



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**

Présentée par : **LALAM Halima**

Thème

**Etude de l'impact des paramètres structuraux sur
les caractéristiques électriques d'un HEMT à base
de GaN**

Soutenu le , 12/07/2021

Devant le Jury :

RABEHI Abdelaziz	Président	M.C.A	Univ-Tissemsilt
DOUARA Abdelmalek	Encadreur	M.C.B	Univ-Tissemsilt
CHEBBAH Kheira	Examineur	M.C.B	Univ-Tissemsilt

Année universitaire : 2020-2021

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents à qui je dois tous,

A mon marie Bilal.

A ma belle fille célia.

je les Remercier à

leurs encouragements, aides et les sacrifices

*Qu'ils ont fait pour moi que dieu les protèges A
mes chers et adorables sœurs et frères Ilyes Assia*

Anas et Imad

Remerciements

*Tout d'abord, une louange, remerciement et gratitude à Dieu le tout puissant qui nous'a guidé sur le droit chemin tout au long du travail et nous 'a inspiré les bons pas et les justes reflexes. Sans sa miséricorde, ce travail n'aura pas pu être abouti. Nous tenons à remercier sincèrement à notre encadreur. **Mr douara abdelmalek** qui a mis toute sa compétence à notre disposition, pour ces directives conseils judicieux et pour son suivi régulier à l'élaboration de ce modeste travail.*

Nous voudrons aussi exprimer toute notre gratitude et nos remerciements à tous les enseignants de spécialité d'électronique de l'Université de tissemsilt

Nous tenons à exprimer nos remerciements également aux
Membres de jury,

SOMMAIRE

Sommaire

Introduction générale	01
------------------------------------	-----------

Chapitre I : Le nitrure de Gallium (GaN)

I.1 Introduction	03
I.2 Les matériaux III-V	04
I.3 Le nitrure de gallium (GaN)	04
I.3.1 Structure cristalline du GaN	05
I.3.1.1 Structure cristalline zinc blende des nitrures	05
I.3.1.2 Structure cristalline wurtzite des nitrures	05
I.3.2 Les différents substrats utilisés pour la croissance de GaN	06
I.3.2.1 Le saphir (Al ₂ O ₃)	06
I.3.2.2 Le silicium (Si)	06
I.3.2.3 Le substrat carbure de silicium(SiC)	06
I.4 Les hétérostructures à base de nitrures	07
I.4.1 Propriétés générales des matériaux III-N	08
I.4.2 Les caractéristiques générales du nitrure de galium(GaN)	09
I.4.2.1 Les matériaux grand-gap	09
I.4.2.2 Champ critique ou champ de claquage	09
I.4.2.3 Conductivité électrique, résistivité, conductivité thermique	09
I.4.2.4 Mobilité des électrons	10
I.4.2.5 Largeur de bande interdite (gap)	10
I.4.2.6 Polarisation spontanée et piézoélectrique	11
I.4.2.6.a Polarisation spontanée	12
I.4.2.6.b Polarisation piézoélectrique	14
I.5 La croissance des nitrures d'éléments	16
I.5.1 Techniques d'épitaxie employées dans la filière GaN	16
I.5.1.1 Croissance MOVPE	16

I.5.1.2 Croissance par jets moléculaires (MBE)	17
I.5.1.3 Croissance HVPE	18
I.6 Domaines d'applications de matériau III.V	18
I.7 Conclusion	21
Référence bibliographies	22

Chapitre II : le Transistor HEMT

II.1 Introduction	24
II.2 Les transistors à effet de champ	25
II.2.1. Généralités	25
II.2.2 Les transistors à haute mobilité électronique (HEMTs)	25
II.2.2.1.1 Le HEMT à base de AlGa _N /Ga _N	26
II.3 Les hétérostructures de matériaux	26
II.4 Généralités sur les transistors à haute mobilité électronique(HEMTs)	27
II.4.1 Historique	27
II.4.2 Structure physique du transistor HEMT Al _x Ga _{1-x} N/Ga _N	27
II.4.3 Description des couches d'un transistor HEMT	28
II.4.4 Concentration de porteurs dans une hétérojonction AlGa _N /Ga _N	29
II.5 Principe de fonctionnement d'un HEMT	30
II.6 Performances des composants HEMT à base de Ga _N	32
II.7 Conclusion	34
Référence bibliographies	35

Chapitre III : Résultats de simulation

III.1. Introduction	37
III.2. Présentation de SILVACO	37
III.2.1 Présentation ATLAS	38
III.2.2. Deckbuild	39
III.2.3. Tonyplot	40
III.3. Caractéristiques électriques des transistors HEMTs	40
III.4. Résultats de simulation et discussion	43
III.4.1. Variation de l'épaisseur de la couche AlN	43

III.4.2 Variation de l'épaisseur de la couche de canal GaN	44
III.4.3 Variation de la fraction molaire de l'aluminium (x).....	45
III.4.4. Influence du dopage de la couche barrière AlGaN	47
III.4.5. Simulation à différentes tensions	48
III.5. Conclusion	50
Référence bibliographies	51
Conclusion générale	52

Liste des figures

Liste des Figures

Chapitre I : Le nitrure de Gallium (GaN)

Figure I.1: Structure cristallines possibles pour les semiconducteurs III-V.....	05
Figure I.2 : Représentation des séquences de couches d'atomes donnant lieu à deux polarités différentes.....	12
Figure I.3 : Génération d'un champ électrique E par la polarisation spontanée.....	13
Figure I.4 : Plan d'atomes d'une structure wurtzite de GaN contrainte et répartition des moments dipolaires (Face Ga)	14
Figure I.5 : Polarisation piézoélectrique dans le GaN	15
Figure I.6: Schéma illustrant la croissance épitaxiale	17
Figure I.7 : Gammes de puissances accessibles en fonction de la fréquence pour différents matériaux semiconducteurs	20

Chapitre II : le Transistor HEMT

Figure II.1 : Diagrammes schématiques montrant les différents types d'hétérojonction.....	27
Figure II.2 : Structure générale et différentes couches du HEMT AlGa _N /Ga _N	28
Figure II.3: Structure AlGa _N /Ga _N à face Ga, où Ga _N est relaxé et AlGa _N contraint en tension.....	30
Figure II.4 : Structure de bande d'un HEMT en présence d'un potentiel de grille.....	31
Figure II .5: Feuille de route des domaines de commercialisation des HEMTs à base de Ga _N en fonction des fréquences de fonctionnement	33

Chapitre III : Résultats de simulation

Figure III.1 : Schéma synoptique des modules utilisés dans la simulation par TCAD SILVACO	38
Figure III.2 : Le logiciel Silvaco en cours d'exécution.....	39
Figure III .3 : Comparaison des caractéristiques courant-tension d'un transistor HEMT.....	40

Figure III .4 : Caractéristiques de sortie $I_{DS}(V_{DS})$ d'un transistor HEMT à mode d'enrichissement	42
Figure III.5 : Structure de transistor HEMT $Al_xGa_{1-x}N/GaN$ étudié.....	43
Figure III .6 : Caractéristiques de sortie de HEMT $Al_{0.2}Ga_{0.8}N / GaN$ pour différentes valeurs de l'épaisseur de AlN.....	44
Figure III.7 : Caractéristiques de transfert du HEMT $Al_{0.2}Ga_{0.8}N / GaN$ pour les différentes valeurs de l'épaisseur de AlN.....	44
Figure III .8 : Caractéristiques de sortie de HEMT $Al_{0.2}Ga_{0.8}N / GaN$ pour différentes valeurs de l'épaisseur de canal (GaN) .avec $V_G=0V$	45
Figure III .9 : Caractéristiques de transfert du HEMT $Al_{0.2}Ga_{0.8}N / GaN$ pour les différentes valeurs de l'épaisseur de canal (GaN) ,avec $V_{DS}=0$	45
Figure III .10 : Caractéristiques de sortie de HEMT $Al_xGa_{1-x}N / GaN$ pour différentes valeurs de fraction molaire (x).....	46
Figure III .11 : Caractéristiques de transfert du HEMT $Al_xGa_{1-x}N / GaN$ pour les différentes valeurs de l'épaisseur de canal (GaN)	46
Figure III .12 : Caractéristiques de sortie de HEMT $Al_{0.2}Ga_{0.8}N / GaN$ pour les différentes valeurs de $N_D (\delta)$	47
Figure III .13 : Caractéristiques de transfert du HEMT $Al_{0.2}Ga_{0.8}N / GaN$ pour les différentes valeurs de $N_D (\delta)$	48
Figure III .14 : Caractéristiques de transfert du HEMT $Al_{0.2}Ga_{0.8}N / GaN$ pour les différentes valeurs de V_{DS}	49
Figure III .15 : Caractéristiques de sortie de HEMT $Al_{0.2}Ga_{0.8}N / GaN$ pour les différentes valeurs de V_G	49

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Extrait de tableau périodique.....	04
Tableau I.2 : Propriétés des principaux substrats pour le GaN.....	07
Tableau I.3: Propriétés des matériaux III-N.....	08
Tableau I.4 : Paramètres de la variation de la bande interdite en fonction de la température.....	11
Tableau I.5: Valeurs numériques théoriques de P_{SP}	13
Tableau I.6: Valeurs numériques des constantes piézoélectriques et élastiques de GaN, AlN, InN.....	15
Tableau II.1 : Caractéristiques de quelques composants commercialisés par les industriels spécialistes dans la fabrication des HEMTs à base de GaN.....	33

Introduction Générale

Le développement de systèmes de télécommunications militaires ou grand public utilisant des micro-ondes nécessite des composants discrets et puissants pouvant fonctionner à des fréquences élevées.

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.

Les cristaux de nitrure de gallium (GaN) offrent des qualités inhérentes qui répondent aux exigences attendues, ses caractéristiques cristallines offrent aux transistors à effet de champ la robustesse et les performances requises pour les applications à haute puissance et à très haute température.

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 AlGaN/GaN, et on expliquera son principe de fonctionnement et le rôle des différentes couches qui le composent, en fin nous étudiera les caractéristiques électriques du HEMTs AlGaN/GaN 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

Le nitrure de Gallium (GaN)

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, Ces deux facteurs indissociables font l'importance de ces matériaux, malgré le nombre limité d'éléments et de composés semi-conducteurs [1].

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
B 5 Bore 10,811	C 6 Carbone 12,0107	N 7 Azote 14,00674
Al 13 Aluminium 26,981538	Si 14 Silicium 28,0855	P 15 Phosphore 30,973761
Ga 31 Gallium 69,723	Ge 32 Germanium 72,64	As 33 Arsenic 74,9216
In 49 Indium 114,818	Sn 50 Étain 118,710	Sb 51 Antimoine 121,750

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 [6]. Le nitrure de gallium offre également la possibilité de réaliser de hétérojonction avec le AlGaN, permettant la fabrication de transistors HEMTs.

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 nitrides 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 nitrides

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 nitrides

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)

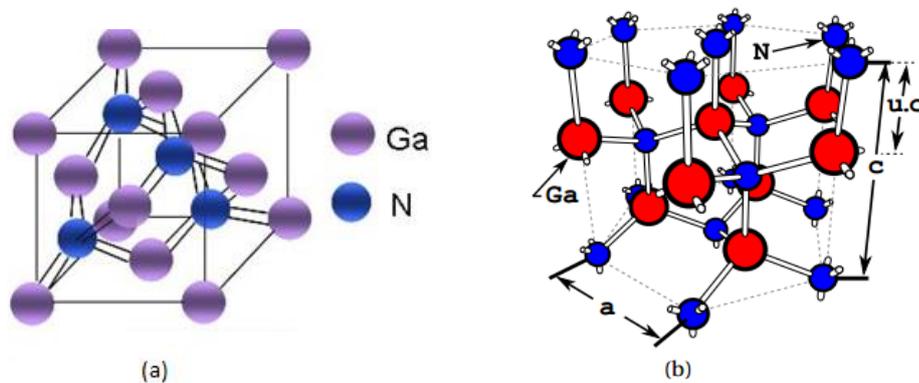


Figure I .1: Structure cristallines possibles pour les semiconducteurs III-V [8].

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 6,31	3.3/3.0	1.12
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 que $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 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].

L'inconvénient de cette structure est que les électrons se déplacent dans une couche dopée qui limite leur mobilité. Afin de surmonter le problème de la mobilité faible du

MESFET, des hétérostructures à haute mobilité électronique ont été réalisées, ces structures nommées HEMT ont une grande vitesse de porteurs.

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 (a₀) de l'AlN, de l'InN et du GaN. Cette dernière détermine avec une bonne approximation du paramètre de maille a₀ des composés ternaire Al_xGa_{1-x}N en fonction du taux d'aluminium x soit [13] :

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

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 [14] :

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

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) :

$$K = L.T.\sigma \quad (I.3)$$

Où : K est la conductivité thermique en $W/cm.K$, L est le nombre de Lorentz ($2.45 \times 10^{-8} W.\Omega/K^2$), 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 : $cm^2/V.s$) 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 [15]. Les variations de la largeur de la bande interdite peuvent être décrites approximativement par la fonction suivante [16].

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

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

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 [5].

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).

I.4.2.6.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.

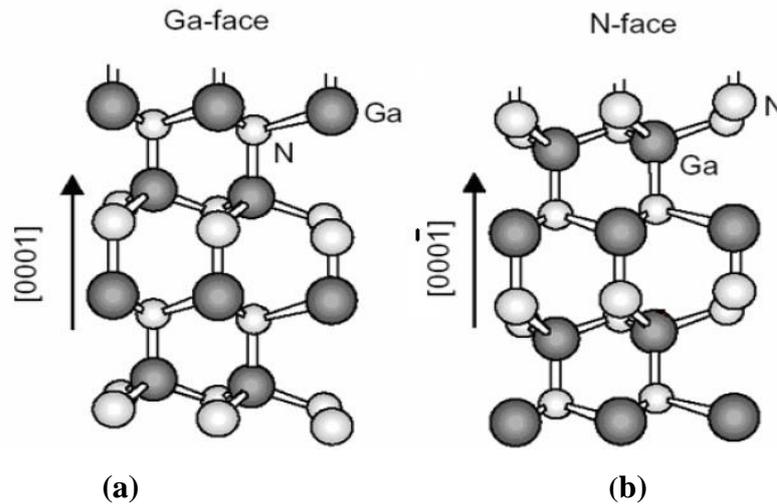


Figure I.2 : Représentation des séquences de couches d'atomes donnant lieu à deux polarités différentes [5].

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.

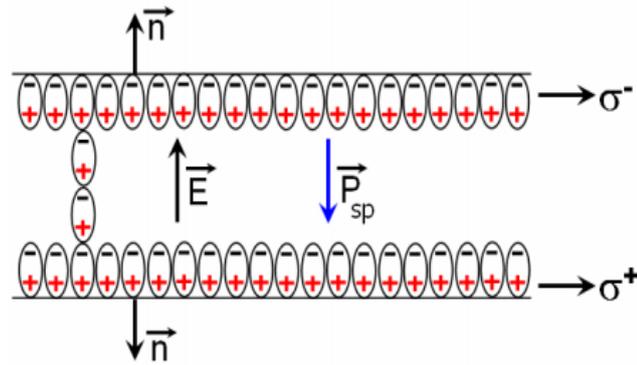


Figure I.3 : Génération d'un champ électrique E par la polarisation spontanée [17].

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 nitrides d'éléments III sont résumées dans le tableau I.5.

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

Tableau I.5 : Valeurs numériques théoriques de P_{SP} [17].

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 .

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

I.4.2.6.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.

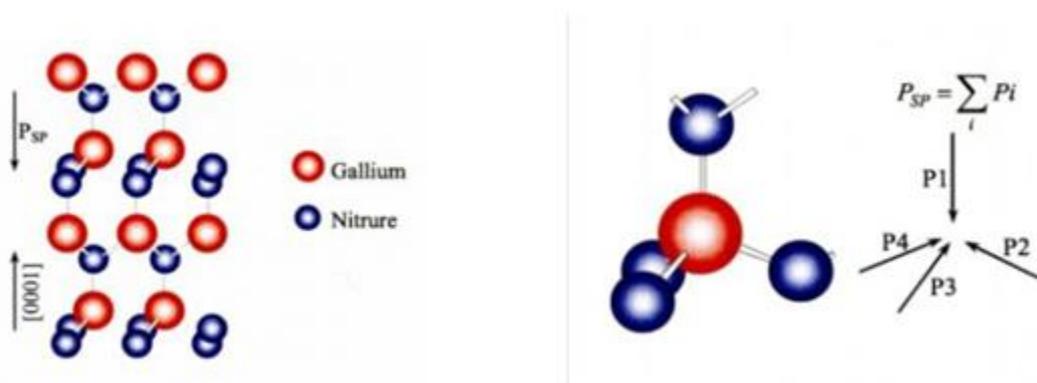


Figure I .4 : Plan d'atomes d'une structure wurtzite de GaN contrainte et répartition des moments dipolaires (Face Ga) [17].

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 [15] :

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

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).

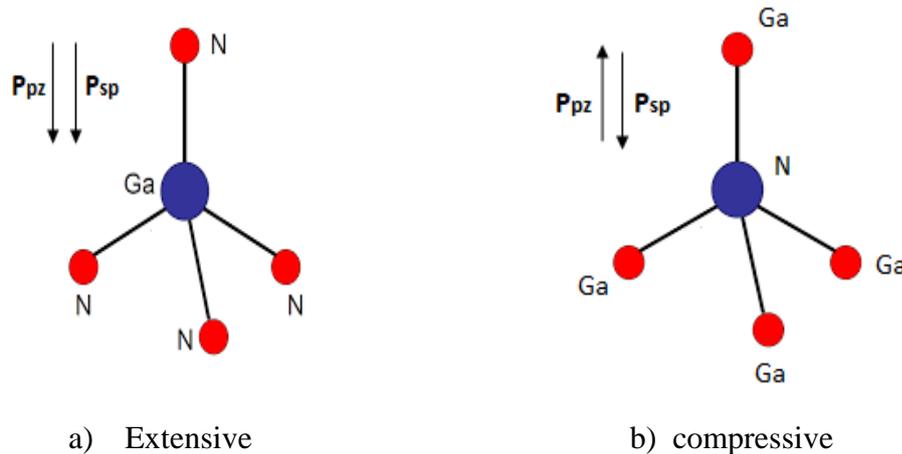


Figure I .5 : Polarisation piézoélectrique dans le GaN [16].

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

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 .

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.

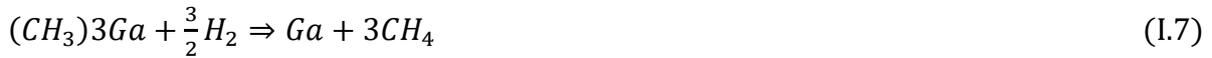
I.5.1 Techniques d'épitaxie employées dans la filière GaN

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 H_2 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 (NH_3), 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. En définitive, cette méthode de croissance permet des vitesses de croissance de l'ordre de $30 \mu\text{m/h}$.

I.5.1.2 Croissance par jets moléculaires (MBE)

La croissance par jets moléculaires est une méthode qui consiste à envoyer les éléments constituant le matériau par jets de molécules sur un substrat chauffé entre 450°C et 850°C , en les évaporant (à partir de sources liquides) ou en les sublimant (à partir de sources solides) pour le cas du gallium. Cette technique s'effectue sous un vide très poussé ($<10^{-6}$ mbar). De la qualité de ce vide dépendra la qualité des films déposés. Les atomes arrivent avec une certaine énergie sur la surface du substrat. Si la température est trop élevée, ils ne vont pas adhérer à la surface (Figure I.6-A). Mais pour une température optimisée, ils se fixent dans les lacunes du substrat Figure I.7-B) ou, par nucléation, à d'autres atomes déjà incorporés sur le substrat (Figure I.6 C).

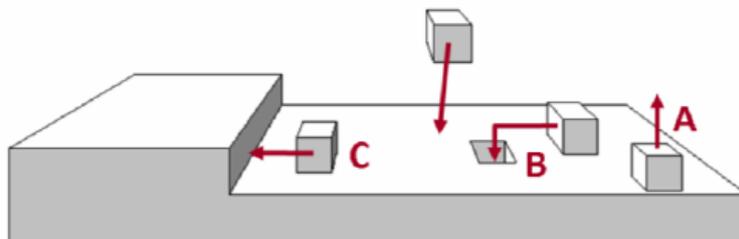


Figure I.6 : Schéma illustrant la croissance épitaxiale [12].

Le matériau va ainsi croître couche atomique par couche atomique. Ce type de croissance est donc beaucoup plus lent, environ $1\mu\text{m/h}$. On va pouvoir ainsi contrôler parfaitement l'épaisseur déposée. Pour cela on utilise généralement une sonde RHEED

(Reflexion High Energy Electron Diffraction) installée dans le bâti de dépôt qui va contrôler en temps réel la quantité d'éléments incorporés.

Pour le dopage du nitruire de gallium, on utilise aussi des sources solides de magnésium (dopage type p) et de silicium (type n). A ce sujet, nous verrons plus tard que les dopants incorporés lors de la croissance du matériau vont être sources de contraintes à l'origine de défauts dans la couche, pouvant mener à la destruction de ce film.

La MBE est reconnue pour donner de bons résultats concernant la croissance des matériaux III-V comme GaAs, InP, GaP. On préférera cependant la MOCVD pour la croissance des nitrures d'éléments III essentiellement pour des raisons de vitesse de croissance.

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.7 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.

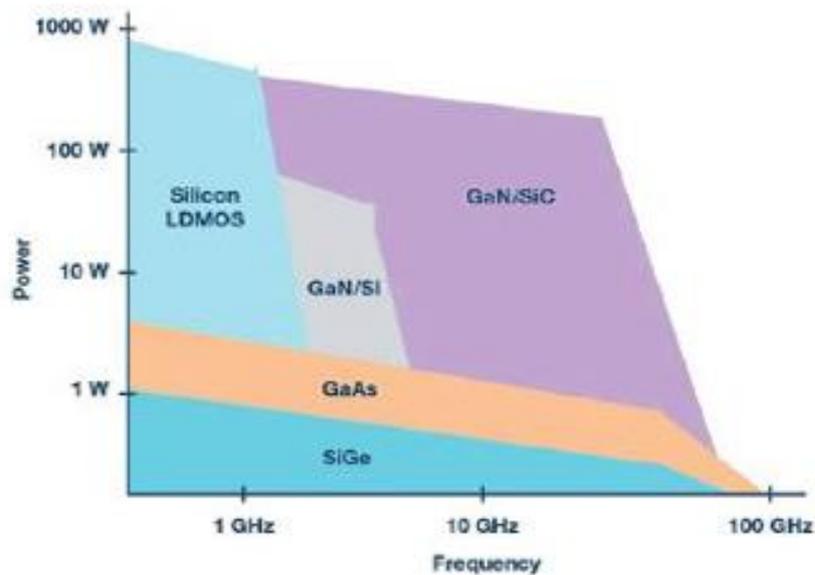


Figure I.7 : Gammes de puissances accessibles en fonction de la fréquence pour différents matériaux semiconducteurs.

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°C. Cette température de fonctionnement est deux fois supérieure à celle des composants à base de Si sur isolant (SOI) qui ne dépasse pas 300°C.

I.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.

Références Bibliographiques

- [1] N. Baghdadli,
Etude des propriétés optoélectroniques des semiconducteurs III-V à base de galium,
Mémoire de magister, université abou-bakr belkaid – tlemcen, 2010.
- [2] S. A.Ghefir,
Etude ab initio des propriétés structurales et électroniques des semi-conducteurs III-V à
base de Phosphore (AlP,InP), Mémoire de magistère, université abou-bakr belkaid –
tlemcen, 2013.
- [3] A.Hamdoune
Elaboration du nitruire de gallium ; Etude des ses propriétés et application, thèse de
Doctorat, université abou-bakr belkaid – tlemcen, 2006.
- [4] P.Agnès,
Caractérisation électrique et optique du nitruire 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 électrothermique non linéaire de transistors à effet de
champ GaN 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 GaN.

- [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. Laviron, 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 AlGa_N/Ga_N incluant les effets électriques, Mémoire de magister , université de constantine,2007.

Chapitre II

Le Transistor HEMT

II.1 Introduction

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 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**xyde **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 à haute mobilité d'électron HEMT (**H**igh **E**lectron **M**obility **T**ransistor).

II.2.2 Les transistors à haute mobilité électronique (HEMTs)

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 [3,4].

II.2.2.1 Le HEMT à base de 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.1. Dans

l'hétérojonction de type I, figure II.1.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.1.b, ou brisé, figure II.1.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.

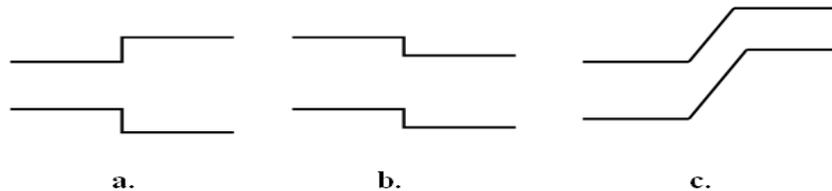


Figure II .1 : Diagrammes schématiques montrant les différents types d'hétérojonction.

II.4 Généralités sur les transistors 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.2 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.

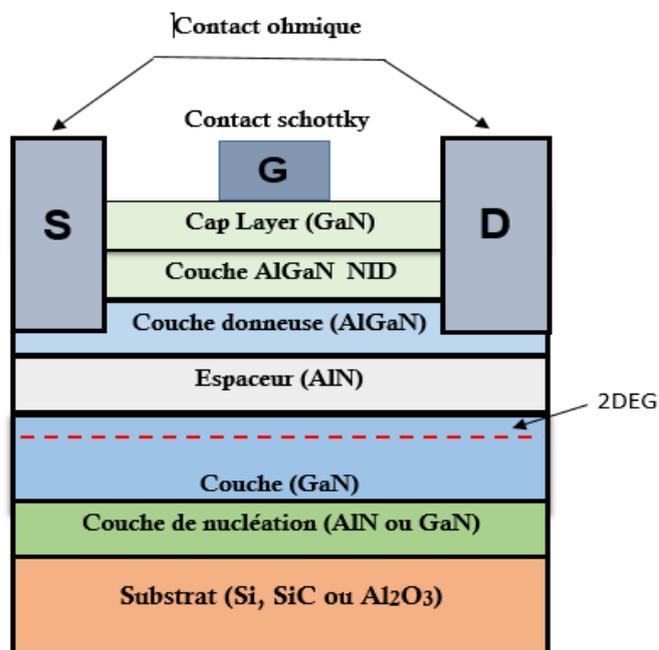


Figure II .2 : Structure générale et différentes couches du HEMT AlGaN/GaN [10].

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.3, 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 le AlGaN, ces dernières ne sont pas représentées sur la figure II.3.

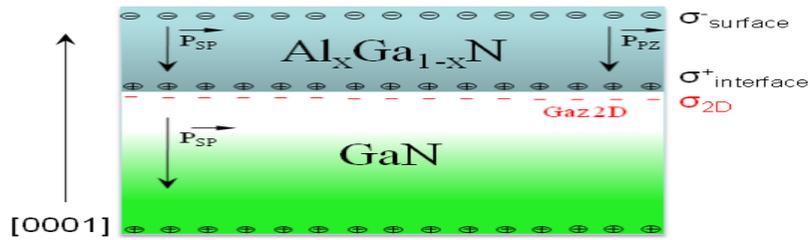


Figure II .3 : Structure AlGaN/GaN à face Ga, où GaN est relaxé et AlGaN contraint en tension.

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

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

Avec

$$P_{PZ_{AlGaN}}(x) = 2 \frac{(a-a_0(x))}{a_0(x)} \left(e_{31}(x) - e_{31}(x) \frac{C_{13}(x)}{C_{33}(x)} \right) \frac{C}{m^2} \quad (II. 2)$$

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

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.4 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].

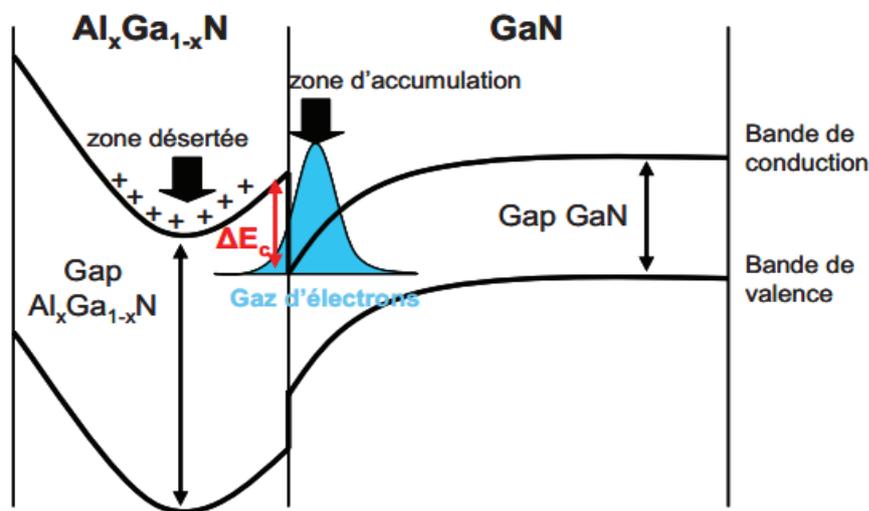


Figure II .4 : Structure de bande d'un HEMT en présence d'un potentiel de grille.

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.5, 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.

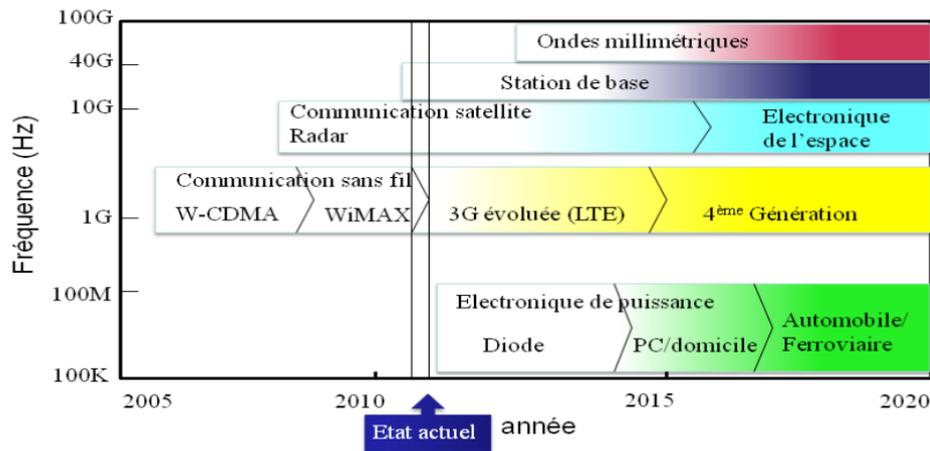


Figure II .5 : Feuille de route des domaines de commercialisation des HEMTs à base de GaN en fonction des fréquences de fonctionnement [17].

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 II.1 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.

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.

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. Scavenec,
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 Beaufeuil, P. Delescluse, P. Etienne, M. Laviron, J. Chaplart, N. T. Linh,
Two dimensional electron gas MESFET structure.
- [7] T. Mimura, S. Hiyamizu, T. Fujii, K. Nanbu,
AIP 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 électrothermique 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 AlGaN/GaN
,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 AlGaN/GaN HEMT pallet amplifier for S-band high power application, pp.
176 –179, oct. 2007.
- [14] T. Oku, Y. Kamo, et M. Totsuka,
AlGaN/GaN HEMTs passivated by Cat-CVD SiN 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 AlGaN/GaN 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 GaN High Electron Mobility Transistors,
Electron Device Letters, IEEE, vol. 29, pp. 287 –289, april 2008.

Chapitre III

Résultats de simulation

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].

Ce chapitre est consacré à la présentation des résultats de simulation du transistor à grande mobilité d'électrons HEMT à base d'hétérostructure AlGaN/GaN.

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

Dans ce travail, nous étudions l'impact de l'épaisseur du canal et l'épaisseur de la couche d'espacement sur les caractéristiques courant-tension à l'aide du simulateur Atlas TCAD, et aussi nous simulons en faisant varier les différents paramètres importants du dispositif (la fraction molaire d'Aluminium et la concentration de dopage dans la couche de barrière). Notre structure simulée trouve le courant de saturation source drain maximal 43 mA/mm avec une épaisseur du canal est de 200 nm et l'existence d'une couche intermédiaire de AlN à 15 nm.

III.2. Présentation de 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 [3]. Dans notre étude, les simulations sont effectuées par le module ATLAS.

III.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.

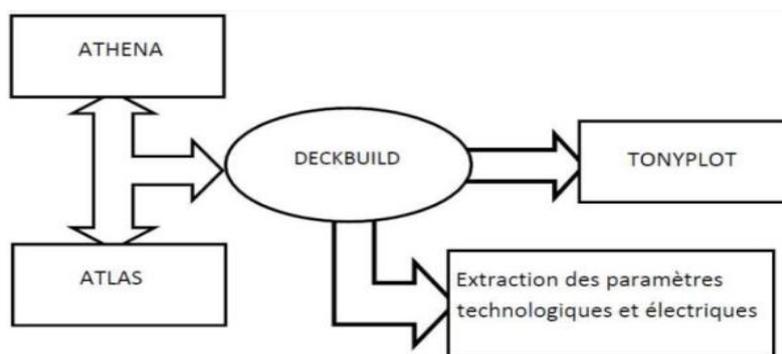


Figure III.1 : Schéma synoptique des modules utilisés dans la simulation par TCAD SILVACO [4].

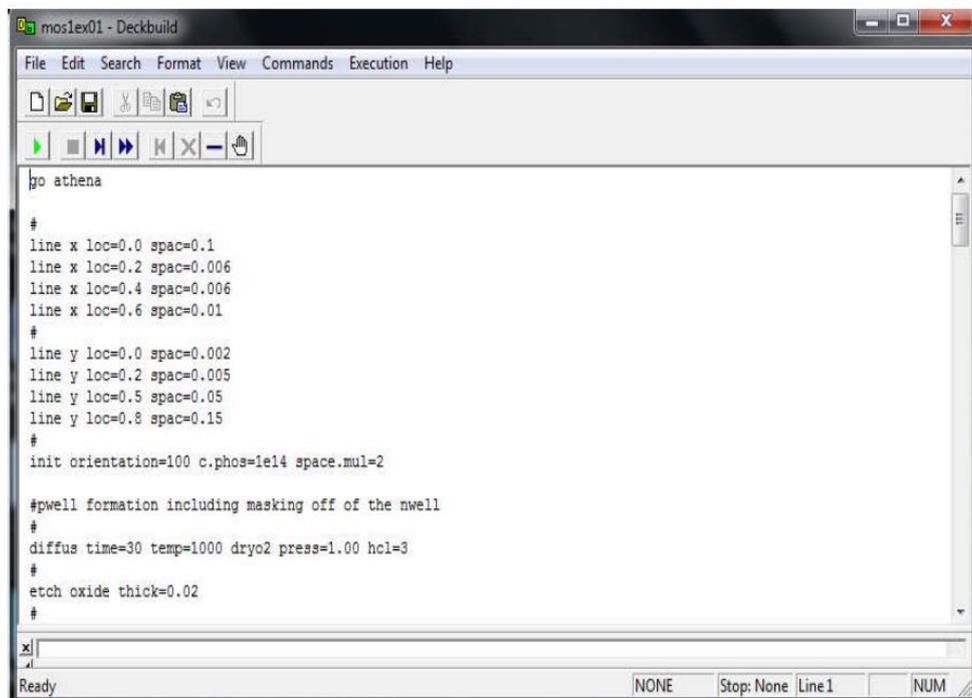
La figure III.1 présente le schéma bloc des modules utilisés dans la simulation par TCAD SILVACO. Les paramètres d'entrée de simulation, définissant les différentes étapes technologiques et les phénomènes physiques, sont réalisés avec le module DECKBUILD de TCADSILVACO.

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.

III.2.2. 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.).



```
moslex01 - Deckbuild
File Edit Search Format View Commands Execution Help
[Icons]
[Navigation icons]
|go athena
#
line x loc=0.0 spac=0.1
line x loc=0.2 spac=0.006
line x loc=0.4 spac=0.006
line x loc=0.6 spac=0.01
#
line y loc=0.0 spac=0.002
line y loc=0.2 spac=0.005
line y loc=0.5 spac=0.05
line y loc=0.8 spac=0.15
#
init orientation=100 c.phos=1e14 space.mul=2
#pwell formation including masking off of the nwell
#
diffus time=30 temp=1000 dryo2 press=1.00 hcl=3
#
etch oxide thick=0.02
#
x|
Ready NONE Stop: None Line 1 NUM
```

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

III.2.3. 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).

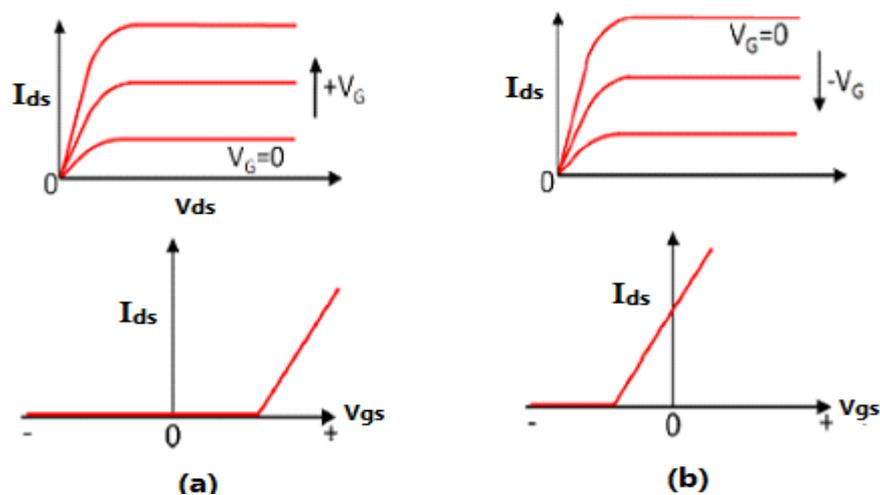


Figure III .3 : Comparaison des caractéristiques courant-tension d'un transistor HEMT [1].

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

$$V_P = -\frac{q}{\epsilon_S} \int_0^{y_0} N_D(y) y dy \quad (\text{III. 4})$$

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

$$V_P = \frac{qN_D y_0^2}{2\epsilon_S} \quad (\text{III. 5})$$

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.

$$V_{th} \approx \phi_{Bn} - V_P - \frac{\Delta E_c}{q} \quad (\text{III. 6})$$

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.4 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:

$$n_s(x) = \frac{C_0[V_G - V_{th} - \psi(x)]}{q} \quad (\text{III. 7})$$

$$\text{Où} \quad C_0 = \frac{\epsilon_S}{y_0 + y_{NID} + \Delta y} \quad (\text{III. 8})$$

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:

$$I_{DS}(x) = W \mu_n q n_s E(x) = W \mu_n C_0 [V_G - V_{th} - \psi(x)] \frac{d\psi(x)}{dx} \quad (\text{III. 9})$$

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:

$$I_{DS} = \frac{W \mu_n C_0}{L} \left[(V_G - V_{th}) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right] \quad (\text{III. 10})$$

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. 10) est ramenée à une expression ohmique:

$$I_{lin} = \frac{W \mu_n C_0 (V_G - V_{th}) V_{DS}}{L} \quad (III. 11)$$

À partir de l'équation (III. 10), la transconductance peut être obtenue de la manière suivante:

$$g_{m,lin} \equiv \frac{dI_{lin}}{dV_G} = \frac{W \mu_n C_0 V_{DS}}{L} \quad (III. 12)$$

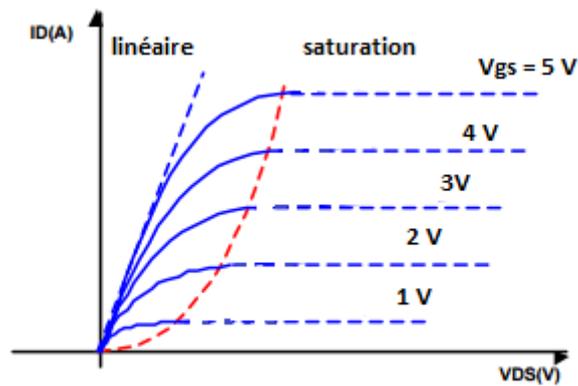


Figure III .4 : Caractéristiques de sortie $I_{DS}(V_{DS})$ d'un transistor HEMT à mode d'enrichissement [1].

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. 7) que :

$$V_{DS,sat} = V_G - V_{th} \quad (III. 13)$$

Ce qui donne un courant de drain de saturation:

$$I_{DS,sat} = \frac{W \mu_n C_0}{2L} (V_G - V_{th})^2 \quad (III. 14)$$

III.4. Résultats de simulation et discussion

La structure du HEMT $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ étudié est illustré sur la figure III.5, nous utilisons du SiC comme substrat. Le canal à base de GaN non intentionnel dopé (n.i.d), avec $N_{D1} = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ de type n. L'épaisseur de canal (d_{ch}) variait dans notre calcul, cette couche sous de couche de l'espaceur AlN d'épaisseur variable (d_{sp}) avec $N_{D2} = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, aussi, nous avons une couche barrière $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ de 50 nm dopée de manière non intentionnelle (structure non intentionnellement dopée) dans laquelle est insérée une couche de dopage δ est N_D .

Toutes les structures simulent en utilisant une longueur de grille de $2 \mu\text{m}$, et $L_{GS} = 3 \mu\text{m}$, un espacement grille-drain (L_{DG}) de $3 \mu\text{m}$. De plus, on prend une largeur de source-drain respectivement $W_S = W_D = 1 \mu\text{m}$. et $L_S = L_D = 3 \mu\text{m}$.

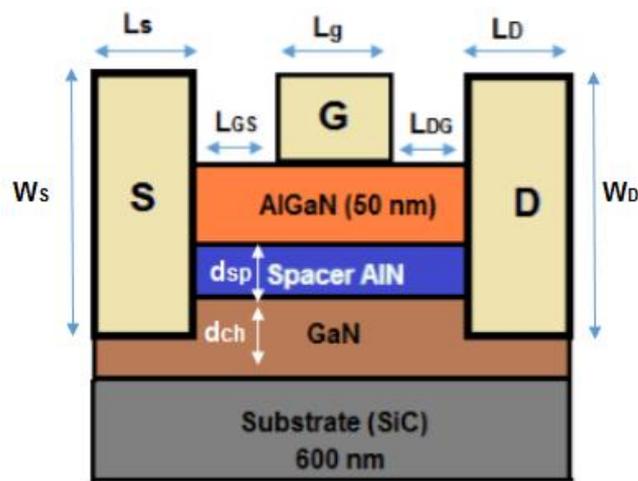


Figure III .5 : Structure de transistor HEMT $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ étudié.

III.4.1. Variation de l'épaisseur de la couche AlN

La caractéristique $I_{DS} (V_{DS})$ illustrée sur la figure III.6 à $V_G = 0$, et nous avons fait varier l'épaisseur de AlN, avec concentration de dopage dans la couche de barrière $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ est $N_D = 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. On peut voir que (I_{DS}) est beaucoup plus grande avec l'existence de la couche (AlN). Ceci est principalement dû à l'augmentation de la concentration de 2DEG.

En ce qui concerne les caractéristiques de transfert $I_{DS} (V_{GS})$, on observe ici que I_{Dmax} augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche d'espaceur, I_{Dmax} pour $d_{sp} = 15 \text{ nm}$ est de $464,5 \text{ mA/mm}$, alors qu'il est réduit à 102 mA/mm en absence de AlN, comme illustré dans la figure III.7.

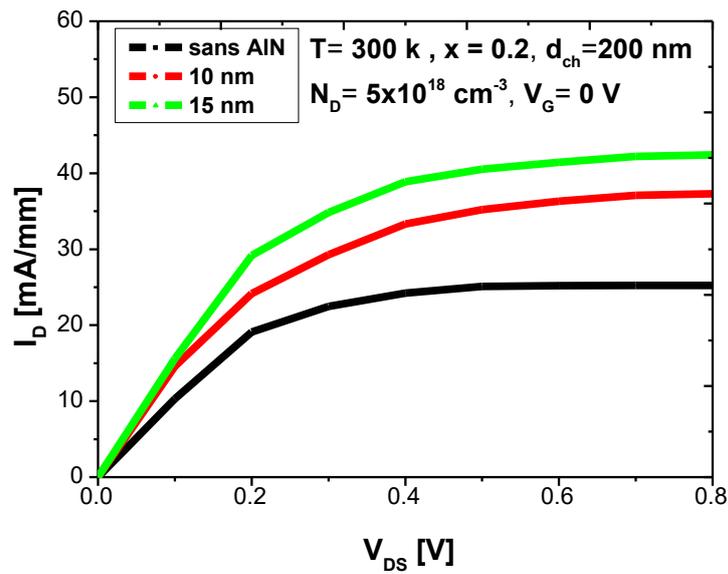


Figure III.6 : Caractéristiques de sortie de HEMT $Al_{0.2}Ga_{0.8}N / GaN$ pour différentes valeurs de l'épaisseur de AlN.

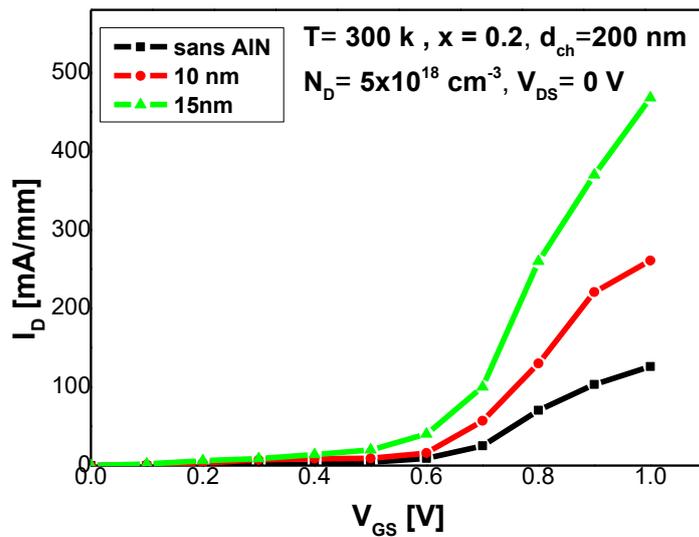


Figure III.7 : Caractéristiques de transfert du HEMT $Al_{0.2}Ga_{0.8}N / GaN$ pour les différentes valeurs de l'épaisseur de AlN.

III.4.2. Variation de l'épaisseur de la couche de canal GaN

Nous avons fixé l'épaisseur de AlN à 15 nm, et nous varions l'épaisseur du GaN dans notre calculs. À $V_G = 0$ V, Le courant de drain à source est relativement dû à la conductivité élevée de 200 nm d'épaisseur de la couche de canal de GaN. De plus, $I_{DS}(V_{GS})$ à $V_{DS} = 0$ V, rapporté

sur la figure III.9, l'influence de l'épaisseur du canal (GaN) est presque le même paramètre de l'espaceur (AlN).

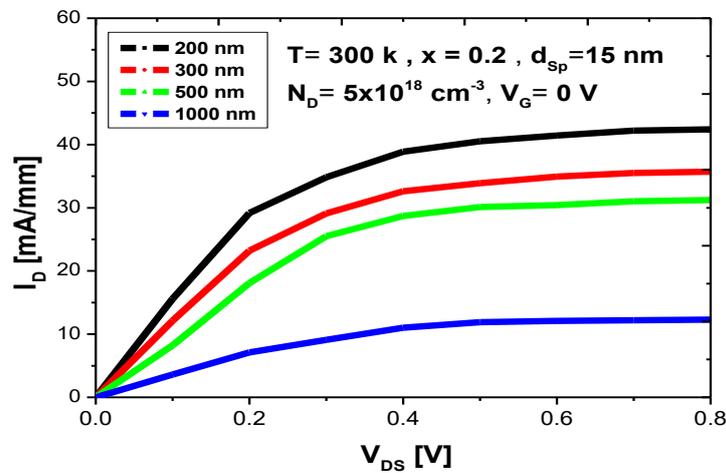


Figure III.8 : Caractéristiques de sortie de HEMT $Al_{0.2}Ga_{0.8}N / GaN$ pour différentes valeurs de l'épaisseur de canal (GaN) avec $V_G=0V$.

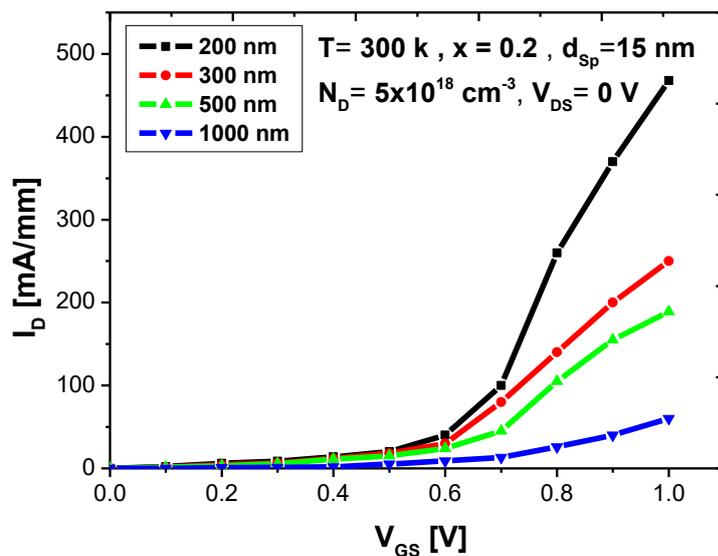


Figure III.9 : Caractéristiques de transfert du HEMT $Al_{0.2}Ga_{0.8}N / GaN$ pour les différentes valeurs de l'épaisseur de canal (GaN) avec $V_{DS}=0V$.

III.4.3. Variation de la fraction molaire de l'aluminium (x)

Comme le montre la figure III.10, les résultats des caractéristiques I_{DS} (V_{DS}) à $V_G = 0$, nous avons varié les pourcentages de la mole d'aluminium (20%, 30% et 38%), pour $x = 0,2$ nous trouvons la saturation maximale de la courant source de drain ($I_{DS,sat}$) par rapport à ceux obtenus avec $x = 0,3$ et $0,38$.

De plus, les résultats obtenus montrent qu'une augmentation de la transconductance et de l'efficacité du dispositif HEMT, et tout cela que nous pouvons réaliser en faisant varier la fraction molaire de Al dans la couche de AlGa_xN.

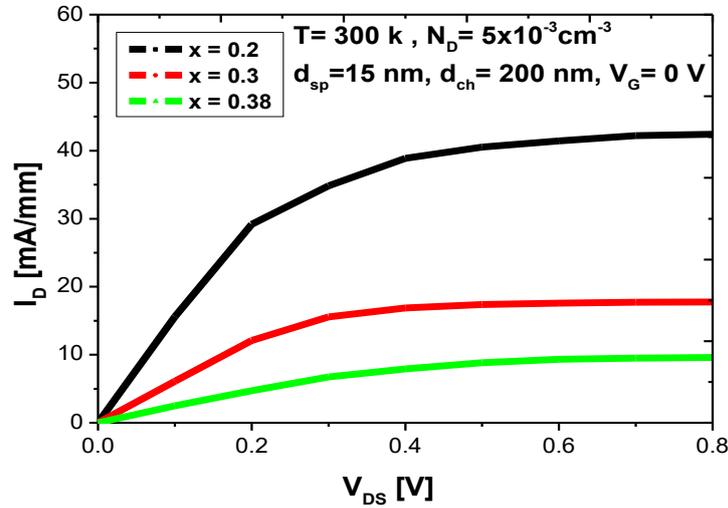


Figure III .10 : Caractéristiques de sortie de HEMT Al_xGa_{1-x}N / GaN pour différentes valeurs de fraction molaire (x).

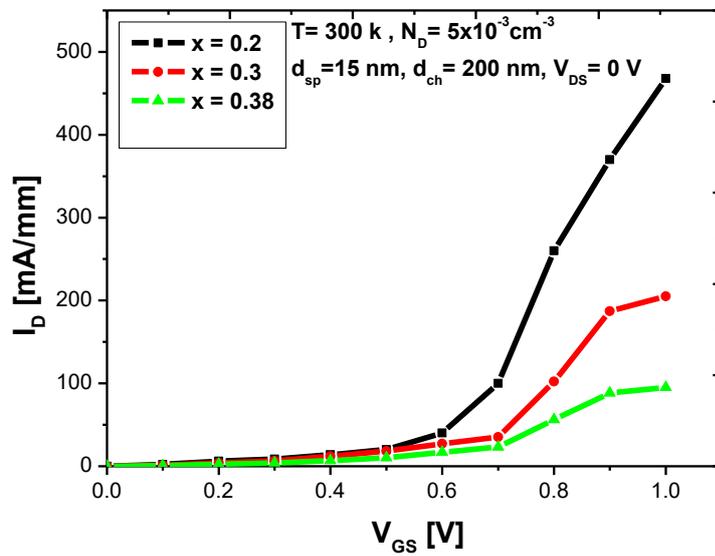


Figure III .11 : Caractéristiques de transfert du HEMT Al_xGa_{1-x}N / GaN pour les différentes valeurs de l'épaisseur de canal (GaN)

III.4.4. Influence du dopage de la couche barrière AlGaN

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 fixé d'autres paramètres.

Nous obtenons nos résultats dans la figure III.12, 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 relativement faible comme on peut le voir sur la figure III.13. Les résultats obtenus dans ce travail sont similaires à ceux obtenus par Bouguenna et al [5] qui retrouvent les mêmes tendances dans la variation du courant par rapport à la concentration du donneur.

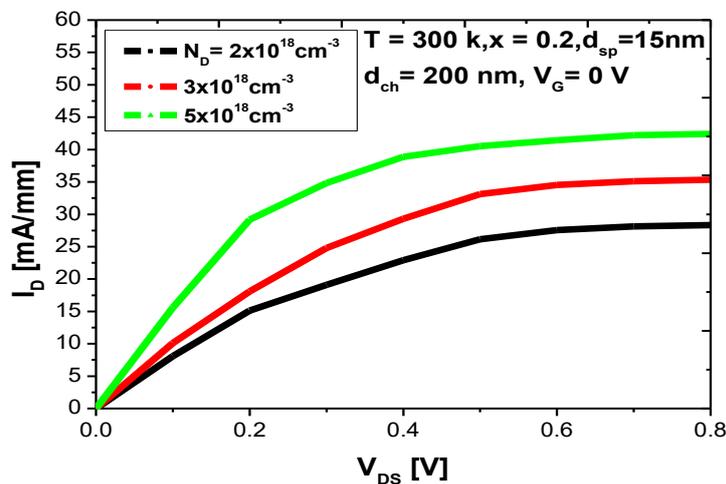


Figure III .12 : Caractéristiques de sortie de HEMT $Al_{0.2}Ga_{0.8}N / GaN$ pour les différentes valeurs de N_D (δ).

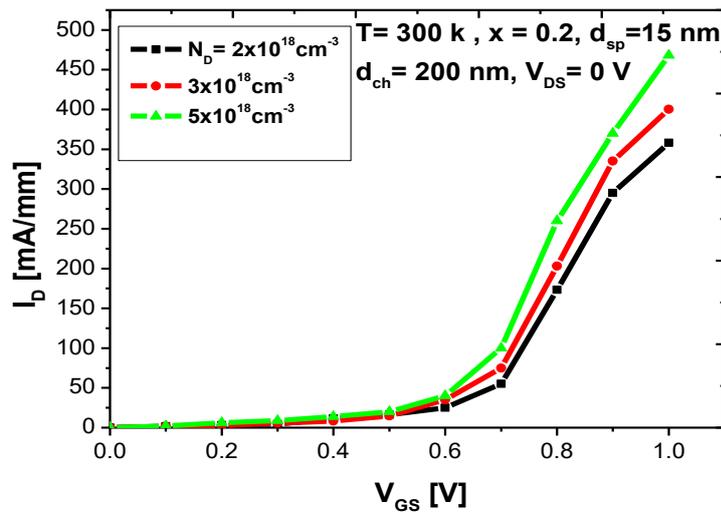


Figure III .13 : Caractéristiques de transfert du HEMT $\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{N}/\text{GaN}$ pour les différentes valeurs de N_D (δ).

III.4.5. Simulation à différentes tensions

Dans cette section, les figures III.14 et III.15 montrent les caractéristiques courant-tension avec différentes valeurs de V_{DS} et V_{GS} , respectivement. Nos calculs ont varié de -0,1 V à 0,2 V, avec l'augmentation de V_G , l'augmentation de la tension de drain calculée. L'effet des fuites de grille peut cependant être inclus dans les simulations.

Les résultats des caractéristiques $I_{DS}(V_{GS})$ sont tracés et un courant de drain élevé est observé lorsque la tension à la grille est inférieure comme indiqué sur la Figure III.15, selon les courbes, nous trouvons ($I_{D_{smax}}=505 \text{ mA/mm}$ à $V_{DS} = -0,1 \text{ V}$), et la tension de seuil de notre structure est de 0,2 V lorsqu'une tension drain-à-source est de 0 V.

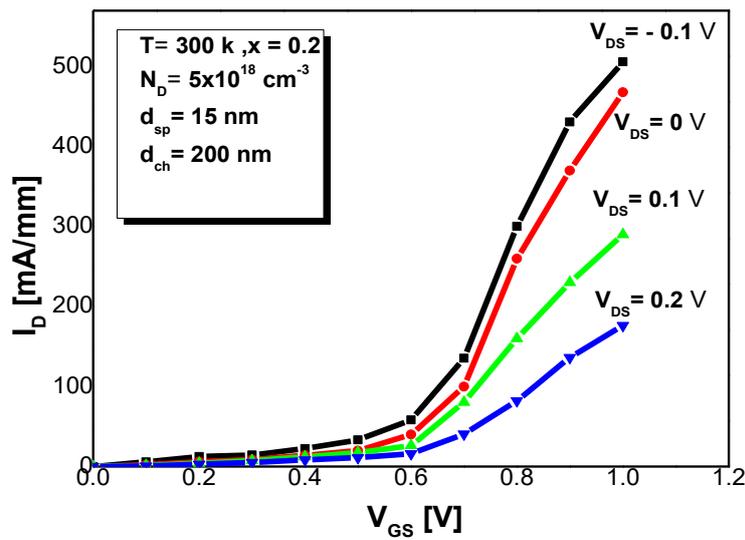


Figure III .14 : Caractéristiques de transfert du HEMT $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N} / \text{GaN}$ pour les différentes valeurs de V_{DS} .

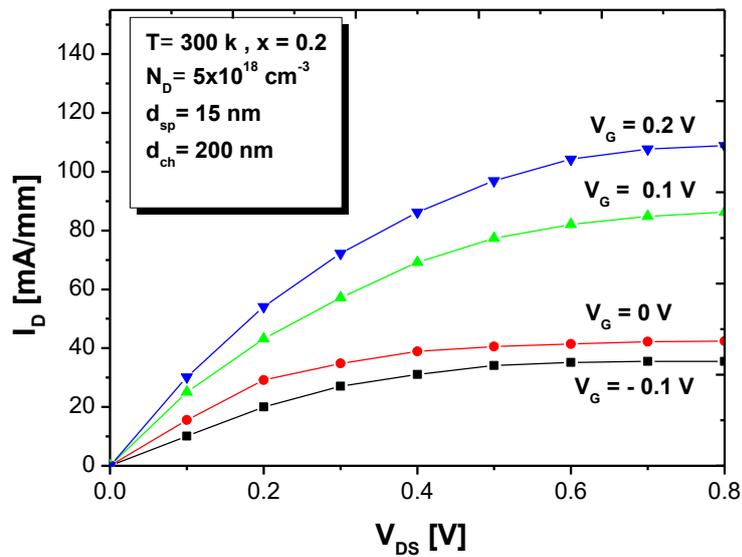


Figure III .15 : Caractéristiques de sortie de HEMT $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N} / \text{GaN}$ pour les différentes valeurs de V_G .

III.5. Conclusion

Dans nos résultats de simulation, nous avons montré les caractéristiques I-V de HEMT à base de AlGa_N/Ga_N par le simulateur Atlas TCAD. L'influence de l'épaisseur de l'intercouche sur les caractéristiques courant-tension de l'hétérostructure AlGa_N/AlN/Ga_N 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 l'épaisseur et de la concentration de donneur au sein de AlGa_N, la concentration du donneur dans la couche de AlGa_N est un facteur moins important par rapport à d'autres paramètres conduisant à la modification de la valeur du courant de in 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] M.A. Dahaoui,
Application de l'AFM et de la Spectrophotométrie dans la Caractérisation des Semi-conducteurs III-N, mémoire de master, Université de Tlemcen, 2013.
- [5] D. Bouguenna, A. B. Stambouli, A. Zado, D. J. As, and N. M. Maaza,
2D Simulations of Current-voltage Characteristics of Cubic Al_x Ga_{1-x} N / GaN Modulation Doped Hetero-junction Field Effect Transistor Structures, vol. 2, no. 5, pp. 309–315, 2012.

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

Dans le deuxième 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 dernier chapitre, nous avons présentés, dans un premier temps, la simulation des caractéristiques électriques telles que: $I_{\text{DS}}(V_{\text{DS}})$, $I_{\text{DS}}(V_{\text{GS}})$.

L'étude de l'influence des propriétés structurales (l'épaisseur de la couche AlN, l'épaisseur de canal, ainsi que les effets dus aux propriétés du matériau comme la fraction molaire (x), le dopage de la couche barrière a été fait par la simulation physique bidimensionnelle par Atlas-Silvaco.

Résumé

Ces dernières années, les transistors à haute mobilité électronique (HEMTs) ont attiré beaucoup d'attention dans les applications à haute puissance, l'une des propriétés les plus intéressantes de ces dispositifs est la formation du gaz d'électrons bidimensionnel (2DEG) avec une mobilité électronique très élevée.

La recherche actuelle vise à étude de l'impact des paramètres structuraux sur les caractéristiques électriques d'un HEMT à base de AlGa_N/Ga_N, nous avons déduit l'effet des propriétés structurelles (l'épaisseur de couche de AlN, l'épaisseur Canal) 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.

les mots clés : HEMT,2DEG, AlGa_N /Ga_N, Silvaco ATLAS,

ملخص

في السنوات الأخيرة ، اكتسبت الترانزستورات ذات التنقل الإلكتروني المرتفع (HEMTs) الكثير من الاهتمام في التطبيقات عالية الطاقة ، ومن أكثر الخصائص إثارة للاهتمام لهذه الأجهزة هو تكوين غاز إلكتروني ثنائي الأبعاد (2DEG) مع قابلية تنقل إلكترونية عالية جدًا .

يهدف البحث الحالي إلى دراسة تأثير المعلمات الهيكلية على الخصائص الكهربائية لـ HEMT بناءً على AlGa_N / Ga_N ، وقد استنتجنا تأثير الخصائص الهيكلية (سماكة طبقة AlN ، سماكة القناة) والتأثيرات الناتجة عن خصائص المواد مثل جزء جزيء الألومنيوم. وتركيز المنشطات ، كل ذلك باستخدام جهاز محاكاة تجاري يسمى Silvaco ATLAS

الكلمات الرئيسية : Silvaco ATLAS, AlGa_N /Ga_N, 2DEG, HEMT,