). Dans le cas contraire, on a une polarité azote ou face N (Figure I.5b). Il convient de noter que la polarité d'une couche ne présage pas de la nature des atomes en surface. Par exemple, une couche à polarité gallium peut aussi bien se terminer par des atomes de gallium que par des atomes d'azote en surface.

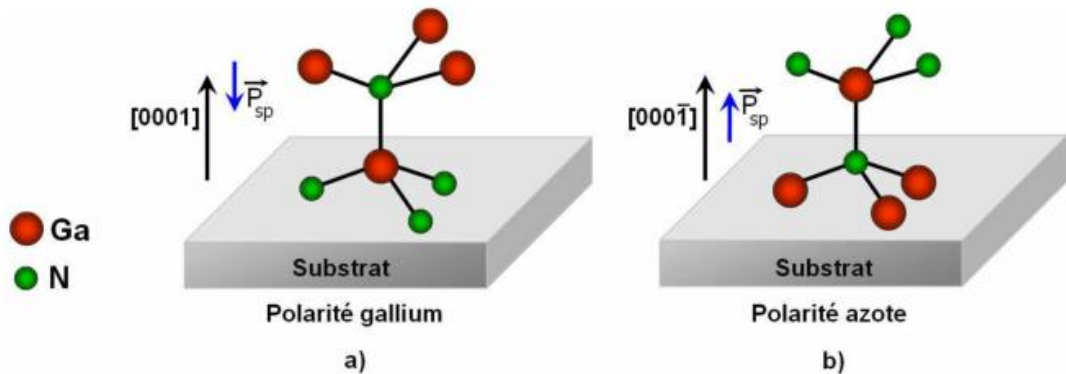
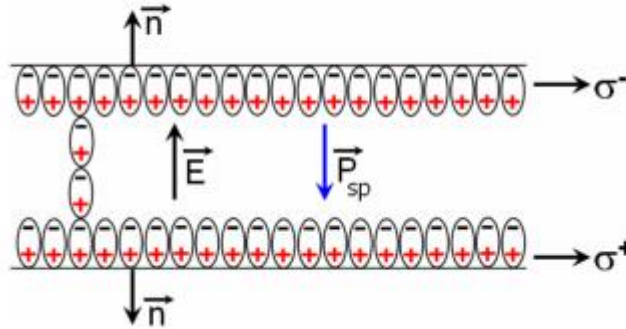


Figure I.5 : Polarités gallium et azote dans Ga hexagonal

A l'intérieur du matériau, les charges liées se compensent. Par contre, à la surface, la séparation des charges du dernier plan de dipôle n'est plus compensée, ce qui va faire apparaître des plans de charges de signe opposé d'un côté et de l'autre du cristal comme il est illustré dans la figure I.6.



**Figure I.6 :** Génération d'un champ électrique  $E$  et de la charge surfacique par la polarisation spontanée dans un cristal Ga würtzite polarité gallium.

Une polarisation  $\vec{p}$ , quelle que soit son origine, induit à la surface du cristal une densité surfacique de charge donnée par:

$$\sigma = \vec{p} \cdot \vec{n} \quad (\text{I.1})$$

Où  $\vec{n}$  est le vecteur unitaire normal à la surface et orienté vers l'extérieur.

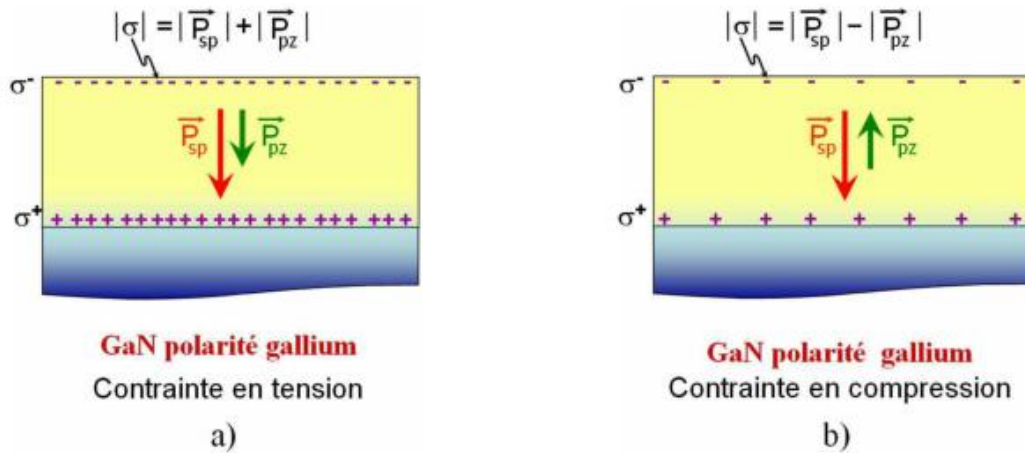
La valeur de la polarisation spontanée du GaN en polarisation gallium est estimée à  $-0,029 \text{ cm}^{-2}$ , ce qui correspond à un champ électrique de l'ordre  $3 \text{ Mv/cm}$  et une densité surfacique de charge de  $1,8 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ .

### I.3.2 La polarisation piézoélectrique

Le GaN est souvent élaboré sur saphir, SiC ou Silicium. Le désaccord de maille entre le GaN et son substrat impose une contrainte (extension ou compression) dans le plan de base des couches GaN. La déformation de la maille du GaN entraîne un déplacement des barycentres des charges et donc une modification de la polarisation spontanée. Cet effet peut être considéré comme l'apparition d'une polarisation dite "piézoélectrique" (Ppz) qui renforce ou affaiblit la polarisation spontanée.

Dans le cas du GaN polarité gallium, lorsque le matériau subit une déformation en tension biaxiale dans le plan perpendiculaire à l'axe de croissance, la vectrice polarisation

piézoélectrique est orientée dans le même sens que le vecteur polarisation spontanée. La polarisation dans le cristal et la charge surfacique augmentent (voir figure I-7a). En revanche, si le matériau subit une déformation en compression bi axiale dans le plan perpendiculaire à l'axe de croissance, la vectrice polarisation piézoélectrique est orientée dans le sens opposé du vecteur de polarisation spontanée. La polarisation dans le cristal et la charge surfacique 7 diminuent (Figure I.7b). Ceci sera opposé pour le cas de polarité N.



**Figure I.7 :** Effet de contrainte sur la polarisation et la charge surfacique d'une couche Ga polarité gallium.

## I.4 Propriétés de diélectriques $\text{Al}_2\text{O}_3$ et $\text{La}_2\text{O}_3$

Le rôle principal d'un diélectrique est d'empêcher le passage du courant lorsqu'on le soumet à une tension électrique. Cependant ce diélectrique ne peut supporter des tensions croissantes indéfiniment, à une certaine tension il se produit un phénomène de claquage, ou la substance perd ses propriétés isolantes.

### I.4.1 L'Alumine $\text{Al}_2\text{O}_3$

L'alumine ou oxyde d'aluminium a pour  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , lorsqu'elle est sous la forme anhydre. Elle présente un polymorphisme structural remarquable avec les variétés  $\alpha$ -,  $\gamma$ -,  $\delta$ -,  $\theta$ - $\kappa$ -,  $\epsilon$ -,  $\eta$ -,  $\chi$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Sa bonne tenue mécanique à haute température, sa dureté élevée, son excellente résistance à l'usure, sa grande résistivité électrique et son inertie chimique importante font de l'alumine un matériau utilisé dans des domaines très variés.

On la trouve à l'état naturel dans la bauxite, sous forme hydratée : monohydrate ( $\text{Al}_2\text{O}_3(\text{H}_2\text{O})$ ) et tryhydrate ( $\text{Al}_2\text{O}_3(\text{H}_2\text{O})_3$ ). On la trouve aussi comme minerai sous forme de corindon ou alumine- $\alpha$  ( $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

L'alumine est un composé très dur : seul le diamant et quelques produits de synthèse ont une dureté supérieure. A température ambiante, elle est inattaquée par les composés chimiques courants. Elle fond à plus de 2000 °C. L'alumine très pure peut être utilisée jusqu'à 1700°C. Elle est étanche aux gaz jusqu'à 1300°C [6]. La combinaison d'un coefficient thermique élevé, d'une faible dilatation thermique et d'une résistance élevée à la compression permet une bonne tenue aux chocs thermiques. On l'utilise donc comme matériau réfractaire, par exemple pour le revêtement de fours ou comme creusets, tubes et gaines de thermocouples soumis à des chocs thermiques. L'alumine offre également une bonne isolation électrique à température élevée et une bonne résistance à l'usure, ce qui permet de l'utiliser comme matériau d'outillage.

Le tableau ci-dessous présente quelques propriétés physiques, mécaniques, électriques et thermiques de l'alumine:



Propriété	Valeurs
<b>Propriétés physiques</b>	
- Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	3.9
- Poids moléculaire (g/mole)	102
-Température maximale d'utilisation sous air (°C)	1700-1800
<b>Propriétés mécaniques</b>	
- Module d'Young (GPa)	300-400
- Coefficient de Poisson	0,25
- Résistance à la flexion (MPa)	380
- Ténacité (Mpa.m <sup>1/2</sup> )	2-3
<b>Propriétés électriques</b>	
- Constante diélectrique	-9-10
- Résistivité électrique à 20 °C (Ohm.cm)	-> 1014
- Résistance diélectrique (kV/mm)	-10-20
<b>Propriétés thermiques.</b>	
-Chaleur spécifique (J/K/kg)	-900
- Conductivité thermique (W/m/K)	
• à 20°C	26-35
• à 500 °C	10-15
- Dilatation linéaire (x10 <sup>-6</sup> ) de 20 à 1000 °C	8-9
- Point de fusion (°C)	2050

**Tableau I.2 :** Quelques propriétés: mécaniques, physiques, thermiques, électriques pour l'alumine [6].

## **I.4.2 L'oxyde d'aluminium $\text{La}_2\text{O}_3$**

L'alumine est l'un des matériaux efficaces et largement utilisés plus économique dans la famille des céramiques techniques. Les matières premières à partir de laquelle cette haute performance en céramique de qualité technique est faite sont facilement disponibles et à un prix raisonnable, ce qui entraîne une bonne valeur pour le coût des formes de transformation de l'aluminium. Avec une excellente combinaison de propriétés et un prix attractif, il n'est pas surprenant que grains fins de qualité technique alumine a une très large gamme d'applications telles les applications hautes fréquences et hautes température. En effet, il possède une bonne conductivité thermique et une haute résistance et la rigidité.

## **I.5 Les filières technologiques du transistor HEMT**

### **I.5.1 Historique du transistor HEMT**

Le transistor HEMT (pour High Electron Mobility Transistor) encore appelé dans la littérature TEGFET (Two Electron Gas Field Effect Transistor) ou MODFET ( Modulation Doped Field Effet Transistor), ou encore SDHT (Selectively Doped Heterojunction Transistor), a été conçu et réalisé simultanément au sein de deux laboratoires, par Thomson en France et par Fujitsu au Japon en 1980.

En 1985, le HEMT est présenté comme un composant micro-onde unique ayant les plus faibles caractéristiques en bruit au monde. Initialement, ce transistor était utilisé dans un radiotélescope à Nobeyama, Japon, qui présente un diamètre de 45 mètres. En refroidissant le composant à la température de l'hélium liquide, il est possible de capter un signal provenant d'une molécule interstellaire située à mille années lumières de la Terre. Plus tard, le HEMT sera implanté dans des récepteurs de télévision pour capter les signaux des satellites géostationnaires (36000 km d'altitude). Puis petit à petit, ce composant se fera une place dans notre quotidien. Le HEMT constitue une évolution majeure du MESFET (Fet à jonction métal/semi-conducteurs) et a pris le pas sur ce dernier depuis le début des années 1990 [7].

### **I.5.2 Evolution de HEMT vers une structure a base de GaN**

Les transistors HEMT en Nitrure de Gallium possèdent de nombreux avantages. Très utilisé dans le domaine de télécommunications. Le HEMT GaN est très apprécié pour ses propriétés semi-conductrices intéressantes. En effet, Ce matériau présente une énergie de bande interdite jusqu'à trois fois plus élevée par rapport au GaAs. D'autre part, le GaN

présente une bonne conductivité thermique, sa haute température de fusion ainsi que l'importante vitesse de saturation des électrons. L'ensemble de ces caractéristiques en font un candidat de choix pour les applications de puissance hyperfréquence.

Le graphe de la figure I.8 montre les plages d'applications puissances-fréquences que peuvent couvrir les différentes filières. On observe que la filière nitrure de gallium offre actuellement le meilleur potentiel. Elle permet d'amplifier une puissance importante RF jusqu'à environ 80 GHz ce qui justifie les nombreux travaux de recherche menés actuellement dans ce domaine.

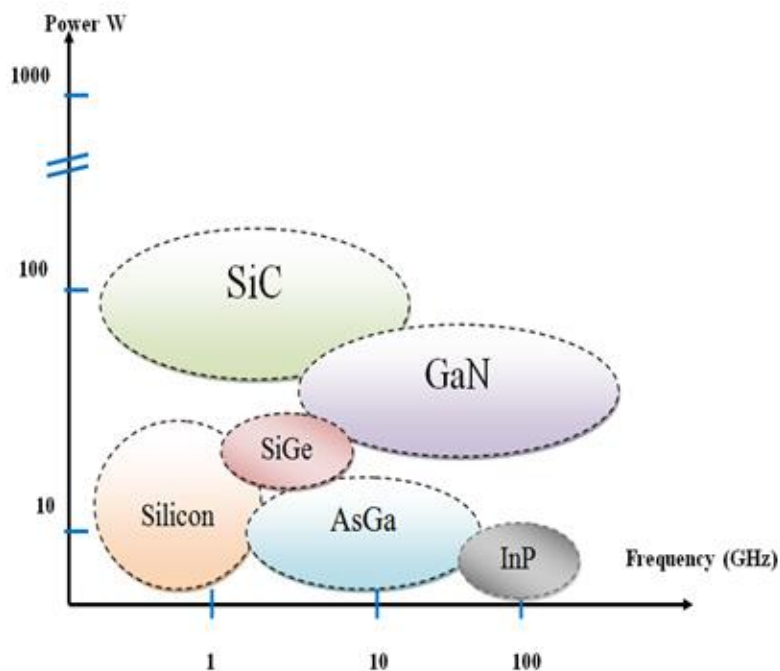


Figure I.8 : Performances fréquences pour différentes filières [7]

### I.5.3 Etude du transistor HEMT à base de GaN

#### I.5.3.1 Présentation du HEMT en GaN

Le transistor HEMT apparaît comme une évolution majeure du MESFET (pour Metal Semiconductor Field Effect Transistor). La différence est que le HEMT utilise une hétérojonction, c'est à dire une jonction entre des matériaux ayant des bandes d'énergie différentes, de manière à faire passer les électrons constituant le courant drain-source dans un semi-conducteur non-dopé, afin de diminuer le temps de transit et donc augmenter les performances en fréquence. La vitesse des électrons est en effet d'autant plus grande que le dopage du semi-conducteur est faible, car la dispersion d'impuretés ionisées est réduite.

Le transistor HEMT  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N} / \text{GaN}$ , est un dispositif à effet de champ de la filière nitrures.

Les principaux avantages du HEMT  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N} / \text{GaN}$  par rapport à ses concurrents sont:

- Un gap important.
- Tension de claquage élevé.
- Une conductivité thermique conséquente.
- Meilleure mobilité électrique.

Le but de la structure d'un HEMT est de séparer les électrons libres de la couche de semi-conducteur contenant des impuretés afin d'augmenter la mobilité des électrons. Pour cela un matériau GaN à gap relativement faible est mis en contact avec le matériau ternaire  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  à grand gap.

### I.5.3.2 Définition de la structure par couche du transistor HEMT GaN

La structure d'un transistor de type HEMT en Nitrure de Gallium est très semblable à celle d'un transistor dont le matériau semi-conducteur est l'Arséniure de Gallium malgré plusieurs différences nettes. On présente une structure typique de transistor HEMT  $\text{AlGaN}/\text{GaN}$  à la figure I.9.

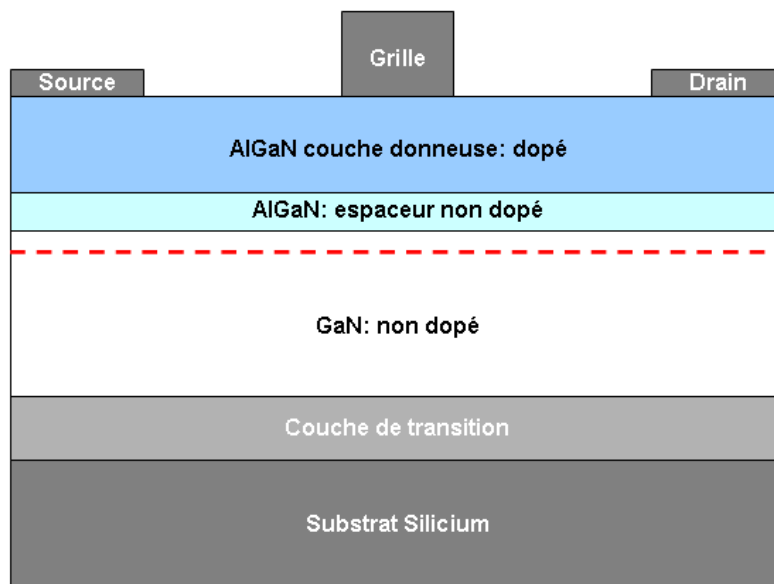
Ce transistor est constitué de trois électrodes : la grille, la source et le drain. Le contact lié au dépôt de l'électrode de grille est un contact de type Schottky. Quant aux électrodes de source et de drain, il s'agit de contacts ohmiques.

C'est un transistor dont la structure est horizontale. Chacune des couches le constituant n'est pas dopé ou ne l'est pas intentionnellement. C'est pourquoi il faudra quand même tenir compte d'un dopage résiduel présent dans chacune des couches semi-conductrices du transistor HEMT GaN.

A la lumière de la figure I.9, on note principalement trois couches principales :

- Les électrodes de source et de drain ne sont pas en surface. Elles sont directement encastrées dans la structure pour être en contact avec le canal d'électrons.
- La barrière  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  fait quelques dizaines de nanomètres.  $x$  représente la fraction molaire ou pourcentage en Aluminium du composé ternaire. La différence de gaps entre ce composé ternaire et le matériau en Nitrure de Gallium crée une hétérojonction dans laquelle les électrons seront confinés afin de constituer le gaz bidimensionnel d'électrons plus connu sous le nom de 2DEG.

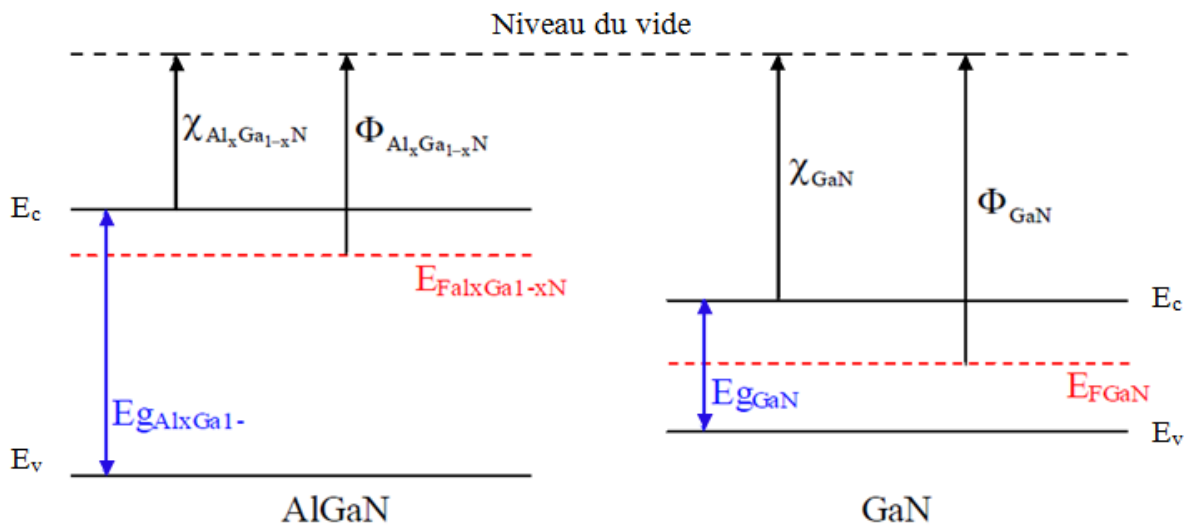
- La couche de nitrure de gallium est placée juste au-dessous de la couche ternaire. Elle contient le 2DEG d'électrons dans sa partie supérieure, répartis sur une épaisseur de quelques nanomètres.
- Afin de constituer le substrat, un support en silicium peut être utilisé. C'est sur celui-ci que sera réalisé le composant.
- L'utilisation d'un buffer en nitrure d'Aluminium placé entre le substrat et la couche de GaN sera requise de manière à passer graduellement de l'accord de maille du GaN vers celui du Si et inversement (cela n'est pas précisé sur la figure mais c'est une étape très importante dans la réalisation du composant).
- Enfin, on pourra avoir recours à l'utilisation d'une couche supplémentaire dite de passivation afin d'isoler la barrière de l'extérieur. En effet, le matériau ternaire possède de l'aluminium fortement oxydable quand il est en contact avec l'air. Afin d'éviter cela et conférer au composant un fonctionnement optimal, on dépose une couche semi-conductrice composée de GaN ne possédant pas d'Aluminium. Cela n'est pas indiqué sur la figure. Ce n'est pas une étape systématique mais elle est fortement conseillée.



**Figure I.9:** Structure d'un transistor HEMT AlGaIn/GaN [4]

### I.5.4 Diagramme des bandes de la structure HEMT AlGaN/GaN et fonctionnement de celui-ci

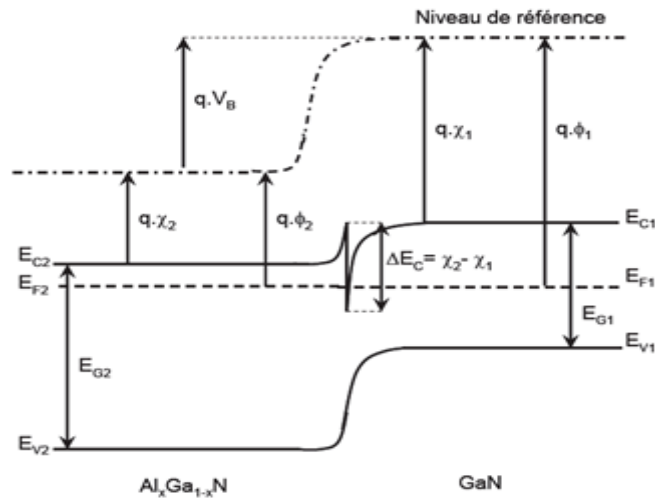
On dépose une couche de matériau ternaire  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  sur une couche de GaN. Ces deux matériaux ont des largeurs de bande interdite différentes. Dans notre structure, le matériau ternaire possède le plus grand gap, il est de 3.96 eV pour  $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{N}$ . Le GaN, quant à lui, possède un gap plus faible : 3,39 eV. C'est la juxtaposition de ces deux couches qui crée la discontinuité des bandes de conduction et de valence au niveau du diagramme des bandes. Elle est présentée aux figures I.10.



**Figure I.10 :** Diagrammes des bandes d'énergie des matériaux constituant l'HEMT GaN (pris séparément) à l'équilibre thermodynamique [7].

La différence de gaps est ici flagrante, le puits de potentiel sera donc situé du côté du matériau à faible gap comme nous le montre la figure I.11.

D'après les règles développées en 1960 par R.L. Anderson [7] et qui permettent de construire les diagrammes énergétiques associés aux structures à hétérojonctions, les niveaux de Fermi des matériaux doivent s'aligner. Cela occasionne une discontinuité des bandes de valence et de conduction étant donné que le niveau de référence (niveau du vide) doit rester rigoureusement continu. Aussi, les bandes de conduction, de valence et du vide doivent rester parallèle entre elles tout en respectant les règles décrites ci-dessus. On obtient alors le diagramme des bandes ci-dessous.



**Figure I.11 :** Diagrammes des bandes après jonction des deux couches qui constituent l'HEMT AlGaN/GaN l'équilibre thermodynamique [7].

Comme le HEMT génère un bruit basse fréquence élevé dû aux centres DX. En conséquence pour satisfaire aux besoins sans cesse croissants de montée en fréquence, l'idée de base a été de remplacer le canal GaAs par un autre matériau autorisant une vitesse des électrons à fort champ électrique la plus élevée possible : InGaAs. Les progrès technologiques en matière d'épitaxie ont donc donné naissance hétérojonction: le HEMT pseudomorphique (PHEMT).

## I.6 Le transistor HEMT pseudomorphique (PHEMT)

Les transistors à effet de champ pseudomorphiques GaAs (ou pHEMTs pour pseudomorphic HEMTs) représentent la technologie de HEMT la plus disponible actuellement, cette filière était destinée aux applications radars militaires car les PHEMTs GaAs proposent de meilleures performances en terme de bruit, en revanche il est limité par la mauvaise conductivité thermique du GaAs [3]. Le terme pseudomorphique provient du fait que le canal du composant est formé en InGaAs, avec une concentration d'Indium allant de 20 à 30 %. Cette couche d'InGaAs est intercalée entre les couches AlGaAs et GaAs du HEMT. En terme de diagramme de bande, la discontinuité de la bande de conduction à l'interface AlGaAs/InGaAs est plus large que dans le cas AlGaAs/GaAs. Le puits de potentiel est donc plus large que pour la structure précédente, et donc le courant dans ce transistor peut être plus élevé. De plus, la vitesse des électrons dans l'InGaAs (non dopé) est également plus élevée que dans le GaAs [8].

Cependant, la constante de maille de l'InGaAs n'est pas parfaitement adaptée à celles de GaAs et de l'AlGaAs, et la formation du canal doit donc se faire de manière contrainte. Néanmoins, à condition que la couche du canal soit suffisamment fine, le canal peut être contraint (canal pseudomorphique) à la constante de maille du reste de la structure sans risquer de dislocation.

Ce type de transistor existe aussi sur substrat InP, pour des applications très haute fréquence. Une couche d'InGaAs est alors intercalée entre une couche d'InAlAs et une couche d'InP qui ont un gap plus grand. Etant donné la structure de bande de ce type de composant, la vitesse effective et la mobilité des porteurs augmentent avec la concentration d'indium. Une forte concentration d'indium de 53 % conduit à une longueur de maille identique à celles de l'InAlAs et de l'InP, et dans ce cas le canal n'est pas contraint. Il s'agit de HEMTs InP à maille adaptée, qui ont une transconductance et une fréquence de transition maximale significativement améliorées. En revanche, les tensions d'avalanche de ces composants ne sont pas très élevées. Des améliorations supplémentaires de la transconductance et de la fréquence de transition maximale peuvent être apportées en augmentant encore la concentration d'indium dans le canal : avec une concentration d'indium de 65 %, on a alors de nouveau un HEMT pseudomorphique, mais les effets d'avalanche compromettent les performances de ces composants pour des applications pratiques [8].

### I.6.1 Structure d'un PHMT conventionnel

La réalisation de circuits intégrés microondes monolithiques (MMIC) à des fréquences supérieures à 60 GHz a nécessité d'étudier d'autres structures à base de couches contraintes sur GaAs avec un canal InGaAs (0,15 x 0,35) [7]. Dans ces structures le canal est réalisé par une couche mince d'InGaAs, un matériau à faible gap (inférieur à celui de l'AsGa) ce qui permet d'augmenter les dimensions du puits de potentiel. De plus, la vitesse des électrons dans l'InGaAs (non dopé) est plus importante que dans l'AsGa ce qui permet de très hautes fréquences de travail. La structure d'un PHEMT est représentée ci-dessous (Figure 12).



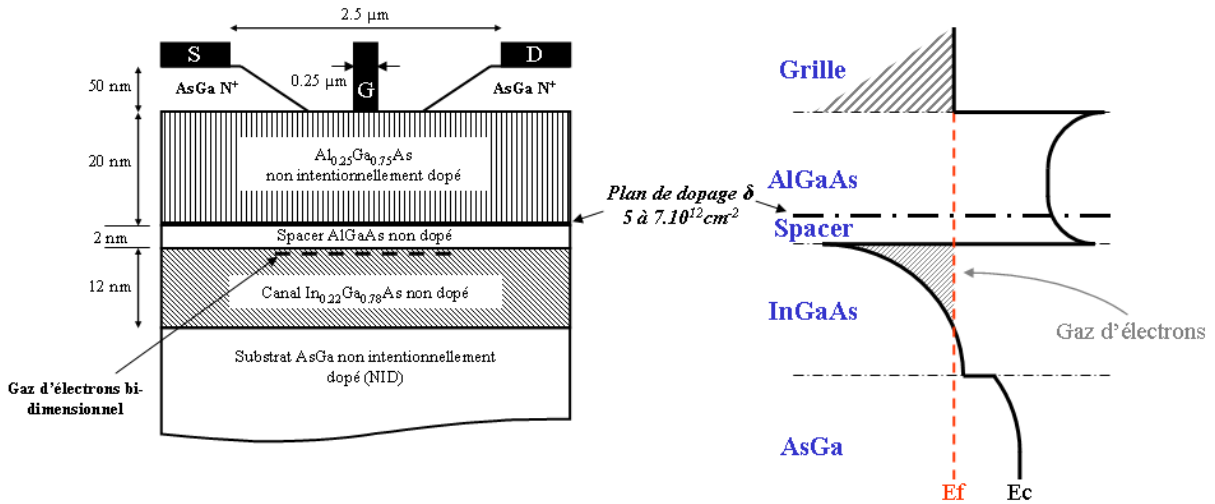


Figure I.12 : Technologie PHEMT [4].

## I.7 Le transistor HEMT AlInAs/GaInAs métamorphique sur GaAs

Pour pallier les inconvénients des filières de matériaux adaptés en paramètres de maille, des structures métamorphiques ont été développées pour réaliser de HEMTs AlInAs/GaInAs sur substrat GaAs. Les épitaxies métamorphiques permettent de réaliser des structures de transistors de bonne qualité cristallographique bien que présentant un paramètre de maille notablement différent de celui du substrat sur lequel elles sont déposées.

La filière métamorphique (M-HEMT) utilise des matériaux sur un substrat de paramètre cristallin différent. On réalise ainsi la croissance d'une couche sacrificielle (10 à 20 nm) où se produit la relaxation de contraintes par formations de dislocations [8]. L'avantage d'une telle filière est de pouvoir faire croître des hétéro-structures AlInAs/GaInAs sur un substrat GaAs. L'utilisation de GaAs comme substrat permet d'avoir un composant moins cher et qui peut être fabriqué avec des wafers (GaAs) de grands diamètres contrairement aux wafers InP qui sont plus fragiles. Des détails sur l'hétéro-structure AlInAs/GaInAs seront données en Annexe A.

La figure I.13 représente la structure multicouche du HEMT métamorphique (M-HEMT)  $\text{Al}_{0.71}\text{In}_{0.29}\text{As} / \text{Ga}_{0.70}\text{In}_{0.30}\text{As}$  non contraint sur GaAs.

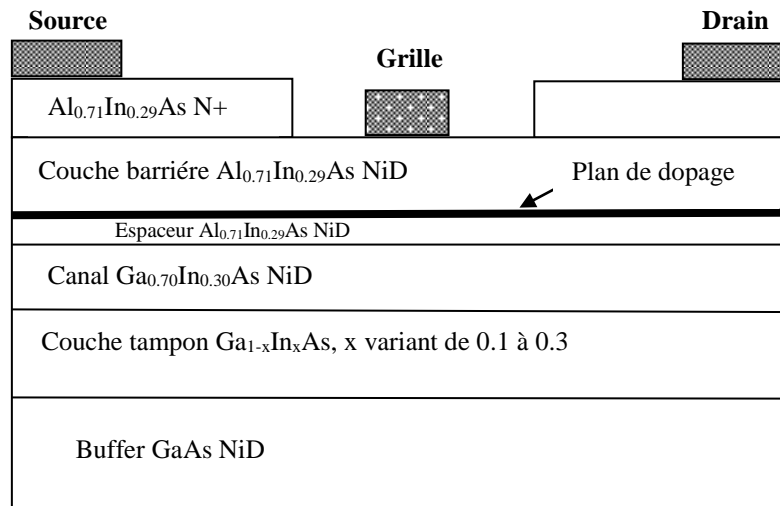
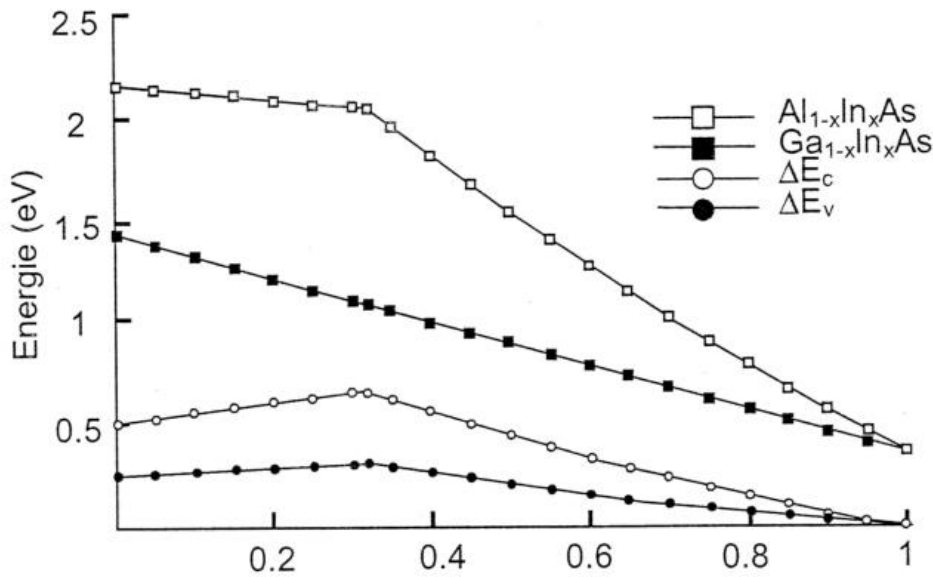


Figure I.13 : Structure du HEMT métamorphique [9].

Le principe de cette approche consiste à insérer entre un substrat de paramètre de maille cristallin  $a_1$  et une couche active de paramètre  $a_2$ , une couche tampon « métamorphique » qui permet par la génération contrôlée de dislocations due au désaccord de maille de passer de  $a_1$  à  $a_2$ . La couche tampon  $Ga_{1-x}In_xAs$  présente un taux d'indium graduel (de 10 à 30 %) et une épaisseur comprise entre 0,5 et 1  $\mu m$  qui va « absorber » les 2 % d'écart de maille atomique qui existe entre les matériaux GaAs et  $Ga_{0,7}In_{0,3}As$ . De ce fait, le canal est complètement relaxé [10]. Pour les applications de puissances, un taux d'indium de 30 % environ permet d'obtenir des discontinuités de bandes de conduction et de valence maximales de 0,7 eV et 0,35 eV respectivement ainsi qu'une largeur de bande interdite de 2 eV pour la couche barrière [11]. L'intérêt principal de cette technologie est de réaliser des dispositifs de puissance ayant des performances comparables à des HEMTs sur substrat InP avec le coût et le rendement comparables à ceux de la technologie PHEMT sur substrat GaAs .

D'autres structures utilisent l'antimoine Sb (AlSb/InAs), le canal du transistor est constitué de InAs qui a une énergie de gap (0.36 eV) plus faible que l'InGaAs (0,72 eV) tandis que la vitesse de saturation pour les électrons dans le cas de InAs ( $4.10^7$  cm/sec) est plus grande que dans le cas de InGaAs ( $2.7.10^7$  cm/sec). Cette différence permet d'avoir des transistors de fréquences de transition plus élevées [12].

La figure I.14 montre l'évolution de la largeur de bande interdite  $E_g$  et de la discontinuité de bande de conduction  $\Delta E_c$  et de valence  $\Delta E_v$  en fonction du taux d'indium  $x$  dans l' $Al_{1-x}In_xAs$  et  $Ga_{1-x}In_xAs$  :



**Figure I.14 :** Evolution de la largeur de la bande interdite  $E_g$  et de la bande de conduction  $\Delta E_c$  et de valence  $\Delta E_v$  en fonction du taux d'Indium [9]

La structure MHEMT utilise une hétérojonction de type  $In_{0,40}Al_{0,60}As/In_{0,40}Ga_{0,60}As$ .

- **par rapport à la filière pseudomorphique  $Al_{0,20}Ga_{0,80}As/In_{0,20}Ga_{0,80}As$  sur GaAs**
  - L'augmentation à 40% du taux d'indium dans le canal en l'absence de contrainte doit entraîner une amélioration des transports (meilleure mobilité, meilleure vitesse des électrons) et des performances hyperfréquences des transistors.
  - L'augmentation des discontinuités de conduction  $\Delta E_c$  et de valence  $\Delta E_v$  doit d'une part réduire le courant de grille de trous résultants de l'ionisation par impact et d'autre part augmenter le courant maximum généré par la structure.
  
- **Par rapport à la filière l'  $In_{0,60}Al_{0,48}As/In_{0,53}Ga_{0,47}As$ , adaptée en maille sur InP**
  - L'augmentation de la largeur de bande interdite de la barrière en  $Al_{0,40}In_{0,60}As$  (1,72eV) améliore la barrière Schottky
  - Un canal en  $Ga_{0,47}In_{0,53}As$ , avec un gap augmenté à 0,75 eV réduit l'ionisation par impact
  - L'augmentation des discontinuités de bande de conduction et de valence doit d'une part augmenter le courant maximum généré par la structure.

### I.7. 1 Paramètres clés du transistor

Les performances des MHEMTs peuvent être estimées à partir de quelques grandeurs électriques importantes qui les caractérisent. Les HEMT Métamorphiques peuvent être utilisés comme driver d'un modulateur .Ils doivent donc posséder une forte transconductance, une faible conductance de sortie, une fréquence de transition et une fréquence maximale d'oscillation élevée, aussi une bonne tenue en tension.

- **Fréquence de coupure**

La fréquence de coupure, d'une manière générale, qualifie la rapidité du transistor. Elle est définie comme la fréquence au-delà de laquelle le gain est inférieur à un.

On distingue deux fréquences de coupure.  $f_t$  est la fréquence de coupure du gain en courant et  $F_{max}$ , la fréquence de coupure du gain en puissance. La fréquence de coupure du gain en courant et  $F_{max}$ , la fréquence de coupure du gain en puissance. La fréquence de coupure intrinsèque du gain en courant dépend de la structure physique interne du composant. On peut approximer cette fréquence de coupure en fonction de la longueur de grille et de la vitesse moyenne des électrons.

$$f_t - int = \frac{1}{12 * \pi * T_{tr}} = \frac{V_{moy}}{2 * \pi * L_g} \quad (I.2)$$

On peut également l'exprimer en fonction des éléments petits signal:

$$f_t - int = \frac{G_m}{2 * \pi * (C_{gs} + C_{gd})} \quad (I.3)$$

$G_m$ : La transconductance intrinsèque

$G_d$ : La conductance de sortie intrinsèque

La fréquence de coupure extrinsèque du gain en courant est bien sur mesurée réellement, mais on peut au 1er ordre l'approximer par la relation suivante :

$$F_t - ext = \frac{G_m}{2 * \pi * (C_{gs} + C_{gd}) * (1 + G_m + R_s)} \quad (I.4)$$

La fréquence de coupure  $F_{max}$ , s'exprime à partir des paramètres intrinsèques du schéma petit signal, de la façon suivante:

$$F_{max} = \frac{F_t}{2 * \sqrt{(R_g + R_i + R_s) * (G_d + G_m * \frac{C_{gd}}{C_{gs}})}} \quad (I.5)$$

$R_g, R_i, R_s$  sont les résistances de grille, d'entrée et de source.  $C_{gd}$  est la capacité grille-drain et  $C_{gs}$  la capacité grille -source.

La fréquence de coupure en puissance est donc très sensible aux éléments parasites qui entourent le cœur du transistor.

- **Transconductance**

La transconductance est une grandeur essentielle du transistor. Elle traduit la capacité à commander le courant circulant dans le canal. La densité de charge est contrôlée par le potentiel de la grille, et l'idéal est d'obtenir la meilleure modulation de courant possible, par une variation de tension de grille la plus possible.

$$G_m \left( \frac{\partial I_{ds}}{\partial V_{gs}} \right) V_{ds} \quad (I.6)$$

- **Conductance de sortie**

La conductance de sortie caractérise le transistor en fonctionnement saturé. Elle mesure les variations du courant de drain par rapport aux variations de tension de drain, à  $V_{gs}$  constant:

$$G_d \left( \frac{\partial I_{ds}}{\partial V_{ds}} \right) V_{gs} \quad (I.7)$$

Un transistor parfait se comporterait comme une source de courant idéale. C'est dire que le niveau du courant de sortie serait indépendant de la tension.

- **Tension de claquage**

Les tensions de claquage du composant sont très importantes, car ce sont elles qui vont déterminer la tension de sortie maximale que pourra fournir le transistor. En fonction de ce paramètre, plusieurs choix sur le type d'étage amplificateur peuvent être faits (Cascade ou non)

### 1.7.2 Influence des paramètres technologiques et de processus sur les grandeurs caractéristiques des transistors

Pour augmenter la transconductance intrinsèque  $G_m$ , il est nécessaire:

- de réduire la longueur de grille  $L_g$ ,
- d'augmenter  $N_s$
- d'améliorer les propriétés électroniques du canal
- de décroître la distance  $\alpha$  entre la grille et le canal pour améliorer le facteur de forme  $L_g / \alpha$

Pour diminuer la capacité d'entrée  $C_{gs}$  et la capacité de contre réaction  $C_{gd}$ , ainsi que les capacités parasites, afin d'améliorer la fréquence de coupure extrinsèque, il est nécessaire:

- de réduire l'allongeur de grille  $L_g$
- d'augmenter la distance entre la grille et le canal
- d'augmenter la hauteur du pied de grille (distance entre le chapeau de grille et le canal)

- de réduire le surplomb du chapeau
- d'éloigne le cap dopé de grille coté drain, afin de déserrer le canal sur une grande distance coté drain

Pour diminuer la conductance de sortie  $G_d$  il faut:

- avoir une excellente qualité de couche tampon
- maintenir un facteur de forme acceptable  $L_g/$  tout en maintenant une avalanche drain/grille acceptable
- répartir le champ électrique sur une distance suffisante pour limiter l'ionisation par impact (augmentation de la distance entre la grille et le bord du recès dopé)

Pour diminuer la résistance de source  $R_s$ , pour augmenter la fréquence de coupure extrinsèque entre autre il est essentiel:

- d'avoir une courte distance entre la source et la grille (en particulier au niveau du recès)
- d'utiliser un grand développement de grille
- d'avoir un bon matériau en terme de mobilité électronique
- d'avoir une couche de contact très conductrice pourvu que l'on utilise une structure recès permettant d'éliminer cette couche au voisinage de la grille, en particulier du coté drain afin de réduire les capacités parasites tout en maintenant un faible cap pour minimiser la taille du recès entre la source et la grille

Pour augmenter la tension de claquage en mode  $V_{br-off}$  il faut :

- augmenter l'épaisseur de la couche barrière
- modifier l'indice d'indium du canal pour diminuer le mécanisme d'ionisation par impact qui pénalise la tension de claquage en mode passant

### I.8 Le transistor MOS-HEMT :

Les performances du transistor HEMT AlGaIn/GaN pour les applications haute puissance, radiofréquence (RF) est haute température sont fortement limitées par le courant de fuite de la grille. D'où un fort courant de grille, induit une consommation plus élevée, une plus faible impédance d'entrée et une augmentation du bruit du HEMT. Ces conséquences limitent les performances du transistor pour les applications visées telles que les chaînes d'émissions RF. Le transistor HEMT présente un courant de grille élevée à température élevée, Il est donc nécessaire de déterminer les mécanismes de transport qui sont responsable de cette augmentation du courant de grille. Dans cette optique, des progrès significatifs ont été

réalisés sur GaN/AlGaN metal-oxide-semiconductor high electron mobility transistors (MOS-HEMTs) en utilisant  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{Sc}_2\text{O}_3$  [13].

### I.8.1 Topologie de la structure étudiée

La structure du MOS-MHEMT à canal composite est représentée sur la figure I.15. La différence principale entre cette structure et la structure du transistor HEMT conventionnel se situe au niveau de contact de grille qui est de type Métal-Oxide-Semiconducteur.

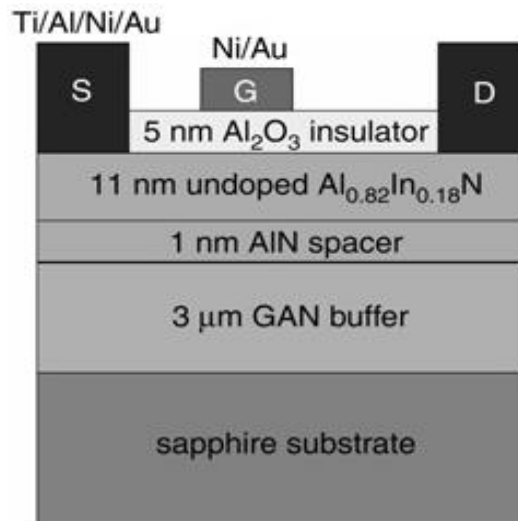


Figure I.15 : Coupe schématique du MOS-HEMT.

### I.8.2 Applications du transistor MOS-HEMT

Le transistor MOS-HEMT est largement utilisé pour des applications de commutation de puissance.

- commutation de puissance
- les applications radio fréquence RF
- communication par satellite
- télécommunication terrestres
- les radars HF

## I.9 Conclusion

Dans Ce chapitre, nous avons présenté les principaux matériaux semi-conducteurs III-N, ces derniers présentent des propriétés très intéressantes pour les applications de puissance dans la gamme des hyperfréquences. Ainsi, la mobilité des porteurs est accrue en raison du confinement des porteurs dans le puits de potentiel.

Ensuite, nous avons décrit les différentes filières du transistor HEMT tels que la filière PHEMT, MHEMT et MOS-HEMT en introduisant de façon simple les bases nécessaires à la compréhension des paramètres technologiques régissant le fonctionnement de ces transistors à effet de champ. Il résume pour chacun de ces transistors le fonctionnement, la technologie et l'état de l'art. Des applications et des performances correspondant à chacune de ces applications ont été aussi présentées tout en insistant sur le choix des transistors adaptés à chaque type d'application et le choix du matériau pour la réalisation des transistors de haute performance en fréquence.



# Chapitre II

**Modèle physico- électrique du transistor**

**$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{La}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}/\text{GaNMOS-HEMT}$**

# Chapitre II : Modèle physico-électrique du transistor $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{La}_2\text{O}_3/\text{AlGaN}/\text{GaN}$ MOS-HEMT

## II.1 Introduction

Les nouveaux systèmes de Télécommunications requièrent des circuits très rapides et à faible bruit. Les matériaux III-V tels que l'AlGaN et le GaN sont les plus indiqués pour ce type d'application RF de par leurs propriétés physiques comparées au silicium.

La diversité des domaines d'application du transistor MOS-HEMT : l'« automobile » (secteur automobile), le spatial ou encore le domaine militaire par exemple, implique la prise en compte de tous les paramètres des matériaux utilisées dans la conception d'un tel composant comme dans notre modèle numérique.

Ce chapitre propose un modèle physico-électrique développé pour le transistor MOS-HEMT GaN. Le paragraphe II-2 présente les polarisations dans le transistor MOS-HEMT à hétéro structure AlGaN/GaN. La quantité de charge à l'interface AlGaN/GaN est présentée dans le paragraphe II.3, ainsi que les caractéristiques C-V seront traitées dans le paragraphe II.4.

## II.2 Effets de polarisations dans le GaN

### II.2.1 Polarisation dans les HEMTs AlGaN/GaN

Les transistors HEMTs GaN typiques peuvent posséder une densité de charge dans le canal atteignant plus de  $1.10^{13}$  charges. $\text{cm}^{-2}$  sans pour autant doper la structure de manière intentionnelle. En effet, on pourra constater la présence d'un dopage résiduel de  $1.10^{16}$   $\text{cm}^{-3}$ .

Ceci est dû à la structure même du transistor qui est le siège de deux types de polarisation, la polarisation piézoélectrique et la polarisation spontanée [13].

### II.2.2 Polarisation spontanée

Il existe également des effets de polarisation spontanée au sein même du volume de GaN dus à la structure hexagonale du cristal et à la non-superposition des barycentres des charges positives avec ceux des charges négatives. Il en résulte une succession de dipôles

orientés de l'atome d'azote vers l'atome de gallium que l'on notera  $P_{sp}$  (Figure II.1) et qui s'exprime en fonction de la fraction d'aluminium introduite dans la barrière d'AlGa<sub>x</sub>N selon l'équation (II.1)

$$P_{sp}Al_xGa_{1-x}N = -0.52x - 0.029 \text{ C/m}^2 \quad (\text{II.1})$$

Cette polarisation est indépendante de l'état de contrainte du matériau et est due à la liaison polaire existant entre l'atome de Gallium et les atomes d'azote. Le vecteur qui en résulte est orienté selon l'axe [0001] et a une valeur négative de  $-0,029 \text{ C.m}^{-2}$  pour une couche de GaN pure et de  $-0,045 \text{ C/m}^2$  pour une structure composée de 30 % d'aluminium, la convention étant de prendre la direction positive de l'atome de gallium vers l'atome d'azote le plus proche (Figure II-1). Il est à noter que la polarisation spontanée est exclusive à la structure hexagonale du GaN car la symétrie cubique empêche toute création de polarisation spontanée. C'est une des raisons pour lesquelles la structure hexagonale est la seule exploitée pour l'épitaxie de couches semi-conductrices utilisées dans les transistors de types HEMT à base de GaN [13, 14].

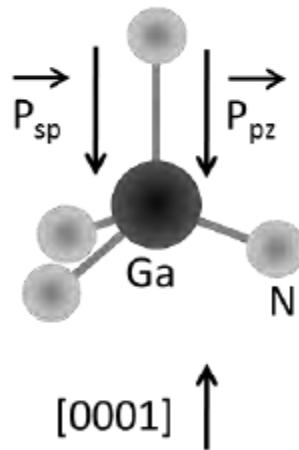


Figure II.1 : Wurtzite [13].

### II.2.3 Effets piézoélectriques

Les matériaux piézoélectriques sont caractérisés par leur propension à répondre à des contraintes mécaniques par un champ électrique de manière proportionnelle. La réciprocité est aussi vraie. En d'autres termes, la polarisation piézoélectrique dans une couche semi-conductrice apparaît lorsque celle-ci est soumise à une contrainte qui modifie la symétrie du cristal.

Tous les matériaux III-V sont sujets aux effets piézoélectriques à cause de leur géométrie non Centro symétriques. Les nitrures, du fait de la polarisation forte de la liaison III-N, sont plus particulièrement sensibles à ces effets. Dans le cas de l'hétérojonction AlGa<sub>0.3</sub>N/GaN c'est la couche supérieure d'AlGa<sub>0.3</sub>N qui vient créer la contrainte mécanique, elle s'exprime en fonction des déformations selon les trois axes à l'aide de l'équation(II.2):

$$P_{pz} = e_{33} \cdot \varepsilon_z + e_{31} \cdot (\varepsilon_x + \varepsilon_y) \quad (II.2)$$

Où  $e_{ij}$  sont les éléments du tenseur piézoélectrique (en C/m<sup>2</sup>) et  $\varepsilon_i$  les déformations selon les trois axes x,y et z. Par convention, ces déformations prennent des valeurs négatives dans le cas d'une couche d'AlGa<sub>0.3</sub>N en tension, et positive dans le cas d'une couche d'AlGa<sub>0.3</sub>N en compression.

Il est possible d'exprimer la polarisation piézoélectrique formée en fonction de la déformation dans le plan de la couche uniquement, car dans les épitaxies minces comme la barrière d'AlGa<sub>0.3</sub>N, les contraintes sont appliquées dans le plan la couche.

On exprime donc la déformation selon l'axe z en fonction de celle selon le plan de la barrière d'AlGa<sub>0.3</sub>N par l'équation (II.3)

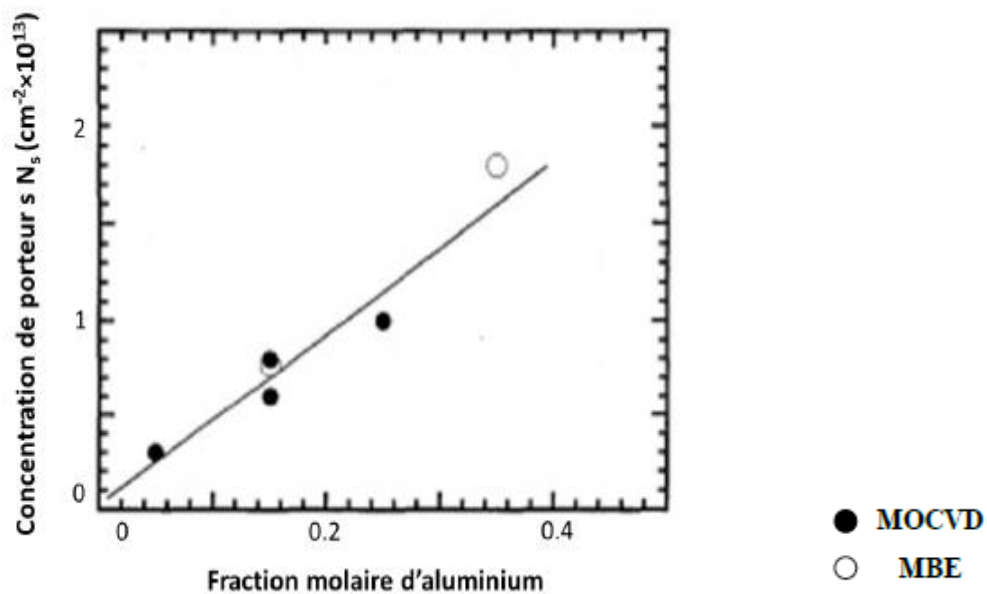
$$\varepsilon_z = -2 \cdot c_{13} / c_{33} \quad (II.3)$$

Où  $c_{13}$  et  $c_{33}$  sont les constants élastiques du matériau utilisé pour réaliser la couche, ici l'AlGa<sub>0.3</sub>N. La polarisation piézoélectrique selon l'axe z s'écrit alors par l'équation (II.4) :

$$P_{pz} = 2 \cdot \varepsilon_z (e_{31} - e_{33} c_{13}) \quad (II.4)$$

Etant donné que le terme  $e_{31}e_{33}.C_{13}/C_{33}$  est négative, et en considérant ce qui a été dit sur les déformations, cette polarisation piézoélectrique est négative dans une structure où la couche d'AlGa<sub>0.3</sub>N est en tension, et positive dans une structure où elle est en compression. Dans le cas de l'interface AlGa<sub>0.3</sub>N/GaN, la couche d'AlGa<sub>0.3</sub>N est en tension. [13, 15].

Le champ électrique ainsi créé permet l'apparition de fortes densités de porteurs dans le canal bidimensionnel des structures au niveau de l'interface AlGa<sub>n</sub>/Ga<sub>n</sub>. L'impact de ce champ sur la concentration de porteurs est conditionné par la fraction molaire d'aluminium dans la barrière (Figure II.2) ainsi que par son épaisseur. Plus la fraction molaire d'aluminium augmente et plus l'extension de la maille cristalline n'est pas grande, créant ainsi un champ électrique orienté vers l'AlGa<sub>n</sub> augmentant la densité de porteurs dans le canal. La quantité d'aluminium présent dans la barrière est cependant limitée par les effets cités plus haut. Pour un alliage comprenant 30 % d'aluminium, la polarisation piézoélectrique a été estimée à 0,011 C/m<sup>2</sup>, ce qui la rend minoritaire devant la polarisation spontanée inhérente à une telle structure [13, 16].



**Figure II.2 :** Valeur expérimentale de  $N_s$  en fonction de la fraction molaire d'Aluminium pour différentes techniques d'épitaxie des structures HFET AlGa<sub>n</sub>/Ga<sub>n</sub>[13]

#### II.2.4 Les différents types d'interface

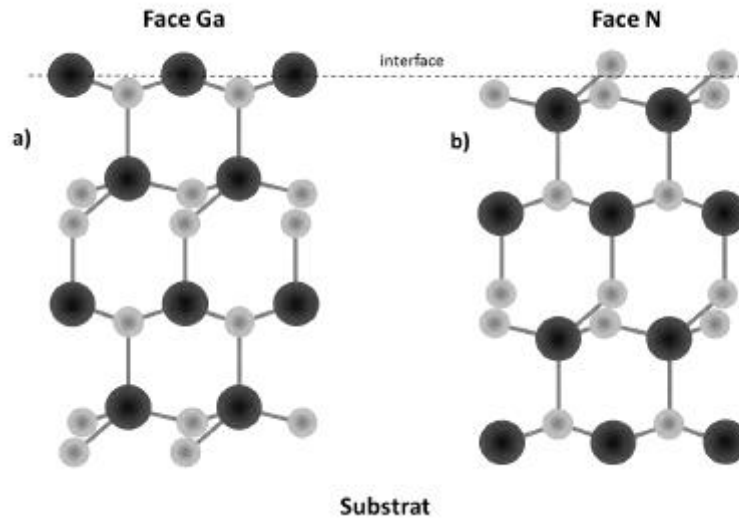
Il existe deux types d'interfaces entre le Ga<sub>n</sub> et l'AlGa<sub>n</sub>. En effet, les structures peuvent être épitaxiées de façon à créer une interface "Ga-face" (Figure II.3 a) ou une interface "N-face" (Figure II.3 b). Dans le cas du Ga<sub>n</sub> "N-face", les structures épitaxiées doivent être de type Ga<sub>n</sub>/AlGa<sub>n</sub>/Ga<sub>n</sub> car le gaz bidimensionnel d'électrons est formé dans le volume de Ga<sub>n</sub> supérieur du fait des effets piézoélectriques (Figure II.3b) et de la polarisation spontanée.

La qualité de l'interface AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> est aussi un axe de recherche important quant à l'amélioration de la fiabilité des transistors et le choix de la terminaison "Ga-face" ou "N-face" du volume de Ga<sub>N</sub> en est un facteur prépondérant [13].

Pour bien des raisons, il apparaît que le choix d'une interface "Ga-face" soit le plus approprié. Citons par exemple les résultats obtenus sur ce genre de structure et pour lesquelles la rugosité de l'interface a été déterminée comme étant inférieure à 1 nm, ainsi que la possibilité de se passer de l'implantation de magnésium en guise d'accepteur pour réaliser les couches isolantes.

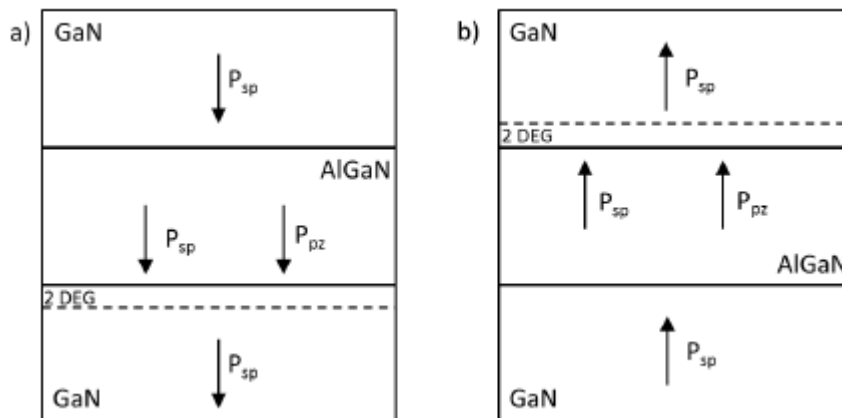
Au niveau de la mobilité électronique au sein du gaz bidimensionnel des études comparatives ont été menées sur les deux types d'interfaces. Pour les hétérojonctions "N-face", les mobilités maximales ont été atteintes pour des structures présentant une barrière non dopée d'AlGa<sub>N</sub> de 400 Å avec une fraction d'aluminium de 25 % créant une densité de porteurs atteignant  $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  au niveau de l'interface. Pour une température de 300 K la mobilité constatée est de 1150 cm<sup>2</sup>/V.s et de 3450 cm<sup>2</sup>/V.s à 77 K. De meilleures mobilités ont été par ailleurs constatées sur des structures similaires possédant une interface Ga-face. Des valeurs de 1432 cm<sup>2</sup>/V.s à 300 K et 3900 cm<sup>2</sup>/V.s à 77 K ont été observées pour ces structures ayant une densité de porteurs de  $1,3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ , une barrière de 200 Å et une fraction d'aluminium dans la barrière d'AlGa<sub>N</sub> de 35 % [13].

Il a également été reporté dans des variations conséquentes de la mobilité dans le gaz bidimensionnel en fonction de l'épaisseur du volume de Ga<sub>N</sub>. Cette variation est directement liée à l'amélioration de l'interface quand le volume de Ga<sub>N</sub> augmente. Pour une structure ayant une barrière dopée d'AlGa<sub>N</sub> de 30 Å et pour une température de 300 K, la mobilité électronique a été déterminée comme étant égale à 1496 cm<sup>2</sup>/V.s et 1575 cm<sup>2</sup>/V.s respectivement pour un volume de Ga<sub>N</sub> de 1,1 μm et 2,2 μm. A 77 K, les mobilités déterminées sont respectivement de 4436 cm<sup>2</sup>/V.s. et 7520 cm<sup>2</sup>/V.s [13].



**Figure II.3 :** Représentation des deux polarités différentes d'une structure GaN :

a) Ga-face, b) N-face [13]



**Figure II.4 :** Bilan des polarisations spontanées et piézoélectriques.

a) GaN de type Ga-face, b) GaN de type N-face [13].

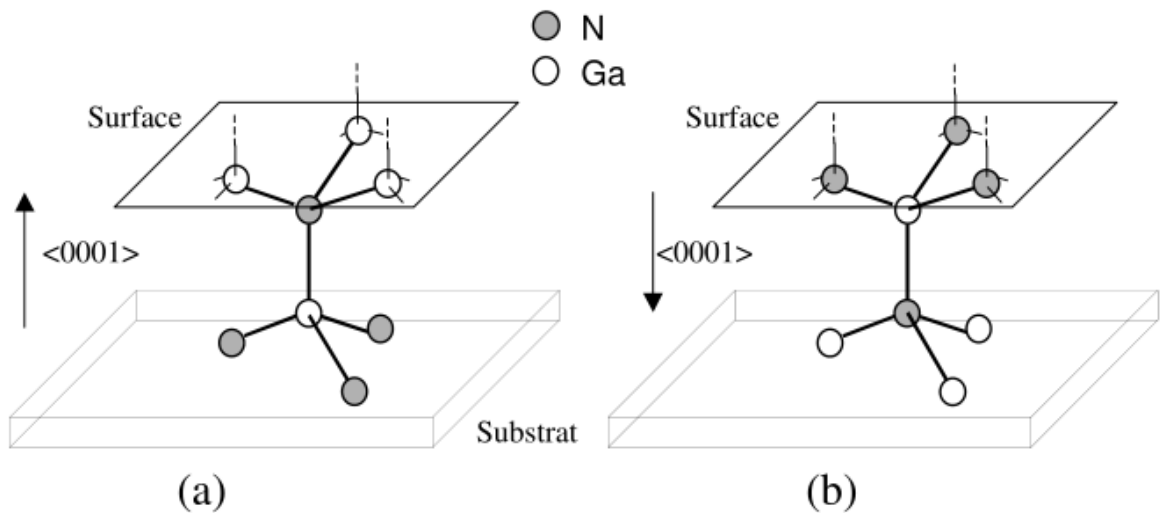
### II.2.5 La polarisation résultante

D'après Bernardini [17] la contribution de la polarisation spontanée est comparable à celle de la polarisation piézoélectrique dans les nitrures, et ne doit donc pas être négligée. La polarisation totale dans la couche de nitrure en phase hexagonale sera alors la résultante de la

somme des deux types de polarisations : piézoélectrique et spontanée, elle s'exprime par l'équation (II.5):

$$\vec{P} = \vec{P}_{sp} + \vec{P}_{pz} \quad (II.5)$$

Dans les nitrures en phase hexagonale une orientation est importante: il s'agit du sens de la liaison Ga-N suivant la direction [0001]. Cette orientation est appelée polarité de la couche comme illustre la figure II.5. Les échantillons que nous avons étudiés sont de polarité gallium.

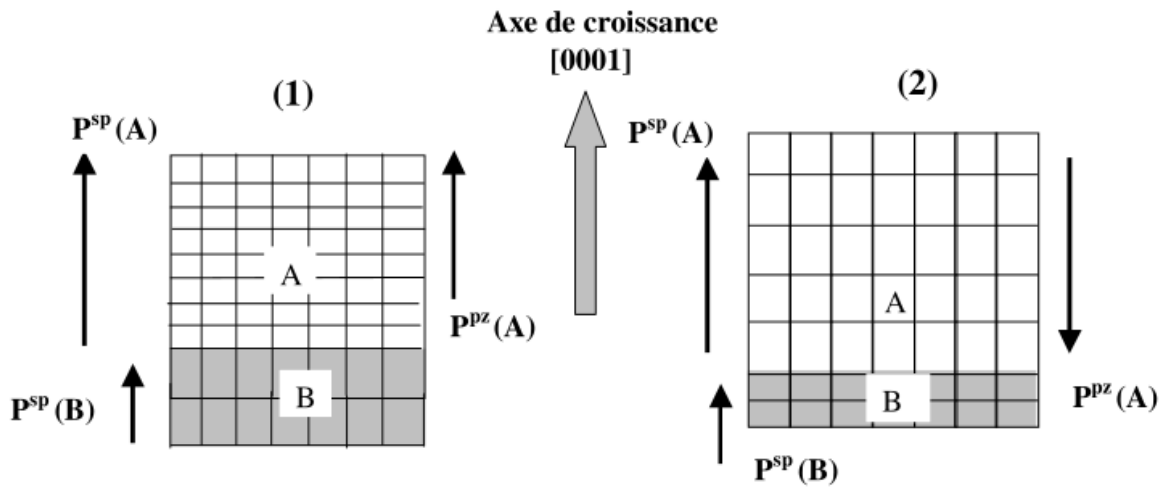


**Figure II.5 :** Polarité des couches de GaN hexagonales.

(a) : polarité gallium (b) polarité azote [18].

Dans les nitrures de polarité gallium la polarisation spontanée est orientée suivant la direction de croissance dans le même sens que celle-ci. Pour ce qui est de la polarisation piézoélectrique elle aussi orientée suivant l'axe de croissance. En revanche son sens dépend du type de contrainte présent dans la couche. Les différentes possibilités sont représentées dans la figure II.6.





**Figure II.6:** Orientation des polarisations spontanée et piézoélectrique pour les nitrures de polarité gallium suivant la contrainte : (1) la couche A est en tension sur la couche B, (2) la couche A est en compression sur la couche [18].

### II.3 Modèle physico-électrique du MOS-HEMT

Il existe principalement deux types de modélisations qui peuvent décrire le fonctionnement du composant à semiconducteurs:

- Les modèles macroscopiques, qui résolvent numériquement (et non par des expressions analytiques) les équations de transport dans les semiconducteurs couplées à l'équation de Poisson,
- Les modèles microscopiques ou particuliers, qui consistent à suivre l'évolution de chaque électron dans l'espace et dans le temps.

La modélisation numérique de la dynamique des porteurs libres dans les composants semiconducteurs repose sur la résolution de l'équation de transport de Boltzmann:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{q \cdot \vec{E}}{h} \cdot \overrightarrow{grad}_r k(f) + \vec{v} \cdot \overrightarrow{grad}_k r(f) = \left( \frac{\partial f}{\partial t} \right) \quad (I.6)$$

Cette équation régit l'évolution de la fonction de distribution  $f$ , qui est la probabilité de présence d'une particule au point  $\overrightarrow{grad}_r$ ,  $\overrightarrow{grad}_k$  de l'espace des phases à l'instant  $t$ . Le second terme rend compte de la force de Coulomb dans un champ  $E$ . Le troisième terme représente les forces de diffusion résultant des gradients de concentration. Le second membre rend

compte des collisions avec le réseau cristallin. L'équation de Boltzmann est valable tant que n'interviennent pas les effets quantiques, c'est-à-dire pour des composants ayant des zones actives suffisamment épaisses.

La simulation électrique de composants électroniques tels que les HEMTs revient à déterminer les potentiels électriques et les flux de porteurs. Pour déterminer ces quantités, nous utilisons les deux lois suivantes:

- la loi de continuité, qui permet de définir le flux de porteurs et donc le courant électrique
- la loi de Poisson qui permet de définir la densité de charges et donc le potentiel électrostatique

### **II.3.1 La loi de continuité**

Les équations de continuité des densités de porteurs libres, électrons (II.7) et trous (II.8) représentent la continuité des flux de porteurs :

$$\nabla \vec{J}n = qR + q \partial n / \partial t \quad (\text{II.7})$$

$$\nabla \vec{J}p = qR + q \partial p / \partial t \quad (\text{II.8})$$

D'où  $\vec{J}n$  et  $\vec{J}p$  représentent respectivement la densité de courant d'électrons et de trous.

- R représentent le taux de génération-recombinaison
- p et n représentent respectivement la densité de trous et d'électrons libres [19].

### **II.3.2 La loi de poisson**

Cette loi relie la densité de charges au potentiel électrostatique, il se modélise comme suit [19, 20]:

$$\Delta \Psi = - \frac{q(p-n+N_d-N_a)}{\epsilon} \quad (\text{II.9})$$

$\epsilon$  représente la permittivité électrique,  $q$  est la charge élémentaire de l'électron,  $n$  et  $p$  sont les densités de porteurs libres, respectivement les électrons et les trous.  $N_d$  et  $N_a$  sont respectivement les concentrations d'atomes dopants donneurs et accepteurs,  $\psi$  le potentiel électrostatique.

Nous pouvons déterminer avec ces deux jeux d'équations le potentiel électrostatique et le flux de porteurs en tout point du composant. Ces équations seront résolues à chaque nœud défini par le maillage [19,21]

## II.4 Rappels de base sur le fonctionnement du MOSFET

### A- Régime de fonctionnement

Le diagramme de bande d'une structure MOS sur substrat uniformément dopé N est rappelé sur la figure II.7. Le niveau de Fermi est défini par la relation  $E_F = E_i - q\phi_f$ , avec  $\Phi_{cc}$  l'écart entre le potentiel intrinsèque et le potentiel de Fermi du semi-conducteur dopé de type accepteur et  $\Phi_f$  donné par l'expression (II.10):

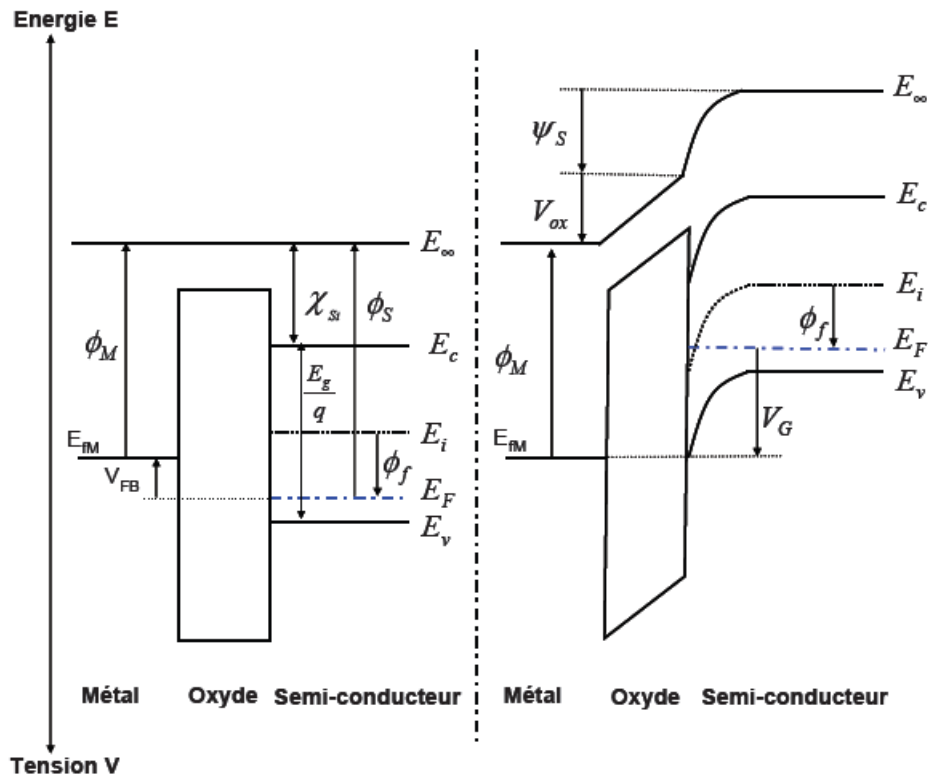
$$\phi_f = \frac{k_B T}{q} \ln \left( \frac{N_A}{n_i} \right) \quad (\text{II.10})$$

Dans l'expression (II.1),  $k_B$  est la constante de Boltzmann,  $T$  la température,  $q$  la charge élémentaire,  $N_A$  la densité de dopants (de type accepteur) et  $n_i$  la densité intrinsèque des porteurs.

La tension de bande plate  $V_{FB} = \phi_M - \phi_S$  est la tension qu'il faut appliquer sur la grille pour que le potentiel à l'interface diélectrique/semi-conducteur  $\psi_S$  soit nul. La différence de potentiel  $\psi_S = (E_i(0) - E_i(\infty))/q$ , appelé potentiel de surface, représente la courbure de bande entre la surface et le volume du semi-conducteur.

Dans le cas où des charges fixes sont présentes dans l'oxyde de grille, la tension de bande plate est donnée par  $V_{FB} = \phi_M - \phi_S - Q_{SS}/C_{ox}$ , avec  $Q_{ss}$  la densité de charges équivalentes d'interfaces (incluant la présence des charges fixes dans l'oxyde) et  $C_{ox}$  désigne la capacité de l'oxyde de grille  $C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}}$ , avec  $\epsilon_{ox}$  et  $t_{ox}$  désignent respectivement la constante diélectrique et l'épaisseur de l'oxyde.

Les différents régimes de fonctionnement sont définis suivant les valeurs du potentiel de surface.



**Figure II.7:** Représentation schématique des bandes d'énergie d'un N-MOSFET, bandes plates (à gauche) et régime d'inversion faible (à droite).

$\phi_M$  est le travail de sortie de la grille,  $\chi_{Si}$ ,  $E_g$  et  $\phi_s$  présentent respectivement l'affinité électronique, la bande interdite et le travail de sortie du silicium,  $E_v$ ,  $E_c$  et  $E_i$  sont respectivement les énergies de la bande de valence, de la bande de conduction et l'énergie intrinsèque du silicium.

- **Régime d'accumulation:**  $\psi_s < 0$  soit  $V_{gs} < V_{FB}$

La charge dans le semi-conducteur est dominée par les porteurs majoritaires du substrat (les trous) près de la surface. Les porteurs sont attirés très près de l'interface diélectrique/semi-conducteur. La charge à la surface du semi-conducteur est du même type que le volume du semi-conducteur avec une densité de trous à la surface grande devant la densité de trous dans le volume.

- **Régime de bande plates:**  $\psi_s = 0$

Ce régime est le seul cas dans lequel le semi-conducteur conserve jusqu'à la surface ses propriétés de volume.

- **Régime de désertion:**  $0 < \psi_S < \phi_f$  soit  $V_{GS} > V_{FB}$

Les porteurs majoritaires sont repoussés de l'interface. Il se crée alors près de la surface une zone dépourvue de porteurs libres (électrons et trous), appelée zone de charge d'espace. Cette zone est constituée uniquement d'impuretés ionisées (charges négatives).

Durant ces deux régimes (accumulation et désertion), le transistor est bloqué.

- **Régime d'inversion faible:**  $\phi_f < \psi_S < 2\phi_f$  soit  $V_{FB} < V_{GS} < V_T$  pour  $\psi_S = \phi_f$ ,

Les densités d'électrons et de trous sont égales en surface (près de l'interface oxyde/semi-conducteur) à la densité intrinsèque de porteurs du matériau considéré (ni).

A partir de  $\psi_S > \phi_f$ , les porteurs présents en plus grande quantité à la surface sont des électrons. Durant le régime d'inversion faible, la densité de porteurs majoritaires à la surface (électrons) est toujours inférieure à la densité de porteurs majoritaires dans le volume (trous).

Pour  $\psi_S = 2\phi_f$  la tension de grille est égale à la tension de seuil. La tension de seuil est la valeur de la tension de grille pour laquelle le transistor passe du régime d'inversion faible au régime d'inversion forte. Sous cette condition, la tension de seuil s'exprime comme suit :

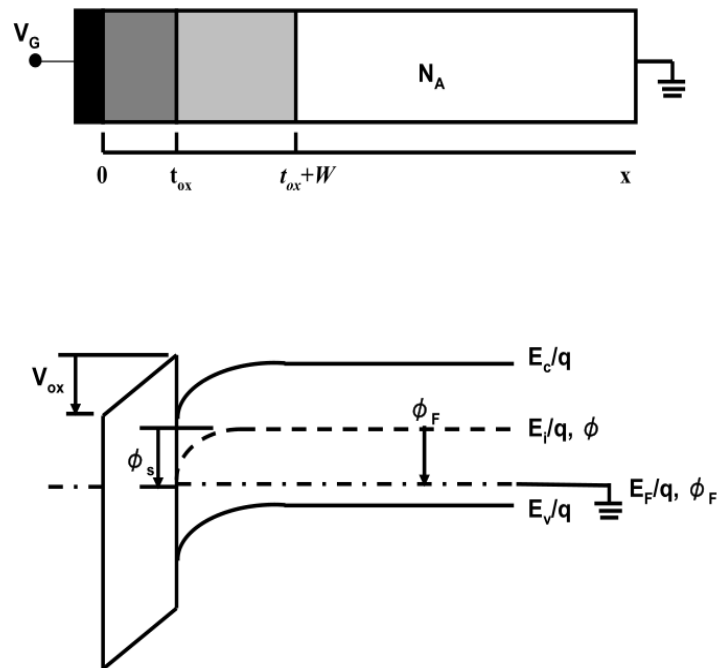
$$V_T = V_{FB} + 2 \cdot \phi_f + \frac{\sqrt{4 \cdot q \cdot N_A \cdot \epsilon_{Si} \cdot \phi_f}}{C_{ox}} \quad (\text{II.11})$$

- **Régime d'inversion forte:**  $\psi_S > 2\phi_f$  soit  $V_{GS} > V_T$

Les électrons sont les porteurs présents en plus grand nombre à la surface et en densité supérieure à celle des trous dans le volume du semi-conducteur. Les porteurs libres sont présents en grand nombre dans le canal. Le transistor est alors passant.

## II.5 Caractéristiques C-V

Le diagramme de bande d'énergie d'un condensateur MOS sur un substrat de type p est représenté dans la figure II.8 [10].



**Figure II.8:** Coupe transversale et le potentiel de diagramme de bande du condensateur MOS-HEMT [22]

Le niveau d'énergie intrinsèque  $E_i$  ou potentiel  $\phi$  dans la partie neutre du dispositif est pris comme référence zéro potentiel, la surface de potentielle  $\phi_s$  est déterminée à partir de ce niveau de référence. La capacité est définie par l'équation (II.12) :

$$C = \frac{dQ}{dV} \quad (\text{II.12})$$

Le changement de la charge est dû au changement de la tension, est plus souvent donnée en farad/unité de surface. Lors des mesures de capacité, une tension alternative est appliquée sur le dispositif. La variation de charge résultante donne lieu à la capacité. En regardant un MOS-C de la grille,  $C = dQ_G/dV_G$  où  $Q_G$  et  $V_G$  sont la charge et la tension de la grille respectivement. Étant donné que la charge totale dans le dispositif doit être zéro.

$Q_G = -(Q_s + Q_{it})$  en supposant qu'aucune charge d'oxyde. La tension de grille est partiellement chutant aux bornes de l'oxyde et partiellement à travers le semiconducteur. Cela donne  $V_G = V_{FB} + V_{ox} + \phi_s$ . Où  $V_{FB}$  est la tension de bande plate,  $V_{ox}$  est la tension d'oxyde et  $\phi_s$  le potentiel de surface, ce qui conduit à l'équation (II.12) qui peut être exprimé par :

$$C = -(dQ_s + dQ_{it}) / (dV_{ox} + d\phi_s) \quad (II.13)$$

$Q_s$  est la densité de charge de semi-conducteurs se compose de la densité de charge de trou  $Q_p$ , la densité de charge d'espace de la région de charge d'espace  $Q_b$ , et la densité de charge de l'électron  $Q_n$ .

Avec  $Q_s = Q_p + Q_b + Q_n$ , l'équation (II.13) devient

$$C = - \frac{1}{\frac{dV_{ox}}{dQ_s + dQ_{it}} + \frac{d\phi_s}{dQ_b + dQ_n + dQ_{it}}} \quad (II.14)$$

En utilisant la définition générale de la capacité, les équations (II.12) et (II.14) deviennent

$$C = \frac{1}{\frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_p + C_b + C_n + C_{it}}} = \frac{C_{ox}(C_p + C_b + C_n + C_{it})}{C_{ox} + C_p + C_b + C_n + C_{it}} \quad (II.15)$$

La charge d'accumulation positive  $Q_p$  domine pour la négative tension de grille pour les composants de substrat de type p. Pour  $V_G$  positif, la charge de semi-conducteurs est négative. Le signe moins dans l'équation (II.11) annule dans les deux cas [22].

L'équation (II.15) est représentée par le circuit équivalent de la figure (II.9). Pour des tensions négatives de grille. Pour des faible tensions de grille positives, la surface est déplétée et la région de la densité de charge d'espace  $Q_b = -qN_A W$  est dominante. La capacité totale est la combinaison de  $C_{ox}$  en série avec  $C_b$  en parallèle avec la  $C_{it}$  comme le montre la figure (II.9.c). Pour une forte inversion,  $C_n$  domine parce que  $Q_n$  est très élevé. Si  $Q_n$  est capable de suivre la tension alternative appliquée, le circuit équivalent à faible fréquence figure (II.9.d) devient la capacité d'oxyde.

Lorsque la charge d'inversion est incapable de suivre la tension de courant alternatif, le circuit de la figure (II.9.e) applique une inversion avec  $C_b = K_s \epsilon_0 / W_{inv}$  et  $W_{inv}$  est la largeur de la zone de charge d'espace en régime d'inversion.

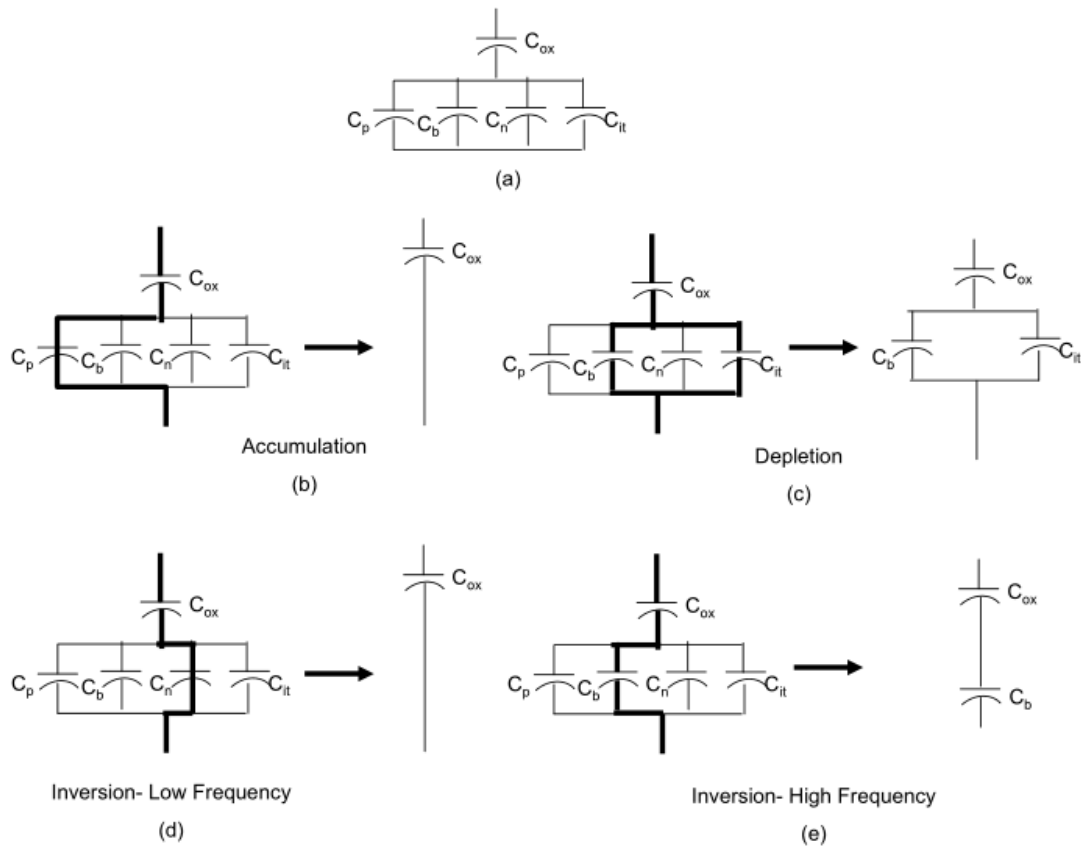


Figure II.9 : Capacité d'un condensateur MOS-HEMT pour différentes conditions de polarisation [22]

## II.6 Résolution numérique par la méthode des éléments finis

Le système des équations fondamentales du transport des charges dans les semiconducteurs citées dans le paragraphe II.3 est résolu numériquement, en choisissant des conditions aux limites appropriées.

La méthode des éléments finis est très largement utilisée pour l'étude de comportement statique d'un tel composant. Elle permet de transformer un problème à équations différentielles en un système numérique pouvant être résolu par des techniques numériques. Cette méthode consiste à diviser la structure à étudier, en morceaux de base appelés maillage. On applique à chaque élément du maillage les différentes équations qui décrivent le comportement physique du dispositif étudié et on définit les conditions aux limites du système. Le système d'équations est ensuite résolu à l'aide d'algorithmes appropriés d'analyse numérique.



## II.7 paramètres d'entrée du modèle numérique

La simulation doit être effectuée par l'introduction dans le modèle numérique des constantes, des paramètres physiques, électriques et thermiques des matériaux semi-conducteurs utilisés, ainsi que les paramètres technologiques du transistor étudié.

Les principaux paramètres d'entrées du modèle numérique sont :

- La vitesse des porteurs en fonction de la température.
- La mobilité des porteurs en fonction de la température.
- Les constantes diélectriques.
- Le gap des matériaux en fonction de la température
- La densité de donneurs ionise.
- Les affinités électroniques des matériaux semiconducteurs
- Les résistances des contacts ohmiques

## II.8 Configuration de la densité de charges qui constitue le 2DEG

C'est sans aucun doute l'une des étapes les plus importantes dans la conception du composant. C'est à ce niveau-là que l'on configure la structure pour qu'elle tienne compte des polarisations piézoélectriques et spontanées des matériaux GaN et Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N.

C'est donc à cet instant que l'on configure la densité électronique du canal situé au niveau de la partie supérieure de la couche de Nitrure de Gallium et qui s'étend sur quelques angströms afin de constituer le gaz bidimensionnel d'électrons. Or, d'après le tutorial d'ATLAS [23], nous avons deux manières de paramétrer ces charges occasionnées par les deux sortes de polarisations.

### - Configuration utilisant les instructions MATERIAL et REGION:

D'après le tutorial d'ATLAS [23], la polarisation des matériaux Wurtzite est caractérisée par deux composantes, la polarisation spontanée PSP et la polarisation piézoélectrique PPI. On déduit alors la polarisation totale dans ces matériaux  $P_t$  qui correspond à la somme de PSP et PPI. Or, nous avons la possibilité de configurer ces deux paramètres pour chacun des matériaux de type Wurtzite en utilisant les instructions MATERIAL et REGION.

On rappelle que la polarisation piézoélectrique présente au sein d'un matériau Wurtzite est donnée par la relation suivante:

$$P_{pZ_{ALGaN}}(x) = 2 \frac{a - a_0(x)}{a_0(x)} [e_{31}(x) - e_{33}(x)c_{31}(x)/c_{33}(x)] \text{ c/m}^2 \quad (\text{II.16})$$

- **Configuration utilisant l'instruction INTERFACE**

C'est par cette méthode que les charges d'interface seront configurées car elle permet de les localiser de manière plus précise à la frontière Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/GaN. Il s'agit tout d'abord de donner directement le résultat du calcul de  $|\sigma^+|$ , densité de charges à l'interface dont l'expression analytique est rappelée ci-dessous avec l'équation :

$$|\sigma^+| = |P_{sp_{AlxGa1-xN}}(x) + P_{pz_{AlxGa1-xN}}(x) + P_{pz_{GaN}} - P_{sp_{GaN}}| \text{ c/m}^2 \quad (\text{II.17})$$

Les expressions de  $P_{sp_{AlxGa1-xN}}(x)$ ,  $P_{pz_{AlxGa1-xN}}(x)$ ,  $P_{pz_{GaN}}$  et  $P_{sp_{GaN}}$  sont données au paragraphe II-2.

C'est le paramètre **CHARGE** de l'instruction **INTERFACE** qui permet de spécifier la valeur de  $|\sigma^+|$  en unité cm<sup>-2</sup>.

De cette façon, avec un x fixé (par exemple à 30%), on déduit la valeur exacte de  $|\sigma^+|$ . Par ailleurs, il faut préciser qu'il s'agit d'une interface semi-conducteur/semi-conducteur, il faut donc indiquer le paramètre **S.S** dans l'instruction **INTERFACE**.

Enfin, il est nécessaire de préciser la localisation de cette interface. Il faut pour cela utiliser les paramètres de positionnement  $x_{min}$ ,  $x_{max}$ ,  $y_{min}$  et  $y_{max}$  qui vont constituer une fenêtre. La densité de charge configurée plus haut sera appliquée à toute interface semi-conducteur/semi-conducteur se situant à l'intérieur de cette fenêtre.

Enfin, il est possible de visualiser la répartition de ces charges à l'interface à l'aide du logiciel **TONYPLOT** en lançant la fenêtre graphique qui fait apparaître la structure du composant. Il s'agit alors de trouver un modèle qui permettra de configurer deux paramètres physiques importants : la mobilité des électrons et des trous (même si ils sont minoritaires car le 2DEG est un canal d'électrons) dans la barrière et le canal lorsque le champ devient plus important, et la vitesse de saturation des porteurs de charges. Cela est rendu possible avec le modèle de mobilité dépendant d'un champ électrique parallèle (c'est un modèle extrait du tutorial d'ATLAS dont le nom est « Parallel Electric Field Dependent Mobility »).

Dans un premier temps, ce modèle de mobilité nous permettra d'effectuer la transition entre le

comportement des porteurs de charges en champ faible et leur comportement en champ élevé.

## **II.9 Configuration des couches d'oxyde**

Pour configurer les couches (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) sous le module Atlas du simulateur Silvaco on utilise l'instruction de matériel en précisant la permittivité relative du diélectrique utilisé, comme l'exemple suivant :

```
MATERIAL region=1 permittivity=27
```

```
MATERIAL region=2 permittivity=9.3
```

## **II.10 Conclusion**

Dans ce second chapitre, nous avons présenté les différents types de polarisations dans le transistor MOS-HEMT tels que la polarisation spontanée, piézoélectrique et la polarisation résultante. Ensuite, nous avons élaboré un modèle physico-électrique du transistor MOS-HEMT sur substrat SiC avec empilement des diélectriques La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, c'est un modèle numérique qui inclut les lois physique régissant le fonctionnement du composant, ainsi, la configuration des différents paramètres de transport de charges sous le module Atlas du simulateur SILAVACON.

# Chapitre III

**Analyse DC et AC du transistor**

**$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{La}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$  MOS-HEMT**

# Chapitre III : Analyse DC et AC du transistor $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{La}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ MOS-HEMT

## III.1 Introduction

Dans ce chapitre, Nous présenterons le logiciel de simulation SILVACO et son module Atlas que nous avons utilisé pour l'analyse du composant, Celui-ci nous permet de déterminer les paramètres DC et radiofréquences du transistor  $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$  MOS-HEMT. Nous analyserons, l'influence de la température sur les caractéristiques statiques, sur le champ électrique, sur la concentration en électron...etc.

Enfin Nous comparerons les performances du MOS-MHEMT avec empilement d'un seul diélectrique et deux diélectriques, afin de montrer que le courant de sortie augmente pour la technologie MOS-MHEMT avec deux diélectriques de grille.

## III.2 Description du logiciel SILVACO

SILVACO 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 de dispositifs. Le développement de SILVACO, les ventes et les équipements de soutien sont stratégiquement localisés dans le monde entier pour soutenir la clientèle. Une majeure partie du modèle des affaires de SILVACO se fonde sur la capacité de la compagnie à fournir des ingénieurs technico-commerciaux bien formés et expérimentés pour le support à la clientèle sur place dans toutes les régions principales de fabrication de semi-conducteurs.

### III.2.1 Présentation du paquet des programmes SILVACO

Sous SILVACO, l'ensemble des outils de simulation et des outils interactifs permettant la conception et l'analyse de la plupart des dispositifs semi-conducteurs s'appelle VWF (Virtual Wafer Fab). Les composants de base de VWF sont :

- 1- Les outils de simulation (VWF coretools) : Ces outils simulent soit leurs processus de fabrication, soit leurs comportements électriques. Les outils de simulation sont Athena, Atlas et SSuprem3.
- 2- Les outils interactifs (VWF interactive tools) : Ces outils sont désignés pour être utilisés en mode interactif dans la construction d'un seul fichier d'entrée. En étant basé sur une interface utilisateur qui est graphique (Graphical User Interface, GUI), le travail de construction du fichier d'entrée devient plus efficient. Les outils interactifs peuvent être utilisés en relation avec un ensemble de fichiers, ou comme des composants intégrés dans l'environnant « VWF automation tools ».
- 3- Les outils d'automatisation (VWF automation tools) : Ces outils permettent à l'utilisateur d'exécuter sur une grande échelle, des études expérimentales pour créer des résultats pour l'analyse statistique suivante. Ces outils automatiques se servent de la technologie de base de données répartie et des méthodes de logiciels de transmissions d'interprocessus.

### III.2.2 Présentation de l'outil « Atlas »

« Atlas » est un simulateur 2D et 3D des dispositifs basés sur la physique de semi-conducteurs. Il prédit le comportement électrique des structures semi-conductrices spécifiées et fournit des aperçus de mécanismes physiques internes associés au fonctionnement des dispositifs. Atlas peut être utilisé autonome ou comme un outil noyau dans le milieu de simulation VWF de SILVACO. Dans le but de prévoir l'impact des variables du processus sur le comportement du circuit, la simulation du dispositif joint la simulation du processus et l'extraction du modèle SPICE.

Dans le schéma de la figure (III.1) nous voyons les types d'informations qui circulent en entrée et 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 (représenté par Fichier de commande). Le second fichier est un Fichier de structure qui définit la structure qui va être simulée. A la sortie d'Atlas, nous avons trois types de fichiers :

1. Le premier de ces fichiers est la sortie « Runtime » qui donne la progression, les erreurs et les messages d'avertissements pendant la simulation.

2. Le deuxième type de fichier est le fichier log qui stocke toutes les valeurs de tensions et de courants provenant de l'analyse du dispositif simulé (c'est le fichier du comportement électrique).

3. 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 (c'est le fichier physique, il contient la structure dans un état particulier). Les deux derniers fichiers sont traités par l'outil de visualisation TonyPlot[25, 26].

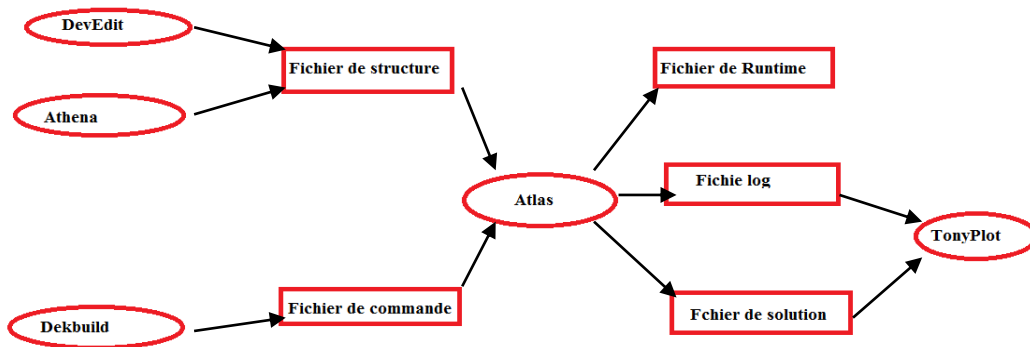


Figure III.1: Fichiers d'entrées et sorties d'Atlas [25].

Dans la figure III.2, nous voyons les composants qui constituent le simulateur Atlas. Comme nous le remarquons, le cœur est la Physique qui contient le modèle mathématique qui fonctionne dans les dispositifs à base de semi-conducteurs.

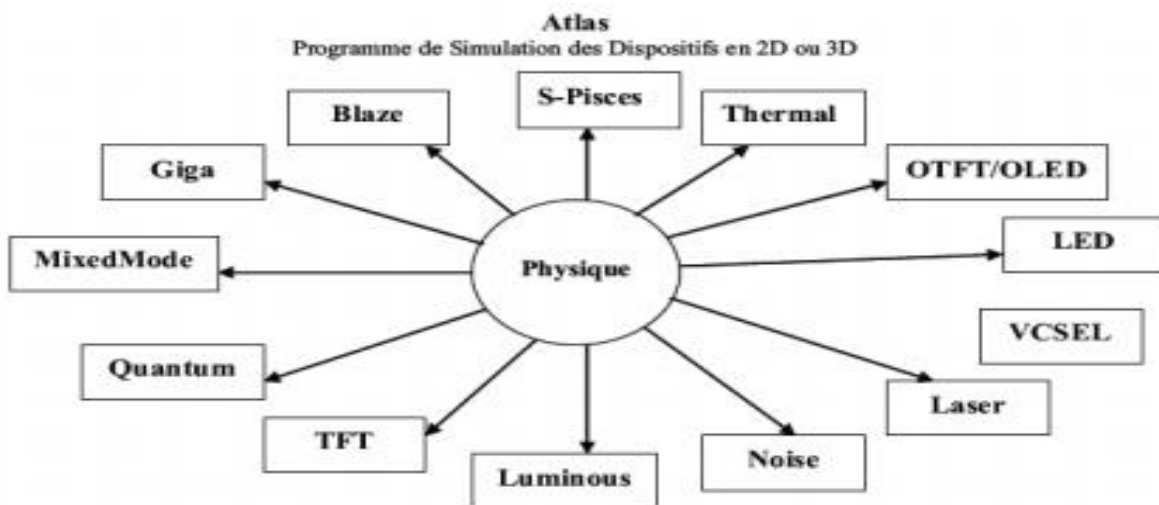


Figure III.2 :Les composants (ou les modules) d'Atlas [25][27].

### III.3 Topologie de la Structure étudiée

Afin de définir les paramètres technologiques de la structure à simuler, tels que les épaisseurs et les longueurs des différentes couches, nous avons arrangé la structure de la figure III.3

L'épitaxie se compose de deux diélectriques  $\text{La}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  d'épaisseurs respectivement 7nm et 5 nm, vient ensuite la couche barrière, elle est fabriquée avec un matériau appartenant à la famille des éléments nitrures  $\text{AlGaIn}$  son épaisseur vaut 20 nm, suivie de 2  $\mu\text{m}$  d'une couche de  $\text{GaN}$  contiendra dans sa zone supérieure le gaz bidimensionnel ou canal d'électrique. Les longueurs des contacts de source, grille et drain sont de 1  $\mu\text{m}$ . l'espacement source-drain est de 5  $\mu\text{m}$ . La densité de charge à l'interface  $\text{AlGaIn}/\text{GaN}$  fixée à  $1.5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  [28].



Figure III.3 : Topologie de la structure MOS-HEMT [28]

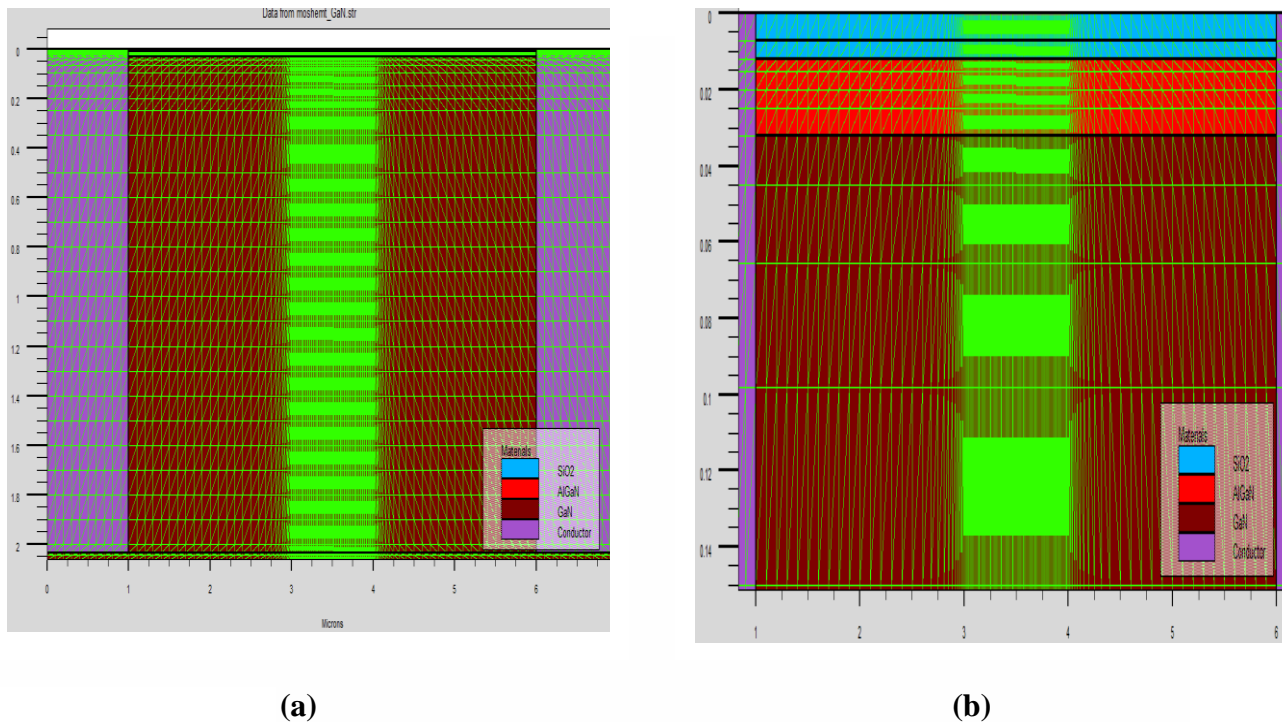
#### III.3.1 Le maillage

La définition du maillage est primordiale pour la validité et la précision des résultats. Ceux-ci ainsi que le temps de calcul sont grandement dépendants du nombre d'intersections. Chaque intersection, ou nœud, représente le point où les équations seront résolues. Le temps de calcul, la précision et donc la validité des résultats dépendent de la qualité du maillage. En effet ; une maille trop large permettra d'avoir moins de nœuds et donc de diminuer le temps de calcul. En revanche, ces nœuds très éloignés les uns des autres, entraînent ainsi des évolutions des différentes grandeurs physiques plus importantes d'un nœud à l'autre. Les imprécisions sur



le résultat final sont donc accentuées ainsi que les risques de divergence lors de la résolution des équations. Ceci peut mener à des résultats incohérents. Une maille trop fine augmente de façon exponentielle le temps de calcul mais permet d'avoir une solution très précise.

Le maillage doit être dense à l'interface barrière/canal pour le gaz bidimensionnel 2DEG suivant l'axe y. Il est aussi très fin sous l'électrode de grille et de part et d'autre de chacune des électrodes suivant l'axe des x. La maille conçue pour notre dispositif est montrée sur la figure III.4



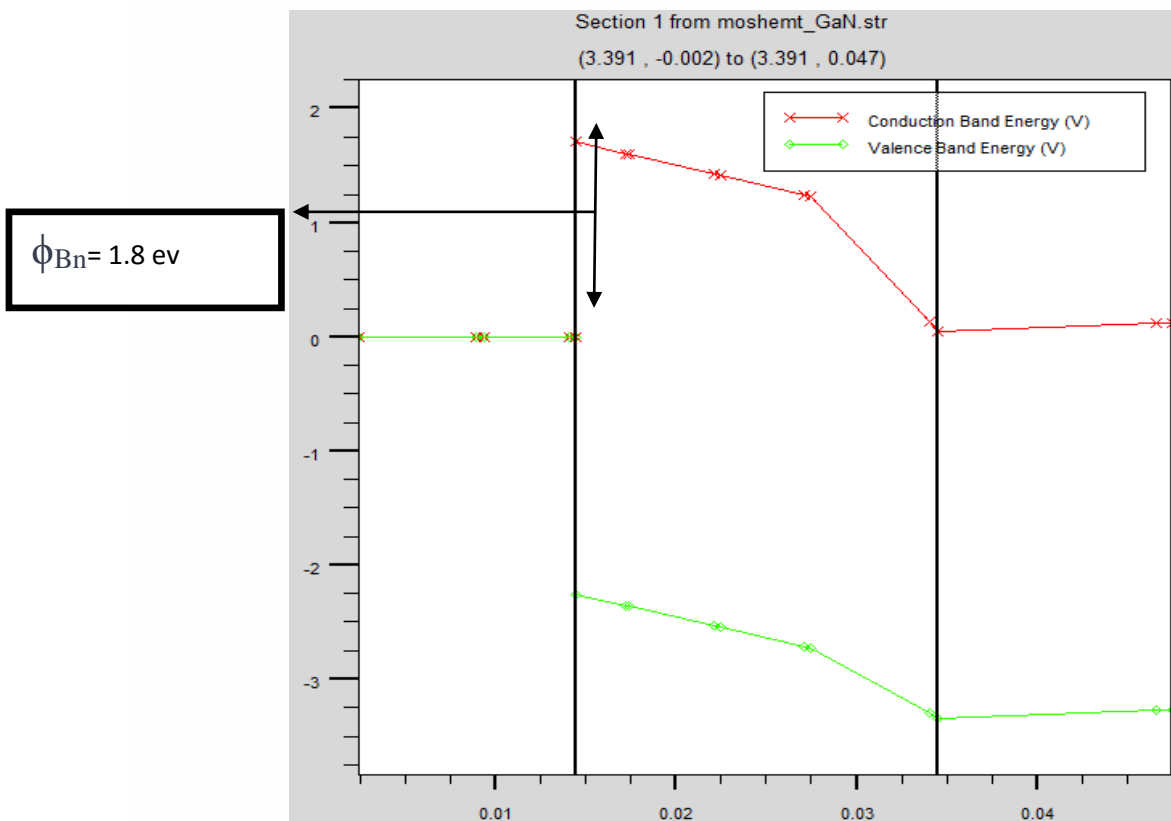
**Figure III.4 :** Structure maillée du transistor MOS-HEMT, (a) structure entière, (b) zoom autour des régions  $\text{La}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}/\text{GaN}$

### III.3.2 Diagramme de bandes d'énergie

On connaît la relation qui lie la hauteur de barrière  $\phi_{\text{Bn}}$ , l'affinité électronique du semi-conducteur se situant sous le contact (X) et le travail de sortie du métal  $\phi_{\text{m}}$ . Elle est donnée par l'équation (III.1) :

$$\phi_{\text{Bn}} = \phi_{\text{m}} - X \quad (\text{III.1})$$

Nous traçons sur la figure III.5 le diagramme des bandes d'énergie de notre structure étudiée à l'équilibre thermodynamique.



**Figure III.5 :** Diagramme de bande d'énergie du MOS-HEMT

Ce diagramme des bandes est correct, la hauteur de barrière (marquant la frontière entre le contact Schottky et le barreau de semi-conducteur) avoisinant les 1,8 eV. De plus, les courbures des bandes semblent bonnes car elles correspondent à ce que l'on attend en théorie. De plus, le puits quantique, créé par l'association des deux couches à accords de mailles

différents, est bien présent à l'interface entre les deux matériaux (AlGaIn et GaIn) et semble avoir une profondeur suffisante pour que les électrons puissent occuper ses niveaux d'énergie.

### III.4 Résultats et interprétations

#### III.4.1 Résultats statiques

Le but principal de notre travail est de pouvoir valider nos résultats de simulations avec ceux mesurés.

##### III.4.1.1 caractéristique de sortie $I_{ds}$ - $V_{ds}$

La grille est polarisée négativement par rapport à la source, le drain est polarisé positivement par rapport à la source. Il crée dans l'ensemble du dispositif un champ électrique qui draine les électrons dans sa direction. La différence de potentiel entre la grille et un point du canal est plus faible à l'extrémité située près de la source (entrée du canal). Le canal est donc plus resserré près du drain qu'à son entrée. L'intensité du champ électrique va donc croissant depuis l'entrée du canal (partie large) jusqu'à sa sortie (partie resserrée).

Nous avons représenté sur les figures III.6, III.7 et III.8 les caractéristiques de sortie donnant l'évolution du courant  $I_{ds}$  circulant entre le drain et la source lorsque l'on fait croître la tension  $V_{ds}$  en maintenant la tension  $V_{gs}$  à des valeurs constantes (-1 V, 0 V, 1 V, 2 V, 3 V et 4 V).

Trois régimes de fonctionnement peuvent être distingués :

- Régime linéaire (le courant  $I_{ds}$  croît avec la tension  $V_{ds}$ ) : Si  $V_{ds} \ll V_{dsat}$ .
- Régime saturé ( $I_{ds}$  est sensiblement indépendant de  $V_{ds}$ ): Si  $V_{ds} \gg V_{dsat}$ .
- Régime non-linéaire : zone de fonctionnement intermédiaire entre les deux régimes cités ci-dessus.

Le transistor passe en régime de saturation lorsque la vitesse des électrons atteint leur vitesse de saturation. Lorsque la tension  $V_{gs}$  augmente en valeur absolue, la diminution de la profondeur du puits de potentiel à l'hétérojonction entraîne celle de la densité surfacique des électrons, et donc du courant  $I_{ds}$ . Pour une tension de grille  $V_{gs}$  suffisamment négative, le canal est pincé. Cette tension de seuil est définie comme une tension de pincement. La concentration des porteurs dans le canal dépendant fortement de l'épaisseur et du dopage de la zone de grand gap (la couche barrière).

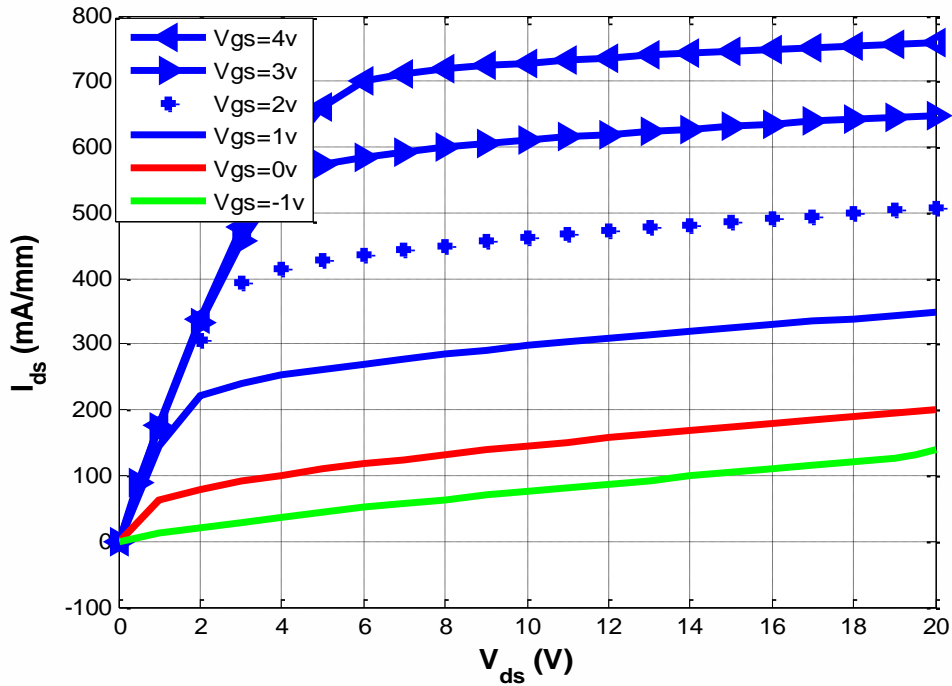


Figure III.6 : Caractéristiques de sortie  $I_{ds}$ - $V_{ds}$  pour  $T = 300$  K,  $V_{gs}$  variant de 4 à -1V avec un pas de 1V

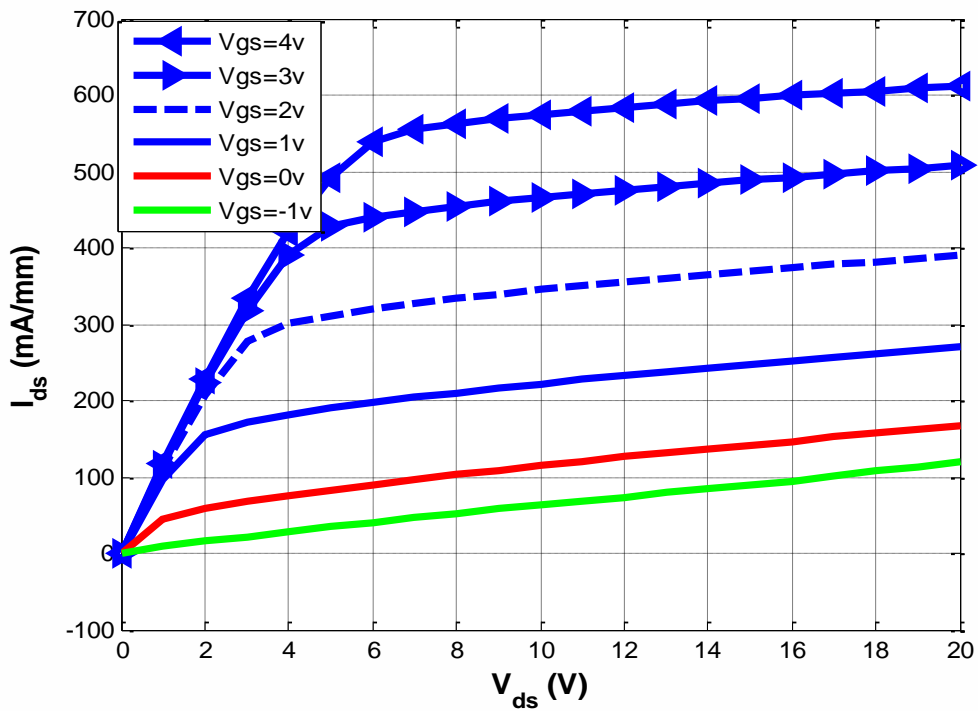
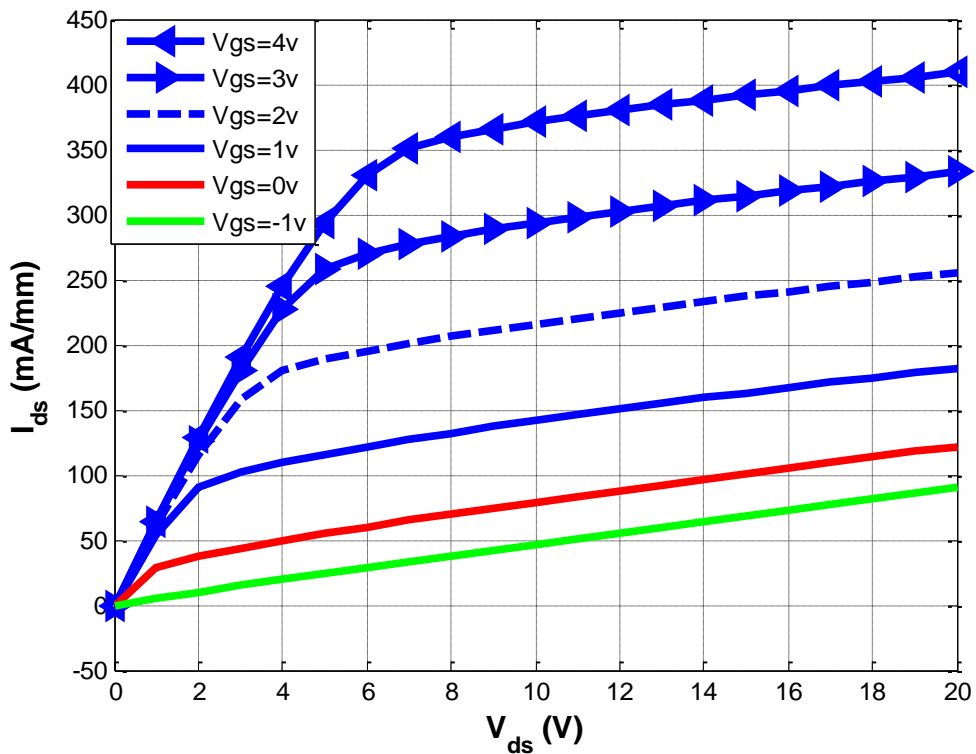


Figure III.7 : Caractéristiques de sortie  $I_{ds}$ - $V_{ds}$  pour  $T = 500$  K,  $V_{gs}$  variant de 4 à -1V avec un pas de 1V



**Figure III.8 :** caractéristiques de sortie  $I_{ds}$ - $V_{ds}$  pour  $T = 600$  K,  $V_{gs}$  variant de 4 à -1V avec un pas de 1V

### III.4.1.2 Caractéristiques de transfert $I_{ds}$ - $V_{gs}$

Les figures III.9, III.10 et III.11 représentent les caractéristiques de transfert  $I_{ds}(V_{gs})$  simulées pour trois valeurs de température (300 K, 500 K et 600 K) dont la polarisation de drain est fixée à 3V, 10 V et 20 V. Là encore, le courant simulé diminue avec l'augmentation de la température. On note que le courant de saturation maximum vaut 750 mA/mm pour  $V_{ds} = 20V$  et se dégrade à environ 420 mA/mm pour  $V_{ds} = 3$  V, pour une température égale à 300 K et de 600 mA/mm pour  $V_{ds} = 20V$  et se dégrade à environ 300 mA/mm pour  $V_{ds} = 3$  V, pour une température de 400 K

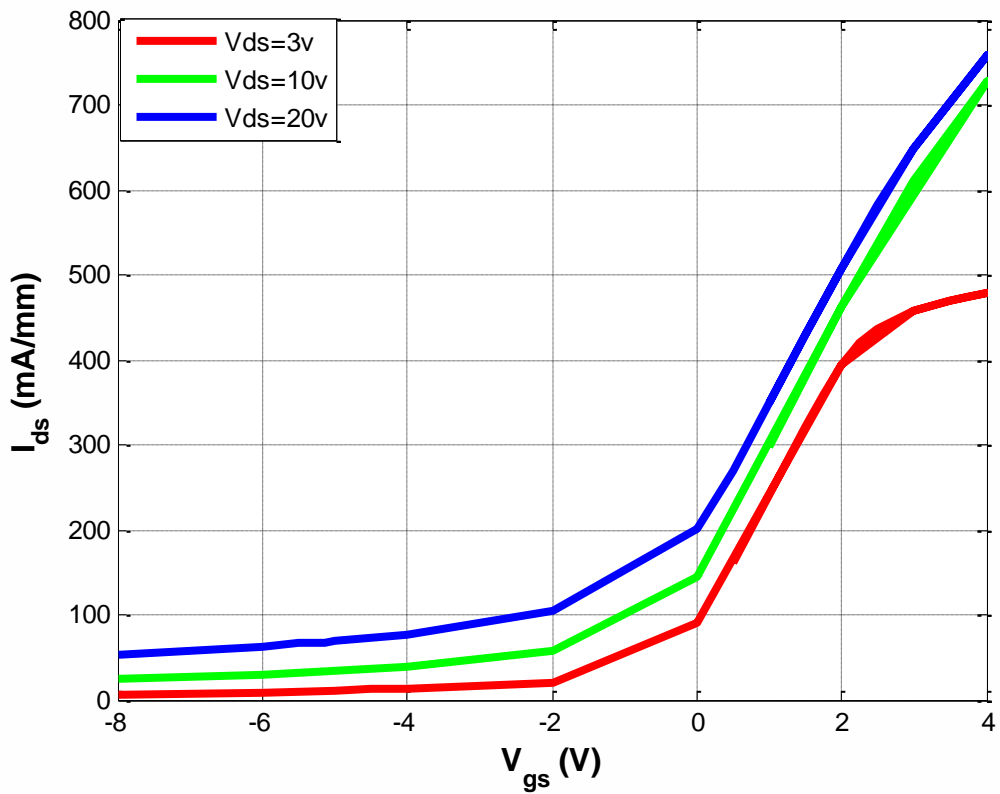


Figure III.9 :Caracteristiques de transfert  $I_{ds}$ - $V_{gs}$  d'un MOS-HEMT

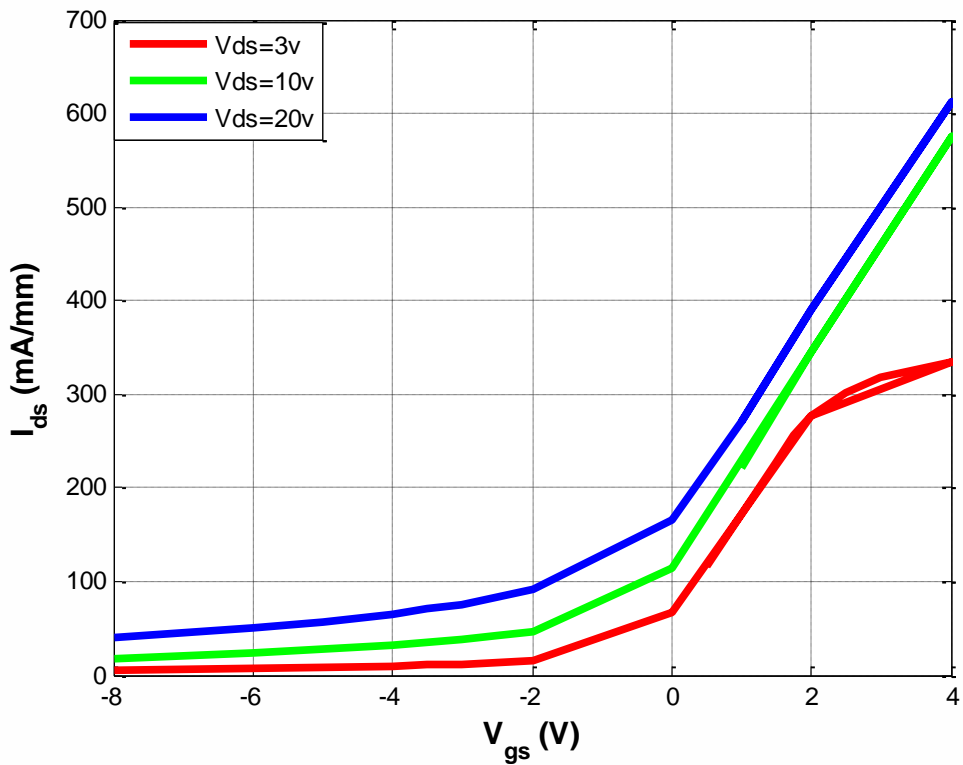


Figure III.10 :Caracteristiques de transfert  $I_{ds}$ - $V_{gs}$  d'un MOS-HEMT

En effet, la caractéristique de transfert est définie par deux grandeurs:

- La tension de seuil  $V_{TH}$ , qui définit la tension de grille nécessaire pour pincer le canal.
- La transconductance  $G_m$ , qui définit le gain de transfert:  $dI_{ds}/dV_{gs}$  à un  $V_{ds}$  donnée

#### a) La tension de seuil

$V_{TH}$  représente la tension à appliquer sur la grille pour délaiter complètement le canal et ainsi pincer le canal. La différence de potentiel (ddp) entre le contact de grille et le canal induit par  $V_{TH}$  doit donc compenser la ddp nette qui réside dans la structure.

En fonctionnement, c'est-à-dire à transistor polarisé, la tension de seuil est la grandeur la plus pertinente, entre autre pour la conception de circuits. C'est elle qui va déterminer le mode de fonctionnement du transistor :

- à désertion pour une tension de seuil négative.
- à enrichissement pour une tension de seuil positive.

#### b) La transconductance

Ce paramètre représente le gain en transfert puisque c'est le rapport entre le courant de drain et la tension de grille. Il est déterminé par l'équation III.2.

$$G_m = \left. \frac{\Delta I_{ds}}{\Delta V_{gs}} \right|_{V_{ds}=cste} \quad \text{III.2}$$

### III.4.2 Effet d'oxyde sur les caractéristique statique du MOS-HEMT

Les paramètres technologiques jouent un rôle primordial dans l'optimisation et l'amélioration des performances électriques d'une telle structure MOS-HEMT. Dans cette optique, nous nous intéressons à étudier l'influence de l'empilement d'un seul et deux diélectriques sur le courant du drain. Pour cette raison, nous avons étudié dans les figures III.11 et III.12 l'évolution du courant de drain en fonction de polarisation du drain et de grille respectivement, on note en particulier que le courant drain diminue avec l'empilement d'un seul diélectrique (La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) et plus précisément, il diminue avec l'empilement d'un diélectrique qui possède un constant diélectrique assez faible. Autrement dit, La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a un constant diélectrique de 9.3 qui est faible par rapport à la constante diélectrique de l'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> qui vaut 27.

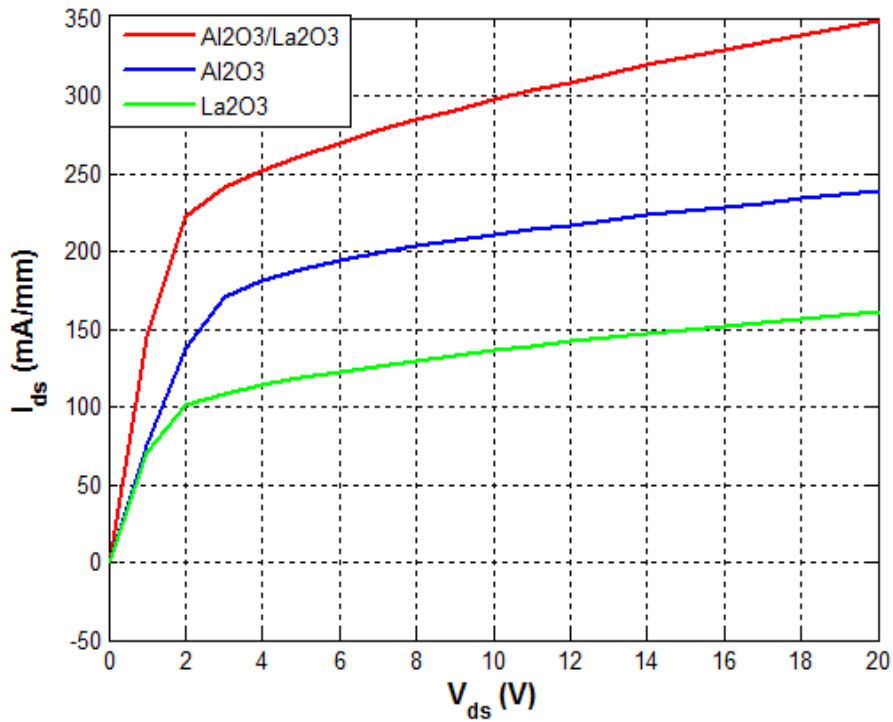


Figure III.11 : Caractéristiques de sortie avec empilement d'un seul diélectriques et deux diélectriques.

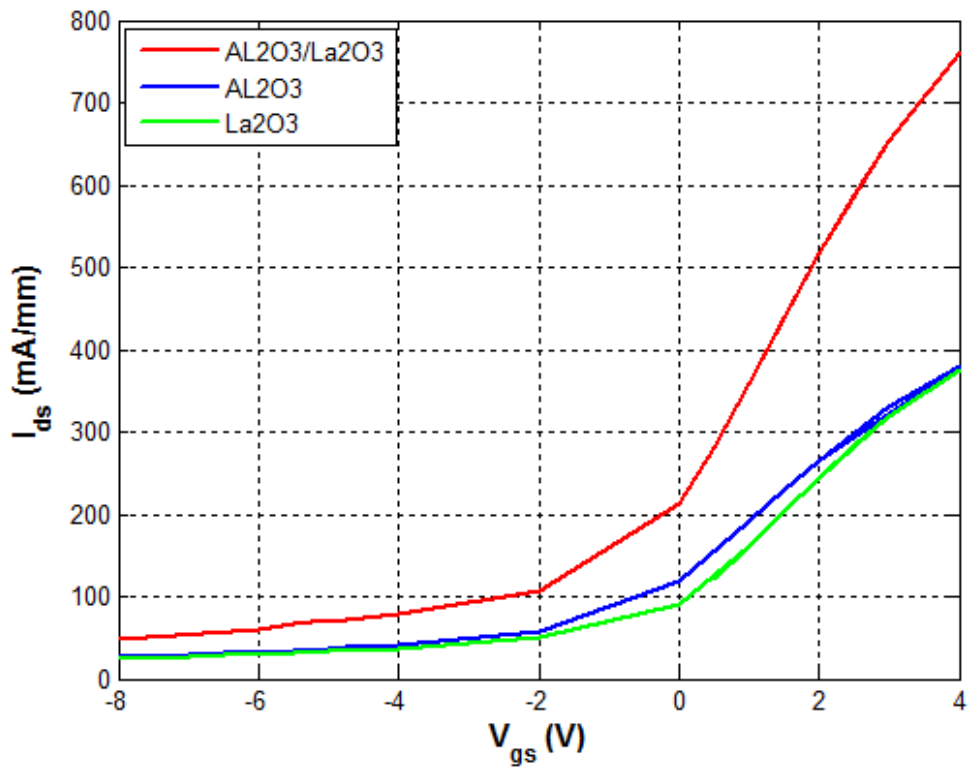


Figure III.12 : Caractéristiques de transfert avec empilement d'un seul diélectriques et deux diélectriques.



### III.5 Parametrage RF du transistor MOS-HEMT

La transconductance est fortement liée à la longueur de grille, elles sont inversement proportionnelles. Et comme  $g_m$  est associée aux performances RF du transistor, la longueur de grille constituera un paramètre à régler lors de l'optimisation de la structure du composant. Par conséquent,  $L_g$  est choisie à  $1 \mu\text{m}$  de longueur de manière à ce que nous obtenions la meilleure fréquence de coupure possible.

La fréquence de coupure dépend aussi de la vitesse de dérive des électrons. Plus celle-ci est importante, plus la fréquence est bonne. Aussi, on sait que les dépassements de vitesse de porteurs de charges dans le canal provoquent des fréquences de transition élevées. Or, c'est l'utilisation d'un canal court qui nous permettra d'atteindre des vitesses élevées de porteurs de charges. La longueur du canal c'est-à-dire la distance entre les électrodes de drain et de source (qui sera dans un premier temps fixée à  $5 \mu\text{m}$ ) représente un paramètre supplémentaire à considérer pour optimiser la structure.

Le transistor, lorsque l'on effectuera les simulations RF, sera polarisé avec des tensions grille de  $1\text{V}$ ,  $0\text{V}$  et  $-1\text{V}$  et une tension drain de  $10\text{V}$ . Ainsi nous avons étudié la fréquence de transition en fonction de la température ( $T = 300\text{ K}$  et  $500\text{ K}$ ). D'après le tableau III.1, on remarque que la fréquence varie proportionnellement avec le  $V_{gs}$ , par contre il y a une diminution de fréquence quand la température augmente.

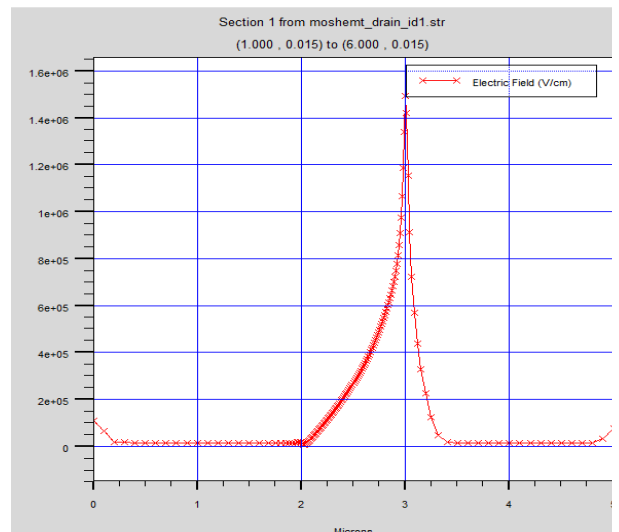
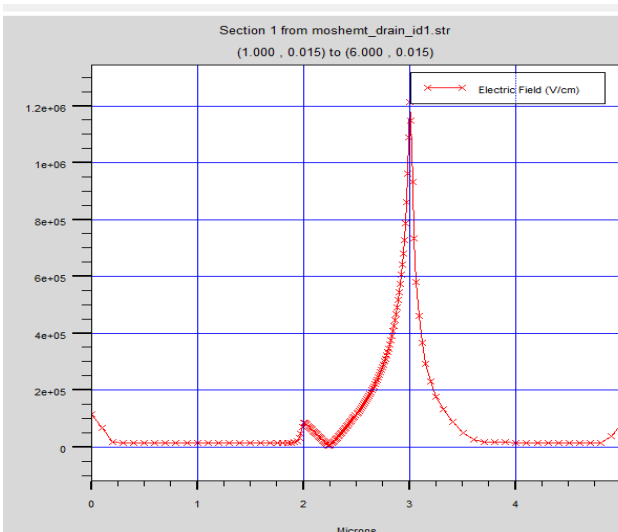
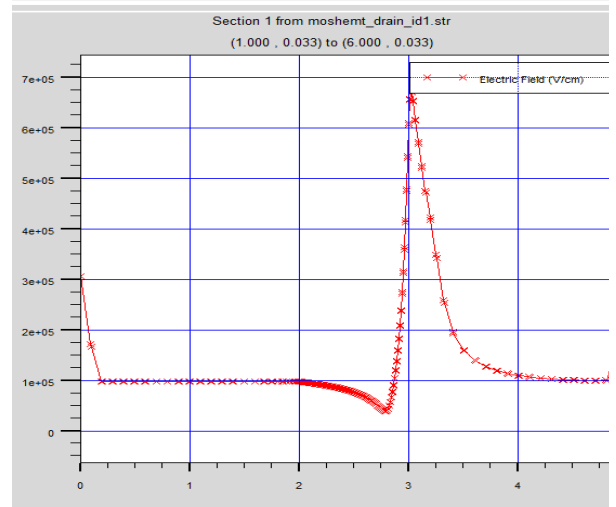
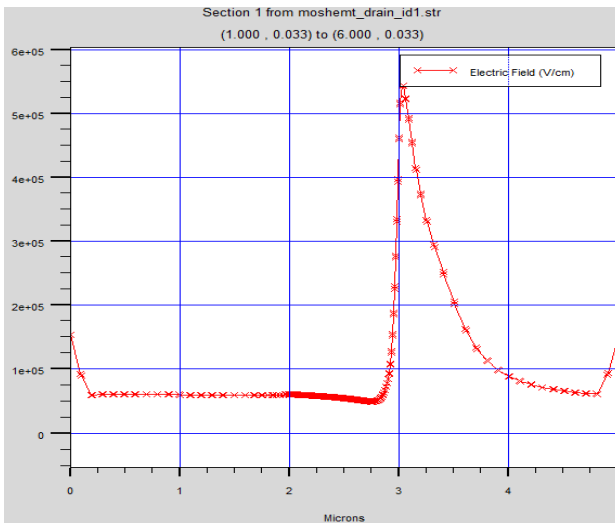
On constate donc que la structure MOS-HEMT peut permettre l'amélioration du comportement sous le seuil, ainsi que des performances fréquentielles.

Température	Vds	Vgs	Fréquence
300 K	10 V	1V	10.2GHz
		0V	10.09GHz
		-1V	10.07GHz
500 K	10 V	1V	10.1GHz
		0V	10.05GHz
		-1V	10.02GHz

**Tableau III.1 :** Fréquence de transition dans le MOS-HEMT

### III.6 Evolution du champ électrique

Les figures III.13 et III.14 illustrent l'évolution du champ électrique le long du dispositif nous concluons que quand la température augmente le champ électrique aussi augmente donc il y a une relation de corrélation directe entre la température et le champ électrique. On note que le champ maximal vaut  $1,2 \cdot 10^6 \text{V/cm}$  et  $5,2 \cdot 10^5 \text{V/cm}$  pour  $T=300\text{K}$  et se augmente environ  $1,4 \cdot 10^6 \text{V/cm}$  et  $7 \cdot 10^7 \text{V/cm}$  pour  $T=600\text{K}$



(a)

(b)

Figure III.13 : Evolution du champ électrique le long du MOS-HEMT.

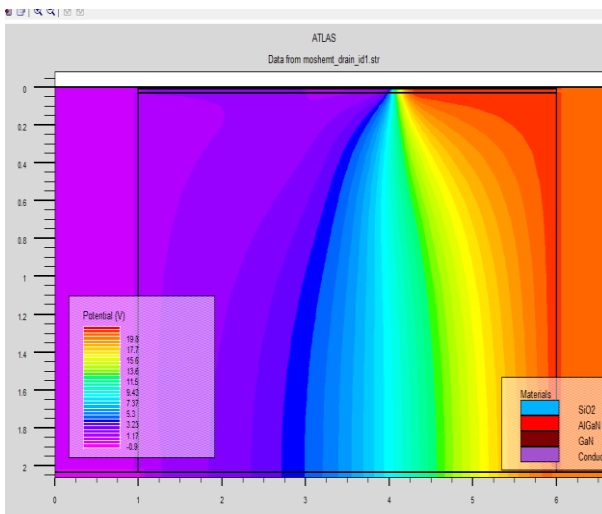
(a)  $T=300\text{K}$  (b)  $T=600\text{K}$

### III.7 Cartographie des grandeurs électriques

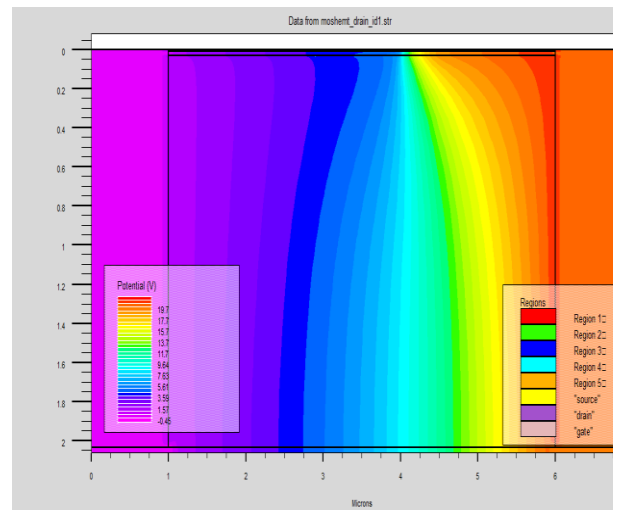
#### III.7.1 Carte du potentiel

Pour savoir le profil de distribution du potentiel dans la région de la barrière, nous avons tracé les cartes 2D (figure III.14) de potentiel dans le MOS-HEMT  $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ .

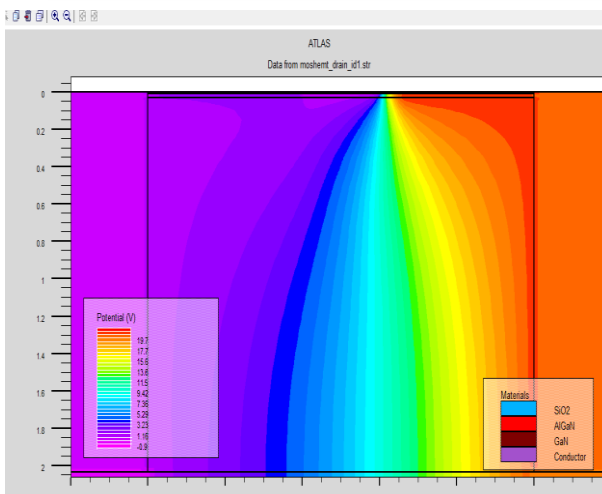
La polarisation du composant électronique en régime statique se fait par une tension de grille  $V_{gs}=-1\text{V}$  et  $V_{gs}=-4\text{V}$ , une tensions de drain  $V_{ds}=20\text{V}$  et pour la température  $T=300\text{K}$  et  $T=500\text{K}$  (figure III.14)



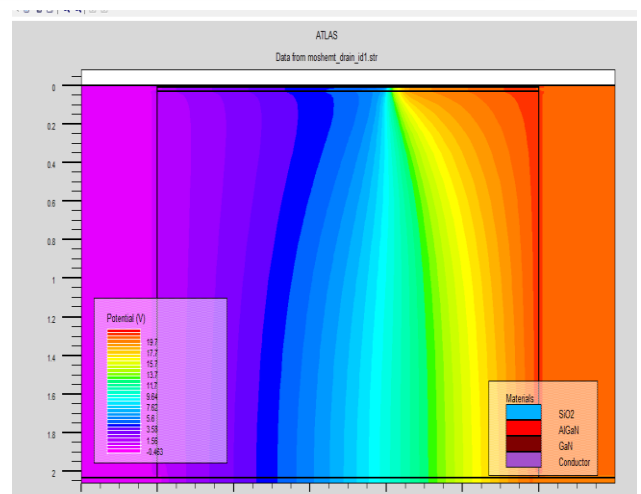
(a)



(b)



(b)



(d)

**Figure III .14:** Carte 2D de potentiel pour une tensions appliquée de 20 V

(a)  $V_{gs}=-1\text{ V}$  et  $T=300\text{K}$  (b)  $V_{gs}=4\text{ V}$   $T=300\text{K}$

(c)  $V_{gs}=-1\text{ V}$  et  $T=500\text{K}$ (d)  $V_{gs}=4\text{ V}$   $T=500\text{K}$

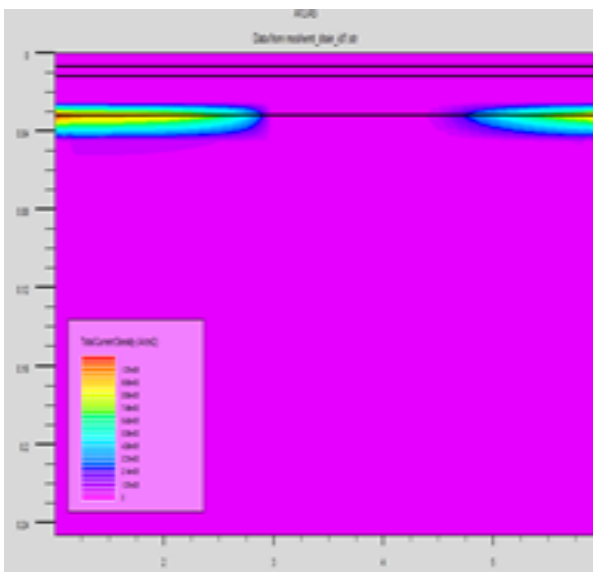
On remarque que le potentiel augmente de la région source vers la région drain, quelle que soit la valeur de  $V_{gs}$  et la valeur de température. Ces courbes montrent aussi que le potentiel augmente avec la polarisation de grille.

On remarque aussi que l'allure du profil de distribution du potentiel indiquée un gradient de potentiel plus important dans la région proche du drain, ceci étant dû à la polarisation du drain plus élevée que celle de la source, et la jonction inverse coté drain qui induit des valeurs de tensions inverses élevées au point de pincement.

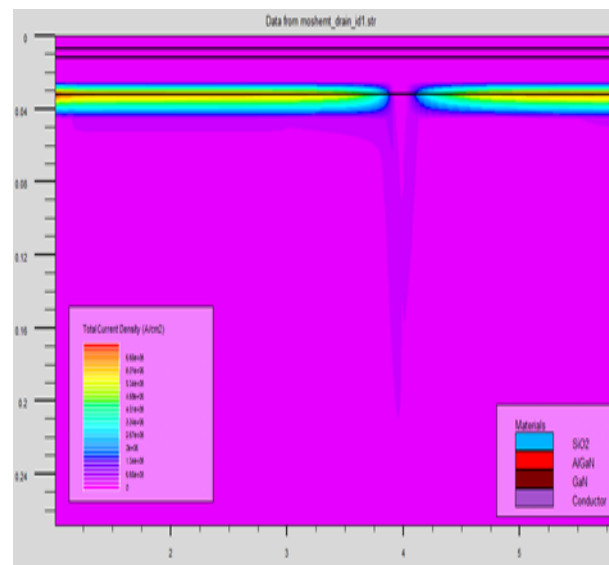
Le potentiel diminue d'une manière très rapide quand on va de la zone barrière/drain vers le socle du composant. On peut aussi noter que la distribution de potentiel présente une discontinuité suivant la direction transversale principalement en raison de charge piézoélectrique.

### III.7.2 Carte de courant

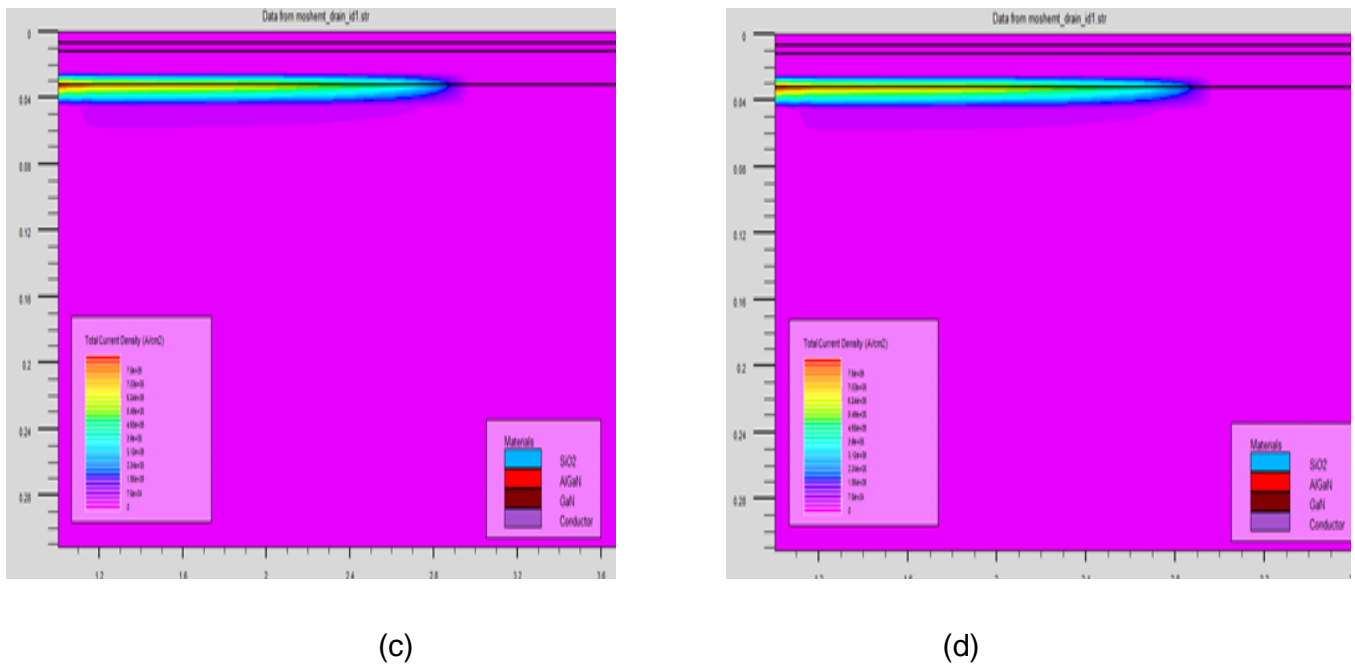
Pour mieux comprendre le profil de la densité du courant dans le composant, nous avons tracé les cartes 2D (figures III.15) de la densité de courant dans le MOS-HEMT. Les polarisations du composant se font par une tension de grille  $V_{gs}=-1\text{V}$  et  $V_{gs}=4\text{V}$  et une tension de drain appliquée est de  $20\text{V}$ .



(a)



(b)

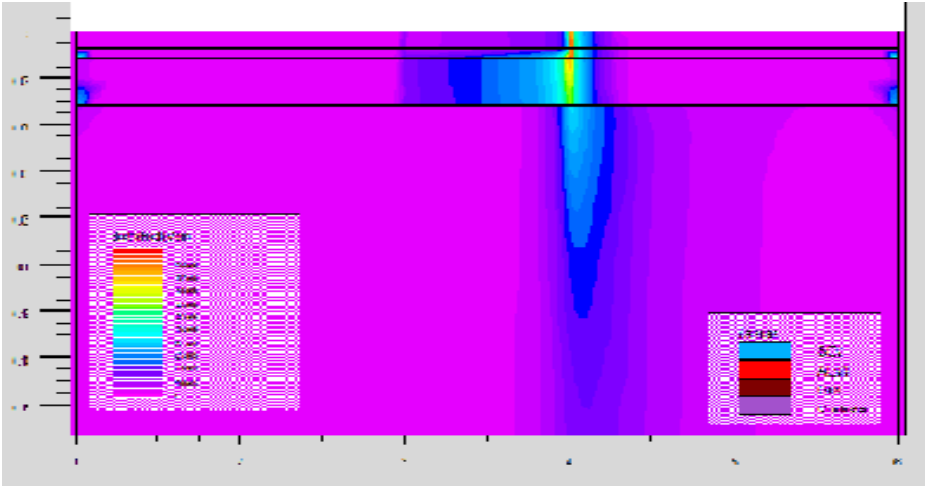


**Figure III.15 :** Carte 2D de la densité du courant  
 (a)  $T=300\text{K}$ ,  $V_{gs}=-1\text{ V}$  (b),  $T=300\text{K}$ ,  $V_{gs}=4\text{ V}$   
 (c)  $T=500\text{K}$ ,  $V_{gs}=-1\text{ V}$  (d)  $T=500\text{K}$ ,  $V_{gs}=4\text{ V}$

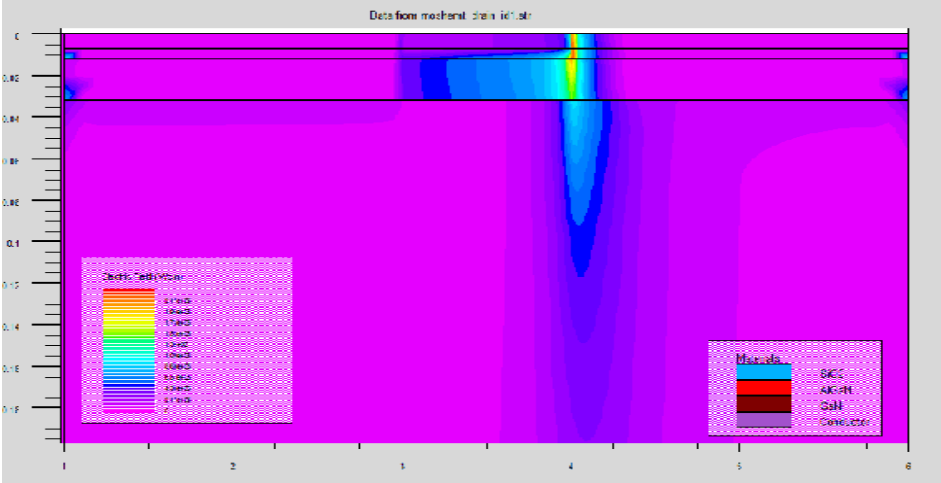
On remarque qu'il y a une augmentation de la densité du courant de la région canal vers la région barrière, pour les deux valeurs de  $V_{gs}$ . Ces cartes montrent aussi que la densité du courant augmente avec la polarisation de grille.

### III.7.3 Carte de champ électrique

Pour concevoir le profil de champ électrique dans le composant nous avons tracé les cartes 2D (figure III.16) de champ électrique dans le MOS-HEMT, les polarisations du composant se font par une tension de grille  $V_{gs}=1\text{ V}$ , une tension de drain appliquée est de  $20\text{ V}$  et une température  $T=300\text{K}$  et  $T=600\text{K}$ .



(a)



(b)

**Figure III.16 :** Carte 2D de champ électrique  
 (a)  $T=300K$ , (b)  $T=600K$

### III. 8 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les résultats de simulation de transistor MOS-HEMT. L'étude par simulation a été menée à l'aide du module Atlas du simulateur SILVACO par la méthode des éléments finis. La prise en compte des paramètres technologiques dans le modèle numérique bidimensionnel proposé a permis d'obtenir des résultats comparables aux résultats expérimentaux en termes de réseau des caractéristiques  $I_{ds}$ - $V_{ds}$ .

Le modèle développé a permis d'étudier les performances électriques du transistor MOS-HEMT ainsi que les performances radio fréquences. La distribution des grandeurs électriques telles que le potentiel, la densité de courant et le champ électrique à été présenté. La structure MOS-HEMT démontre les meilleures performances grâce à la combinaison de la plus haute mobilité de matériau et de haute constante diélectrique des diélectriques empilés.

# **Conclusion générale**



# Conclusion générale

Ce paragraphe vient parachever ce projet de fin d'études. Dans ce travail on a présenté les performances statiques et dynamiques du transistor MOS HEMT AlGaN / GaN avec empilement des diélectriques  $\text{La}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  de grille.

Nous avons présenté une description générale sur les principales propriétés des matériaux III-N en insistant sur les propriétés de transport de charges comme par exemple la mobilité et la vitesse des électrons. Nous avons également présenté les différentes filières technologiques du transistor à effet de champ les plus utilisés actuellement dans des conceptions hyperfréquences. En effet, les dispositifs à base de nitrure de gallium présentent de bonnes performances dans les applications de haute puissance et haute température. Ceci est principalement dû au large gap direct du GaN, son champ de claquage élevé. De plus l'effet de la polarisation spontanée et piézoélectrique existant toutes les deux au sein du GaN s'ajoute à ses qualités. La polarisation spontanée est une polarisation permanente dont la valeur est -0.029 tandis que la polarisation piézoélectrique est variable selon le type de contrainte appliquée sur sa maille. L'effet de la combinaison des deux est très notoire d'autant plus qu'elles contribuent à l'amélioration et à la diversion des domaines d'applications des MOS-HEMTs AlGaN/GaN. Cette étape préliminaire nous a préparé à la conception sous logiciel du composant étant donnés tous les paramètres que proposait le module ATLAS du simulateur SILVACO.

En effet, cette étape de conception était indispensable pour définir précisément le comportement des électrons dans le canal lorsque l'on se place à l'échelle de l'atome. La définition de chacun des paramètres intervenant dans la mise en œuvre du transistor était capitale et imposait une certaine rigueur car chacun d'entre eux avaient leur rôle à jouer dans le comportement du composant, que ce soit en régime statique ou en radiofréquences.

Aussi un modelé physico-électrique pour le transistor MOS-HEMT a été proposé. C'est un modèle numérique qui inclut les lois physiques régissant le fonctionnement du transistor et un model électrique avec un couplage physico-électrique.

Ensuite et après un aperçu des principes fondamentaux des MOS-HEMTs AlGaN/GaN, le troisième aspect traite la présentation de l'outil de simulation. En fait notre modèle numérique est implanté dans le module ATLAS du simulateur SILVACO.

La Structure MOS-HEMT présente les meilleures performances DC, RF grâce à la combinaison de la plus haute mobilité du matériau AlGaIn/GaN, et d'un offset de bande de conduction plus large et d'une forte barrière qui permet un meilleur confinement des charges dans le canal. L'ensemble de ces points permet d'améliorer les performances du transistor, de plus l'empilement de deux diélectriques qui font partie des matériaux high-k ( $\text{La}_2\text{O}_3$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) améliore les performances du composant en termes de puissance et fréquence.

Les perspectives qui se dégagent de ce projet de fin d'études peuvent être

- La validation des résultats de simulation en régime statique et radiofréquences du transistor MOS-HEMT  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{La}_2\text{O}_3$  AlGaIn/GaN conventionnel et à canal composite, par des mesures
- L'étude de l'effet thermique dans le transistor MOS-HEMT  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{La}_2\text{O}_3$  AlGaIn/GaN
- L'étude des structures comportant un isolant qui fait des parties des matériaux High K comme par exemple le HfO<sub>2</sub>.
- La conception d'un amplificateur MMIC dans la gamme d'ondes submillimétriques à base du MOS-HEMT.

## Bibliographie

- [1] **W. SHOCKLEY**, «A unipolar field effect transistor». Proc.Of the IRE, vol.40,pp.1365-1376,1953
- [2] **ThiDak NGUYEN**,Réalisation et caractérisation de HEMTS AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> sur silicium pour applications à haut tension
- [3] **Ludovic LACHEZE**,« ETUDE ET SIMULATION PHYSIQUE DES EFFETS PARASITES DANS LES HEMTsAlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>», Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux, 2009.
- [4] **Charles TEYSSANDIER**, « Contribution à la modélisation non-linéaire de transistors de puissance HEMT Pseudomorphiques sur substrat AsGa : Analyse des effets parasites »,
- [5] **M. Levinshstein and S. Rumyantsev**, Properties of Advanced Semiconductor Materials.WileyInterscience, 2001.
- [6] **KouratDjedjiga**« Modélisation de la rupture diélectrique dans les céramiques à haute teneur en alumine soumises à des contraintes électriques » soutenue le : 04/01/2012
- [7] **T.Gasseling**, “Caractérisation non linéaire avancée de transistors de puissance pour la validation de leur modèle CAO», Thèse doctorat, Université de Limoges, 2003.
- [8] **Stéphane DELLIER** «Contributions à la conception des circuits micro-ondes» soutenue le 18/07/2005
- [9] **O. Pajona**, «Transistor HEMT Métamorphique sur substrat GaAs pour applications de télécommunications à très haut débits : mesures statiques et dynamiques pour intégration des effets parasites dans des modèles», Thèse de Doctorat, Université de Limoges, Mai 2006.
- [10] **Ismail Noufel**,«Modélisation non linéaire distribuée des transistors à effet de champ: application à l’analyse de la stabilité des transistors et des caractéristiques en bruit dans les circuits millimétriques», Thèse de Doctorat, Université de Limoges, Mars 2001
- [11] **B. Lambert**, «Etude de l’influence du mécanisme d’ionisation par impact sur les performances et la fiabilité des transistors à effet de champ sur substrat III-V», Thèse Doctorat, Université de Bordeaux, Mars, 2001
- [12] **N. A. Papanicolaou, B. R. Bennett, J. B. Boos, D. Park, R. Ba**,«Sb-based HEMTs withInAlSb/InAs heterojunction», Electronics Letters, Vol. 41, Issue 19, pp. 1088- 1089, 2005.
- [13] **International Journal of High Speed Electronics and Systems** vol.14, no 3(2004) 791-796

- [14] **Astre Guilhem** « Fiabilité des dispositifs HEMT en technologie GaN » Thèse de Doctorat, l'université de Toulouse III-Paul Sabatier, 2012
- [15] **Andrzej Taube, Mariusz Sochaki, Jan Szmidt, Eliana Kamińska, and Anna Piotrowska**, « Modelling and Simulation of Normally-off AlGaIn/gaN MOS-HEMT », Journal of Electronics and Telecommunications, Vol.60, No.3, pp.253-258, 2014
- [16] **F. BERNARDINI et Al**, « Spontaneous polarization and piezoelectric constants of III-V nitrides », physical review B, Vol.56, No. 16, pp, 10024-10027, 1997.
- [17] **Xiao TANG**, « Optimisation théorique et expérimentale de composants hyperfréquences de la filière nitrure de gallium à partir d'étude physico-thermiques et électriques » Thèse de Doctorat, Université des sciences et technologies de Lille, 2010
- [18] **Barnardini, F., Fiorentini, V. and Venderbilt, d.** Spontaneous polarization and piezoelectric Constants of III-V nitride phys.Rev.B, vol.64, n°a RT.085207, p.7p, 2001.
- [19] **Nicolas VELLAS** « Etude expérimentales de transistors HEMT de la filière Nitrure de Gallium pour des applications de puissance hyperfréquences », Thèse de doctorat Université des sciences et technologies Lille, 2003.
- [20] **Hilde Muller et Jan Nicolas Myklebust**, « Les composants hyperfréquences », Site web: [www.etud.insa-toulouse.fr/~sroy/cce/Transistors\\_HF.doc](http://www.etud.insa-toulouse.fr/~sroy/cce/Transistors_HF.doc) actifs
- [21] **Liang Pang, Ogyun Seok, Kyekyoon (Kevin) Kim**, « AlGaIn/GaN MOS-HEMTs using RF MANTECH Conference », May 19th - 22<sup>nd</sup>, 2014, Denver, Colorado, USA
- [22] **Jiangning Chen** « Process dependent Electrical characteristics of High-k gate dielectrics on AlGaIn/GaN devices » these de Master, Departement of Electronics and Applied Physics Interdisciplinary Graduate School of science and Engineering Tokyo Institute of Technology, 2013
- [23] **ATLAS user's manual**, SILVACO international, 2010
- [24] **Crosslight Software Inc**, « Advanced Issues in HEMT Simulation », site web: [http://www.crosslight.com/applications/crosslight\\_hemt2.pdf](http://www.crosslight.com/applications/crosslight_hemt2.pdf)
- [25] **M. Gassoumi**, « Étude des défauts électriquement actifs dans les composants hyperfréquences de puissance dans les filières SiC et GaN », Thèse de Doctorale, INSA-Lyon, juin 2006
- [26] **Site web**: <http://www.crosslight.com/>, 2011.
- [27] **Han-Yin Liu, Ching-Sung Lee, Fu-Chen Liao, Wei-Chou Hsu, Bo-Yi Chou, Jung-Hui Tsai, and Hsin-Yuan Leed**, « Comparative Studies on AlGaIn/GaN MOS-HEMTs with Stacked La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Dielectric Structures », Journal of Solid State Science and Technology, 3(8)N115-N119, 2014

## Résumé

Ces dernières années, le transistor MOS-HEMT à base d'hétéro structure AlGaN/GaN fait l'objet d'intenses recherches et investigations. En effet, celles-ci ont montré l'efficacité de ce composant qui est un très bon candidat pour les applications haute puissance nécessitant des tensions et des puissances élevées. De part ses mobilités électroniques élevées et un fonctionnement aux hautes températures exigé pour certains dispositifs, les transistors MOS-HEMTs laissent espérer des applications aussi diverses tels que l'émetteurs-récepteurs radar HF, télécommunications terrestres, communications par satellite... Les performances de ce composant dépendent entre autre de la bonne qualité de sa couche active constituée d'une phase hexagonale de type wurtzite qui présente un champ électrique interne important résultant des propriétés de polarisations spontanée et piézoélectrique du matériau. Aussi, le transistor MOS-HEMT est un composant approprié pour la suppression de courant de fuite et l'augmentation de la tension de claquage en raison de la large bande interdite de l'isolant et la grande bande de conduction à l'interface diélectrique/GaN.

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur l'étude du comportement statique du transistor AlGaN/GaN MOS-HEMT sur substrat SiC avec empilement des diélectriques  $\text{La}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ . En effet,  $\text{La}_2\text{O}_3$  a une constante diélectrique importante (20 ~ 25), une grande bande interdite (~ 6 eV) et une meilleure stabilité thermique que  $\text{HfO}_2$ . Dans ce cadre, un modèle physico-électrique issu d'un modèle de dérive-diffusion est basé sur la méthode des éléments finis développé pour ce transistor. Ce modèle prend en compte les paramètres du transport de charges telles que la mobilité et la vitesse des électrons. Il permet l'étude et l'analyse détaillée des performances statiques et radiofréquences en tenant compte l'impact de la température du réseau cristallin sur l'ensemble des paramètres de ce composant. Ce modèle est exploité pour étudier la distribution de certains grandeurs électriques tels que le potentiel, la densité du courant total et le champ électrique dans le composant.

**Mots clés:** MOS-HEMT, GaN, AlGaN,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{La}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ , Stabilité thermique, Eléments finis.

## summary

In recent years, the MOS-HEMT based hetero structure AlGaN / GaN is the subject of intense research and investigations. Indeed, they have shown the effectiveness of this component which is a very good candidate for high power applications requiring voltage and high output. Due to its high electron mobility and high temperature operation required for some devices, MOS-HEMTs transistors give hope such diverse applications such as HF radar transceivers, terrestrial telecommunications, satellite communications ... The performance of this component depend among other good quality of the active layer of a hexagonal phase of wurtzite which has a large internal electric field resulting from spontaneous and piezoelectric polarization properties of the material. Also, the MOS-HEMT appropri   pour isa component of the removal decourant fuiteet increase dela voltage claquageen due lalargebande prohibited insulation great bandede andthe conductive dielectric interface / GaN.

The work presented in this thesis focuses on the study of static ducomportement transistor AlGaN / GaNMOS-HEMT on SiC substrate with stacking of La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dielectric. Indeed, La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> has a large dielectric constant (20 ~ 25), a large band gap (~ 6 eV) and better thermal stability than HfO<sub>2</sub>. Dans this context, a physical-electric model from a drift-diffusion model is based on the method of finisestd  velopp   elements for this transistor. This model takes into account the charge transport parameters such as mobility and the speed of electrons. It allows the study and the detailed analysis of static and RF performance, taking into account the impact of the temperature of the crystal lattice on all param  tresde this component. This model estexploit     tudi  la for distribution of certain electrical quantities such as the potential, the density of the total current andthe electric field in the component.

Keywords: MOS-HEMTs, GaN, AlGaN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, thermal stability, finite elements.