

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DU GENIE ELECTRIQUE ET D' INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D' AUTOMATIQUE

Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie électrique

Spécialité : Génie Microélectronique

Présenté par

MOHAMMED ALLAF

Thème

Etude du comportement du transistor HEMT en HF.

Mémoire soutenu publiquement le ...13../...07../ 2017..... devant le jury composé de :

Monsieur, LAKHLEF AHCENE, Président

Monsieur, BENFDILA AREZKI, Encadreur

Monsieur, CHELLI TAKFARINAS, Examineur

Dédicaces

A mes chers parents

A ma fiançais

A ma famille

Et à ma belle famille

Je tiens à remercier toutes personnes que j'ai été amené à rencontrer au cours des années passées, pour leur sympathie, leur générosité, leur sincérité, et leur bonne humeur car ils ont tous contribué au bon déroulement de ce travail.

Remerciements

Ce travail n'aurait pas pu être mené à lieu, sans l'aide et le soutien de monsieur A. BENFDILA, je tiens à lui exprimer ma profonde reconnaissance pour tout ce qu'il a fait pour moi : pour son soutien et sa présence, pour ces précieux conseils et pour l'immense importance qu'il ma toujours accordé, merci monsieur.

Je tiens aussi à remercier monsieur A. LAKHELEF pour sa présence et son soutien et pour l'aide qu'il apporté à ce travail.

Je remercie également tous mes autres professeurs pour leurs patiences et pour leurs efforts.

Je ne peux tourner cette page son remercier l'être précieux qui a toujours été à mes cotés et qui ma toujours soutenu et encouragé d'aller toujours de l'avant M .mahiou katia.

Enfin, j'exprime ma gratitude et mon immense amour à mes chers et tendre parents pour leurs amour et leurs sacrifices sont limites afin de faire de moi ce que je suis aujourd'hui, alors merci, merci beaucoup je vous aime.

TABLE DES MATIERES

<i>Remerciements</i>	
<i>Dédicace</i>	
<i>table de matière</i>	
<i>liste des figures</i>	
<i>liste des tableau</i>	
<i>introduction générale</i>	1

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

I.	
introduction.....	3
I-1: Propriétés structurales:.....	3
a- La structure blende de zinc.....	3
b- La structure wurzite.....	4
I-2- Propriétés électroniques.....	6
I.2.1 - La polarisation spontanée.....	7
I.2.1- La polarisation piézoélectrique.....	7
I.2.2 La polarisation totale dans le GaN.....	9
I-3 IMPACT DE LA POLARISATION SUR L'HETEROSTRUCTURE AlGa _N /Ga _N	9
I- 3 -1 La polarisation spontanée et piézoélectrique.....	11
I- 3 -2 Calcul de la densité de charges due à la polarisation.....	14
I-3 -3 Calcul de la concentration n_s du 2-DEG.....	17
I- 4 PROCÉDES ET SUBSTRATS POUR LA CROISSANCE DU Ga _N	19
I-5 CROISSANCE ET DOPAGE DU Ga _N	21
I-6 LES DEFANTS DANS LE Ga _N	22
I- 6 -1 Défauts étendus dans le Ga _N hexagonal.....	22
I-6 -2 Défauts étendus dans le Ga _N blende de Zinc.....	22

I-6-3 Avantage du GaN cubique.....	23
I-7 APPLICATIONS.....	24
I-8 CONCLUSION.....	25

chapitre II: transistors

II-1.- Introduction.....	27
II-2.-Structure cristalline.....	27
II-3.Préparation du GaAs.....	27
II-3.1 Préparation de Substrat	27
II-3.2 La technique de Czochralski Encapsulation Liquide (LEC).....	28
• La Technique Horizontal de Bridgman (HB)	28
• Préparation des Couches Actives.....	28
• Techniques Epitaxiales	28
• Technique Epitaxiale en Phase Vapeur.....	29
• Technique Epitaxiale en Phase Liquide.....	29
II-4-Propriétés électriques	30
II-5.Avantages et inconvénients du GaAs.....	31
II-6:Transistor à Effet de Champ à Contact Schottky (MESFET).....	32
II-6.1:Structure et Description.....	32
II-6.2:Principe de fonctionnement.....	33
II-6.3:Contraintes et domaines d'utilisation.....	35
II.7 Les HEMTs.....	36
II-7.1:HEMTs a base de nitrure de gallium AlGa _N /Ga _N	37
II.7.1.1: Description de la structure d'un HEMT.....	37
II-7.1.2: Description des couches.....	37
II.7.2 Etude de L'hétérojonction AlGa _N /Ga _N	39
II.7.2.1: Hétérostructure AlGa _N /Ga _N	39
II.7.2.2: Formation et expression du 2DEG.....	41
II.8 Les caractéristiques électriques.....	44
II.8.1 Le courant drain-source Ids.....	45
II.8.2 La transconductance.....	45
II.8.3 La conductance de sortie.....	45

II.9:conclusion.....	46
----------------------	----

Chapitre III: Résultat et interprétation

III.1 Introduction.....	47
III.2 Présentation du logiciel de simulation SILVACO.....	47
III.2.1 ATLAS.....	48
III.2.2 Différents étapes de simulation.....	50
III.3 Le transistor à effet de champ Al _{0.28} Ga _{0.72} N/GaN HEMT.....	53
III.3.1 Description de la structure simulée.....	53
III.4 l'influence des propriétés du matériau.....	57
III.4.1 L'effet de la concentration d'interface n_s sur les caractéristiques du transistor Al _{0.28} Ga _{0.72} N/GaN HEMT.....	57
III.4.2 L'effet de dopage du canal (GaN) sur les caractéristiques du transistor Al _{0.28} Ga _{0.72} N/GaN HEMT.....	61
III.5 L'influence des paramètres technologique de l'AlGa _{0.28} N/GaN HEMT.....	64
III.5.2 L'effet de la longueur de la grille (L _g) sur les caractéristiques du transistor Al _{0.28} Ga _{0.72} N/GaN HEMT.....	64
III.5.3 L'effet de l'espace drain-source (L _{sd}) sur les caractéristiques du transistor Al _{0.28} Ga _{0.72} N/GaN HEMT.....	69
III.6 Résumé.....	72

Chapitre IV: La technologie GaN pour l'amplification de puissance et les architectures à haut rendement associées

IV.1 Introduction.....	73
IV.2 Le transistor HEMT GaN : brique de base pour l'amplification de puissance.....	74
IV.3 Les architectures à haut rendement.....	78
IV.3.1 Les architectures cartésiennes.....	80

IV.3.1.1 L'architecture Doherty.....	80
IV.3.1.1.1 Principe.....	80
IV.3.1.1.2 Utilisation d'une topologie asymétrique.....	86
IV.3.1.1.3 Utilisation d'une topologie multi-étages.....	88
IV.3.1.1.4 Contrôle adaptatif de la polarisation de grille de l'amplificateur auxiliaire.....	90
IV.3.1.1.5 Doherty numérique.....	90
IV.4 Conclusion.....	90

liste des figures

CHAPITRE I:

Figure I-1 : <i>Structure cristalline blende de zinc du GaN</i>	4
Figure I-2 : <i>Structure cristalline hexagonale du GaN</i>	4
Figure I-3 : <i>Schéma de la structure wurzite à face Ga et à face N</i>	5
Figure I-4 : <i>L'hétérostructure AlGa_xN/GaN</i>	10
Figure I-5 : <i>Schéma de la distribution des charges et diagramme énergétique de la bande de conduction de l'hétérostructure AlGa_xN/GaN</i>	11
Figure I-6: <i>sens des polarisations pour les faces Ga et N des HEMTs AlGa_xN/GaN Relaxé et sous contrainte</i>	12
Figure I-7: <i>L'hétérostructure AlGa_xN/ GaN à face Ga</i>	14
Figure I-8 : <i>Diagramme des densités de charges présentes à l'hétérojonction</i>	14
Figure I-9 : <i>Variation de la densité n_s en fonction du taux d'aluminium (y) pour différentes épaisseurs (d)</i>	14

chapitre II:

FIGURE II-1:- Maille cristalline de l'arséniure de gallium	27
Figure II.2: Vue en coupe du MESFET GaAs implanté auto-aligné	32
Figure II.3 : Structure idéalisée de MESFET GaAs en 3D	33
Figure II.4 : Caractéristiques typiques d'un transistor MESFET GaAs	35
Figure II. 5: Structure et différentes couches du HEMT AlGa _x N/GaN	37
Figure II.6: Diagramme d'énergie d'une hétérojonction: (a) les deux semi-conducteurs sont séparés par un espace infinitésimal (b) les deux semi-conducteurs sont raccordés	40
Figure II.7: Schéma de la structure AlGa _x N/GaN	42
Figure II.8: Diagramme énergétique de la bande de conduction du HEMT AlGa _x N/GaN	43

CHAPITRE III:

Figure III.1: Schéma synoptique des modules utilisés dans la simulation par TCAD SILVACO	49
Figure III.2: Définition des électrodes	51
Figure III.3: 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	54
Figure III.4: Une structure représentative d'un transistor HEMT AlGaN/GaN.	55
Figure III.5: Les caractéristiques courant de drain- tension de drain pour des tensions de grille V _g =-2,-1,0 Volt.	56
Figure III.6: la caractéristique de transfert DC et RF du transistor étudié pour V _{ds} =4.0Volt	57
Figure III.7: L'effet de la charge d'interface AlGaN/GaN sur les caractéristiques courant-drain-tension- drain (I _d -V _d) du transistor	59
Figure III.8: L'effet de la charge d'interface AlGaN/GaN sur la caractéristique courant-drain-tension- grille (I _{ds} -V _{gs}) du transistor.	60
Figure III.9: L'effet de la charge d'interface AlGaN/GaN sur la transconductance G _m (V _{gs}).	61
Figure III.10: L'effet du dopage du canal GaN sur les caractéristiques courant-drain - tension drain (I _{ds} -V _{ds}) du transistor.	62
Figure III.11: L'effet du dopage du canal GaN sur la caractéristique courant-drain- tension-grille (I _{ds} -V _{gs}) du transistor AlGaN/GaN HEMT.	63
Figure III.12: L'augmentation du maximum de la transconductance G _{mmax} en fonction du dopage du canal GaN du transistor AlGaN/GaN HEMT	64
Figure III.13: L'effet du type de substrat sur la caractéristique de transfert courant-drain- tension drain (I _{ds} -V _{ds}) du transistor	65
Figure III.14: 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}).....	67
Figure III.15: L'effet de la longueur de la grille sur la caractéristique de transfert (I _{ds} -V _{gs}) du transistor HEMT	68

Figure III.16: la variation de la transconductance en fonction de la tension de la grille a différents longueur de la grille.69

Figure III.17: La variation des caractéristiques courant-tension (I_{ds} - V_{ds}) en fonction de la tension de la grille a différents longueur de la grille 70

Figure III.18: la variation de la transconductance en fonction de la tension de la grille a différents longueur de la grille..... 71

CHAPITRE IV:

Figure IV-1 : vue en coupe simplifiée de la structure de base d'un HEMT AlGaIn/GaN ..74

Figure IV-2 : évolution des standards de communication et des solutions d'amplification proposées [Wang 14]. Depuis les années 90 et l'apparition sur le marché des systèmes GSM (2G) utilisant la modulation GMSK et des signaux à bande étroite et à enveloppe constante, jusqu'à l'actuelle LTEadvanced (4G), utilisant la technique OFDM et des formats de modulation aussi variés que QPSK, 16QAM ou 64QAM et assurant des bandes passantes jusqu'à 100MHz 79

Figure IV-3 : principe de variation de la charge active utilisé dans la topologie Doherty. Le second transistor produit un courant à travers Z_L , induisant une augmentation de l'impédance Z_1' . La charge Z_1 vue par le premier transistor au fondamental derrière l'inverseur d'impédance diminue. 81

Figure IV-4 : topologie générale de l'architecture Doherty82

Figure IV-5 : représentation des courants et tensions au fondamental sur la charge RL en sortie de l'amplificateur Doherty84

Figure IV-6 : représentation du cycle de charge à fort et faible niveaux de l'amplificateur principal (polarisé en classe B). L'excursion de sortie maximale ($V_{DSmax}/2=V_{DS0}$) en tension est obtenue (sur R_{opt}) à la moitié de l'excursion maximale d'entrée ($V_{in}=V_{max}/2$). A partir de ce point, la mise en conduction de l'auxiliaire provoque alors une diminution de la charge vue par le principal (jusqu'à $R_{opt}=40\%$), assurant le maintien de l'excursion maximale en tension du principal et donc son fonctionnement à rendement maximal 85

Figure IV-7 : rendement de l'amplificateur Doherty utilisant deux transistors identiques (classe B et C), comparativement à la classe B classique86

Figure IV-8 : utilisation d'une topologie asymétrique afin de disposer d'un amplificateur auxiliaire de taille N-1 fois supérieure87

Figure IV-9 : rendement de l'amplificateur Doherty utilisant une topologie asymétrique N voies88

Figure IV10 : structure générale de la topologie Doherty multi-étages.....89

liste des tableaux

chapitre I:

Tableau I-1 : *Relevé des valeurs des paramètres de maille du h-GaN à 300°k*

Tableau I-2 : *Comparaison des propriétés de différents s/c dont le GaN*

Tableau I-3 : *Liste des paramètres usuellement utilisés pour le (h-GaN) –AlN et InN.*

Tableau I-4: *Différents substrats utilisés pour le GaN*

Tableau I-6 : *Caractéristiques de DEL à différentes couleurs*

chapitre II:

Tableau II-1 : Propriétés du GaAs à température ambiante (300 K)

Tableau II-2: Propriété physique de GaAs

chapitre III:

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

Introduction generale

ces dernières années, le transistor HEMT (High Electron Mobility Transistors) à base d'hétérostructure AlGaN/GaN, fait l'objet d'intenses recherches et investigations. Celles-ci ont montré l'efficacité de ce composant pour des applications hyperfréquences nécessitant des tensions et des puissances élevées. De part ses mobilités électroniques élevées et un fonctionnement aux hautes températures exigé pour certains dispositifs, les transistors HEMTs laissent espérer des applications aussi diverses tels que les émetteurs-récepteurs radar HF, télécommunications terrestres, communications par satellite. Les performances de ces composants dépendent entre autre de la bonne qualité de la couche active constituée d'une phase hexagonale de type wurtzite qui présente un champ électrique interne important résultant des propriétés de polarisations spontanée et piézoélectrique du matériau même pour des structures non dopées, permettant ainsi de constituer le gaz bidimensionnel (2-DEG) induit par les effets de polarisation nécessaire au fonctionnement du composant. Cependant, cette structure est limitée par une combinaison des mécanismes tels que les dislocations, la contrainte résiduelle et notamment le champ électrique interne qui interagit aussi avec les nombreux défauts structuraux en volume et en surface du matériau dégradant les performances électriques du transistor.

C'est dans ce contexte que nous nous intéresserons à la caractérisation des propriétés électriques locales de la couche active afin de quantifier l'effet des défauts en surface ou interfaces dans le GaN et dans les couches AlGaN. Pour cela, des caractéristiques électriques (capacité et conductance) de la Schottky grille source du HEMT AlGaN/GaN ont été étudiées à différentes fréquences et températures pour différentes tensions de grille. L'analyse des mesures réalisées sur les HEMTs AlGaN / GaN obtenu par MBE sur substrat silicium, permet de modéliser ce type de structure.

Ce mémoire comporte quatre chapitres, le premier étant destiné à la description du nitrure de Gallium, matériau de base servant à cette étude, et où on a abordé ses propriétés structurales, électriques et électroniques, ainsi que les procédés de croissance et dopage. Un intérêt particulier a été porté à l'impact de telles propriétés sur les hétérostructure à base de nitrure et particulièrement sur les hétérostructures AlGaN/GaN.

Le deuxième chapitre sera consacré à la présentation des transistors MESFET, HEMTs avec un aperçu physique et géométrique de leurs structures, ensuite viendra l'analyse des caractéristiques électriques, spécialement les courbes $I(V)$. Par ailleurs, on mènera aussi une étude sur l'influence de la variation de quelques paramètres tels que le dopage, ou les grandeurs géométriques du transistor sur la concentration n_s du 2-DEG et la tension de seuil V_{th} .

Dans le chapitre trois nous allons présenter les résultats simulés par le logiciel Atlas-Silvaco. Les effets dus 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 étudiés. 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.

Dans le chapitre quatre une description succincte du transistor à effet de champ HEMT et la technologie à base de nitrure de gallium (GaN) dans le contexte de l'amplification de puissance est présentée. La présentation de trois des principales techniques relevées dans la littérature relative à l'amplification de puissance linéaire à haut rendement des signaux modulés à enveloppe variable est faite : la topologie Doherty, l'architecture EER (*envelope elimination and restoration*) et enfin la technique d'ET (*envelope tracking*)

Chapitre I

"Semi-conducteurs III-V (les nitrures de gallium)"

I. introduction

Le nitrure de gallium GaN est un matériau sur lequel les recherches ont commencé dans les années 60. Cependant le développement des nitrures a été limité par la mauvaise qualité du matériau obtenu et par la difficulté du dopage (p). Néanmoins avec l'évolution des recherches, on arrive aujourd'hui à obtenir un GaN de bonne qualité ainsi qu'une mise au point d'un dopage type p. Ces réalisations ont fait du nitrure de gallium l'axe de recherche principal dans plusieurs domaines, optoélectronique et micro-ondes. Le GaN a l'avantage d'avoir une bande interdite directe et large de 3,4 eV à 300K, de plus, par le fait de sa structure cristalline wurtzite et sa forte ionicité, il exhibe une variété de propriétés qui n'est pas présente (ou d'une façon moins importante) dans les semiconducteurs conventionnels. L'élément principal est l'effet de la polarisation spontanée et piézoélectrique dont plusieurs études expérimentales et théoriques ont révélé son importance dans la conception et l'analyse des composants à base d'hétérostructures de nitrures.

L'intérêt dans ce chapitre sera donc de reporter un bref résumé sur les principales propriétés connues sur le GaN.

I.1 Propriétés structurales:

Le GaN se cristallise sous deux formes différentes, la structure hexagonale ou wurzite (h-GaN), et la structure cubique (blende de zinc: c-GaN).

a. La structure blende de zinc

Cette structure est formée de deux sous réseaux cubiques à faces centrées comprenant chacun un type d'atome décalés d'un quart par rapport à la diagonale de la maille. Cette structure est thermodynamiquement instable et est moins exploitée par rapport à l'autre type, la valeur de sa maille élémentaire est de $4.511 \text{ }_0 a = A_0$ à 300K

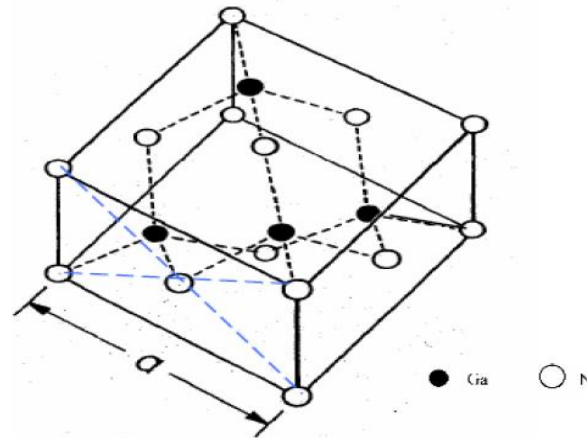


Figure I.1 : Structure cristalline blende de zinc du GaN

b. La structure wurzite

Celle-ci par contre est constituée de deux réseaux hexagonaux, l'un avec les atomes de gallium et l'autre avec les atomes d'azote, interpénétrés et décalés entre eux suivant l'axe c de $5/8$ de la maille élémentaire. (Figure I-2)

La structure wurzite possède deux paramètres principaux, (a) le paramètre de maille latérale et (c) le paramètre de maille verticale. Leurs valeurs ainsi que celles d'autres semiconducteurs sont portées sur le tableau I-1.

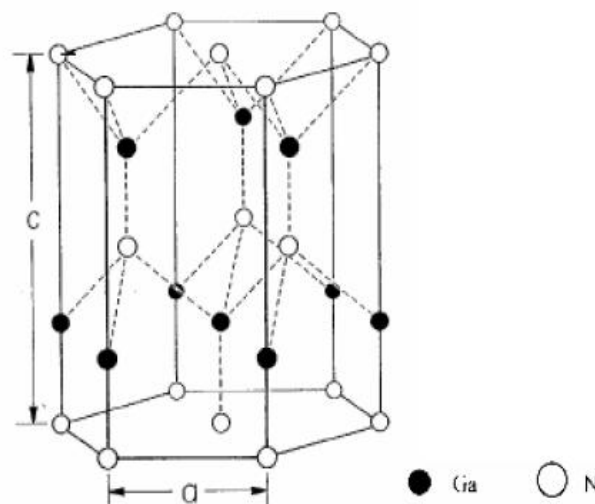


Figure I.2 : Structure cristalline hexagonale du GaN

<i>Matériaux</i>	<i>AlN</i>	<i>GaN</i>	<i>InN</i>
$a_0 (Å)$	3.112	3.189	3.540
$c_0 (Å)$	4.982	5.185	5.705

Tableau I.1 : Relevé des valeurs des paramètres de maille du h-GaN à 300°k

La croissance de la structure hexagonal du GaN se fait sur l'axe de croissance $[0001]$ ou $[000 \bar{1}]$, les atomes sont rangés en deux couches interpénétrées, décalées et formant deux espaces hexagonaux, l'un avec des cations c'est à dire des atomes de gallium (Ga) et l'autre par des anions c'est-à-dire les atomes d'azote (N).

Si l'axe de polarité de la surface est $[0001]$ le sommet de la structure sera formé uniquement par des atomes de gallium, on l'appelle alors à face Ga, par contre l'axe de polarité $[000 \bar{1}]$ contient uniquement des atomes d'azote à la surface, on l'appelle alors à face N (figure I-3).

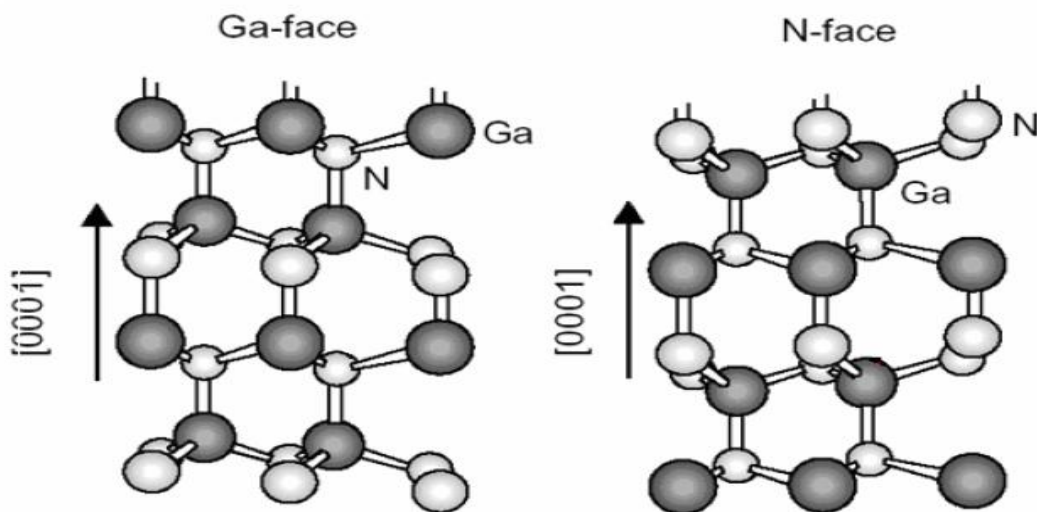


Figure I.3 : Schéma de la structure wurzite à face Ga et à face N

L'effet des deux surfaces (face N) et (face Ga) du GaN n'est pas équivalent, et elles sont très différentes chimiquement et physiquement. La méthode de croissance est un facteur déterminant pour le type de face à obtenir, une croissance par MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition) sur saphir est toujours à face Ga alors que par MBE (Molecular Beam Epitaxy) est soit à face Ga ou à face N, selon l'existence ou pas de la couche AlN de nucléation. De plus et grâce à leur polarité elles jouent un rôle important dans la formation et la position du gaz bidimensionnel existant dans les hétérostructures à base de nitrures.

I.2 Propriétés électroniques

Les deux polytypes du GaN présentent comme la plupart des matériaux III-V, une bande interdite directe au point (Γ) centre de la première zone de Brillouin. La largeur de cette bande a été estimée à 3.4 eV à température ambiante.

Le tableau qui suit résume quelques propriétés du GaN ainsi que d'autres semiconducteurs candidats pour les applications électroniques.

	Si	GaAs	SiC	GaN
Energie du gap à 300°k (eV)	1.11	1.43	3.2	3.4
Champ de claquage E V/cm	6.5×10^5	6.5×10^5	3.5×10^5	3.5×10^5
Vitesse de saturation cm/s	10×10^7	2.0×10^7	2.0×10^7	2.5×10^7
Mobilité des électrons cm^2/Vs	1350	6000	800	1600
Conductivité thermique W/cmK	1.5	0.46	3.5	1.7

Tableau I.2 : Comparaison des propriétés de différents s/c dont le GaN

1.2.1 La polarisation spontanée

Dans la structure du GaN hexagonal, il apparaît une succession de dipôles orientés dans la direction [0001]. Ces dipôles sont créés du fait des relations de voisinages entre les atomes d'azote et de gallium dans la structure cristalline. En effet on a un atome de gallium pour quatre d'azote, dont trois sont dans le même plan cristallographique et perpendiculairement à l'axe C. On en déduit l'existence d'une polarisation spontanée, qui est là en l'absence de toute influence externe, contrainte ou champ électrique, contrairement à la structure blende zinc où la polarisation spontanée se perd à cause de la forte symétrie cristalline sur l'axe c. Le sens de cette polarisation dépend de la face du GaN considérée.

La valeur numérique de la polarisation spontanée du GaN ainsi que quelques éléments III-V est reportée sur le tableau I-3.

1.2.1 La polarisation piézoélectrique

La piézoélectricité est l'aptitude de certains matériaux à produire un dipôle électrique proportionnel à la contrainte mécanique (traction ou compression) qui les déforme. En appliquant une pression sur les cristaux des nitrures, on oblige la structure à s'accommoder aux contraintes et ceci par une variation de ses paramètres de maille, soit a et c . Il en résulte une variation de la polarisation qui n'est pas dû à la variation de la polarisation spontanée, puisqu'elle existe toujours dans le cristal et ne dépend d'aucun effet externe, mais à un autre type qu'on nommera la polarisation piézoélectrique. La valeur de cette polarisation sera calculée à partir de la formule suivante:

$$P_{PZ} = 2 \left(\frac{a(0) - a(m)}{a(m)} \right) * \left(e_{31}(m) - \frac{e_{33}(m)C_{13}(m)}{C_{33}(m)} \right) \quad (1.1)$$

ou: e_{31} et e_{33} sont les constantes piézoélectriques
 c_{13} et c_{33} sont les constantes élastique

$a(0)$ et $a(m)$ sont les constantes de maille latérale à l'équilibre et sous contrainte.

Les valeurs des constantes usuellement utilisées sont relevées sur le tableau I-3.

D'après les valeurs des paramètres du tableau I-3, on remarque que l'entité

$$\left(e_{31}(m) - \frac{e_{33}(m)C_{13}(m)}{C_{33}(m)} \right)$$

est toujours négative d'où on déduit que la polarisation piézoélectrique des groupes III-nitrures est toujours négative pour les structures sous contrainte tractive ($a > a_0$) et positive pour celles sous contrainte compressive ($a < a_0$) alors que la polarisation spontanée reste toujours négative.

<i>Matériaux</i>	<i>AlN</i>	<i>GaN</i>	<i>InN</i>
$a_0 (A^\circ)$	3.112	3.189	3.540
$c_0 (A^\circ)$	4.982	5.185	5.705
c_0 / a_0	1.6010	1.6259	1.6116
$P_{SP} (C/m^2)$	-0.081	-0.029	-0.032
$e_{31} (C/m^2)$	-0.60	-0.49	-0.57
$e_{33} (C/m^2)$	1.46	0.73	0.97
$C_{13} (Gpa)$	108	103	92
$C_{33} (Gpa)$	373	405	224

Tableau I.3 : Liste des paramètres usuellement utilisés pour le (h-GaN) –AlN et InN.

I.2.2 La polarisation totale dans le GaN :

La polarisation totale du GaN est l'effet des deux polarisations générées dans le cristal et sera égale à :

$$P(\text{GaN}) = P_{SP}(\text{GaN}) + P_{PZ}(\text{GaN}) \quad (1.2)$$

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 (ρ) tel que :

$$\nabla \cdot P(\text{GaN}) = \nabla \cdot (P_{SP}(\text{GaN}) + P_{PZ}(\text{GaN})) = -\rho_{\text{surf}}$$

(1.3)

I.3 IMPACT DE LA POLARISATION SUR L'HÉTÉROSTRUCTURE AlGaN/GaN

Dans le cas de l'hétérostructure AlGaN/GaN (figure I-4) :

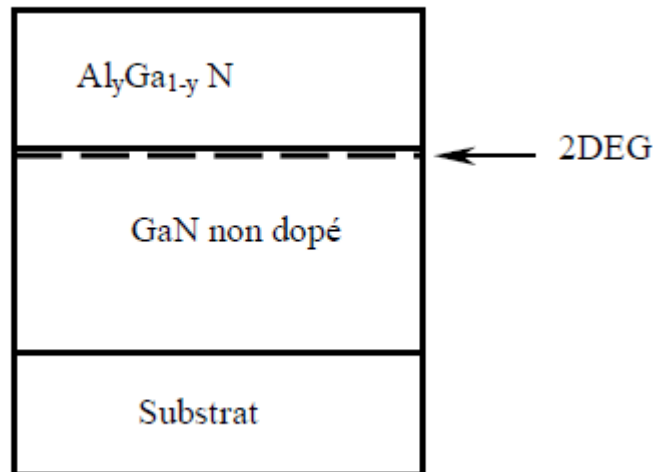


Figure I-4 : L'hétérostructure AlGaN/GaN

Les deux semi-conducteurs sont à gap différents, leur juxtaposition impose, à l'équilibre thermodynamique, l'alignement des deux niveaux de Fermi ce qui cause une courbure des bandes de conduction et de valence. La bande de conduction du GaN se trouve alors très proche du niveau de Fermi à l'interface formant ainsi un puits de potentiel triangulaire entre $F E$ et $c E$ (figure I-5) où les électrons provenant de l'AlGaN (grand gap, petite affinité électronique) sont confinés dans le puits dans des niveaux d'énergie distincts. Selon la structure, on peut avoir un ou plusieurs niveaux d'énergie E_i . Mais en pratique, seuls les deux premiers niveaux sont quasi pleins à température ambiante. Avec l'hétérointerface d'un côté et le potentiel de barrière d'un autre côté, les électrons sont libres seulement dans le plan de l'interface. La discontinuité entre les bandes énergétiques est donc la cause de la formation du gaz bidimensionnel 2-DEG mais pas l'origine des fortes concentrations évaluées, ceci ne peut être dû qu'à la densité de charges positives créée par la polarisation à l'interface des deux matériaux.

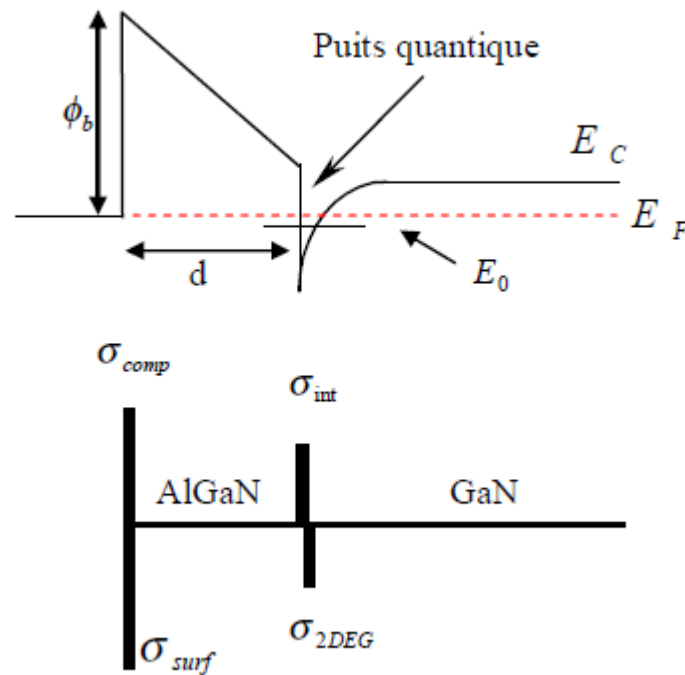


Figure I.5 : Schéma de la distribution des charges et diagramme énergétique de la bande de conduction de l'hétérostructure AlGaN/GaN

I. 3 .1 La polarisation spontanée et piézoélectrique

A cause des deux polarisations distinctes, et qu'on ne peut observer dans les autres hétérostructures (III-V) conventionnelles, des valeurs de la concentration du 2-DEG de l'ordre de 10^{13} cm^{-2} ou plus ont été obtenues pour des structures non dopée. L'effet de la polarisation est très distinct sur la caractéristique du composant et ceci selon la nature de la surface formant l'hétérojonction. Tel qu'on peut le voir ci- dessous, le sens de la polarisation spontanée du GaN est lié au type de face auquel on a affaire. On peut voir sur la figure I-6, que la polarisation spontanée pointe vers le substrat pour la face-Ga et dans le sens contraire pour la face-N.

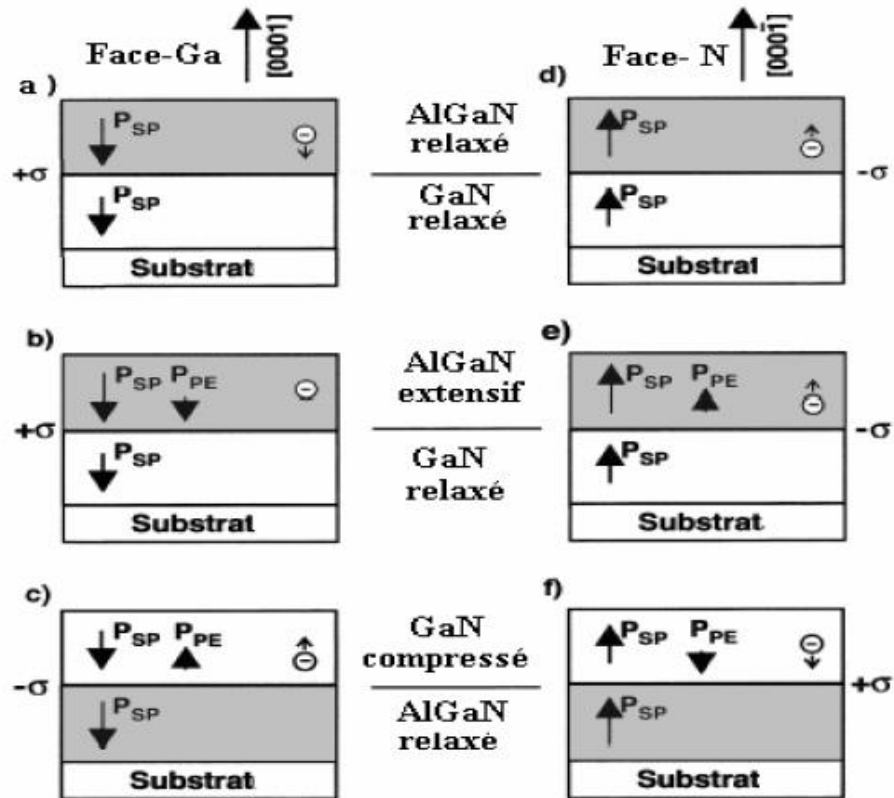


Figure I.6: sens des polarisations pour les faces Ga et N des HEMTs AlGaN/GaN Relaxé et sous contrainte

La polarisation piézoélectrique change quant à elle de sens négativement ou positivement selon les contraintes. On déduit la polarisation totale de la couche de GaN ou celle de l' AlGaN comme étant la somme des polarisations spontanée et piézoélectrique :

$$P = P_{pz} + P_{sp}$$

avec :

$$P(Al_y Ga_{1-y}N) = P_{sp}(Al_y Ga_{1-y}N) + P_{pz}(Al_y Ga_{1-y}N)$$

$$P(GaN) = P_{sp}(GaN) + P_{pz}(GaN)$$

D'où

$$P = (P_{sp}(GaN) + P_{sp}(AlGaN)) + (P_{pz}(GaN) + P_{pz}(AlGaN)) \quad (1.4)$$

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 comme on peut le voir sur la figure I-6 pour les cas (c) et (f).

A titre de comparaison pour les différents cas précédents, on remarque que la densité de charge formée à l'interface de la jonction AlGaN /GaN dans les cas (a) et (b) est positive, ce qui aura pour conséquence d'attirer les charges négatives qui sont les électrons, alors que dans les cas (d) et (e) la densité de charges est négative et par conséquent, il y a formation d'un gaz de trous (2-DHG).

Pour les cas (c) et (f) où la séquence de la structure a été changée, puisqu'on utilise du GaN contraint sur du AlGaN relaxé, on peut voir que pour la face Ga il y a désormais formation d'un gaz de trous alors que pour la face N c'est un gaz d'électrons. Le siège du canal est, pour tous les cas présentés, le matériau à faible gap (GaN).

On déduit de cette analyse que les conditions optimales pour avoir une meilleure concentration du 2-DEG sont un GaN à face Ga complètement relaxé sur lequel on fait croître sous contrainte extensive (tractive) la couche AlGaN (cas b).

I- 3 -2 Calcul de la densité de charges due à la polarisation :

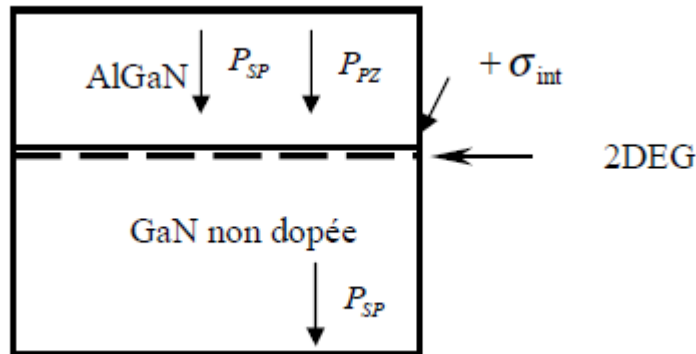
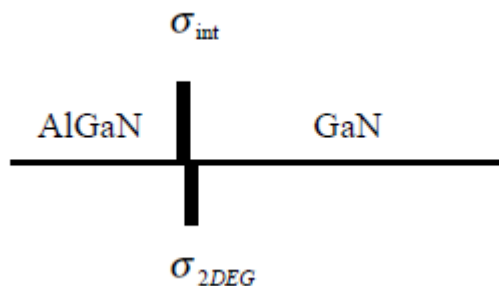


Figure I.7: L'hétérostructure AlGaIn/ GaN à face Ga

Par analogie avec ce qui a précédé (Eq I-3) 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, son expression sera donnée par :

$$\sigma_{int} = (P_{SP} + P_{PZ})_{couche1} - (P_{SP} + P_{PZ})_{couche2} \quad (I.5)$$

La différence des polarisations piézoélectrique et spontanée entre les couches de l'AlGaIn/GaN détermine la densité de charges fixes à l'interface entre les deux matériaux, cette différence de polarisation induit une charge positive (figure I-8), 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.



FigureI-8 : 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 :

$$\sigma = -\nabla \cdot P$$

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:

$$\sigma_{\text{int}} = P_{\text{tot}, \text{couche1}} - P_{\text{tot}, \text{couche2}}$$

$$\sigma_{\text{int}}(y) = [P_{SP} + P_{PZ}]_{\text{couche1}} - [P_{SP} + P_{PZ}]_{\text{couche2}}$$

En respectant l'ordre de croissance on obtient :

$$\sigma_{\text{int}}(y) = [P_{sp}(GaN) + P_{pz}(GaN)] - [P_{sp}(Al_y Ga_{1-y}N) + P_{pz}(Al_y Ga_{1-y}N)]$$

La polarisation spontanée de la couche AlGaN est :

$$P_{SP}(y) = (-0.052y - 0.029) \quad C/m^2$$

La polarisation piézoélectrique de la couche AlGaN est :

$$P_{PZ}(Al_y Ga_{1-y}N) = 2 \left(\frac{a(0) - a(y)}{a(y)} \right) * \left(e_{31}(y) - \frac{e_{33}(y)C_{13}(y)}{C_{33}(y)} \right)$$

où les paramètres de maille et les coefficients de polarisation en fonction de la concentration d'aluminium (y) sont donnés ci dessous :

- La constante de maille :

$$a(y) = (-0.077y + 3.189) * 10^{-10} m$$

- Les constantes d'élasticités :

$$C_{13}(y) = (5y - 103) \text{ GPa}$$

$$C_{33}(y) = (-32y - 405) \text{ GPa}$$

- Les constantes piézoélectriques :

$$e_{31}(y) = (-0.11y - 0.49) \text{ C/m}^2$$

$$e_{33}(y) = (0.73y - 0.73) \text{ C/m}^2$$

Puisqu'on assume que le GaN est totalement relaxé (conditions optimales pour une meilleure concentration du 2-DEG) donc il ne possède pas de polarisation piézo-électrique de cela on déduit $P(\text{GaN}) = 0$

La polarisation spontanée du GaN est :

$$P_{sp}(\text{GaN}) = -0.029 \text{ C/m}^2$$

L'expression finale de $\sigma_{int}(y)$ sera :

$$\sigma_{int}(y) = P_{sp}(\text{GaN}) - P_{sp}(\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}) - 2 \left(\frac{a(0) - a(y)}{a(y)} \right) * \left(e_{31}(y) - \frac{e_{33}(y)c_{13}(y)}{c_{33}(y)} \right)$$

I-3 -3 Calcul de la concentration n_s du 2-DEG :

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 (Figure I-8).

La concentration n des électrons attirés par cette densité de charge pour une structure AlGaN/GaN sera donnée par l'expression :

$$n_{s0} = \sigma_{\text{int}}(y) / q - \left[\varepsilon_0 \varepsilon(y) / (d) q^2 \right] (q\phi_b(y) + E_F(y) - \Delta E_c(y))$$

où :

$\sigma_{\text{int}}(y)$ est donnée par

La permittivité du vide ε_0 est égale à $8.854.10^{-14}$ (F.cm⁻¹) et celle du AlGaN $\varepsilon(y)$ qui est sous

la forme:

$$\varepsilon(y) = 9.5 - 0.5y \quad (\text{Cm}^{-1}\text{V}^{-1})$$

La hauteur de la barrière du AlGaN $\phi_b(y)$ est :

$$\phi_b(y) = 0.84 + 1.3y \quad (\text{eV})$$

La discontinuité entre les couches du GaN et AlGaN est :

$$\Delta E_c = 0.7(E_g(y) - E_g(0)) \quad (\text{eV})$$

où E_g , la largeur du gap de l'AlGaN est donnée par

$$E_g(y) = 6.13y + 3.42(1 - y) - y(1 - y) \quad (\text{eV})$$

E_F est approximé par [4] :

$$E_F(y) = E_0(y) + E_1(y) + \frac{\hbar^2}{4\pi m^*(y)} ns(y) \quad (\text{eV})$$

E_0 et E_1 sont les niveaux d'énergie du puits quantique formé entre les deux semiconducteurs et sont exprimés par :

$$E_0(y) = \gamma_0 ns^{2/3} (\text{eV}) \quad \text{et} \quad E_1(y) = \gamma_1 ns^{2/3} (\text{eV})$$

avec:

$$\gamma_0 = 2.123 \times 10^{-12} \quad \text{et} \quad \gamma_1 = 3.734 \times 10^{-12}$$

En utilisant les équations précédentes, on pourra calculer la concentration des électrons en fonction de la concentration (y) de l'aluminium pour différentes épaisseurs de la couche AlGaN (figure I-9). Cette courbe montre la dépendance du 2-DEG 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 AlGaN varie. De plus en faisant varier l'épaisseur de la couche AlGaN pour deux valeurs, soit d=10nm et d=30nm, comme on le voit sur la figure I-9, on constate que pour un taux d'aluminium de y=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 AlGaN augmente

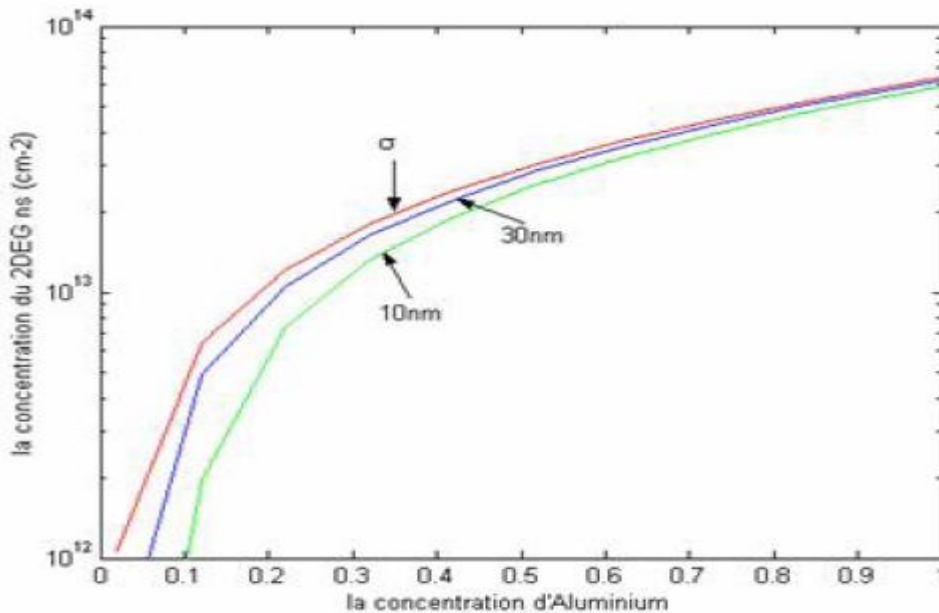


Figure I-9 : Variation de la densité n_s en fonction du taux d'aluminium (y) pour différentes épaisseurs (d)

I- 4 PROCEDES ET SUBSTRATS POUR LA CROISSANCE DU GaN :

A l'inverse des semi-conducteurs connus tels que le Si ou le GaAs, il n'existe pas de substrat de GaN monocristallin massif dans le commerce, quoique certains d'entre eux ont été élaborés avec succès sous haute pression, mais le produit disponible n'est pas très grand par rapport à la durée de croissance (100mm pour 200h de croissance) ceci oblige l'utilisation de substrats différents du GaN pour un dépôt de couches sur de grandes surfaces, ce qui rajoute un problème d'hétéroépitaxie puisqu'il n'y a pas de substrat en accord de maille avec le GaN, de plus le type de GaN obtenu est étroitement lié au substrat de départ et les conditions de croissance restent primordiales pour favoriser l'une ou l'autre des phases, cubique ou hexagonale

La plupart des couches de GaN élaborées sont déposées sur substrat saphir (Al_2O_3). Malgré les grandes différences des paramètres de maille et de dilatation thermique (14%) en plus d'une faible conductivité thermique, il a l'avantage d'avoir une grande stabilité en température et est disponible à un prix abordable. En revanche pour le 6H-SiC, le développement de la croissance du GaN sur ce substrat ne s'est faite que récemment alors qu'il présente les paramètres de maille et de coefficient de dilatation thermique les plus proches de ceux du nitrure de gallium (3.5%), mais il reste qu'il n'existe pas de technique de gravure permettant l'obtention d'un état de surface approprié à l'hétéroépitaxie du GaN et ce substrat reste encore très coûteux.

De nos jours, ce sont les substrats silicium qui sont très attractifs parce qu'ils présentent une bonne morphologie de surface, leur technologie est plus développée, ont un prix abordable par rapport au saphir et au SiC et de plus ils permettent l'intégration des dispositifs à base de GaN dans la microélectronique. L'inconvénient majeur est que les couches de GaN élaborées sur Si présentent une concentration de défauts importante du fait des différences de paramètres de maille (17%) et de coefficient de dilatation thermique trop importantes.

Matériau	structure cristalline
<u>Substrat pour h-GaN</u>	
Saphir	hexagonal
Si (111) (100)	cubique
GaAs (111) (100)	cubique
AlN (couche tampon)	wurtzite
ZnO	wurtzite
6HSiC	wurtzite
<u>Substrat pour e-GaN</u>	
3CSiC	cubique
Si (100)	cubique
GaAs (100)	cubique
MgO	cubique

Tableau I-4: Différents substrats utilisés pour le GaN

I-5 CROISSANCE ET DOPAGE DU GaN :

Les premiers films de GaN ont été obtenus par épitaxie en phase vapeur aux hydrures sur substrat saphir. Cette méthode présente l'avantage de donner des vitesses de croissance très grandes, ce qui a permis d'obtenir des films très épais, mais leur qualité était moindre que ceux obtenus par les nouvelles méthodes tel que MOVPE (Metal Organic Vapor Phase Epitaxy) et la MBE(moléculaire beam épitaxy) qui présente l'avantage de permettre un contrôle de la croissance et des épaisseurs des couches épitaxiées, de plus, les faibles températures de croissances autorisées permettent l'obtention des couches de GaN cubique, reste que les vitesses de croissances sont très lentes par rapport à la MOVPE .Le dopage de type n du GaN est le plus souvent réalisé avec du silicium ou du germanium, leur solubilité est meilleure, de l'ordre de 10^{20} cm^{-3} pour le Si, de plus leurs concentrations sont plus facilement contrôlables que celle de l'oxygène.

Pour ce qui est du dopage p du GaN il est nettement moins développé que le dopage de type n, il est beaucoup plus difficile à réaliser, comme cela est souvent le cas dans les matériaux à large gap. L'accepteur le plus utilisé est le magnésium. Néanmoins, le GaN non intentionnellement dopé présente un fort résiduel de type (n) de l'ordre de 10^{16} cm^{-3} dans le meilleur des cas. L'origine de ce dopage n'est toujours pas déterminée, mais il est fréquemment attribué aux lacunes d'azote issues des étapes de la croissance.

I-6 LES DEFAUTS DANS LE GaN :

Le GaN étant relaxé lors de l'épitaxie. Cette relaxation induit une forte concentration de dislocations et de fautes d'empilement dans les couches. En plus de l'utilisation de substrats fortement désaccordés, la différence de dilatation entre le substrat et le GaN, donne lieu à une contrainte résiduelle lors du refroidissement des échantillons de la température de dépôt à l'ambiante. Cette contrainte est en partie relaxée par la propagation des dislocations. De tout ceci il en résulte que même les couches de GaN de bonne qualité contiennent une très forte concentration de défauts étendus comparativement aux autres semiconducteurs III-V tels que le GaAs ou InP. A cause de cette densité de défauts, la durée de vie des porteurs est nécessairement réduite et les caractéristiques des dispositifs ne sont plus optimales.

I- 6 -1 Défauts étendus dans le GaN hexagonal :

Les clichés de microscopie électronique en transmission (TEM) révèlent, dans les couches de GaN hexagonal, un important réseau de dislocations vis se propageant parallèlement à la direction de croissance. Dans le GaN épitaxié sur saphir la densité des dislocations est de l'ordre de 10^{10} cm^{-2} (et 10^8 cm^{-2} dans les meilleurs des cas). Il a été remarqué que leur dispersion latérale est du même ordre de grandeur que les largeurs des régions actives des composants. Les zones actives sont donc nécessairement traversées par une ou plusieurs dislocations. Sur substrat 6HSiC, la concentration de ces dislocations semble plus faible, (probablement du fait du meilleur accord de maille) mais elle reste assez importante

I-6 -2 Défauts étendus dans le GaN blende de Zinc:

Les images TEM de GaN cubique présentent de nombreux défauts planaires à l'interface entre c-GaN et le substrat, que ce dernier soit GaAs, 3C SiC ou MgO. Ces défauts se propagent suivant les directions (111) du nitrure de gallium. L'intersection de deux de ces défauts peut les amener à s'annihiler. Par conséquent, la qualité cristalline du GaN cubique est améliorée loin du substrat. Notons que toute rugosité du substrat induit une zone cristalline défectueuse dans le GaN où la formation d'inclusions hexagonales est favorisée.

I-6-3 Avantage du GaN cubique :

Si le développement du GaN à phase cubique est resté modéré par rapport au GaN hexagonal, (retard principalement dû à la métastabilité de cette phase, et qui rend difficile l'obtention d'un matériau de bonne qualité sans inclusions de phase hexagonale), l'utilisation de la phase cubique devrait présenter certains avantages pour la réalisation et le fonctionnement des composants. En effet, la propagation des dislocations est moins efficace dans les structures cubiques d'orientation $\langle 100 \rangle$, puisqu'elles peuvent interagir et s'annihiler à leur intersection. De plus, les propriétés de transport électronique pourraient être améliorées, puisque, les masses effectives des porteurs de charge sont plus faibles dans le GaN cubique on atteint des mobilités supérieures à celles atteintes dans la phase hexagonale.

Pour la réalisation de diodes émettrices de lumière, le c-GaN bénéficie d'une bande interdite moins large que celle du h-GaN. Il serait donc possible d'atteindre les longueurs d'onde visibles en utilisant les alliages InGaN avec un plus faible pourcentage d'Indium dans le système cubique. Cet élément constitue un avantage par rapport au système hexagonal car l'indium est difficile à incorporer en grande quantité sans dégrader la qualité du matériau.

De plus, l'absence d'effets piézoélectriques (dont le GaN hexagonal est le siège) dans les couches cubiques sur substrats (100) permet d'obtenir un meilleur effet de confinement dans les structures quantiques.

Enfin, le cristal cubique épitaxié sur substrat (100) se clive plus aisément, ce qui facilite la réalisation de cavités laser.

I-7 APPLICATIONS :

Nul ne peut contester que jusqu'à ce jour que c'est la phase hexagonale du GaN qui est la responsable de toutes les performances atteintes par les dispositifs à base de ce matériau et ce malgré les avantages que peut présenter la phase cubique. En effet l'avantage du GaN à avoir un gap de 3.4 eV (ce qui correspond à une longueur d'onde de 365 nm en ultra violet) est très exploité en optoélectronique. Nous citons son utilisation dans les LEDs blanches ou couleurs à simples ou doubles hétérostructures, pour les LEDs à structure SQW ou MQW (puits quantique simple ou multiple) mais aussi dans les diodes lasers, les détecteurs ultra violet, les photoconducteurs et photodiode Schottky ; p-i-n ; MSM. On cite dans le tableau qui suit les performances de quelques DEL à base de nitrures, comparativement à celles obtenues dans d'autres matériaux.

<i>Matériau</i>	<i>Longueur d'onde d'émission</i>	<i>Intensité lumineuse</i>	<i>Puissance émise</i>	<i>Rendement quantique externe</i>
Rouge GaAlAs	660 nm	1790 mCd	4885 μ W	12.83 %
Vert GaP	555 nm	63 mCd	30 μ W	0.07%
Vert InGaN	500 nm	2000 mCd	1000 μ W	2.01%
Bleu SiC	470 nm	9 mCd	11 μ W	0.02%
Bleu InGaN	450 nm	2500 mCd	3000 μ W	11 %

Tableau I-6 : *Caractéristiques de DEL à différentes couleurs*

Dans le domaine des hyperfréquences, on le retrouve dans les transistors à haute mobilité hémis, où les valeurs de la densité d'électrons (ns) sont élevées par rapport aux autres hémis tel qu'on peut le voir sur le tableau ci-dessous:

<i>Hétérojonction (barrière/canal)</i>	ΔE_c eV	ns $10^{12} cm^{-2}$
$Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs$	0.22	1.5
$Al_{0.25}Ga_{0.75}As/In_{0.2}Ga_{0.8}As$	0.36	3
$In_{0.52}Al_{0.48}As/In_{0.53}Ga_{0.47}As$	0.52	4...5
$Al_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN$	0.42	10...5

Ces résultats qui ont favorisé l'emploi des composants à base de nitrure dans les domaines civils et militaires pour les applications à distance tel que les radars, les communications mobiles, la navigation aérospatiale.

I-8 CONCLUSION :

Dans ce chapitre on a présenté un résumé sur les nitrures de gallium, ses propriétés structurales, électriques et électroniques, ainsi que les substrats utilisés pour la croissance de ce matériau. L'élément important est la polarisation spontanée et la polarisation piézoélectrique et leur influence sur les propriétés et 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 ns du 2-DEG 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 optoélectronique pour la fabrication des leds pour le bleu, l'ultra violet, des détecteurs UV et en micro-ondes pour des transistors fonctionnant à des fréquences et températures élevées.

Chapitre II

« Transistors à effet de champs »

II.1 Introduction

L'arséniure de gallium est un composé chimique de formule brute GaAs appartenant à la famille des semi conducteurs III-V. C'est un matériau semi conducteur utilisé notamment pour réaliser des composants micro-ondes et des composants de haute fréquence, des diodes électroluminescentes dans l'infrarouge ou des cellules photovoltaïques. Le GaAs est dit « III-V » car le gallium et l'arsenic se trouvent respectivement dans les colonnes III et V du tableau périodique des éléments, et présentent donc trois et cinq électrons de valence.

II.2 Structure cristalline

L'arséniure de gallium possède une structure cristalline de type blende. Si l'on considère que les atomes de gallium suivent une structure de type cubique à faces centrées (CFC), les atomes d'arsenic occupent quant à eux 4 des 8 sites tétraédriques de cette maille (et vice-versa).

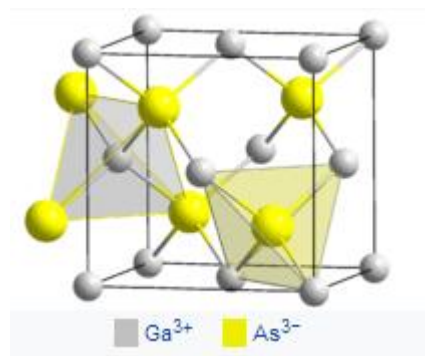


FIGURE II.1:Maille cristalline de l'arséniure de gallium

II-3.Préparation du GaAs:

II.3.1 Préparation de Substrat

Plusieurs techniques sont employées pour fabriquer le substrat, parmi ces techniques en situe la technique de liquide encapsulation de vczochralski (LEC) et la technique horizontale de Bridgman (HB)

II.3.2 La technique de Czochralski Encapsulation Liquide (LEC)

Le Gallium est un métal liquide à 30°C ; il réagit avec la vapeur d'Arséniure à 1240°C pour extraire l'Arséniure de Gallium fondu, il est refroidi lentement puis purifié. Lors de ce traitement, il est particulièrement instable. L'Arséniure a la tendance de s'évaporer, donc il faut opérer sous pression pour maintenir l'équilibre des deux Éléments .

L'Arséniure de Gallium fondu est couvert d'une couche de B₂O₃ pour éviter l'évaporation de l'Arséniure, le germe résulte est mise en rotation au bout d'un creuset. Le matériau liquide se solidifier dans un état ordonné orienté par le germe

- **La Technique Horizontal de Bridgman (HB)**

Dans cette technique ; une nacelle contenant le Ga (source de Ga) est placée au bout d'un tube en quartz scellé et l'As solide (source d'As) a l'autre bout.

Le Ga est maintenu à une température juste au dessus de celle de fusion (1240°C) et l'As autour de (615°C) ou la pression de vapeur d'As est 1 atmosphère. L'As est transporté par diffusion de la région source vers le Ga liquide ; qui devient éventuellement un liquide de GaAs et comme la pression de vapeur de As au-dessus du GaAs liquide à (1240°C) est aussi à 1 atmosphère ; une presque parfaite stœchiométrie est atteinte. La croissance du monocristal GaAs est réalisée en introduisant dans un four à gradient de température (température décroissant suivant x) la nacelle contenant le germe et le GaAs fondu. La nacelle est déplacée de la section la plus chaude du four à la section la plus froide. En suite elle est retirée lentement à une vitesse constante et la solidification du monocristal choisit l'état ordonné avec la même orientation que celle du germe.

- **Préparation des Couches Actives**

La couche active est une couche conductrice mince de l'GaAs de grande pureté, dopée avec des impuretés de type donneur, en général uniforme développé sur un substrat semi-isolant. Elle existe deux techniques de préparation de ces couches actives.

- **Techniques Epitaxiales**

L'épitaxie est une étape technologique consistant à faire croître du cristal sur du cristal. Etymologiquement, "épi" signifie "sur" et "taxis", "arrangement". On utilise le substrat comme germe cristallin de croissance et on fait croître la couche par un apport d'éléments constituant la nouvelle couche. La couche épitaxie peut être dopée ou non dopée. Elle existe deux types principaux de cette technique :

- **Technique Epitaxiale en Phase Vapeur**

Cette technique consiste à faire croître le cristal à partir de sources de gaz contenant les éléments dopants. Dans le réacteur, les gaz se dissocient pour fournir

par exemple le silicium qui se dépose à la surface des plaquettes. Pour assurer une bonne croissance ces dernières sont chauffées. Suivant la température de croissance, les réactions sont très différentes et elles peuvent même conduire à des effets négatifs. Il faudra donc aussi contrôler les équilibres chimiques par injections de gaz résultant de la décomposition de la source.

- **Technique Epitaxiale en Phase Liquide**

Cette technique consiste à faire croître le cristal par la mise en contact du substrat avec une source liquide. C'est le même principe que le tirage d'un lingot par la méthode Czochralski. Il faut bien contrôler les échanges thermiques pour éviter de liquéfier le cristal existant. Cette méthode présente l'avantage d'être très rapide, la vitesse de croissance peut être de l'ordre du micron par minute

Propriété	Valeur
Structure cristalline	Zinc blende
Paramètre de maille	5.65 Å
Densité	5.32 g/cm ³
Densité atomique	4.5 × 10 ²² atomes/cm ³
Masse molaire	144.64 g
Coefficient d'expansion thermique	5.8 × 10 ⁻⁶ K ⁻¹
Chaleur spécifique	0.327 J/g.K
Constante diélectrique	12.85
Mobilité des électrons (non dopé)	8500 cm ² /V.s
Mobilité des trous (non dopé)	400 cm ² /V.s
Point de fusion	1238 °C

Tableau II.1 : Propriétés du GaAs à température ambiante (300 K)

II.4 Propriétés électriques

Les propriétés électriques élémentaires des Silicium et GaAs sont regroupées dans le tableau II.1 . Ces grandeurs dépendent de la température, des méthodes de tests utilisées, de la qualité du matériau mais également de la concentration en atomes dopants. Les propriétés du Si sont données en référence dans le même tableau. Il existe trois caractéristiques physiques qui font de ce semi-conducteur un candidat intéressant, notamment pour des applications à hautes températures. Il s'agit de :

- la largeur de bande interdite, - la vitesse de saturation, - la conductivité thermique

GRANDEURS PHYSIQUES	GaAs
$E_g(\text{eV})$	1.43
Electrique (MV.cm^{-1}) à 300°K	0.4
$N_i(\text{cm}^{-3})$ à 300°K	10×10^{10}
$V_{\text{sat}}(\text{cm.s}^{-1})$	1.0×10^{10}
$\mu_n(\text{cm}^2.\text{V}^{-1}.\text{s}^{-1})$	8500
$\mu_p(\text{cm}^2.\text{V}^{-1}.\text{s}^{-1})$	400
ϵ_r	12.5
$\alpha_K(\text{W.cm}^{-1}.\text{s}^{-1})$	0.54

Tableau II.2: Propriété physique de GaAs

II.5 Avantages et inconvénients du GaAs

Même si le silicium reste le matériau de base le plus largement utilisé dans le secteur des semi-conducteurs, on constate l'émergence rapide de nouveaux marchés demandant des matériaux spécifiques. Le besoin de nouveaux composants pour les hyperfréquences, la logique rapide, l'optoélectronique a poussé le développement des matériaux III-V dont les propriétés de transport électronique et les propriétés optiques ne sont pas accessibles au silicium.

Le GaAs, dont les avantages par rapport au silicium résident en particulier dans la possibilité d'obtenir un matériau semi isolant et aussi dans une mobilité électronique plus élevée (sept fois plus grande que celle du silicium). Ces deux dernières propriétés étant favorables à un fonctionnement à fréquence élevée . Ces caractéristiques ont rendu ce matériau très prometteur pour répondre aux nouvelles exigences dans les domaines des hautes fréquences et de l'optoélectronique.

Dans le domaine des composants optoélectroniques, on utilise surtout les propriétés de sa structure de bande (gap direct) et celles de ses composés ternaires et quaternaire (GaAlAs), GaAsP, GaInAs et GaInAsP). Ainsi, le développement de la technologie de fibres optiques à faible perte et la maîtrise de l'élaboration de GaAs ont abouti à la réalisation d'ensembles de télécommunications optiques utilisant des émetteurs lasers à semi-conducteur GaAs et GaAlAs .

Un autre atout très important de ce matériau est la possibilité de l'obtenir sous forme semi-isolant cet état de résistivité élevée est particulièrement favorable pour le développement d'une véritable technologie planaire de circuits intégrés sur GaAs. Aussi la largeur de sa bande interdite

relativement importante qui autorise un fonctionnement à haute température. L'inconvénient majeur du GaAs est son coût élevé. Par exemple, les circuits intégrés en arséniure de gallium sont beaucoup plus cher : le matériau ne s'obtient qu'en plaquettes de 3 à 4 pouces de diamètre (de 7,5 à 10 cm) au maximum, ce qui limite le nombre de circuits intégrés fabriqués ; sa physicochimie se prête moins bien que le silicium aux associations de matériaux (semi-conducteurs, isolants, métaux) requis par les circuits intégrés, ce qui rend les méthodes de fabrication plus délicates et les rendements de fabrication plus faibles. Ces handicaps limitent l'arséniure de gallium aux utilisations où il est indispensable, à savoir lorsque l'on veut des circuits fonctionnant à des fréquences supérieures à 1 Ghz.

II.6 Transistor à Effet de Champ à Contact Schottky (MESFET)

Dans cette section, une présentation détaillée du principe de fonction du transistor MESFET GaAs est donnée. La Structure idéalisée de MESFET GaAs en 3D est illustrée sur la figure II.2.

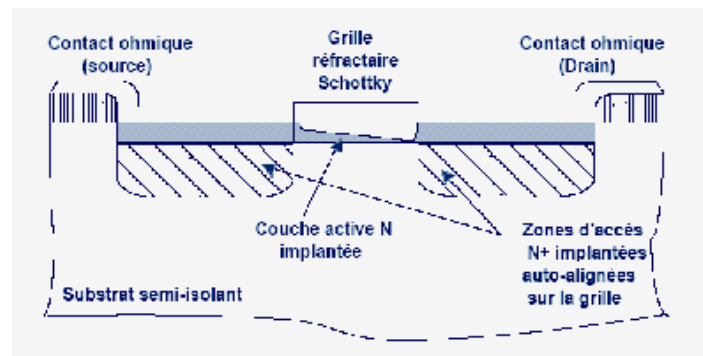


Figure II.2: Vue en coupe du MESFET GaAs implanté auto-aligné

II.6.1 Structure et Description

Dans l'état de l'art aujourd'hui, la structure du Transistor à effet de champ à contact Schottky repose sur une couche active (canal) directement implantée dans le substrat semi-isolant. Ensuite, la grille en métal réfractaire est déposée pour matérialiser le contact schottky. Puis les zones N+ sont implantées en se servant

du métal comme d'un masque pour obtenir deux zones d'accès auto alignées sur la grille. La figure (1.6) présente une coupe schématique d'un MESFET. La structure présentée met en évidence les différentes couches utilisées pour sa réalisation. La couche active est généralement une couche du type N qui repose sur un substrat semi-isolant.

Les contacts de source et de drain sont des contacts ohmiques contrairement au contact Schottky de grille.

II.6.2 Principe de fonctionnement

La base du fonctionnement d'un MESFET est la possibilité de moduler l'épaisseur du canal sous la grille. Le contact de grille est de type Schottky. Une couche dépeuplée d'électrons libres, appelée zone de charge d'espace (ZCE), se crée sous la grille. Aucun courant ne peut traverser cette couche. La région où le courant peut circuler est donc réduite à la fraction de la couche active non dépeuplée. En régime de fonctionnement normal le drain est polarisé positivement par rapport à la source, tandis que la grille est polarisée négativement, toujours par rapport à la source.

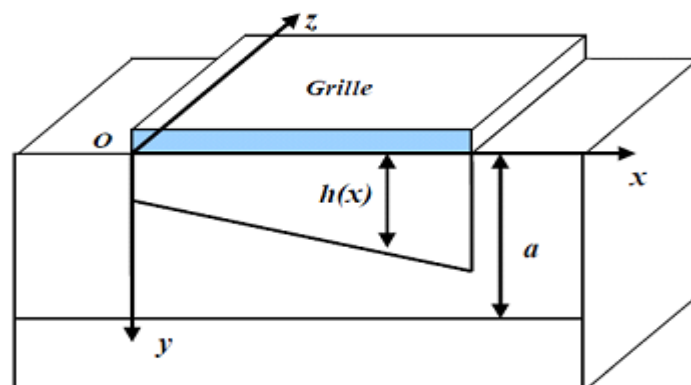


Figure II.3 : Structure idéalisée de MESFET GaAs en 3D.

Le fonctionnement d'un MESFET est résumé par les étapes suivantes :

A tension de drain fixée, la polarisation négative de la grille a pour effet d'augmenter la pénétration de la zone de charge d'espace dans la couche active, diminuant ainsi le passage du courant. Lorsque la tension de grille est suffisamment négative, la ZCE vient complètement obstruer le canal, ne laissant plus passer le courant. Le transistor est alors dit « pincé » et la tension appliquée sur la grille est alors appelée tension de pincement V_p .

A tension de grille fixée, l'augmentation de la tension positive de drain crée un champ électrique dans le canal. Ce champ entraîne les électrons de la source vers la grille, établissant ainsi un courant I_{ds} (drain-source).

Avec l'accroissement de la tension de drain, la section de la zone dépeuplée (zone de charge d'espace) commence à se déformer en devenant beaucoup plus importante côté drain que côté source. Ce resserrement du canal provoque un ralentissement de la croissance du courant de drain. Arrivé à un certain stade, l'augmentation de la tension V_{ds} n'a quasiment plus aucune influence sur le courant. On nomme le courant de saturation I_{dsat} , lorsque le courant de drain I_{ds} du transistor commence à rentrer dans la zone de saturation pour une tension de polarisation de grille V_{gs} nulle.

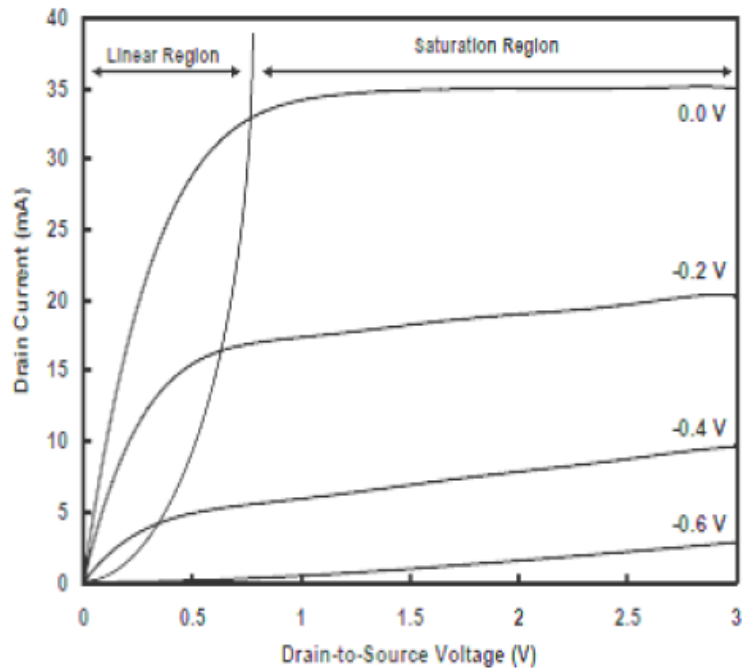


Figure II.4 : Caractéristiques typiques d'un transistor MESFET GaAs

II.6.3 Contraintes et domaines d'utilisation

Le MESFET GaAs est longtemps resté le composant à effet de champ prépondérant pour l'amplification de puissance micro-onde. En effet, les propriétés de transport électronique de l'Arséniure de Gallium permettent d'obtenir des densités de porteurs dont la vitesse moyenne dans le canal est bien supérieure à celle du Silicium. Avantage supplémentaire, le GaAs permet le dépôt de contacts ohmiques de bonne qualité par rapport à la plupart des autres composés III-V. Pour fournir une puissance élevée, le FET doit pouvoir délivrer un courant drain source I_{ds} le plus élevé possible tout en supportant des tensions V_{ds} de grande amplitude. Cependant, l'obtention d'un fort courant I_{ds} nécessite l'emploi de dopages élevés qui entraînent une dégradation de la tension de claquage. D'autre part, si l'on veut privilégier un fonctionnement à de très hautes fréquences, il convient de réduire la longueur de grille. La nécessité de garder un facteur d'aspect (le rapport entre la longueur de grille et l'épaisseur de la couche active) raisonnable contraint alors à diminuer l'épaisseur de

cette couche active, ce qui se traduit par une diminution de courant drain-source.

Pour des applications de forte puissance, des MESFET utilisant des matériaux dits à grand gap présentent des caractéristiques intéressantes. Ainsi, l'utilisation du Carbure de Silicium SiC permet d'obtenir des performances élevées grâce à un champ de claquage huit fois plus élevée et une conductivité thermique trois fois plus élevée que le Silicium.

Ces propriétés permettent d'utiliser les composants avec des tensions très élevées, de plusieurs dizaines de volts et à haute température. Compte tenu de ces performances, le domaine d'utilisation privilégié de ces composants est l'amplification de très forte puissance (Objectif > 100W) pour l'émission en station de base par exemple.

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.7 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 semi conducteurs ayant des bandes d'énergie différentes, de manière à faire passer les électrons constituant le courant drain-source dans un semi conducteur 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 semi conducteur 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 semi conductrice contenant des impuretés afin d'augmenter la mobilité des électrons.

II.7.1 HEMTs a base de nitrure de gallium AlGaN/GaN

II.7.1.1 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 semi conducteur est l'Arséniure de Gallium malgré plusieurs différences nettes. On représente une structure typique d'un transistor HEMT AlGaN/GaN par la figure II-5. Elle est constituée des matériaux suivants :

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



Figure II. 5: Structure et différentes couches du HEMT AlGaN/GaN

II.7 .1.2 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 plus part 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.7.2 Etude de L'hétérojonction AlGaN/GaN

II.7.2.1: 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 , 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 stoechiométrie ou encore à des impuretés accumulées à l'interface lors de la croissance par épitaxie de l'hétérojonction. La figure II.6-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 semi conducteurs sont supposés homogène (composition, dopage...) et électriquement neutres. Tous les niveaux d'énergie y sont plats

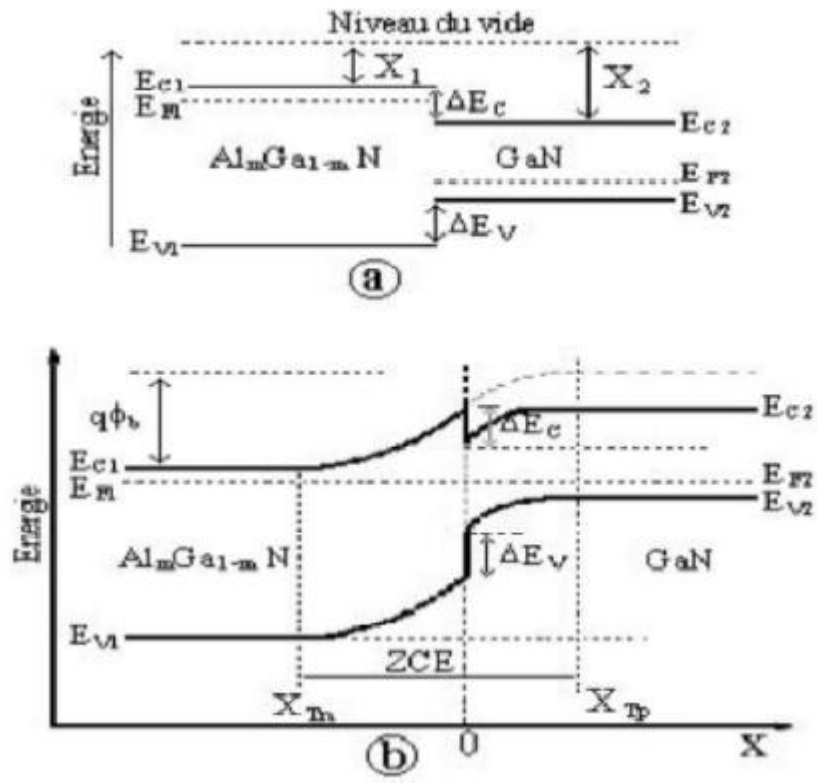


Figure II.6: Diagramme d'énergie d'une hétérojonction: (a) les deux semi-conducteurs sont séparés par un espace infinitésimal (b) les deux semi-conducteurs sont raccordés.

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 semi conducteur. 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.6-b représente les diagrammes de bande raccordés après avoir recollé les deux Semi conducteurs formant ainsi une hétérojonction. Les porteurs de charges sont à présent libres de se redistribuer entre les deux semi conducteurs. 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 est la seulement la différence entre les deux affinités X1-X2 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 électronique set 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 x_{Tn} et x_{Tp} de part et d'autre de l'hétérojonction peuvent être obtenues par intégration de l'équation de Poisson.

II.7.2.2: 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 AlGaIn/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'AlGaIn mais surtout à la présence d'une forte polarisation à l'hétéro interface.

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

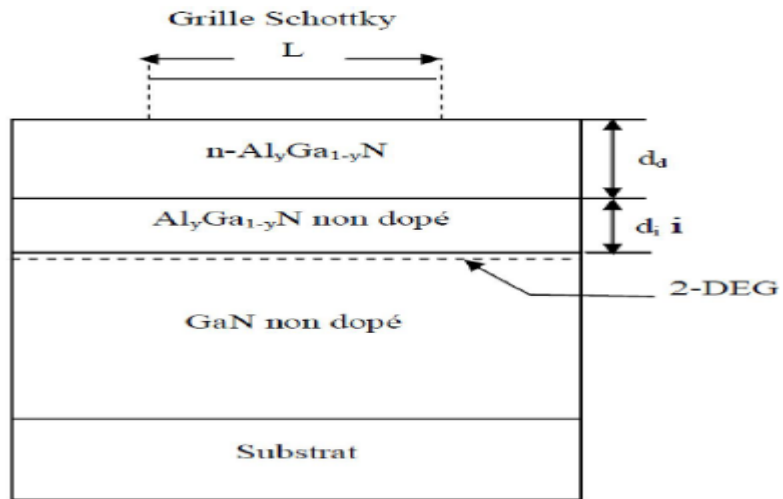


Figure II.7: Schéma de la structure AlGaN/GaN.

Le diagramme de bande associé à une telle structure est illustré sur la figure II-7, le principe de fonctionnement a été décrit plus haut, nous allons maintenant exprimer la densité de porteurs dans le 2DEG, nous supposerons 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.

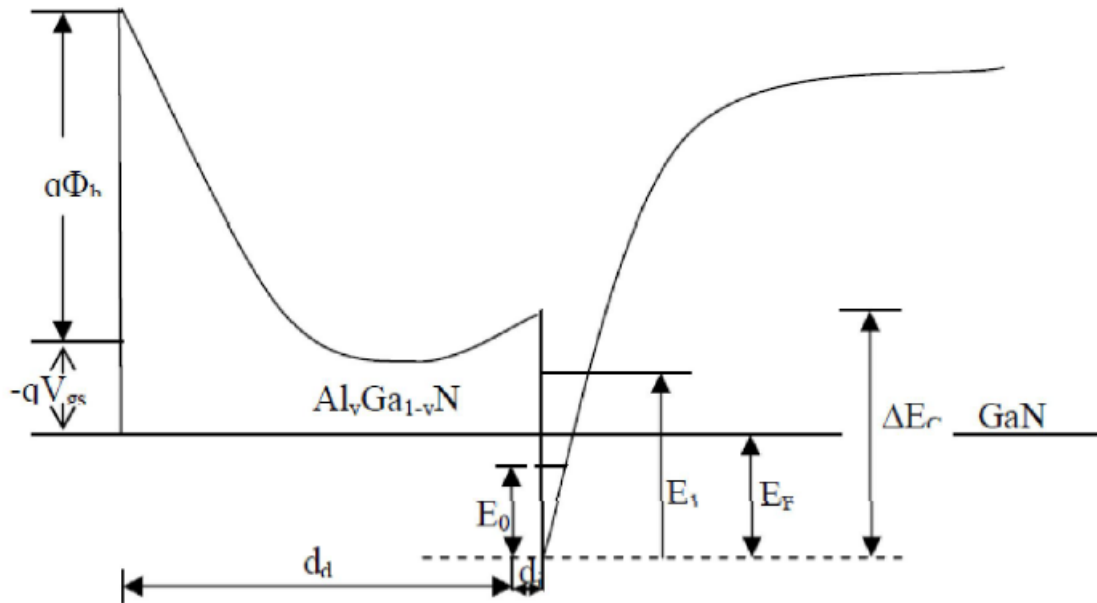


Figure II.8: Diagramme énergétique de la bande de conduction du HEMT AlGaIn/GaN

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:

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

Ou $D = \frac{m_0}{\pi \cdot \hbar^2}$ 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:

$$n_s = \frac{\varepsilon(x)}{qd} \left(v_g - \frac{E_F}{q} - v_{th}(x) \right)$$

ou

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

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'AlGaN 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 EC 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 . En faible inversion

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

En moyenne inversion :

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

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

$$n_s = \frac{2\epsilon(x)qD}{(\epsilon(x) + 2q^2D(d_d + d_i))} (v_{gs} - v_{th}(x))$$

II.8 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.

II.8.1 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:

$$I_{ds} = q w n_s v(E(y))$$

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.8.2 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 :

$$g_m = \left[\frac{\partial I_{ds}}{\partial v_{gs}} \right]_{v_{ds}=cst}$$

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.8.3 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 :

$$g_d = \left[\frac{\partial I_{ds}}{\partial v_{ds}} \right]_{v_{gs}=cst}$$

La conductance gd 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.9 conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit le semi conducteur GaAs, la structure et le fonctionnement des transistors MESFETs et les HEMTs en particulier. On a analysé le HEMT de base constitué d'une couche donneuse AlGaN/un Espaceur non dopé AlGaN/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.

Chapitre III

« Résultat et interprétation »

III.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 microondes. 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 utilisé le module ATLAS du logiciel 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.

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 TCADSILVACO 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

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 semi conducteurs. Il est capable de prédire les caractéristiques électriques de la plupart des composants semi conducteurs en régime continu, transitoire ou fréquentiel. En plus du comportement électrique, 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 semi conducteurs 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 semi conducteur 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

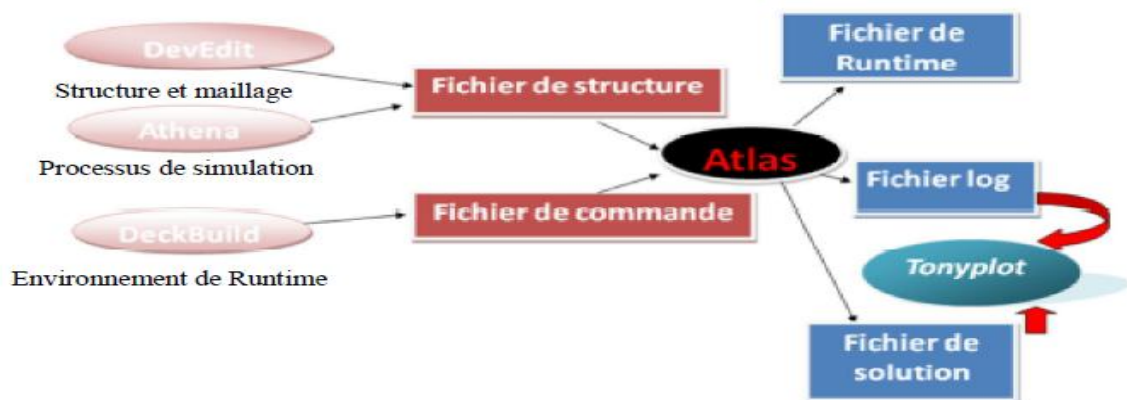


Figure III.1: Schéma synoptique des modules utilisés dans la simulation par TCAD SILVACO

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.).

- **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 :

a. 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

b. 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.

c. Spécification des Régions et Matériaux

Après avoir défini le maillage, il est nécessaire de définir 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.

d. Spécification des électrodes

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

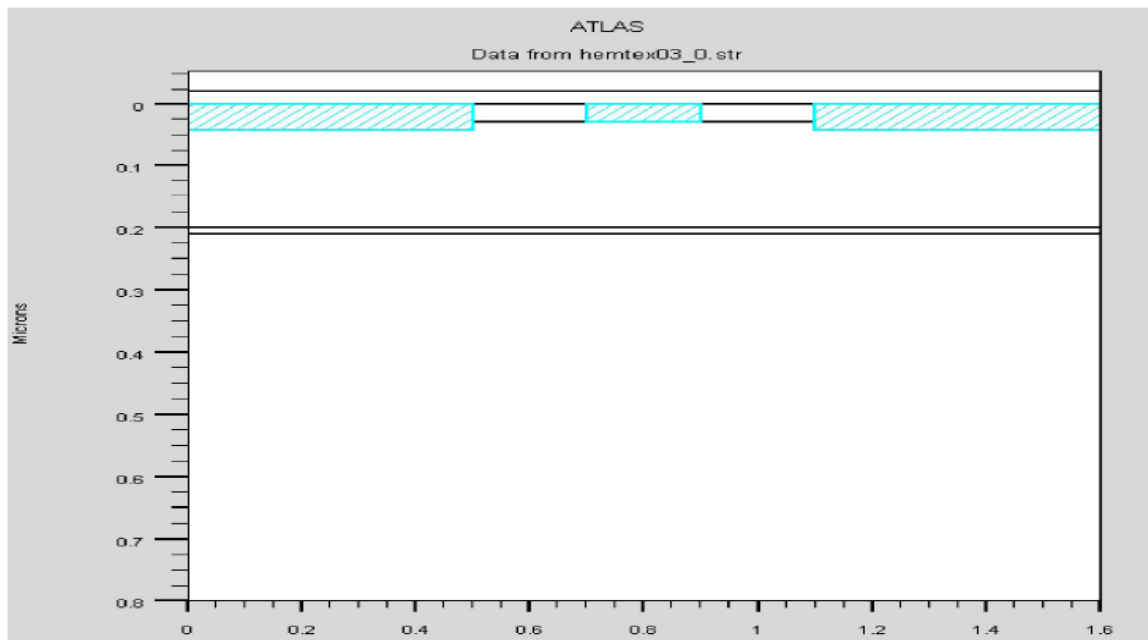


Figure III.2: Définition des électrodes

e. 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

f. Spécifications des Matériaux et des modèles

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

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

g. Spécification Méthodes numériques de calcul

Après la précision du modèle de matériau, la sélection de la méthode numérique doit être indiquée. 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 Le transistor à effet de champ Al_{0.28}Ga_{0.72}N/GaN HEMT

III.3.1 Description de la structure simulée

La topologie de la structure étudiée est celle d'un HEMT Al_{0.28}Ga_{0.72}N/GaN épitaxie sur un substrat saphir (Sapphire:Al₂O₃). La taille de substrat est de 8x9μm². L'épitaxie se compose d'une couche d'AlGa_{0.28}N (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 1.47μm.

Les longueurs des contacts de source, grille et drain sont de 0.5μm/2μm/0.6μm respectivement. Les distances source-grille et grille-drain sont de 2μm-3μm. La densité de charge à l'interface Al_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN est fixée à 0.99×10¹³cm⁻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 de chaque matériau est calculé et rassemblé dans le tableau III.1. La figure III.3 illustre la structure du HEMT étudiée est simulée par le logiciel Atlas-Silvaco et la figure III.4 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 III.1: la structure du HEMT Al_{0.28}Ga_{0.72}N/GaN simulé par Silvaco-Atlas.

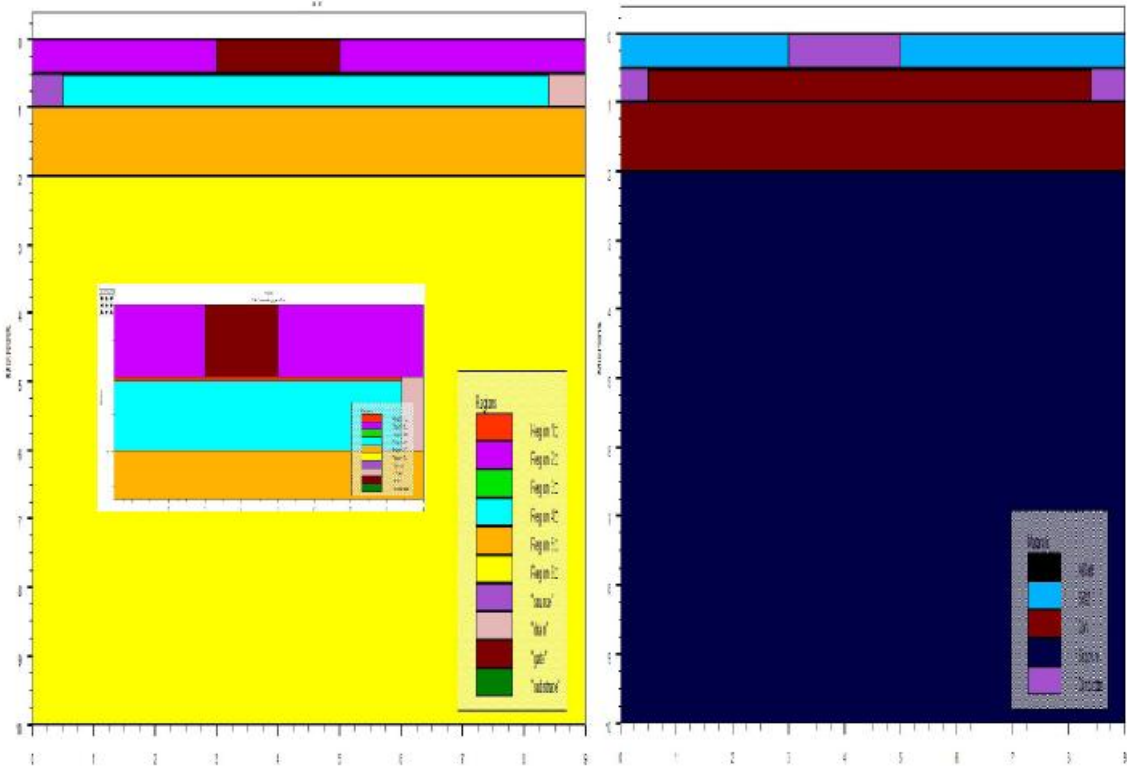


Figure III.3: La structure du HEMT Al_{0.28}Ga_{0.72}N/GaN simulée par Atlas- Silvaco, a gauche la Représentation des différentes régions et a droite la représentation est faite selon le type de matériau.

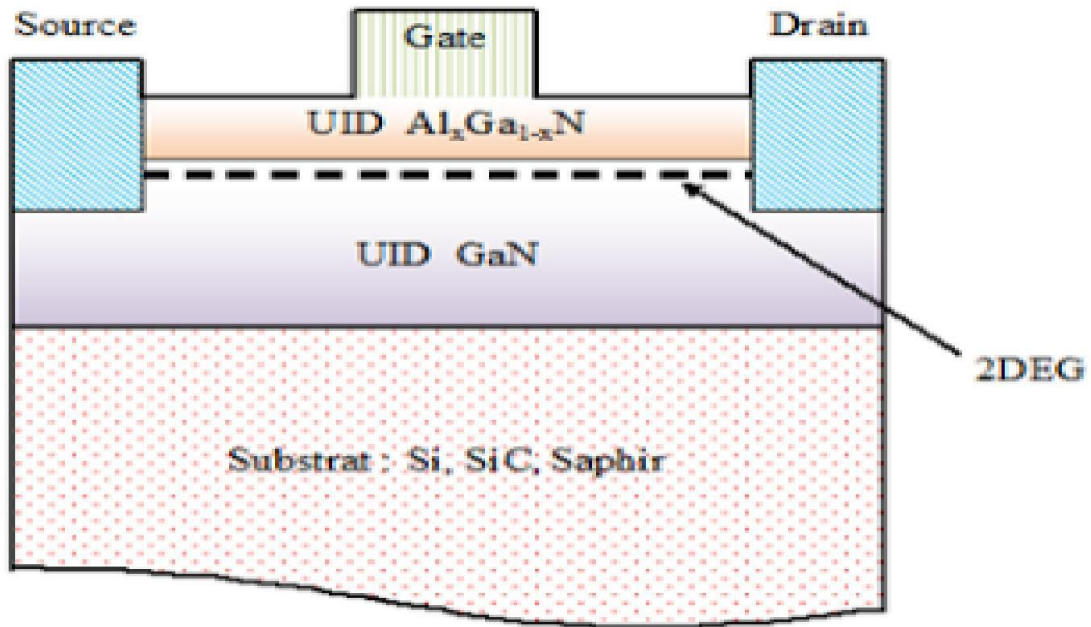


Figure III.4: Une structure représentative d'un transistor HEMT AlGaIn/GaN.

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

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

- Le modèle de la mobilité à faible champ d'Albercht est généralement choisit dans le cas des matériaux a base de GaN, quoique le fameux modèle pour ce type d'alliage c'est le modèle de Canali surtout a 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 :

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

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. $AN.ALBRCT.N.BN.ALBRCT.CN.ALBRCT.NON.ALBRCT.TON$.et $T1N$. $ALBRCT$ 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 III.5. 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.

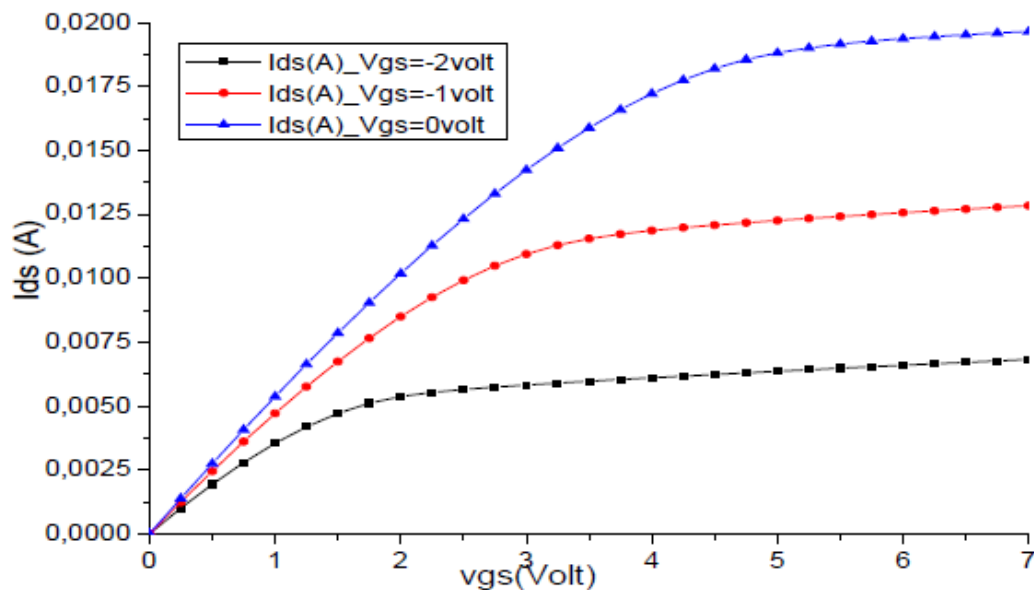


Figure III.5: Les caractéristiques courant de drain- tension de drain pour des tensions de grille $V_g = -2, -1, 0$ Volt.

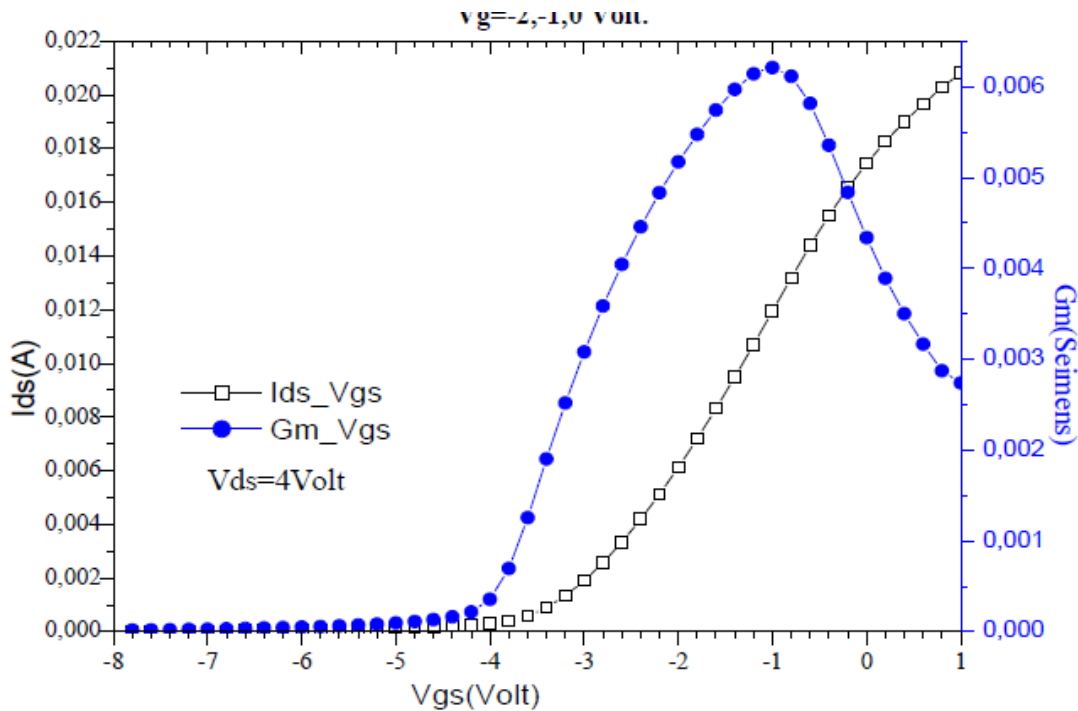


Figure III.6: la caractéristique de transfert DC et RF du transistor étudié pour $V_{ds}=4.0$ Volt.

La figure IV.6 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.

III.4 l'influence des propriétés du matériau

III.4.1 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 semi conducteurs a base de GaN. Elle représente une propriété très importante spécialement pour ces alliages, nous virons 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:

$P_{int} = P_{tot}$ (la couche supérieure) - P_{tot} (la couche inférieure)

Et P total = polarisation Spontanée + Polarisation Piézoélectrique

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

$$P_{sp} = -0.09x - 0.034 \times (1-x) + 0.021 \times x \times (1-x) \quad (\text{III.3})$$

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

$$P_{pz} = -0.0525x + 0.0282 \times (1-x) \quad (\text{III.4})$$

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

$$P_{int}(\text{AlGaN/GaN}) = 1.38 \times 10^{-13} \text{ cm}^{-2} \quad (\text{III.5})$$

L'augmentation du courant I_{ds} due à cette charge d'interface est représentée par la figure III.5 Cette figure présente l'évolution du courant drain en fonction de la variation de la charge d'espace a 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.

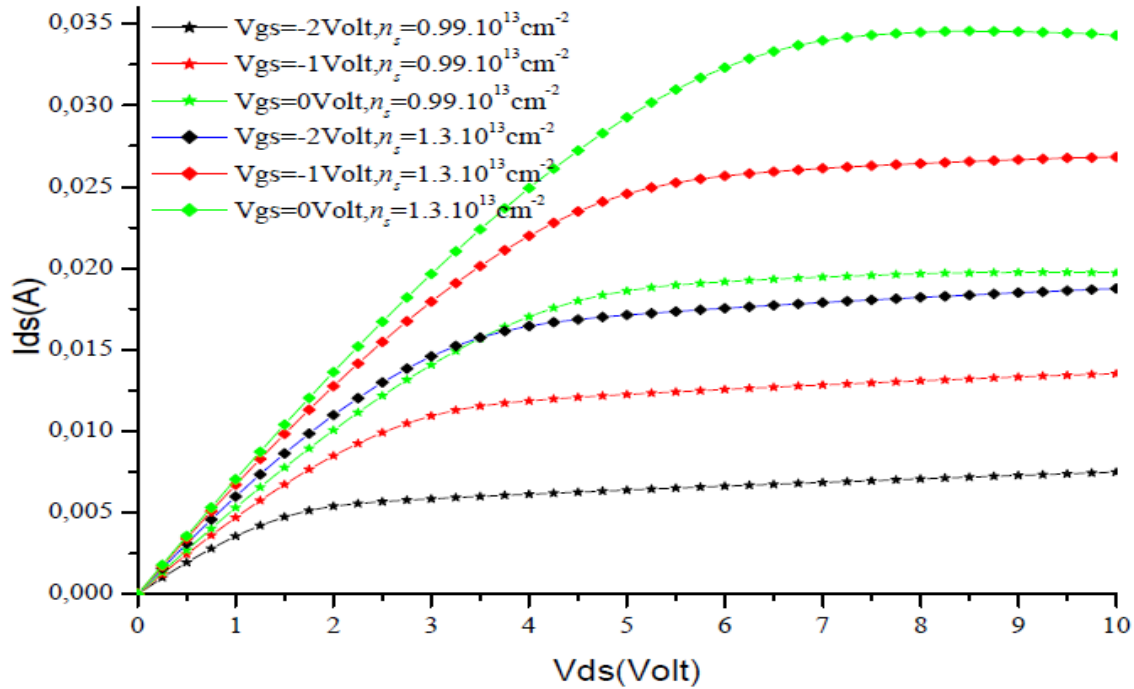


Figure III.7: L'effet de la charge d'interface AlGaIn/GaN sur les caractéristiques courant-tension drain (Id-Vd) du transistor.

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 III.7 et la figure III.8.

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.

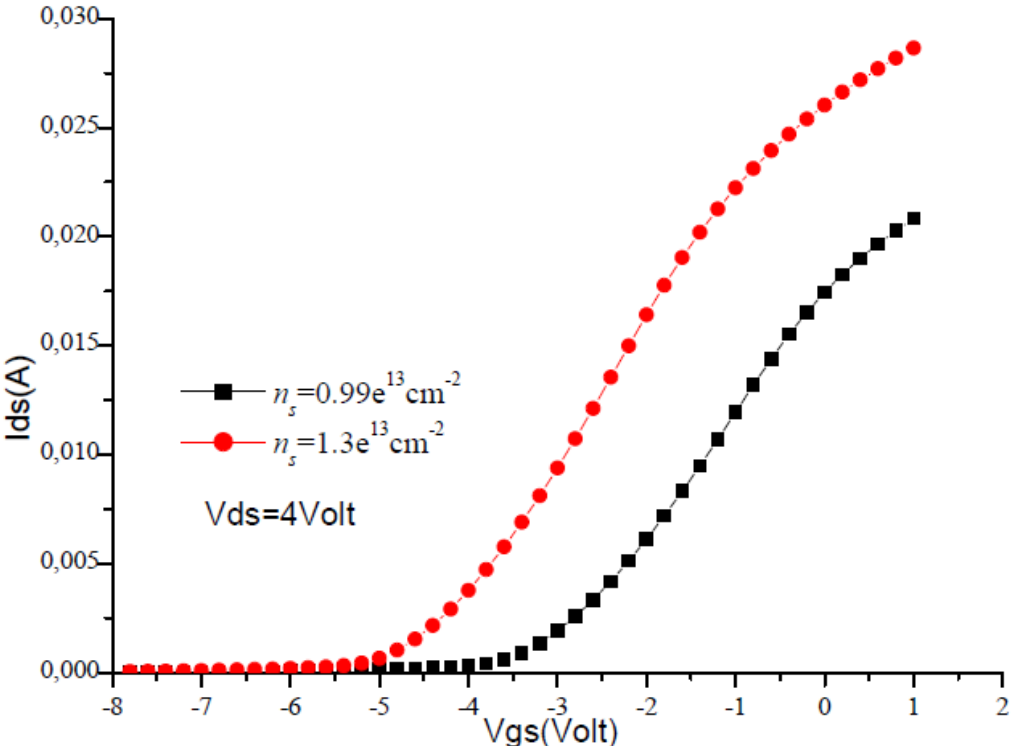


Figure III.8: L'effet de la charge d'interface AlGaN/GaN sur la caractéristique courant-drain-tension- grille (I_{ds} - V_{gs}) du transistor.

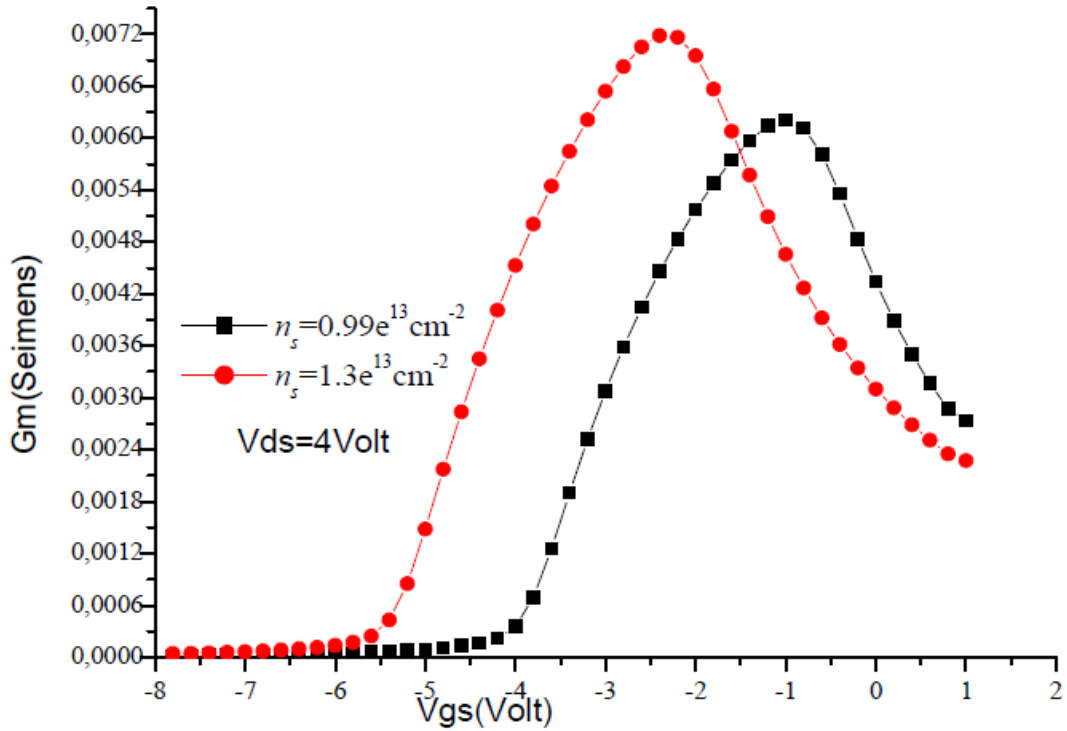


Figure III.8: L'effet de la charge d'interface AlGaIn/GaN sur la transconductance $G_m(V_{gs})$.

III.4.2 L'effet de dopage du canal (GaN) sur les caractéristiques du transistor Al_{0.28}Ga_{0.72}N/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 a l'phénomène de dispersion.

Selon la figure III.9, on remarque que l'augmentation du dopage dans le canal n'améliore pas la caractéristique de transfert I_{ds_Vds} .

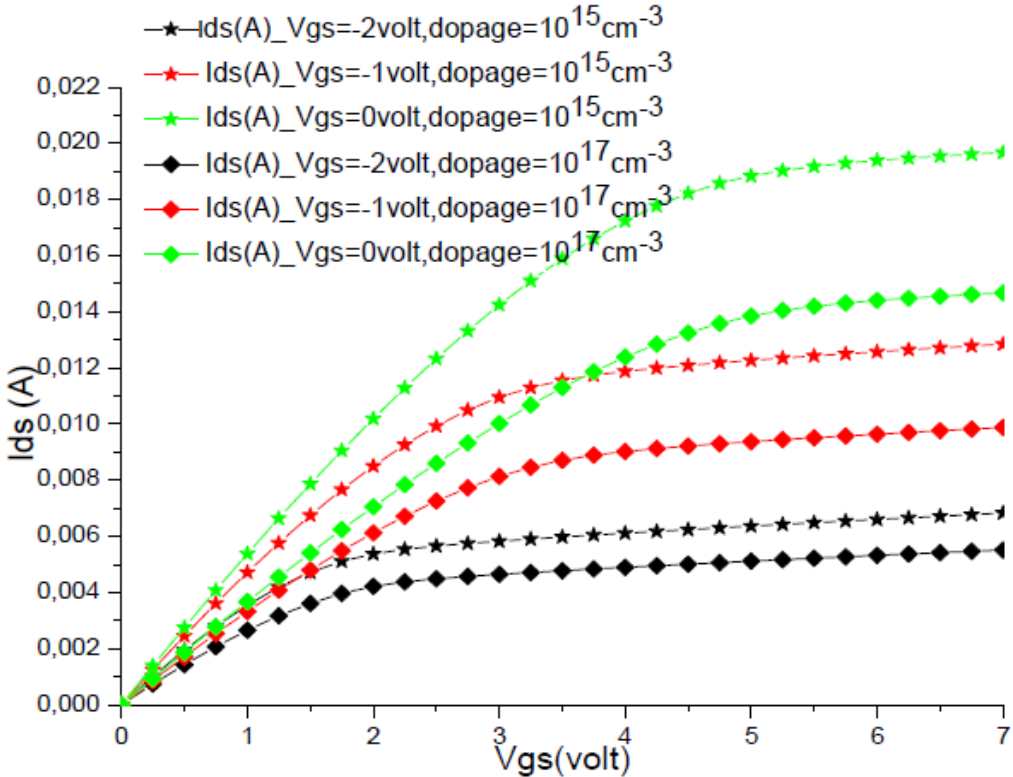


Figure III.9: L'effet du dopage du canal GaN sur les caractéristiques courant-drain - tension drain (I_{ds} - V_{ds}) du transistor.

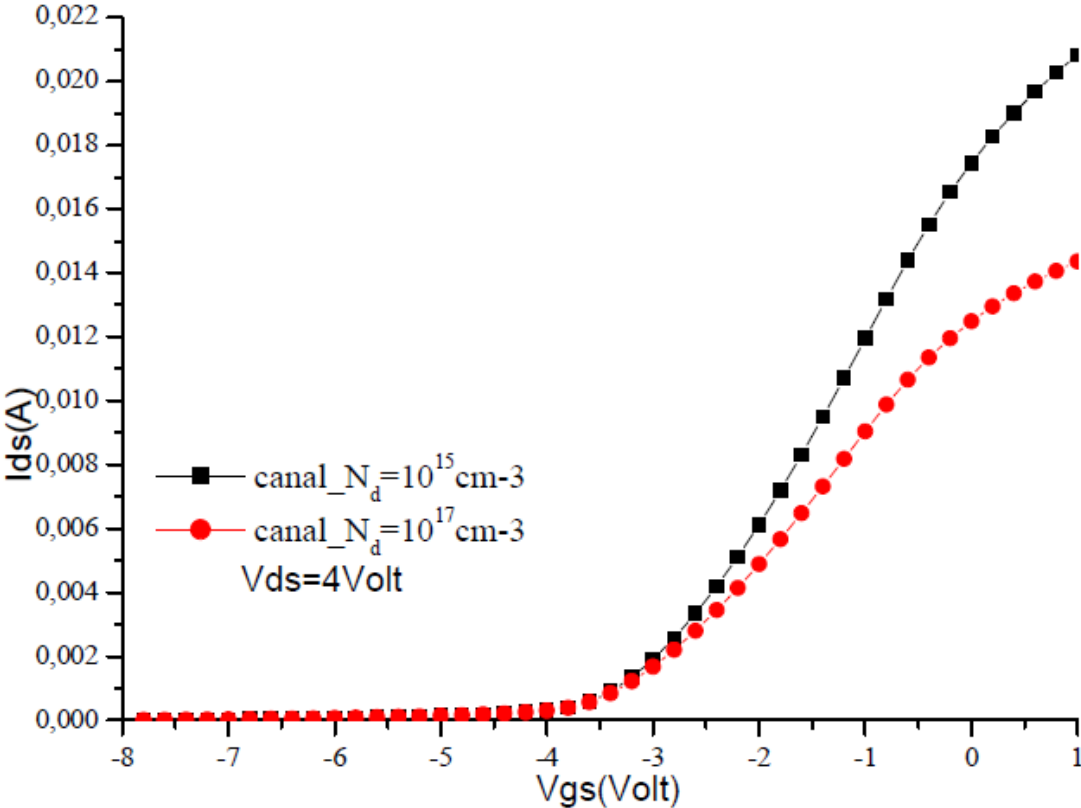


Figure III.10: L'effet du dopage du canal GaN sur la caractéristique courant-drain- tension-grille (I_{ds} - V_{gs}) du transistor AlGaIn/GaN HEMT.

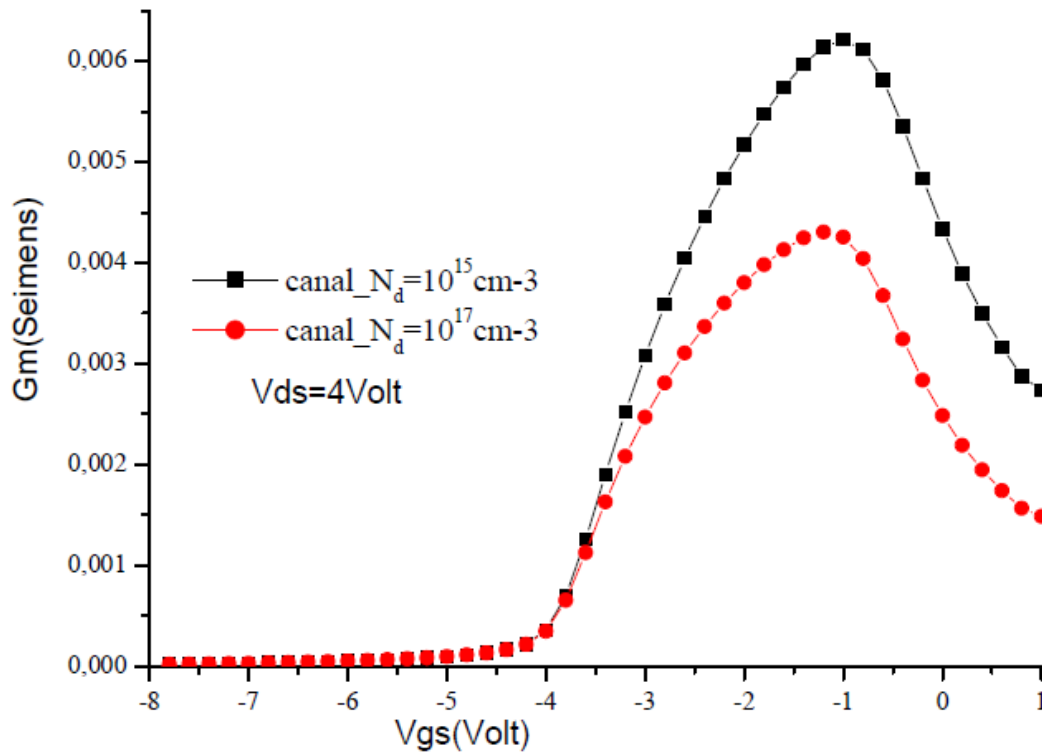


Figure III.11: L'augmentation du maximum de la transconductance G_{mmax} en fonction du dopage du canal GaN du transistor AlGaIn/GaN HEMT.

Comme on peut le constater d'après la figure IV.10 et IV.11 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_{mmax} et relativement affectée la tension de pincement

III.5 L'influence des paramètres technologique de l'AlGaIn/GaN HEMT

III.5.1 L'effet du type de substrat sur les caractéristiques du transistor Al_{0.28}Ga_{0.72}N/GaN HEMT

L'action du type de substrat sur le transistor est observée ici par la figure III.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 :

$$K(T) = (a+b.T+C.T^2)^{-1} \quad (III.6)$$

Ou $K(300^\circ\text{K})$ est égale à $1.3 \text{ W/cm.}^\circ\text{K}$ pour le GaN et $1.7 \text{ W/cm.}^\circ\text{K}$ pour le saphir. La figure III.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 le cas dont substrat saphir (Sapphire Al_2O_3) est utilisé.

Le substrat GaN c'est un à accord total de maille avec les couches suppliants 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 a proposé pour réduire la densité de défauts dans la structure de HEMT.

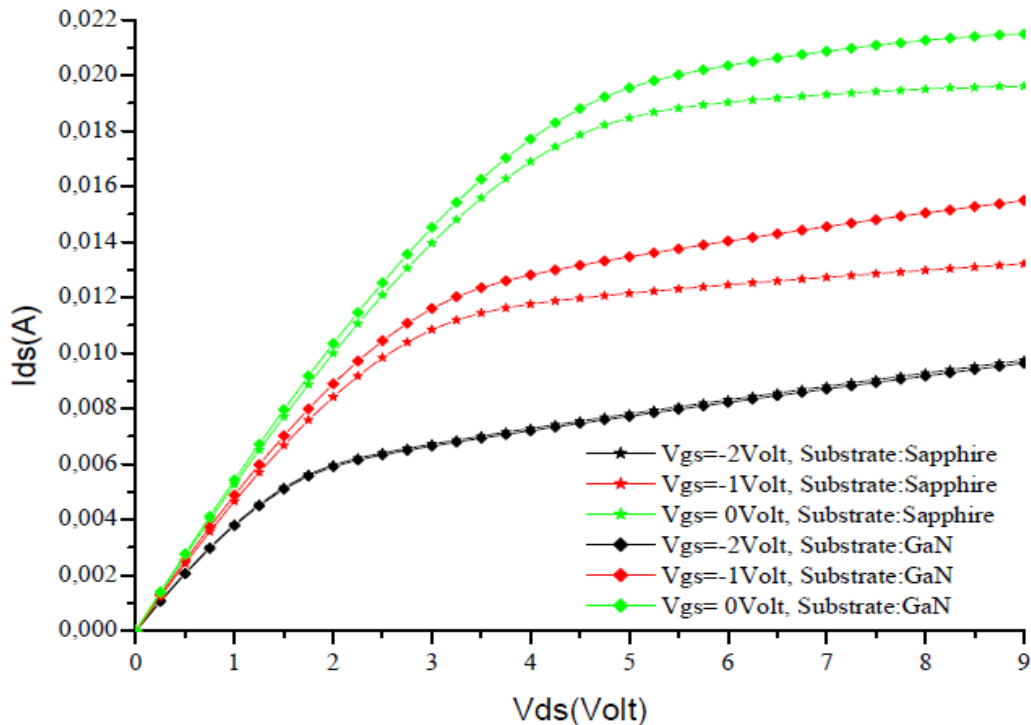


Figure III.12: L'effet du type de substrat sur la caractéristique de transfert courant-drain-tension drain (I_{ds} - V_{ds}) du transistor

III.5.2 L'effet de la longueur de la grille (L_g) sur les caractéristiques du transistor $\text{Al}_{0.28}\text{Ga}_{0.72}\text{N}/\text{GaN}$ 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 avantageuse 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:

$$E=V/L_g \quad (\text{III.7})$$

Cette montée 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 :

$$F_t = v_{sat} / L_g \quad (\text{III.8})$$

La figure III.13 montre d'une manière expressive l'augmentation du courant de drain I_{ds} due à la réduction de la longueur de la grille.

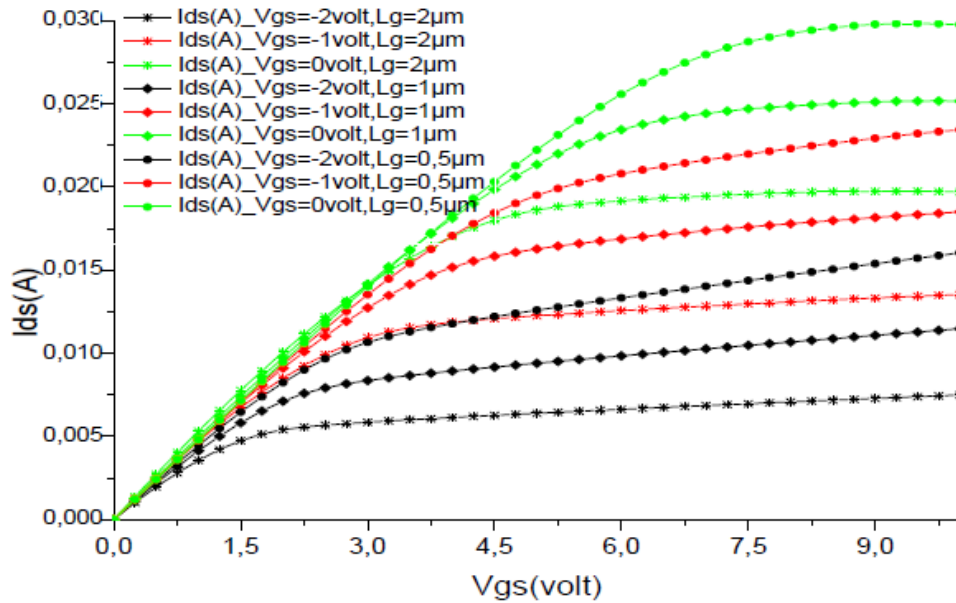


Figure III.13: L'évolution de la caractéristique de transfert courant-drain- tension-drain (I_{ds} - V_{ds}) du transistor HEMT en fonction de la longueur de la grille à différentes tension de la grille (V_{gs}).

Les figures III.13 et III.14 prouvent bien cette constatation. De la figure III.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 c'est 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 $l_g = 0.5\mu m$.

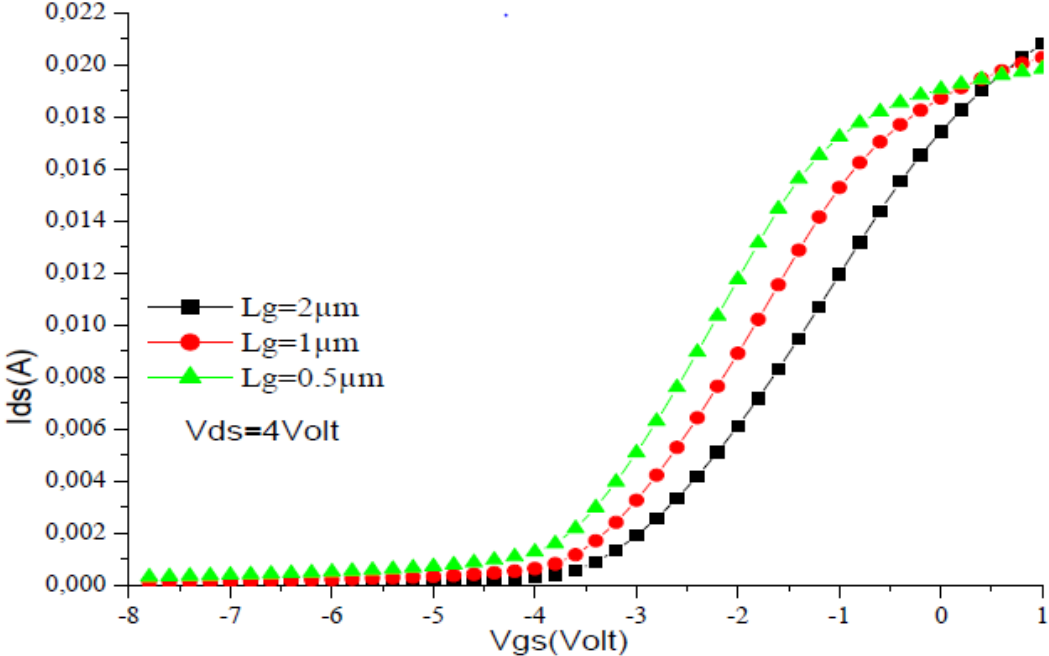


Figure III.14: L'effet de la longueur de la grille sur la caractéristique de transfert (I_{ds} - V_{gs}) du transistor HEMT

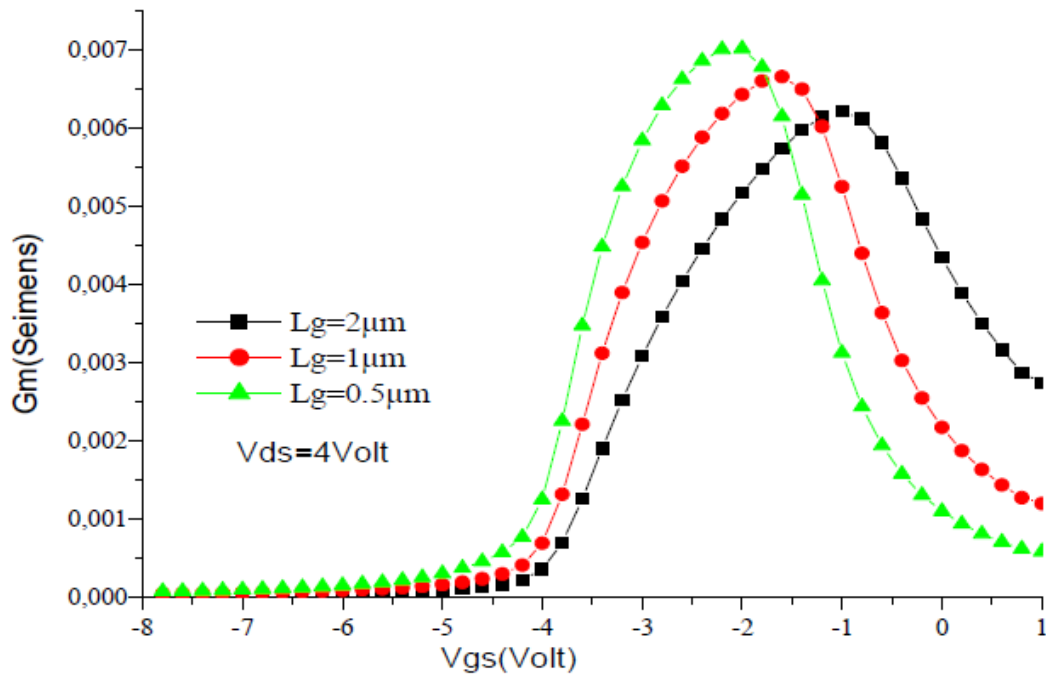


Figure III.15: la variation de la transconductance en fonction de la tension de la grille a différents longueur de la grille.

III.5.3 L'effet de l'espace drain-source (L_{sd}) 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 III.15

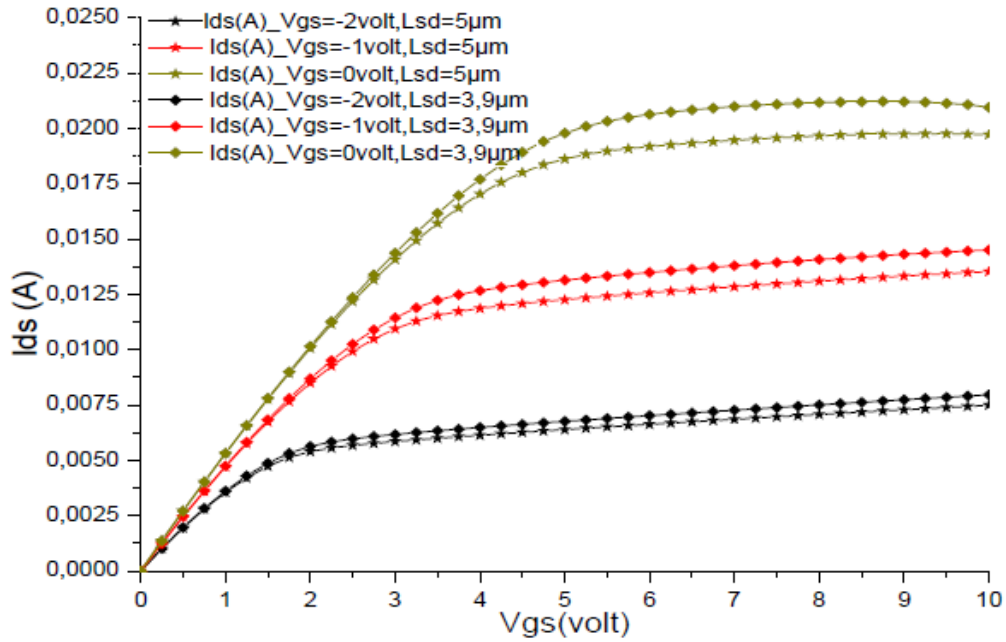


Figure III.16: La variation des caractéristiques courant-tension (I_{ds} - V_{ds}) en fonction de la tension de la grille a différents longueur de la grille.

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 a l'espace source-grille et grille-drain comme les relations suivantes le montre:

$$R_s = R_c + \frac{LSG}{q\mu_p N_d w} \cdot \frac{1}{a}, \quad R_d = R_c + \frac{LGD}{q\mu_p N_d w} \cdot \frac{1}{a} \quad (III.9)$$

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. ϵ_0 est la perméabilité du vide.

La même observation c'est reproduit pour la caractéristique I_{ds} _ V_{gs} et la transconductance en fonction de la tension de la grille G_m _ V_{gs} illustrés par les figures III.17 et III.18.

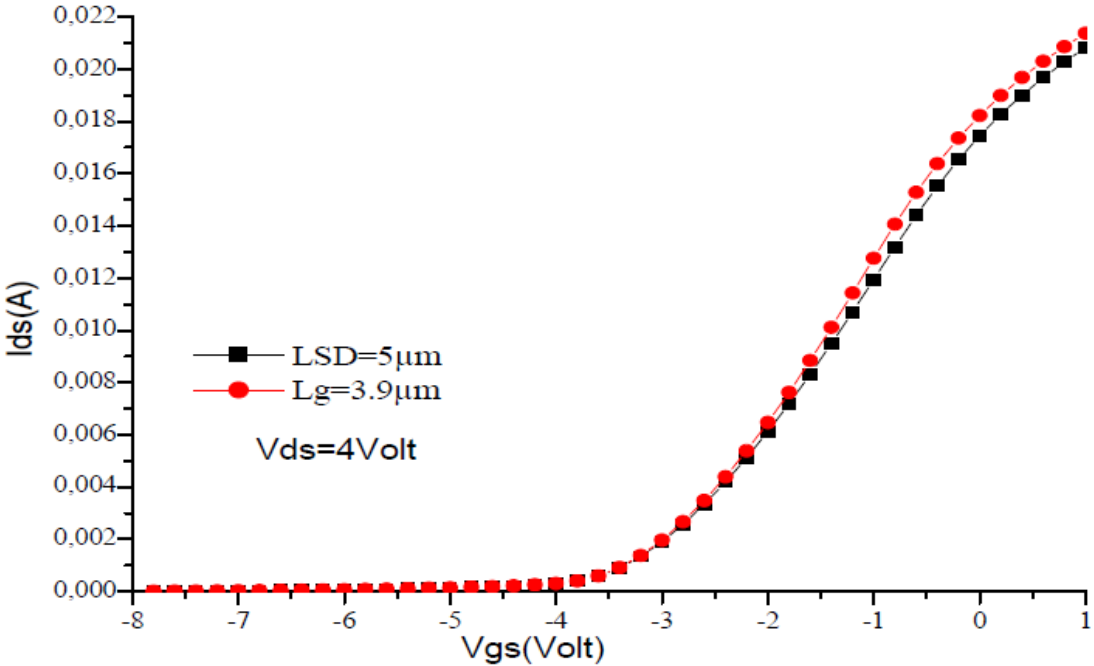


Figure III.17: la variation de la transconductance en fonction de la tension de la grille a différents longueur de la grille.

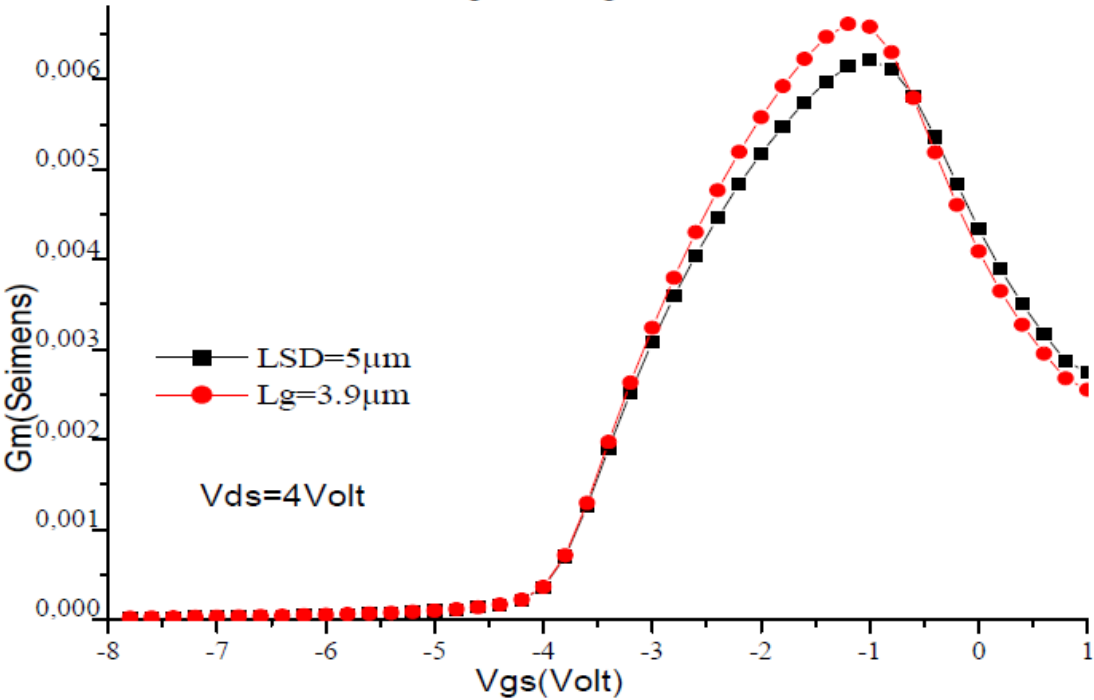


Figure III.18: La variation de la transconductance en fonction de la tension de la grille a différents longueur de la grille.

III.6 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

Chapitre IV

« La technologie GaN pour l'amplification de puissance et les architectures à haut rendement associées »

IV.1 Introduction

L'étage final d'amplification de puissance RF, avec au cœur de celui-ci, le transistor de puissance, est une partie critique dans les systèmes de communication modernes. Comme cela a été vu au cours du deuxième chapitre, il impacte de façon prépondérante les performances en rendement et en linéarité globales de l'architecture. Les schémas de modulation à haute efficacité spectrale, requis pour l'augmentation du débit des liaisons, imposent la linéarité comme le critère dominant. L'efficacité énergétique de l'amplificateur, quantifiée par la PAE, est la seconde contrainte devant arriver en tête dans le cahier des charges, car il impacte directement le coût de l'architecture, augmente la durée de vie des batteries dans les systèmes, simplifie grandement la gestion thermique de la cellule active, et permet d'améliorer la fiabilité des éléments actifs.

Au travers de la littérature relative à la transmission d'information au sens large, on peut distinguer trois voies possibles, progressant en parallèle, afin d'améliorer les performances globales des systèmes : d'une part, l'optimisation de la couche physique, que nous n'aborderons pas dans ces travaux. Cette approche, en amont de la partie analogique, consiste à travailler sur l'onde émise, afin d'optimiser la forme temporelle pour relâcher une ou plusieurs contraintes liées à l'amplification (algorithmes de réduction du PAPR, techniques d'étalement spectral, techniques de codage et de modulations par exemple). La seconde voie est le développement des filières technologiques de fabrication des semi-conducteurs. Depuis les années 90, de nouveaux matériaux sont à l'étude dans les laboratoires de recherche, ouvrant la voie à d'importantes améliorations des performances en tenue en puissance et en fréquence avec l'arrivée à maturité des matériaux grand gap. Enfin, la dernière approche est liée au développement des outils et des méthodes de conception RF. Elle conduit à l'optimisation des conditions de fonctionnement du transistor, par l'utilisation des classes de fonctionnement à haut rendement (F, F-1, E, ...), ainsi qu'au développement de solutions d'amplification dites intelligentes (*smart power*) que nous allons présenter.

chapitre-IV La technologie GaN pour l'amplification de puissance et les architectures à haut rendement associées

Dans ce chapitre, une description succincte du transistor à effet de champ HEMT et la technologie à base de nitrure de gallium (GaN) dans le contexte de l'amplification de puissance est présentée. La présentation d'une des principales techniques relevées dans la littérature relative à l'amplification de puissance linéaire à haut rendement des signaux modulés à enveloppe variable est faite : « la topologie Dohert ».

IV.2 Le transistor HEMT GaN : brique de base pour l'amplification de puissance

Le principe de fonctionnement du transistor HEMT AlGaN/GaN repose sur l'utilisation d'une hétérojonction entre deux matériaux de gaps différents. L'effet transistor est alors obtenu par le contrôle de la concentration des porteurs dans le canal, à l'interface entre les deux matériaux, au moyen de l'électrode de grille. Une vue en coupe simplifiée d'une structure HEMT AlGaN/GaN est représentée à la figure IV-1.

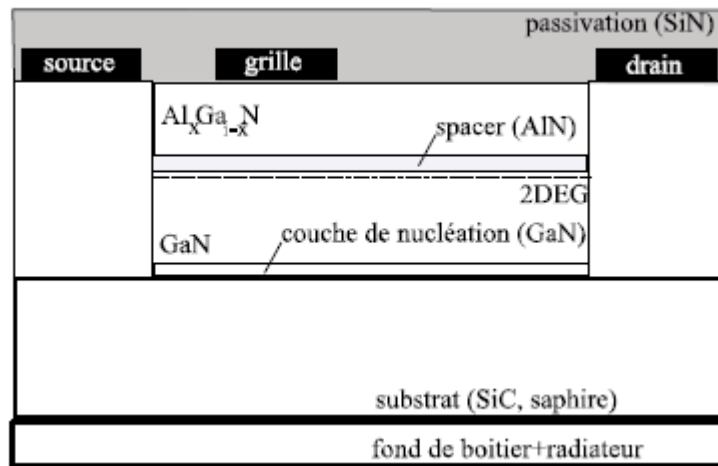


Figure IV.1 : vue en coupe simplifiée de la structure de base d'un HEMT AlGaN/GaN

Le substrat, constitué d'un matériau ayant d'excellentes propriétés thermiques (SiC) est brasé sur un support thermique en métal (fond de boîtier), permettant l'évacuation finale des calories au moyen d'un radiateur. Sur ce substrat, on fait croître par nucléation une couche, destinée à accueillir la croissance épitaxiale du GaN, puis celle de l'AlGaN. Une couche d'AlN (spacer) est enfin « insérée » afin de minimiser l'interaction entre le canal et les ions donneurs présents dans la couche d'AlGaN.

A l'équilibre thermodynamique, les niveaux de Fermi des deux matériaux (AlGaN/GaN) s'alignent, résultant en une discontinuité des bandes de valence et de conduction à l'interface. Cette discontinuité est à la base de la création d'un minimum local de l'énergie potentielle pour les électrons, ceux-ci se retrouvant piégés dans le puits de potentiel très étroit ainsi créé à l'interface, jouant le rôle du canal [Mathieu 01]. Les dimensions de la zone active étant de l'ordre du nanomètre, ce sont alors les effets quantiques qui sont mis à profit pour le transport des électrons : ceux-ci se déplaceront préférentiellement de façon parallèle au plan des couches (dans l'interface), formant alors un gaz d'électrons bidimensionnel (*2DEG : 2 dimensions electron gaz*), localisé à l'interface AlGaN/GaN. Sans entrer davantage dans le transport des électrons dans ce type de structures, qui ne fait pas l'objet de ce travail, on peut cependant qualitativement préciser que certains paramètres importants sont affectés par le confinement des électrons dans le puits quantique, ce qui permet notamment l'obtention d'une très grande mobilité électronique, conduisant à une forte densité de courant en haute fréquence. On contrôle la conductance du canal ainsi formé par le contrôle de la densité superficielle d'électrons avec l'électrode de grille. Toutes les propriétés intrinsèques du nitrure de gallium, associées à l'utilisation d'une hétérostructure à la base de la création d'un canal à très haute mobilité, contribuent à l'obtention de performances intéressantes du transistor HEMT de puissance, brique de base de la cellule active. Citons parmi celles-ci :

- **densité de puissance [W/mm]** : représente la puissance en sortie du transistor par unité de développement de grille. Ce paramètre facilite la comparaison entre transistors de technologies, tailles et procédés différents. L'augmentation de la densité de puissance maximale passe nécessairement par l'augmentation du courant de canal admissible I_{DSS} et de la tension d'avalanche V_{DSmax} . Des densités de puissance de l'ordre de 30-40W/mm ont été atteintes, se plaçant plus d'un ordre de grandeur au-dessus des performances de l'AsGa .
- **adaptation de sortie** : l'un des points critiques dans l'utilisation des transistors de puissance réside dans leur adaptation de sortie. A puissance de sortie donnée, l'objectif est d'augmenter l'impédance de sortie. Du fait du fort champ de claquage des

composants GaN, la possibilité de développer de la puissance sous forte tension autorise d'une part la polarisation du transistor sous forte tension V_{DS0} , ce qui permet, à puissance de sortie donnée, une diminution des capacités d'entrée/sortie, autorisant une adaptation du composant sur une bande passante plus large, et d'autre part, ceci permet, toujours à puissance de sortie fixée, de faire travailler le transistor avec un cycle de charge moins incliné : l'impédance à synthétiser sera plus haute, facilitant sa conception et minimisant les pertes dans le circuit d'adaptation de sortie.

- **fréquence de transition f_t et fréquence maximale d'oscillation f_{max}** : la fréquence de transition du transistor est définie comme étant la fréquence pour laquelle le module du gain en courant $G_i = |I_{DS}/I_{GS}|$ est égal à l'unité. Cette fréquence est alors :

$$f_t = \frac{g_m}{2\pi C_{gs}} \quad (VI.1)$$

La fréquence maximale d'oscillation du transistor est définie comme étant la fréquence pour laquelle le module du gain maximal en puissance est égal à l'unité. Son expression est :

$$f_{max} = \frac{f_t}{2\sqrt{R_g/R_{ds}}} \quad (VI.2)$$

Des fréquences f_t et f_{max} de l'ordre de 370GHz ont été rapportées [Higashiwaki 05, Yue 12], ouvrant la voie à des applications en gamme millimétrique pour les futures générations de dispositifs. Bien que très prometteurs, des effets dégradant les performances électriques finales du transistor, intrinsèques au matériau GaN, et notamment à sa maturité actuelle, moins avancée que le silicium ou l'AsGa, peuvent être décrits :

- **les effets de pièges** : Principal sujet d'investigation actuel sur le GaN, ils affectent les performances électriques du transistor, provoquant une décroissance importante de l'excursion maximale du cycle de charge en puissance, par réduction du courant I_{DS} en sortie. Les pièges trouvent leur origine dans différents types de défauts présents dans l'épithaxie, venant de la fabrication du transistor. Ils peuvent alors être séparés selon leur localisation dans la structure : au-dessus de la couche donneuse d'AlGaIn (pièges de

surface, activés par un changement de polarisation de grille (effets de gate-lag)), ou bien sous le canal, dans le buffer GaN (pièges de buffer, activés par un changement de polarisation de drain (effets de drain-lag)). D'un point de vue électrique, ces défauts sont des états énergétiques libres capables de capturer des porteurs libres, puis de les réémettre, modifiant la conductivité apparente du canal. Les constantes de temps de capture (τ_{capture}) et d'émission ($\tau_{\text{émission}}$) des porteurs libres étant très différentes (typiquement, τ_{capture} est de l'ordre de la dizaine de ns, et $\tau_{\text{émission}}$ est de l'ordre de la ms ou plus), les phénomènes de pièges participent aux effets mémoire BF.

- **la notion de fiabilité et de vieillissement du transistor** : Les HEMT sont sujets à des phénomènes de dégradation dus au stress RF encore mal connus et à investiguer. La difficulté de dissocier tous les mécanismes de défaillance réside dans leur nature statistique et multiphysique, précisément parce que les HEMT AlGaIn/GaN travaillent à de fortes tensions de drain, des champs électriques intenses et des températures élevées. Un fort champ électrique favorisant l'apparition de porteurs dits « chauds », capables de produire le phénomène d'ionisation par impact, principal phénomène de dégradation. Afin de limiter le vieillissement du transistor HEMT GaN on impose une sous-utilisation par rapport aux limites de fonctionnement, notamment sur la tension de polarisation de drain, avec comme conséquence la baisse de la puissance en sortie.
- **les effets thermiques** : Lors de son utilisation, le transistor de puissance est soumis à de fortes contraintes thermiques du fait des densités de puissances atteintes. Celles-ci provoquent une détérioration des performances intrinsèques du matériau (mobilité des porteurs, conductivité...) provoquant une diminution du courant en sortie par auto-échauffement. L'évacuation de la chaleur en dehors de la zone active vers la face arrière représente une tâche ardue : ses très faibles dimensions, comparativement aux niveaux d'énergie thermique en jeu, nécessitent l'emploi de substrat à très forte conductivité thermique comme le SiC. L'utilisation de multiples chemins de dissipation (l'emploi de couches de passivation avec de bonnes propriétés thermiques, l'amincissement des substrats, ou de nouvelles techniques, comme le report flip-chip à base de nanotube de carbone), sont également des solutions possibles à l'étude. On retrouve toute l'importance

de minimiser la puissance dissipée par le transistor, par l'augmentation de son rendement dans l'amplificateur. Au niveau circuit dès la conception, ceci passe notamment par des techniques d'amplification à haut rendement que nous allons présenter.

IV.3 Les architectures à haut rendement

L'amélioration des performances de l'amplificateur RF, au travers du développement d'architectures innovantes fait l'objet d'un grand effort de recherche dans de nombreux laboratoires depuis de nombreuses années. Ceci est impulsé notamment par le développement des standards de communication, imposant des conditions de conception sévères sur les performances des chaînes de transmission, et notamment sur l'amplificateur d'émission. Le développement des circuits numériques dédiés (AWG, ADC, FPGA...) et la montée en gamme de l'instrumentation associée à l'amplificateur (générateurs, analyseurs...), conjointement à l'amélioration des performances des composants intégrés pour la gestion de puissance (transistors, diodes, switch...), permettent aujourd'hui de relever le défi imposé par la demande du marché des télécommunications. La figure II-2 représente la nécessaire évolution des solutions d'amplification, imposée notamment par l'augmentation du PAPR des formes d'ondes transmises, relative au développement des standards de communication.

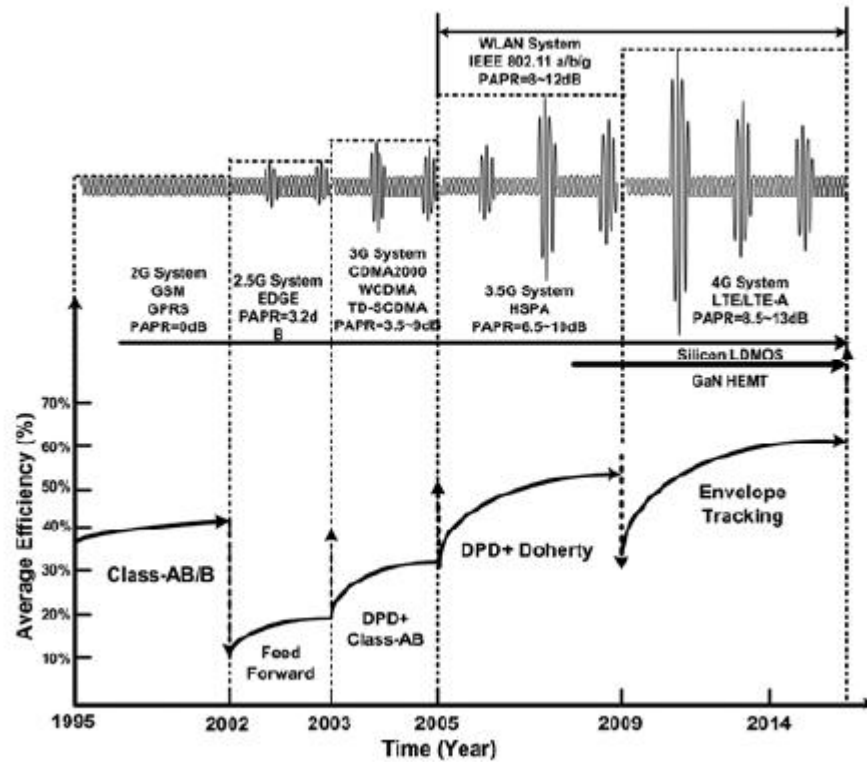


Figure IV.2 : évolution des standards de communication et des solutions d'amplification

Un tour d'horizon des architectures existantes montre que, de façon à optimiser le rendement énergétique, deux approches différentes sont possibles : l'action sur la polarisation et/ou les impédances présentées, ou bien l'action sur l'enveloppe complexe de modulation du signal.

L'action sur la polarisation et/ou les impédances de fermeture constitue ce que l'on appelle la famille des architectures cartésiennes. Le signal, défini par son enveloppe complexe de modulation (signaux IQ dans le plan cartésien), est traité efficacement par l'amplificateur au moyen d'une modification de ses paramètres extérieurs comme sa polarisation ou les impédances qui lui sont présentées. Parmi celles-ci, citons l'architecture Doherty et la technique d'*envelope tracking (ET)*.

Les performances énergétiques de l'amplificateur étant dégradées par les variations d'amplitude de l'enveloppe de modulation, une autre voie, que l'on peut qualifier de polaire, est basée sur la

transformation (non-linéaire) de l'enveloppe complexe, généralement effectuée en numérique, en bande de base, au moyen d'un algorithme dédié. A l'issue de cette transformation, on dispose alors de deux voies : l'une (voie RF) à enveloppe constante, contenant la modulation de phase, et l'autre (voie BF) modulée en amplitude. Parmi ces techniques, nous présenterons la technique d'EER (*envelope elimination and restoration*), ainsi qu'un développement plus récent, appelé *pulse polar transmitter*.

IV.3.1 Les architectures cartésiennes

IV.3.1.1 L'architecture Doherty

IV.3.1.1.1 Principe

L'architecture Doherty, proposée par W.Doherty en 1936 [Doherty 36] lorsqu'il travaillait aux laboratoires Bell, est basée initialement sur l'amélioration du rendement électrique des tubes microondes de fortes puissances sous condition de signaux modulés en amplitude. Elle a été appliquée la première fois sur les transistors à l'état solide par F.H.Raab . Largement étudiée et développée, elle est actuellement la seule solution d'amplification à puissance adaptative à haut rendement couramment implantée dans les émetteurs des systèmes de télécommunication

Comme il a été vu dans la section précédentes, les performances du transistor de puissance sont fortement impactées par les impédances de fermeture présentées, notamment en sortie, sur l'accès de drain. Un amplificateur en classe B offre un rendement de drain théorique maximal de 78.5% sur la charge R_{opt} maximisant l'excursion en tension de sortie au fondamental. Si l'excursion RF en entrée présente une diminution d'un facteur p en tension, le rendement chute alors à $78.5/p$, la charge R_{opt} ne suffisant plus à assurer l'excursion maximale en tension. Il faut augmenter sa valeur d'un facteur p pour assurer à nouveau l'excursion maximale, et ainsi retrouver le rendement maximal . On peut donc théoriquement maintenir le rendement à son maximum sous condition d'enveloppe variable, à la condition d'assurer la variation de la résistance de charge adéquate : c'est le principe de l'architecture Doherty qui est basée sur la modulation active de la charge vue par le transistor au fondamental.

Le schéma de principe de cette variation de charge est représenté à la figure IV-3. On considère deux transistors RF idéaux identiques, représentés par leurs sources de courant pilotées par des signaux en phase V_{GS1} et V_{GS2} .

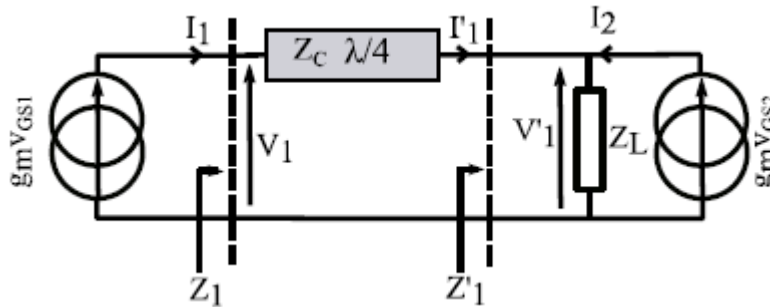


Figure IV.3 : principe de variation de la charge active utilisé dans la topologie Doherty. Le second transistor produit un courant à travers Z_L , induisant une augmentation de l'impédance Z_1' . La charge Z_1 vue par le premier transistor au fondamental derrière l'inverseur d'impédance diminue.

L'impédance Z_1' s'écrit :

$$Z'_1 = \frac{V'_1}{I'_1} = Z_L \left(\frac{I'_1 + I_2}{I'_1} \right) \quad (VI.3)$$

L'impédance vue par la source 1 à travers la ligne quart-d'onde s'écrit :

$$Z_1 = \frac{Z_C^2}{Z_L \left(\frac{I'_1 + I_2}{I'_1} \right)} \quad (VI.4)$$

En contrôlant la phase et l'amplitude du courant I_2 au fondamental, injecté dans la charge par le transistor 2, on peut donc faire varier la charge vue par le transistor 1.

Dans l'architecture Doherty classique, les sorties de deux amplificateurs sont combinées au travers d'une ligne $\lambda/4$ assurant une inversion d'impédance, de telle sorte qu'existe une modulation de charge active profitable. L'amplificateur principal (*carrier*) est alors polarisé en classe B, l'amplificateur auxiliaire (*peaking*), de même taille, en classe C. Il faudra introduire un déphasage en entrée de 90° afin d'assurer une bonne recombinaison au niveau de la charge par

l'utilisation d'une seconde ligne $\lambda/4$, ou d'un coupleur 0-90°. Du fait de l'utilisation de lignes $\lambda/4$, la topologie Doherty est bande étroite par nature, la bonne recombinaison des signaux sur la charge est donc contrainte à la largeur de bande de la modulation. La configuration de l'architecture Doherty est illustrée à la figure IV-4.

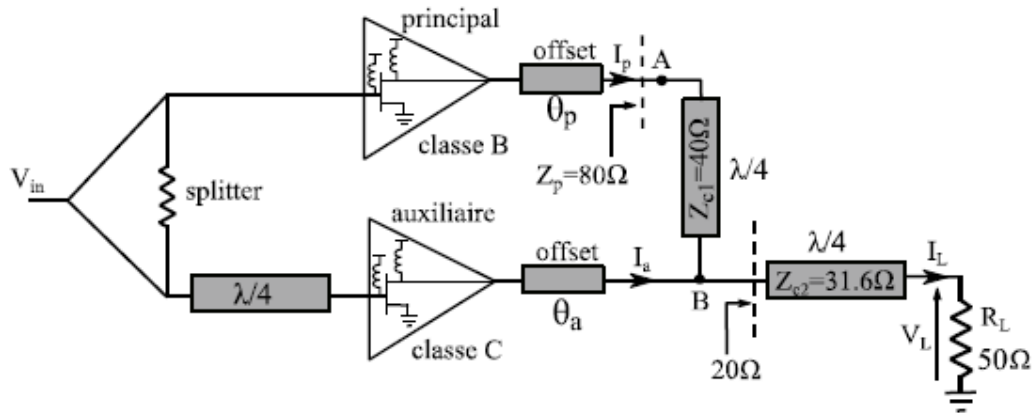


Figure IV.4 : topologie générale de l'architecture Doherty

On distingue alors trois zones de fonctionnement :

- Lorsque le niveau d'entrée est faible ($0 < V_{in} < V_{max}/2$), l'amplificateur auxiliaire ne fournit aucun courant, l'amplitude de l'excursion d'entrée étant insuffisante pour le faire passer en conduction (classe C). Il ne consomme pas de puissance DC Il présente alors idéalement un circuit ouvert à la RF (ajout d'un offset fixe θ_a). L'amplificateur principal est seul à produire un courant à travers la charge. La relation entre courant fondamental (I_p) en fonction de l'excursion d'entrée est donc linéaire (classe B). L'impédance Z_p vue par le principal au point A est alors :

$$Z_p = \left(\frac{Z_{C1}^2}{Z_{C2}^2} \right) R_L = \left(\frac{80^2}{63.2^2} \right) 50 = 80 \Omega$$

(VI.5)

Ce qui correspond au double de l'impédance optimale R_{opt} optimisant le cycle de charge pour un amplificateur fonctionnant en classe B à son excursion maximale ($I_{DSS}=1.5A$ et $V_{DSmax}=60V$).

chapitre-IV La technologie GaN pour l'amplification de puissance et les architectures à haut rendement associées

- Avec l'augmentation du niveau RF d'entrée, l'amplificateur principal arrive à la saturation. Son rendement de drain est alors maximal (théoriquement, 78.5% pour une classe B). Sur $Z_p=80_\Omega$, ceci se produit exactement à $V_{in}=V_{max}/2$, au moment où l'auxiliaire rentre en conduction. Il injecte alors un courant à travers la charge R_L : l'impédance vue au point B augmente. La transformation d'impédance assure une diminution de Z_p . Conjointement à l'augmentation du courant fourni I_p , cette diminution assure notamment que l'excursion maximale en tension en sortie de l'amplificateur principal est maintenue (pour cela, on montre qu'il faut notamment assurer $Z_{c1}=R_{opt}$) et donc qu'il travaille à son rendement maximal pour $V_{max}/2 < V_{in} < V_{max}$: c'est la zone de modulation active par l'auxiliaire de la charge vue par le principal.
- Au maximum d'excursion RF d'entrée, les deux amplificateurs travaillent alors sur la même charge R_{opt} (40_Ω), développant une tension maximale à travers la charge. Chacun contribue pour moitié à la puissance totale en sortie. Chacun fonctionnant à son rendement maximal, le rendement maximal de la classe B est à nouveau atteint.

Le tableau ci-dessous résume les valeurs des charges vues par les amplificateurs principal et auxiliaire (Z_p et Z_a) au fondamental :

Excursion d'entrée V_{in}	Z_p	Z_a
$0 < V_{in} < V_{max}/2$	$\left(\frac{Z_{C1}}{Z_{C2}}\right)^2 R_L = 2R_{opt}$	∞
$V_{max}/2 \leq V_{in} < V_{max}$	$\left(\frac{Z_{C1}}{Z_{C2}}\right)^2 \frac{1}{1 + I_a/I_p} R_L$	$\frac{Z_{C2}^2}{R_L} \left(1 + I_p/I_a\right)$
$V_{in} = V_{max}$	$\left(\frac{Z_{C1}}{Z_{C2}}\right)^2 R_L/2 = R_{opt}$	$2 \frac{Z_{C2}^2}{R_L} = R_{opt}$

Le fonctionnement du faible au fort niveau est alors représenté sur le cycle de charge, ainsi que les courant et tension au fondamental aux figures IV-5 et IV-6 :

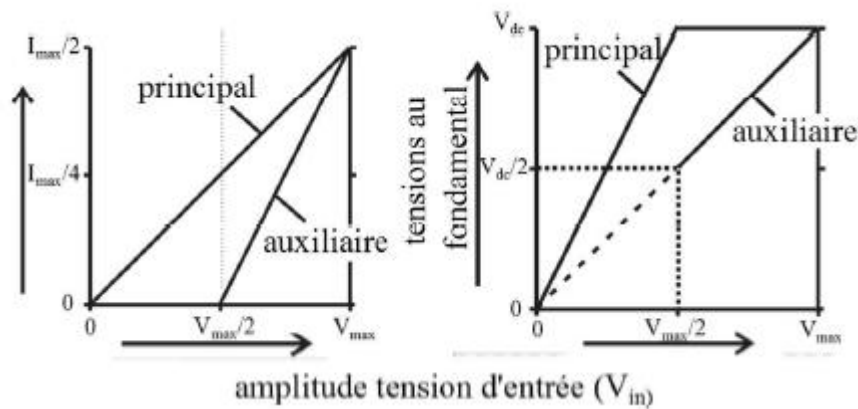


Figure IV.5 : représentation des courants et tensions au fondamental sur la charge RL en sortie de l'amplificateur Doherty

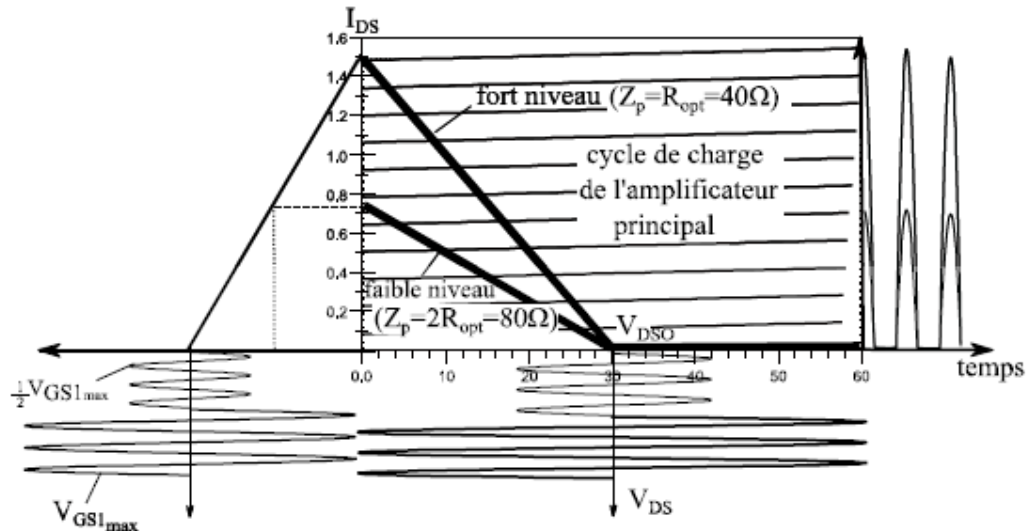


Figure IV.6 : représentation du cycle de charge à fort et faible niveaux de l'amplificateur principal (polarisé en classe B). L'excursion de sortie maximale ($V_{DSmax}/2 = V_{DS0}$) en tension est obtenue (sur R_{opt}) à la moitié de l'excursion maximale d'entrée ($V_{in} = V_{max}/2$). A partir de ce point, la mise en conduction de l'auxiliaire provoque alors une diminution de la charge vue par le principal (jusqu'à $R_{opt} = 40\Omega$), assurant le maintien de l'excursion maximale en tension du principal et donc son fonctionnement à rendement maximal

La figure IV-7 représente les courbes théoriques typiques de rendement de drain de l'architecture Doherty, utilisant deux transistors identiques (classe B et classe C), comparativement à la classe B classique. Le rendement maximal est atteint une première fois à la moitié de l'excursion ($V_{in} = V_{max}/2$, correspond à une décote en puissance de 6dB par rapport à l'excursion maximale). Dans la zone $V_{max}/2 < V_{in} < V_{max}$, une légère décroissance du rendement apparaît car l'auxiliaire ne produit alors pas encore une excursion en tension de sortie V_a maximale (sa contribution au rendement global étant fonction de la puissance qu'il délivre, le rendement global n'est cependant que faiblement impacté dans la zone de modulation de la charge). Finalement, le rendement maximal est à nouveau atteint lorsque les deux amplificateurs travaillent sur l'excursion de tension maximale, produisant le même courant à travers R_L .

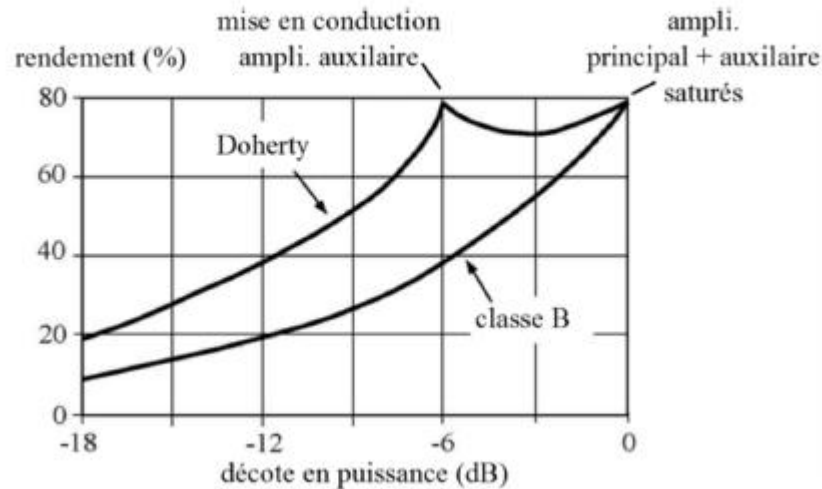


Figure IV.7 : rendement de l'amplificateur Doherty utilisant deux transistors identiques (classe B et C), comparativement à la classe B classique

Dans sa première approche, l'architecture Doherty utilise un transistor polarisé en classe C pour l'amplificateur auxiliaire. En utilisant deux transistors identiques, une polarisation en classe C du transistor auxiliaire le contraint cependant à fournir un courant au fondamental insuffisant pour assurer la modulation de charge nécessaire au principal. L'impédance de charge alors présentée étant trop grande, ceci conduit son cycle de charge à aller excursionner dans la zone ohmique, dégradant alors la linéarité finale. Afin de disposer de courants I_a et I_p identiques à la saturation, on cherche à augmenter la taille de l'auxiliaire. Pour cela, la solution la plus simple est l'utilisation de plusieurs amplificateurs auxiliaires identiques, associés en parallèle, et qui constitue la base de la topologie dite asymétrique

IV.3.1.1.2 Utilisation d'une topologie asymétrique

On montre que le premier pic de rendement peut être déplacé vers la gauche sur la figure II-7, élargissant ainsi la zone à haut rendement, si l'amplificateur principal et l'amplificateur auxiliaire sont de tailles différentes. On utilise alors un amplificateur auxiliaire de taille supérieure au principal grâce à la mise en parallèle de $N-1$ amplificateurs identiques au principal, comme représenté à la figure II-8. La saturation du principal, travaillant sur une résistance de charge NR_{opt} et correspondant à l'apparition du premier pic de rendement, présente alors un écart de

$20\log(N)$ par rapport à la puissance maximale pour laquelle les deux amplificateurs sont à la saturation (cf figure II-9). Ceci présente notamment un intérêt pour l'amplification des formats actuels de modulation à haute efficacité spectrale pour lesquels le PAPR des formes d'onde dépasse facilement les 6dB offerts par l'architecture classique.

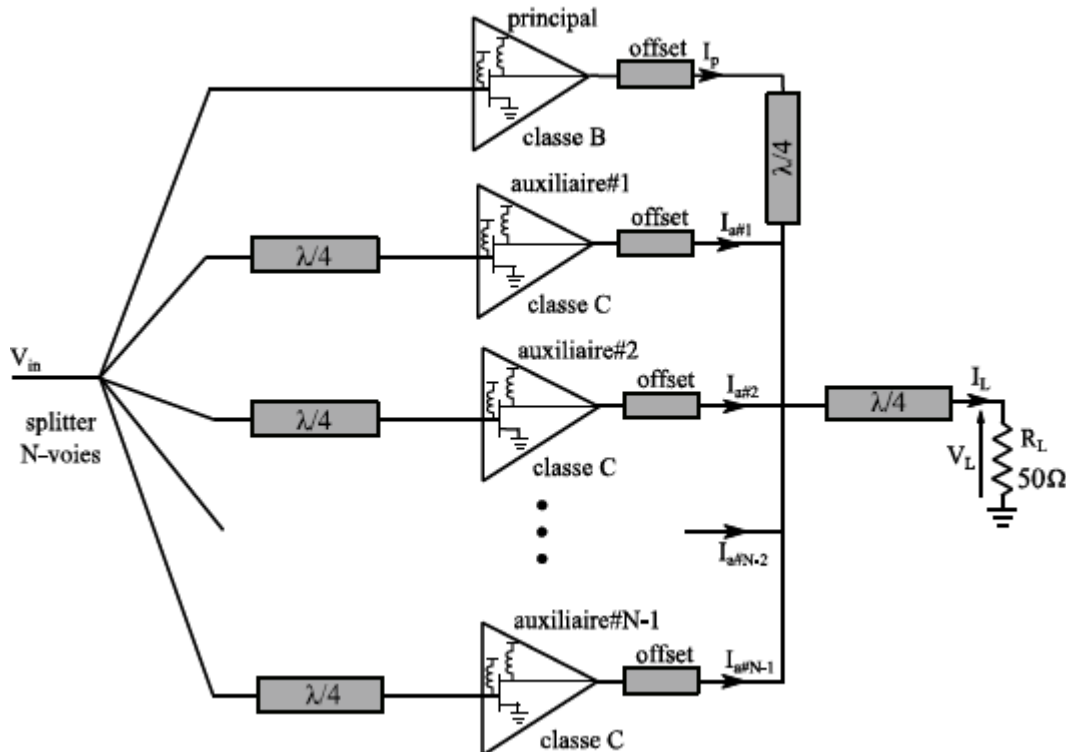


Figure IV.8 : utilisation d'une topologie asymétrique afin de disposer d'un amplificateur auxiliaire de taille N-1 fois supérieure

La difficulté réside alors dans l'utilisation du diviseur de puissance N voies dont les pertes d'insertion deviennent importantes, ainsi que la recombinaison des signaux en sortie. Pour cela l'utilisation d'une topologie distribuée, dont la recombinaison des ondes est faite au niveau du transistor, présente un intérêt particulier .

Du fait de l'asymétrie entre les deux voies, cette topologie présentera un écart plus grand entre minimum et maximum de rendement, correspondant à la zone de modulation active de la charge vue par le principal (lorsque les N-1 auxiliaires sont mis en conduction) et ce de façon d'autant plus marquée que le rapport de taille entre l'amplificateur principal et l'amplificateur auxiliaire est important

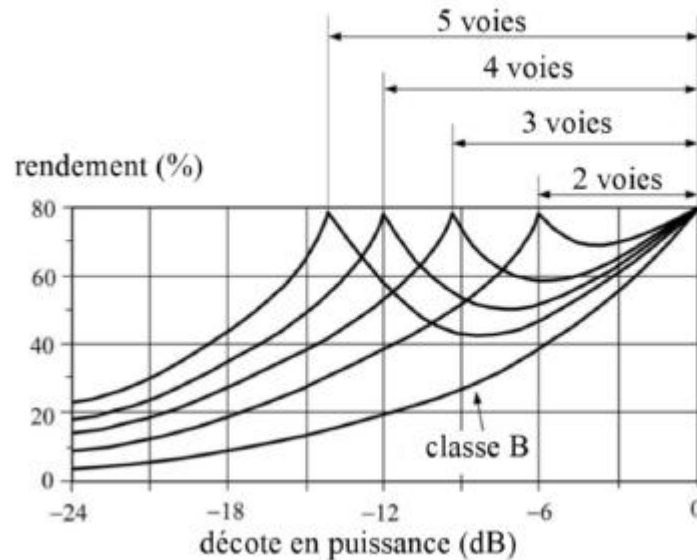


Figure IV.9 : rendement de l'amplificateur Doherty utilisant une topologie asymétrique N voies

IV.3.1.1.3 Utilisation d'une topologie multi-étages

Dans cette topologie, représentée figure IV-10, plusieurs amplificateurs auxiliaires sont combinés afin de prévenir la chute de rendement de l'architecture asymétrique. Bien que plus complexe dans sa conception, cette solution d'amplification sera donc préférée dans le cas où le signal présente un large PAPR. Elle est fondamentalement différente de l'architecture asymétrique, car basée sur l'utilisation de plusieurs amplificateurs auxiliaires de tailles différentes, dont les mises en conduction successives assurent plusieurs zones de modulation de charge actives.

Ainsi, le couple d'amplificateurs principal/auxiliaire#1 fonctionne exactement comme dans l'architecture Doherty classique, et peut être vu comme un seul et même amplificateur. Lorsque les deux commencent à saturer, l'auxiliaire#2 rentre alors en conduction, modulant la charge vue par le couple précédent, et permettant de les maintenir à la saturation. Par récurrence, les mises en conduction successives des N-1 amplificateurs auxiliaires assurent ainsi une large zone à haut rendement. Les courbes de rendement en fonction du nombre d'étages sont illustrées à la figure IV-11.

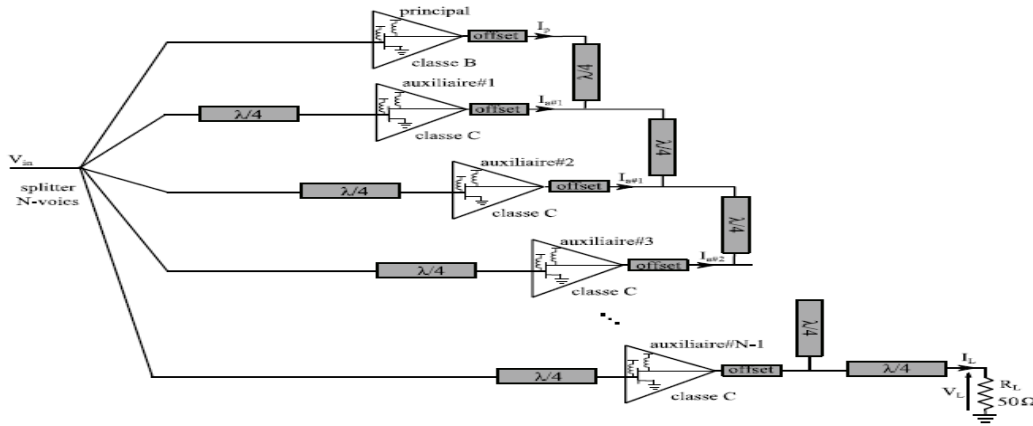


Figure IV10 : structure générale de la topologie Doherty multi-étages

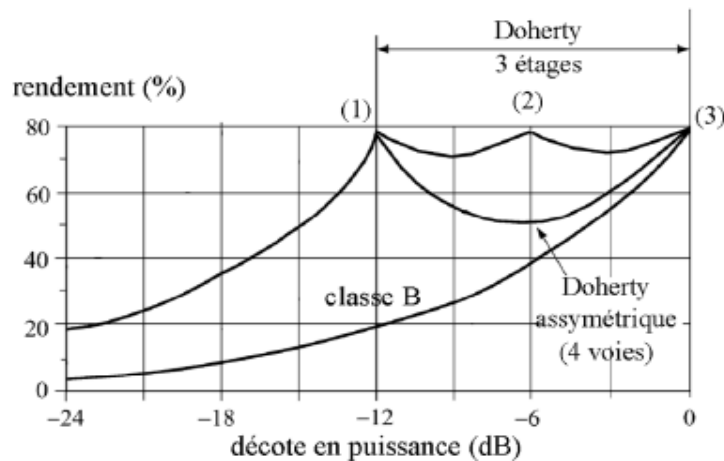


Figure IV.11 : rendement de la structure à 3 étages, comparativement à la structure asymétrique. (1) correspond à l'apparition de la saturation de l'amplificateur principal, conjointement à la mise en conduction de l'auxiliaire#1. (2) correspond à la saturation du couple (principal/auxiliaire#1), l'auxiliaire#2 rentre en conduction, il module la charge vue par le couple précédent. (3) correspond au point maximal de puissance, pour lequel tous les amplificateurs sont à la saturation.

IV.3.1.1.4 Contrôle adaptatif de la polarisation de grille de l'amplificateur auxiliaire

Une solution relativement simple pour disposer du niveau de courant au fondamental nécessaire à assurer la variation optimale de la charge du principal est proposée dans [Kim 12]. Elle consiste à assister la polarisation de grille de l'amplificateur auxiliaire afin de faire varier dynamiquement sa transconductance selon l'amplitude de la tension d'entrée V_{in} . Une fois l'amplificateur auxiliaire mis en conduction, la tension de polarisation de grille est alors remontée vers la classe AB, augmentant la quantité de fondamental injecté dans la charge. Ce contrôle appliqué sur l'auxiliaire permet l'utilisation de transistor de tailles identiques dans une architecture symétrique, évitant l'utilisation d'un transistor auxiliaire de taille supérieure et la baisse de rendement inhérente à sa sous-utilisations. Le fonctionnement à fort niveau correspond donc à la mise en parallèle de deux transistors identiques, et polarisés similaire en

IV.3.1.1.5 Doherty numérique:

Dans cette architecture, on génère numériquement, en bande de base, les deux signaux pilotant les amplificateurs principal et auxiliaire. L'amplitude et la phase relatives des deux signaux sont alors contrôlées de façon adaptative, afin d'optimiser le fonctionnement de l'architecture. Par rapport à la solution classique purement analogique avec une seule voie d'entrée, un degré de liberté est alors apporté. Ceci permet de relâcher les contraintes de conception liées à l'impact critique du diviseur de puissance d'entrée, mais également du choix du point de fonctionnement de l'amplificateur auxiliaire.

IV.4 Conclusion

La mise en place de nouveaux standards de transmission afin de répondre à la demande en Services de plus en plus importante (notamment en téléphonie mobile), passe par l'apparition des formats de modulation complexes pour lesquels les niveaux de PAPR et la largeur de bande passante imposent des critères de conception très sévères sur l'émetteur RF. Dans cette course à l'augmentation des débits, maintenir un niveau de linéarité sur une large bande passante, tout en assurant une consommation énergétique optimisée des systèmes de transmission, impose l'apparition de nouvelles solutions d'amplification.

chapitre-IV La technologie GaN pour l'amplification de puissance et les architectures à haut rendement associées

Dans la première partie, la technologie à base de nitrure de gallium a été présentée. Les propriétés uniques du transistor HEMT GaN, en termes de tenue en tension, de fréquences d'utilisation et de performances naturelles en linéarité, le présentent comme le candidat de choix pour l'amplification de forte puissance en hyperfréquence à l'état solide. La filière GaN, bien que faisant toujours l'objet d'études et de recherches importantes au niveau universitaire, a atteint une relative maturité industrielle (avec notamment l'apparition de composants en boîtier disponibles commercialement), ouvrant la voie à de nombreuses applications. De par les niveaux de puissance atteints, impliquant des phénomènes thermiques et électriques spécifiques, les dispositifs GaN nécessitent de nouvelles méthodes de conception et d'analyse. La seconde section s'est naturellement portée sur les principales architectures et topologies à haut rendement. De la présentation des principales, et en effectuant un tour d'horizon de ce qui est rapporté dans la littérature relative, des constats généraux se dégagent :

Il n'existe pas de solution « clef en main ». De très nombreuses solutions ont été proposées, chacune levant des verrous, mais également se heurtant à de nouveaux points durs : il demeure toujours le problème de parvenir à augmenter la bande passante, tout en assurant une consommation faible.

Ainsi, les architectures polaires, théoriquement très prometteuses au niveau du rendement, présentent l'inconvénient majeur d'augmenter la bande passante des signaux internes traités (par une transformation non-linéaire des coordonnées cartésiennes en coordonnées polaires). Elles sont donc limitées à des modulations bande étroite.

Les architectures cartésiennes présentent l'avantage de ne pas élargir la bande des signaux (bande de modulation). Cependant, l'ajout autour de l'amplificateur d'une circuiterie souvent complexe, afin d'optimiser son fonctionnement, conduit à un gain final sur le compromis rendement / linéarité modéré lors d'applications concrètes.

chapitre-IV La technologie GaN pour l'amplification de puissance et les architectures à haut rendement associées

Se basant sur ce constat général, il a été étudié dans ces travaux l'amplification au voisinage de la classe B (présentant une grande simplicité et de bonnes performances en rendement), associée à une commande dynamique de la polarisation de grille pour gérer une linéarisation en back-off. Potentiellement, cette approche est basée sur l'utilisation d'un circuit de contrôle de grille basse puissance, donc basse consommation et qui peut de ce fait opérer pour de larges bandes de modulation.

Nous aborderons ainsi successivement dans les chapitres suivants, la mise en place d'un système de mesure servant au développement de cette solution et la réalisation et la caractérisation d'un démonstrateur.

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 semi conducteurs 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_{0.28}N ou AlIn_{0.28}N, 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 représenté la couche donneuse, suivie du canal GaN contient dans sa zone supérieure, le gaz bidimensionnel (2DEG) vient ensuite des couches suppliantes de GaN. Le contact Schottky est représenté par la grille de longueur de 2µm. La densité de charge à l'interface Al_{0.28}Ga_{0.72}N/GaN est due principalement à la polarisation 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 a base de GaN. Cette accroissement offre aussi une élévation dans la valeur de pic de la transconductance ainsi une meilleur 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 conséquence affaibli 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 a la réduction de la longueur de la grille qui représente une manière technologique avantageés pour la progression de la capacité de contrôle de la grille des électrons et par conséquence 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 permit 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.

Références bibliographique :

[Adelmann'02] Adelman, H. C.

Growth and Strain Relaxation mechanisms of Group III Nitride Hetero-structures
Thèse de Doctorat de l'Université Joseph Fourier – Grenoble 1 (2002).

[Barjon'02] Barjon, J.

Etude d'un laser UV compact à semi-conducteurs (Al,Ga)N pompé par micro pointes
Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble (2002).

[Bon'99] Bon, M., Scavenec, A.,

Transistors et circuits intégrés à hétérostructures III-V
Techniques de l'Ingénieur, traité Électronique, E 2 450, 1999.

[Castagné89] Castagné, R., Duchemin, J.P., Gloanec, M., Rumelhard, Ch.,

Circuits intégrés en Arséniure de Gallium, Physique, Technologie et Règles de conception
Collection Technique et scientifique des Télécommunications, MASSON 1989.

[Clei'96] Clei, A., Post, G.,

Les transistors à effet de champ à hétérojonction sur InP
L'écho des Recherches N° 166, 4e Trimestre 1996.

[Duboz'95] Duboz, J. Y.,

Matériaux semi-conducteurs à grand gap III-V à base de GaN
Techniques de l'ingénieur, traité électronique, pp. 1-23, E 1995.

[Fang'98] Fang, Z.-Q., Look, D.C., Kim, W., Fan, Z., Botchkarev, A., Morkoc, H.,

Deep centers in n-GaN grown by reactive molecular beam epitaxy
Appl. Phys. Lett. 72 (1998) 2277.

[Gassoumi'06] Gassoumi, M, Bluet, J.M, Chekir, F, Dermoul, I, Maaref, H, Guillot, G,
Minko, A, Hoel, V, Gaquière, C.

Investigation of traps in AlGaIn/GaN HEMTs by current transient spectroscopy
Materials Science and Engineering: C, Volume 26, Issues 2-3, March 2006, Pages 383-386.

[Götz'94] Götz, W., Johnson, N.M., Amano, H., Akasak, I. i,

Deep level defects in n-type GaN
Appl. Phys. Lett. 65 (1994) 463.