



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Med Khider Biskra

Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie

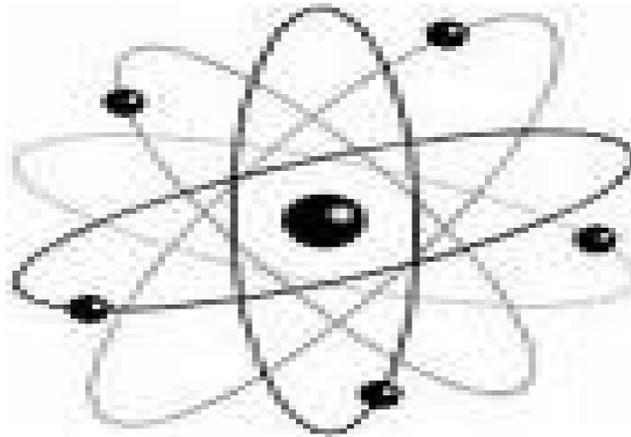


Département des Sciences de la Matière

Domaine des Sciences de la Matière

Filière de Physique

Spécialité Physique Photovoltaïque



Mémoire de fin d'étude en Master

Intitulé:

Étude et simulation d'un transistor AlGa_N/Ga_N HEMT

Présenté par :

Dahmane Khalida

Devant le Jury Composé par :

Meftah Amjad

Professeur

Université Med Khider.Biskra

Présidente

Tibermacine Toufik

MCB

Université Med Khider.Biskra

Examineur

Abdeslam Nora Amele

MCB

Université Med Khider.Biskra

Rapporteur

Année Universitaire

2013-2014

Remerciement:

Avant tout, nous remercions Allah le tout puissant qui nous a donné la force pour réaliser cet ouvrage que nous souhaitons qu'il atteindra nos espérances.

Ce travail a été réalisé au sein de laboratoire des Matériaux Semi-conducteurs et Métalliques « LMSM » à l'université de Biskra.

Je tiens à exprimer mes remerciements les plus sincères à mon encadreur Madame Abdou Salam Nora Amele -Maître conférence à l'université de Biskra- de bien vouloir m'encadrer.

Mes remerciements les plus élogieux Madame Meftah Amjad Professeur à l'université de Biskra, qui me fait l'honneur de présider le jury de mon mémoire

Il m'est aussi très agréable de remercier Monsieur Tibermacine Maître de conférences à l'université de Biskra, qui a bien voulu accepter d'examiner mon travail

En remercie tous ceux qui de près ou de loin mon ont aidés et soutenus afin de réaliser un travail scientifique d'actualité.

TABLE DES MATIERES

<i>Dédicace</i>	<i>i</i>
<i>Remerciement</i>	<i>ii</i>
<i>Tableaux de matière</i>	<i>iii</i>
<i>Liste de figure</i>	<i>iv</i>
<i>Liste de tableau</i>	<i>v</i>
<i>Introduction générale</i>	<i>vi</i>

Chapitre I :Semi-conducteurs III-V (les nitrures de gallium)

I.1.Introduction.....	2
I.2.Historique des systèmes a base de GaN	2
I.3.Avantages des éléments III-N	3
I.4 Propriétés des nitrures	5
I.4.1.Propriétés structurales.....	5
I.4.1.1 Structure de type wurtzite	5
I.4.1.2.Structure de type blende de zinc.....	7
I.4.1.3.Zone de Brillouin.....	8
I.4.3.4.Paramètres de maille.....	9
I.4.2.Les propriétés électriques du GaN.....	10
I.4.2.1La polarisation.....	10
I.4.2.1.a La polarisation spontanée.....	10
I.4.2.1.b La polarisation piézoélectri.....	11
I.5.Propriétés du ternaire $Al_xGa_{1-x}N$	12
I.6 Calcul de la densité de charges due à la polarisation.....	14
I.7.Applications.....	16
I.8 Résumé.....	18
Bibliographies du chapitre I.....	19

Chapitre II:Le principe de fonctionnement d'AlGaN/GaN HEMT

II.1Introduction.....	23
II.2 Les transistors a effet de champs	23
II.2.1 Les MESFETs.....	23
II.2.2 Les HEMTs.....	25

II.3. HEMTs a base de nitrure de gallium AlGa _N /Ga _N	25
II.3.1. Description de la structure d'un HEMT.....	25
II.3.2 Description des couches.....	26
II.4. Etude de L'hétérojonction AlGa _N /Ga _N	27
II.4.1 Hétérostructure AlGa _N /Ga _N	27
II.4.2 Formation et expression du 2DEG.....	29
II.5 Les caractéristiques électriques.....	31
II.5.1 Le courant drain-source I_{ds}	31
II.5.2 La transconductance.....	32
II.5.3 La conductance de sortie.....	32
II.6 Résumé.....	32
Bibliographies du chapitre II.....	34

Chapitre III : La simulation d'un HEMT par Silvaco basé sur la modélisation physique

III.1 Introduction.....	36
III.2 Présentation du logiciel de simulation SILVACO.....	36
III.2.1 ATLAS.....	37
III.2.2 Différents étapes de simulation.....	39
III 2.2.1 Spécification de la Structure étudié.....	39
III 2.2.1.a Spécification de Maillage.....	40
III 2.2.1.b Spécification des Régions et Matériaux	40
III 2.2.1.c Spécification des électrodes.....	41
III.2.2.1.d Spécification de Dopage	42
III.2.2.2 Spécifications des Matériaux et des modèles.....	43
III.2.2.2 a Spécifications des Matériaux.....	43
III.2.2.2 b Spécifications des modèles.....	43
III.2.2.3 Spécification Méthodes numériques de calcul.....	44
III.3. Les équations de Base de Semi-conducteur en ATLAS-SILVACO.....	44
III.4. Résumé.....	45
Bibliographies du chapitre III.....	46

Chapitre IV: Résultat et interprétation

IV. Introduction.....	48
IV.2 Le transistor à effet de champ Al _{0,28} Ga _{0,72} N /Ga _N HEMT.....	48

IV.2.1 Description de la structure simulée.....	48
IV.3.l'influence des propriétés du matériau.....	52
IV.3.1 L'effet de la concentration d'interface n_s sur les caractéristiques du transistor $Al_{0.28}Ga_{0.72}N / GaN$ HEMT.....	52
IV.3.2.L'effet de dopage du canal (GaN) sur les caractéristiques du transistor $Al_{0.28}Ga_{0.72}N/GaN$ HEMT.....	55
IV.4.L'influence des paramètres technologique de l'AlGaN/GaN HEMT.....	57
IV.4.1 L'effet du type de substrat sur les caractéristiques du transistor $Al_{0.28}Ga_{0.72}N/GaN$ HEMT.....	57
IV.4.2 L'effet de la longueur de la grille (Lg) sur les caractéristiques du transistor $Al_{0.28}Ga_{0.72}N/GaN$ HEMT.....	58
IV.4.3 L'effet de l'espace drain-source (Lsd) sur les caractéristiques du transistor $Al_{0.28}Ga_{0.72}N/GaN$ HEMT.....	61
IV.5 Résumé.....	63
Bibliographies du chapitre IV.....	64
Conclusion générale.....	66

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Energie de la bande interdite en fonction du paramètre de maille à 300°K de différents semi conducteurs	3
Figure I.2 :Maille cristalline de GaN dans sa phase wurzite.....	6
FigureI.3 : Polarités gallium et azote dans GaN hexagonal.....	7
FigureI.4 :Structure zinc blende du GaN.....	7
Figure I.5 :Seconds voisins dans les structures wurzite et blende de zinc.....	8
FigureI.6 : Les zones de Brillouin des deux structures : (a) wurzite et (b) zinc blende.....	9
Figure I.7 :polarisation spontanée dans le GaN.....	11
Figure I.8 : L'hétérostructure AlGa _N / GaN à face Ga.....	14
Figure I.9 : Diagramme des densités de charges présentes à l'hétérojonction.....	15
Figure I.10 : Variation de la densité n_s en fonction du taux d'aluminium (x) pour différentes épaisseurs (d).....	16
Figure II.1 : (a) Schéma d'un MESFET AlGaAs, (b) Vue en coupe d'un MESFET polarisé	24
Figure II.2 : Structure et différentes couches du HEMT AlGa _N /GaN.....	26
Figure II.3 :Diagramme d'énergie d'une hétérojonction: (a) les deux semi-conducteurs sont séparés par un espace infinitésimal (b) les deux semi-conducteurs sont raccordés	28
Figure II.4 :Schéma de la structureAlGa _N	29
Figure II.5 : Diagramme énergétique de la bande de conduction du HEMT AlGa _N /GaN.....	30
Figure III.1 :Schéma synoptique des modules utilisés dans la simulation par TCAD SILVACO.....	38
Figure III.2 : Le logiciel Silvaco en cours d'exécution	39
Figure III.3:Maillage du dispositif	40
Figure III.4 : Structure bidimensionnelle d'Un HEMT	41
Figure III.5 :Définition des électrodes.....	42
Figure III.6 :Définition de dopage.....	43
Figure IV.1: la structure du HEMT Al _{0,28} Ga _{0,72} N/GaN simulée par Atlas- Silvaco, a gauche la représentation des différentes régions et a droite la représentation est faite selon le type de matériau.....	49
Figure IV.2 : une structure représentative d'un transistor HEMT AlGa _N /GaN.....	45

Figure IV.3: Les caractéristiques courant de drain- tension de drain pour des tensions de grille $V_g = -2, -1, 0$ Volt.....	51
Figure IV.4: la caractéristique de transfert DC du transistor étudié pour $V_{ds} = 4.0$ Volt	51
Figure IV.5: L'effet de la charge d'interface AlGa _N /Ga _N sur les caractéristiques courant- drain- tension-drain ($I_d - V_d$) du transistor.....	53
Figure IV.6: L'effet de la charge d'interface AlGa _N /Ga _N sur la caractéristique courant-drain- tension-grille. ($I_{ds} - V_{gs}$) du transistor... ..	54
Figure IV.7: L'effet de la charge d'interface AlGa _N /Ga _N sur la transconductance G_m (V_{gs})	54
Figure IV.8: L'effet du dopage du canal Ga _N sur les caractéristiques courant-drain - tension- drain ($I_{ds} - V_d$) du transistor	55
Figure IV.9: L'effet du dopage du canal Ga _N sur la caractéristique courant-drain- tension- grille ($I_{ds} - V_{gs}$) du transistor AlGa _N /Ga _N HEMT.....	56
Figure IV.10: L'augmentation du maximum de la transconductance G_{mmax} en fonction du du dopage du canal Ga _N du transistor AlGa _N /Ga _N HEMT.....	56
Figure IV.11: L'effet du type de substrat sur la caractéristique de transfert courant-drain- tension-drain ($I_d - V_d$) du transistor	58
Figure IV.12: L'évolution de la caractéristique de transfert courant-drain- tension-drain (I_{ds} - V_{ds}) du transistor HEMT en fonction de la longueur de la grille à différentes tension de la grille- (V_{gs}).....	59
Figure IV.13: L'effet de la longueur de la grille sur la caractéristique de transfert ($I_{ds} - V_{gs}$) du transistor HEMT	60
Figure IV.14: la variation de la transconductance en fonction de la tension de la grille a différents longueur de la grille	60
Figure IV.15: la variation de la transconductance en fonction de la tension de la grille a différents longueur de la grille.....	61
Figure IV.16: la variation de la transconductance en fonction de la tension de la grille a différents longueur de la grille	62
Figure IV.17: la variation de la transconductance en fonction de la tension de la grille a différents longueur de la grille.....	62

LISTE DE TABLEAU

LISTE DE TABLEAU

Tableau I.1 Propriétés des différents matériaux semi conducteurs	4
Tableau I.2 Paramètres de la structure wurtzite idéale et réelle de GaN	6
Tableau I.3 Valeurs expérimentales et théoriques des paramètres de maille et de la distance.....	9
Tableau I.4 Paramètre de maille a des structures dans la phase cubique.....	10
Tableau I.5 Effets de la maille non idéal sur la P_{SP} dans les matériaux III-N.....	11
Tableau I.6 Coefficients piézoélectriques pour les semiconducteurs III-V.....	12
Tableau IV.1 la structure du HEMT $Al_{0.28}Ga_{0.72}N/GaN$ simulé par Silvaco-Atlas.....	49

Introduction général

Introduction générale

Durant ces dernières années, le développement des composées III-V a été spectaculaire. En effet, ces composés présentent des performances bien supérieures à celles des semi-conducteurs plus classiques comme le silicium. Ce sont des matériaux de choix pour toutes les applications microélectroniques et optoélectroniques. Or les caractéristiques de ces matériaux et de leurs composants sont sensibles à l'état de surface et à l'interface. L'étude du fonctionnement des différents types de composants électroniques passe par une maîtrise préalable des phénomènes physiques régissant les propriétés des électrons dans le semiconducteur. Il est donc essentiel de comprendre les mécanismes de formation des hétérostructures et des nanostructures pour maîtriser au mieux la technologie des composants réalisés, à l'heure où les nanotechnologies ouvrent de nouvelles voies.

En effet, l'intérêt aux composées III-V tels que l'arséniure de gallium (GaAs) ou le nitrure de gallium (GaN) a été impressionnant. Cependant, de nos jours, la microélectronique et l'optoélectronique ne cessent de se développer et de nombreuses études sont effectuées afin de disposer de semiconducteurs toujours plus performants.

Le nitrure de gallium (GaN) admet une bande interdite large et directe, une grande stabilité chimique et thermique, de très bonnes propriétés mécaniques, et des propriétés physiques très intéressantes pour opérer en haute température, haute puissance et haute fréquence. Allié éventuellement autres composés III-V, il permet de réaliser divers dispositifs pour un très vaste domaine d'applications, entre autres les transistors HEMT. Outre ces propriétés physiques, GaN présente la particularité d'être un matériau pyroélectrique et piézoélectrique. Cette spécificité permet de réaliser des transistors HEMT type AlGaN/GaN dont la densité d'électrons à l'interface peut aisément dépasser 10^{13}cm^{-2} sans dopage intentionnel de la barrière AlGaN. C'est dans ce contexte que nous nous intéresserons à la caractérisation des propriétés électriques et physiques de matériau afin de quantifier l'effet de ces derniers sur les reponses de sortie du transistor.

Pour cela, des caractéristiques électriques (courant de drain et tranconductance) du HEMT AlGaN/GaN en fonction de la tension ont été étudiées.

L'objectif de ce travail est de faire une simulation physique de type TCAD, avec le logiciel SILVACO basé sur la modélisation bidimensionnel de transistor HEMT AlGaN/GaN et de déterminer les caractéristiques électriques $I_{ds}-V_{ds}$, $I_{ds}-V_{gs}$ et G_m-V_{gs} avec l'influence des différents paramètres.

Introduction générale

Ce travail contient quatre chapitres avec une introduction et conclusion générale telle que:

- Dans le premier chapitre, nous traitons les semiconducteurs III-V particulièrement le nitrure de gallium. Nous exposons toutes ses propriétés physiques, optiques mécaniques dans ses deux phases. Nous étudions alors les propriétés fondamentales de GaN, AlN, et leurs alliages.
- Dans le deuxième chapitre; nous menons une étude théorique détaillée sur le transistor à hétérostructure HEMT AlGaIn/GaN: fonctionnement, avantages.
- Au troisième chapitre, nous présentons une étude succincte sur le simulateur T-CAD Atlas-Silvaco, étapes de simulation; modèles implanter; caractéristiques de ce simulateur
- . Puis nous simulons l'influence des paramètres internes du transistor sur ses performances, ainsi que les caractéristiques statiques et RF.

Enfin ; nous terminons notre mémoire par une conclusion générale.

Chapitre I :

Chapitre I :

Les semiconducteurs III-V (les Nitrures de Gallium)

I.1 Introduction

Les transistors à haute mobilité électronique (HEMTs) à base de nitrure de gallium (GaN) sont, depuis peu, capable de concurrencer les transistors à base de silicium (Si) et les pHEMT à base d'arséniure de gallium (GaAs) sur le marché des stations de bases utilisées pour les télécommunications. Les semiconducteurs à grande largeur de la bande interdite et particulièrement les composés III-N tels que le GaN et ses alliages sont, par leurs propriétés physiques et chimiques, de bons candidats pour la réalisation de tels composants caractérisés par une puissance élevée à haute fréquence. En effet, leurs structures cristallographiques leur confèrent des propriétés telles qu'une haute conductivité thermique, un fort champ de claquage, de fortes vitesses de saturation qui sont essentiels pour ce type d'applications.

Après cette courte introduction, les semi conducteurs III-N et leurs propriétés propices seront rappelés. Nous évoquerons ensuite les principales propriétés du nitrure de gallium (GaN) et ses applications dans le cadre de transistors à haute mobilité électronique (HEMTs).

I.2 Historique des systèmes a base de GaN

Les dispositifs à base de nitrure de gallium GaN ont connu un énorme succès au cours de ces dernières années. En revanche, le matériau lui-même a été découvert dès le début du XX siècle. Juza et Hahn ont été les premiers à synthétiser le GaN dans les années 1930 en faisant passer de l'ammoniac (NH_3) sur du gallium liquide (Ga) à des températures élevées [1]. Leur but était d'étudier la structure et les paramètres du réseau cristallin du GaN. A cette époque, aucune croissance épitaxiale en phase vapeur n'avait jamais été tentée en raison de l'absence d'un substrat adéquat. La fin des années 1970 a connu une forte diminution des recherches dans le domaine du GaN en raison des difficultés rencontrées avec la croissance des couches de haute qualité nécessaires pour le développement des dispositifs.

Les problèmes persistants étaient toujours le choix et la disponibilité d'un substrat approprié, le contrôle de la conductivité intrinsèque très élevée des matériaux de type n et les difficultés d'obtention d'un GaN de type p . En 1982, seule une poignée d'articles étaient publiés dans le monde entier sur ce système de matériaux.

Il a fallu attendre la persévérance d'Amano et al. qui, en 1986, ont obtenu une couche GaN avec des propriétés morphologiques, optiques et électriques fortement améliorées. Cette couche a été obtenue par une croissance MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition) sur un substrat de saphir et par l'intermédiaire d'une couche de nucléation d'AlN

[2]. En 1989, la même équipe était la première à élaborer une couche GaN conductrice de type p [3]. Ces découvertes ont conduit à la renaissance du GaN au début des années 1990. En 1991, Khan et al. étaient les premiers à donner la preuve d'un gaz d'électrons bidimensionnel (2DEG) formé par une hétérojonction $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ sur saphir [4]. Les premiers transistors GaN à effet de champ (Metal Semiconductor Field Effect Transistors MESFET) et à hétérostructure (High Electron Mobility Transistors HEMTs) produits par MOCVD sur substrats de saphir furent fabriqués respectivement en 1993 et en 1994, par Khan et al. [5, 6]. En 1993, Nakamura et al. ont donné naissance à la première LED bleu GaN [7].

Depuis ces pas de géant, les activités de recherche et la commercialisation des dispositifs à base de GaN ont beaucoup progressé. Aujourd'hui, les technologies de production, la reproductibilité et la fiabilité du matériau épitaxié sont les questions clés qui doivent être posées pour satisfaire les grandes promesses attendues des dispositifs à base de GaN.

I.3 Avantages des éléments III-N

En point de vue propriétés électroniques et en comparant les propriétés de base des matériaux semiconducteurs, nous pouvons conclure sur les domaines d'applications et les performances accessibles par certains alliages. Comme nous pouvons le voir sur la figure I.1, les semiconducteurs diffèrent essentiellement par la nature et la largeur de leur bande d'énergie interdite. Nous trouvons parmi eux des matériaux à gap direct tels que le GaAs, l'InP et le GaN. L'avantage de ce type de bande interdite est que les transitions des porteurs (électrons ou trous) entre les niveaux énergétiques est directe.

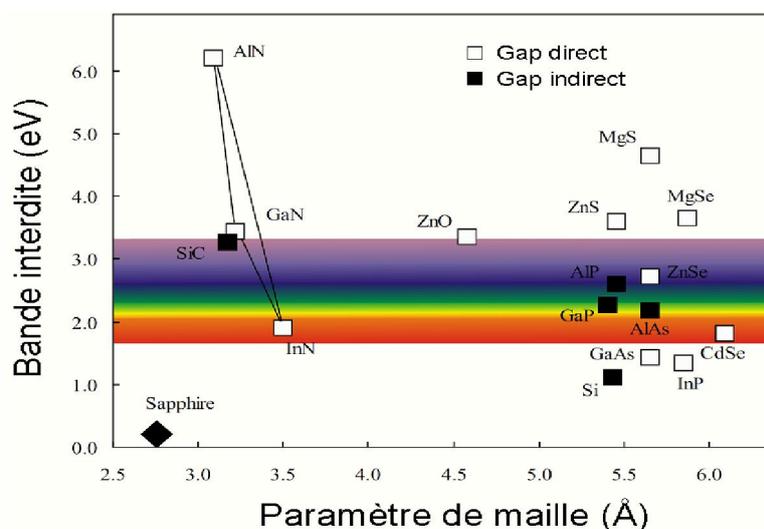


Figure I.1: Énergie de la bande interdite en fonction du paramètre de maille à 300°K de différents semi conducteurs.

Dans ce cas, une recombinaison radiative ou une absorption inter-bandes est facilement générée. Ces propriétés sont primordiales dans les applications optoélectroniques à base de semi conducteurs III-V, notamment pour la réalisation de lasers à semi conducteurs.

La largeur de la bande interdite joue aussi un rôle important selon l'application envisagée. Les semi conducteurs à grand gap permettent d'atteindre des tensions de claquage et des températures de fonctionnement assez élevées, ce qui rend possible leur utilisation dans les dispositifs à haute tension d'alimentation. SiC et GaN possèdent un gap deux à trois fois plus grand et par conséquent un champ de claquage typiquement un ordre de grandeur plus grand que les semi conducteurs classiques tels que le Si, le GaAs ou l'InP.

D'autres propriétés physiques de ces alliages peuvent être aussi comparées afin de voir l'intérêt de certains d'entre eux. Le tableau I.1 présente les propriétés fondamentales à 300°K des semiconducteurs les plus importants pour les performances des dispositifs électroniques. [8 - 10].

Généralement, pour atteindre des forts courants et un fonctionnement à haute fréquence, il est souhaitable d'avoir une mobilité de porteurs de charge (μ) et une vitesse de saturation (v_{sat}) des électrons élevées. La haute mobilité des électrons dans GaAs ($8500 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) est la principale raison qui explique que les transistors à effet de champ (FET) fabriqués avec ce matériau ont d'excellentes performances à haute fréquence. Un inconvénient majeur dans la fabrication des transistors à base de GaN et de SiC est la valeur relativement faible de la mobilité des électrons, qui est de $900 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ pour GaN et environ $700 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ pour le SiC. Cependant, ces valeurs sont suffisantes pour les transistors spécifiquement conçus pour un fonctionnement à haute puissance.

Propriétés électroniques	GaN	AlN	InN	SiC	Si	GaAs	InP
Bande interdite (eV)	3.4	6.2	0.7	3.2	1.1	1.4	1.3
Champ de claquage (MV/cm)	3.3	8.4	1.2	3.5	0.3	0.4	0.5
Vitesse de saturation (10^7 cm/s)	2.5	2.1	1.8	2.0	1	1	1
Mobilité électronique ($\text{cm}^2/\text{V.s}$)	990	135	3.6	650	1500	8500	5400
Permittivité relative (ϵ_r)	9.5	9.14	15.3	10	11.8	11.5	12.5
Conductivité thermique (W/cm.K)	1.3	2	0.45	4.5	1.5	0.5	0.7

Tableau I.1: Propriétés des différents matériaux semi conducteurs.

La conductivité thermique (κ) d'un matériau semiconducteur est un paramètre très important car il définit la capacité de dissipation de la chaleur par un composant. Une mauvaise conductivité thermique conduit à un fonctionnement dégradé du dispositif à des températures élevées. En général, les semi conducteurs classiques sont de mauvais conducteurs thermiques, en particulier GaAs et InP. Inversement, le SiC et surtout le diamant sont d'excellents conducteurs thermiques. Le GaN et l'AlN sont comparables avec le Si, le meilleur des semi conducteurs classiques.

La permittivité relative (ϵ_r) est une indication sur la charge capacitive d'un transistor et affecte les impédances de sortie d'un dispositif. Le tableau I.1 montre que les valeurs de ϵ_r pour les semiconducteurs à grand gap sont inférieures à celles des semiconducteurs classiques: -20% dans le cas du GaN, d'AlN et du SiC et -55% pour le diamant. Cela permet par exemple, avec un dispositif à base de GaN, d'avoir une surface 20% plus grande pour une impédance donnée. En conséquence, cette augmentation de la surface permet de générer des courants plus forts et une plus forte puissance de sortie.

I.4 Propriétés des nitrures

Les nombreuses propriétés mécaniques, thermodynamiques, optiques, électroniques, structurales, thermiques et électriques du GaN, font de ce semiconducteur un élément attractif dans plusieurs domaines d'utilisation. Nous citerons dans ce paragraphe un ensemble de propriétés jugées utiles pour la suite de notre étude.

I.4.1 Propriétés structurales

Le nitrure de gallium se présente sous deux formes cristallines: la structure de type Wurtzite (hexagonale) et la structure blende de zinc (cubique).

I.4.1.1 Structure de type wurtzite

Dans la structure de type wurtzite figure I. 2, les atomes d'azote (N) forment un empilement hexagonal compact. Les atomes de gallium (Ga) occupent la moitié des sites tétraédriques. Il y a deux unités formulaires GaN par maille et le groupe d'espace est **P63mc**. Cette structure est caractérisée par les paramètres de maille a et c , mais aussi par le paramètre $u = l/c$, où l est la longueur de liaison Ga-N suivant c [11].

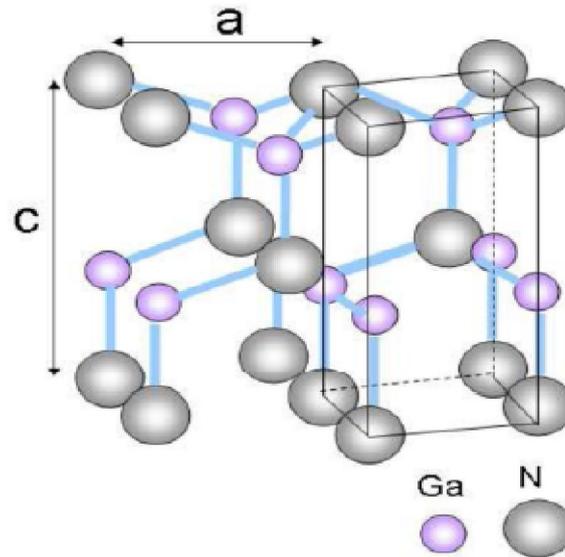


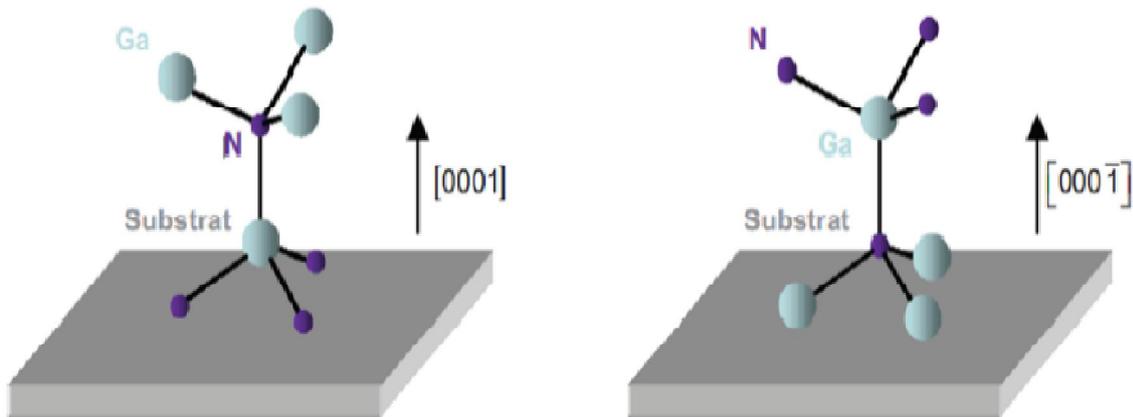
Figure I.2: Maille cristalline de GaN dans sa phase wurzite.

La structure du nitrure de gallium ne dévie que légèrement de la structure wurzite idéale ou la comparaison entre eux est donné par le Tableau I.2. Les atomes de gallium sont donc dans un environnement tétraédrique très peu distordu [12]. Les cristaux de nitrure de gallium de structure wurzite adoptent le plus souvent une géométrie en plaquette, avec les faces perpendiculaires à l'axe c , ou en prismes, dont l'axe de croissance est l'axe c .

GaN wurzite	c/a	u
Structure idéale	1.633	0.376
Structure réelle	1.627	0.377

Tableau I.2: Paramètres de la structure wurzite idéale et réelle de GaN.

La structure wurzite n'est pas symétrique par rapport au plan (0001), on parle alors de polarité. 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 (figure I.3). Dans le cas contraire, on a une polarité azote. 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.



Polarité gallium **Polarité azote**
Figure I.3: Polarités gallium et azote dans GaN hexagonal [13].

1.4.1.2- Structure de type blende de zinc

Dans la structure de type blende de zinc (Figure I.4), les atomes d'azote forment un empilement cubique faces centrées dans lequel les atomes de gallium occupent la moitié des sites tétraédriques. Il y a quatre unités formulaires GaN par maille et le groupe d'espace est $F\bar{4}3m$. Cette structure est caractérisée par le paramètre de maille a [11].

Le paramètre cristallin a observé, varie entre 4,51 et 4,52Å suivant la méthode de synthèse mise en œuvre. Cette phase étant métastable, sa synthèse nécessite le contrôle précis des paramètres expérimentaux.[14] Dans le cas de l'élaboration de couches minces, un substrat généralement de structure cubique et orienté de manière spécifique (afin de désavantager la formation de la phase hexagonale) est en plus nécessaire pour stabiliser la phase cubique. Par exemple, les substrats suivants sont utilisés: MgO (100), Si (100), β -SiC(3C-SiC) (100), GaAs (001) ou encore Al_2O_3 (0001) [15,16].

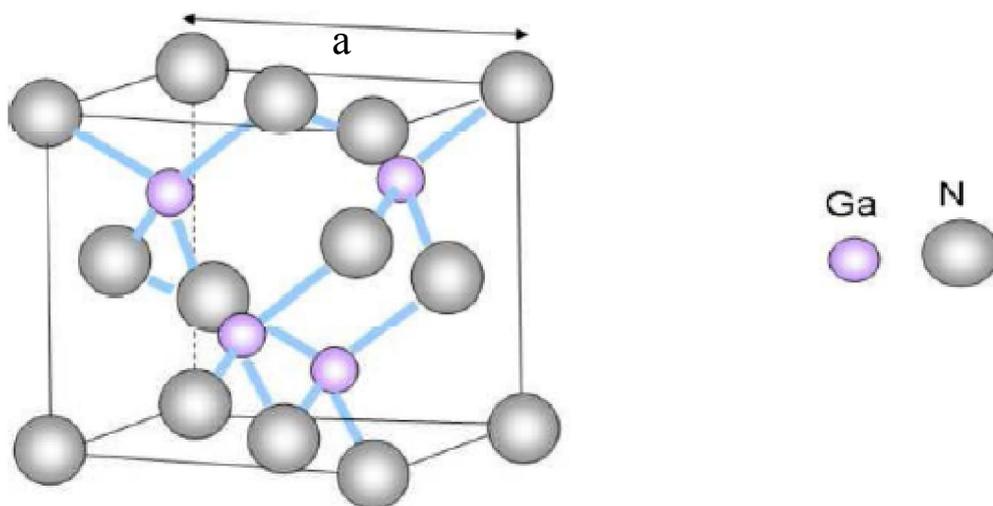


Figure I.4: Structure zinc blende du GaN.

Comme nous venons de le voir; les deux structures diffèrent uniquement au niveau de la séquence d'empilement des plans cristallins (figure I.5). L'entourage cristallographique des atomes ne diffère qu'à partir du troisième voisin.

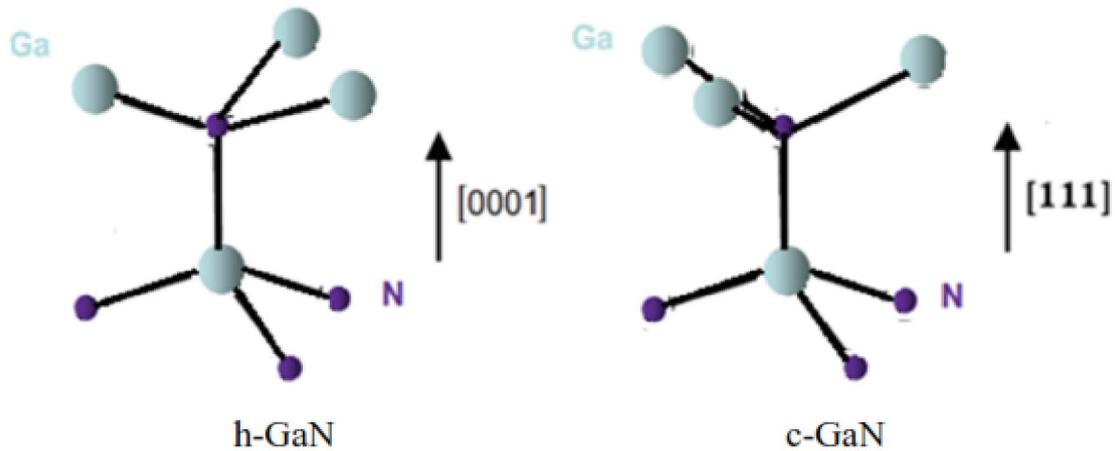


Figure I.5: Seconds voisins dans les structures wurtzite et blende de zinc [17].

I.4.1.3 Zone de Brillouin

Les propriétés électroniques et optiques sont gouvernées par la structure de bandes électroniques autour du maximum de la bande de valence et du minimum de la bande de conduction. Pour un cristal périodique, les paramètres internes ont la périodicité du réseau. Le réseau direct est défini par la première zone de Brillouin. Les grandeurs physiques dans le cristal sont périodiques dans l'espace direct, il suffit de les connaître dans la maille élémentaire du réseau pour les reconnaître dans tout le cristal. Il est de même dans l'espace réciproque, il suffit de les avoir pour la première zone de Brillouin.

Rappelons que la zone de Brillouin des réseaux cfc a la forme d'un octaèdre tronqué par les six faces d'un cube comme illustrer par la figure 1.6. Elle présente un centre de symétrie à l'origine noté Γ et des axes de symétrie: les axes $\langle 100 \rangle$ à symétrie d'ordre 4 (Δ), les axes $\langle 111 \rangle$ à symétrie d'ordre 6 (Λ), les axes $\langle 011 \rangle$ à symétrie d'ordre 2 (Σ).

Matériau	Valeur théorique a_0 (Å) calculée par les méthodes empiriques [21]		
	GaN	4.423	4.462
AlN	4.301	4.392	4.34

Tableau I.4 : Paramètre de maille a des structures dans la phase cubique [20]

1.4.2 Les propriétés électriques du GaN

1.4.2.1 La polarisation

La présence d'un champ de polarisation spontanée et piézoélectrique est l'une des propriétés physiques originales des composés semiconducteurs III-N de structure wurtzite, crû par épitaxie le long de la direction $\langle 0001 \rangle$, qui a des conséquences pour les applications électroniques. L'importance de la polarisation totale dans les composés nitrures présente un grand intérêt comparativement à d'autres semiconducteurs composés III-V tel que le GaAs.

1.4.2.1.a La polarisation spontanée

Compte tenu de l'électronégativité, que possède l'azote par rapport aux autres éléments du groupe V tels que le gallium et l'indium, lui permet d'attirer plus fortement vers lui les électrons dans la liaison Ga-N. Le nuage électronique ne sera plus symétrique et le barycentre des charges électriques ne sera plus situé au centre des deux atomes (Ga, N). On dit d'une telle liaison qu'elle est polarisée car elle agit comme si elle possédait un pôle positif et un pôle négatif. Ce même effet existe pour le GaAs et InP de structure zinc blende mais relativement faible parce que leurs liaisons ioniques sont faibles. L'atome de gallium associé aux quatre atomes d'azote voisins forment des dipôles illustré par la figure I-7 tel que [22]

$$\sum_{i=1}^{i=4} \vec{P}_i = \vec{P}_{SP} \quad (1.2)$$

Il y a apparition d'une succession de dipôles orientés dans la direction $\langle 0001 \rangle$ et création d'un champ électrique dans le sens opposé à cette polarisation, le matériau possède ainsi une polarisation suivant l'axe c . A contrainte nulle, une polarisation spontanée P_{SP} existe, mentionnée dans le tableau I.5 [22].

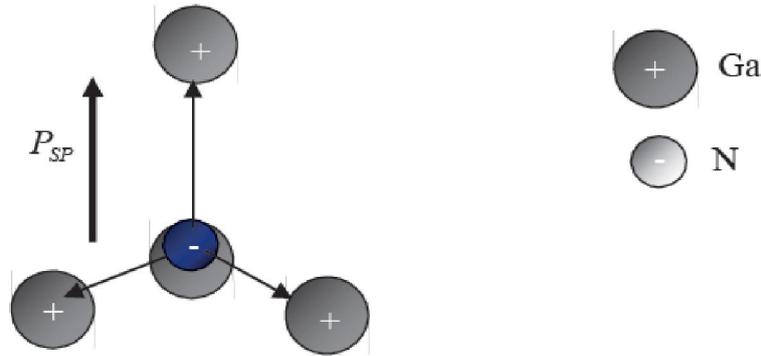


Figure I.7: polarisation spontanée dans le GaN

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

Matériaux	AlN	GaN
C_0/a_0	1.6010	1.6259
$P_{SP}(C/m^2)$	-0.081	-0.029

Tableau I.5: Effets de la maille non idéal sur la P_{SP} dans les matériaux III-N [22].

I.4.2.1.b La polarisation piézoélectrique

La polarisation piézoélectrique est due au mécanisme de contrainte présent dans le cristal. C'est à dire si le facteur d'idéalité des mailles c_0/a_0 du matériau GaN a changé suivant un impact extérieur, un changement aura lieu dans la polarisation du cristal à cause de la forte ionisation de la liaison Ga-N. Alors, si une pression est appliquée, les paramètres de la maille idéale c_0 et a_0 changent pour accommoder cette pression, ce qui implique une variation dans la polarisation. Cette dernière, toujours présente dans les cristaux contraints à base de nitrure, est additionnelle à la polarisation spontanée et cette polarisation piézoélectrique est notée P_{pz} . La polarisation piézoélectrique est donnée par la formule suivante [23,24]

$$P_{pz} = 2 \cdot \frac{a-a_0}{a_0} \left(e_{31} - \frac{e_{33} \cdot c_{13}}{c_{33}} \right) \quad (I.3)$$

Avec c_{13} et c_{33} sont les constantes élastiques.

e_{31} et e_{33} sont les coefficients piézoélectriques.

a_0 et c_0 sont les constantes de maille d'un matériau relaxé (à l'équilibre) et a c'est le constant de la maille sous contrainte.

Le tableau I.6 représente les différents paramètres de la polarisation piézoélectrique pour des matériaux à base de nitrure y compris le GaN [25,26].

Matériaux	AlN	GaN
$e_{31}(C/m)$	-0.60	-0.49
$e_{33}(C/m)$	1.46	0.73
C_{13} (GPa)	108	103
C_{33} (GPa)	373	405

Tableau I.6: Coefficients piézoélectriques pour les semiconducteurs III-V

I.5 Propriétés du ternaire $Al_xGa_{1-x}N$

AlGaN a reçu le plus d'attention des alliages de la famille des nitrures III-V, en raison de son potentiel d'applications en hétérostructure AlGaN/GaN. Depuis le premier rapport d'une solution solide GaN-AlN en 1976 [27], de nombreux groupes ont fait la synthèse d'AlGaN. Baranov [28] a pu obtenir en 1978, AlN avec une concentration atteignant 45% d'Aluminium. Les mesures par rayons X ont montré que tous les échantillons sont de conductivité de type n, ayant une mobilité décroissante en fonction de la fraction molaire x ; et ils contiennent de petites régions d'AlGaN cubiques [29].

L'étude la plus complète à ce jour sur les propriétés d'AlGaN a été réalisée par Yoshida [30], il a signalé la variation de la concentration des électrons, la mobilité, la résistivité, la constante de réseau et le gap, en fonction de x sur toute la gamme d'alliage

Pour une concentration d'Al allant de zéro à 0.40, la constante de réseau d' $Al_xGa_{1-x}N$ a tendance à être plus petite. La résistivité passe de $10^{-4} \Omega.cm$ à $10^6 \Omega.cm$, et la concentration de transporteurs diminue, passant de $n = 2 \times 10^{20}/cm^3$ à $n = 10^{17}/cm^3$.

L'alliage $Al_xGa_{1-x}N$ sert souvent de barrière de confinement dans les structures optoélectroniques à base de nitrures. La connaissance de ses propriétés est donc un objectif impératif pour développer de nouveaux composants. En première approximation, ses paramètres de maille peuvent se déduire des paramètres de GaN et AlN, par interpolation linéaire (la loi de Végard). Les paramètres physiques de cet alliage peuvent souvent être approximés par interpolation linéaire des coefficients de GaN et AlN selon les équations (I.4-I.8).

$$a_{Al_xGa_{1-x}N} = a_{AlN} \cdot x + a_{GaN} \cdot (1 - x) \quad (I.4)$$

$$E_{g_{Al_xGa_{1-x}N}} = E_{g_{AlN}} \cdot x + E_{g_{GaN}} \cdot (1 - x) - 1.3x(1 - x) \quad (I.5)$$

$$\varepsilon_{Al_xGa_{1-x}N} = 85x + 8.9(1 - x) \quad (I.6)$$

$$m_{e_{Al_xGa_{1-x}N}} = 0.314x + 0.2(1 - x) \quad (I.7)$$

$$N_c(T_L) = 2 \left(\frac{2\pi m_e^* k T_L}{h^2} \right)^{3/2} = \left(\frac{T_L}{300} \right)^{3/2} N_c 300 \quad (I.8)$$

Où a , E_g , ε , m_e et N_c sont le paramètre cristallin du matériau, la largeur de la bande interdite la permittivité, la masse effective d'électron et la densité effective des électrons dans la bande de conduction, respectivement.

Concernant la polarisation et sachant que les deux polarisations sont distinctes, et qu'on ne peut observer dans les autres hétérostructures (III-V) conventionnelles, des valeurs de la concentration du 2DEG de l'ordre de 10^{13} cm^{-2} . La polarisation totale de la couche de GaN ou celle de l'AlGaN comme étant la somme des polarisations spontanée et piézoélectrique:

$$P = P_{pz} + p_{sp} \quad (I.9)$$

La valeur positive ou négative de cette polarisation dépendra du sens de l'orientation des deux polarisations. Ce sens est lui-même défini selon que la structure est sous traction ou compression. Si le cristal du GaN est sous contrainte tractive ou extensive, la polarisation spontanée et la polarisation piézoélectrique sont de même sens et la polarisation totale s'en trouve augmentée. Par contre si le cristal est sous contrainte compressive, les deux polarisations sont de sens opposés, donc la polarisation totale diminue.

Notons que la variation spatiale des champs de polarisation piézoélectrique et spontanée fait naître une densité de charge (σ) tel que: [31] :

$$\Delta \cdot p(GaN) = \Delta \cdot (p_{sp}(GaN) + p_{pz}(GaN)) = -\sigma_{surf} \quad (I.10)$$

avec :

$$\begin{cases} P(Al_x Ga_{1-x} N) + P_{pz}(Al_x Ga_{1-x} N) \\ p(GaN) = P_{sp}(GaN) + P_{pz}(GaN) \end{cases} \quad (I.11)$$

D'où

$$P = (P_{sp}(GaN) + P_{sp}(AlGaN)) + (P_{pz}(GaN) + P_{pz}(AlGaN)) \quad (I.12)$$

De plus la position et la nature du gaz bidimensionnel formé à l'hétérointerface dépendent eux aussi de la face du GaN et de la séquence des couches de la structure utilisée. La concentration du 2DEG peut être déduite on connaissant la charge d'interface induite par cette polarisation.

I.6 Calcul de la densité de charges due à la polarisation

Par analogie avec ce qui a précédé et selon l'équation (I.10) on peut facilement conclure que la polarisation induit aussi une densité de charge (σ_{int}) dans les hétérostructures et en assumant que l'ordre est celui dans lequel on fait croître les matériaux ainsi représenté par la figure I.9

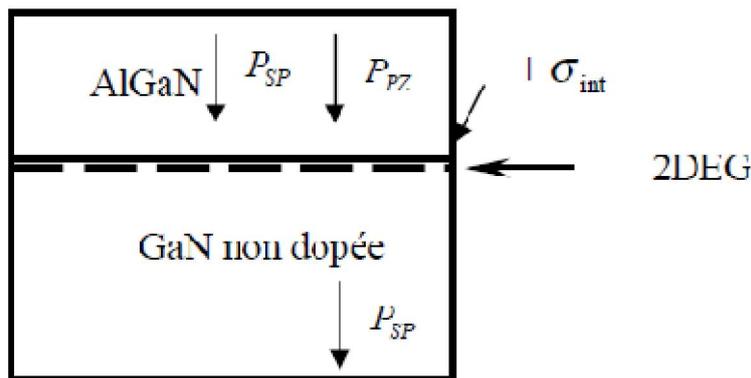


Figure I.8: L'hétérostructure AlGaN/ GaN à face Ga.

L'expression de cette densité sera donnée par [31]:

$$\sigma_{int} = (p_{sp} + p_{pz})_{couche1} - (p_{sp} + p_{pz})_{couche2} \quad (I.13)$$

La différence des polarisations piézoélectrique et spontanée entre les couches de L'AlGaN/GaN détermine la densité de charges fixes à l'interface entre les deux matériaux, cette différence de polarisation induit une charge positive (figure I.9), les électrons sont alors attirés par cette charge et finissent par s'accumuler à l'hétérointerface formant un canal conducteur. La présence de charges positives et négatives induit un champ électrique assez fort pour aider à former une grande densité de charges et établir un bon confinement dans le canal.

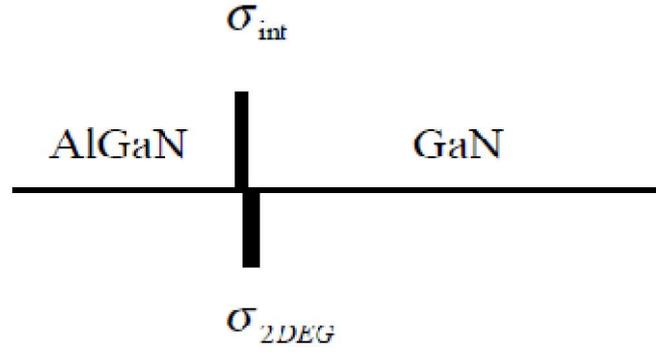


Figure I.9: Diagramme des densités de charges présentes à l'hétérojonction

En l'absence de tout champ électrique externe la polarisation totale (P) du HEMT AlGaN/GaN induit une densité de charges (σ) tel que:

$$\sigma = -\nabla p \quad (\text{I.14})$$

Pour la structure wurtzite, cette polarisation est dirigée le long de l'axe c perpendiculairement à l'interface de l'hétérostructure. La densité de charge y est formée est son expression sera donnée par:

$$\sigma_{int} = p_{tot,couche1} - p_{tot,couche2} \quad (\text{I.15})$$

$$\sigma_{int}(x) = [p_{sp} + p_{pz}]_{couche1} - [p_{sp} + p_{pz}]_{couche2} \quad (\text{I.16})$$

En respectant l'ordre de croissance on obtient :

$$\sigma_{int}(x) = [p_{sp}(GaN) + p_{pz}(GaN)]_{couche1} - [p_{sp}(Al_x Ga_{1-x}N) + p_{pz}(Al_x Ga_{1-x}N)]_{couche2} \quad (\text{I.17})$$

Tel qu'il a été cité plus haut, la charge fixe induite par le changement de la polarisation des deux couches attirera à l'interface, une charge mobile compensatrice de signe opposée comme illustré par la figure I.10. D'où la concentration n_{s0} des électrons attirés par cette densité de charge pour une structure AlGaN/GaN sera donnée par l'expression : [31]

$$n_{s0} = \sigma_{int}(x)/q - [\varepsilon_0 \varepsilon(x)/(d)q^2](q\phi_b(y) + E_F - \Delta E_C(x)) \quad (\text{I.18})$$

Où la permittivité du vide ε_0 est égale à $8.854 \cdot 10^{-14}$ (F.cm⁻¹) et celle du AlGaN (x) déjà mentionné.

En utilisant les équations précédentes, on pourra illustrer la variation de la concentration des électrons en fonction de la concentration (x) de l'Aluminium pour différentes épaisseurs de la couche AlGa_N donné par la figure I.10. Cette courbe montre la dépendance du 2DEG de ces deux paramètres en effet, la concentration du 2DEG converge vers la valeur de la densité de charge fixe induite par la polarisation lorsque l'épaisseur de la couche AlGa_N varie. De plus en faisant varier l'épaisseur de la couche AlGa_N pour deux valeurs, soit $d=10\text{nm}$ et $d=30\text{nm}$, comme on le voit sur la figure I.10, on constate que pour un taux d'Aluminium de $x=0.3$, la valeur de n_s varie de $1.32 \times 10^{13}\text{cm}^{-2}$ à $1.63 \times 10^{13}\text{cm}^{-2}$ pour $d=10\text{nm}$ et $d=30\text{nm}$ respectivement. On remarque aussi que la concentration du 2DEG se rapproche de la densité de charge fixe induite par la polarisation quand l'épaisseur de la couche AlGa_N augmente.

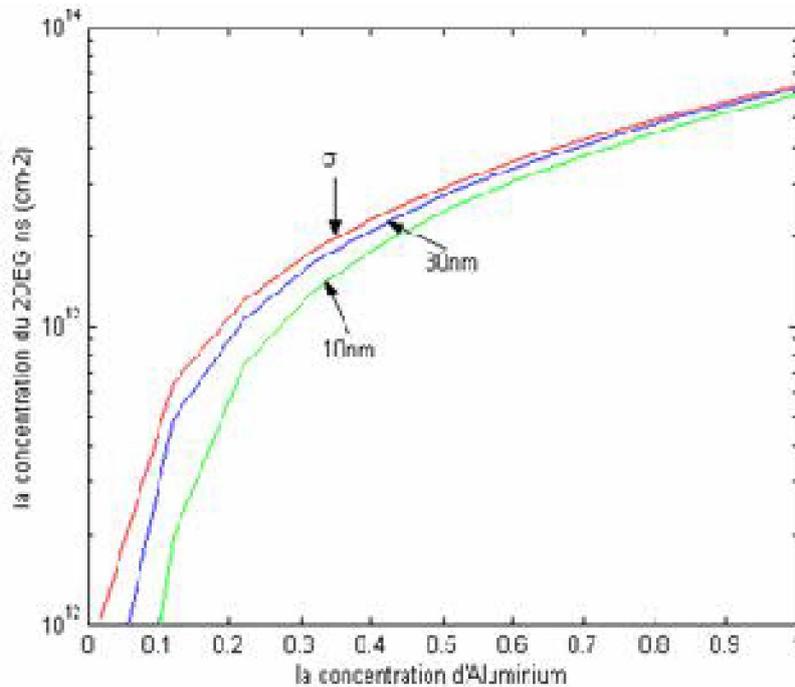


Figure I.10: Variation de la densité n_s en fonction du taux d'aluminium (x) pour différentes épaisseurs (d).

I.7 Applications

Les premières recherches effectuées sur les semiconducteurs à grand gap ont été dirigées vers des applications optoélectroniques. Cela est dû au fait que le bleu était la couleur qui manquait sur le marché des diodes électroluminescentes (LED). Avant que les LEDs à base de GaN ne deviennent disponibles, le SiC a été utilisé, mais sa bande interdite indirecte conduisait à une efficacité de recombinaison radiative plutôt faible. En utilisant le système

d'alliages de nitrure In GaAlN, des LEDs de longueurs d'onde allant de l'ultraviolet (UV) au bleu/vert peuvent être réalisées avec une très bonne efficacité. De nombreuses autres applications sont possibles telles que les écrans de télévision à base de LED, l'éclairage automobile et peut-être l'éclairage général dans le futur. Les LEDs blanches peuvent être réalisées par revêtement de l'intérieur d'une LED UV avec un luminophore (par exemple du phosphore) pour convertir les photons ultraviolets en lumière visible. L'optoélectronique s'est aussi intéressée aux lasers UV-bleu à base de GaN avec une gamme de longueur d'onde autour de 400 nm. La fluorescence induite par laser UV employée dans les domaines médicaux, tels que la dermatologie, la gynécologie et le traitement des tumeurs, a remporté un vif succès. Ces lasers sont aussi utilisés pour les nouvelles générations de lecteurs enregistreurs DVD appelés Blue-Ray Disc utilisés par Sony pour la première fois en 2003.

Dans le domaine de la microélectronique, la plupart des applications sont dirigées vers le développement de dispositifs haute fréquence/haute puissance. Les deux technologies à base de SiC et de GaN offrent l'avantage d'une densité de puissance élevée et de bonnes propriétés thermiques, ce qui permet d'obtenir des petits modules de puissance assez performants. Dans les systèmes nitrures, la structure couramment utilisée est la structure latérale de type HEMT. Aujourd'hui, le plus gros marché potentiel concerne les stations de base destinées aux communications (satellites, téléphonie mobile...). Compte tenu de leurs avantages, les dispositifs à base de GaN rentrent en concurrence avec les technologies LDMOS (laterally diffused métal oxide semiconductor) à base de silicium et les HEMTs pseudo morphiques

GaAs qui sont beaucoup moins chers mais aussi moins performantes. La réalisation des transistors bipolaires à hétérojonction (TBH) à base de GaN est complexe en raison de la difficulté d'atteindre un dopage de type p suffisamment fort dans la base. En outre, la présence des dislocations peut générer des chemins de conduction parallèle dans ces dispositifs à conduction verticale et affecter leur fiabilité.

les gammes de puissance accessibles en fonction des fréquences de fonctionnement pour certains semiconducteurs utilisés aujourd'hui dans la microélectronique. Nous remarquons que, contrairement au GaAs ou au silicium, dont l'utilisation se limite à des gammes bien déterminées en fréquence et en puissance, le GaN apparaît comme un bon candidat pour couvrir des domaines plus larges avec un bon compromis puissance-fréquence [32]

Un autre domaine d'application est l'électronique haute température. Habituellement, les systèmes électroniques qui contrôlent les compartiments à haute température, comme un

moteur à réaction, sont situés dans les régions froides. Cela nécessite un câblage entre le système électronique et les capteurs. Si ces systèmes pouvaient être placés dans la zone à haute température, la quantité totale de câblage pourrait être réduite. L'utilisation des composants à base de GaN présente un avantage du fait de leur capacité de fonctionnement dans un environnement qui peut atteindre 600°C. Cette température de fonctionnement est deux fois supérieure à celle des composants à base de Si sur isolant (SOI) qui ne dépasse pas 300°C.

I.8 Résumé

Dans ce chapitre on a présenté une étude sur les nitrures de gallium, ses propriétés structurales, électriques et électroniques, ainsi que les substrats utilisés pour la croissance de ce matériau. Les plus intéressantes propriétés pour ces matériaux sont la polarisation spontanée et la polarisation piézoélectrique et leur influence sur le comportement des composants. Le GaN possède une polarisation spontanée permanente d'une valeur de -0.029 C/m^2 , valeur élevée par rapport aux autres semiconducteurs AlN et InN et une polarisation piézoélectrique dont les coefficients sont encore supérieurs.

L'effet de la combinaison de ces deux polarisations fait surgir une densité de charge qui sera l'origine de la concentration n_s du 2DEG dont la valeur s'évalue à 10^{13} cm^{-2} à l'interface des hétérojonctions en l'absence de tout dopage dans la structure. Ces particularités ont été exploitées dans plusieurs domaines spécialement en hyperfréquences et pour la fabrication des HEMTs fonctionnant à des fréquences et températures élevées.

Bibliographies du chapitre I

- [1] E. Rhoderick, “Metal-semiconductor contacts,” *Solid-State and Electron Devices*, IEE Proceedings I, vol. 129, no. 1, p. 1, 1982
- [2] S. Sze, *Physics of semiconductor devices*. Wiley Interscience Publication, 1981.
- [3] S. Kurtin, T. C. McGill, and C. A. Mead, “Fundamental transition in the electronic nature of solids,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 22, pp. 1433–1436, Jun 1969
- [4] H. W. Jang, C. M. Jeon, K. H. Kim, J. K. Kim, S.-B. Bae, J.-H. Lee, J. W. Choi, and J.-L. Lee, “Mechanism of two-dimensional electron gas formation in AlGaIn/GaN heterostructures,” *Applied Physics Letters*, vol. 81, no. 7, pp. 1249–1251, 2002
- [5] S. Heikman, S. Keller, Y. Wu, J. S. Speck, S. P. DenBaars, and U. K. Mishra, “Polarization effects in AlGaIn/GaN and GaN/AlGaIn/GaN heterostructures,” *Journal of Applied Physics*, vol. 93, no. 12, pp. 10114–10118, 2003.
- [6] J. P. Ibbetson, P. T. Fini, K. D. Ness, S. P. DenBaars, J. S. Speck, and U. K. Mishra, “Polarization effects, surface states, and the source of electrons in AlGaIn/GaN heterostructure field effect transistors,” *Applied Physics Letters*, vol. 77, no. 2, pp. 250–252, 2000.
- [7] A. Rizzi, “Surface and interface electronic properties of group III-nitride heterostructures,” *Applied Surface Science*, vol. 190, no. 1-4, pp. 311 – 317, 2002
- [8] T. P. Chow, V. Khemka, J. Fedison, N. Ramungul, K. Matocha, Y. Tang, and R. J. Gutmann, “SiC and GaN bipolar power devices,” *Solid-State Electronics*, vol. 44, no. 2, pp. 277 – 301, 2000.
- [9] M. Farahmand, C. Garetto, E. Bellotti, K. Brennan, and et al, “Monte carlo simulation of electron transport in the III-nitride wurtzite phase materials system: binaries and ternaries,” *Electron Devices, IEEE*, vol. 48, pp. 535 – 542, 2001.
- [10] R. Trew, “SiC and GaN transistors - is there one winner for microwave power applications?,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 90, pp. 1032 – 1047, jun 2002
- [11] M. Leszczynski, J. Edgar, S. Strite, I. Akasaki, H. Amano and C. Wetzel, *Common crystal structure of the group III nitrides, Properties, processing and applications of gallium nitride and related semiconductors*, 1998, Publication INSPEC, Datareview series n°23, p3-5
- [12] I. Akasaki and H. Amano, *Common crystal structure of group III nitride, Properties of group III nitride*, 1994, J. EDGAR, Publication INSPEC, Datareview series n°11, p3-6.
- [13] Joseph Fourier «Physique des matériaux», thèse d'état à Grenoble 1 (décembre 2004).

- [14] W.Y. Wang, Y.P. Xu, D.F. Zhang and X.L. Chen, Synthesis and dielectric properties of cubic GaN nanoparticles, *Mat. Res. Bul.*, 36(2001), p2155-2162.
- [15] O. Brandt, Cubic group III nitride, Group III nitride semiconductor compounds – physics and applications, 1998, B. GIL, Oxford Science Publication , p417-459.
- [16] L. Liu and J. H. Edgar, Substrates for gallium nitride epitaxy, *Mat. Sci. Eng. R*, 37(2002),p61-127.
- [17] S. Porowski, Bulk and homoepitaxial GaN-growth and characterizations, *J. Cryst. Growth*, 189/190(1998), p153-158.
- [18] Philippe Agnès, Caractérisation électrique et optique du nitrure de gallium hexagonal et cubique en vue de l'obtention d'émetteurs bleus (Thèse) : Institut national des sciences appliquées de Lyon, 1999.
- [19] Stéphanie Anceau, Etude des propriétés physiques des puits quantiques d'alliages quaternaires (Al,Ga,In)N pour la conception d'émetteurs ultraviolets, thèse de doctorat de l'université Montpellier , 2004
- [20] Martinez _Guerrero, Esteban Elaboration en épitaxie par jets moléculaires des Nitrures d'éléments III en phase cubique, Institut nationale des sciences appliquées Lyon, 2002.
- [21] Pugh S. K, Dugdale D. J, Brand S and Abram R.A, Electronic structure calculation. onnitride semiconductors. *Semicond. SCI, Technol*, 1999, VOL 14, p23-31
- [22] N. VELLAS, « Etudes Expérimentales De Transistors HFET De La Filière Nitrure De Galium Pour Des Applications De Puissance Hyperfréquences », Thèse de doctorat soutenue le 18 Décembre 2003, Université de lille
- [23] P. CHEVALIER; “Transistors à effet de champ à hétérojonction sur matériaux III-V pour applications hyperfréquences”, Thèse de doctorat, Ecole polytechnique universitaire de Lille, 1999
- [24] M. K. CHATTOPADHYAY. “Temperature and polarization dependent polynomial based non-linear analytical model for gate capacitance of Al_mGa_{1-m}N/GaN MODFET ” *Solid-State Electronics* 50, 220–227, 2006
- [25] F. CAROSELLA , “Etude théorique des phénomènes de transport électronique dans les puits quantiques AlGa_n/Ga_n ”, Thèse de Doctorat, Université de lille, 2005
- [26] A.F. WRIGHT “elastic properties of zinc blende and Wurtzite AlN, GaN, InN “ *Journal of Applied physics*, , volume 82, pp 2833-2839, 15 September 1997
- [27] M D. Lyutaya and T.S. Barntnitskaya, *Inorg. Mater.* 9, 1052 (1973).

- [28] B. Burgov, L.Daweritz, V. B. Gutan, G. Jungk, H.Neuman and H.Raidt, Phys. Status Solidi AZ 49, 629 (1978).
- [29] S. Strite and H. Morkoç , GaN, AlN, and InN: A Review, Materials Research - Laboratory and Coordinated Science Laboratory, University of Illinois at Urbana Champaign, Urbana, IL 61801, 1992.
- [30] S. Yoshida, S. Misawa and S. Gonda, J. Appl. Phys.53, 6844 (1982).
- [31] E.T.Yu “ O.Manasresh, book chapter for inclusion in III-V Nitride Semiconductors: Application and Devices” université of California at Sandiego la Jolla, CA 92093-0407.
- [32] I. Ohdomari, T. S. Kuan, and K. N. Tu, “Microstructure and schottky barrier height of Iridium silicides formed on Silicon.,” *Journal of Applied Physics*, vol. 50, no. 11, pp. 7020–7029, 1979.

Chapitre II : Chapitre II :

Le principe de fonctionnement d'AlGa_N/Ga_N HEMT

II-1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter les transistors à effet de champ utilisés dans des conceptions hyperfréquences. Tout d'abord, nous proposerons une description géométrique et physique des transistors micro-ondes les plus utilisés actuellement. Nous présenterons ici les MESFETs et leurs dérivés les HEMTs. Le principe de fonctionnement du HEMT en général sera étudié et en particulier le HEMT AlGaN/GaN et l'effet de l'introduction du nitrure de gallium en tant que matériau de base pour la conception de ces transistors. Cet effet qui débutera par la création des charges de polarisations induites par le fait que le GaN (et ses alliages), est un matériau très polaire et qui à la fin se affectera les caractéristiques du composant. L'analyse et l'utilisation de l'effet de la polarisation dans les transistors à base d'hétérostructures seront détaillées.

II-2 Les transistors a effet de champs

Le transistor à effet de champ, nommé FET ou TEC (Field Effect transistor ou transistor a effet de champ) Donc pour une utilisation aux hautes fréquences, il est préférable que le type de porteur soit celui qui présente les meilleures propriétés de transport (mobilité, vitesse et coefficient de diffusion), les électrons ayant des propriétés plus intéressantes que les trous. Les divers types des transistors FET diffèrent par la nature du contact de grille élaboré, dont nous citons.

- J-FET: grille à jonction pn.
- MOSFET: grille métallique isolée de la couche active par un oxyde.
- MESFET: contact grille (métal) -la couche active (canal) est un contact Schottky.

II-2-1 Les MESFETs

Le transistor à effet de champ à barrière Schottky, contrairement au JFET, est un transistor dont la jonction PN est remplacée par une barrière Schottky soit métal-semiconducteur. La largeur du canal conducteur a est modulée par la variation de la largeur d de la zone de charge d'espace. La figure II.1 qui suit montre la vue en coupe du transistor polarisé.

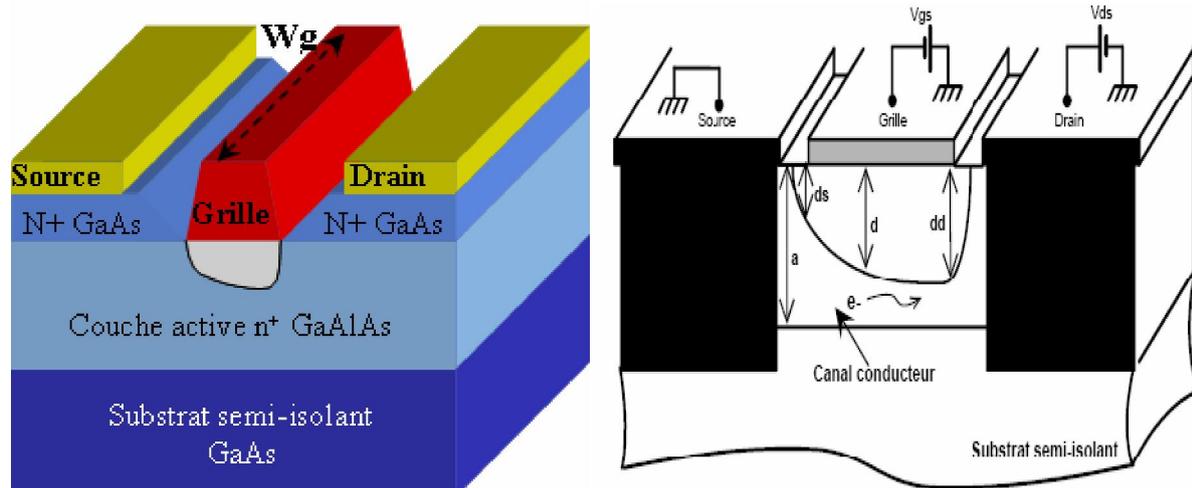


Figure II.1: (a) Schéma d'un MESFET AlGaAs[1], (b) Vue en coupe d'un MESFET polarisé [2]

En régime de fonctionnement normal la grille est généralement polarisée négativement par rapport à la source alors que le drain est polarisé positivement par rapport à la source également. La présence du contact Schottky crée une zone dépeuplée de porteurs libres sous la grille. La concentration des électrons mobiles est donc maximale dans la fraction restante de la couche conductrice (canal). En effet lorsqu'on applique une tension V_{ds} positive, un flux d'électrons traverse le canal de la source vers le drain ce qui correspond à un courant I_{ds} dans le sens inverse. Or la section du canal disponible est limitée à $(a-d)$. Si on diminue V_{gs} , l'épaisseur (d) augmente, par conséquent le courant I_{ds} diminue. Lorsque (d) atteint la valeur (a), le canal est alors pincé et I_{ds} s'annule. On se trouve ainsi en mesure de contrôler le passage du courant de sortie par la commande de grille [2].

Afin de comprendre l'évolution de la profondeur de la zone désertée qui est plus importante du côté drain que du côté source, on exprime les épaisseurs ds et dd comme ceci :

$$ds = \left[\frac{2\varepsilon}{qNd} (\Phi_b - v_{gs}) \right]^{1/2} \quad \text{et} \quad dd = \left[\frac{2\varepsilon}{qNd} (\Phi_b - v_{gd}) \right]^{1/2} \quad (\text{II-1})$$

Or:

$$V_{gd} = V_{gs} - V_{ds} \quad (\text{II-2})$$

Sachant que $V_{ds} > 0$, alors $V_{gd} < V_{gs}$, ce qui implique $dd > ds$. Ce fait explique que la zone désertée est plus importante du côté drain que du côté source (figure II.1(b)).

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

II-2-2 Les HEMTs

Le transistor à hétérojonction haute mobilité électronique HEMT (High Electron Mobility Transistor) est un composant dont le fonctionnement est proche du MESFET comme c'est représenté par la figure II-2. La différence est que le HEMT utilise une hétérojonction, c'est-à-dire une jonction entre des matériaux semiconducteurs ayant des bandes d'énergie différentes, de manière à faire passer les électrons constituant le courant drain-source dans un semiconducteur non-dopé. Ainsi ces électrons ont un temps de transit très faible, ce qui permet d'augmenter des performances en fréquence. La vitesse des électrons est en effet d'autant plus grande que le dopage du semiconducteur est faible, car la dispersion d'impuretés ionisées est réduite. La structure favorable aux applications hautes fréquences ainsi que l'utilisation de matériaux à grand gap de forte conductivité thermique, tel que le GaN par exemple, font de ce composant un candidat très intéressant pour les applications de puissance.

D'où le but de la structure d'un HEMT est de séparer les électrons libres de la couche semiconductrice contenant des impuretés afin d'augmenter la mobilité des électrons.

II.3 HEMTs à base de nitrure de gallium AlGaN/GaN

II.3.1 Description de la structure d'un HEMT

La structure d'un transistor de type HEMT en nitrure de gallium est très semblable à celle d'un transistor dont le matériau semiconducteur est l'Arséniure de Gallium malgré plusieurs différences nettes. On représente une structure typique d'un transistor HEMT AlGaN/GaN par la figure II-2. Elle est constituée des matériaux suivants [3]:

- Le substrat
- Un matériau à grand gap
- Un matériau à petit gap

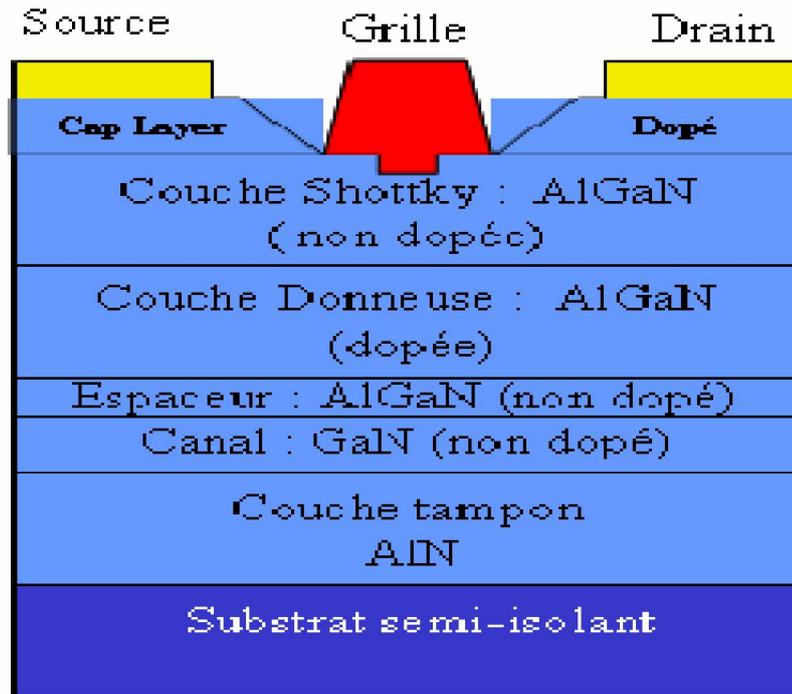


Figure II. 2: Structure et différentes couches du HEMT AlGaN/GaN [1].

II-3 -2 Description des couches

- **Couche cap layer**

C'est une couche superficielle, formée par un matériau de faible bande interdite afin de réaliser les contacts ohmiques de source et de drain. Cette couche est dans la plupart des cas fortement dopée afin de diminuer la valeur des résistances de contact et donc celle des résistances d'accès.

- **Couche Schottky**

Cette couche à grand gap non dopée réalise le contact Schottky de la grille.

- **Couche donneuse**

Comme son nom l'indique, elle fournit les électrons libres à la structure, le dopage qui est généralement réalisé par un plan de dopage silicium, y joue un rôle important car il contribue à l'augmentation de la concentration des électrons fournis.

- **Espaceur (Spacer)**

Cette couche de matériau à grand gap intentionnellement non dopée, permet la séparation des atomes donneurs d'électrons de la couche donneuse, des électrons du canal. Les interactions électrons-impuretés sont ainsi réduites, on remarque que plus cette couche est épaisse, meilleur est la mobilité des électrons dans le canal par contre un espaceur moins épais (fin) favorise un transfert meilleur d'électron dans le canal.

- **Le canal**

C'est la plus importante des parties du HEMT, car c'est dans cet endroit que se crée le canal qui reçoit le gaz bidimensionnel d'électrons et c'est cette couche qui déterminera les performances du composant à travers les propriétés de transport des électrons dans le matériau.

- **La couche tampon**

En générale cette couche a des propriétés structurales moyennes entre celle du substrat et le matériau du canal. Elle permet une croissance meilleur du GaN, le type de face dépend en partie de cette couche et elle favorise le confinement des électrons en s'interposant à l'injection des porteurs vers le substrat.

- **Le substrat**

C'est la couche sur laquelle on fait croître les matériaux à épitaxies. Son choix est crucial pour la qualité du composant et son fonctionnement. En effet un mauvais choix de substrat peut causer lors de la croissance des dislocations, qui peuvent rendre le composant non fonctionnel.

II.4 Etude de L'hétérojonction AlGaN/GaN

II.4.1 Hétérostructure AlGaN/GaN

L'hétérostructure, ou bien, l'hétérojonction formée par la juxtaposition de deux matériaux dont les largeurs des bandes interdites sont différentes, l'un présentant un large gap AlGaN: et l'autre a un plus faible gap GaN, entraînant la formation d'une discontinuité de la bande de conduction à l'interface ΔE_c ainsi représenté par la figure II.3. Cette structure permet la création d'un gaz d'électrons dans un canal peu dopé favorisant ainsi la montée en fréquence. D'après les règles d'Anderson [4], lors de la jonction de deux matériaux, les niveaux de Fermi s'alignent et le niveau du vide ne pouvant pas subir de discontinuités, il en résulte une discontinuité de la structure de bande d'énergie à l'interface. On se limite ici au cas simplifié d'une hétérojonction idéale où il n'y a pas de charges à l'interface dues, par exemple, à des pièges associés à un désaccord de maille, à une non stœchiométrie ou encore à des impuretés accumulées à l'interface lors de la croissance par épitaxie de l'hétérojonction. La figure II.3-a représente les diagrammes de bandes des deux semi-conducteurs supposés fictivement séparés par un espace infinitésimal suffisant. Le niveau du vide est par contre continu à travers cette séparation. Les deux semiconducteurs sont supposés homogènes (composition, dopage...) et électriquement neutres. Tous les niveaux d'énergie y sont plats [4-5]

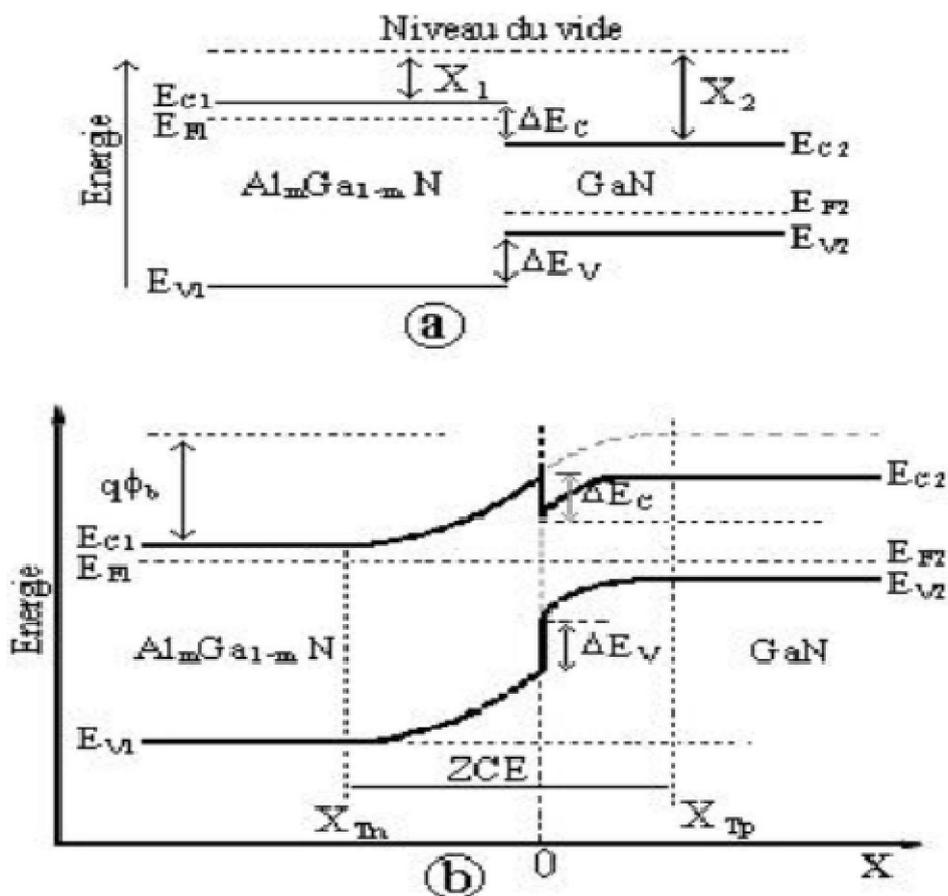


Figure II.3: Diagramme d'énergie d'une hétérojonction: (a) les deux semi-conducteurs sont séparés par un espace infinitésimal (b) les deux semi-conducteurs sont raccordés.

E_{c1} et E_{c2} sont les niveaux du bas de bandes de conduction. Et E_{F1} et E_{F2} , les niveaux de Fermi de chaque semiconducteur. Les niveaux du haut de bandes de valence sont respectivement E_{v1} et E_{v2} . Les affinités électroniques χ_1 et χ_2 sont les énergies requises pour extraire un électron du bas de la bande de conduction qui représentent des grandeurs intrinsèques caractéristiques des deux matériaux, au même titre que leur énergie de bande interdite ou gap

$$E_{G1} = E_{c1} - E_{v1} \quad \text{et} \quad E_{G2} = E_{c2} - E_{v2} .$$

La figure II.3-b représente les diagrammes de bande raccordés après avoir recollé les deux semiconducteurs formant ainsi une hétérojonction. Les porteurs de charges sont à présent libres de se redistribuer entre les deux semiconducteurs. Ceux-ci ne forment plus qu'un seul système dont le niveau de Fermi E_F est constant, puisque nous le considérons à l'équilibre thermodynamique ($E_F = E_{F1} = E_{F2}$) ainsi ΔE_c est la seulement la différence entre les deux

affinités $\chi_1 - \chi_2$. Le haut de la bande de valence doit, par conséquent, présenter une discontinuité complémentaire par rapport à celle du gap : $\Delta E_v = \Delta E_G - \Delta E_c$. Notons que la répartition $\Delta E_c / \Delta E_v$ est une constante puisqu'elle ne dépend que des affinités électroniques et des gaps des deux matériaux. Infiniment loin de l'interface, de chaque côté de l'hétérojonction, le diagramme de bande doit tendre asymptotiquement vers chacun des diagrammes initiaux. Cela implique donc que les bandes de conduction et de valence sont courbées au voisinage de l'hétérojonction. Cette courbure de bande et la constance du niveau de Fermi sont assurées par la redistribution des porteurs et la création associée d'une zone de charge d'espace dont les épaisseurs xT_n et xT_p de part et d'autre de l'hétérojonction peuvent être obtenues par intégration de l'équation de Poisson qu'on va voir dans le chapitre III.

II.4.2 Formation et expression du 2DEG

Le principe de base d'un HEMT est le transfert des électrons des atomes donneurs de la couche à plus grand gap vers celle à petit gap pour former le canal près de l'interface. Les HEMTs AlGaN/GaN possèdent une grande densité de charges n_s du gaz à électrons bidimensionnel 2DEG qu'on ne peut attribuer cela uniquement à la grande discontinuité de bande entre le GaN et l'AlGaN mais surtout à la présence d'une forte polarisation à l'hétéro interface.

La figure qui suit montre un HEMT AlGaN/GaN, où les paramètres d_d et d_i sont respectivement les épaisseurs de la couche donneuse et de l'espaceur.

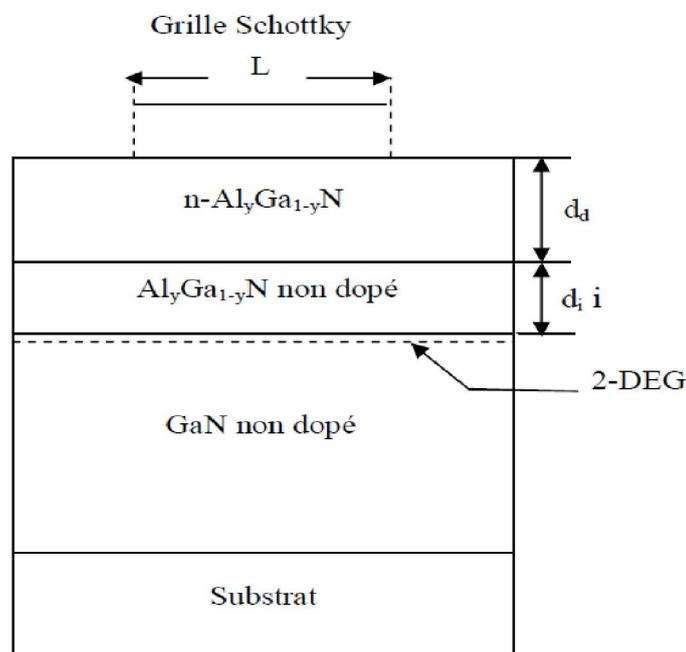


Figure II.4: Schéma de la structure AlGaN/GaN.

Le diagramme de bande associé à une telle structure est illustré sur la figure II-5, le principe de fonctionnement a été décrit plus haut, nous allons maintenant exprimer la densité de porteurs dans le 2DEG, nous supposons dans l'étude qui suit que :

- Le 2DEG est dans un puits de potentiel triangulaire à l'hétérointerface et que seules les deux premières sous bandes d'énergie E_0 et E_1 sont peuplés.
- La couche AlGaN est fortement dopée (N_d) et a une épaisseur d_d .
- Le spacer est une couche d'AlGaN non dopée et a une épaisseur d_i .
- L'origine positive des distances x est l'interface entre l'AlGaN et le GaN.

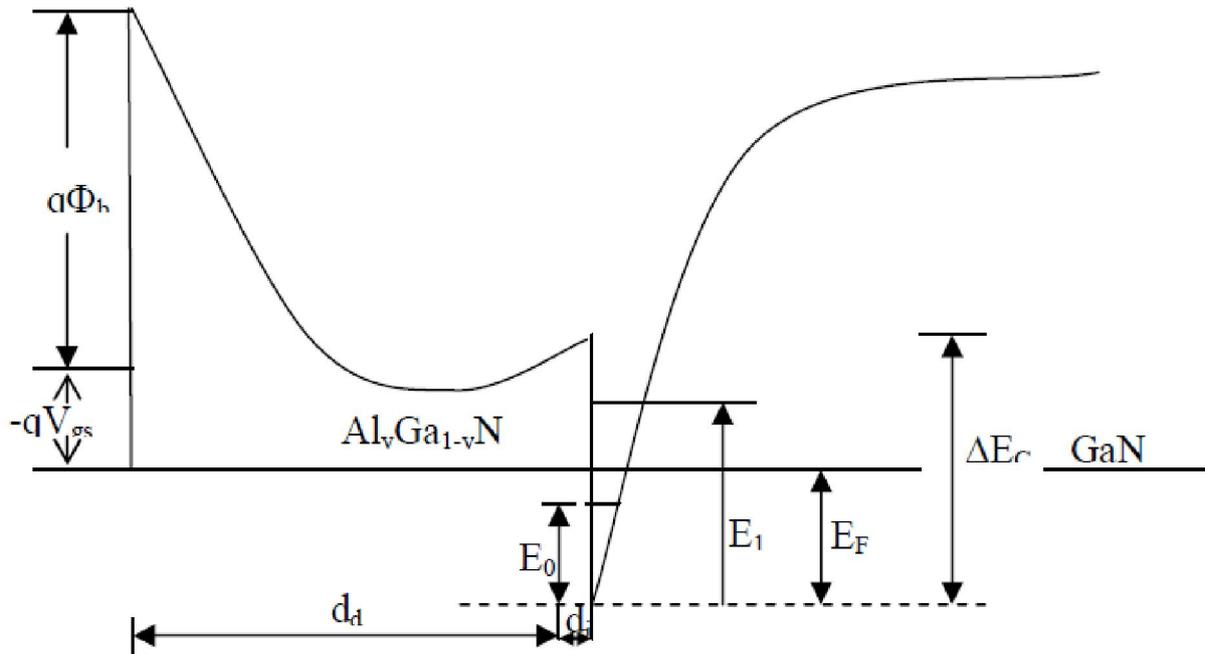


Figure II.5: Diagramme énergétique de la bande de conduction du HEMT AlGaN/GaN

L'utilisation de la résolution de l'équation de Schrödinger a permis d'expliquer la base physique du 2DEG dans le puits quantique et d'établir l'équation de la concentration des porteurs $n_s = f(E_f)$ tel que [6] :

$$n_s = DK_B T \ln \left[\left(1 + e^{\frac{(E_F - E_0)}{K_B T}} \right) \left(1 + e^{\frac{(E_F - E_1)}{K_B T}} \right) \right] \quad (II.3)$$

Où $D = \frac{m_0}{\pi \cdot \hbar^2}$ avec $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ et K_B est la constante de Boltzmann. D'un autre côté l'équation de poisson permet d'écrire n_s en fonction de la polarisation de grille V_{gs} et de σ_{pol} comme suit:

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

Où

$$v_{th}(x) = \frac{\phi_b}{q} - \frac{\Delta E_C(x)}{q} - \frac{qN_d}{2\varepsilon_d} d_d^2 - \frac{\sigma_{int}(x)}{\varepsilon(x)} d \quad (II.5)$$

x est la fraction molaire de l'Aluminium, ε est le constant diélectrique et $\phi_b(x)$ est la hauteur de la barrière Schottky, $\Delta E_C(x)$ est la valeur de la discontinuité des bandes entre l'AlGaIn et le GaN et σ_{int} la densité de charge.

De cela, une estimation correcte de n_s nécessite donc une résolution simultanée des deux équations. Quand le niveau de Fermi est bien en dessous des niveaux d'énergie E_0 et E_1 , la densité n_s a une valeur très faible c'est le régime de faible inversion, dès qu'il atteint le bas du puits de potentiel, le dispositif opérera alors juste en dessous de sa tension de seuil, en approchant celle-ci le niveau de Fermi se trouve peu au dessus de la bande de conduction et la valeur de n_s commence alors à augmenter, le dispositif opère alors en régime de moyenne inversion. Mais dès que le niveau de Fermi est loin au dessus de E_C on a alors des valeurs considérables de n_s (c'est le régime de forte inversion), l'expression de n_s sera alors pour les trois régimes [7]. En faible inversion

$$n_s = 2DK_B T \exp\left(\frac{q(v_{gs} - v_{th}(x))}{K_B T}\right) \quad (II.6)$$

En moyenne inversion :

$$n_s = n_0 \exp\left(\frac{q\varepsilon(x)\left(v_{gs} - v_{th}(x) - \frac{q(d_d + d_i)n_0}{\varepsilon(x)}\right)}{q^2 (d_d + d_i)n_0 + \varepsilon(x)k_B T}\right) \quad (II.7)$$

Le terme n_0 représente la densité de charge à l'équilibre. En forte inversion :

$$n_s = \frac{2\varepsilon(x)qD}{(\varepsilon(x) + 2q^2 D(d_d + d_i))} (v_{gs} - v_{th}(x)) \quad (II.8)$$

II.5 Les caractéristiques électriques

Le comportement électrique des HEMTs est défini par des grandeurs qui vont déterminer leurs performances. Ces paramètres sont fortement liés à la technologie, tant au niveau matériau qu'au niveau des procédés.[8]

II.5.1 Le courant drain-source I_{ds}

Le courant drain-source I_{ds} d'un transistor HEMT est le courant du gaz d'électron calculé sous la grille à l'interface de l'hétérojonction, représenté par l'équation suivante:

$$I_{ds} = q w n_s v(E(y)) \quad (\text{II.9})$$

Avec

y : position sur l'axe source-drain, w : la largeur de grille du composant. Sachant que $E(y)$ représente le champ électrique longitudinal sous la grille. $V(E(y))$ la vitesse des électrons dans le canal.

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

II.5.2 La transconductance

La transconductance intrinsèque g_m est définie comme la variation du courant I_{ds} en fonction de la tension V_{gs} intrinsèque à V_{ds} constant :

$$g_m = \left[\frac{\partial I_{ds}}{\partial v_{gs}} \right]_{v_{ds}=cst} \quad (\text{II.10})$$

Le g_m traduit l'efficacité de la modulation du courant dans le canal par la tension appliquée sur la grille. On cherchera donc à la rendre maximale.

II.5.3 La conductance de sortie

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

$$g_d = \left[\frac{\partial I_{ds}}{\partial v_{ds}} \right]_{v_{gs}=cst} \quad (\text{II.11})$$

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

II.6 Résumé

Dans ce chapitre nous avons décrit la structure et le fonctionnement des transistors en général et les HEMTs en particulier. On a analysé le HEMT de base constitué d'une couche donneuse AlGaIn/un Espaceur non dopé AlGaIn/GaN non dopé/substrat. On s'est intéressé

particulièrement à la concentration n_s du gaz bidimensionnel à l'interface entre l'AlGaN et le GaN.

On a aussi vu que cette densité est plus dominée par l'alignement de niveau de fermi (règle d'Anderson) et par la polarisation V_{gs} . Cette concentration est sensible à l'épaisseur de la couche active puisqu'elle augmente quand celle-ci augmente. Les caractéristiques électriques sont limitées dans notre cas à l'étude statique d'où seulement le courant I_{ds} et les conductances sont reportés dans ce manuscrit.

Bibliographies du chapitre II

- [1] T.Gasseling, “Caractérisation non linéaire avancée de transistors de puissance pour la validation de leur modèle CAO” , thèse doctorat, Université de Limoges 2003.
- [2] S.Augaudy, “Caractérisation et modélisation des transistors micro-ondes, application à l'étude de la linéarité des amplificateurs à fort rendement” , université de Limoges 2002.
- [3] P.Chevalier, “Transistors à effet de champ à hétéro jonction sur matériaux III-V pour application hyperfréquences” , Ecole polytechnique universitaire de Lille, 1999.
- [4] S. DE MAYER, " Etude d'une nouvelle filière de composants HEMTs sur technologie nitrure de gallium. Conception d'une architecture flip-chip d'amplificateur distribué de puissance à très large bande", Thèse de doctorat , Université de Limoges, 2005
- [5] H. Mathieu, " Physique des semiconducteurs et des composants électriques ",Édition Masson, Paris 1996
- [6] H. Mathieu, “physique des semi-conducteurs et des composants électroniques” . Edition Masson, France 1998
- [7] Rashmi, A.Kranti, S.Haldar, R.s.Gupta, “ An accurate charge control model for spataneous and piezoelectric polarization dependent two-dimensional electron gas sheet charge density of lattice-mismatched AlGaIn/GaN” . HEMTs solid state electronics 46 (2002).
- [8] C. Meliani, “Circuit intégrés amplificateurs à base de transistors HEMT pour les transmissions numériques

Chapitre III :

Chapitre III :

La simulation d'un HEMT par Silvaco basé sur la modélisation physique

La simulation d'un HEMT par Silvaco basé sur la modélisation physique

III.1 Introduction

Ce chapitre expose un aperçu sur la simulation basé sur un modèle physique d'un dispositif HEMT à base de GaN en utilisant le Silvaco-ATLAS. Les modèles physiques qui décrivent les propriétés des semiconducteurs sont introduites dans ce chapitre. Une description détaillée de la structure de HEMT et de sa géométrie sont données avec leurs maillages requis. Un intérêt spécial concernant les propriétés des matériaux III-N et leurs modèles physiques vont être exposés.

La modèle physique de la simulation en Silvaco se repose sur la résolution des trois équations fondamentales qui régissent le comportement des porteurs de charges nous permet de calculer la caractéristique (I-V) d'un dispositif (dans notre cas le HEMT) ainsi que d'autres paramètres physiques tels que le champ E, le potentiel, ce qui fournit les renseignements utiles des performances. La résolution analytique étant compliquée et pratiquement impossible, nous avons recours à la résolution numérique qui nécessite un grand nombre d'itérations.

Le simulateur TCAD (Technology Computer-Aided Design) permet la modélisation du comportement physique et électrique d'un composant électronique. Ceci nous permet d'économiser le temps et le coût de développement, et ainsi de pouvoir envisager et optimiser des solutions pour améliorer les performances des transistors. Les simulateurs existants sur le marché (ISE, Synopsis, Silvaco, PC1D,...) ont le même principe de fonctionnement. Ils résolvent les équations différentielles qui gèrent le fonctionnement des hétérostructures par des méthodes numériques (éléments finis, moindre carré, méthode de monté Carlo, etc.).

Dans notre étude nous avons modélisé une structure d'un transistor HEMT réalisée à base de AlGaIn/GaN, et nous avons simulé ses paramètres physiques et électriques par le logiciel bidimensionnel SILVACO.

III.2 Présentation du logiciel de simulation SILVACO

Le SILVACO (Silicon Valley Corporation) est un logiciel qui permet de concevoir, modéliser et simuler les performances des dispositifs à semiconducteur, avant la fabrication des prototypes d'essais. Il est très utile dans les projets de recherche-développement car il optimise le temps des essais et par conséquent réduit le coût de conception et de fabrication des dispositifs électroniques [1]

Le TCAD-SILVACO inclut de nouveaux modèles physiques qui utilisent des méthodes et des algorithmes numériques efficaces, de nouvelles techniques de maillage, des solutions linéaires d'optimisation, etc., tout en permettant d'obtenir des résultats de simulation très proches de

celles de la pratique. L'avantage majeur de ce type de simulateurs est de visualiser dans l'espace des phénomènes physiques difficilement accessibles et observables [2] et de s'approprier de manière pédagogique les procédés de fabrication. Les modules de TCAD-SILVACO peuvent être utilisés pour:

- La simulation des étapes de fabrication technologique (ATHENA, SSupreme3, etc.).
- La simulation électrique des dispositifs tels que, les Diodes, les MOSFET, les transistors bipolaires, etc. (ATLAS).
- Virtual Wafer Fab pour automatiser la simulation de fabrication des Wafers [1]

Dans notre étude, les simulations sont effectuées par le module ATLAS.

III.2.1 ATLAS

Le logiciel de simulation ATLAS est un simulateur de modélisation bidimensionnelle de composants semiconducteurs. Il est capable de prédire les caractéristiques électriques de la plupart des composants semiconducteurs en régime continu, transitoire ou fréquentiel. En plus du comportement électrique, exemple $I(V)$, il fournit des informations sur la distribution interne des variables électrique telles que le courant ou la tension (lignes de champ). Ceci est réalisé en résolvant numériquement les équations de Poisson et de continuité des électrons et des trous (à deux dimensions) en un nombre fini de points formant le maillage de la structure défini par l'utilisateur ou par le programme. Ce simulateur est composé de deux parties :

- une partie de traitement numérique (méthode d'intégration, de discrétisation...)
- une partie formée des modèles physiques des composants semiconducteurs les plus courants: modèles de recombinaison (Shockley Read Hall), d'ionisation par impact (Pearson et Monte Carlo), ainsi que les modèles de mobilité, et les statistiques de Fermi-Dirac et Boltzmann.

ATLAS permet de simuler le comportement électrique d'un composant semiconducteur créé et modélisé comme par exemple une diode ou un transistor. Le composant étudié est représenté comme une structure maillée où chaque nœud a des propriétés qui lui sont associés telles que le type de matériau, le type de dopage, la concentration du dopant, etc. Ainsi, pour chaque nœud, la concentration de porteurs, le champ électrique...etc, peuvent être calculés. Les électrodes sont représentées par des surfaces sur lesquelles les conditions aux limites sont imposées, comme par exemple, les tensions appliquées.

Le schéma bloc des modules utilisés dans la simulation par SILVACO est représenté par la figure III.1

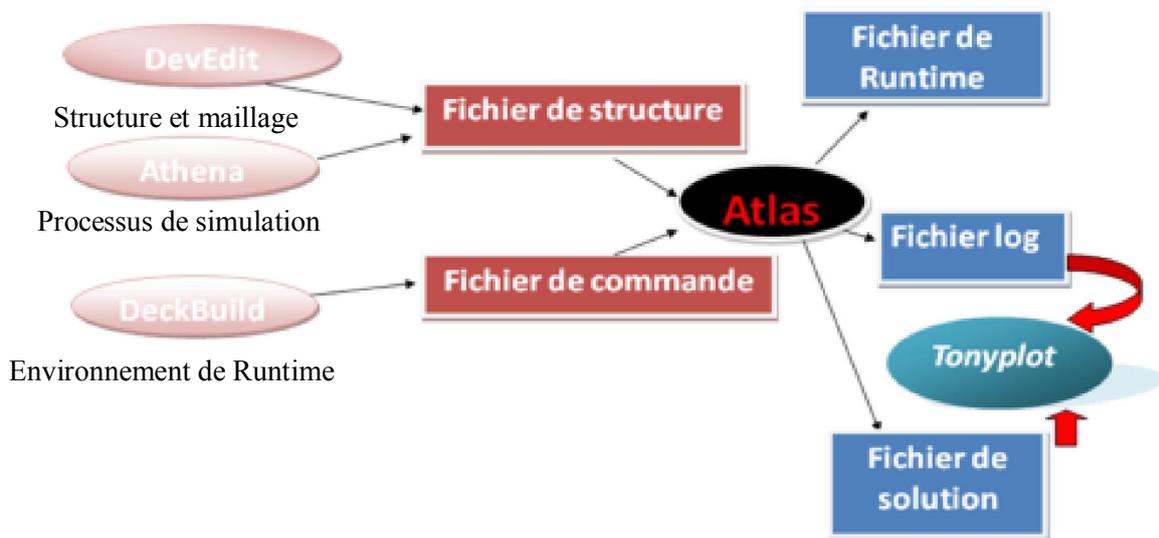


Figure III.1: Schéma synoptique des modules utilisés dans la simulation par TCAD SILVACO [3].

Les paramètres d'entrée de simulation, définissant les différentes étapes technologiques et les phénomènes physiques, sont réalisés avec le module DECKBUILD. La visualisation de la structure et des paramètres de sorti tel que la caractéristique I(V) et les conductances, etc., s'effectue avec le module TONYPLOT.

- **Deckbuild**

Le DECKBUILD est l'environnement où est défini le programme de simulation à travers des commandes spécifiques. De multiples simulateurs considérés comme des entrées peuvent être utilisés avec le DECKBUILD : ATHENA, ATLAS, SSUPREM3,.... Sous cet environnement nous pouvons visualiser sur une fenêtre d'information (Output window) les résultats de simulation tels que les paramètres technologiques (profondeur de jonction, concentration des porteurs) et les paramètres électriques (tension de seuil, courant, etc.). Les groupes de commandes utilisés par ATLAS sont indiqués sur la Figure III.2

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

Figure III.2: Le logiciel Silvaco en cours d'exécution.

- **Tonyplot**

TONYPLOT est L'environnement où sont tracés les résultats des simulations. Il donne des possibilités complètes pour la visualisation et l'analyse des caractéristiques de sortie (structure du composant électronique, profil de dopage, et caractéristiques électriques). Selon le programme de simulation utilisé, TONYPLOT peut donner des caractéristiques de sortie en une, deux ou trois dimensions.

III.2.2 Différents étapes de simulation

La simulation d'un dispositif semiconducteur selon ATLAS-SILVACO est fait sous les étapes suivantes [3] :

- **III 2.2.1 Spécification de la Structure étudiée**

La spécification de la structure est effectuée en définissant le maillage, les régions, les électrodes et le niveau de dopage.

- **III 2.2.1.a Spécification de Maillage**

Le maillage est une série de lignes horizontales et verticales. Dans notre étude, le maillage utilisé est à deux dimensions. Par conséquent, seuls les paramètres x et y sont définis. La Figure III.3 montre le maillage de notre structure.

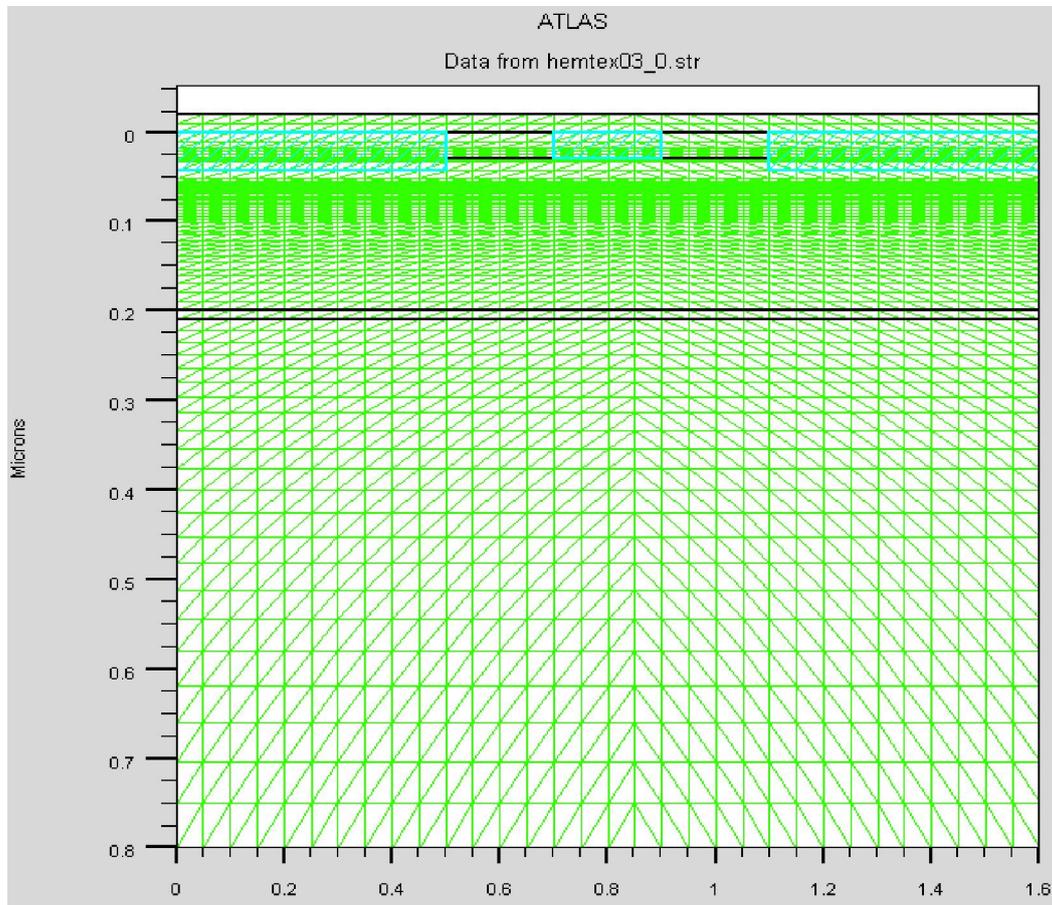


Figure III.3: Maillage du dispositif.

- **III 2.2.1.b Spécification des Régions et Matériaux**

Après avoir défini le maillage, il est nécessaire de définir les régions. La Figure III.4 montre les régions du maillage. Les limites de chaque région sont explicitement identifiées dans les axes x et y. Notons que le code de couleur indique la matière. Les régions ont des lignes verticales et horizontales pour marquer leurs limites.

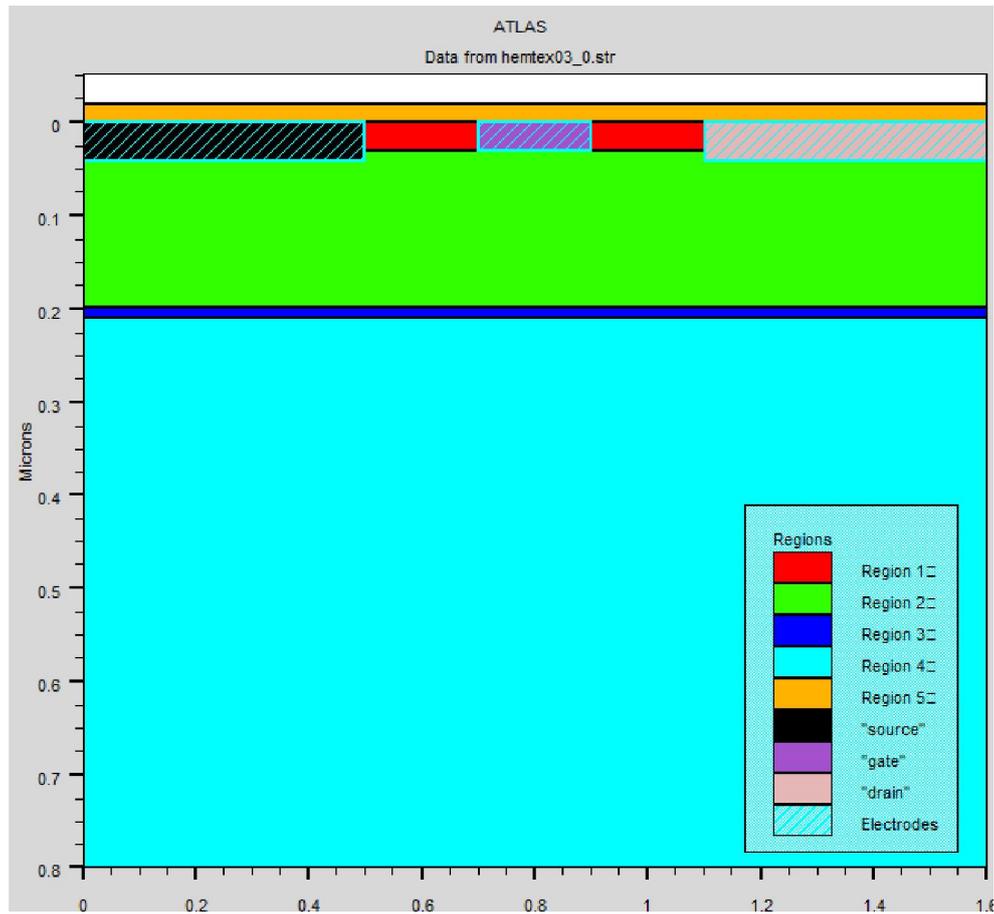


Figure.III.4.: Structure bidimensionnelle d'un HEMT.

- III 2.2.1.c Spécification des électrodes

ATLAS a une limite de 50 électrodes qui peuvent être définies. La Figure III.5 montre la position de drain, source et grille par des valeurs de x et de y.

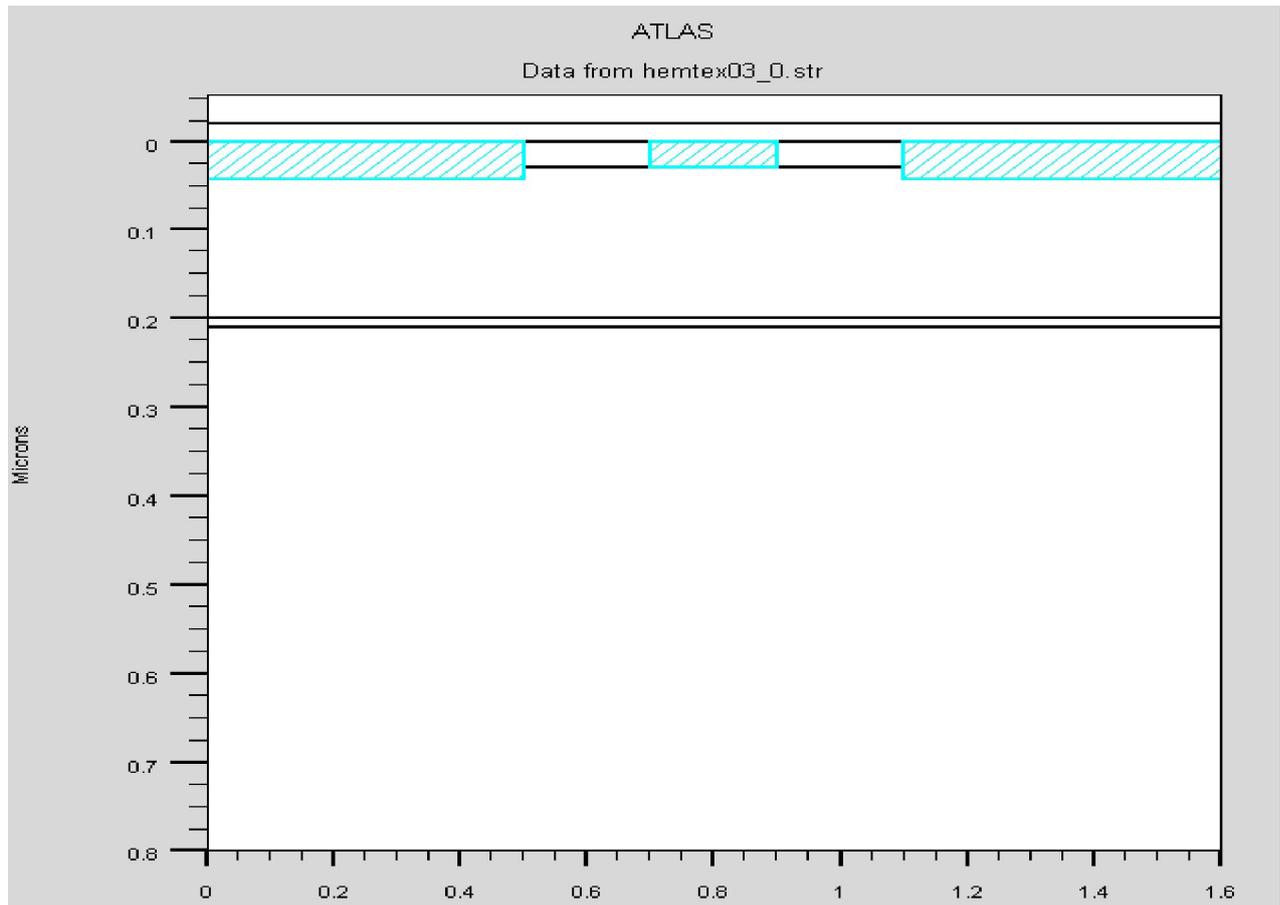


Figure III. 5: Définition des électrodes.

- III.2.2.1.d Spécification de Dopage

Le dernier aspect de la spécification de la structure qui doit être défini est le dopage. Le dopage peut être de type N ou P. Le type de distribution peut être uniforme ou gaussien. Après la définition des différentes caractéristiques structurales telles que le maillage, les dimensions, les électrodes et le dopage. Il reste à préciser les modèles et les contacts.

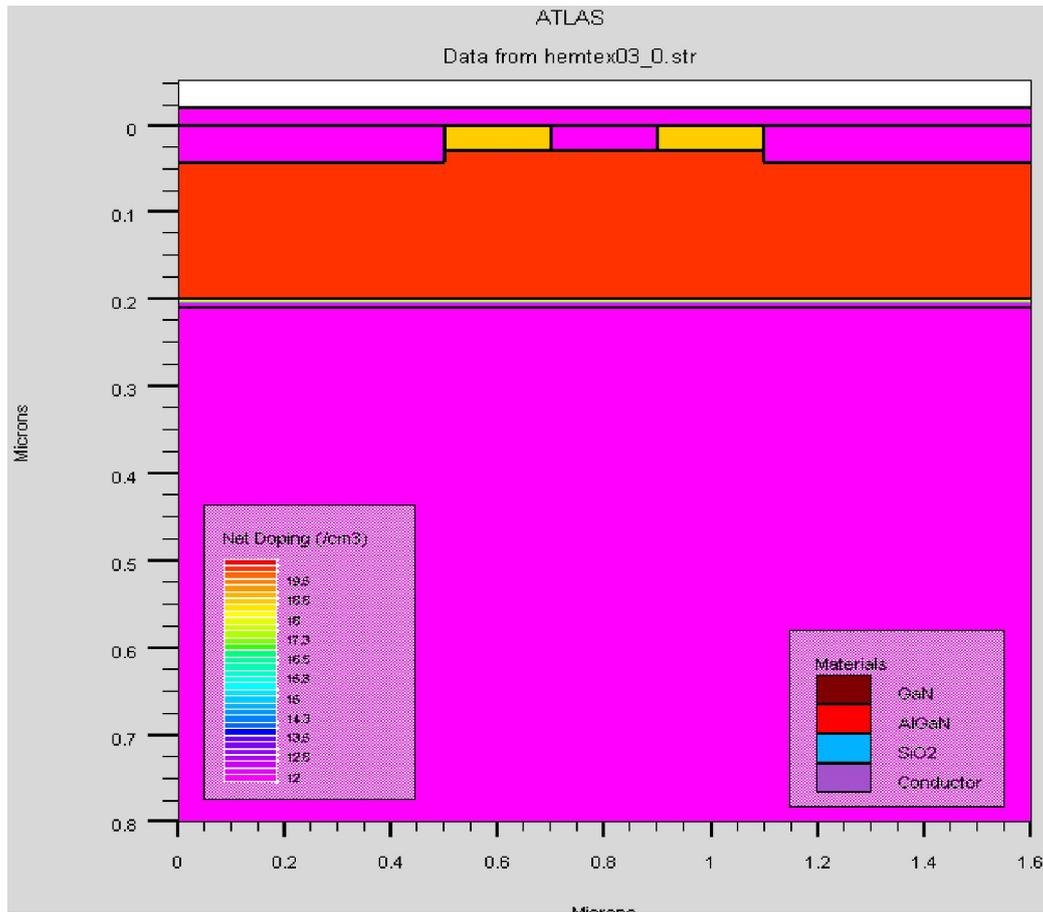


Figure III.6 Définition de dopage.

III.2.2.2 Spécifications des Matériaux et des modèles

• III.2.2.2 a Spécifications des Matériaux

Le matériau peut être déclaré par rapport à son type et à plusieurs autres paramètres comme exemples: la mobilité d'électrons (MUN) et la mobilité de trous (MUP), (TAUN0) et (TAUP0) qui sont les durées de vie d'électrons et de trous respectivement .

• III.2.2.2 b Spécifications des modèles

Les modèles physiques sont classés en cinq catégories: Mobilités des porteurs de charges, mécanismes de génération-recombinaison, les statistiques de transport, l'ionisation par impact et l'effet tunnel. Le choix du modèle dépend des matériaux choisis pour la simulation [3].

Exemple: le modèle de Shockley-Read-Hall pour la recombinaison-génération, tandis que pour la mobilité elle dépend soit du champ électrique parallèle ou de la concentration

Il existe aussi les modèles qui concernent le type de contact soit contact ohmique qui sont connus par défaut et le contact redresseur (contact de Schottky), ce contact est reconnu par un travail de sortie (workfunction)

III.2.2.3 Spécification Méthodes numériques de calcul

Après la précision du modèle de matériau, la sélection de la méthode numérique doit être indiquée [3]. Parmi les différentes méthodes numériques de résolution des systèmes d'équations, trois types de techniques sont utilisées dans ATLAS -SILVACO :

- Méthode de Gummel
- Méthode de Newton
- Méthode des blocs

On peut aussi utiliser deux méthodes de calcul. Exemple : method newton gummel, où les équations sont résolues par la méthode Gummel. Si la convergence n'est pas atteinte, les équations sont résolues en utilisant la méthode de Newton.

III.3 Les équations de Base de Semi-conducteur en ATLAS-SILVACO

De façon très succincte, nous pouvons dire que ce simulateur de dispositifs est basé sur la résolution simultanée de l'équation de Poisson et de l'équation de continuité. Il calcule à chaque instant et en tout point de l'espace en une suite d'éléments finis, la concentration des électrons et des trous et la valeur du potentiel électrostatique. L'équation de Poisson montre une relation entre le potentiel et la densité des porteurs [3]:

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

Où:

ε est la constante diélectrique,

V le potentiel,

q est la charge élémentaire d'électrons,

N_D^- et N_A^+ sont les concentrations des dopants donneurs et accepteurs ionisées,

n et p sont les densités des porteurs.

L'évolution temporelle des densités de porteurs obéit aux équations de continuité pour les électrons et les trous :

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

$$\frac{\partial p}{\partial t} = G_p - V_p + \frac{1}{q} \operatorname{div} \vec{J}_p \quad (\text{III.3})$$

Où :

\mathbf{G} et \mathbf{U} sont respectivement les taux de génération et de recombinaison des porteurs, \vec{J}_n et \vec{J}_p sont respectivement les densités de courant des électrons et des trous.

Les dérivations basées sur la théorie de transport de Boltzmann ont prouvé que la densité des courants dans les équations de continuité peut être définie par le modèle d'entraînement diffusion. Les densités de courants sont exprimées en deux termes. Le premier correspond à l'entraînement des charges par le champ électrique, le second correspond à la diffusion des porteurs.

$$\vec{J}_n = qn\mu_n \vec{E} + qD_n \overrightarrow{\operatorname{grad}n} \quad (\text{III.4})$$

$$\vec{J}_p = qn\mu_p \vec{E} + qD_p \overrightarrow{\operatorname{grad}p} \quad (\text{III.5})$$

$$E = -\overrightarrow{\operatorname{grad}} \quad (\text{III.6})$$

III.4 Résumé

D'après l'étude simplifiée et succincte du logiciel ATLAS-SILVACO on conclut que c'est un logiciel profond et complet pour la simulation de comportement des composants semiconducteurs

Dans cette partie, nous avons présenté le principe de fonctionnement, les performances, les modules des simulations spécialement ATLAS. L'environnement où est défini le programme de simulation (DECKBUILD), et l'outil de visualisation (TONYPLOT) du logiciel TCAD-SILVACO. Puis nous avons décrit les étapes de simulation faite par ce logiciel, en présentant pour chaque étape le modèle physique utilisé.

Nous allons par la suite, dans le chapitre IV, étudier la structure AlGaIn/GaN HEMT par ce logiciel et mettre en évidence sa capacité à refléter les différents phénomènes qui peuvent se manifester dans le dispositif.

Bibliographies du chapitre III

- [1] M^{er} Mostafa Kara Selma Etude et simulation de cellules photovoltaïques à couches minces A Base de CIS et CIGS Mémoire de Magister université de Université Abou-Bakr Blekaid Tlemcen_2012

- [2] Jean-Marc Gallière, Jérôme Boch, « Mise en oeuvre de la simulation mixte électrique/TCAD pour décloisonner l'enseignement de la microélectronique », 10^{es} Journées Pédagogiques du CNFM, 2008

- [3] ATLAS User's "Manual-device simulation software" volume 1.

Chapitre IV :

Résultats et Interprétation

IV.1 Introduction

Les potentialités des transistors à effet de champ à grande mobilité électronique HEMT à base de l'hétérostructure AlGaN/GaN intéressent fortement la communauté scientifique internationale et sont certainement les plus étudiés actuellement au niveau mondial. Ils sont apparus comme candidats attractifs pour les applications à forte tension, puissance élevée aux fréquences micro-ondes. Grâce aux polarisations spontanées et piézoélectriques, ils ont la facilité de réaliser un gaz bidimensionnel d'électrons (2DEG) à l'interface avec une concentration de l'ordre 10^{13}cm^{-2} sans dopage intentionnel.

La modélisation de la structure transistor HEMT AlGaN//GaN est faite par Silvaco-Atlas en considérant les modèles de la mobilité et l'effet de température qui jouent un rôle principal dans les matériaux à base de GaN.

Dans ce chapitre nous allons présenter les résultats simulés par le logiciel Atlas-Silvaco. Les effets due aux propriétés du matériau comme la charge d'interface (n_s) qui en résulte de la polarisation et la fraction molaire (x de l'Aluminium) vont être étudié. En outre, sur le plan technologique, on va voir l'influence des dimensions de la grille, la distance entre la source et le drain et le type du substrat sur les caractéristiques de sortie du transistor HEMT.

Dans cette partie, nous présentons les résultats de simulations des caractéristiques statiques (DC) du transistor HEMT GaN. Pour cela, nous avons utilisés le module ATLAS du logiciel SILVACO.

IV.2 Le transistor à effet de champ $\text{Al}_{0.28}\text{Ga}_{0.72}\text{N}/\text{GaN}$ HEMT

IV.2.1 Description de la structure simulée

La topologie de la structure étudiée est celle d'un HEMT $\text{Al}_{0.28}\text{Ga}_{0.72}\text{N}/\text{GaN}$ épitaxie sur un substrat saphir (Sapphire: Al_2O_3). La taille de substrat est de $8 \times 9 \mu\text{m}^2$. L'épitaxie se compose d'une couche d'AlGaN (26.7 nm), suivie de 0,2nm d'une couche de GaN contiendra dans sa zone supérieure, le gaz bidimensionnel (2DEG) ou canal d'électrons vient ensuite des couches suppliantes de GaN d'épaisseur totale $1.47 \mu\text{m}$.

Les longueurs des contacts de source, grille et drain sont de $0.5 \mu\text{m}/2 \mu\text{m}/0.6 \mu\text{m}$ respectivement. Les distances source-grille et grille-drain sont de $2 \mu\text{m}-3 \mu\text{m}$. La densité de charge à l'interface $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}/\text{GaN}$ est fixée à $0.99 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$. Le contact Schottky est donné par la fonction de travail WF (work function) égale à 3.4 eV.

L'alignement est posé à la valeur de 0.8 sur la couche AlGa_{0.28}N qui permet 80% de différence de largeur de bande interdite à apparaître comme la discontinuité de bande de conduction. Les propriétés physiques du chaque matériau est calculé et rassemblé dans le tableau IV.1.

La figure IV.1 illustre la structure du HEMT étudiée est simulée par le logiciel Atlas-Silvaco et la figure IV.2 celle d'une structure représentative d'un AlGa_{0.28}N/GaN HEMT.

Matériau/propriété	Al _{0.28} Ga _{0.72} N	GaN	Saphir
Eg largeur de la bande interdite	4.8	3.39	2.86
ε _r permittivité du matériau	10.28	9.5	10
m _e	0.17	0.19	
Dopage (cm ⁻³)	(UID) n _i =10 ¹⁰	10 ¹⁵	
K(T) coefficient de la conductivité thermique		1.3	1.7
La longueur du transistor 100μm			

Tableau IV.1: la structure du HEMT Al_{0.28}Ga_{0.72}N/GaN simulé par Silvaco-Atlas.

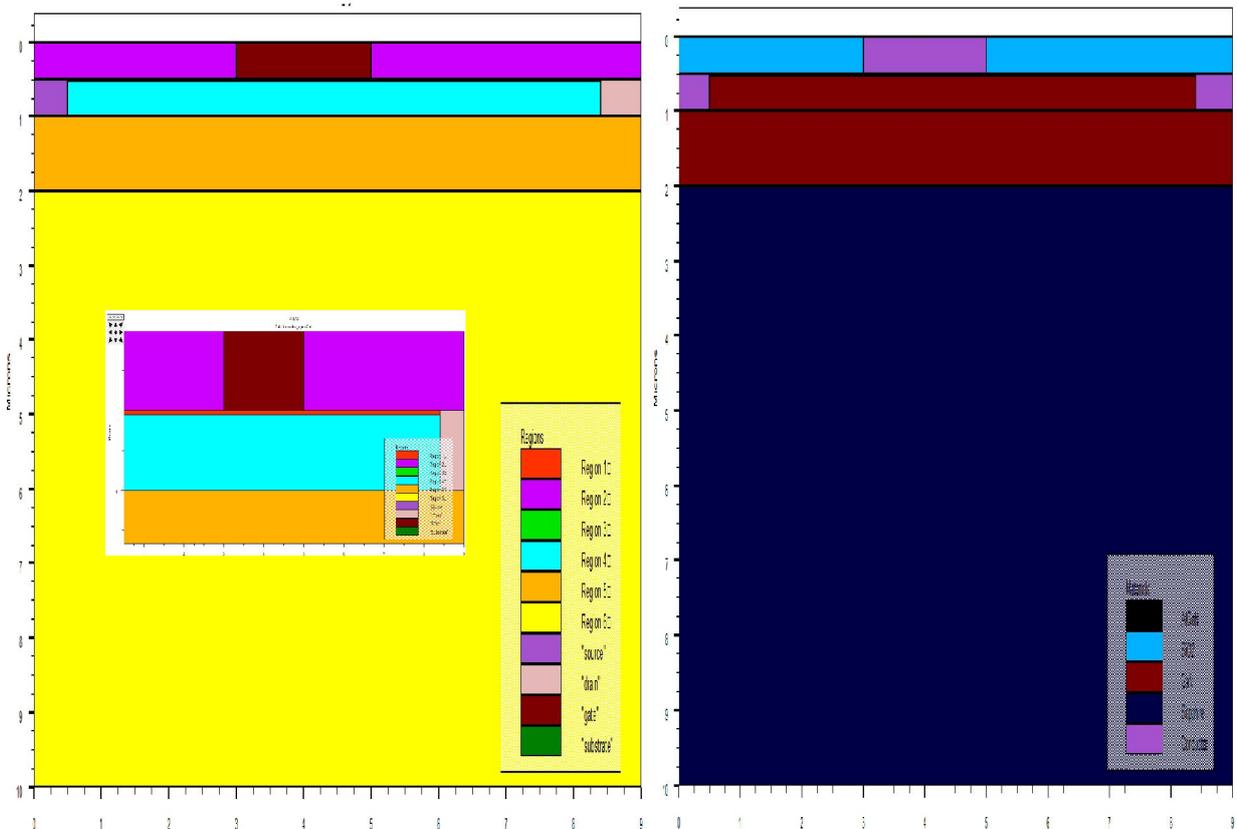


Figure IV.1: La structure du HEMT Al_{0.28}Ga_{0.72}N/GaN simulée par Atlas- Silvaco, a gauche la représentation des différentes régions et a droite la représentation est faite selon le type de matériau.

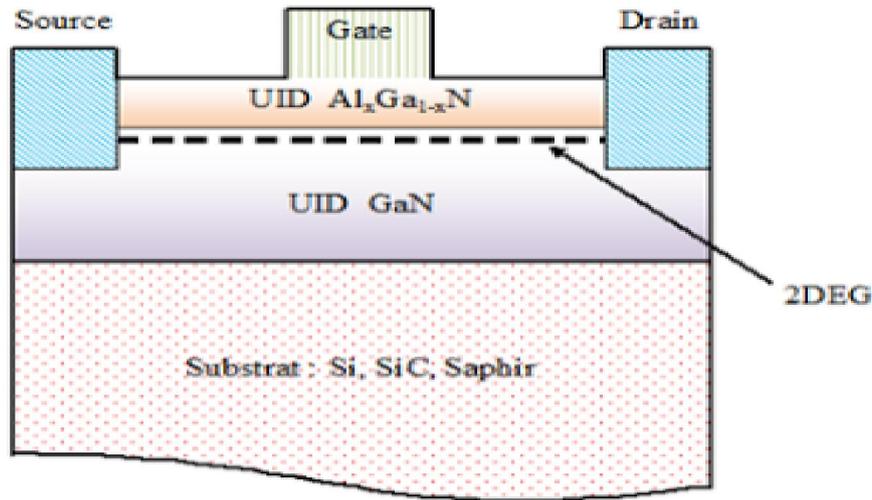


Figure IV.2: Une structure représentative d'un transistor HEMT AlGaIn/GaN.

- Les propriétés physiques du matériau (paramètre de maille, énergie du gap, permittivité...) groupés dans le tableau IV.1 sont calculés en se basant sur la loi de Vegard donnée par:

$$Y(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) = Y(1-x)_{\text{AlN}} + x \cdot Y_{(\text{GaN})} \quad (\text{IV.1})$$

- Le modèle de la mobilité à faible champ d'Albercht est généralement choisi dans le cas des matériaux à base de GaN, quoique le fameux modèle pour ce type d'alliage c'est le modèle de Canali surtout à des champs d'entraînement des porteurs très élevés.

Suivant les travaux d'Albercht et al, l'équation de la mobilité est donnée par l'équation suivante :

$$\frac{1}{\mu(N,T)} = \frac{AN \cdot ALBRCT \cdot N}{NON \cdot ALBRCT} \left(\frac{T}{TON \cdot ALBRCT} \right)^{-3/2} \ln \left[1 + 3 \left(\frac{T}{TON \cdot ALBRCT} \right)^2 \left(\frac{N}{NON \cdot ALBRCT} \right)^{-3/2} \right] + BN \cdot ALBRCT \times \left(\frac{T}{TON \cdot ALBRCT} \right)^{3/2} + \frac{CN \cdot ALBRCT}{\exp(T1N \cdot ALBRCT / T - 1)} \quad (\text{IV.2})$$

Où $\mu(N,T)$ est la mobilité en fonction de dopage et de la température, N est la concentration total dopage, T est la température. $AN \cdot ALBRCT \cdot N$, $BN \cdot ALBRCT$, $CN \cdot ALBRCT$, $NON \cdot ALBRCT$, $TON \cdot ALBRCT$ et $T1N \cdot ALBRCT$ sont des paramètres spécifiques de la mobilité.

On précise ce modèle dans le logiciel Atlas-Silvaco en spécifiant le matériau par l'instruction suivante dans:

mobility albrct.n an.albrct=5e-3 bn.albrct=3e-3 cn.albrct=2e-3 vsatn=2e7

Les caractéristiques de transfert du transistor AlGaN/GaN HEMT sont présentées par la figure IV.3. Les caractéristiques courant drain-tension drain (I_{ds} - V_{ds}) est une des figures de mérites les plus intéressantes pour les composants électroniques, elle est dite empreinte digitale d'un transistor, d'où nous les ramenons dans ce manuscrit un grand intérêt.

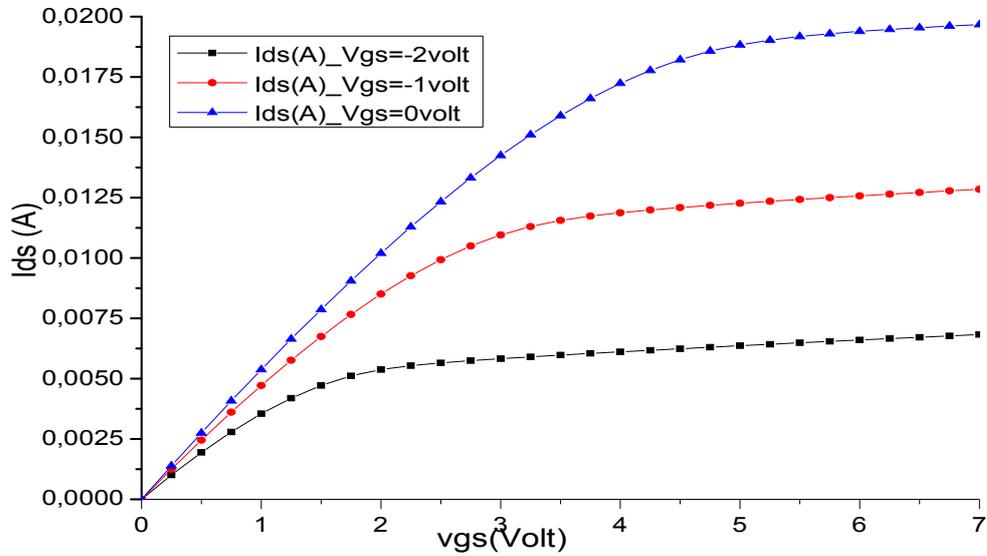


Figure IV.3: Les caractéristiques courant de drain- tension de drain pour des tensions de grille $V_g = -2, -1, 0$ Volt.

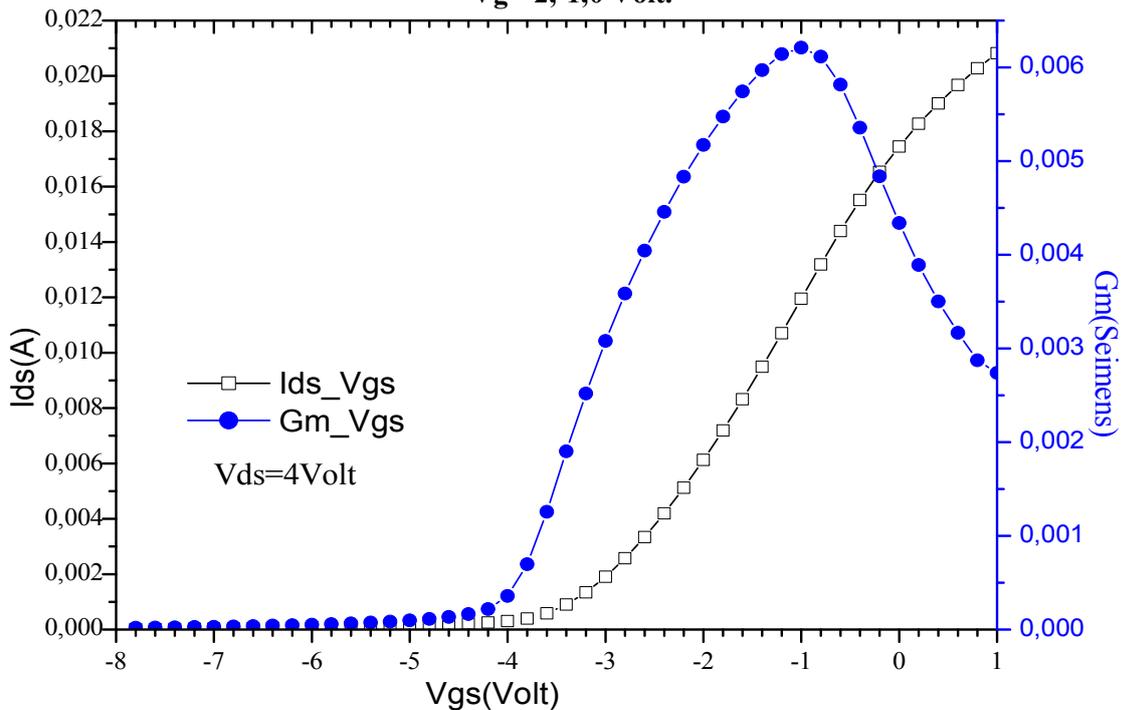


Figure IV.4: la caractéristique de transfert DC et RF du transistor étudié pour $V_{ds} = 4.0$ Volt.

La figure IV.4 représente la variation de du courant de drain I_{ds} en fonction de la tension de la grille V_{gs} , ainsi que la transconductance G_m en fonction de V_{gs} . La tension totale de pincement (pinch-off voltage) est de valeur -3.25 Volt.

IV.3 l'influence des propriétés du matériau

IV.3.1 L'effet de la concentration d'interface n_s sur les caractéristiques du transistor $Al_{0.28}Ga_{0.72}N/GaN$ HEMT

Comme signalé dans le chapitre I, que la concentration des électrons responsables de la conduction (2DEG) et qui représente la charge d'interface n_s qui est due a la polarisation induite dans les semiconducteurs a base de GaN. Elle représente une propriété très importante spécialement pour ces alliages, nous vrons ici son influence sur les caractéristiques du transistor à effet de champ HEMT.

La polarisation spontanée et piézoélectrique induites la charge d'interface sont la source majeur des porteurs dans les dispositifs hétérojonction à base de GaN. La charge de polarisation à l'interface sont données par:

$$P_{int}=P_{tot}(\text{la couche supérieure})-P_{tot}(\text{ la couche inferieure}) \quad (IV.3)$$

Et

$$P_{total} = \text{polarisation Spontanée} + \text{Polarisation Piézoélectrique} \quad (IV.4)$$

La polarisation spontanée du GaN est de -0.034 C/m^2 et pour le AlGaN est donnée comme suite:

$$P_{sp} = -0.09x -0.034 \times (1-x) + 0.021 \times x \times (1-x) \quad (IV.5)$$

Et la polarisation piézoélectrique dans le AlGaN tendu (sous contrainte) croît sur la couche GaN est donnée par:

$$P_{pz} = -0.0525x + 0.0282 \times (1-x) \quad (IV.6)$$

Une mince couche épitaxiale AlGaN grandi sur le GaN subit une contrainte de traction bi-axiale, d'où une nette charge d'interface due a la polarisation est donnée par.

$$P_{int}(AlGaN/GaN) = 1.38 \times 10^{-13} \text{ cm}^{-2} \quad (IV.7)$$

L'augmentation du courant I_{ds} due à cette charge d'interface est représentée par la figure IV.5.

Cette figure présente l'évolution du courant drain en fonction de la variation de la charge d'espace à différentes tension de grille. Comme nous pouvons le remarquer, l'augmentation de la charge d'interface de la valeur $0.99 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ à $1.3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ améliore le courant I_{ds} du transistor d'une façon intéressante puis ce que la densité des porteurs responsables de la conduction sont les électrons 2DEG essentiellement.

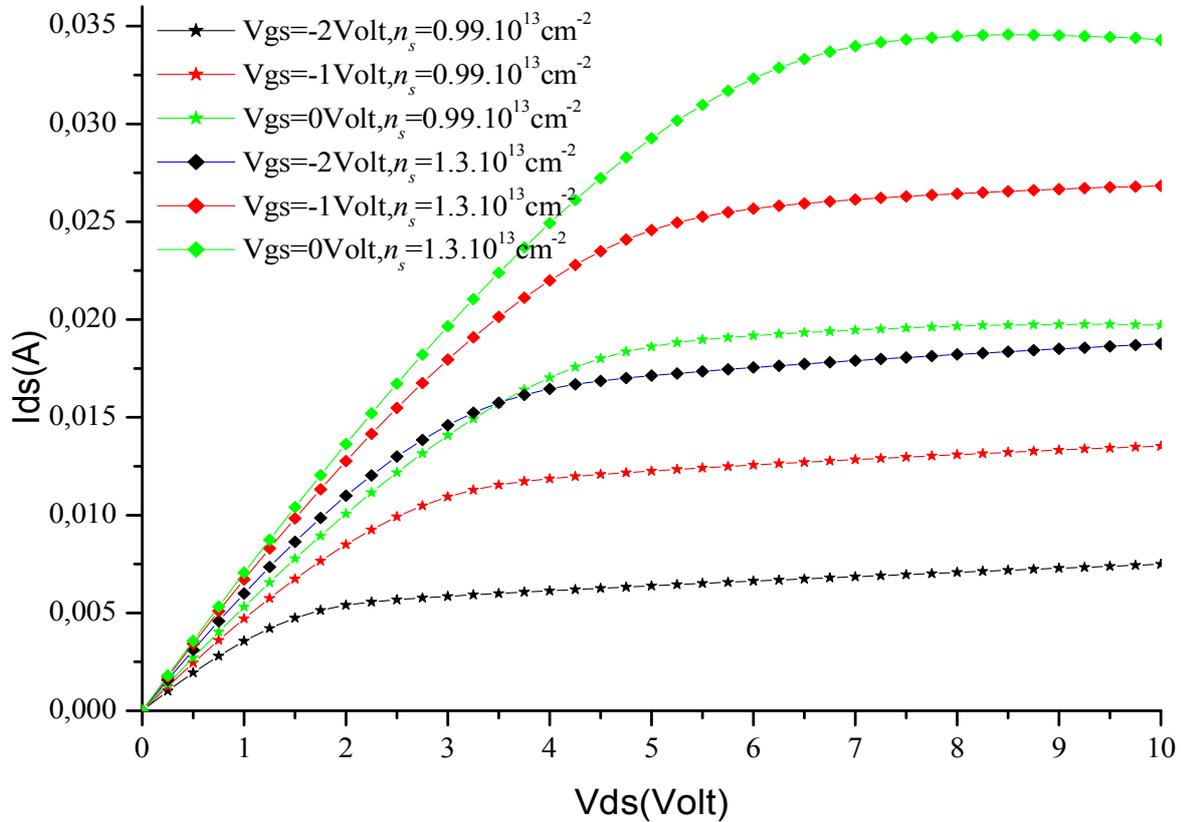


Figure IV.5: L'effet de la charge d'interface AlGaIn/GaN sur les caractéristiques courant-drain-tension-drain (I_d - V_d) du transistor.

Les figures de la caractéristique Dc courant du drain en fonction de la tension de la grille (I_{ds} - V_{gs}) et celle de la transconductance en fonction de la tension de la grille (G_m - V_g) à $V_d=4$ Volt sont représentés par la figure IV.6 et la figure IV.7.

L'augmentation de la charge d'interface n_s qui représente la densité de porteurs (électrons) responsables de la conduction dans les hétérojonctions HEMT à base de GaN, augmente la valeur maximum de la transconductance G_{mmax} de la valeur 0.00621 S à $V_g=-1.0$ Volt vers la valeur 0.00718 S à $V_g=-2.4$ Volt.

En plus, il est bien observable que la tension de pincement total $V_{pinch-off}$ est décalé depuis la valeur -3.25 Volt jusqu'à -4.75 Volt.

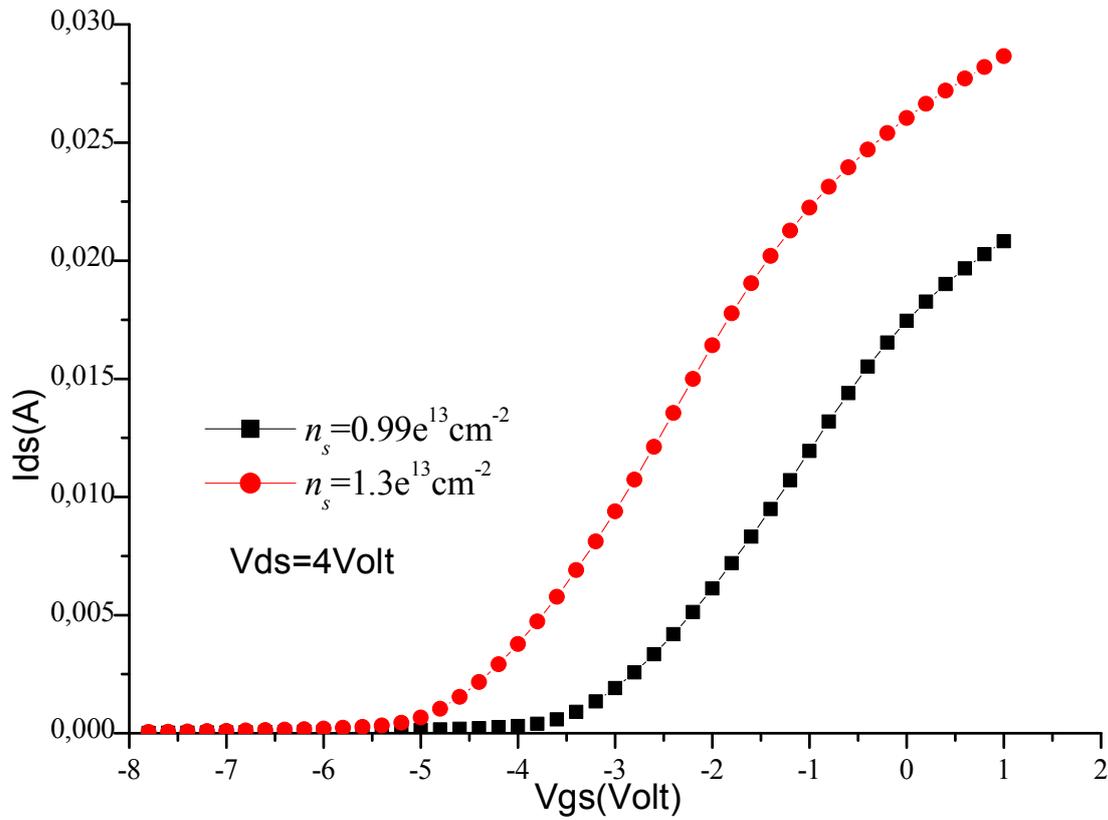


Figure IV.6: L'effet de la charge d'interface AlGaIn/GaN sur la caractéristique courant-drain-tension-grille (I_{ds} - V_{gs}) du transistor.

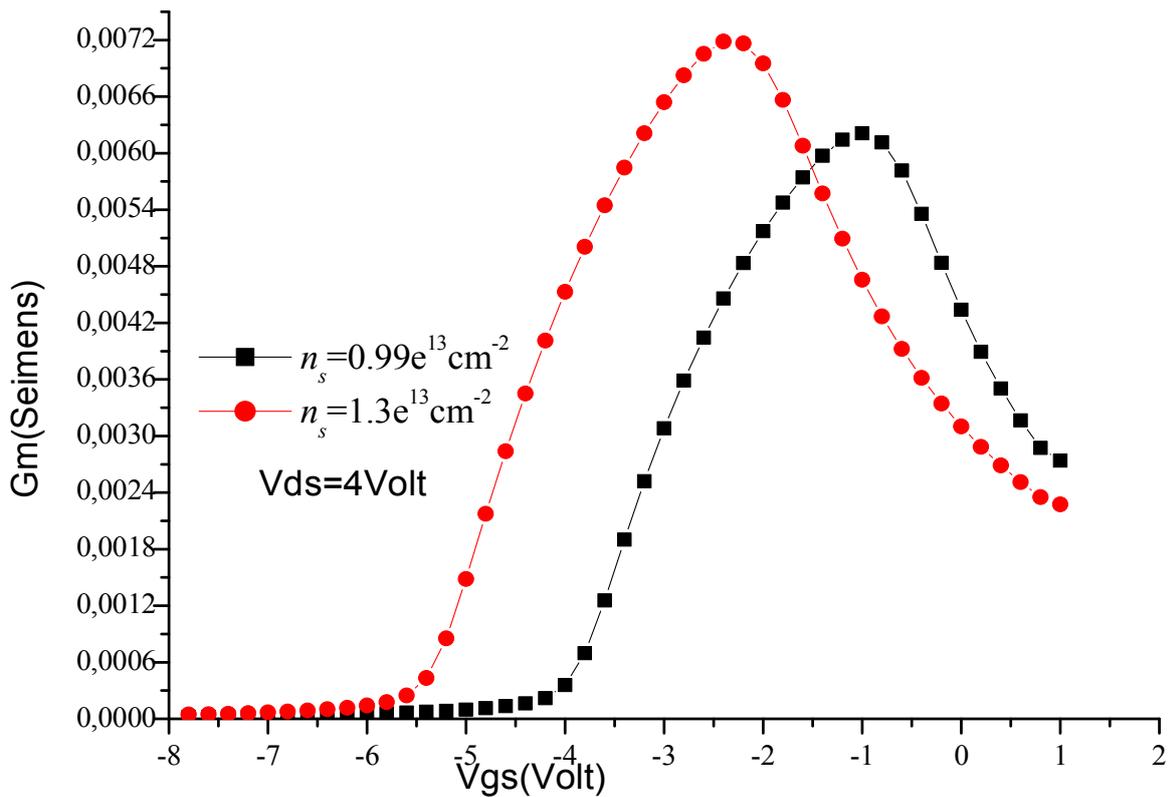


Figure IV.7: L'effet de la charge d'interface AlGaIn/GaN sur la transconductance $G_m(V_{gs})$.

IV.3.2 L'effet de dopage du canal (GaN) sur les caractéristiques du transistor $\text{Al}_{0,28}\text{Ga}_{0,72}\text{N}/\text{GaN}$ HEMT

Il est bien connu que tant la densité des électrons dans canal est importante, la conduction est meilleure et par suite le courant I_{dsmax} est plus grand, mais ce n'est pas le cas toujours spécialement dans les hétérojonctions a nano-dimensions est cela est principalement due au phénomène de dispersion.

Selon la figure IV.8, on remarque que l'augmentation du dopage dans le canal n'améliore pas la caractéristique de transfert $I_{\text{ds}}\text{-}V_{\text{ds}}$ ce qui affirme ce qu'on avait mentionné dans le chapitre II.

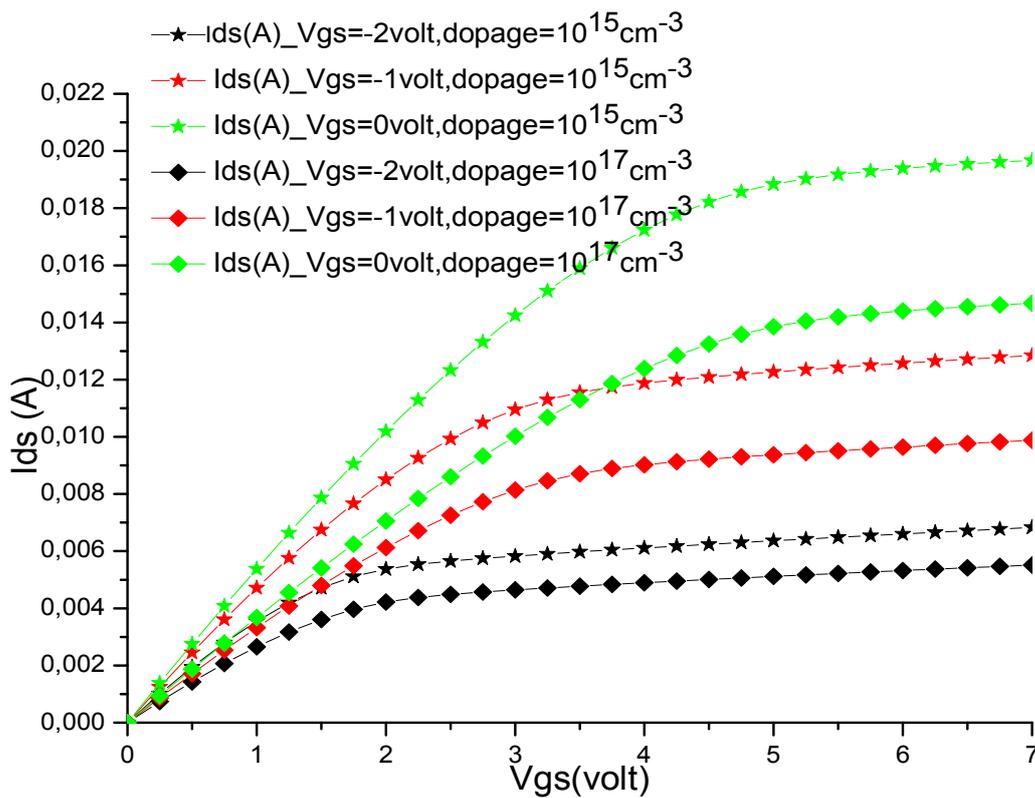


Figure IV.8: L'effet du dopage du canal GaN sur les caractéristiques courant-drain - tension-drain ($I_{\text{ds}}\text{-}V_{\text{ds}}$) du transistor.

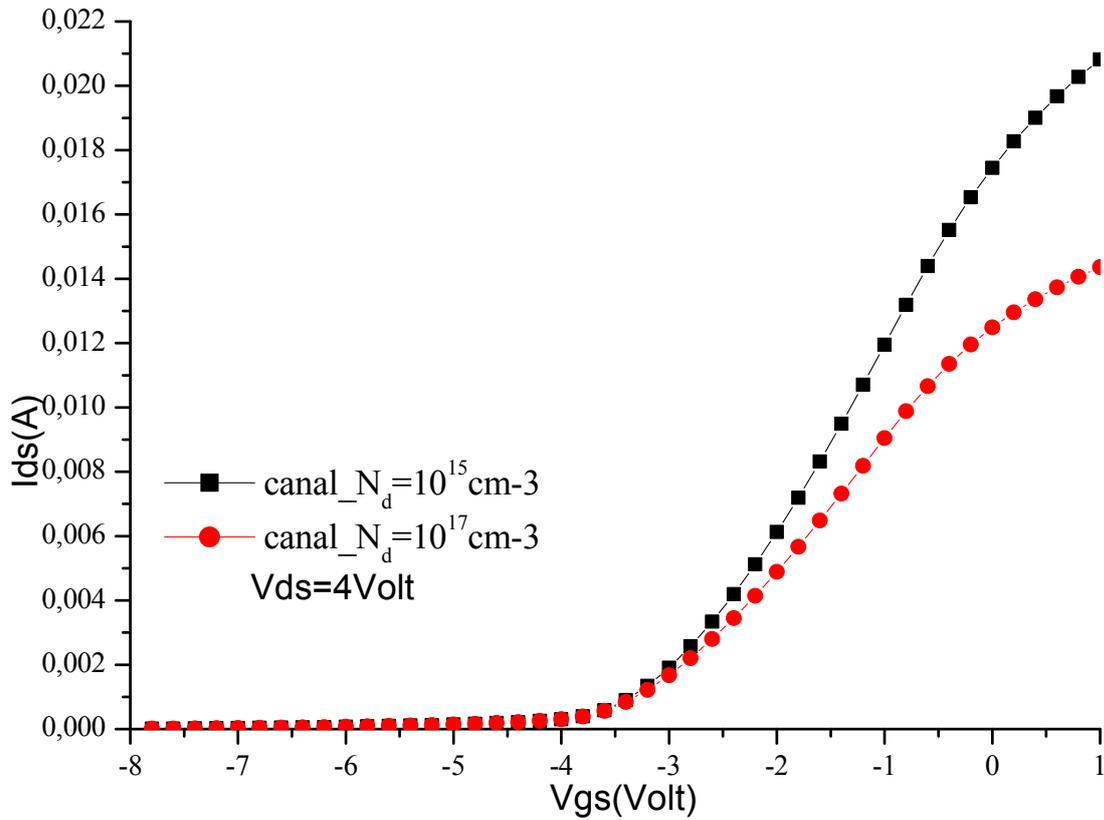


Figure IV.9: L'effet du dopage du canal GaN sur la caractéristique courant-drain- tension-grille (I_{ds} - V_{gs}) du transistor AlGaN/GaN HEMT.

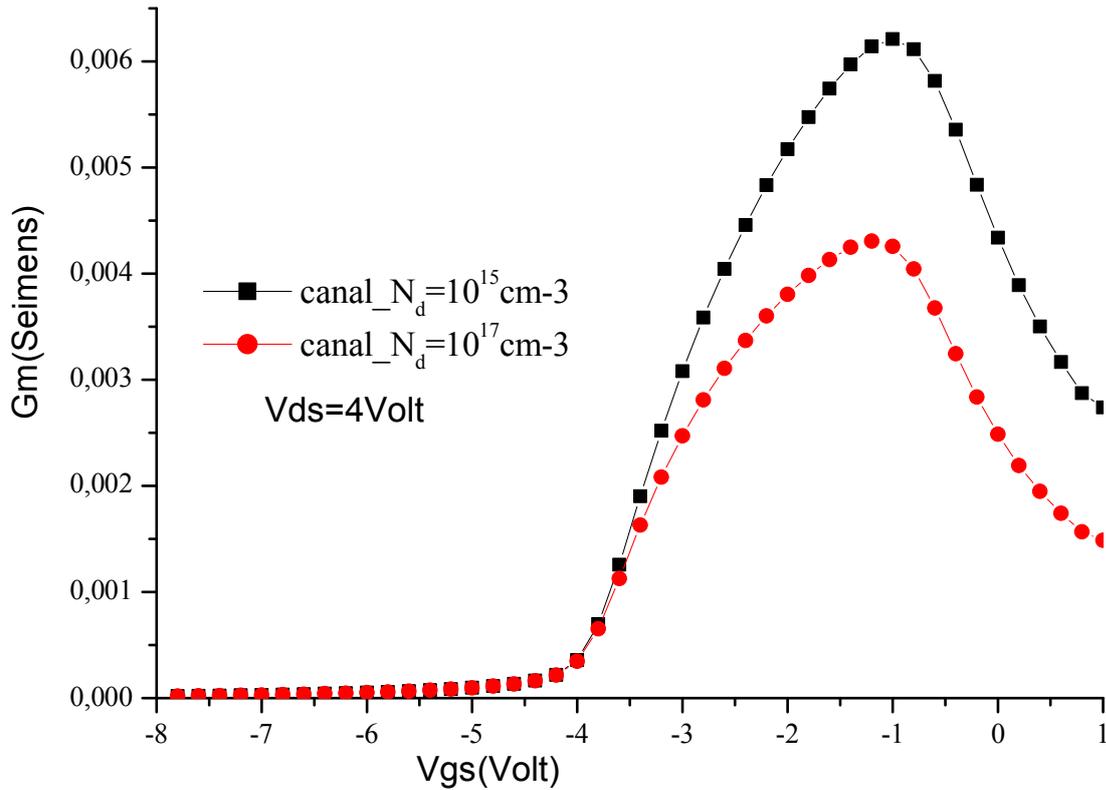


Figure IV.10: L'augmentation du maximum de la transconductance G_{mmax} en fonction du dopage du canal GaN du transistor AlGaN/GaN HEMT.

Comme on peut le constater d'après la figure IV.9 et IV.10 que cette augmentation du dopage du canal de 10^{15} cm^{-3} à 10^{17} cm^{-3} a diminué la valeur maximale de la transconductance $G_{m\max}$ et relativement affectée la tension de pincement.

IV.4 L'influence des paramètres technologique de l'AlGaIn/GaN HEMT

IV.4.1 L'effet du type de substrat sur les caractéristiques du transistor $\text{Al}_{0.28}\text{Ga}_{0.72}\text{N}/\text{GaN}$ HEMT

L'action du type de substrat sur le transistor est observée ici par la figure IV.11. L'optimisation ou le choix de substrat s'appuie essentiellement sur deux facteurs, l'accord de maille et l'approche du coefficient de conductivité thermique entre les couches superposées. De ce point de vue, le substrat peut être sélectionné.

Le coefficient de conductivité thermique est un paramètre indispensable pour le choix du substrat, il est caractérisé par l'équation suivante :

$$K(T) = (a + b.T + c.T^2)^{-1} \quad (\text{IV. 8})$$

Où $K(300^\circ\text{K})$ est égale à $1.3 \text{ W/cm}\cdot^\circ\text{K}$ pour le GaN et $1.7 \text{ W/cm}\cdot^\circ\text{K}$ pour le saphir.

La figure IV.11 montre l'influence de substrat GaN qui améliore les caractéristiques $I_{ds}-V_{ds}$ et cependant rend meilleures les performances du transistor HEMT par rapport au cas où substrat saphir (Sapphire Al_2O_3) est utilisé.

Le substrat GaN c'est un accord total de maille avec les couches supérieures de GaN, amplifie d'une façon très claire les performances du transistor mais de nos jours et malgré l'évolution des techniques de fabrication, le matériau GaN ne peut être utilisé que comme un pseudo-substrat sur des couches minces et c'est ce que Nichia [1] a proposé pour réduire la densité de défauts dans la structure de HEMT.

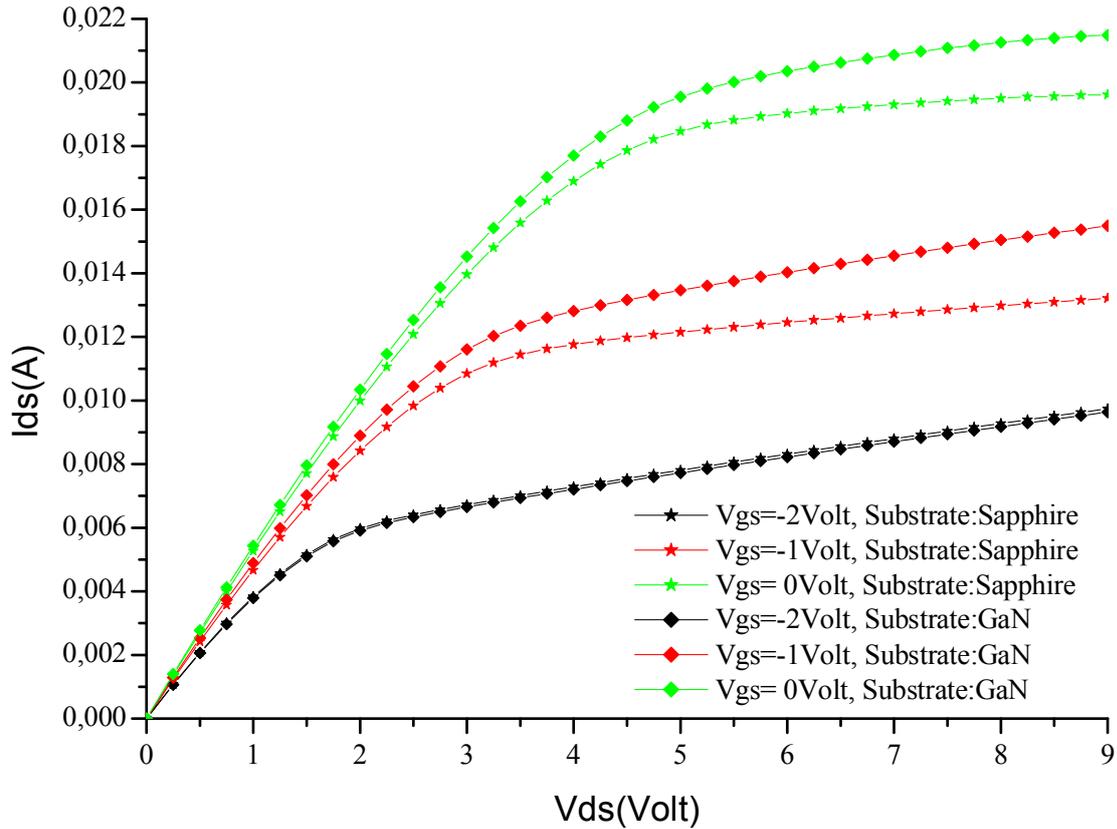


Figure IV.11: L'effet du type de substrat sur la caractéristique de transfert courant-drain-tension-drain (I_{ds} - V_{ds}) du transistor.

IV.4.2 L'effet de la longueur de la grille (L_g) sur les caractéristiques du transistor $Al_{0,28}Ga_{0,72}N/GaN$ HEMT

Le développement de la technologie de la fabrication des couches minces principalement la technique BEM (Beam Epitaxial Molecular layer) à beaucoup aider l'évolution des performances des composants électroniques. Il est connu que la réduction de la longueur de la grille est une manière technologique très avantageuses pour l'amélioration des paramètres de transistor et par suite affecte ces performances surtout dans le domaine de hautes fréquences.

Selon la figure suivante, il est bien clair que la réduction de la longueur de la grille augmente le courant du canal. Cela est principalement dû à l'augmentation du champ électrique latéral qui est inversement proportionnel à la longueur de la grille selon l'équation suivante:

$$E=V/L_g \quad (IV.9)$$

Cette monté de champ augmente le courant du canal I_{ds} , sachant que ce dernier est principalement un courant d'entraînement dont J_d (la densité du courant) = $A \cdot \sigma \cdot E$. Ici, σ est la conductivité du canal (spécifie le matériau), A est la surface du canal et V le potentiel.

En outre, cette réduction dans la longueur de la grille améliore les performances du transistor en améliorant sa fréquence de coupure (F_t) selon la relation:

$$F_t = v_{sat} / L_g \quad (IV.10)$$

La figure IV.12 montre d'une manière expressive l'augmentation du courant de drain I_{ds} due à la réduction de la longueur de la grille.

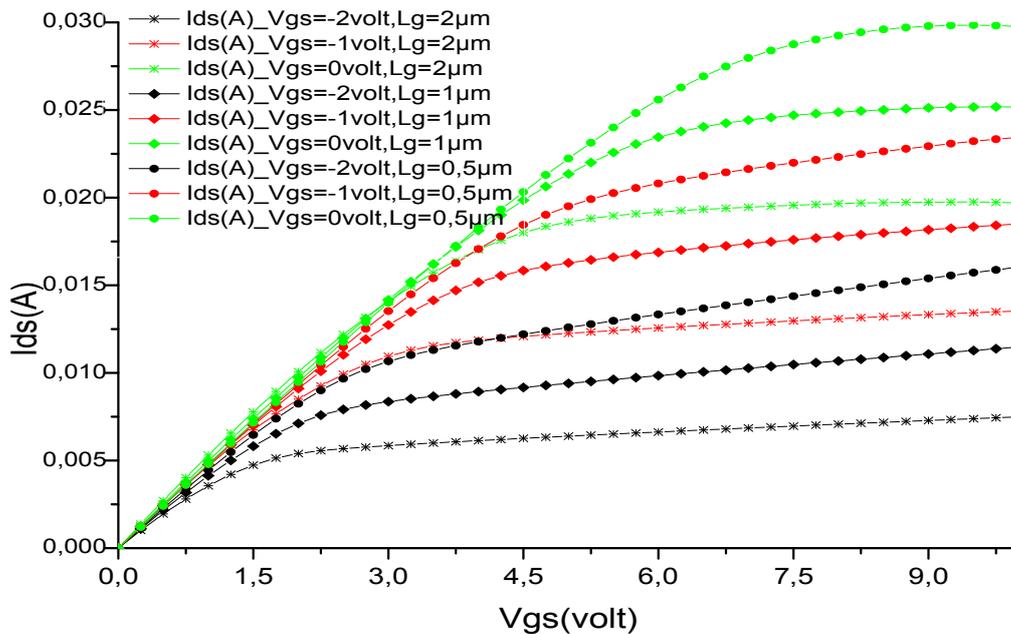


Figure IV.12: L'évolution de la caractéristique de transfert courant-drain- tension-drain (I_{ds} - V_{ds}) du transistor HEMT en fonction de la longueur de la grille à différentes tension de la grille (V_{gs}).

Les figures IV.13 et IV.14 prouvent bien cette constatation. De la figure IV.13, la tension de pincement a clairement augmentée vers des tensions plus négatives de la grille de la valeur - 3.25Volt à -4.0Volt.

A partir de la figure IV.14, il se soit encore avéré que la réduction de la longueur de la grille influe intensivement le pic de la transconductance (G_{mmax}) du transistor HEMT. On outre, on peut clairement remarquer que la capacité de commande de la grille s'améliore, où le maximum

de G_m varie de 0.0061S à $V_{gs} = -1.02$ Volt pour $l_g = 2\mu m$, à la valeur 0.00665S à $V_{gs} = -1.6$ Volt pour $l_g = 1\mu m$ à la valeur 0.0070S à $V_{gs} = -2$ Volt pour $l_g = 0.5\mu m$.

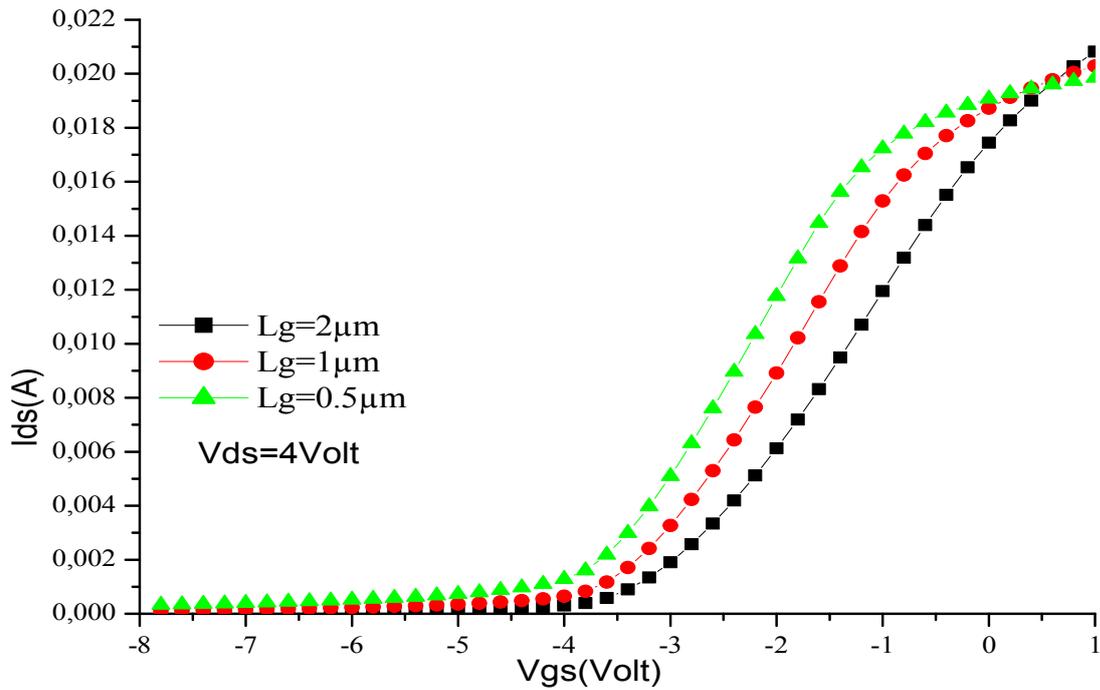


Figure IV.13: L'effet de la longueur de la grille sur la caractéristique de transfert (I_{ds} - V_{gs}) du transistor HEMT

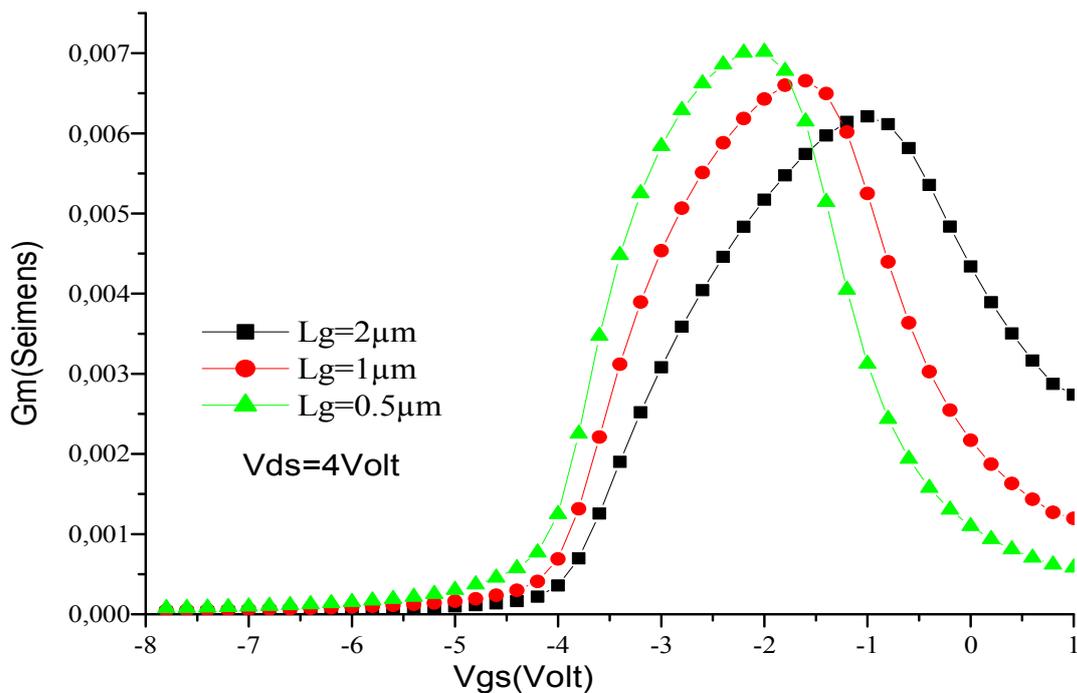


Figure IV.14: la variation de la transconductance en fonction de la tension de la grille a différents longueur de la grille.

IV.4.3 L'effet de l'espace drain-source (Lsd) sur les caractéristiques du transistor

$\text{Al}_{0,28}\text{Ga}_{0,72}\text{N}/\text{GaN}$ HEMT

L'étude de l'espace de séparation entre les électrodes drain et source est simulée dans cette partie de mémoire. L'influence de cette distance sur la caractéristique de transfert DC courant-drain tension drain est illustrée par la figure IV.15.

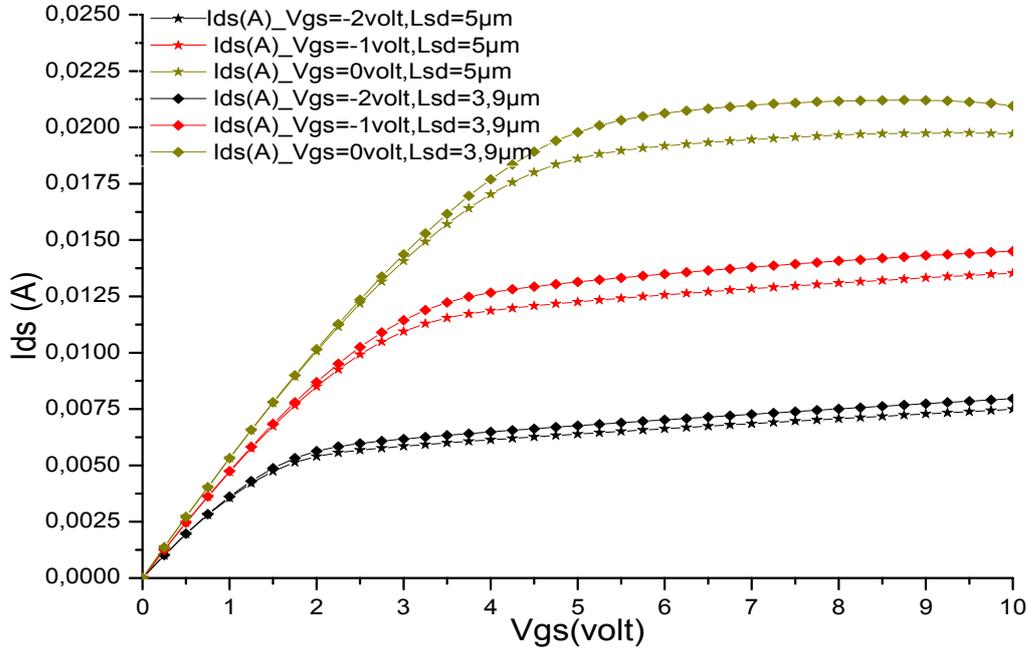


Figure IV.15: La variation des caractéristiques courant-tension (I_{ds} - V_{ds}) en fonction de la tension de la grille a différents longueur de la grille.

Comme on peut le distinguer, une amélioration relative est conçue avec la réduction de l'espace drain-source. Cela est dû principalement à la réduction des résistances d'entrées de la source et de drain R_s et R_d qui sont proportionnelles à l'espace source-grille et grille-drain comme les relations suivantes le montre:

$$R_s = R_c + \frac{LSG}{q\mu_p N_d w} \cdot \frac{1}{a}, \quad R_d = R_c + \frac{LGD}{q\mu_p N_d w} \cdot \frac{1}{a} \quad (\text{IV.11})$$

Où R_c représente la résistance ohmique des contacts, LSG et LGD est l'espace entre la source et la grille et celui de la grille et le drain respectivement. a est l'épaisseur de canal. μ_p est la perméabilité du vide.

La même observation c'est reproduit pour la caractéristique I_{ds_Vgs} et la transconductance en fonction de la tension de la grille G_m_Vgs illustrés par les figures IV.16 et IV.17.

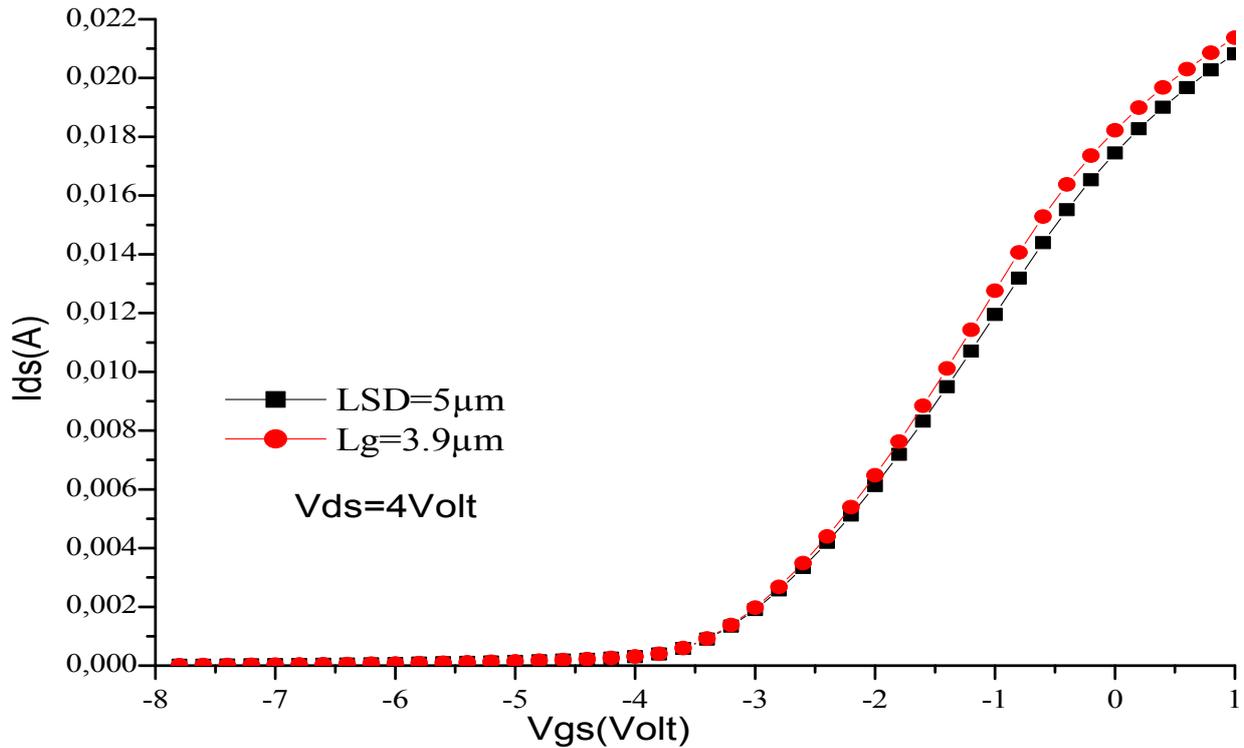


Figure IV.16: la variation de la transconductance en fonction de la tension de la grille a différents longueur de la grille.

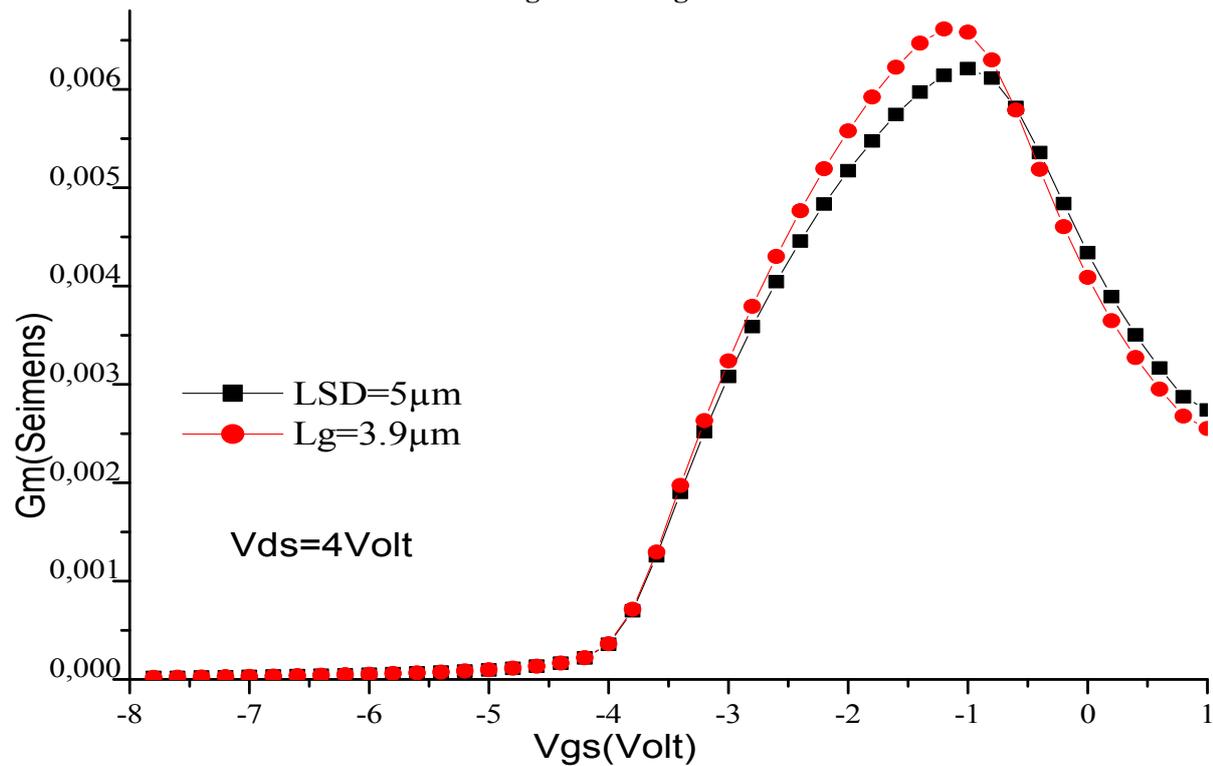


Figure IV.17: La variation de la transconductance en fonction de la tension de la grille a différents longueur de la grille.

IV.5 Résumé

Dans ce chapitre, nous avons étudié le transistor à effet de champ AlGAN/GaN HEMT, en considérant le modèle de la mobilité et l'effet de température qui jouent un rôle principal dans les matériaux à base de GaN. L'influence des propriétés physiques (matériau: la charge d'interface et le dopage) et structurales (longueur de la grille, distance entre le drain et la source, le choix du substrat) ont été explorés durant notre simulation bidimensionnel.

Les résultats obtenus dans cette section de mémoire prouvent que ces paramètres ont une forte influence sur les performances d'un transistor à effet de champ HEMT à base de GaN et que Atlas-Silvaco nous offre un outil de simulation à la fois physique et électrique qualifié.

Bibliographies du chapitre IV

- [1] M^{er} Taleb Ihsen yasser étude des propriétés de quelque Nitrures Application Aux photodiodes Mémoire de Magister université de Abou_Bekr BelkaiD Tlemcen_2012

Conclusion générale

Conclusion générale

Nous avons exposé dans ce manuscrit les résultats de l'optimisation de la technologie des transistors HEMTs AlGa_{0.28}Ga_{0.72}N/GaN afin de fabriquer des composants performants. L'analyse faite a montré les différences fondamentales existant entre ce matériau et les semiconducteurs III-V plus conventionnels tel que l'arséniure de gallium. Sa grande bande d'énergie interdite, sa vitesse de saturation élevée ainsi que ses aspects piézoélectriques en font un candidat idéal pour les applications de fortes puissances en hyperfréquence. Le nitrure de gallium offre la possibilité de réaliser des alliages ternaires type AlGa_{0.28}N, InGa_{0.72}N ou AlInN, ce qui permet de réaliser des hétérojonctions à haute mobilité électronique utilisables pour la fabrication de transistors à effet de champ plus rapides.

La structure étudiée est celle d'un HEMT Al_{0.28}Ga_{0.72}N/GaN épitaxie sur un substrat saphir (Sapphire:Al₂O₃). L'épitaxie se compose d'une couche d'AlGa_{0.28}N qui représente la couche donneuse, suivie du canal GaN qui contient dans sa zone supérieure, le gaz bidimensionnel (2DEG) vient ensuite des couches supérieures de GaN. Le contact Schottky est représenté par la grille de longueur de 2 μm. La densité de charge à l'interface Al_{0.28}Ga_{0.72}N/GaN est due principalement à la polarisation et est de $0.99 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$.

L'effet de la concentration des électrons n_s (2DEG) responsables de la conduction est étudié. Il s'est avéré que l'augmentation de cette densité améliore les caractéristiques de sortie du transistor HEMT à base de GaN. Cette augmentation offre aussi une élévation dans la valeur de pic de la transconductance ainsi qu'une meilleure maîtrise de contrôle à l'électrode de la grille. Le dopage du canal (la partie supérieure du GaN) pour les transistors à haute mobilité électronique à base de GaN n'est pas fermement favorable et cela est particulièrement en raison du phénomène de dispersion qui amorti la mobilité des électrons et par conséquent affaiblit les performances de la structure hétérojonction HEMT.

Notamment, afin d'atteindre des excellentes performances, l'étude de la technologie de ces composants est d'avantage majeur. La sélection du substrat est un facteur d'optimisation pour la fabrication des HEMT d'application en haute puissance et haut fréquences. Ici, la couche de GaN et la couche AlGa_{0.28}N sont formées de façon séquentielle (épitaxie) de la structure du substrat. Une couche de cristal de GaN serait préférable pour un substrat de base; Néanmoins, la technologie actuelle est incapable de produire une telle large plaquette.

Afin d'améliorer le processus du dispositif, on s'intéresse aussi à la réduction de la longueur de la grille qui représente une manière technologique avantageuse pour la progression de la

Conclusion Générale

capacité de contrôle de la grille des électrons et par conséquent l'évolution des éléments de transistor telle que la transconductance et la fréquence de coupure.

L'étude de l'espace de séparation entre les électrodes drain et source a aussi permis l'accroissement des caractéristiques de transfert du HEMT a base de GaN dû à la diminution des résistances d'entrées de la source et de drain R_s et R_d .

En conclusion, nous pouvons affirmer que les caractéristiques de sortie de transistor HEMT a base de GaN dépendent particulièrement de la polarisation des matériaux constituant l'hétérojonction et qui sont la source majeure de la charge d'interface. En plus la grille représente l'électrode de commande pour les transistors à effet de champ et donc ses dimensions affectent grandement la caractéristique de transfert.

Notre travail et une affirmation des notions théoriques et nos résultats obtenus sont en accord avec ce qui à été publié expérimentalement ou par modélisation menés sur les hétérostructures HEMT à base de GaN.

Nous pouvons signaler que l'étude de ces transistors exige beaucoup d'apprentissage physique concernant ces propriétés de polarisation (mécaniques) et ceux électroniques (permittivité, le gap ..ect) et l'effet des dimensions de la grille du point de vue hauteur, longueur, forme et matériau constituant cet électrode.

Étude et simulation d'un transistor AlGa_N/Ga_N HEMT

Résumé : Ce document traite de la simulation des caractéristiques de sortie de transistor High Electron Mobility Transistors AlGa_N/Ga_N HEMT en vue de leur modélisation. Une étude exhaustive des transistors à base de Ga_N est réalisée. Une importance particulière est donnée à la charge d'interface dû a la polarisation piézoélectrique. La simulation bidimensionnelle est faite avec le logiciel Silvaco-Atlas. L'effet des propriétés physiques (matériau: la charge d'interface et le dopage du canal) et structurales (longueur de la grille (L_g), distance entre le drain et la source (LSD), le choix du substrat) ont été explorés. L'augmentation de la charge d'interface améliore le courant de drain I_{ds} d'une façon intéressante car la densité des porteurs de charge 2DEG sont essentiellement responsables de la conduction. Le canal doit être le moins dopée possible par ce que la vitesse des électrons est d'autant plus grande que le dopage du semiconducteur est faible dû a la réduction de la dispersion d'impuretés ionisés. Le choix du substrat constitue aussi un effet majeur afin d'augmenter les performances du transistor. L'influence de la réduction de l'espace drain-source LSD et la longueur de la grille a clairement amélioré le courant et I_{ds} et le maximum de la transconductance G_{mmax} . Les résultats obtenus sont confirmés par ce qui est publié expérimentalement.

Mots Clés : Transistor à haute mobilité électronique (HEMT), AlGa_N/Ga_N, nitrure de gallium (Ga_N), nitrure d'Aluminium de gallium (AlGa_N), SILVACO, Atlas.

Study and simulation of AlGa_N/Ga_N transistor HEMT

Abstrat: This document deals with the simulation of output characteristics of High Electron Mobility Transistors AlGa_N/Ga_N HEMT with a view to modeling. An exhaustive study of Ga_N-based transistors is performed. Special importance is given to the interface charge due to the piezoelectric polarization. The two-dimensional simulation is done with the Silvaco Atlas software. The effect of the physical properties (the material: the interface charge and channel doping) and structural (gate length (L_g), the distance between the source and drain (LSD), the selection of substrate) were investigated. Increasing the interface charge improves the drain current I_{ds} in an interesting way because the carrier density of 2DEG are mainly responsible for the conduction. The channel must be less doped as possible that the velocity of the electrons is much larger than the doping of the semiconductor is low due to the reduction in the dispersion phenomenon. The choice of the substrate is also an important effect to increase the performance of the transistor. The impact of the reduction of the drain-source space LSD and the gate length clearly improved the current I_{ds} and the maximum of the transconductance G_{mmax} . The results are confirmed by what is published experimentally.

Key Words: High electron mobility transistor (HEMT), AlGa_N/Ga_N, Gallium Nitride (Ga_N), Gallium Alumium Nitride (AlGa_N), SILVACO, Atlas