



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique
Université El-wancharissi de Tissemsilt



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Sciences et de la Technologie

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme
de Master académique en

Filière : **Electronique**

Spécialité : **Instrumentation**

Présenté par : **HIDRA Ilyas Ghalem**

CHEHAT Mhamed

Thème

**Etude par simulation de l'optimisation des
hétérostructures HEMTs à base de nitrure de
gallium**

Soutenu le, 20/06/2022

Devant le Jury :

Dr. HAMDANI Mostefa	Président	M.C.B	Univ-Tissemsilt
Dr. CHEBBAH Kheira	Examineur	M.C.B	Univ-Tissemsilt
Dr. DOUARA Abdelmalek	Encadreur	M.C.B	Univ-Tissemsilt

Année universitaire : 2021-2022

Dédicaces

Je dédie ce travail

*Tout d'abord, Dieu merci qui m'a aidée à réaliser
ce modeste travail*

*A mes chers parents ma mère et mon père
Pour leur patience, leur amour, leur soutien et
leur Encouragements*

*A mes frères : Houari, Zine Eddine, Mohamed,
Mourad*

A mes Soeurs

A mon binôme Ilyas

A Tous Mes Collègues et Mes Amis

A tous ceux que j'aime.

M. Chehat Mhamed

Dédicaces

*Avec tout mon amour éternel et avec
L'intensité de mes émotions.*

Je dédie ce mémoire :

A Mon cher père et Ma mère

*Je n'oublie pas ses sacrifices pour leur
encouragement : je vous souhaite la joie et de
bonne santé.*

A mon binôme Mhamed

A Tous Mes Collègues et Mes Amis

A tous ceux que j'aime.

M. Hidra Ilyas Ghalem

Remerciements

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

Nous adressons nos remerciements à notre encadreur **M. DOUARA Abdelmalek** Maître de Conférences au Département d'électronique de la Faculté de Technologie de l'Université de Tissemsilt, pour son aide consistante, ses conseils judicieux, pour ses remarques objectives et pour son encadrement afin de mener à bien ce modeste travail.

Nous exprimons notre profonde gratitude à **M. RABHI Abdelaziz** Maître de Conférences au Département d'électronique de la Faculté de Technologie de l'Université de Tissemsilt, pour l'intérêt qu'il a accordé à ce travail en acceptant de le juger et de présider le jury.

Nous sommes très honorées de la présence dans ce jury de mémoire de **M^{Mlle} CHEBBAH Kheira**, Maître de Conférences au Département d'électronique de la Faculté de Technologie de l'Université de Tissemsilt, qu'elle trouve ici le témoignage de nos sincères remerciements pour avoir accepté de juger et d'évaluer ce travail.

Sommaire

Table des matières

Table des matières.....	01
Table des figures.....	05
Liste des tableaux.....	08
Introduction générale.....	10
Chapitre I : Propriétés générales du nitrure de Gallium.....	13
I.1 Introduction.....	14
I.2 Les matériaux III-V.....	15
I.3 Le nitrure de gallium (GaN).....	15
I.3.1 Structure cristalline du GaN.....	16
I.3.1.1 Structure cristalline zinc blende des nitrures.....	16
I.3.1.2 Structure cristalline wurtzite des nitrures	16
I.3.2 Les différents substrats utilisés pour la croissance de GaN.....	17
I.3.2.1 Le saphir (Al_2O_3).....	17
I.3.2.2 Le silicium (Si).....	17
I.3.2.3 Le substrat carbure de silicium (SiC).....	17
I.4 Les hétérostructures à base de nitrures.....	18
I.4.1 Propriétés générales des matériaux III-N.....	19
I.4.2 Les caractéristiques générales du nitrure de gallium (GaN).....	20
I.4.2.1 Les matériaux grand-gap.....	20
I.4.2.2 Champ critique ou champ de claquage.....	20
I.4.2.3 Conductivité électrique, résistivité, conductivité thermique.....	20

Table des matières

I.4.2.4	Mobilité des électrons.....	21
I.4.2.5	Largeur de bande interdite (gap).....	21
I.4.2.6	Polarisation spontanée et piézoélectrique.....	22
a.	Polarisation spontanée	23
b.	Polarisation piézoélectrique.....	25
I.5	La croissance des nitrures d'éléments.....	27
I.5.1	Techniques d'épitaxie employées dans la filière GaN.....	27
I.5.1.1	Croissance MOVPE.....	27
I.5.1.2	Croissance MBE.....	28
I.5.1.3	Croissance HVPE	29
I.6	Domaines d'applications de matériau III.V.....	29
I.7	Conclusion.....	32
	Références Bibliographiques.....	33
	Chapitre II : Généralités sur le Transistor HEMT.....	36
II.1	Introduction	37
II.2	Les transistors à effet de champ	38
II.2.1	Présentation générale	38
II.2.1.1	Généralités	38
II.2.2	Le transistor MESFET	38
II.2.3	Le transistor HEMT	39
II.2.3.1	Le HEMT à base d'AlGa _x N / GaN	39
II.3	Les hétérostructures de matériaux	40
II.4	Généralités sur les transistors à haute mobilité électronique (HEMTs).....	41
II.4.1	Historique	41
II.4.2	Structure physique du transistor HEMT Al _x Ga _{1-x} N/GaN.....	41

Table des matières

II.4.3	Description des couches d'un transistor HEMT	42
II.4.4	Concentration de porteurs dans une hétérojonction AlGa _N /Ga _N	43
II.5	Principe de fonctionnement d'un HEMT.....	44
II.6	Performances des composants HEMT à base de Ga _N	46
II.8	Conclusion.....	48
	Références Bibliographiques.....	49
	Chapitre III : Résultats et interprétations.....	51
III.1	Introduction.....	52
III.2	Présentation SILVACO.....	52
II.2.1	Présentation ATLAS	53
III.3	Caractéristiques électriques des transistors HEMTs.....	55
III.4	Résultats et discussions.....	58
III.4.1	Variation de l'épaisseur de la couche tampon Ga _N	59
III.4.2	Influence du dopage de la couche barrière AlGa _N	60
III.4.3	Variation de la fraction molaire (x)	62
III.4.4	Simulation à différentes tensions	63
III.5	Conclusion	65
	Références Bibliographiques.....	66
	Conclusion générale.....	67
	Résumé.....	69

Liste des Figures

Chapitre I : Propriétés générales du nitrure de Gallium

Figure I.1: Structure cristallines possibles pour les semiconducteurs III-V.....	16
Figure I.2 : Représentation des séquences de couches d'atomes donnant lieu à deux polarités différentes.....	23
Figure I.3 : Génération d'un champ électrique E par la polarisation spontanée.....	24
Figure I.4 : Plan d'atomes d'une structure wurtzite de GaN contrainte et répartition des moments dipolaires (Face Ga)	25
Figure I.5 : Polarisation piézoélectrique dans le GaN	26
Figure I.6 : Gammes de puissances accessibles en fonction de la fréquence pour différents matériaux semiconducteurs	31

Chapitre II : Généralités sur le Transistor HEMT

Figure II .1 : Transistor à effet de champ à grille Schottky, le MESFET.....	39
Figure II.2: Diagrammes schématiques montrant les différents types d'hétérojonction.....	40
Figure II.3 : Structure générale et différentes couches du HEMT AlGaIn/GaN.....	42
Figure II.4: Structure AlGaIn/GaN à face Ga, où GaN est relaxé et AlGaIn contraint en tension.....	44
Figure II.5 : Structure de bande d'un HEMT en présence d'un potentiel de grille.....	45
Figure II.6 : Feuille de route des domaines de commercialisation des HEMTs à base de GaN en fonction des fréquences de fonctionnement	47

Chapitre III : Résultats et interprétations

Figure III.1 : Schéma synoptique des modules utilisés dans la simulation par TCAD SILVACO	54
Figure III.2 : Le logiciel Silvaco en cours d'exécution.....	55
Figure III .3 : Comparaison des caractéristiques courant-tension d'un transistor HEMT.....	56
Figure III .4 : Caractéristiques de sortie $I_{DS}(V_{DS})$ d'un transistor HEMT à mode	

d'enrichissement	58
Figure III.5 : Structure de transistor HEMT $Al_xGa_{1-x}N/GaN$ étudié.....	59
Figure III.6 : Caractéristiques de sortie de HEMT $Al_{0.2}Ga_{0.8}N / GaN$ pour différentes valeurs de l'épaisseur de couche tampon GaN.....	60
Figure III.7 : Caractéristiques de transfert du HEMT $Al_{0.2}Ga_{0.8}N / GaN$ pour différentes valeurs de l'épaisseur de couche tampon GaN.....	60
Figure III.8 : Caractéristiques de sortie de HEMT $Al_{0.2}Ga_{0.8}N / GaN$ pour les différentes valeurs de N_D (δ).....	61
Figure III.9 : Caractéristiques de transfert du HEMT $Al_{0.2}Ga_{0.8}N / GaN$ pour les différentes valeurs de N_D (δ)	62
Figure III.10 : Caractéristiques de sortie de HEMT $Al_xGa_{1-x}N / GaN$ pour différentes valeurs de fraction molaire (x).....	63
Figure III.11 : Caractéristiques de transfert du HEMT $Al_xGa_{1-x}N / GaN$ pour les différentes valeurs de l'épaisseur de canal (GaN).....	63
Figure III.12 : Caractéristiques de sortie de HEMT $Al_{0.2}Ga_{0.8}N / GaN$ pour les différentes valeurs de VGS.....	64
Figure III.13 : Comparaison entre les résultats de simulations et expérimentale de Caractéristiques de sortie de HEMT $Al_{0.2}Ga_{0.8}N / GaN$	64
Figure III.14 : Comparaison entre les résultats de simulations et expérimentale de Caractéristiques de transfert de HEMT $Al_{0.2}Ga_{0.8}N / GaN$	65

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Extrait de tableau périodique.....	15
Tableau I.2 : Propriétés des principaux substrats pour le GaN.....	18
Tableau I.3: Propriétés des matériaux III-N.....	19
Tableau I.4 : Paramètres de la variation de la bande interdite en fonction de la température.....	22
Tableau I.5: Valeurs numériques théoriques de P_{SP}	24
Tableau I.6: Valeurs numériques des constantes piézoélectriques et élastiques de GaN, AlN, InN.....	26
Tableau II.1 : Caractéristiques de quelques composants commercialisés par les industriels spécialistes dans la fabrication des HEMTs à base de GaN.....	47

Introduction générale

Le développement des systèmes de communications, civiles et militaires, se traduit par leur montée en puissance et en fréquence. Cette évolution apparaît pour les concepteurs comme une nouvelle contrainte sur les étages d'amplification et donc plus particulièrement sur les transistors de puissance qui les constituent.

Il s'agit de composants hyperfréquences hautes performances pour les systèmes d'émission-réception. Le potentiel des transistors HEMT (**H**igh **E**lectron **M**obility **T**ransistor) à base d'hétérostructures AlGa_xN/GaN a suscité un grand intérêt dans la communauté scientifique internationale, et il est certainement le plus étudié au monde. Ils sont devenus des candidats intéressants pour les applications hyperfréquences haute tension et haute puissance. En raison de la polarisation spontanée et de la polarisation piézoélectrique, ils peuvent générer un gaz d'électrons bidimensionnel (2DEG) avec une concentration de l'ordre de 10^{13}cm^{-2} à l'interface sans beaucoup de dopage. Le marché des composants de puissance constitués de ce matériau est en pleine expansion et est utilisé dans un grand nombre d'applications.

Le nitrure de gallium est un semi-conducteur III-V avec une large bande interdite, ce qui rend sa technologie différente des matériaux traditionnels à faible bande interdite tels que le silicium (Si) ou l'arséniure de gallium (GaAs). En plus de ses propriétés physiques et thermiques, le GaN a également la particularité d'être un matériau pyroélectrique et piézoélectrique. Cette particularité permet de réaliser des transistors HEMT de type AlGa_xN/GaN. On a montré que la polarisation spontanée et la polarisation piézoélectrique dans les matériaux GaN et AlN à structure wurtzite sont environ 10 fois supérieures à celles des matériaux III-V conventionnels.

Dans les matériaux III-N, la polarisation spontanée génère un champ électrique de 3 MV/cm, et la contrainte dans les hétérostructures pseudomorphiques Al_xGa_{1-x}N/GaN ou InGa_xN/GaN peut générer un champ de polarisation piézoélectrique d'environ 2 MV/cm. Ces fortes polarisations provoquées par les champs électriques produisent des densités de porteurs très élevées à l'interface.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres, le premier chapitre est une revue de l'intérêt pour les matériaux à base de GaN. Nous décrivons également les types de croissance et les problèmes liés à la sélection du substrat, et nous avons introduit la structure cristalline du GaN et ses propriétés électriques et thermiques.

Et dans le deuxième chapitre, nous présenterons le transistor HEMT de type AlGaIn/GaN, et on expliquera son principe de fonctionnement et le rôle des différentes couches qui le composent.

Dans le troisième chapitre, Nous présenterons les résultats de simulation destinés à rechercher les paramètres optimaux permettant d'augmenter les performances du transistor HEMT AlGaIn/GaN. Nous passerons ensuite à la présentation des caractéristiques courant – tension $I(V)$ à l'aide de simulateur commercial appelé Silvaco ATLAS.

Ce travail se terminera par une conclusion générale en mettant en valeur les principaux résultats obtenus.

Chapitre I

Propriétés générales du nitrure de Gallium

I.1 Introduction

Dans l'ensemble des matériaux, les semi-conducteurs III-V constituent une classe bien définie, avec des propriétés physiques particulières qui sont sources d'intérêt au plan de la connaissance fondamentale et à celui des applications [1]. Ces deux facteurs indissociables font l'importance de ces matériaux, malgré le nombre limité d'éléments et de composés semi-conducteurs.

En électronique rapide et en optoélectronique, les composés semi-conducteurs III-V sont préférables que d'autres (les propriétés du silicium par exemple sont insuffisantes : mobilités des porteurs relativement petites et transition électroniques indirectes au seuil d'absorption optique) [2].

On citera pour exemple quelques composés binaires, GaN, AlN, InN, ... Les propriétés de ces matériaux sont très intéressantes pour les performances de ces dispositifs [3].

Le nitrure de gallium (GaN) est un matériau sur lequel les recherches ont commencé dans les années 60 par Maurska et Tienjen [4], 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 300 K [5], 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 des hétérostructures de nitrures.

Dans ce chapitre, nous insisterons sur les propriétés et les caractéristiques structurelles du GaN, ainsi que les techniques de croissance nitrures d'éléments.

I.2 Les matériaux III-V

Les matériaux III-V sont constitués des éléments des colonnes IIIA et VA de la classification périodique des éléments (Tableau I.1). L'étude de leur structure de bandes montre toutefois, que les éléments les plus légers donnent des composés dont la bande interdite est large et indirecte, et dans laquelle la masse effective des électrons est élevée ce qui diminue leur mobilité. Des matériaux, comme les composés contenant du bore, ou de l'aluminium, sont ainsi moins intéressants pour l'électronique rapide.

Des semiconducteurs binaires comme (BN, GaN, AlN, InN) mais également les alliages ternaires et quaternaires qui en découlent, présentent des propriétés très intéressantes pour les applications hyperfréquence. Ces alliages ternaires et quaternaires sont réalisés par substitution partielle de l'un des éléments par un élément de la même colonne. On sait, par exemple, obtenir des alliages du type $Al_xGa_{1-x}N$ ou un type $Al_xIn_{1-x}N$.

Les matériaux III-V offrent donc une grande variété de compositions permettant de modifier leurs propriétés électroniques.

III	IV	V
5 B 10,81	6 C 12,01	7 N 14,01
13 Al 26,98	14 Si 28,09	15 P 30,97
31 Ga 69,74	32 Ge 72,59	33 As 74,92
49 In 114,82	50 Sn 118,69	51 Sb 121,75

Tableau I .1 : Extrait de tableau périodique.

I.3 Le nitrure de gallium (GaN)

Le nitrure de gallium (GaN) est un semi-conducteur III-V, souvent considéré comme un matériau dont les caractéristiques sont les plus prometteuses pour les applications de puissance en hyperfréquence à haute température. Le nitrure de gallium offre également la possibilité de réaliser de hétérojonction avec l'AlGaN, permettant la fabrication de transistors HEMTs [6].

De plus, les hétérostructures à base de GaN hexagonal permettent, par la maîtrise du champ piézoélectrique et de polarisation spontanée, d'obtenir des densités de porteurs dans le canal très importantes de l'ordre de 10^{13} cm^{-2} et un courant de saturation important [7].

I.3.1 Structure cristalline du GaN

Les nitrures III-N peuvent cristalliser suivant deux structures cristallines, dont l'une de maille hexagonale (wurtzite) et l'autre de maille cubique. La forme la plus utilisée est la maille de type wurtzite à cause de ses propriétés physiques avantageuses et pour sa facilité de croissance par rapport à l'autre structure.

I.3.1.1 Structure cristalline zinc blende des nitrures

Dans la structure zinc blende les atomes d'azote forment un empilement cubique à faces centrées dans lequel les atomes de gallium occupent la moitié des sites tétraédriques (voir la figure I.1 (a)). Cette structure est caractérisée par le paramètre de maille a , il varie entre 4.51 et 4,52 Å [6].

I.3.1.2 Structure cristalline wurtzite des nitrures

La structure wurtzite possède une cellule élémentaire de forme hexagonale constituée de 6 atomes de chaque groupe et consiste en l'empilement de deux sous réseaux cristallographiques représentant la maille hexagonale comme représentée sur la figure I.1(b)

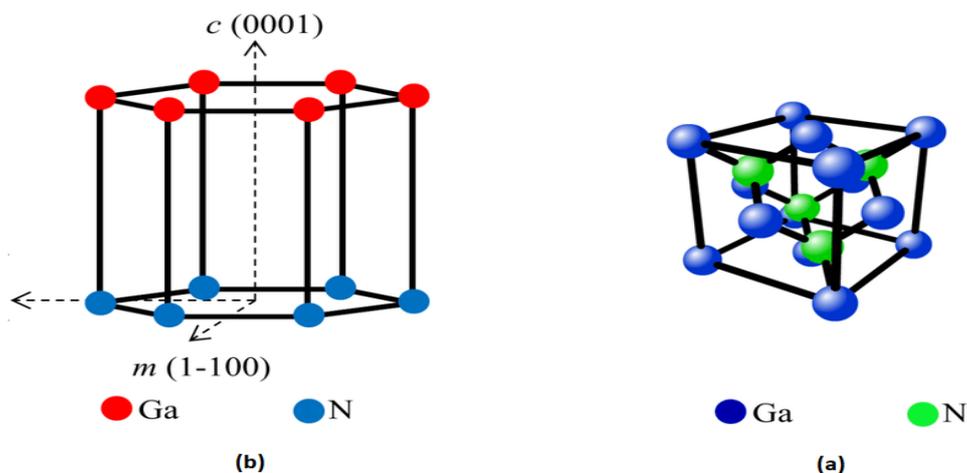


Figure I .1: Structure cristallines possibles pour les semiconducteurs III-V [8].

I.3.2 Les différents substrats utilisés pour la croissance de GaN

Idéalement, le substrat et les couches basses du composant sont réalisés dans le même matériau, éliminant ainsi une interface entre des matériaux présentant des mailles différentes. Malheureusement, la croissance du GaN massif étant très difficile, l'épitaxie du GaN est effectuée sur des substrats de substitution. Les substrats, les plus fréquemment, utilisés sont le saphir, le silicium et le carbure de silicium.

I.3.2.1 Le saphir (Al_2O_3)

Est semi-isolant, sa qualité cristalline est très bonne et il est disponible, à moindre coût et dans de grandes dimensions. Ce substrat révèle aussi plusieurs inconvénients, tels que: son fort désaccord de maille avec le GaN d'environ 16 % et son fort désaccord de coefficient de dilatation thermique avec le GaN suivant l'axe « a ».

De plus, la conductivité thermique du saphir est mauvaise (0.25W/cmK), ce qui est un facteur hautement limitatif pour les applications aux fortes puissances. Pour atténuer l'effet de désaccord de maille, on dépose une couche mince d'AlN. Le désaccord de maille résiduel reste important et induit une forte densité de dislocations (de l'ordre de 10^{10} cm^{-2}) [7].

I.3.2.2 Le silicium (Si)

Est utilisé lui aussi, comme substrat de croissance pour le GaN. Ce substrat offre l'avantage d'être disponible et à très faible coût, ainsi qu'une meilleure conductivité thermique. C'est pourquoi, le Si couramment utilisé comme substrat de croissance pour les couches de GaN. Les points faibles de ce substrat sont : un fort désaccord de maille de l'ordre de 17% avec le GaN, et une différence du coefficient de dilatation thermique supérieure à 35% [9], ce qui produit une plus grande densité de dislocations. Des techniques de croissance appropriées où des couches de nucléation complexes, composées d'AlN et de GaN réalisées avant la couche GaN principale, sont déposées permettant de réduire ces risques.

I.3.2.3 Le substrat carbure de silicium (SiC)

Contrairement aux autres cités précédemment, présente un meilleur accord de maille avec le nitrure de gallium GaN, alors il offre des conditions d'épitaxie plus favorables à cause d'un plus faible désaccord de maille et de coefficient thermique respectivement de 3.5 % et 25% [10]. De plus, il a l'avantage d'avoir de bonnes propriétés physiques telles qu'une

conductivité thermique excellente (4.9 W/cmK) permettant une dissipation aisée de la chaleur. Cependant, les inconvénients majeurs de ce substrat sont principalement leur coût important et leur taille réduite disponible.

Le tableau I.2 résume les caractéristiques des substrats usuels pour GaN. Ces dernières sont données en rapport avec les paramètres du GaN, soit un paramètre de maille $a = 3.189 \text{ \AA}$ et un coefficient d'expansion thermique de $5.59 \times 10^{-6} /\text{K}$ [11].

substrats	saphir	SiC	Si
Gap (eV)	> 9,0		
	6,22	3.3/3.0	1.12
	6,31		
Constante diélectrique relative	8,6	9.7	11.8
Constante thermique (W /K .cm)	0,5	4.9	1.5
Température de fusion (°C)	2030	2500	1410
Désaccord de maille avec GaN (%)	16	3.5	-17
Désaccord de coefficient d'expansion thermique (%)	-35	25	54

Tableau I .2 : Propriétés des principaux substrats pour le GaN.

I.4 Les hétérostructures à base de nitrures

La réalisation d'alliages ternaires à base de nitrure est un grand avantage du GaN par rapport au SiC. En effet, les hétérostructures réalisables telles qu' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ permettent d'avoir des LEDs et LASER couvrant l'ensemble du spectre visible. En microélectronique, les différents gaps des matériaux de ces hétéro-structures permettent d'obtenir des grandes discontinuités de bande de conduction, qui, associées aux polarisations spontanée et piézoélectrique, donnent des densités de porteurs très grandes à l'interface. La gravure du GaN est difficile par voie chimique, c'est pourquoi la plupart des composants à base de ce matériau ont une structure planaire. Ainsi, les MESFET ont été les premiers composants réalisés pour la simplicité de leur structure [12].

I.4.1 Propriétés générales des matériaux III-N

Le tableau I.3 donne à la température 300 K les paramètres de GaN, AlN et InN quand ces matériaux sont totalement relaxés.

Paramètres de Structure wurtzite à 300K	Unité	GaN	AlN	InN
Constante diélectrique statique	1	8.9	8.5	15.3
Gap	eV	3.39	6.2	1.89
Masse effective à 300k	m ₀	0.2	0.48	0.11
Mobilité électronique	Cm ² /Vs	1000	135	3200
Vitesse de saturation	Cm /s	2.5*10 ⁷	1.4*10 ⁷	2.5*10 ⁷
Champ de claquage	V/cm	>2.5*10 ⁶		
Conductivité thermique	W /cmK	1.3	2.85	
Température de fusion	°C	>1700	3000	1100
a ₀ [14]	Å	3.189	3.112	3.54
c ₀ [15]	Å	5.185	4.982	5.705
α [15]	10 ⁻⁶ K ⁻¹	5.6/7.7	4.2/5.3	
a ₀ /c ₀ [16]	Exp	1.6259	1.601	1.6116
a ₀ /c ₀	Cal	1.6336	1.619	1.6270

Tableau I.3 : Propriétés des matériaux III-N.

Une interpolation linéaire peut être définie à partir des valeurs du paramètre de maille (a_0) de l'AlN, de l'InN et du GaN. Cette dernière détermine avec une bonne approximation du paramètre de maille a_0 des composés ternaire $Al_xGa_{1-x}N$ en fonction du taux d'aluminium x soit [17] :

$$a_0 (Al_xGa_{1-x}N)[\text{Å}] = a_0 (GaN) - 0.077x = 3.189 - 0.077x [\text{Å}]$$

I.4.2 Les caractéristiques générales du nitrure de galium (GaN)

I.4.2.1 Les matériaux grand-gap

Une rapide étude des caractéristiques des semi-conducteurs grand-gap permet de mettre en avant leur influence sur les performances des transistors réalisés à base de ces matériaux.

I.4.2.2 Champ critique ou champ de claquage

Le champ de claquage ou champ critique (noté E_{cr} , unité : V/cm) est la valeur du champ ou de la tension maximum que peut supporter le composant

Les matériaux grands gap ont un champ de claquage très important. La valeur de ce champ est directement liée à la largeur de bande interdite par la fonction suivante :

$$E_{Cr} \propto E_g^{3/2} \quad (I. 1)$$

Ce qui signifie que plus le gap d'énergie n'est important, plus le champ de claquage n'est élevé, mais aussi, le champ de claquage diminue lorsque la température augmente. Ce paramètre est un des plus importants à prendre en compte pour les performances en puissance d'un transistor. Il traduit, en effet, la tension maximale de fonctionnement du composant. Cette propriété engendre donc une limitation de la puissance RF.

Plus le champ critique est élevé et plus on pourra réaliser des transistors de petites dimensions avec des dopages plus importants. En conséquence, le composant présentera entre autre une transconductance élevée, un meilleur gain en puissance, des fréquences plus élevées et un meilleur rendement dû aux résistances d'accès plus faibles.

I.4.2.3 Conductivité électrique, résistivité, conductivité thermique

On définit la conductivité électrique (notée σ , unité : S/m) ainsi que la résistivité (notée ρ , unité : $\Omega.m$) d'un matériau par les formules suivantes :

$$\sigma = q(n\mu_n + p\mu_p) \text{ et } \rho = 1/\sigma \quad (I. 2)$$

En effet, une faible résistivité des substrats provoque des courants de fuites importants, ce qui augmente la puissance dissipée du dispositif et diminue ainsi la puissance transmise par

celui-ci. Cependant, si on considère l'aspect thermique des matériaux, le contraire se produit. La conductivité électrique est directement liée à la conductivité thermique (notée K) :

$$K = L \cdot T \cdot \sigma \quad (\text{I.3})$$

Où : K est la conductivité thermique en $\text{W/cm} \cdot \text{K}$, L est le nombre de Lorentz ($2.45 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \Omega / \text{K}^2$), T est la température en K et σ est la conductivité électrique en S/cm .

Cela signifie qu'un matériau possédant une conductivité électrique importante a également une conductivité thermique importante.

Cette dernière propriété traduit la capacité du matériau à dissiper la chaleur. Les calories non dissipées provoquent une élévation de température du composant qui va entraîner une chute de la mobilité des électrons, causant une diminution du rendement et une génération plus forte de chaleur. C'est pourquoi, une forte conductivité thermique est préférable pour des applications de puissance.

I.4.2.4 Mobilité des électrons

La mobilité (notée μ , unité : $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$) étant liée au libre parcours sans choc dans le semiconducteur, toute modification du réseau cristallin entraîne une modification de celle-ci. En effet, l'ajout d'atomes dopants et/ou l'élévation de température, créent des perturbations dans le cristal et affectent la mobilité. La mobilité des électrons influe sur la valeur de la tension de coude V_{knee} .

Une faible mobilité de charges induira une augmentation de la résistance parasite, soit plus de pertes et donc moins de gain. De plus, ces effets s'intensifieront pour des fonctionnements aux hautes fréquences et /ou à des températures élevées.

I.4.2.5 Largeur de bande interdite (gap)

L'énergie de bande interdite est un facteur de la capacité du matériau à supporter une forte température, elle définit la température maximale de fonctionnement du transistor. Le matériau est considéré comme un semiconducteur à grand gap pour des valeurs supérieures à 2 eV [18]. Les variations de la largeur de la bande interdite peuvent être décrites approximativement par la fonction suivante [19].

$$E_g(T) = E_g(0) - \left((a \cdot 10^{-4}) \cdot \frac{T^2}{T + b} \right) \quad (\text{I.4})$$

Où les valeurs des paramètres $E_g(0)$, a et b sont résumées dans le Tableau I.4 suivant pour différents matériaux [7].

Semiconducteurs	$E_g(0)$ (ev)	a (ev /K)	b (k)
GaAs	1.519	5.405	204
Si	1.17	4.73	636
Ge	0.7437	4.774	235
GaN	3.509	7.32	700
AlN	6.118	17.99	1432

Tableau I .4 : Paramètres de la variation de la bande interdite en fonction de la température.

I.4.2.6 Polarisation spontanée et piézoélectrique

La piézoélectricité est l'aptitude de certains matériaux à produire une charge électrique dipolaire proportionnelle à la contrainte mécanique (traction ou compression) qui les déforme. L'effet piézoélectrique direct résulte essentiellement de l'existence de dipôles électriques internes créés par la séparation à l'échelle de la maille du centre de gravité des charges positives de celui des charges négatives sous l'effet d'une contrainte externe. Ce phénomène est réversible par l'application d'un champ électrique externe. Par le fait qu'ils sont non-centrosymétriques, les composés III-V sont piézoélectriques.

Cette dernière propriété est très importante pour les nitrures à cause de la forte polarisation de la liaison III-N, alors les électrons sont totalement localisés sur l'atome d'azote. En l'absence de contrainte ou de champ externes, certains cristaux présentent une polarisation électrique dite spontanée. Cette classe de cristaux est appelée pyroélectriques, à cause de la variation de la polarisation spontanée avec la température. Cette classe est composée de matériaux ferroélectriques tels que les nitrures d'éléments III (GaN, AlN, InN et leurs alliages).

a- Polarisation spontanée

Les composés cristallins non centrosymétriques présentent deux séquences de couches atomiques dans les deux directions parallèles opposées à certains axes cristallographiques, et par conséquent, deux polarités peuvent être observées le long de ces axes.

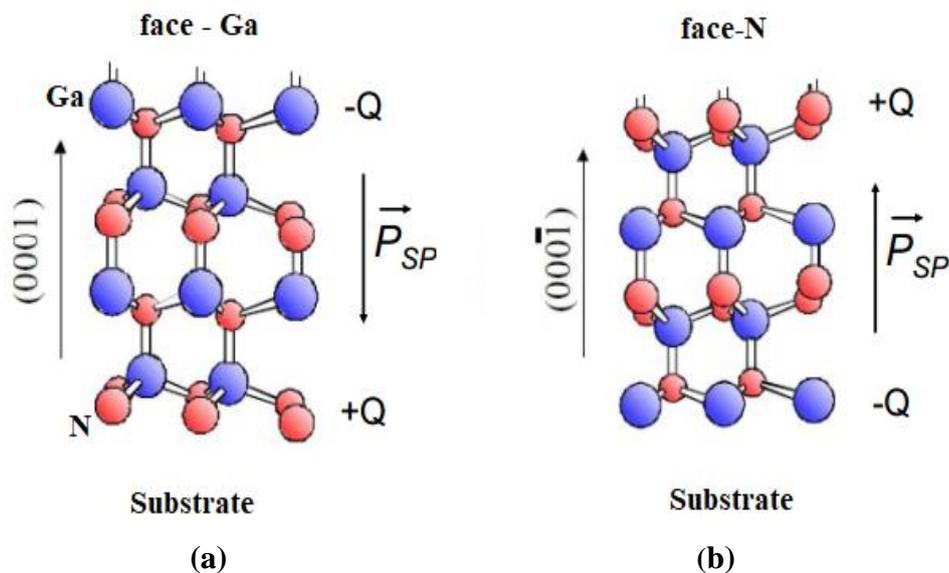


Figure I.2 : Représentation des séquences de couches d'atomes donnant lieu à deux polarités différentes [20].

Pour des composés binaires GaN de type Wurtzite, la séquence des couches d'atomes des constituants Ga et N est inversée le long des directions $[0001]$ et $[000\bar{1}]$. Alors les faces Ga et N sont respectivement associées aux directions $[0001]$ et $[000\bar{1}]$. Sachant que le vecteur de la polarisation spontanée est orienté de l'atome d'azote vers celui du gallium, les structures (a) et (b) de la figure I.2 présentent une polarisation spontanée de signe opposé.

Dans le GaN hexagonal, il y a apparition d'une succession de dipôles orientés dans la direction $[0001]$, et création alors d'un champ électrique dans le sens opposé à cette polarisation. Le GaN hexagonal relaxé possède ainsi une polarisation spontanée suivant l'axe « c » sans excitation extérieure appliquée. Tout ça, peut être schématisé par le dessin de la figure I.3.

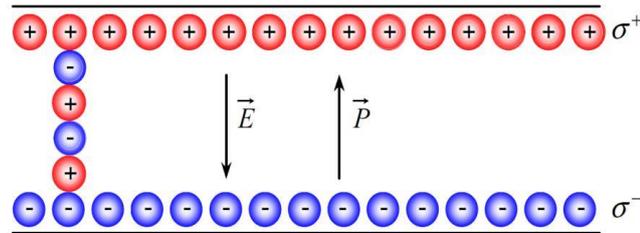


Figure I.3 : Génération d'un champ électrique E par la polarisation spontanée [21].

En d'autres termes, un échantillon de GaN, wurzite épitaxié suivant l'axe « c », présente sur chacune de ses deux faces des densités de charges fixes identiques mais de signes opposés. Ce matériau est par définition naturellement polarisé sans l'apport extérieur d'un champ électrique : c'est la polarisation spontanée. Dans une hétérostructure AlGaN/GaN, les valeurs numériques de la polarisation spontanée suivant l'axe « c » de différents nitrures d'éléments III sont résumées dans le tableau I.5. Ces données issues de la littérature ont été déterminées théoriquement par F. Bernardini et al [16].

matériaux	GaN	AlN	InN
$P_{SP} (C/m^2)$	-0.029	-0.081	-0.032

Tableau I .5 : Valeurs numériques théoriques de P_{SP} .

Les valeurs des polarisations spontanées du tableau I.5 sont négatives, signifiant que le vecteur P_{SP} est orienté dans le sens opposé à la direction [0001], c'est dans le cas d'une hétérostructure GaN à face Ga. Par contre, si la structure est à face N.

L'orientation du vecteur de polarisation spontanée est dans le sens inverse soit $P_{SP} > 0$. Une loi linéaire représentant l'évolution de la polarisation spontanée du composé ternaire $Al_xGa_{1-x}N$ en fonction du taux d'aluminium x peut être établie à partir des valeurs de polarisation spontanée d'AlN et GaN [22].

$$P_{SP}(x) = -0.052x - 0.029 \quad C/m^2 \quad (I.5)$$

b- Polarisation piézoélectrique

Les matériaux piézo-électriques sont des diélectriques particuliers qui permettent de transformer l'énergie de déformation élastique en énergie électrique, et inversement. Plus précisément, la piézoélectricité est la capacité de certains matériaux à se polariser lorsqu'ils sont contraints mécaniquement, la charge apparaissant à leur surface étant proportionnelle à la déformation engendrée.

Si ces matériaux sont des cristaux constitués par des paires non centrosymétriques tel que le GaN (cubique ou hexagonal), on observe une modification des moments dipolaires liés à la variation des distances inter atomiques.

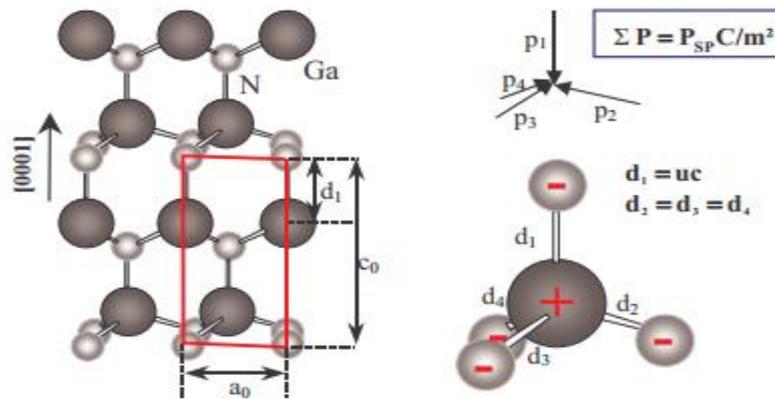


Figure I.4 : Plan d'atomes d'une structure wurtzite de GaN contrainte et répartition des moments dipolaires (Face Ga) [23].

La figure I.4 illustre le phénomène piézoélectrique d'une couche de nitrure de gallium contrainte. Dans le cas d'une hétérostructure $Al_xGa_{1-x}N/GaN$, les forces externes sont générées par le désaccord de maille existant entre les deux matériaux. Cette polarisation sera notée P_{pz} et elle donnée par l'expression [24] :

$$P_{PZ} = 2 \frac{(a - a_0)}{a_0} \left(e_{31} - e_{33} \frac{C_{13}}{C_{33}} \right) C / m^2 \quad (I.6)$$

Avec:

- e_{31}, e_{33} : sont les coefficients piézo-électriques.
- C_{13}, C_{33} : sont les constantes élastiques.
- a_0 : est le constante de maille d'un matériau sous aucune contrainte (relaxé).
- a : est la constante de maille d'un matériau contraint.

Il faut noter que les coefficients e_{33} , C_{13} , C_{33} sont toujours positifs, alors que e_{31} est négatif : le terme $(e_{31}-e_{33}C_{13}/C_{33})$ sera donc négatif, il en résulte que pour une déformation en tension biaxiale du cristal, (couches de GaN soumises à une contrainte extensive $a > a_0$), la polarisation piézoélectrique est négative comme la polarisation spontanée (figure I.5.a), pour une déformation en compression, la polarisation piézoélectrique est positive contrairement à la polarisation spontanée voir (figure I.5.b).

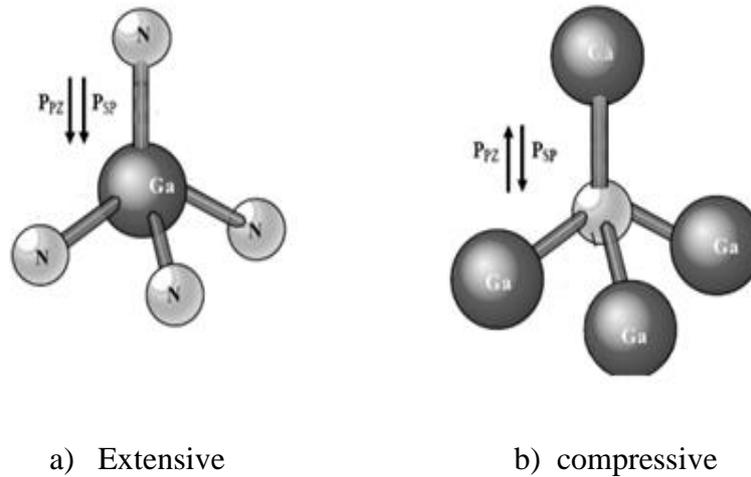


Figure I.5 : Polarisation piézoélectrique dans le GaN [25].

Le tableau I.6 résume les valeurs numériques des constantes piézoélectriques et élastiques de GaN, AlN et InN issues de la littérature .

matériaux	GaN	AlN	InN
e_{31} (C /m ²)	-0.49	-0.60	-0.57
e_{33} (C /m ²)	0.73	1.46	-0.97
C_{13} (GPs)	103	108	92
C_{33} (GPs)	405	373	224

Tableau I .6 : Valeurs numériques des constantes piézoélectriques et élastiques de GaN, AlN, InN [26].

Comme pour la polarisation spontanée, une interpolation linéaire est également utilisée à partir des valeurs obtenues du GaN et AlN pour représenter l'évolution des constantes piézoélectriques (e_{31}, e_{33}) et des constantes élastiques (C_{13}, C_{33}) du composé ternaire $Al_xGa_{1-x}N$ en fonction du taux d'aluminium x .

- $e_{31} = (-0.11x - 0.49) \text{ (C/m}^2\text{)}$
- $e_{33} = (0.73x + 0.73) \text{ (C/m}^2\text{)}$
- $C_{13} = (5x + 103) \text{ (GPa)}$
- $C_{33} = (-32x + 405) \text{ (GPa)}$

Les polarisations spontanées et piézoélectriques pour les matériaux GaN et AlN sont environ dix fois plus importantes que dans les matériaux III-V conventionnels (GaAs, InP). La polarisation spontanée peut générer des champs électriques de 3MV/cm dans les matériaux de type III-N et la contrainte de la couche supérieure des hétérostructures AlGaN/GaN ou InGaN/GaN peut produire un champ piézoélectrique d'environ 2 MV/cm [27].

Ceci engendre des champs électriques permettant la formation d'un gaz bidimensionnel d'électrons avec des densités de porteurs très élevées.

I.5 La croissance des nitrures d'éléments

Une présentation de toutes les techniques de croissance dépasserait le cadre de ce travail, nous nous bornerons donc à présenter les méthodes qui ont été utilisées dans la filière GaN.

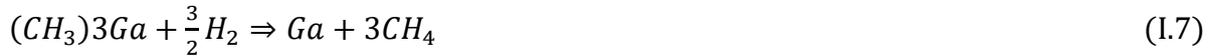
I.5.1 Techniques d'épitaxie employées dans la filière GaN

Les deux principales techniques d'épitaxie utilisées dans la filière GaN sont la MOVPE (Metal Organo Vapor Phase Epitaxy) et la MBE (Molecular Beam Epitaxy). La première présente une bonne vitesse de croissance et la deuxième, à faible vitesse de croissance, offre un très bon contrôle de l'épaisseur des couches déposées. Le choix de l'épitaxie peut permettre de choisir l'orientation du cristal de GaN ou de l'AlGaN. Une autre technique d'épitaxie dérivée de la MOVPE, appelée HVPE (Hybrid Vapor Phase Epitaxy), est employée dans la réalisation de substrats en GaN massif, grâce à sa très grande vitesse de croissance.

I.5.1.1 Croissance MOVPE

Cette technique, consiste à injecter un composé organique contenant l'atome métallique, du TMGa (Triméthylgallium) ou du TEGa (Triéthylgallium) pour le gallium, puis un gaz vecteur (dihydrogène H₂), pour véhiculer les composés vers le réacteur sur un substrat chauffé à 1000°C.

Le TMGa va se décomposer avec le H₂ pour former du gallium (Equation. I.7). Puis le gallium va s'associer par pyrolyse avec l'azote, provenant d'une source comme l'ammoniac (NH₃), pour former du GaN qui va se condenser sur le substrat selon l'équation I.8 :



Il a été mentionné que les composés carbonés obtenus lors de la réaction provenant de l'utilisation des organométalliques, peuvent être une source de contamination en créant des défauts électriquement actifs [28]. En définitive, cette méthode de croissance permet des vitesses de croissance de l'ordre de 30 μm/h.

I.5.1.2 Croissance MBE

La MBE (Molecular Beam Epitaxy) est une technique d'épitaxies réalisée sous ultravide. Le principe consiste à provoquer la condensation de flux atomiques ou moléculaires obtenus par évaporation de sources solides sur un substrat mono cristallin. La MBE conventionnelle ne peut pas être utilisée pour la croissance du GaN, car l'azote ne peut pas être dissocié en utilisant des cellules d'effusion classiques. Une cellule d'effusion est un dispositif constitué d'un creuset et d'un four, qui permet d'évaporer le matériau placé dedans. Différents types de cellules d'effusion existent selon la nature des matériaux à évaporer. Dans la croissance MBE du GaN, un faisceau de Ga sous forme de vapeur produit par une cellule d'effusion et de l'azote actif sont directement dirigés sur le substrat chaud pour former le film de GaN.

La chambre de bâti MBE peut être également équipée avec des cellules de Si ou de Mg pour le dopage de type n ou p, aussi bien que d'Al pour la croissance d'AlGaIn. L'ammoniac est la source d'azote actif la plus utilisée. L'azote actif doit être dissocié en azote atomique dans des cellules de dissociation à haute température. Des composés métallo-organiques peuvent être utilisés comme sources des éléments du groupe III qui peuvent réagir avec l'ammoniac près du substrat chaud pour former le GaN et ses différents alliages. Ces différentes sources ont inspiré des techniques de MBE hybrides, comme la Metal Organic MBE (MOMBE) [29], la Chemical Beam Epitaxy (CBE), et la Plasma Assisted MBE (PAMBE).

La technique MBE fournit un très bon contrôle des paramètres de croissance (au niveau de la mono couche) en temps réel et permet la réalisation d'hétéro-structures avec un contrôle très précis de l'épaisseur et du profil de dopage des couches, ainsi que de leur composition. Cependant, cette technique de croissance présente plusieurs limitations, comme un rendement de production faible, en raison de la faible vitesse de croissance de l'ordre de 1 µm/h, soit une mono couche par seconde, ou encore comme une forte densité de défauts en surface liée à des résidus de gallium.

I.5.1.3 Croissance HVPE

L'épitaxie HVPE (Hybrid Vapor Phase Epitaxy) est une technique dérivée de la MOVPE, la source de gallium est cependant différente. Les réacteurs utilisés pour la HVPE possèdent deux zones, qui sont une zone de source et une zone de croissance. Des gaz HCl et NH₃ sont injectés dans le réacteur à travers la zone de source. De l'azote est utilisé comme gaz porteur pour le HCl et le NH₃. Dans la zone de source, où la température est de 860°C, HCl

une zone contenant du Ga à l'état solide, pour former du GaCl, qui est ensuite injecté dans la zone de croissance. Il rentre alors en réaction avec le NH₃ à la surface du substrat pour former du GaN. L'équation régissant la réaction chimique de la formation du GaN est :



La température de croissance est habituellement comprise entre 950 et 1050°C. Le saphir est le substrat le plus souvent utilisé pour la croissance de couches épaisses de GaN par HVPE. De manière à augmenter la densité de nucléation de la couche de GaN sur le saphir [0001], un prétraitement au GaCl peut être fait, ou une couche tampon en ZnO peut être déposée.

L'épitaxie HVPE avec sa vitesse de croissance élevée (> 200 µm/h) apparaît comme une technique très attractive pour la production de couches de GaN épaisses (> 230 µm), pour former des wafers de bonne qualité.

I.6 Domaines d'applications de matériau III.V

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

système d'alliages de nitrure InGaAlN, des LEDs de longueurs d'onde allant de l'ultraviolet (UV) au bleu/vert peuvent être réalisées avec une très bonne efficacité.

De nombreuses autres applications sont possibles telles que les écrans de télévision à base de LED, l'éclairage automobile et peut-être l'éclairage général dans le futur. Les LEDs blanches peuvent être réalisées par revêtement de l'intérieur d'une LED UV avec un luminophore (par exemple du phosphore) pour convertir les photons ultraviolets en lumière visible.

L'optoélectronique s'est aussi intéressée aux lasers UV-bleu à base de GaN avec une gamme de longueur d'onde autour de 400 nm. La fluorescence induite par laser UV employée dans les domaines médicaux, tels que la dermatologie, la gynécologie et le traitement des tumeurs, a remporté un vif succès. Ces lasers sont aussi utilisés pour les nouvelles générations de lecteurs enregistreurs DVD appelés Blue-Ray Disc utilisés par Sony pour la première fois en 2003.

Dans le domaine de la microélectronique, la plupart des applications sont dirigées vers le développement de dispositifs haute fréquence/haute puissance. Les deux technologies à base de SiC et de GaN offrent l'avantage d'une densité de puissance élevée et de bonnes propriétés thermiques, ce qui permet d'obtenir des petits modules de puissance assez performants. Dans les systèmes nitrures, la structure couramment utilisée est la structure latérale de type HEMT.

Aujourd'hui, le plus gros marché potentiel concerne les stations de base destinées aux communications (satellites, téléphonie mobile...). Compte tenu de leurs avantages, les dispositifs à base de GaN rentrent en concurrence avec les technologies LDMOS (laterally diffused metal oxide semiconductor) à base de silicium et les HEMTs pseudomorphiques GaAs qui sont beaucoup moins chers mais aussi moins performantes. La réalisation des transistors bipolaires à hétérojonction (TBH) à base de GaN est complexe en raison de la difficulté d'atteindre un dopage de type p suffisamment fort dans la base.

En outre, la présence des dislocations peut générer des chemins de conduction parallèle dans ces dispositifs à conduction verticale et affecter leur fiabilité.

La figure I.6 montre les gammes de puissance accessibles en fonction des fréquences de fonctionnement pour certains semiconducteurs utilisés aujourd'hui dans la microélectronique. Nous remarquons que, contrairement au GaAs ou au silicium, dont l'utilisation se limite à des gammes bien déterminées en fréquence et en puissance, le GaN apparaît comme un bon candidat pour couvrir des domaines plus larges avec un bon compromis puissance-fréquence.

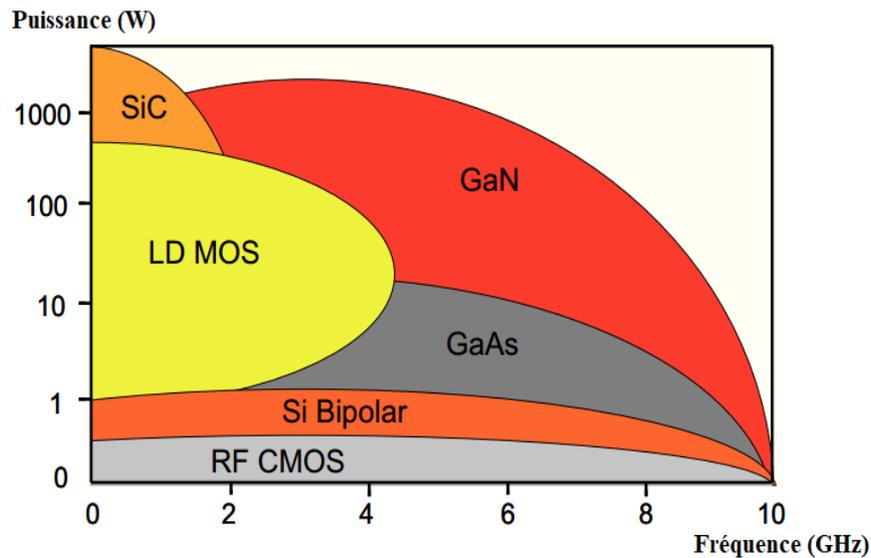


Figure I.6 : Gammes de puissances accessibles en fonction de la fréquence pour différents matériaux semiconducteurs [29].

Un autre domaine d'application est l'électronique haute température. Habituellement, les systèmes électroniques qui contrôlent les compartiments à haute température, comme un moteur à réaction, sont situés dans les régions froides. Cela nécessite un câblage entre le système électronique et les capteurs. Si les systèmes pouvaient être placés dans la zone à haute température, la quantité totale de câblage pourrait être réduite.

L'utilisation des composants à base de GaN présente un avantage du fait de leur capacité de fonctionnement dans un environnement qui peut atteindre 600° [30]. Cette température de fonctionnement est deux fois supérieure à celle des composants à base de Si sur isolant (SOI) qui ne dépasse pas 300°C.

I.7 conclusion

Dans ce chapitre on a présenté un résumé sur les nitrures de gallium, ses propriétés structurales, électriques et électronique, 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 n_s du 2-DEG dont la valeur s'évalue à 10^{13} cm^{-3} à l'interface des hétérojonctions.

Ces particularités ont été exploitées dans plusieurs domaines spécialement en optoélectronique pour la fabrication des LEDs pour le bleu, l'ultraviolet, des détecteurs UV et en micro-ondes pour des transistors fonctionnant à des fréquences et températures élevées.

Références Bibliographiques

- [1] B.Sophie,
Etude par microscopie à champ proche de matériau III-V pour émetteurs électroniques Planaires, thèse de doctorat, université de lille, 2008.
- [2] A.Rabehi,
Propriétés électriques et photoélectriques des diodes Schottky à base du matériau GaAs nitruré: Mesures et simulation, thèse de doctorat, université de Sidi Bel Abbès, 2017.
- [3] J. L.Pankove,
Optical processes in semiconductors, Dover publications Inc. 1971.
- [4] P.Agnès,
Caractérisation électrique et optique du nitrure de gallium hexagonal et cubique en vue de l'obtention d'émetteurs bleus, thèse de doctorat , université de lyon ,1999.
- [5] A.Douara,
Etude par simulation d'un transistor HEMT à base de AlGa_N/Ga_N, mémoire de magister, Université sidi belabess,2013.
- [6] S.M. Sze,
Semiconductor Devices - Physics and Technology 1985, ISBN 0-471-87424-8.
- [7] C. Charbonniaud,
Caractérisation et modélisation électronithermique non linéaire de transistors à effet de champ Ga_N pour l'amplification de puissance micro-onde, thèse de doctorat, Université de Limoges ,2005.
- [8] D.Yannick,
Etude de HEMTs AlGa_N/Ga_N à grand développement pour la puissance hyperfréquence - conception et fabrication - caractérisation et fiabilité, thèse de doctorat, Université de Lille, 2012.
- [9] M. Mostefaoui,
Caractérisation et simulation des dispositifs à base de matériaux appartenant à la filière des nitrures de l'élément III, thèse de doctorat,université de Sidi Bel Abbès, 2016 .
- [10] J. Y. Duboz,
Matériaux semi-conducteurs à grand gap III-V à base de Ga_N.

- [11] M. Werquin,
Etudes théoriques et expérimentales des transistors HEMTs de la filière nitrure de gallium pour les applications de puissance hyperfréquences, thèse de doctorat, université de Lille 2005.
- [12] D. Delage beaudeuf, P. Delescluse, P. Etienne, M. Laviro, J. Chaplart, N. T. Linh,
Electronics Letters, Vol. 16, No 17, Août 1980.
- [13] J. H. Edgar,
INSPEC publication, ISBN 0-85296-818-3.
- [14] H. Mathieu,
Physique des semiconducteurs et des composants électroniques DUNOD, ISBN 2-10-005654-9.
- [15] F. Bernardini, V. Fiorentini, D. Vanderbilt,
Spontaneous polarization and piezoelectric constants of III-V nitride Physical Review B, volume 56, numéro 16, octobre 1997, pp.10024-10027.
- [16] P. Chevalier,
Transistors à effet de champ à hétérojonction sur matériaux III-V pour applications Hyperfréquences, cours Tec 35, Eudil, Ecole polytechnique universitaire de Lille, 1999.
- [17] D.fatiha,
Modélisation de l'hétérostructure HFET AlGaIn/GaN incluant les effets électriques, Mémoire de magister , université de constantine,2007.
- [18] N. Ghalichechian,
Solid State Electronics Fall ,ENEE793, 2002.
- [19] S.M. Sze,
Physics and Technology, ISBN 0-471-87424-8, 1985.
- [20] J. Sylvain,
Croissance d'Hétérostructures à base de GaN sur substrat de silicium orienté (001): application aux transistors à haute mobilité d'électrons,thèse de doctorat, universite de Nice-Sophia Antipolis,2007 .
- [21] N. Thi Dak Ha,
Réalisation et caractérisation de hemts AlGaIn/GaN sur silicium pour applications à haute tension, thèse de doctorat, universite paris-sud,2013.

- [22] D.chahrazad,
Etude par simulation des phénomènes de polarisations et les contacts ohmiques dans les transistors HEMTS base de GaN , universite de constantine,2005.
- [23] B.samira-driad,
Réalisation et caracterisation de transistors HEMTs GaN pour des applications dans le domaine Millimetrique,thèse de doctorat,université de lille ,2013.
- [24] A.F.Wright,
Journal of Applied Physics, volume 82, numéro 6, septembre 1997, pp.2833-2839.
- [25] P. Ellinghaus,
Simulation of GaN/AlGaN heterostructures for a HEMT simulator, thèse de master, université de l'aquila ,2011.
- [26] H. Chu,
Thèse de doctorat de l'Université de Hong Kong University of Science and Technology (2004).
- [27] B. Lakhdar,
Modélisation des effets de la contrainte en surface et étude des effets thermiques dans les composants à base GaN mémoire de magister, 2008.
- [28] O.Menard,
Developpement de briques technologiques pour la realisation de diodes schottky sur nitrure de gallium .thèse doctorat ,2010.
- [29] G. Giuseppe,
AlGaIn/GaN heterostructures for enhancement mode transistors, International PhD in Nanoscience XXV cycle, université de Catania.
- [30] N. Benyahya,
Caractérisations et simulation des transistors HEMTs de la filière InAlN/GaN , thèse de doctorat, université sidi Bel-abbes ,2016

Chapitre II

Généralités sur le Transistor HEMT

II.1 Introduction

Le premier choix que doit faire tout concepteur de circuit intégrés monolithiques microondes porte sur les transistors utiliser. Dans le cas de la conception d'un amplificateur, les critères de choix du composant sont donnés par :

- ✓ La gamme de fréquences d'utilisation et le gain à obtenir.
- ✓ Le niveau de puissance de sortie à fournir et la tension d'alimentation disponible.

Les matériaux semiconducteurs III-N sont de bons candidats pour la fabrication de ces types de transistors et de diodes. Les matériaux semiconducteurs III-N présentent plusieurs avantages tels qu'un large bande interdite, une grande stabilité chimique, des propriétés mécaniques exceptionnelles ainsi que d'autres propriétés physiques remarquables. Ces semiconducteurs possèdent les qualités indispensables pour fabriquer des composants de puissance.

Durant plusieurs années, les recherches ont été consacrées aux HEMTs (**H**igh **E**lectron **M**obility **T**ransistors) à base de GaAs à cause de ses propriétés électriques et physiques, son utilisation dans les applications à haute puissance s'avère limité d'où les chercheurs s'intéressent à d'autres matériaux à base de nitrure, en particulier le nitrure de gallium GaN dont les propriétés physiques, électroniques, et structurales sont importantes.

Dans ce chapitre nous présenterons des notions générales sur les transistors à haute mobilité HEMTs avec une description de leurs différentes couches. Ensuite, on expliquera son principe de fonctionnement basé sur les propriétés de haute mobilité d'un gaz d'électron bidimensionnel 2-DEG (**T**wo **D**imensional **E**lectron **G**as.).

II.2 Les transistors à effet de champ

II.2.1 Présentation générale

II.2.1.1 Généralités

Le transistor à effet de champ dénommé FET ou TEC repose sur le fonctionnement d'un dispositif semi-conducteur unipolaire, c'est-à-dire qu'un seul type de porteur intervient. Ainsi, pour une utilisation aux hautes fréquences, il est préférable que le type de porteur responsable de l'effet transistor soit celui présentant les meilleures propriétés de transport : mobilité, vitesse et coefficient de diffusion. Les électrons possèdent des propriétés plus intéressantes que les trous les FET sont essentiellement élaborés sur du matériau de type N.

Leur principe peut être comparé à une résistance semi-conductrice dont la section est modulée par une jonction polarisée en inverse, principe décrit pour la première fois en 1952 par W.Shockley [1]. Sur ce principe, différentes structures de transistors à effet de champ correspondant à différents contacts de grille ont été élaborées [2] :

- Grille à jonction PN pour le transistor JFET (**J**unction **F**ield **E**ffect **T**ransistor).
- Grille métallique isolée pour le transistor MOSFET (**M**etal **O**xide **S**emi-conductor **F**ield **E**ffect **T**ransistor).
- Grille métallique à barrière Schottky pour le transistor MESFET (**M**etal **S**emi-conductor **F**ield **E**ffect **T**ransistor).
- Transistor a haute mobilité d'électron HEMT (**H**igh **E**lectron **M**obility **T**ransistor).

II.2.2 Le transistor MESFET

Ce type de transistor, apparu expérimentalement dans les années 1970, consiste à moduler la conductance d'un canal entre deux contacts ohmiques sous l'action électrostatique d'une électrode de commande (figure II.1). Elle a permis d'imaginer une nouvelle filière de transistors innovants qui a écarté les inconvénients de ce type de technologie.

En effet, dès les années 1980 [3], le MESFET a été délaissé petit à petit au détriment d'une nouvelle filière de transistor à effet de champ à haute mobilité (HEMT) et à forte densité de porteurs (GaAs, InP, GaN). Cette technologie a donc été abandonnée dans les années 1990, au profit de la puissance en hyperfréquence que présentent les HEMT [4].

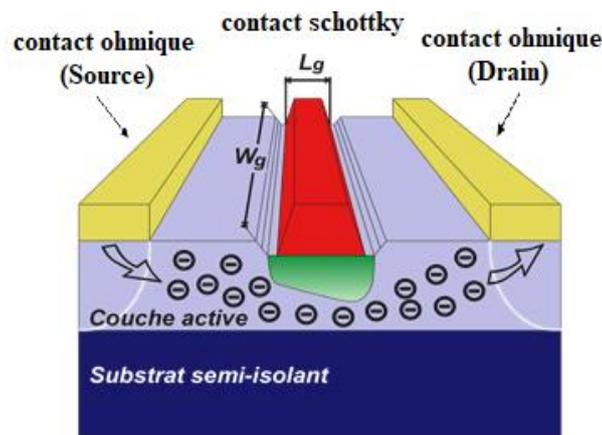


Figure II .1 : Transistor à effet de champ à grille Schottky, le MESFET [5].

II.2.3 Le transistor HEMT

Ce type de transistor peut être désigné sous des appellations différentes : HFET, TEGFET ou plus communément HEMT. Le MODFET est une variante du HEMT pour lequel la couche barrière est dopée séquentiellement, Le HEMT est présenté comme un composant micro-onde unique ayant les plus faibles caractéristiques en bruit au monde. Initialement ce transistor était utilisé dans un radiotélescope à Nobeyama, Japon, qui présente un diamètre de 45 mètres. En refroidissant le composant à la température de l'hélium liquide, il est possible de capter un signal provenant d'une molécule interstellaire située à mille années lumières de la Terre.

II.2.3.1 Le HEMT à base d'AlGaN /GaN [5]

Est un dispositif à effet de champ de la filière nitrures. Les principaux avantages du HEMT basé sur AlGaN/GaN par rapport à ses concurrents sont :

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

Le but de la structure d'un HEMT est de séparer les électrons libres de la couche de semiconducteur contenant des impuretés afin d'augmenter la mobilité des électrons. Pour cela

un matériau GaN à gap relativement faible est mis en contact avec le matériau ternaire $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ à grand gap.

II.3 Les hétérostructures de matériaux

Les transistors HEMTs sont des composants dont le fonctionnement repose sur l'existence d'hétérojonctions semi-conducteur/semi-conducteur. En effet, le changement abrupt de structure de bandes à l'hétéro-interface entre deux semi-conducteurs conduit à l'apparition de discontinuités (offsets) à la jonction des bandes de conduction ou de valence, c'est-à-dire à des sauts de potentiel.

Cela est illustré par le diagramme de bandes d'une hétérojonction dont l'établissement nécessite la connaissance de l'affinité électronique des deux semi-conducteurs. L'application des règles d'Anderson permet de déterminer les positions respectives des bandes de valence et de conduction à l'interface. La forme de la barrière dépend alors de la différence des travaux d'extraction et de la position du niveau de Fermi dans les deux matériaux.

La particularité des composants à hétérostructures résulte de leur capacité à contrôler le flux et la distribution des électrons et des trous à travers ces décalages de bandes. Leurs progrès n'a été rendu possible que par l'avancée des techniques d'épitaxie, et notamment de l'épitaxie par jets moléculaires.

Les hétérojonctions sont classées en différents types suivant le type d'offset qui se produit à l'hétérojonction abrupte de semiconducteurs, comme illustré figure II.2. Dans l'hétérojonction de type I, figure II.2.a, les offsets de bande pour la bande de conduction et de valence agissent comme des barrières de potentiel et gardent les électrons et les trous dans le matériau de plus petit gap. Les hétérojonctions de type II sont à gap décalé, figure II.2.b, ou brisé, figure II.2.c. Dans ces situations, électrons et trous sont alors séparés dans l'espace, avec les électrons diffusant dans un matériau et les trous dans l'autre.

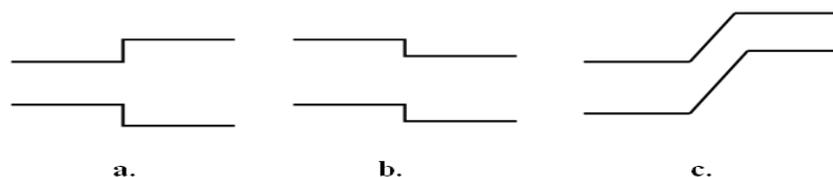


Figure II .2 : Diagrammes schématiques montrant les différents types d'hétérojonction.

II.4 Généralités sur les transistors à haute mobilité électronique (HEMTs)

II.4.1 Historique

Les premiers transistors HEMTs sont apparus en 1980 (Fujitsu, Thomson) [6,7], où ils sont apparus comme une évolution des transistors de type MESFET élaborés à partir des semiconducteurs III-V de type GaAs. En 1985, le HEMT est présenté comme un composant micro-onde unique au monde, ayant les plus faibles caractéristiques en bruit. Dans les premiers temps, ce transistor a été utilisé dans un radiotélescope. Plus tard, ce composant sera implanté dans les récepteurs de télévision pour capter des signaux des satellites (36000 km d'altitude) [8]. De plus en plus, les applications à faible bruit et à faible consommation, mais les hautes fréquences restent son application naturelle [9].

Ce composant est largement utilisé dans les systèmes de télécommunications terrestres et spatiales, dans les radiotélescopes, dans les récepteurs de télévision par satellite, ..., dans bons nombres de systèmes électroniques, des téléphones portables aux véhicules automobiles [10].

II.4.2 Structure physique du transistor HEMT $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$

Le principe de base d'un HEMT consiste à mettre en profit les propriétés de haute mobilité d'un gaz d'électron bidimensionnel 2DEG. La structure des couches épitaxiées des HEMT est réalisée de façon à séparer physiquement les électrons libres dans le canal des atomes donneurs ionisés, ceci afin d'augmenter la mobilité des électrons par la réduction de la répartition des impuretés ionisés. La différence essentielle entre les MESFET et les HEMT se situe au niveau du principe même du contrôle du courant dans le canal.

Dans le cas du MESFET, l'électrode de grille contrôle la section du canal disponible pour la conduction, alors que dans le cas du HEMT, elle contrôle la densité d'un gaz d'électron libres dans une zone non dopée sous l'hétéro interface qui constitue le canal du transistor.

La figure II.3 représente la structure en couches d'un HEMT classique où ce type de transistor est constitué essentiellement de trois matériaux différents : le substrat, un matériau à grand gap, et un matériau à petit gap. On retrouve aussi les électrodes métalliques de source, grille et drain.

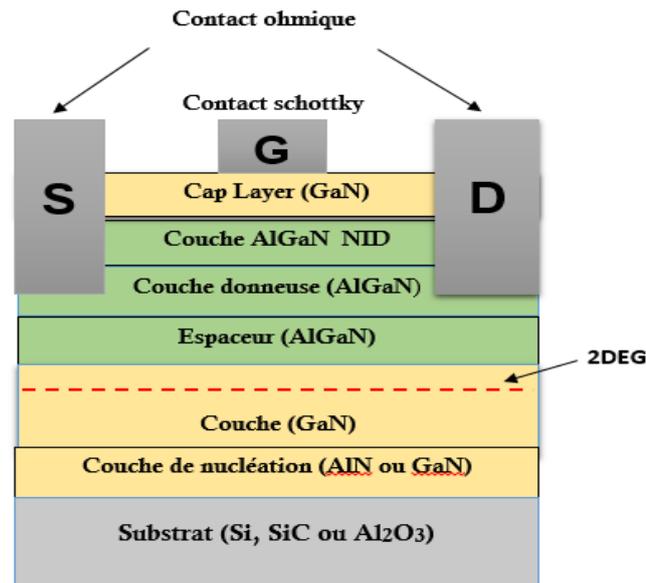


Figure II .3 : Structure et différentes couches du HEMT AlGaIn/GaN [10].

II.4.3 Description des couches d'un transistor HEMT [11]

1 / **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 sera dans la plus part des cas dopée afin de diminuer la valeur des résistances de contact et donc celle des résistances d'accès.

2 / **Couche SCHOTTKY** : cette couche à grand gap non dopée réalise le contact Schottky de la grille.

3 / **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.

4 / **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.

5 / 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.

6 / 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.

7 / 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. Les différents substrats utilisés pour la croissance de ces transistors ont été abordés dans le premier chapitre.

II.4.4 Concentration de porteurs dans une hétérojonction AlGa_xN/GaN

À partir des données précédentes, nous avons calculé la densité de charges fixes σ développées à l'interface d'une hétérostructure Al_xGa_{1-x}N/GaN à face Ga, en supposant que le GaN est totalement relaxé et le AlGa_xN contraint en tension.

La structure est représentée dans la figure II.4, où seules les charges fixes positives et négatives ont été représentées.

La couche du GaN, n'étant pas contrainte, elle présente des charges positives et négatives moins importantes que dans l'AlGa_xN, ces dernières ne sont pas représentées sur la figure II.4.

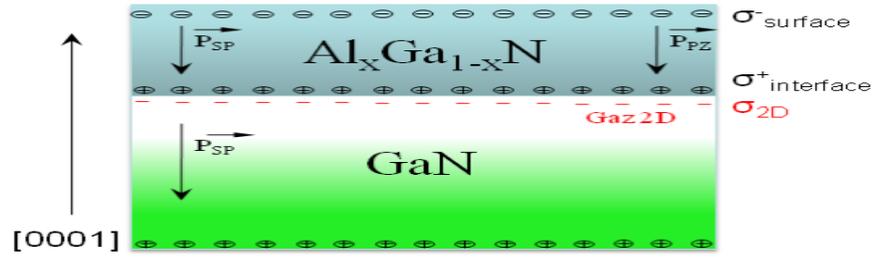


Figure II .4 : Structure AlGaIn/GaN à face Ga, où GaN est relaxé et AlGaIn contraint en tension.

La densité de charges aux interfaces est la différence entre la somme des champs de polarisation dans la couche d’AlGaIn et celle de GaN [5] :

$$\sigma = P_{SP_{AlGaIn}}(x) + P_{PZ_{AlGaIn}}(x) - P_{SP_{GaN}} \quad (\text{II. 1})$$

Avec

$$P_{PZ_{AlGaIn}}(x) = 2 \frac{(a-a_0(x))}{a_0(x)} \left(e_{31}(x) - e_{31}(x) \frac{c_{13}(x)}{c_{33}(x)} \right) \frac{c}{m^2} \quad (\text{II. 2})$$

$$P_{SP_{AlGaIn}} = -0.052x - 0.029 \frac{c}{m^2} \quad (\text{II. 3})$$

II.5 Principe de fonctionnement d’un HEMT

Son principe de fonctionnement est basé sur la formation d’une hétérojonction qui est définie par la juxtaposition d’un matériau à grand gap E_{g1} et un matériau à petit gap E_{g2} qui implique la création d’une discontinuité de bande de conduction à l’interface entre deux matériaux (modèle d’Anderson). Lors de la jonction de deux semiconducteurs à bandes interdites différentes, les niveaux de Fermi s’alignent.

La conservation des paramètres physiques de part et d’autre de l’interface entraîne des courbures des bandes de conduction et de valence, ainsi que des discontinuités à l’interface pour ces deux bandes.

Cette hétérojonction illustrée par la figure II.5 entraîne la formation d’un puits de potentiel dans le matériau à petit gap où les électrons provenant de la couche donneuse se transfèrent et s’accumulent.

L'hétérojonction est caractérisée par la discontinuité de bande de conduction ΔE_c entre les deux matériaux, plus la valeur de ΔE_c sera élevée, le transfert des électrons de la couche donneuse vers le canal sera meilleur.

En outre, plus le matériau constituant le canal sera à petit gap, les propriétés de transport (vitesse, mobilité) seront meilleurs, on note que dans la plus part des cas, $\Delta E_c = 3/2 \Delta E_g$ [12].

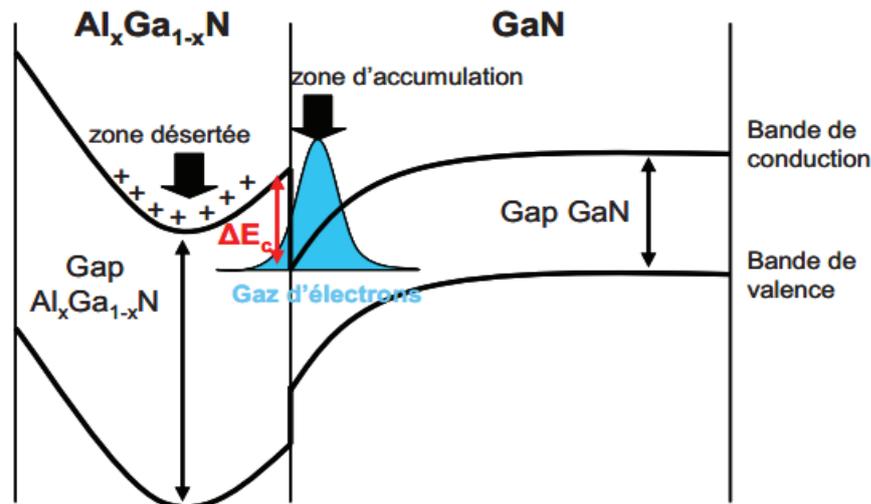


Figure II.5 : Structure de bande d'un HEMT en présence d'un potentiel de grille.

Le transfert de charges génère dans la couche donneuse une zone désertée. Le profil électrique, des charges détermine la courbure de bande de part et d'autre de l'hétérojonction ce qui se traduit par la formation d'un puits de potentiel de forme triangulaire dans le canal. Pour une largeur de puits inférieure à la longueur d'onde de Broglie, apparaissent les effets quantiques.

Ces effets se traduisent par la quantification des niveaux d'énergie des électrons et par la restriction du mouvement des porteurs dans un plan parallèle à l'hétérojonction. On appelle gaz d'électrons bidimensionnel (2-DEG) l'accumulation des électrons dans ce puits.

L'hétérojonction permet la séparation spatiale des atomes donneurs ionisés des électrons libres, ces électrons ne sont donc plus soumis aux interactions sur impuretés ionisées, et peuvent alors atteindre des mobilités importantes.

II.6 Performances des composants HEMT à base de GaN

La nécessité d'obtenir des rendements meilleurs en puissance dans des domaines de fréquence de plus en plus larges devient aujourd'hui la force motrice du développement des composants RF. Pour avoir une idée sur les derniers résultats obtenus dans le domaine de la recherche et de l'industrie, ce paragraphe sera dédié à un bref état de l'art sur les performances des HEMTs à base de GaN obtenues dans différentes gammes de fréquences.

Le domaine le plus attractif se trouve dans les applications de communications sans fils dans la bande de fréquence L et S (1-4 GHz). Un des résultats majeurs a été obtenu par la société Eudyna en 2007 sur des HEMTs AlGaIn/GaN sur SiC qui délivrent une puissance de 800W.

Des composants peuvent atteindre un rendement en puissance de 50 % et fonctionnent dans la gamme 2,9 à 3,3 GHz sous une polarisation de 65V sur le drain en régime pulsé [7]. Sur substrat de silicium, Nitronex a annoncé en 2004 un HEMT AlGaIn/GaN à 12 W/mm de grille [13].

Dans la bande C (4-8 GHz), principalement utilisée dans les stations de base et les applications radar, Oku et al. ont réussi à atteindre en 2008 une puissance de 140 W. Cette excellente performance a été obtenue en utilisant une couche de passivation de SiN à la surface par Cat-CVD (Catalytic Chemical Vapor Deposition) pour minimiser les défauts à l'interface SiN/AlGaIn [14]. Fujitsu a obtenu un amplificateur à base de GaN avec une puissance de sortie de 343 W. La même société a sorti récemment le premier amplificateur dans la bande X (8-12 GHz) avec une puissance de 100 W et un rendement de 50% [15].

Dans cette gamme de fréquence, les applications sont dédiées aux radars météorologiques et au contrôle aérien. Toshiba a également développé un HEMT avec une périphérie de 23,04 mm présentant une puissance de sortie de 81 W avec un rendement de 34% sous une tension $V_{DS}=30V$ et une fréquence de 9,5 GHz.

Les performances en hautes fréquences ont été également démontrées dans la bande K (12-40 GHz). Kasahara et al. ont développé un HEMT avec une largeur de grille de 0,36 mm délivrant une puissance de 1,48 W (4,1 W/mm) à 30 GHz [16]. Avec une structure MOS GaN, Toshiba a sorti un transistor qui peut atteindre une puissance de 65,4 W à 14,5 GHz et une polarisation $V_{DS} = 30V$. Aujourd'hui, les évolutions technologiques dans le domaine des hyperfréquences ciblent des gammes de fréquence encore plus élevées (> 40 GHz).

La figure II.6, montre la feuille de route qu'est en train de suivre la commercialisation des HEMTs à base de GaN dans les différents domaines de fréquences.

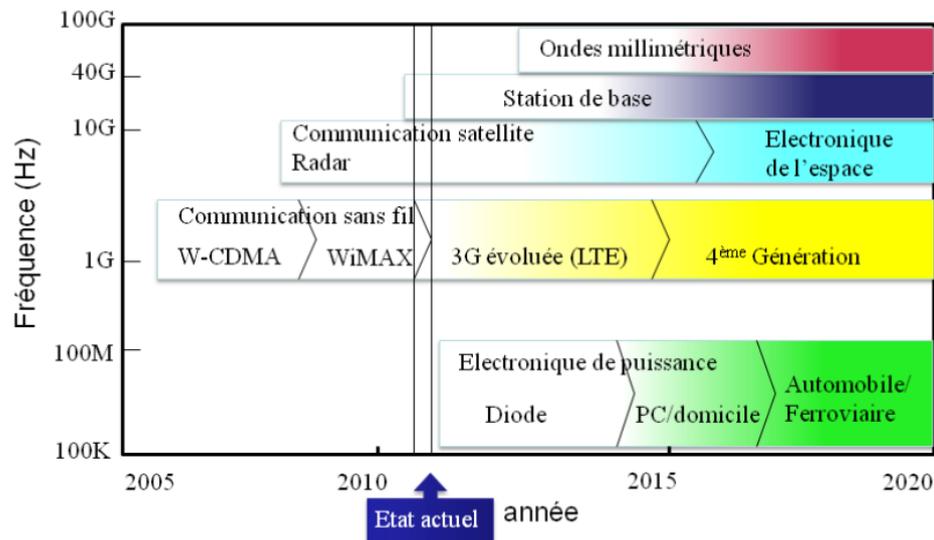


Figure II. 6 : Feuille de route des domaines de commercialisation des HEMTs à base de GaN en fonction des fréquences de fonctionnement [17].

Afin d’obtenir un aperçu général sur les transistors HEMTs à base de GaN qui sont disponibles actuellement dans le commerce, le tableau II.1 montre une gamme de transistors destinés aux amplificateurs pour les applications de transmission de données à haut débit (WiMax).

Société	Réf	Substrat	Fréquence (GHz)	Psat (W)	Psortie (W)	Rendement (PAE %)	I _{ds} (mA)	V _{ds} (V)
Eudyna	EGN26C07012D	Si	2,6	40,8		35	400	
Nitronex	NPT251000	Si	2,5		90			28
RFMD	RF3934	SiC	2,1	120			440	48
CREE	CGH27060f	SiC	2,5		60		300	28

Tableau II .1 : Caractéristiques de quelques composants commercialisés par les industriels spécialistes dans la fabrication des HEMTs à base de GaN [5].

Le tableau indique clairement que la voie d’industrialisation de ces composants se divise en deux selon le substrat choisi. L’utilisation du silicium comme substrat a été adoptée par les industriels essentiellement à cause du faible coût de fabrication. Toutefois, la fiabilité de cette technologie devient un souci vu le grand désaccord de maille avec le GaN et les

propriétés thermiques limitées comparées au SiC. La création de défauts et même sans vieillissements accélérés, aura des conséquences directes sur la fiabilité des composants sur substrat de silicium [18].

Néanmoins, il existe des travaux qui ont défendu cette voie et ont montré une excellente fiabilité électrique des HEMTs sur Si avec une durée de vie potentielle de l'ordre de 10^7 heures [19].

II.8 Conclusion

Le principe de base d'un transistor à haute mobilité (HEMT) consiste à mettre à profit les propriétés de haute mobilité d'un gaz d'électron bidimensionnel (2-DEG) à partir de la séparation physique des électrons libres, des donneurs ionisés dont ils proviennent.

Les HEMTs sont des dispositifs électroniques opérant à des hautes fréquences avec des vitesses très élevées grâce au matériau de base approprié.

Références Bibliographiques

- [1] G.Le coustre,
Contribution au développement d'une filière de transistor de forte puissance à base de technologie HEMT GaN pour applications télécoms et radar, thèse de doctorat université de lille ,2009.
- [2] N. Ghalichechian,
Silicon Carbide Overview of Physical Properties and Thin Film Deposition, ENEE793, Solid State Electronics Fall 2002.
- [3] M. Bon, A. Scavennec,
Transistors et circuits intégrés à l'hétérostructures III-V, techniques de l'Ingénieur, traité de l'électronique, 450 (1999).
- [4] G.Jean-Claude,
Conception et réalisation technologique de transistors de la filière HEMTs AlGaIn/GaN sur substrat silicium pour l'amplification de puissance hyperfréquence , thèse de doctorat, université de lille 1, 2009.
- [5] A.Douara,
Etude par simulation d'un transistor HEMT à base de AlGaIn/GaN,mémoire de magister, Université sidi belabess,2013.
- [6] D. Delage beaudeuf, P. Delescluse, P. Etienne, M. Laviron, J. Chaplart, N. T. Linh,
Two dimensionnal electron gas MESFET structure.
- [7] T. Mimura, S. Hiyamizu ,T. Fujii ,K. Nanbu,
Aplanes Journal of Applied Physics, Vol.19, No 5, Mai 1980, pages L225 à L227.
- [8] E. Byk,
Méthodes d'analyse couplée pour la modélisation de composants et modules millimétriques de forte puissance, thèse de Doctorat, université de Limoges, 2002.
- [9] M. Feneyrol,
Télécommunication : réalités et virtualités, un avenir pour le XXIème siècle .Editions MASSON, 1996.
- [10] C. Charbonniaud,
Caractérisation et modélisation életronthermique non linéaire de transistors à effet de, champ GaN pour l'amplification de puissance micro-onde,thèse de doctorat ,

- université de Limoges ,2005.
- [11] F. Abdelaziz,
Caracterisation électrique des HEMTs à base de nitrure de gallium AlGa_N/Ga_N
,mémoire de Magister, Université de Constantine,2005.
- [12] P. Chevalier,
Transistors à effet de champ à hétérojonction sur matériaux III-V pour applications
hyperfréquences cours Tec 35, Eudil, Ecole polytechnique universitaire de Lille, (1999).
- [13] E. Mitani, M. Aojima, et S. Sano,
A kW-class AlGa_N/Ga_N HEMT pallet amplifier for S-band high power application, pp.
176 –179, oct. 2007.
- [14] T. Oku, Y. Kamo, et M. Totsuka,
AlGa_N/Ga_N HEMTs passivated by Cat-CVD Si₃N₄ Film Thin Solid Films, vol. 516, no.
5, pp. 545 –547, 2008. Proceedings of the Fourth, International Conference on Hot-
Wire CVD Cat- CVD Process.
- [15] T. Kikkawa, K. Makiyama,
High performance and high reliability AlGa_N/Ga_N HEMTs, physica status solidi
(a), vol. 206, no. 6, pp. 1135–1144, 2009.
- [16] J.Joh and J. et del Alamo,
Critical Voltage for Electrical Degradation of Ga_N High Electron Mobility Transistors,
Electron Device Letters, IEEE, vol. 29, pp. 287 –289, april 2008.
- [17] M. Kuzuhara, et Y. Ando,
Miyamoto, AlGa_N/Ga_N heterojunction FETs for high-power applications, Electronics
and Communications in Japan (Part II: Electronics), vol. 86, no. 12, pp. 52–60, 2003.
- [18] E. Piner, et S. Singhal,
I. Kizilyalli, et K. Linthicum, Device Degradation Phenomena in Ga_N HFET
Technology: Status, Mechanisms, and Opportunities, pp. 1 – 4, dec. 2006.
- [19] S. Singhal, T. Li, A. Chaudhari,
Marquart, P. Rajagopal, J. Roberts, E. Piner, I. Kizilyalli, and K. Linthicum,
Microelectronics and Reliability, vol. 46, no. 8, pp. 1247 – 1253, 2006.
- [20] A.Douara,
Etude par simulation d'un transistor HEMT à base de AlGa_N/Ga_N,mémoire de
magister, Université sidi belabess,2013

Chapitre III

Résultats et interprétations

III.1 Introduction

La simulation est un moyen très important pour la compréhension et l'explication de certains phénomènes physiques qui régissent le fonctionnement des dispositifs électroniques et leurs performances [1].

La caractérisation des composants est une étape indispensable pour la compréhension d'un grand nombre de phénomènes physiques et électriques qui limitent leurs performances. Ces limitations sont bien souvent liées à des défauts intrinsèques aux matériaux utilisés ou à la technologie de fabrication.

L'objectif principal de ce chapitre est de montrer les résultats des simulations des caractéristiques de sortie et de transfert des structures de HEMT à base d'AlGaIn/GaN.

Les structures proposées des dispositifs HEMT AlGaIn/GaN ont été améliorées.

Dans ce travail, nous étudions l'impact des différents paramètres physiques et technologiques tels que de l'épaisseur de couche tampon (GaN) et la concentration de dopage dans la couche (AlGaIn) et la fraction molaire de l'aluminium « x » sur les caractéristiques courant-tension à l'aide du simulateur Atlas TCAD.

Nous simulons en faisant varier les différents paramètres importants du dispositif (fraction molaire de l'aluminium et épaisseur de couche de tampon (GaN)...etc). Notre structure simulée trouve le courant de saturation source drain maximal 420 mA/mm. Avec une épaisseur du canal est de 50 nm et concentration de dopage $4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.

III.2 Présentation SILVACO

Le SILVACO (Silicon Valley Corporation) est un logiciel qui permet de concevoir, modéliser et simuler les performances des dispositifs à semi-conducteur, 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 [2].

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 simulateur est de visualiser dans

l'espace des phénomènes physiques difficilement accessibles et observables et de s'approprier de manière pédagogique les procédés de fabrication [3].

Les modules de TCAD-SILVACO peuvent être utilisés pour :

- ✓ La simulation des étapes de fabrication technologique (par ATHENA, SSupreme3, SSupreme4, etc.).
- ✓ La simulation électrique des dispositifs tels que, les Diodes, les MOSFET, les transistors bipolaires. (par ATLAS).
- ✓ Virtual Wafer Fab pour automatiser la simulation de fabrication des Wafers. Dans notre étude, les simulations sont effectuées par le module ATLAS.

II.2.1 Présentation 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, par exemple $I(V)$, il fournit des informations sur la distribution interne des variables électriques telles que le courant ou la tension (lignes de champ).

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 associées telles que le type de matériau, le type de dopage, la concentration du dopant, etc.

Ainsi, pour chaque nœud, la concentration des porteurs, le champ électrique, ... peuvent être calculés. Les électrodes sont représentées par des surfaces sur lesquelles les conditions aux limites sont imposées, comme par exemple, les tensions appliquées.

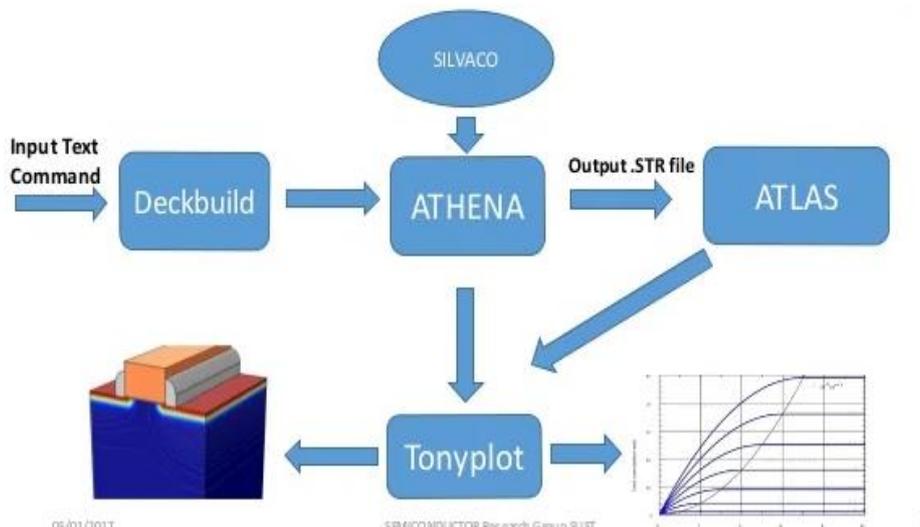


Figure III.1 : Schéma synoptique des modules utilisés dans la simulation par TCAD SILVACO.

La figure III.1 présente le schéma bloc des modules utilisés dans la simulation par TCADSILVACO. Les paramètres d'entrée de simulation, définissant les différentes étapes technologiques et les phénomènes physiques, sont réalisés avec le module DECKBUILD de TCADSILVACO.

La visualisation de la structure et des paramètres de sortie tels que le rendement quantique, la réponse spectrale, $I(V)$ par exemple s'effectuent 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.).

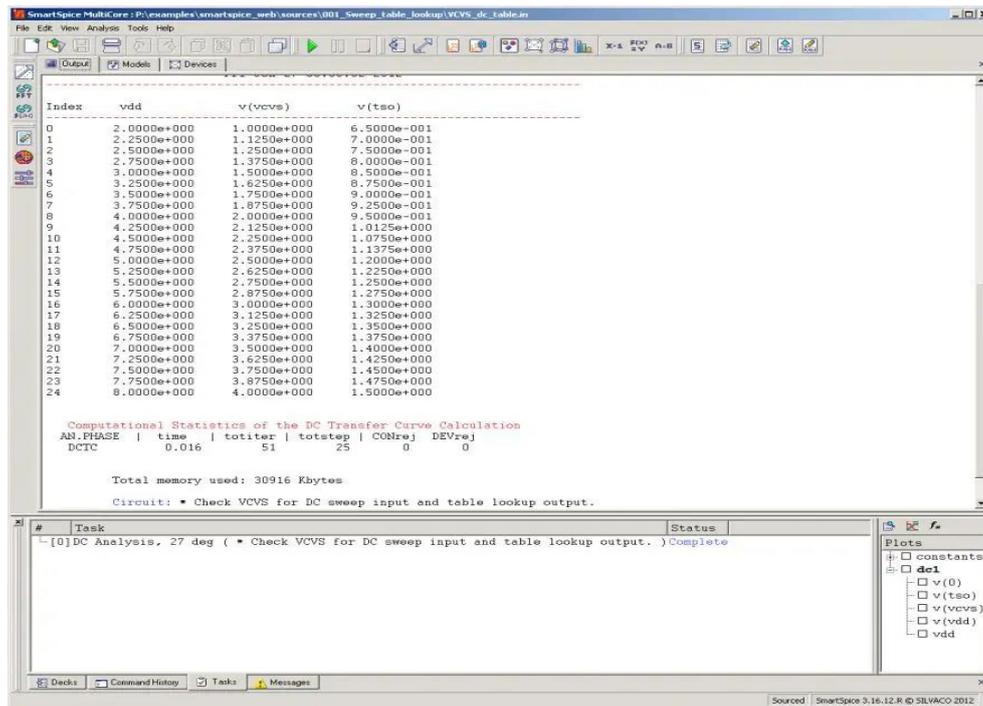


Figure III.2 : Le logiciel Silvaco en cours d'exécution.

- Tonyplot

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

III.3 Caractéristiques électriques des transistors HEMTs

Il existe deux types de transistors HEMT en fonction de l'état des transistors à polarisation de grille nulle. Leurs schémas caractéristiques de sortie et de transfert sont présentés dans la figure III.3 (a), appelés mode enrichissement. La contrepartie est appelé mode de déplétion, ou normalement fermé, comme illustré de la figure III.3 (b).

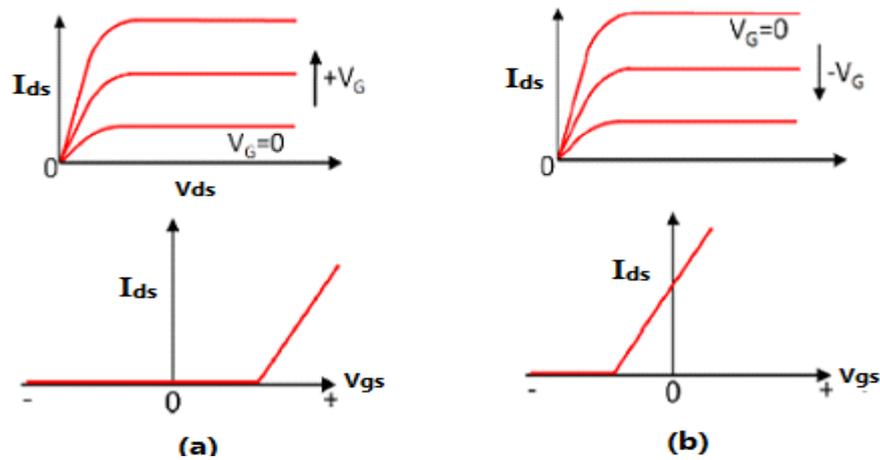


Figure III.3 : Comparaison des caractéristiques courant-tension d'un transistor HEMT [4].

La tension de pincement V_P pour la couche AlGaIn dans la région de déplétion est donnée par:

$$V_P = -\frac{q}{\epsilon_S} \int_0^{y_0} N_D(y)ydy \tag{III. 1}$$

Pour un profil de dopage général. Cependant, pour uniforme le dopage de ce potentiel intégré devient:

$$V_P = \frac{qN_Dy_0^2}{2\epsilon_S} \tag{III. 2}$$

Où q est l'amplitude de la charge de l'électron, N_D est la concentration en impureté donneur dans la couche barrière et ϵ_S est la permittivité diélectrique du semi-conducteur.

La tension de seuil est la polarisation de grille à laquelle le canal se forme entre la source et le drain.

$$V_{th} \approx \phi_{Bn} - V_P - \frac{\Delta E_c}{q} \tag{III. 3}$$

En choisissant le profil de dopage et la hauteur de barrière ϕ_{Bn} , V_{th} peut varier entre des valeurs positives et négatives. Un exemple pour une tension de seuil V_{th} positive est montré à la figure III.5 et le transistor montre la caractéristique normalement fermé. De plus, avec une tension de grille supérieure à la tension de seuil le 2DEG induite par la grille en fonction de la distance x est couplé capacitif et est donnée par:

$$n_s(x) = \frac{C_0[V_G - V_{th} - \psi(x)]}{q} \quad (\text{III. 4})$$

$$\text{Où} \quad C_0 = \frac{\epsilon_S}{y_0 + y_{NID} + \Delta y} \quad (\text{III. 5})$$

y_0 et y_{NID} sont l'épaisseur dopée et non dopée AlGaIn et Δy est l'épaisseur du canal de gaz d'électrons bidimensionnel, $\psi(x)$ est le potentiel de canal en ce qui concerne la source et (x est la direction de drain-source).

Il varie le long de la chaîne de zéro à la polarisation de drain V_D . La dérive actuelle à n'importe quel point le long du canal est donnée par:

$$I_{DS}(x) = W \mu_n q n_s E(x) = W \mu_n C_0 [V_G - V_{th} - \psi(x)] \frac{d\psi(x)}{dx} \quad (\text{III. 6})$$

Où W est la largeur de déplétion et μ_n est la mobilité de dérive des électrons. Comme le courant est constant tout au long de canal, intégration de l'équation ci-dessus à partir de la source-drain donne:

$$I_{DS} = \frac{W \mu_n C_0}{L} \left[(V_G - V_{th}) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right] \quad (\text{III. 7})$$

Les caractéristiques de sortie pour une mode enrichissement sont présentées dans la figure III.4. Dans la région linéaire où $V_{DS} \ll (V_G - V_{th})$, l'équation (III. 7) est ramenée à une expression ohmique:

$$I_{lin} = \frac{W \mu_n C_0 (V_G - V_{th}) V_{DS}}{L} \quad (\text{III. 8})$$

À partir de l'équation (III. 4), la transconductance peut être obtenue de la manière suivante:

$$g_{m,lin} \equiv \frac{dI_{lin}}{dV_G} = \frac{W \mu_n C_0 V_{DS}}{L} \quad (\text{III. 9})$$

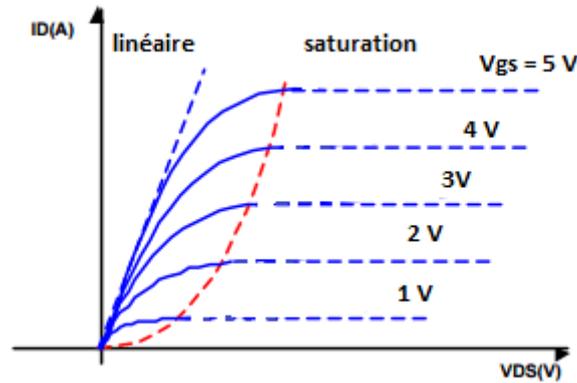


Figure III.4 : Caractéristiques de sortie $I_{DS}(V_{DS})$ d'un transistor HEMT à mode d'enrichissement [4].

À haute V_{DS} , n_S au niveau du drain est réduite à zéro, saturés correspondant à l'état de pincement et de courant avec V_{DS} . On peut montrer de l'équation. (III. 4) que :

$$V_{DS,sat} = V_G - V_{th} \quad (\text{III. 10})$$

Ce qui donne un courant de drain de saturation:

$$I_{DS,sat} = \frac{W \mu_n C_0}{2L} (V_G - V_{th})^2 \quad (\text{III. 11})$$

III.4 Résultats et discussions

Nos simulations du transistor HEMT à base de AlGaIn/GaN ont été effectuées en utilisant la structure illustrée de la figure III.5. Cette structure est formée d'une couche de barrière ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$) de 30 nm intentionnellement dopée avec un profil de dopage $N_D(\delta)$ qui définit la concentration d'électrons dans le canal, et d'une couche de canal (GaN) de 50 nm dopée avec un niveau de dopage estimé de $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, une couche de nucléation (tampon) à base de GaN est déposée sur un substrat isolant de saphire (Al_2O_3).

Les longueurs (L_s, L_g, L_d) sont égales à $2 \mu\text{m}$, et $L_{gs} = L_{gd} = 1 \mu\text{m}$. L'épaisseur de la couche tampon (GaN) est prise comme paramètre variable dans nos calculs.

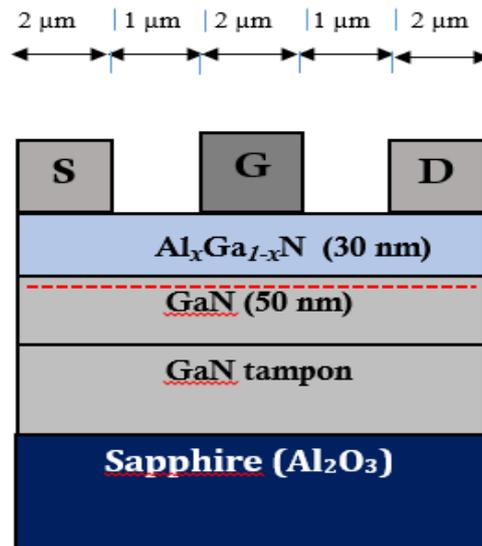


Figure III.5 : Structure de transistor HEMT $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ étudié

III.4.1 Variation de l'épaisseur de la couche tampon GaN

La figure III.6 montre les caractéristiques de sortie calculées de HEMT $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$. D'après les calculs, nous obtenir une augmentation du courant drain-source avec la diminution de l'épaisseur de la couche tampon GaN. Cependant, le courant drain à la source à $V_{GS} = 0 \text{ V}$ est relativement important en raison de la forte conductivité de 300 nm d'épaisseur de couche tampon GaN .

Les caractéristiques de transfert du transistor à $V_{DS} = 0 \text{ V}$ sont illustrées à la figure III.7. Selon les courbes, nous peut atteindre une concentration d'électrons élevée et en réduisant la diffusion des impuretés, une augmentation de mobilité des électrons dans le canal et la transconductance élevé de notre composants.

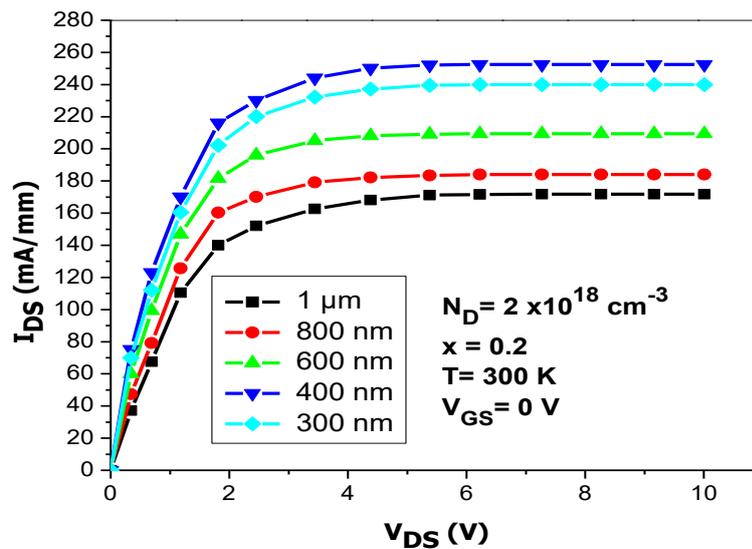


Figure III.6 : Caractéristiques de sortie de HEMT Al_{0.2}Ga_{0.8}N / GaN pour différentes valeurs de l'épaisseur de couche tampon GaN.

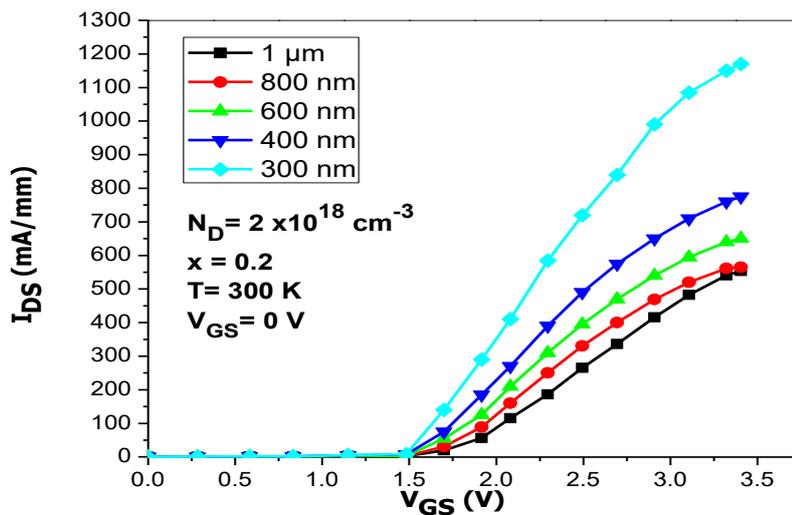


Figure III.7 : Caractéristiques de transfert du HEMT Al_{0.2}Ga_{0.8}N / GaN pour différentes valeurs de l'épaisseur de couche tampon GaN.

III.4.2 Influence du dopage de la couche barrière AlGaIn

D'autre part, nous avons fait varier la concentration en donneurs (N_D) sur la couche de barrière Al_{0.2}Ga_{0.8}N et prend 400 nm de GaN. Nous obtenons nos résultats dans la figure. III.8, les résultats des caractéristiques de sortie visualisent que la couche barrière de dopage intentionnel est nécessaire pour obtenir une transconductance élevée.

De plus, nous avons trouvé que l'influence de (N_D) est très forte comme on peut le voir sur la figure.III.8. Les résultats obtenus dans ce travail sont similaires à ceux obtenus par Bouguenna et al [4] qui retrouvent les mêmes tendances dans la variation du courant par rapport à la concentration du donneur.

On observe ici que I_{Dmax} augmente avec l'augmentation de concentration de dopage.

$$I_{Dmax} = 420 \text{ mA/mm pour } N_D(\delta) = 4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$$

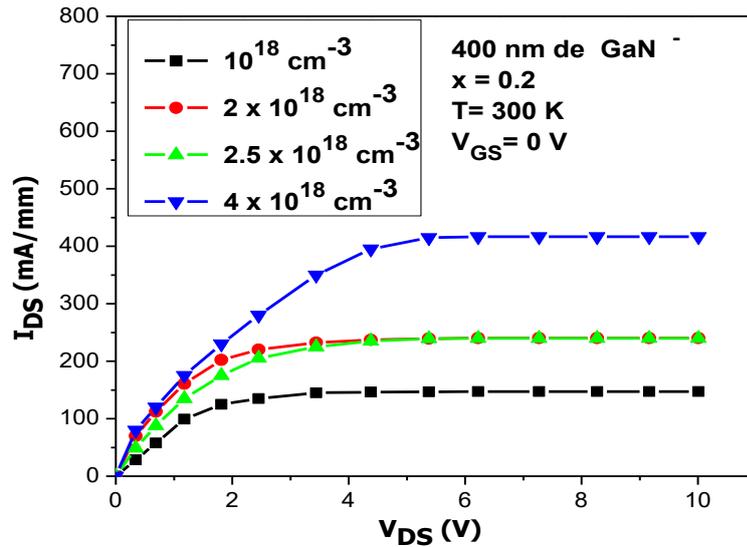


Figure III.8 : Caractéristiques de sortie de HEMT $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N} / \text{GaN}$ pour les différentes valeurs de $N_D(\delta)$.

Le calcul des caractéristiques de transfert électrique visualise que le dopage intentionnel de la couche barrière $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ est essentiel pour obtenir une transconductance élevée. Avec la concentration de dopage la plus élevée de la couche δ , c'est-à-dire $N_D(\delta) = 4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$,

Le composant présente le courant de saturation de drain le plus élevé, comme illustré à la figure III.9.

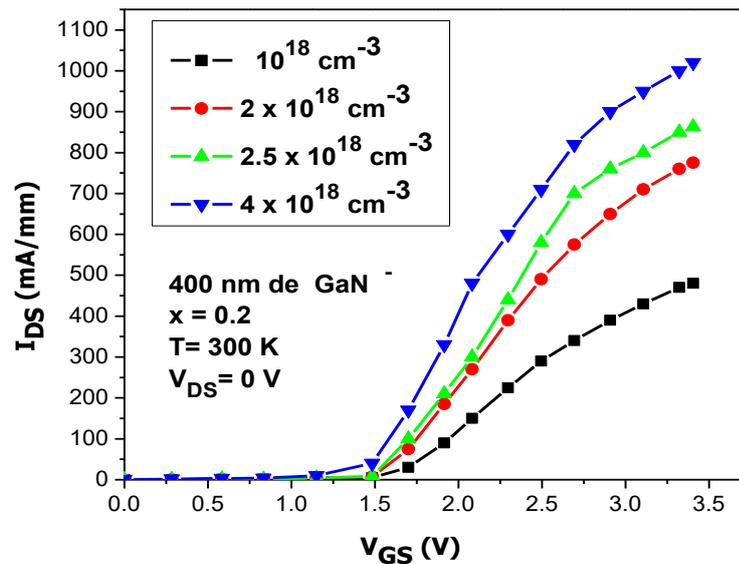


Figure III.9 : Caractéristiques de transfert du HEMT $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ pour les différentes valeurs de N_D (δ).

III.4.3 Variation de la fraction molaire (x)

La figure III.10 montre les Caractéristiques de sortie de HEMT, pour différents valeurs de fraction molaire (x) dans la couche barrière $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$. Nos résultats montrent que Pour $x = 20\%$ le HEMT atteint le drain maximum courant de saturation source $I_{DS\text{sat}} = 420$ mA/mm par rapport à ceux obtenus avec $x = 33\%$, 30% et 25% .

Les caractéristiques de transfert sont représentées sur la figure III.11, où le HEMT présente une tension de seuil basse environ 6 V pour $x = 20\%$, les caractéristiques de sortie et le transfert ont été calculées à $V_{GS} = 0$ V et $V_{DS} = 0$ V respectivement. Les résultats montrent qu'une amélioration de la transconductance et des performances de Les du composant HEMT normalement éteints peuvent être atteints en faisant varier la fraction molaire de l'aluminium dans la couche barrière $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$.

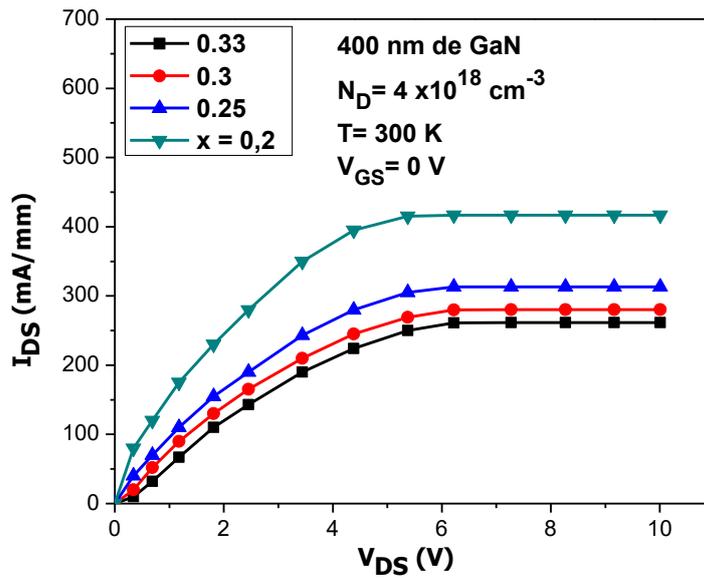


Figure III.10 : Caractéristiques de sortie de HEMT Al_xGa_{1-x}N / GaN pour différentes valeurs de fraction molaire (x).

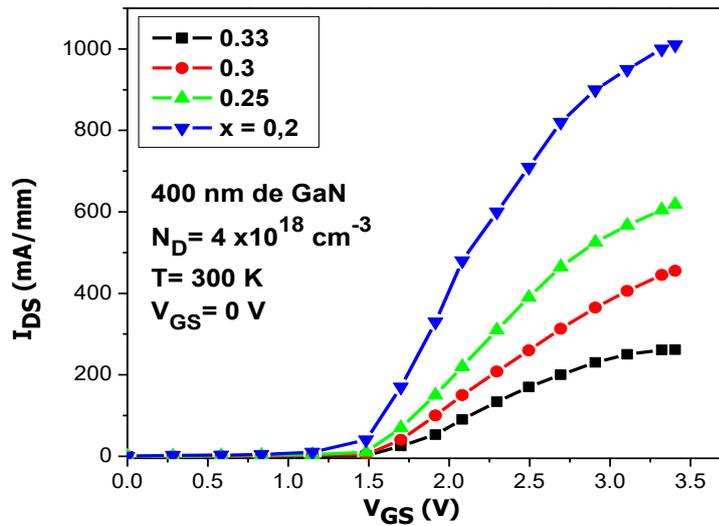


Figure III.11 : Caractéristiques de transfert du HEMT Al_xGa_{1-x}N / pour différentes valeurs de fraction molaire (x).

III.4.4 Simulation à différentes tensions

Dans cette section, les figure.III.12 montrent les caractéristiques courant-tension avec différentes valeurs de V_{GS} , nos calculs ont varié la tension grille –source de - 4 V à +2 V (avec une pas de +2 V) . L'effet des fuites de grille peut cependant être inclus dans les simulations.

Les résultats des caractéristiques I_{DS} (V_{DS}) sont tracés et un courant de drain élevé est observé lorsque la tension à la grille est inférieure comme indiqué sur la Figure III.12, selon les courbes, nous trouvons ($I_{DSmax} = 900 \text{ mA/mm}$ à $V_{DS} = +2 \text{ V}$), et la tension de seuil de notre structure est de 6 V à 0 V.

Les figure III.13 et III.14 montre un bon accord entre nos résultats calculés et les données expérimentales.

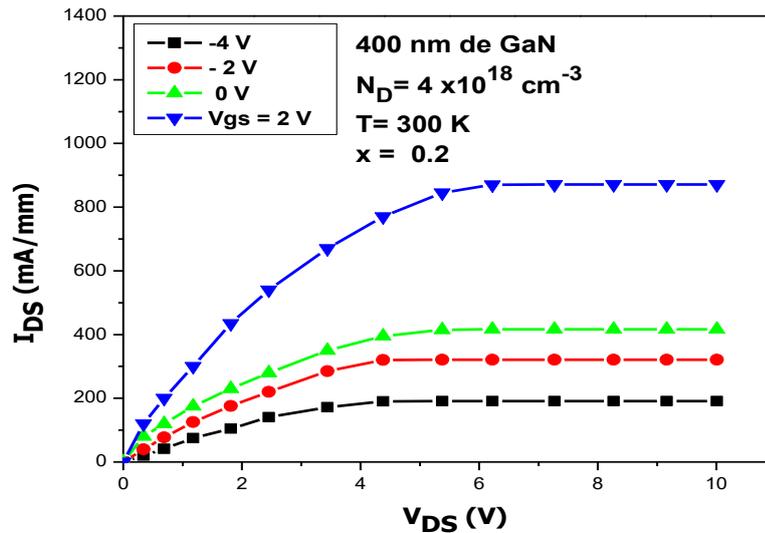


Figure III.12 : Caractéristiques de sortie de HEMT $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N} / \text{GaN}$ pour les différentes valeurs de V_{GS} .

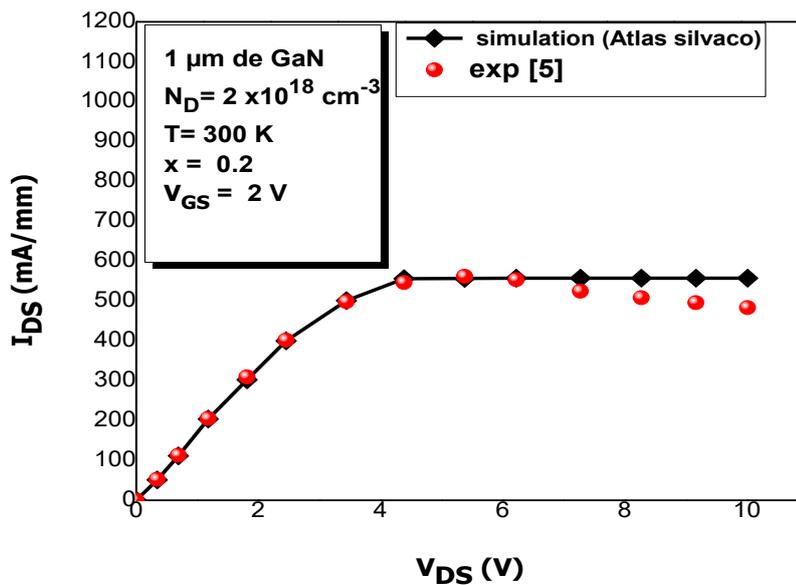


Figure III.13 : Comparaison entre les résultats de simulations et expérimentale [5] de Caractéristiques de sortie de HEMT $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N} / \text{GaN}$.

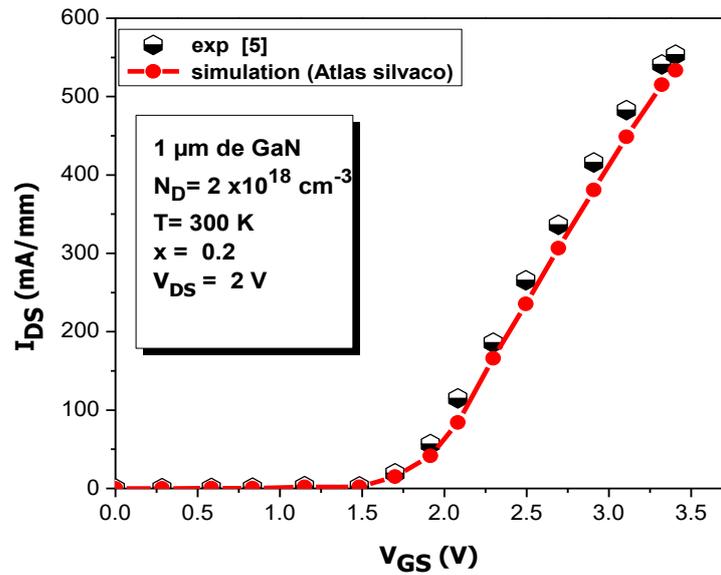


Figure III.14 : Comparaison entre les résultats de simulations et expérimentale [5] de Caractéristiques de transfert de HEMT $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N} / \text{GaN}$.

III.5 Conclusion

Dans nos résultats de simulation, nous avons montré les caractéristiques I-V de HEMT à base de AlGa_{0.2}N/GaN par le simulateur Atlas TCAD. L'influence de l'épaisseur de couche tampon sur les caractéristiques courant-tension de l'hétérostructure AlGa_{0.2}N/GaN a été considérée, des études supplémentaires liées à l'influence d'autres paramètres.

Le plus élevé de courant drain-source dépendant de la fraction molaire de Al et de la concentration de donneur au sein de couche donneur (AlGa_{0.2}N), la concentration du donneur dans la couche (AlGa_{0.2}N) est un facteur plus important par rapport à d'autres paramètres conduisant à la modification de la valeur du courant dans le canal.

Références Bibliographiques

- [1] A. Douara,
Etude par simulation de l'optimisation des HEMT à base de GaN pour les applications en haute fréquences , Thèse de doctorat, Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbès, 2019.
- [2] http://www.Silvaco.com/products/device_simulation/atlas.html. Mai 2012.
- [3] J.M.Gallière, J. Boch,
Mise en oeuvre de la simulation mixte.électrique/TCAD pour décloisonner l'enseignement de la microélectronique, 10 es Journées Pédagogiques du CNFM, 2008.
- [4] D. Bouguenna, A. B. Stambouli, A. Zado, D. J. As, and N. M. Maaza,
2D Simulations of Current-voltage Characteristics of Cubic $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N} / \text{GaN}$ Modulation Doped Hetero-junction Field Effect Transistor Structures, vol. 2, no. 5, pp. 309–315, 2012.
- [5] Khan MA, Hu X, Simin G, et al. AlGa_N/Ga_N metal oxide semiconductor heterostructure field effect transistor. IEEE Electron Dev Lett. Feb. 2000;21(2):63-65

Conclusion Générale

L'utilisation des matériaux à grand gap, et tout particulièrement l'emploi du nitrure de gallium GaN semble être une solution intéressante pour la fabrication des transistors HEMT, grâce à ses propriétés physiques et électriques remarquables. Les HEMTs réalisés à partir du matériau GaN présentent actuellement les meilleures performances mondiales pour la génération de puissance RF.

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

Dans le deuxième chapitre de ce mémoire, nous avons fait un rappel de structure et de principe de fonctionnement ainsi que les phénomènes physiques qui régissent ses performances.

Nous nous avons présenté les résultats de caractéristique I-V de transistor HEMT AlGa_xN/GaN à 2D par logiciel Silvaco ATLAS et concerne que l'effet de quelque paramètres physique et géométrique pour améliorer la performance de transistor parmi eux (le teneur d'aluminium (x), la concentration de dopage (N_D)...etc).

Enfin, on trouve un courant de saturation drain-source plus élevées pour un composant avec 400 nm de couche tampon, $N_D(\delta) = 4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, et la fraction molaire d'aluminium $x = 20\%$ de la couche barrière, à $V_{GS} = 2 \text{ V}$. Pour cette structure, les caractéristiques de transfert afficher une basse de tension de seuil et la valeur de transconductance maximale plus élevée, parmi les simulées structures HEMT.

Résumé

L'électronique de puissance comme moyen de contrôle de l'énergie prend une place très importante dans les technologies modernes. Les transistors HEMTs AlGa_N/Ga_N sont largement utilisés dans les applications à forte puissance avec des grandes vitesses de commutation générant de faibles pertes. La recherche de modèles du transistor HEMT engendrant des simulations en accord avec l'expérience est devenue un défi pour la recherche actuelle.

La recherche actuelle vise à étude de l'impact des paramètres sur les caractéristiques électriques d'un transistor HEMT à base de AlGa_N/Ga_N, nous avons déduit l'effet des propriétés structurales (l'épaisseur de couche Ga_N) et effets dus aux propriétés des matériaux telles que la fraction molaire de l'aluminium et la concentration de dopage, tout cela en utilisant d'un simulateur commercial appelé Silvaco ATLAS.

Mot clé : HEMTs, AlGa_N/Ga_N , Silvaco ATLAS

ملخص

تحتل إلكترونيات الطاقة مكانًا مهمًا للغاية كوسيلة للتحكم في الطاقة ، في التقنيات الحديثة. تستخدم الترانزستورات المبنية على المواد AlGa_N / Ga_N على نطاق واسع في تطبيقات الطاقة العالية مع سرعات تحويل عالية تولد خسائر منخفضة. أصبح البحث عن نماذج من ترانزستورات HEMT التي تولد عمليات المحاكاة بالاتفاق مع التجربة تحديًا للبحث الحالي.

يهدف البحث الحالي إلى دراسة تأثير المعلمات على الخصائص الكهربائية للترانزستور HEMT المبنى على المواد AlGa_N / Ga_N ، وقد استنتجنا تأثير الخصائص الهيكلية (سمك طبقة Ga_N) وتأثيرات خصائص المواد مثل تركيز المنشطات ، كل هذا باستخدام برنامج محاكي تجاري يسمى Silvaco ATLAS.

الكلمات المفتاحية : HEMTs, AlGa_N/Ga_N , Silvaco ATLAS