

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعلّم العالی والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان -

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen -

Faculté de TECHNOLOGIE

Département de Télécommunication



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Télécommunication

Spécialité : Système de Télécommunication

Par :

- SAIDI Aymen

- BOUGHRARA Yacine

Sujet

Simulation des performances électriques HEMT Base InAlN/GaN dans la bande Ku-Vsat

Soutenu publiquement, le 30/09/2021, devant le jury composé de

Mr BOUSALAH Faiza

Mr KOURDI Zakarya

Mr IRID HADJ Mohammed

Mr HADJILA Mourad

Université de Tlemcen

Université de Tlemcen

Université de Tlemcen

Université de Tlemcen

Président

Encadreur

Co-Encadreur

Examineur

Année universitaire 2020/2021

REMERCIEMENTS

***** REMERCIEMENTS *****

Le travail présenté dans ce rapport a été effectué à l'université Abou-Beker Belkaid - Tlemcen-

Avant tout, je remercie ALLAH d'avoir donné à l'homme le pouvoir de raisonner et d'explorer les vérités de l'univers.

Que mes remerciements les plus sincères s'adressent à mon co-encadreur KOURDI Zakarya, maîtres de recherche classe A au CDS-Oran de l'agence spatiale algérien pour avoir accepté de superviser mon travail et pour m'avoir initié aux bases de télécommunication système.

Que mes remerciements les plus sincères s'adressent à mon encadreur IRID HADJ Mohammed, maître de conférences à l'université Abou-Beker Belkaid -Tlemcen-, pour avoir accepté de superviser mon travail et pour m'avoir initié aux bases de télécommunication système.

.../////....

Je ne pourrais oublier de présenter mes vifs remerciements et ma sincère gratitude à toutes celles et tous ceux qui m'ont épaulé dans les moments durs et m'ont donné la force pour continuer et arriver au bout du travail.

Je ne peux terminer sans exprimer toute ma gratitude à tous les membres de ma famille qui m'ont soutenu et conseillé tout le long de ce travail, plus particulièrement ma mère.

DÉDICACES

*** DEDICACES ***

Je dédie ce mémoire à :

Mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

Toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infailible,

Merci d'être toujours là pour moi.

Aymen SAIDI

Je dédie ce mémoire à :

Mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

Toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infailible,

Merci d'être toujours là pour moi.

Yacine BOUGHRARA

***** ABRÉVIATIONS *****

AUPC	Automatic Uplink Power Control
BUC	Bloc Up Converter
DVB	Digital video Broadcasting
FAT	Final Acceptance Test
FDMA	Frequency Division Multiple Access
HEMT	High Electron Mobility Transistor
GIS	Geography Information System
LNA	Low Noise Amplifier
LNB	Low Noise Bloc
MMBS	Band Multimedia Broadcasting System
NMS	Network Management System
ODU	Out Door Unit
OSAT	On-Site Acceptance Test
RCST	Return Channel Satellite Terminal
RF	Radio Frequency
TDM	Time Division Multiplexing
TTC& M	Telemetry and Tele-command Control & Maintenance
IDU	In Door Unit
VSAT	Very Small Aperture Antenna

***** SOMMAIRE *****

*** Remerciements ***	I
*** Dédicaces ***	II
*** Abréviations ***	IV
*** Sommaire ***	V
Liste des figures	VIII
Listes Du Tableau	X
Introduction générale.....	
Chapitre I : Matériaux semi-conducteur à base de GAN	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Matériaux binaires nitruré	3
I.2.1 Propriétés Structurales du matériau GaN	4
I.2.2 Propriété électrique du GaN	6
I.2.2.1 Largeur bande interdite	6
I.2.2.2 Constante diélectrique	7
I.2.2.3 Polarisation spontanée	7
I.2.3 Propriété thermique du GaN.....	9
I.2.3.1 Conductivité thermique.....	9
I.2.3.2 Chaleur spécifique	10
I.2.3.3 Dilatation thermique	10
I.2.3.4 Température de debye	11
I.2.4 Propriétés optiques	11
I.3 Propriétés générales du nitrure d'indium	12
I.3.1 Propriétés structurales	12
I.3.2 Propriétés électroniques	13
I.3.2.1 Structure des bandes d'énergie	13
I.3.2.2 Masses effectives	14
I.3.2.3 Propriétés optiques Dans les InN	14
I.4 Conclusion	15

Chapitre II : transistor a haut mobilité d'électron

Sommaire

II.1 Introduction.....	27
II.2 Etude d'une hétérojonction	27
II.2.1 Introduction.....	27
II.2.2 Diagramme de bande d'une hétérojonction.....	28
II.3 Formation et expression du 2-DEG	29
II.4 Principe du transistor HEMT.....	34
ii.5 Caractéristiques électriques HEMT.....	35
I.5.1 Caractéristiques statiques	35
II.5.2 La Transconductance.....	36
II.5.3 La fréquence de transition d'un HEMT.....	37
II.5.4 Fréquence de coupure et fréquence maximale d'oscillation.....	37
II.5.5 Bruit généralités	38
II.5.5.1 Origines du bruit	38
II.5.5.2 Les bruits en excès	39
II.5.6 Facteur de bruit.....	40
II.5.6.1 Température de bruit	40
II.5.6.2 Bruit d'un système	41
II.5.6.3 Principe des mesures.....	42
II.5.6.4 Définition de l'ENR.....	43
II.5.7 Fonctionnement en puissance	43
II.5.7.1 La puissance de sortie.....	43
II.6 Le schéma équivalent petit signal	43
II.6.1 La transconductance	44
II.6.2 La conductance de sortie.....	44
II.6.3 La capacité grille- source	44
II.6.4 La capacité grille-drain	45
II.6.5 La capacité entre le drain et la source	45
II.6.6 Les résistances R_i et R_{gd}	45
II.7 Conclusion	45
Chapitre III : Résultats et discussion de simulation HEMT-LNA	
III.1 Introduction.....	53
III.2 TCAD-SILVACO	53
III.2.1 Principes et conditions d'utilisation	53

Sommaire

III.2.2 ATHENA TCAD-SILVACO.....	54
III.2.3 ATLAS TCAD-SILVACO	54
III.2.4 DECKBUILD.....	55
III.2.5 TONYPLOT.....	55
III.3 HEMT à base de GaN étudiés	56
III.3.1 Structures des HEMT	56
III.4 Résultats et discussion	56
III.4.1 Performances de DC.....	57
III.4.1.1 Caractéristique de transfert IDS-VGS	57
III.4.1.2 Caractéristique de sortie IDS-VDS	57
III.4.1.3 Caractéristique de transconductance $gm-V_{GS}$	58
III.4.2 Caractéristiques AC	59
III.4.2.1 Capacités en fonction de tension	59
III.4.2.2 Capacités en fonction de fréquence.....	60
III.4.3 Caractéristiques du bruit.....	61
III.4.4 Caractéristique HEMT-LNA en bande Ku.....	64
III.5 Conclusion	65
Conclusion générale	67
Références	68
Chapitre 1	68
Chapitre 2	70
Chapitre 3	71

LISTE DES FIGURES

Chapitre I :

Figure I- 1 : Illustrations des différents types de structures cristallographiques du nitrure de gallium : (a) wurtzite, (b) zinc blende et (c) rock salt [5].	4
Figure I- 2 : Structures cristalline wurtzite face-Ga [000 1] et face-N [000I] [6].	5
Figure I- 3 : Distribution des électrons de la bande de valence d'un atome GaN[12].	7
Figure I- 4 : a). Structure GaN wurtzite (b) Polarisation spontanée[13].	8
Figure I- 5 : Charges en surface du GaN hexagonal[12].	8
Figure I- 6 : Indice de réfraction du GaN entre 0.35 et 10 μm [15]	11
Figure I- 7 : Maille cristalline de InN dans deux phase Wurtzite et Zinc blende[23].	13
Figure I- 8 : La structure de bandes d'InN en utilisant les approximations de la GGA[31].	14

Chapitre II :

Figure II- 1 : Les différents types d'hétérojonctions entre deux matériaux semi conducteurs A et B ayant des énergies de bande interdite E_{gA} et E_{gB} [2].	28
Figure II- 2 : (a) Diagramme de bandes d'énergie des deux matériaux semi-conducteurs avant contact, (b) Diagramme de bandes d'énergie après contact des deux matériaux semi-conducteur (Hétérojonction)[3].	28
Figure II- 3 : Schéma de la structure A/GaN/GaN.[4]	29
Figure II- 4 : Diagramme énergétique de la bande de conduction du HEMT AlGaIn/GaN[5].	30
Figure II- 5 : variation de la concentration du 2-DEG en fonction tension [8].	30
Figure II- 6 : Variation de la concentration du 2-DEG en fonction de l'épaisseur dd [9].	32
Figure II- 7 : Variation de la tension de seuil en fonction du dopage[11].	33
Figure II- 8 : Exemple d'une épitaxie d'un transistor HEMT AlGaIn/GaN.[7].	33
Figure II- 9 : Caractéristique de sortie $I_{DS} = F(V_{DS})$ d'un HEMT.[6]	34
Figure II-10 : Transconductance g_m en fonction de la polarisation grille-source v_{GS} a) HEMT1 et b) HEMT2[10].	35
Figure II- 11 : Représentations d'une résistance bruyante.[12]	36
Figure II- 12 : Bruit ajouté par un quadripôle.	39
Figure II- 13 : La méthode du facteur Y pour la mesure de la température équivalente de bruit d'un amplificateur.	42
Figure II- 14 : Schéma équivalent petit signal les transistors à effet de champ y compris le HEMT [13]	44

Chapitre III :

Liste des figures

Figure III-1 : Entrées et sorties ATLAS [1].....	55
Figure III-2 : Vue 2D des structures a) HEMT GaN/InAlN/AlN/GaN.....	56
Figure III-3 : caractéristiques de transfert du HEMT InAlN/GaN étudié.....	57
Figure III-4 : Caractéristiques de sortie du HEMT InAlN/GaN simulé.....	57
Figure III-5: Transconductance du HEMT InAlN/GaN étudié.....	58
Figure III-6 : Gain de courant simulé (H21), gain de puissance unilatéral (U) et gain de puissance du transducteur max. unilatéral (U) et gain de puissance maximal du transducteur (MTG) en fonction de la fréquence pour le HEMT InAlN/GaN.....	59
Figure III-7 : Les différences capacités (Cds/Cgs/Cgd) en fonction de tension.....	59
Figure III-8 : les différences capacités (Cds/Cgs/Cgd) en fonction de fréquence.....	60
Figure III-9 : Densité spectrale de tension de bruit de notre dispositif simulé à VDS=2V...	61
Figure III-10: Facteur de bruit minimum en fonction de la fréquence. La tension de polarisation du drain est égale à 5V.....	62
Figure III-11 : la transconductance en fonction de la fréquence.....	64
Figure III-12 : les gains en fonction de la fréquence.....	64

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I-1: Comparaison de l'électronégativité des principaux éléments utilisés dans les semi-conducteurs.[9]..... 5

Tableau I-2: Données relatives à la dépendance du gap de l'AlN et le GaN en fonction de la température[11]. 7

Tableau I-3: Des coefficients de dilatation thermique pour le GaN wurtzite et pour les substrats les plus utilisés[13]..... 10

Tableau I-4: Propriétés optiques pour les matériaux de base [16]. 12

Tableau I-5: Propriétés des principaux composés binaires III-V à 300K [15]. 12

Tableau I-6: Indice de réfraction et constantes diélectriques expérimentaux, de InN[23]..... 15

Introduction Générale

Introduction Générale

Les matériaux à grands écarts sont connus depuis des décennies. Nitrure de gallium (GaN) est sur le marché depuis les années 1970, il a une bande interdite. L'énergie est égale à 3,4 eV, ce qui signifie qu'elle est trois fois plus élevée que les semi-conducteurs utilisés jusqu'à présent, comme le silicium, le germanium ou l'arséniure de gallium. Les chercheurs se sont toujours intéressés à ces types de matériaux pour les utiliser dans les domaines de l'électronique et de l'optoélectronique.

Le développement de ces composants pour les applications radiofréquences n'a commencé qu'à partir dans les années 1980 utilisant le carbure de silicium. L'amélioration des performances électriques des transistors reste un sujet de recherche combinant de nouveaux matériaux et adoptant une nouvelle structure.

Les équipements basés sur ces nouveaux matériaux, notamment ceux à base de GaN, qui attire toujours beaucoup d'attention dans le domaine de la recherche, est utilisé dans des applications civils et militaires. Le but est de perfectionner des transistors qui fonctionnent à haute température, très haute fréquence et capable de fournir une puissance de sortie importante. Les transistors à haute mobilité électronique (HEMT) sont les mieux placés dans cette direction.

Notre mémoire de master s'articule sur trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous avons étudié les propriétés de base des matériaux Semi-conducteurs III-N, y compris les semi-conducteurs à faible bande interdite et large bande interdite. Nous avons montré leurs différentes propriétés cristallographiques, physique, électrique, optique, cela nous aidera à choisir des matériaux efficaces et bénéfiques pour l'objectif visé. Puis nous introduirons les alliages ternaires que nous utiliserons dans les transistors en question, et nous allons compléter la recherche fondamentale de l'hétérojonction.

Le deuxième chapitre présentera spécifiquement les transistors HEMT : nous présenterons type de HEMT, leur fonctionnement et leur structure avec le rôle de chaque couche. La dernière technologie des transistors HEMT sera présentée avec tous les effets. L'effet néfaste qui endommage ses propriétés physiques et ses performances électriques. Nous allons également introduire différents substrats de croissance Nitrure de gallium actuellement utilisé.

Le troisième chapitre utilisera le logiciel commercial Silvaco pour simuler les performances de notre HEMT. Il s'agira de calculer leurs différences, mettre en évidence les caractéristiques

Introduction Générale

observés en bande Ku, la simulation et l'affichage de modèles d'équipements. Nous simulerons l'impact de la technologie et des paramètres physiques sur les performances. Les transistors caractérisent les pièges en mode statique, petit signal en mode dynamique, puissance micro-ondes et mode impulsion. Ce chapitre est dédié aussi à l'interprétation et discussion des résultats obtenus, ainsi qu'une comparaison des performances en bande Ku.

Ce travail se termine par une conclusion générale résumant l'essentiel des résultats obtenus ainsi que les perspectives à entreprendre pour approfondir cette étude

Chapitre I :
MATÉRIAUX SEMI-
CONDUCTEUR À BASE
DE GAN

I.1 INTRODUCTION

Les semi-conducteurs composés à base des matériaux III-N tels que GaN, AlN, InN, BN et leurs alliages sont des semi-conducteurs à gap direct. Ces matériaux sont apparus comme des matériaux de grand intérêt dans des applications en électronique et optoélectronique. Dans l'électronique, ces matériaux permettent de fabriquer des dispositifs ayant une grande puissance, une haute fréquence et fonctionnant à température élevée, tels que les transistors bipolaires, les transistors à effet de champ, y compris les transistors à haute mobilité d'électrons [1]. Ces dispositifs trouvent leurs applications dans les domaines civils et militaires. Dans l'optoélectronique ; ces matériaux sont utilisés pour élaborer des diodes laser visibles très efficaces [2,3], des diodes électroluminescentes [4,5,6], et des cellules photovoltaïques [7,8]. En raison du grand nombre de leurs applications possibles, ces matériaux ont attiré une attention remarquable des chercheurs dans la science et la technologie, ces dernières années.

I.2 MATERIAUX BINAIRES NITRURE

Les matériaux semi-conducteurs sont des isolants au zéro absolu qui conduisent l'électricité de façon limitée à température ambiante. Parmi leurs caractéristiques principales, ils peuvent être dopés grâce à des impuretés pour altérer leurs propriétés électriques.

Les semi-conducteurs sont classés selon leur composition chimique. Il existe des semi-conducteurs élémentaires tels que le silicium (Si), le germanium (Ge) et l'étain gris (α -Sn), qui appartiennent tous au groupe 14 du tableau périodique (autrefois appelé groupe IVB et désigné ici comme groupe IV). Il existe également des semi-conducteurs composites, binaires, ternaires, quaternaires, voire quinaires, respectivement constitués de deux, trois, quatre ou cinq espèces chimiques différentes. Ces éléments peuvent être du groupe IV, comme dans le cas carbure de silicium, mais il est plus courant qu'il s'agisse d'éléments d'autres groupes, les plus courants étant les semi-conducteurs III-V, constitués d'éléments du groupe III (groupe 13) (aluminium, gallium, indium, etc.) et d'éléments du groupe V (groupe 15) (azote, phosphore, arsenic, antimoine, etc.).

Le nitrure de gallium (GaN) est un semi-conducteur à large bande interdite (3,4 eV) utilisé en optoélectronique et dans les dispositifs de grande puissance ou de haute fréquence. C'est un composé binaire (groupe III/groupe V) qui possède une semi-conductivité intrinsèque. Il est peu sensible aux rayonnements ionisants (comme tous les autres nitrures du groupe III), ce qui fait de lui un matériau approprié pour les panneaux solaires des satellites.

Les matériaux nitrures se différencient des autres matériaux par plusieurs caractéristiques :

- Le **GaN** est un matériau à grand gap lui permettant de fonctionner à forte tension et haute température. · Il est possible de réaliser des hétérostructures à forte discontinuité de bande de conduction (**AlGaN**, **InGaN**, **AlGaInN**, **BN**, ...).
- La forme hexagonale du **GaN** permet d'obtenir des champs de polarisation très élevés induisant des densités surfaciques de charges très importantes sans dopage intentionnel.

I.2.1 Propriétés Structurales du matériau GaN

Le nitrure de gallium peut s'organiser sous trois formes cristallines : les structures de type wurtzite (appelé également hexagonale), zinc blende et rock salt (appelé aussi NaCl), la Figure I-1 illustre les trois types de structures. L'arrangement cristallographique est lié aux conditions de croissance et à la nature du substrat. Dans la structure de zinc blende, les atomes d'azotes forment un empilement cubique faces centrées dans lequel les atomes de gallium occupent la moitié des sites tétraédriques. Cette structure est caractérisée par le paramètre de maille « a » qui sera obtenue avec des substrats tels que SiC, Si, l'oxyde de magnésium (MgO) et l'AsGa. La structure rock salt ne s'obtient pas par croissance, mais en appliquant une forte pression. Un des effets des hautes pressions est de favoriser les coordinences élevées au sein du réseau des matériaux, ce qui permet de stabiliser la phase de type NaCl. En effet, pour cette structure, la coordinence des atomes de gallium et d'azote est de 6 contre 4 dans le cas de celles de type wurtzite et zinc blende. La structure de type NaCl est composée de deux sous-réseaux cubiques faces centrées d'atomes d'azote et de gallium, décalés d' $a/2$.

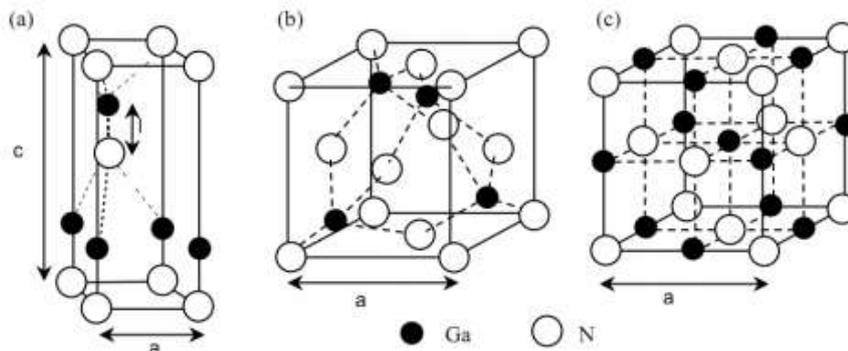


Figure I-1 : Illustrations des différents types de structures cristallographiques du nitrure de gallium :(a) wurtzite, (b) zinc blende et (c) rock salt [5].

Au sein de la structure wurtzite, les atomes d'azotes forment un empilement hexagonal compact faces centrées dans lequel les atomes de gallium occupent la moitié des sites tétraédriques. Cette structure sera obtenue avec des couches « bulk » *AlN*, *GaN*, *InN*.

La structure cristallographique recherchée lors de l'épitaxie de couches présentes dans un transistor à haute mobilité d'électrons (*HEMT*) *GaN* est une structure wurtzite, cette dernière est la phase la plus stable thermodynamiquement et le plus facile à obtenir.

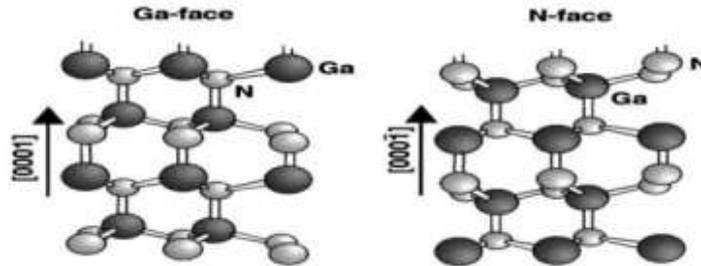


Figure I-2 : Structures cristalline wurtzite face-Ga [000 1) et face-N [000I][6].

Le manque de symétrie dans la structure fait que la phase hexagonale du *GaN* peut avoir deux faces différentes (la face *Ga* et la face *N*) qui correspondent respectivement aux directions $\{0001\}$ et $\{000\bar{1}\}$, illustrée dans la Figure I-2. Cette différenciation est primordiale dans le HEMT puisque le type de structure wurtzite face *Ga* ou face *N*, influence sur les charges de polarisation piézoélectriques et spontanée.

I. Étude des charges de polarisation

Dans les matériaux semi-conducteurs binaires, ternaires ou quaternaires, en raison de la présence d'atomes de nature différente ayant une différence d'électronégativité, des molécules asymétriques se forment en créant ainsi des moments dipolaires permanents. Le Tableau 1 illustre la comparaison de l'électronégativité des différents éléments utilisés dans les différents matériaux. Dans les semiconducteurs à base de *GaN*, les effets de polarisation sont beaucoup plus prononcés que pour d'autres semiconducteurs.

	Ga	N	Al	As	In	p
x (eV)	1.6	3	1.5	2	1.7	2.1

Tableau I-1 : Comparaison de l'électronégativité des principaux éléments utilisés dans les semi-conducteurs[9].

La raison principale est due à la grande différence d'électronégativité des atomes de gallium (*Ga*) et de nitrure (*N*), constituant une molécule. En effet, ceci implique une dissymétrie des répartitions des charges dans la molécule et donc une forte polarité électronique. En l'absence de toute contrainte dans une couche de nitrure de wurtzite, celle-ci présente une polarisation spontanée qui vient du dipôle créé par la non superposition du barycentre des charges positives avec celui des charges négatives. Ce décalage entre les deux barycentres des charges a deux origines principales. La première s'explique par l'irrégularité des tétraèdres formant le cristal ou les distances entre les atomes à fort caractère ionique varient suivant l'axe de croissance $\{0001\}$. Ainsi chaque tétraèdre possède un dipôle élémentaire. Ces dipôles s'ajoutent pour donner dans la structure une polarisation spontanée dirigée suivant l'axe de croissance du matériau. La deuxième est une raison de rupture de symétrie dans le cristal à partir du troisième voisin, qui engendre la création d'un dipôle électrique suivant la direction $\{0001\}$ dans la phase hexagonale [9]. Il en résulte deux mécanismes principaux : la polarisation spontanée et la polarisation piézoélectrique. La première est un phénomène qui tend à ordonner de manière naturelle les atomes des différentes couches, elle est liée à la contrainte thermique. La deuxième est induite par la contrainte mécanique, elle est présente seulement dans les hétérostructures. Lors du prochain paragraphe, nous calculerons et comparerons la polarisation spontanée et piézoélectrique entre les hétérojonctions AlGa_N/Ga_N et InAl_N/Ga_N.

I.2.2 Propriété électrique du GaN

I.2.2.1 Largeur bande interdite

L'évolution en température de la largeur de la bande interdite suit la loi empirique de Varshni [11] :

$$E_G(t) = E_G(0) = \frac{T_2}{T + \beta} \quad (I - 1)$$

Où $E_G(0)$ est la largeur de bande interdite à température ($T_0=0$ K), α et β des constantes, β dépend de la température de Debye. Ces valeurs sont données à titre indicatif pour l'AlN et le

	GaN	AlN
$E_G(OK)$ (eV)	3.4727 à [12]	6.1 [11]
α (meV/K)	1.08×10^{-3} [12]	1.799 [10]
β (K)	745 [12]	1462 [10]

GaN dans le Tableau suivant :

Tableau I-2: Données relatives à la dépendance du gap de l'AlN et le GaN en fonction de la température [11].

Le gap du ternaire $Al_mGa_{1-m}N$ en fonction du paramètre de la fraction molaire m et de la température peut être représenté simplement par la loi classique:

$$\begin{aligned} E_G^{AlGaN}(T, m) &= m * E_G^{AlN}(T) + (1 - m) * E_G^{GaN}(T) - b^{AlGaN} * m * (1 - m) \\ E_G^{InAlN}(T, m) &= m * E_G^{InN}(T) + (1 - m) * E_G^{AlN}(T) - b^{InAlN} * m * (1 - m) - 2 \end{aligned} \quad (I - 2)$$

Avec b : paramètre de courbure de bande (bowing parameter) la valeur obtenue par Van Schilfgarde $b = 0.6$ [12].

De bande (bowing parameter) la valeur obtenue par Van Schilfgarde $b = 0.6$ [12].

I.2.2.2 Constante diélectrique

La constante diélectrique du GaN à 300 K reportée dans la littérature est de $\epsilon_r^{GAN} = 9.5$. Cette constante varie de 7% dans une plage de température de 700 K.

$$\epsilon_r(T) = \epsilon_r(300k)[1 + 100 - 4(T - 300)] \quad (I - 3)$$

La valeur de la permittivité diélectrique en fonction de la fraction molaire d'aluminium m suit une loi linéaire:

$$\epsilon_rALGAN(m) = \epsilon_rGAN - 0.5m \quad (I - 4)$$

I.2.2.3 Polarisation spontanée

Dans une structure cristalline GaN de type wurtzite, les électrons de la bande de valence sont plus attirés par l'azote que par l'aluminium ou le gallium à cause de sa forte électronégativité (Figure I-3). Cette attraction entraîne la déformation de la structure tétraédrique et le rapport des paramètres de maille (c/a) devient plus faible que la valeur attendue (c/a=1.633). Le non concordance des barycentres des charges positives et négatives entraîne donc la création d'une polarisation appelée polarisation spontanée.

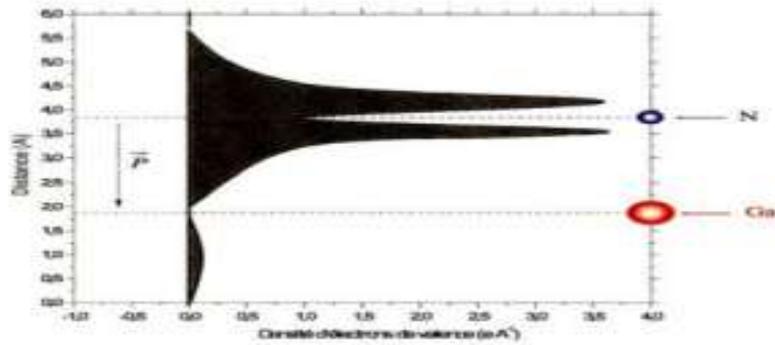


Figure I-3 : Distribution des électrons de la bande de valence d'un atome GaN [12].

En effet, parmi les quatre atomes d'azote qui entourent l'atome de gallium, trois se trouvent dans le même plan cristallographique et le quatrième se trouve sur l'axe "c" (Figure I-4). La somme vectorielle des moments dipolaires entre chaque atome d'azote et l'atome de gallium forme un moment dipolaire parallèle à l'axe "c" qui est à l'origine d'une polarisation macroscopique spontanée en l'absence de toute contrainte extérieure.

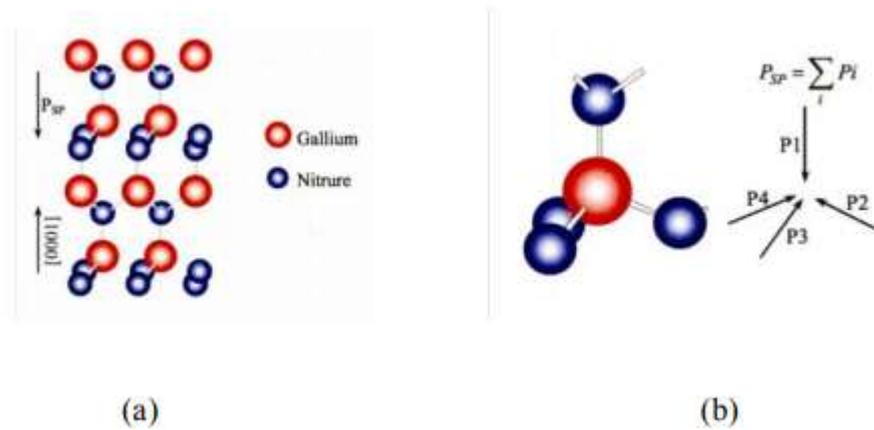


Figure I-4:(a). Structure GaN wurtzite, (b) Polarisation spontanée [13].

L'effet de cette polarisation spontanée dans le GaN wurtzite en volume, se traduit par la création d'une succession de dipôles électriques qui sont à l'origine de la création d'un champ électrique (Figure I-5).

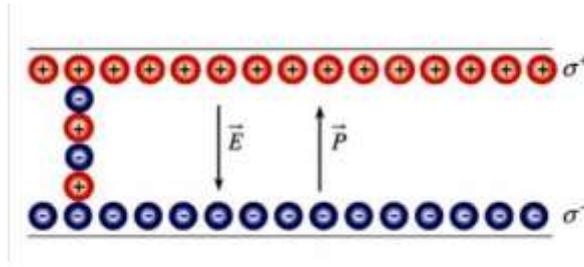


Figure I-5 : Charges en surface du GaN hexagonal [12].

En volume, le gradient de cette polarisation est nul ainsi que la densité de charges volumique. Par contre la discontinuité de cette polarisation spontanée va créer des charges surfaciques de part et d'autre de la couche GaN. En effet, la relation de continuité du vecteur de déplacement à la surface libre du GaN s'écrit :

$$\sigma = \varepsilon^0 \varepsilon_r | \vec{E}_{int} | - \varepsilon^0 | \vec{E}_{ext} | \quad (I - 5)$$

\vec{E}_{int} et \vec{E}_{ext} sont respectivement le champ électrique à l'intérieur et à l'extérieur du GaN au niveau de la surface libre. En absence d'un champ extérieur, l'équation précédente se réduit à [12]:

$$\sigma = \varepsilon^0 \varepsilon_r | \vec{E}_{int} | \quad (I - 6)$$

I.2.3 Propriété thermique du GaN

Dans les semi-conducteurs ; les principales grandeurs physiques qui déterminent les propriétés thermiques sont la conductivité thermique, la dilatation thermique, la chaleur spécifique, la température de debye.

I.2.3.1 Conductivité thermique

La conductivité thermique d'un matériau traduit sa capacité à dissiper la chaleur. Or, la résistance thermique (notée R_{th}) est inversement proportionnelle à la conductivité thermique R_{th} ($W.K^{-1}$) :

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{P_{diss}} \quad (I - 7)$$

Où ΔT est l'élévation la température en K, P_{diss} la puissance dissipée en W. On voit donc que la résistance thermique est directement liée à la puissance dissipée. Cela signifie qu'une forte

conductivité thermique du matériau permet l'évacuation de la puissance dissipée (sous forme de chaleur) sans échauffement important de celui-ci. Dans le cas de l'amplification de puissance où les puissances délivrées sont importantes, l'élévation de température pour une puissance dissipée donnée sera bien plus faible dans des transistors à grand gap.

I.2.3.2 Chaleur spécifique

Dans un composant semi-conducteur, l'augmentation de la température entraîne une augmentation du nombre de phonons. La chaleur spécifique est le paramètre physique qui permet de relier les variations de la température du réseau au nombre de phonons présents dans le semiconducteur, sa valeurs peut être calculée à partir de la relation de debye [13]:

$$C_p(T) = \frac{12\pi^4 R}{5} \left(\frac{T}{T_D}\right)^3 \quad (I - 8)$$

Avec $R=8.344$ l/mol.k., T_D :température de Debye

I.2.3.3 Dilatation thermique

En plus de la contrainte due au substrat, il apparaît une deuxième contrainte et par conséquent une deuxième déformation thermo-élastique au cours du refroidissement après l'hétéroépitaxie. Cette contrainte est due à la différence entre les coefficients d'expansion thermiques linéaires des différentes couches déposées et du substrat. La croissance a lieu à haute température, elle dépend du substrat choisi pour l'hétéroépitaxie. Suivant les substrats, la couche épitaxiée peut se trouver en compression ou en tension biaxiale dans son plan de croissance. Pour le GaN de type wurtzite, le coefficient de dilatation thermique a été mesuré en fonction de la température sur monocristaux. Selon l'axe "a", le coefficient de dilatation thermique est constant sur toute la gamme de température. Par contre suivant l'axe "c", le coefficient de dilatation augmente en fonction de la température avec un changement brutal de la pente à 700K.

	GaN		6H-SiC	Al2O ₃	Si
	300k- 700K	700K-900K			
α_a (10-6/k)	5. 59		4.2	7.5	2.6
α_c (10-6/k)	3.17	7.75	4.7	8.5	2.6

Tableau I-3 : Des coefficients de dilatation thermique pour le GaN wurtzite et pour les substrats les plus utilises[14].

Le coefficient de dilatation thermique est un paramètre à prendre en considération lors d'une épitaxie, car si le coefficient de dilatation thermique du substrat est différent de celui du GaN, il peut se créer des contraintes résiduelles induisant des fissures dans le GaN. Les coefficients de dilatation thermique pour le GaN wurtzite comparés aux substrats les plus utilisés sont répertoriés dans le Tableau I-3. Dans ce domaine, le carbure de silicium 6H-SiC est le plus adapté en termes de dilatation thermique pour les températures de fonctionnement.

I.2.3.4 Température de debye

La température de Debye TD définie la valeur maximale des énergies des vibrations. Cette grandeur physique peut être déterminée à partir de la chaleur spécifique ou bien à partir des coefficients élastiques. Les valeurs les plus souvent données dans la littérature sont 700 K ou 650 K suivant les méthodes de calcul [13].

I.2.4 Propriétés optiques

Les propriétés optiques d'un matériau recouvrent principalement son indice de réfraction et son coefficient d'absorption. Ces propriétés sont primordiales pour les composants optoélectroniques puisqu'elles régissent le déplacement de la lumière dans le composant. L'indice de réfraction d'un matériau est défini par le rapport de la vitesse de la lumière dans le vide, c , sur la vitesse de la lumière dans le matériau v par :

$$n = \frac{c}{v} \quad I - 9$$

La vitesse de la lumière dans un matériau n'est pas constante, elle change avec la longueur d'onde.

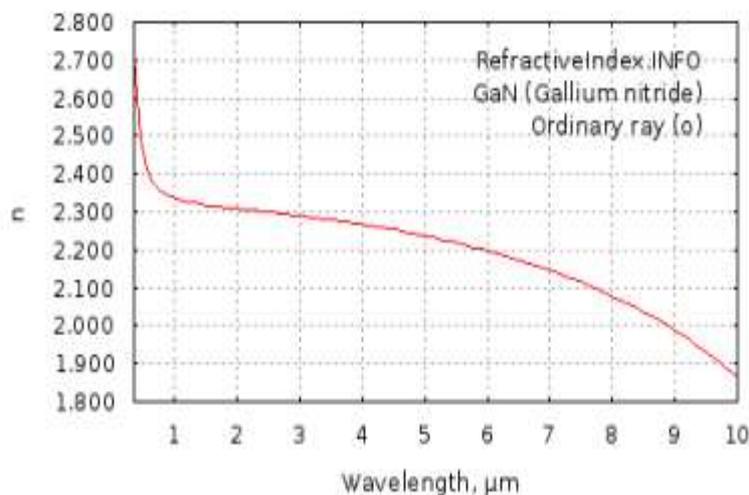


Figure I-6: Indice de réfraction du GaN entre 0.35 et 10 μm [15]

	GaAs	InAs	InN	GaN	AlN
Constante diélectrique statique (ϵ_{DC})	12.9	15.15	14.4	9.7	8.5
Constante diélectrique RF (ϵ_{RF})	10.89	12.3	5.8	5.3	4.6
Coefficient de recombinaison radiative ($\text{cm}^{-1}\text{s}^{-1}$) $\cdot 10^{-10}$	7.0	1.1	2.0	110	0.4
Energie du phonon optique (meV)	36.1	27	73	83.7	99

Tableau I-4: Propriétés optiques pour les matériaux de base [16].

Composé III-V	E_G (eV)	m^*/m_0	(cm^2/Vs)	$a(\text{\AA})$
AlSb	1.58	0.12	200	6.1355
AlAs	2.153	0.037	12000	5.66
AlN	6.2	0.4	314	a=3.111 c=4.978
InAs	0.36	0.023	33000	6.0584
InSb	0.17	0.0145	80000	6.4794
InP	1.35	0.077	4600	5.8686
InN	0.7	0.11	250	a=3.544 c=5.718
GaN	3.36	0.19	380	a=3.189 c=5.185
GaP	2.26	0.82	110	5.4512
GaAs	1.42	0.067	8500	5.6533
GaSb	0.72	0.042	5000	6.0959

Tableau I-5: Propriétés des principaux composé binaires III-V à 300K [17].

I.3 PROPRIETES GENERALES DU NITRURE D'INDIUM

I.3.1 Propriétés structurales

Le nitrure d'indium peut exister sous deux structures cristallines différentes, la structure Zinc blende (cubique) et la structure Wurtzite (hexagonale) qui est la phase la plus stable d'un point

de vue thermodynamique. La maille cristalline est un prisme droit de hauteur c dont la base est hexagonale d'arêtes de même longueur a , formant un angle de 120° (voir Figure I-7). Les paramètres de maille à température ambiante utilisés pour la structure Wurtzite donnés par deux références : $a = 0,354 \text{ nm}$, $c = 0,571 \text{ nm}$, $u = 0,375$ [17] et $a = 0,3501 \text{ nm}$, $c = 0,5669 \text{ nm}$ [18] Le rapport c/a est proche de la valeur attendue théoriquement dans une structure hexagonale qui est de $\sqrt{\frac{3}{8}}$.

La structure Zinc blende peut être représentée par deux réseaux cubiques à faces centrées occupés l'une par les atomes de nitrure et l'autre par les atomes d'indium et décalés d'un quart de la diagonale principale de la maille soit $(1/4, 1/4, 1/4)$, avec un paramètre de maille expérimental égale à $0,498 \text{ nm}$ [19], et théoriques égale à $0,493\text{--}0,498$ [20-22].

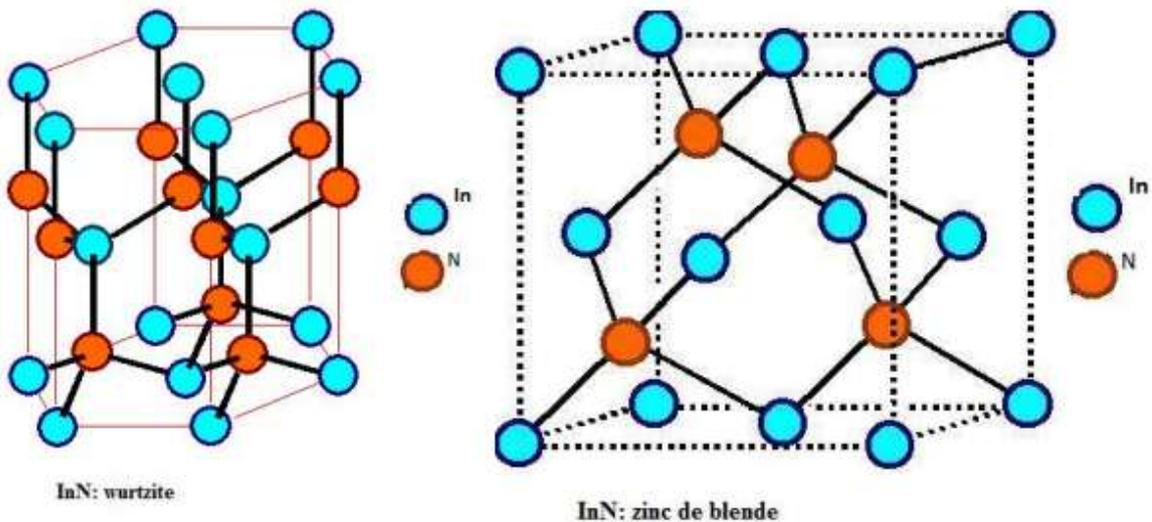
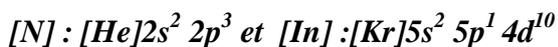


Figure I-7 : Maille cristalline de InN dans deux phase Wurtzite et Zinc blende[23].

I.3.2 Propriétés électroniques

I.3.2.1 Structure des bandes d'énergie

Les structures électroniques de la bande de nitrure d'indium sont :



Le nitrure d'indium est un semiconducteur à bande d'énergie interdite directe. Le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande de conduction sont situés au point Γ de la zone de

Brillouin. Les valeurs des différents niveaux énergétiques ont été calculées par différents auteurs, elles sont de **0,399** [23] **0.7- 0.9** [24-27], **1,52 eV** [28] et de **1,890 eV** [29].

La Figure I-5 présente la structure de bandes dans les deux phases cristallines pour l'InN d'après nos calculs [23] en utilisant l'approximation du gradient généralisé (GGA).

I.3.2.2 Masses effectives

La masse effective des électrons dans l'InN (Wurtzite), a été mesurée par plusieurs auteurs en utilisant des techniques expérimentales très variées. Les valeurs obtenues dans la direction Z et la direction perpendiculaire, sont similaires $m_e = 0,11m_o$ [30]. Les masses des trous sont : m_{hh} (trous lourds) = $1,63m_o$, m_{lh} (trous légers)= $0,27m_o$, m_s (split-off band) = $0,65m_o$ [31].

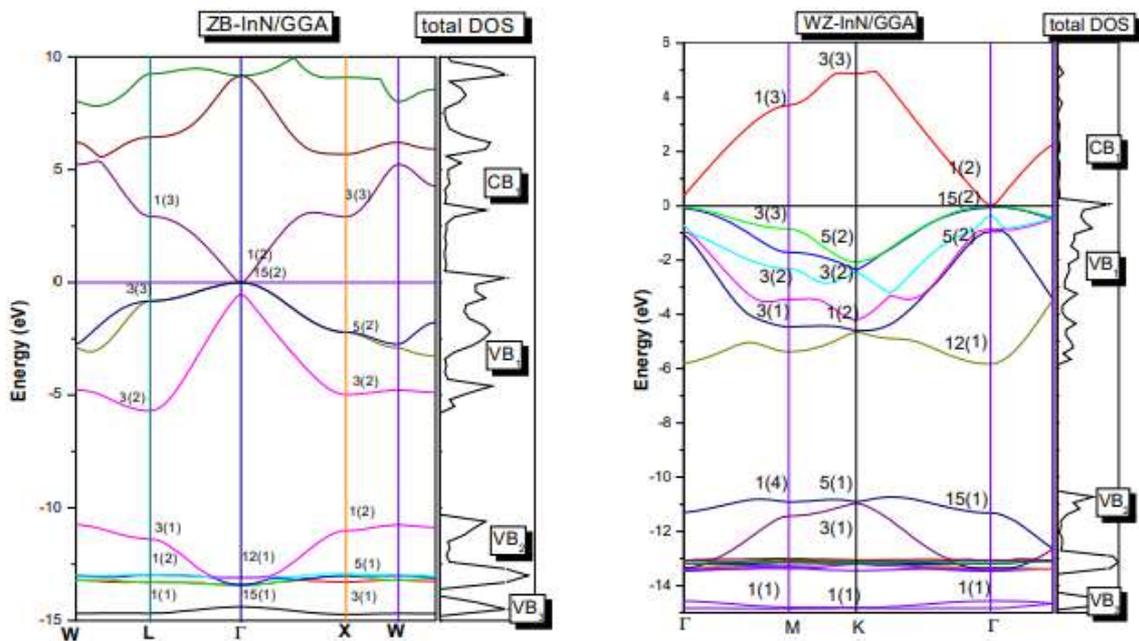


Figure I-8 : La structure de bandes d'InN en utilisant les approximations de la GGA [31]

I.3.2.3 Propriétés optiques Dans les InN

Les composantes du tenseur diélectrique, parallèle et perpendiculaire à l'axe c, sont différentes. Il y a une dispersion importante des valeurs des constantes diélectriques citées dans la littérature. Le Tableau I-6 regroupe quelques valeurs expérimentales des constantes diélectriques, énergie des phonons optiques et coefficient de recombinaison radiative [32].

$n(\lambda=1,55\mu m)$	ϵ (statique)	ϵ (haute	Energie des	Coefficient de
------------------------	-----------------------	-------------------	-------------	----------------

CHAPITRE I : Matériaux semi-conducteur à base de GAN

		fréquece)	phonons optiques(meV)	recombinaison radiative(cm ³ .s ⁻¹)
2,65-3,12	15,3	8,4	73	2x10 ⁻¹⁰

Tableau I-6: Indice de réfraction et constantes diélectriques expérimentaux, de InN[32].

I.4 CONCLUSION

Dans le premier chapitre, nous avons étudié les principales caractéristiques électriques, propriétés mécaniques, thermiques et optiques des composés binaires InN et AlN et GaN. Nous avons également passé en revue les principales propriétés des composés ternaires utilisés dans nos transistors.

Chapitre II :

**TRANSISTOR A HAUT
MOBILITE D'ÉLECTRON**

II.1 INTRODUCTION

En 1985, le premier transistor à haute mobilité électronique (HEMT) a été utilisé dans les micro-ondes à faible bruit du radiotélescope japonais. En refroidissant les composants à la température de l'hélium liquide, des signaux provenant de molécules interstellaires à mille années-lumière de la terre. Ensuite, le HEMT sera implanté dans les récepteurs de télévision pour recevoir les signaux des satellites géostationnaires (36000 Km d'altitude), et il deviendra alors le transistor le plus investi dans l'industrie des transistors.

Le HEMT est en fait un MESFET évolué (Metal/Semiconductor Field Effect Transistor), mais il a été préféré à ce dernier depuis le début des années 1990 [1]. Le HEMT à base de nitrure de gallium présente des caractéristiques très intéressantes, il est donc largement utilisé dans le domaine des télécommunications. D'autre part, GaN a une bonne conductivité thermique, une température de fusion élevée et un taux de saturation des électrons élevé.

Toutes ces caractéristiques en font un candidat de choix pour les applications de puissance micro-ondes.

II.2 ETUDE D'UNE HETEROJONCTION

II.2.1 Introduction

L'hétérojonction est obtenue par la juxtaposition de deux matériaux semi-conducteurs de gaps différents. Le type de l'hétérojonction dépend du type des deux semi-conducteurs associés ; s'ils sont de même type, il s'agit d'une hétérojonction isotype et s'ils sont différents, l'hétérojonction est anisotype. La croissance cristalline d'un semi-conducteur sur l'autre, forme une hétérojonction. Pour minimiser la densité de dislocations et les défauts cristallins, la croissance nécessite deux matériaux semi-conducteurs ayant des propriétés cristallines voisines. L'intérêt de l'hétérojonction réside dans le décalage créé entre les bandes d'énergies permises des deux matériaux semi-conducteurs. Ces matériaux ont des énergies de bande interdite différentes, ce qui engendre une discontinuité de bande de conduction ΔE_C et une discontinuité de bande de valence ΔE_V à l'interface de l'hétérojonction. Le type d'hétérojonction dépend de la position des bandes interdites des deux matériaux semi-conducteurs. La figure (II-1) représente les différents types d'hétérojonction.

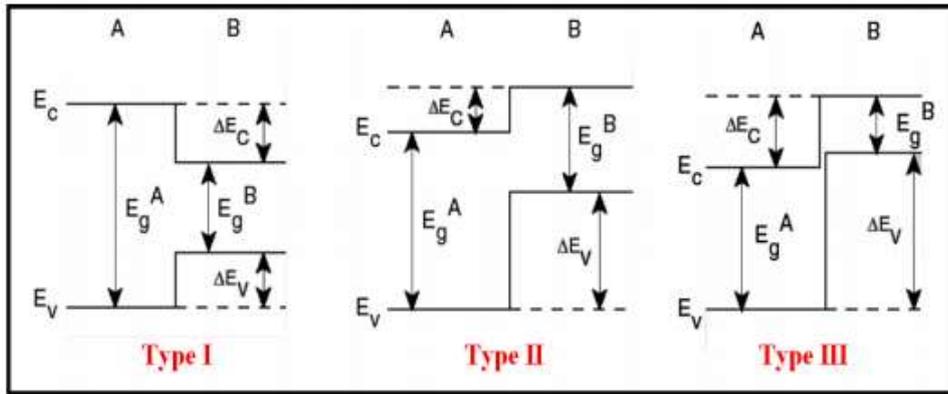


Figure II- 1 : Les différents types d'hétérojonctions entre deux matériaux semi conducteurs A et B ayant des énergies de bande interdite E_g^A et E_g^B [2].

D'où :

E_C : désigne la bande de conduction .

E_V : désigne la bande de valence.

ΔE_C : discontinuité de bande de conduction.

ΔE_V : discontinuité de bande de valence.

II.2.2 Diagramme de bande d'une hétérojonction

La figure 10 représente l'état des deux matériaux semi-conducteurs avant contact. Chaque matériau a une bande interdite différente (E_g), ce qui entraîne des décalages au niveau des bandes de conduction (ΔE_C) et de valence (ΔE_V) lorsque les deux matériaux sont mis en contact, la flexion de la bande entraîne des discontinuités dans les bandes de conduction et de valence, comme illustré dans le diagramme de bande d'énergie de la figure II-2.

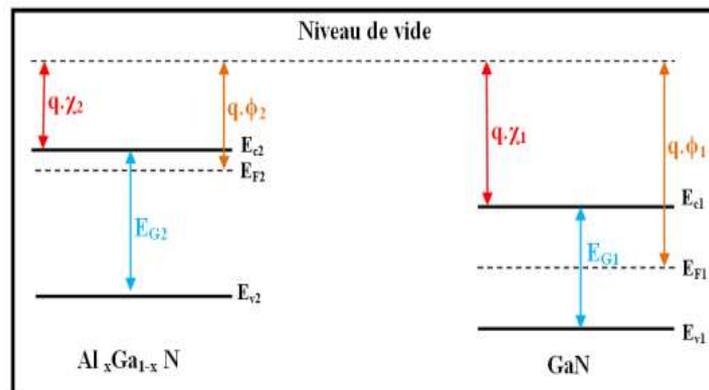


Figure II-2 : Diagramme de bandes d'énergie des deux matériaux semi-conducteurs avant contact [3]

D'où :

EC : valeur des bandes interdite

X : affinité électronique

qx : travail de sortie d'un électron (constante du matériau),

V_B: différence de potentiel entre les couches,

qΦ : travail existant entre le niveau de Fermi (E_F) et le niveau de référence (variable avec le dopage)

La figure II-2 montre le diagramme de bandes d'énergie d'une structure AlGa_xN/GaN. A l'interface AlGa_xN/GaN, la discontinuité ΔE_c forme un puits quantique, comme le montre la figure II-3.

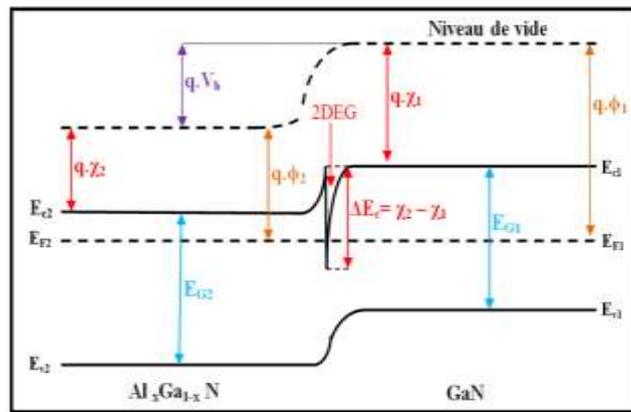


Figure II-3: Diagramme de bandes d'énergie après contact des deux matériaux semi-conducteur (Hétérojonction) [4].

Les électrons confinés dans un canal de conduction bidimensionnel (2DEG) ont une mobilité et une densité élevées, ce qui rend les transistors à effet de champ à base d'hétérojonction prometteurs pour les applications à haute fréquence et à forte puissance.

II.3 FORMATION ET EXPRESSION DU 2-DEG

Le principe de base du HEMT est le transfert des électrons des atomes donneurs de la couche à plus grand gap vers celle à petit gap pour former le canal près de l'interface. Les HEMTs AlGa_xN/GaN possèdent une si grande densité de charges n_s du 2-DEG qu'on ne peut attribuer cela uniquement à la grande discontinuité de bande entre le GaN et l'AlGa_xN mais surtout à la présence d'une forte polarisation à l'hétéro interface. La figure II-4 qui suit montre un HEMT AlGa_xN/GaN, où d_d et d_i sont les épaisseurs respectives de la couche donneuse et de l'espaceur.

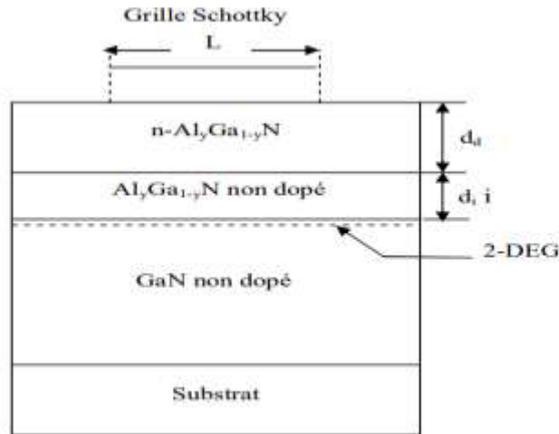


Figure II-4: Schéma de la structure A/GaN/ GaN [4].

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

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

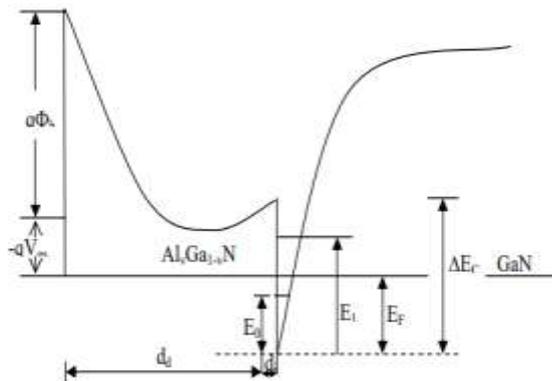


Figure II-5: Diagramme énergétique de la bande de conduction du HEMT AlGaN/ GaN [5].

L'utilisation de la résolution de l'équation de Schrödinger a permis d'expliquer la base physique du 2DEG dans le puits quantique et d'établir l'équation de la concentration des porteurs $N_s = f(E_f)$ tel que [3] :

$$n_s = DK_b T \ln + \left[\left(1 + e^{\frac{(E_f - E_0)}{kT}} \right) \left(1 + e^{\frac{(E_f - E_1)}{kT}} \right) \right] \quad (II - 1)$$

E_0 et E_1 , sont donnés par l'équation I-1. D'un autre côté l'équation de poisson (A1) permet d'écrire n_s en fonction de la polarisation de grille V_{gs} de σ_{pol} et on peut écrire :

$$n_s = \frac{\varepsilon(y)}{qd} \left(Vg - \frac{EF}{q} - V_{th}(y) \right) \quad (II - 2)$$

D'où :

$$V_{th}(y) = \frac{\phi_b(y)}{q} - \frac{\Delta E_c(y)}{q} - \frac{qNd}{2\varepsilon_2} d^2 - \frac{\sigma_{int}(y)}{\varepsilon(y)} d \quad (II - 3)$$

$\phi_b(y)$ est la hauteur de la barrière Schottky, $\Delta E_c(y)$ la valeur de la discontinuité des bandes entre l'AlGaN et le GaN et $\sigma_{int}(y)$ densité de charge (II-3).

De cela, une estimation correcte de n_s nécessite donc une résolution simultanée des deux équations. Quand le niveau de Fermi est bien en dessous des niveaux d'énergie E_0 et E_1 , la densité n_s a une valeur très faible c'est le régime de faible inversion, dès qu'il atteint le bas du puits de potentiel,

Le dispositif opérera alors juste en dessous de sa tension de seuil, en approchant celle-ci le niveau de Fermi se trouve peu au-dessus de la bande de conduction et la valeur de n_s commence alors à augmenter, le dispositif opère alors en régime de moyenne inversion. Mais dès que le niveau de Fermi est loin au-dessus de E_C on a alors des valeurs considérables de N_s (c'est le régime de forte inversion), l'expression de n_s sera alors pour les trois régimes [3].

En faible inversion :

$$n_s = 2DK_b T \exp \left(\frac{q(V_{gs} - V_{th}(y))}{K_B T} \right) \quad (II - 4)$$

En moyenne inversion :

$$n_s = n_o \exp \left(\frac{q\varepsilon(y)(V_{gs} - V_{th}(y)) - \frac{q(dd+d_i)n_o}{\varepsilon(y)}}{q^2(dd+d_i)n_o + \varepsilon(y)k_B T} \right) \quad (II - 5)$$

Le terme n_0 représente la densité de charge à l'équilibre.

En forte inversion :

$$n_s = \frac{2\varepsilon(y)qD}{(\varepsilon(y)+2q^2D(dd+d_i))} \left(V_{gs} - V_{th}(y) \right) \quad (II - 6)$$

La courbe de la variation de n_s en fonction de V_{gs} en régime de forte inversion (figure II-6) montre que lorsque l'épaisseur (d_d) de la couche donneuse AlGaIn augmente, la concentration du 2-DEG augmente. Les grandes valeurs de n_s sont attribuées à la présence des charges de polarisation. La pente de cette courbe correspond à la capacité de la structure, qui est liée directement à la séparation entre la grille et le 2-DEG plus exactement à l'épaisseur (d), plus cette dernière augmente plus la capacité diminue.

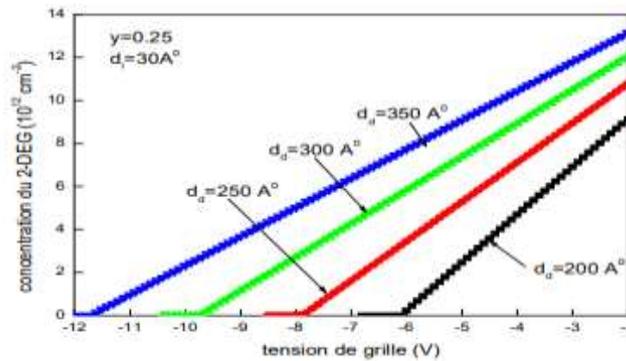


Figure II-6: variation de la concentration du 2-DEG en fonction tension [6].

Ces grandes valeurs de (d) sont souhaitables pour avoir un 2-DEG élevé et une capacité de grille moindre, néanmoins il faut éviter l'apparition du canal du MESFET parasite qui apparaît lorsque V_g atteint et dépasse la valeur de seuil, les deux zones de charges d'espace ne se recouvrent plus et un canal conducteur apparaît dans la couche du AlGaIn, ce phénomène impose une limite supérieure de l'épaisseur et un dopage modéré de la couche donneuse.

Un autre tracé de la variation de la concentration du 2-DEG en fonction de l'épaisseur de la couche active AlGaIn est montré sur la figure II-7.

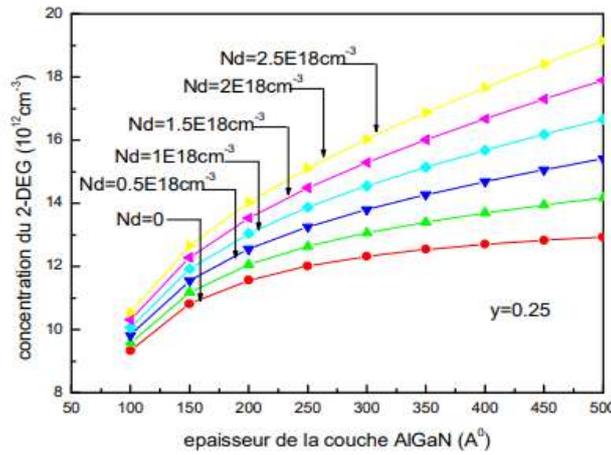


Figure II-7: Variation de la concentration du 2-DEG en fonction de l'épaisseur dd[7]

On remarque que l'augmentation simultanée de l'épaisseur (d_d) et du dopage (N_s) provoque une large augmentation de (n_s), de plus pour les grandes valeurs de (d_d) on constate des écarts significatifs entre les valeurs de la concentration (n_s) pour un dopage donné, ce qui explique la sensibilité du 2-DEG à l'épaisseur de la couche active ainsi que l'impact du dopage sur l'augmentation de celui-ci. L'étude qui suit a été menée sur la variation de la tension de seuil des HEMTs en fonction du dopage. Tel qu'on peut le voir sur la figure II-8, les valeurs de la tension de seuil tendent à être de plus en plus négatives pour les valeurs élevées et de N_d et de d_d .

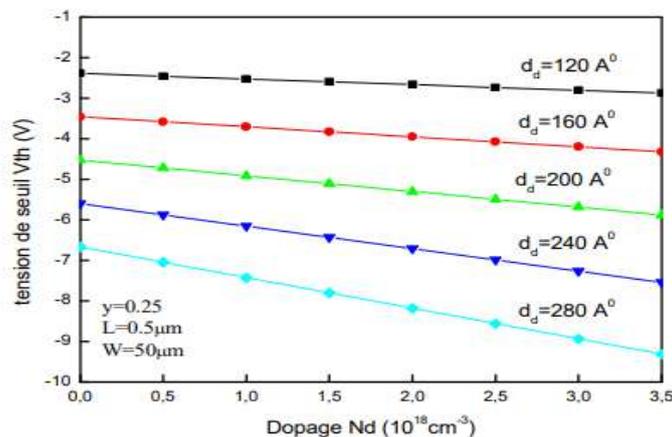


Figure II-8 : Variation de la tension de seuil en fonction du dopage [8].

Ceci confirme le fait que la tension de seuil dans les HEMTs AlGaIn/GaN est beaucoup plus dominée par la densité de charge saint que par le dopage.

II.4 PRINCIPE DU TRANSISTOR HEMT

La structure du transistor HEMT est principalement composée par trois couches de matériaux : un contact de Schottky pour la grille et deux contacts ohmiques pour les électrodes de source et de drain. Elle est illustrée par la Figure II-9. Le principe de fonctionnement du HEMT se distingue à celui d'un transistor à effet de champ à grille Schottky de type MESFET (Modulation Electron Field Effect Transistor), le transfert de courant se fait grâce à la formation, à l'hétérojonction d'un « puits de potentiel » qui tiendra le rôle de canal. L'hétérojonction permet la séparation des atomes donneurs ionisés des électrons libres. Ces électrons sont confinés dans le puits sous forme d'un gaz bidimensionnel (noté 2DEG), où ils peuvent atteindre des mobilités élevées.

La tension de grille V_{GS} affecte la position énergétique de la bande de conduction sous la grille par rapport au niveau de Fermi, la tension de grille doit être négative pour désertir le canal, ce dernier agit directement sur la densité de courant n_s .

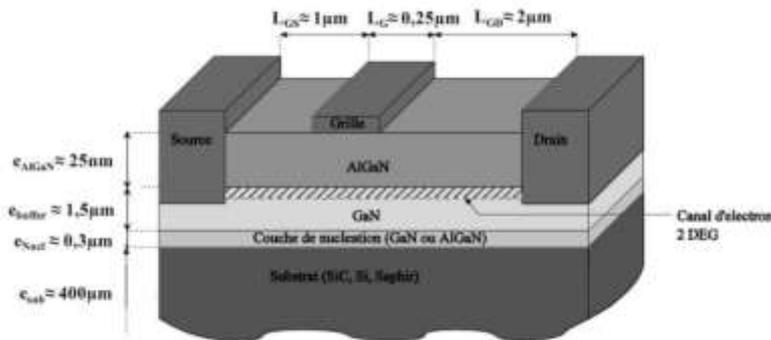


Figure II-9 : Exemple d'une épitaxie d'un transistor HEMT AlGaIn/GaN [9].

Afin d'augmenter les performances des dispositifs à base d'hétérostructures AlGaIn/GaN, une solution serait d'accroître la proportion d'aluminium dans la couche barrière d'AlGaIn, Cependant, cette méthode a quelques limites. Au-delà de 30% d'aluminium, la résistance du canal augmente beaucoup en raison de la diffusion de l'alliage où de la rugosité de l'interface. De plus, dans ces proportions d'aluminium, le courant de fuite peut augmenter et provoquer la cassure de la jonction de grille. Aujourd'hui, avec l'évolution de la technologie GaN, nous retrouvons des transistors InAlN/GaN, qui démontrent des performances plus intéressantes que les composants AlGaIn/GaN. L'introduction de la couche d'AlN entre l'AlGaIn et le GaN permet de diminuer les effets de courant de fuite [12] et d'augmenter environ par deux la densité de porteurs dans le canal de conduction. L'amélioration de l'hétérostructure InAlN/GaN s'explique

essentiellement par l'accord de maille entre la couche barrière InAlN avec la couche de tampon GaN.

II.5 CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES HEMT

I.5.1 Caractéristiques statiques

La caractéristique statique d'un HEMT est représentée par la figure II-9, elle représente le courant drain-source en fonction de la tension drain-source avec une tension grille-source donnée. Sur la caractéristique de sortie trois zones possibles qui représentent le régime de fonctionnement du transistor :

- Zone linéaire : c'est le régime ohmique, le courant drain-source (I_{DS}) croit linéairement en fonction de la tension drain-source (V_{DS}). Cette zone est limitée par une tension de coude (V_{knee}). L'accroissement linéaire du courant I_{DS} est dû à l'augmentation de la mobilité des électrons grâce à l'augmentation de la tension V_{ds} . La limite de cette zone par la tension de coude (V_{knee}) est proportionnelle à la vitesse de saturation des électrons c'est-à-dire plus la vitesse de saturation est faible plus cette zone est petite, et l'inverse est vrai.
- Zone de saturation : dans cette zone le courant drain-source est quasi-constant mais varie selon la tension grille-source. Le régime de saturation est limité par la tension de coude (V_{knee}) et la tension d'avalanche (V_{BR}). Dans cette zone le courant I_{DS} atteint un niveau de saturation car les électrons du canal atteignent leur vitesse de saturation.
- Zone d'avalanche : dans cette zone le courant drain-source augmente de façon brusque et brutale jusqu'à la destruction du composant. Ce phénomène se produit lorsque le champ dans canal atteint la valeur critique de claquage.

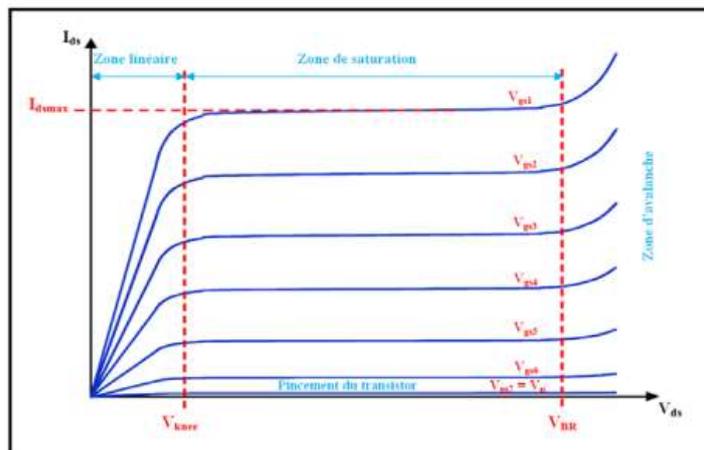


Figure II-10: Variation de la tension de seuil en fonction du dopage [10]

A partir de la caractéristique de sortie, on remarque que le courant I_{DS} varie selon la tension de commande appliquée sur l'électrode de grille.

Le courant I_{DS} décroît quand la tension V_{GS} augmente en valeur absolue. Lorsque la tension de commande devient de plus en plus négative, la densité d'électrons dans le canal diminue entraînant une diminution du courant I_{DS} et il devient nul lorsque la tension de commande atteint la valeur de pincement (V_P) propre du dispositif.

II.5.2 La Transconductance

Les figures II-10 a et b présentent la variation de la transconductance en fonction de la tension grille-source $g_m = f(V_{GS})$, à différentes valeurs de la tension drain-source V_{DS} ; pour les deux transistors. La transconductance g_m est définie par la variation du courant de sortie I_{DS} par rapport à la variation de la tension grille V_{GS} , pour une tension drain V_{DS} donnée. La fréquence de transition d'un HEMT lui est directement proportionnelle ; on aura donc intérêt à avoir une grande valeur de g_m si le transistor est appelé à fonctionner en hautes fréquences.

Pour une tension V_{DS} donnée, nous voyons que g_m augmente avec V_{GS} pour atteindre un pic, puis elle diminue. La transconductance est maximum à une tension V_{GS} pour laquelle la mobilité des électrons est maximale.

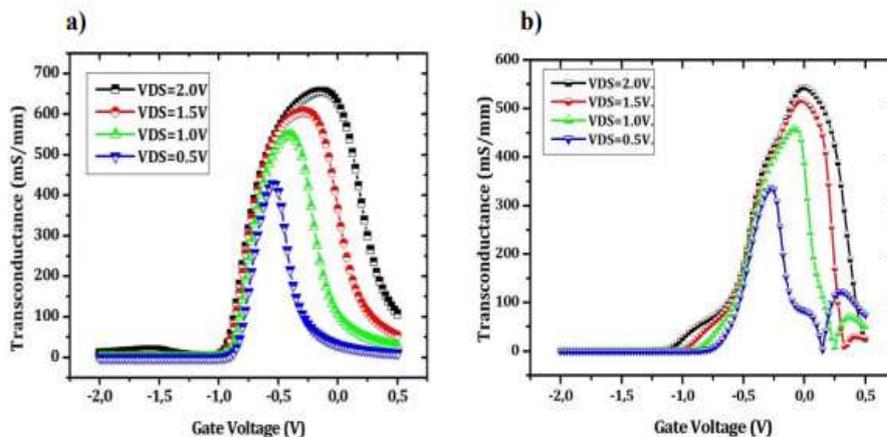


Figure II-11 : Transconductance g_m en fonction de la polarisation grille-source V_{GS} . A) HEMT1, B) HEMT2 [11]

Une grande pente de la transconductance signifie qu'on a un bon contrôle de la grille sur le canal. La transconductance maximale augmente avec V_{DS} et se décale vers une tension V_{GS} plus grande. Les valeurs de g_m obtenues nous permettent de dire que le HEMT1 est plus apte que le

HEMT2, en haute fréquence. Pour $V_{DS} = 2.0 \text{ V}$; nous obtenons une transconductance maximum égale à 690 mS/mm pour le HEMT1, et 578 mS/mm pour le HEMT2.

Ces valeurs obtenues sont supérieures à des valeurs précédemment rapportées pour des structures similaires basées sur l'hétérostructure AlGaIn/GaN [5], ce serait dû aux effets indésirables qui existeraient dans une structure réelle et qui ne sont pas prises en compte dans notre simulation. Un phénomène est visible dans le cas du deuxième transistor, la courbe de g_m est distordue pour les grandes valeurs de V_{GS} (entre 0 et 0.5 V à peu près; cela serait dû à un comportement des diodes formées par les trois jonctions des électrodes dans le transistor.

II.5.3 La fréquence de transition d'un HEMT

Lui est directement proportionnelle ; on aura donc intérêt à avoir une grande valeur de g_m si le transistor est appelé à fonctionner en hautes fréquences.

Pour une tension V_{DS} donnée, nous voyons que g_m augmente avec V_{GS} pour atteindre un pic, puis elle diminue. La transconductance est maximum à une tension V_{GS} pour laquelle la mobilité des électrons est maximale.

II.5.4 Fréquence de coupure et fréquence maximale d'oscillation

La fréquence de coupure traduit la rapidité du transistor, d'une manière générale. On distingue deux fréquences de coupure : f_T est la fréquence de coupure du gain en courant et f_{Max} est la fréquence de coupure du gain en puissance (fréquence maximale d'oscillation). La fréquence de coupure intrinsèque du gain en courant dépend de la structure interne du dispositif, on peut l'exprimer en fonction de la longueur de grille et de la vitesse moyenne des électrons :

$$f_T = \frac{1}{2\pi\tau_w} = \frac{v_{moy}}{2\pi LG} \quad (II - 7)$$

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

$$f_s = \frac{gm}{2\pi(CGD + CGD)} \quad (II - 8)$$

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

$$f_{text} = \frac{gm}{2\pi((CGD+CGD)[1+gmRs])} \quad (II - 9)$$

La fréquence de coupure f_{Max} s'exprime à partir des paramètres intrinsèques du schéma équivalent petits signaux :

$$f_{max} = \frac{g_m}{2(R_G + R_I + R_S) \left[g_D + g_m \frac{C_{GD}}{C_{GS}} \right]} \quad (II - 10)$$

La fréquence de coupure en puissance est donc très sensible aux éléments parasites qui interviennent dans le fonctionnement du transistor. Le facteur de bruit est un autre critère à prendre en compte, il est défini par :

$$N_F = 2\pi f C_{GS} \left(\frac{R_G + R_i}{g_m} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (II - 11)$$

II.5.5 Bruit généralités

II.5.5.1 Origines du bruit

Le bruit dans les composants électroniques est dû au mouvement désordonné des électrons (produit par divers mécanismes de collision des porteurs) et aux diverses interactions parasites dans les matériaux constituant le dispositif. Ceci se traduit par des fluctuations de courant et de tension autour du point de polarisation [6,7].

Le bruit thermique (ou bruit Johnson [8]) :

Propre aux composants présentant des pertes par conduction, le bruit thermique est dû au mouvement erratique des électrons dont les directions de propagation sont sans cesse modifiées par suite des collisions avec les atomes du réseau cristallin. Le bruit thermique est un bruit blanc, il est constant avec la fréquence.

La valeur quadratique moyenne de la tension de bruit dans une bande B est donnée par relation de Nyquist [9] :

$$\overline{e^2} = 4kTRB \quad (II - 12)$$

Avec :

K : constante de Boltzmann = $1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K

T : température en kelvin

R : valeur de la résistance

B : bande dans laquelle le bruit est mesuré

Une résistance bruyante est par exemple représentée par une source de bruit thermique en série avec une résistance non bruyante :

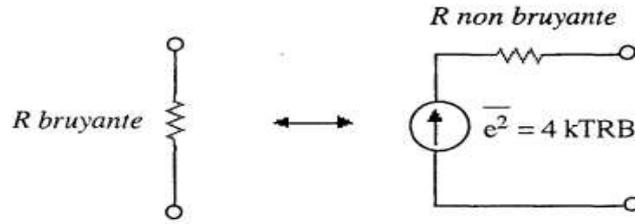


Figure II-12: représentations d'une résistance bruyante [12].

Le bruit de grenaille (ou bruit Schottky) :

Ce bruit résulte des fluctuations de courant dues aux variations du flux de charges à travers une transition (jonction p-n ...). Ce bruit est également un bruit blanc (à condition d'avoir $f < \frac{1}{2}\pi\tau$ ou τ le temps de transit à travers la zone de transition).

La valeur quadratique moyenne du courant de bruit dans une bande B est donnée par la relation de Schottky :

$$\bar{i}^2 = 2qI_0B \quad II - 13$$

Avec :

q : charge élémentaire de l'électron = $1,6 \cdot 10^{-19}$ C

I_0 : courant moyen appliqué

B : bande dans laquelle le bruit est mesuré

II.5.5.2 Les bruits en excès

Les bruits en excès sont propres aux matériaux semi-conducteurs et viennent se superposer aux deux bruits précédemment cités. Ils traduisent la fluctuation de la densité des porteurs due à la présence de défauts et aux phénomènes de piégeage. On reconnaît généralement deux types de bruit en excès :

- Le bruit de génération-recombinaison : lors de leurs transitions entre bandes de conduction et de valence, les porteurs séjournent sur des niveaux pièges (liés à la présence d'impuretés ou de défauts) pendant un temps aléatoire et ne participent donc pas à la conduction.
- Le bruit en 1/f : il est caractérisé par sa répartition spectrale. Pour la plupart de dispositifs électroniques, il prédomine très nettement en basse fréquence par rapport au bruit thermique ou de grenaille. Il s'agit d'un bruit qui décroît avec la fréquence.

- Le bruit en 1/f ou bruit de scintillement ("flicker noise") est significatif pour des fréquences en dessous de quelques kHz. Dans le cadre de notre étude, nous nous situerons dans des gammes de fréquence largement supérieures au domaine d'influence de ce type de bruit.

II.5.6 Facteur de bruit

II.5.6.1 Température de bruit

L'effet du bruit d'un composant dans un montage électronique se traduit essentiellement par la dégradation du rapport signal sur bruit (S/N). Chaque élément ajoute du bruit et diminue un peu plus la dynamique du système. La première définition du facteur de bruit donnée par Friis traduit bien cet effet:

$$N_F = \frac{(S/N)_{\text{entrée}}}{(S/N)_{\text{sortie}}} = \frac{\frac{S^1}{N^1}}{\frac{S^2}{N^2}} \quad \text{en linéaire} \quad (II - 14)$$

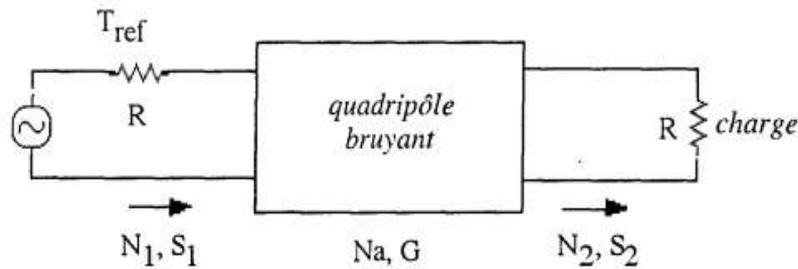


Figure II-12: Bruit ajouté par un quadripôle

N_1 et N_2 sont respectivement les puissances de bruit totales disponibles à l'entrée et à la sortie du quadripôle. En définissant N_a comme étant le bruit ajouté par le dispositif et G son gain en puissance disponible, on obtient :

$$N_2 = G \cdot N_1 + N_a \quad (II - 15)$$

ET

$$S^2 = G \cdot S_1 \quad (II - 16)$$

D'où

$$N_F = \frac{G \cdot N_1 + N_a}{G \cdot N_1} \quad (II - 17)$$

SI $N_e=N_a /G$ est le bruit ajouté ramené à l'entrée, on obtient :

$$N_F = 1 + \frac{N_e}{N_1} \quad II - 18$$

Par analogie avec la puissance moyenne de bruit émise par un corps noir, on peut écrire

$$N=KTB$$

D'ou

K : constante de Boltzmann

T : température absolue corps noir

B : bande de fréquence

On obtient alors :

$$N_F = 1 + \frac{4KT_e}{4KT_{ref}} \quad (II - 19)$$

$$N_F = 1 + \frac{T_e}{T_{ref}} \quad \text{en linéaire} \quad (II - 20)$$

Avec T_{ref} : température ambiante (290k)

On définit la température équivalente de bruit ramenée à l'entrée T_e comme étant la température à laquelle il faudrait porter un dipôle fictif à bruit purement thermique pour qu'il présente un bruit identique à celui du quadripôle étudié, à la température T et dans la bande de fréquence B.

Le facteur de bruit et les températures de bruit équivalentes sont deux moyens de caractériser les propriétés de bruit d'un composant.

II.5.6.2 Bruit d'un système

Rappelons tout d'abord la formule de Friis [10] qui donne l'expression du facteur de bruit d'une chaîne de éléments en cascade:

$$N_{F\ total} = N_{F1} + \frac{N_{F2}-1}{G_{a1}} + \frac{N_{F3}-1}{G_{a1} G_{a2}} + \dots \quad (II - 21)$$

D'Ou :

N_{Fi} et G_{ai} sont respectivement le facteur de bruit et le gain disponible du $i^{ème}$ étage.

Le facteur de bruit total est donc essentiellement déterminé par celui du premier étage. Ceci impose, lors de la conception d'un amplificateur faible bruit, que le premier étage soit avant tout très faible bruit mais qu'il ait aussi suffisamment de gain pour masquer le bruit des étages suivants.

II.5.6.3 Principe des mesures

Théoriquement, la température de bruit équivalente d'un composant peut être déterminée en mesurant la puissance de sortie lorsqu'une charge adaptée à une température physique de 0 K est connectée à l'entrée du composant. En pratique, une température de source 0 K ne peut pas être atteinte et il faut avoir recours à une autre solution. Si nous disposons de deux charges à des températures relativement différentes, alors nous pouvons utiliser la méthode du facteur Y [11]. Cette technique est illustrée sur la figure II-13, où l'amplificateur (ou un autre composant) à tester est connecté à l'une des deux charges adaptées, celles-ci sont à des températures différentes que nous appelons "chaude" et "froide". La puissance de sortie est mesurée dans chacun des cas. Appelons T_1 la température de la charge chaude, et T_2 celle de la charge froide. P_1 et P_2 sont les puissances de sortie respectives mesurées à la sortie de l'amplificateur. La puissance de sortie comporte la puissance de bruit générée par l'amplificateur ainsi que la puissance de bruit de la résistance. Nous pouvons donc écrire :

$$P_1 = GkT_1B + GkT_eB \quad ; \quad P_2 = GkT_2B + GkT_eB$$

Les deux puissances P_1 et P_2 ainsi que les deux températures T_1 et T_2 étant connues, nous avons donc deux équations à deux inconnues ; celles-ci sont la température de bruit

* bande passante GB . Le facteur Y est alors défini de l'comme étant le rapport des deux puissances mesurées :

$$Y = \frac{P_1 P_1}{P_2} = \frac{T_1 + T_e}{T_2 + T_e} > 1 \quad (II - 21)$$

La température de bruit de **DUT** (Device Under Test), T_e , est alors déduite de II-22 :

$$T_e = \frac{T_1 - T_2 T_2}{Y - 1} \quad (II - 22)$$

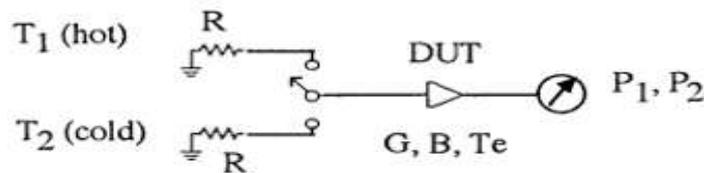


Figure II-13: La méthode du facteur Y pour la mesure de la température équivalente de bruit d'un amplificateur.

En pratique, on peut utiliser un générateur de bruit actif de type diode à bruit (définie par son bruit en excès ou ENR (Excess Noise Ratio)) dans ses états "on" et "off". Une autre solution consiste à utiliser la diode à bruit comme "charge chaude" tandis que la "charge froide" peut être obtenue en plongeant la résistance dans de l'azote liquide (77 K), ou encore dans de l'hélium liquide (4 K).

II.5.6.4 Définition de l'ENR

Une source à état colloïde à diode à avalanche est caractérisée par son ENR : il définit la puissance de bruit en excès disponible à la sortie de la source de bruit par rapport au bruit thermique ambiant. Cette quantité est fournie par le constructeur.

$$ENR(dB) = 10 \log \left(\frac{T_{chaude}}{290} - 1 \right) \quad (II - 23)$$

T_{chaude} est la température chaude (en K) de la diode lorsque celle-ci est polarisée (état "on").

Pour les diodes de bruit classiques, l'ENR vaut 5, 15 ou encore 30 dB.

II.5.7 Fonctionnement en puissance

II.5.7.1 La puissance de sortie

La puissance de sortie maximale théorique d'un transistor HEMT peut être estimée à partir de sa caractéristique de sortie $I_{DS} = F(V_{DS})$ par la relation II-24 [12]

$$P_{out} = \frac{1}{8} I_{D_{MAX}} \cdot (V_{BR} - V_{KNEE}) \quad (II - 24)$$

Où $I_{D_{MAX}}$ est le courant de drain maximal, V_{BR} est la tension de claquage du dispositif et V_{KNEE} est la tension coude à laquelle les courbes I-V passent de la région linéaire à la région de saturation.

II.6 LE SCHEMA EQUIVALENT PETIT SIGNAL

Un schéma équivalent petit signal du HEMT peut être établi en utilisant les éléments cités ci-dessus. Ces paramètres décrivent l'effet HEMT et les éléments parasites issus de sa propre structure. Par ailleurs, lorsqu'un transistor HEMT est physiquement réalisé, quelque inductance se rajoute au schéma L_G , L_D , L_S se sont les inductances parasites d'accès respectives à la grille, drain et source.

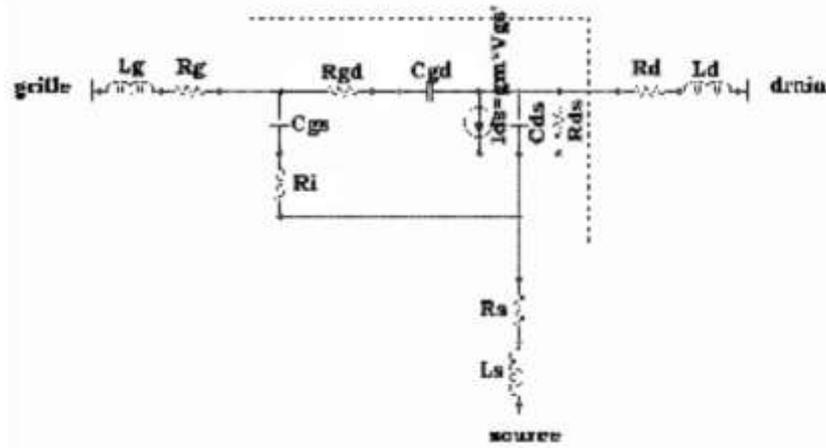


Figure II- 14 : Schéma équivalent petit signal les transistors à effet de champ y compris le HEMT [13].

II.6.1 La transconductance

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

$$g_m = \left[\frac{\partial I_{ds}}{\partial V_{gs}} \right] \quad \text{Avec } V_{ds} = cste \quad (II - 25)$$

Le g_m intrinsèque traduit le contrôle de charge dans le canal par la tension de grille.

II.6.2 La conductance de sortie

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

$$g_D = \left[\frac{\partial I_{ds}}{\partial V_{ds}} \right] \quad \text{avec } V_{gs} = cste \quad (II - 26)$$

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

II.6.3 La capacité grille- source

C_{GS} décrit l'interaction capacitive sous la grille entre la grille et la source. Sa valeur est majoritairement déterminée par la partie de la capacité de la zone de charge d'espace de la jonction Schottky grille-source :

$$C_{GS} = \left[\frac{\partial Q}{\partial V_{gs}} \right] \quad \text{avec } V_{gd} = cste \quad (II - 27)$$

Q : la charge de la ZCE de la jonction Schottky.

II.6.4 La capacité grille-drain

C_{gd} est définie comme l'interaction capacitive dans le semiconducteur entre la grille et le drain. Elle reflète la variation de la quantité de charge dans la ZCE de la jonction Schottky à tension V_{gs} constante :

$$C_{GD} = \left[\frac{\partial Q}{\partial V_{gd}} \right] \quad \text{avec } V_{gs} = cste \quad (II - 28)$$

Cette capacité détériore les performances dynamiques de deux façons différentes : [14] Ø

- **Par effet Miller** : une partie de C_{gd} (ou multiple de C_{gs}) se retrouve reporté à l'entrée du transistor s'additionnant avec la capacité C_{gs} et diminuant ainsi le gain extrinsèque du transistor à haute fréquence Ø

- **Par couplage directe** : A haute fréquence, C_{gd} relie directement l'entrée du transistor à sa sortie et peut provoquer des instabilités.

II.6.5 La capacité entre le drain et la source

L'origine de C_{ds} est l'interaction capacitive entre les deux régions du canal sous les contacts ohmiques de drain et de source.

II.6.6 Les résistances Ri et Rgd

Même lorsque la barrière est totalement dépletée sous la grille. Elle ne l'est pas complètement dans les zones qui ne sont pas exactement sous la grille, surtout dans les régions d'accès au canal actif. De ce fait, les capacités C_{gs} et C_{gd} se retrouvent en série avec deux zones partiellement conductrices, respectivement R_i et R_{gd}.

II.7 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons étudié différents transistors à effet de champ, leur structure, leurs caractéristiques, leur fonctionnement, leurs caractéristiques et leurs performances. Ensuite, nous avons étudié différents types de transistors à haute mobilité électronique, notamment ceux basés sur nos travaux sur l'arséniure de gallium et le nitrure de gallium. Une étude détaillée de ces deux derniers transistors ; puis on utilise toutes les couches qui les composent pour traiter les aspects

techniques, leurs caractéristiques électriques, leurs caractéristiques, et les effets indésirables qui y existent. Améliorer ses performances à partir de la solution discutée.

Chapitre III :
Résultats et
Interprétation

III.1 INTRODUCTION

Notre travail permet d'étudier les transistors à haute mobilité électronique GaN / InAlN / AlN ; plus précisément, il s'agit de simulation Et comparez leurs performances DC et AC. Pour cela, nous utilisons un logiciel de simulation Silvaco.

Tout d'abord, nous présentons le logiciel de simulation TCAD SILVACO et sa description et sa mise en œuvre ; puis nous concevons la structure. Nos transistors utilisent des modules Blaze / Blaze3D.

La première partie de la simulation traite du problème d'optimisation de HEMT :

Nous calculons les caractéristiques de sortie et de transmission de différentes épaisseurs et dopages Les couches qui composent le transistor, et l'influence du substrat et du métal utilisé Pour l'électrode. Nous avons également traité de l'impact du modèle physique simulation.

Dans la deuxième partie, nous étudions les deux transistors représentant le point Notre sujet le plus important. Dans un état statique ; nous simulons des fonctionnalités, Et les effets néfastes qui réduisent et limitent les performances des transistors, tels qu'Effet de pliage, effet d'avalanche, courant de fuite...

Petits signaux dans la gamme dynamique ; nous simulons la transconductance,

La capacité, le courant et le gain de puissance différents changent avec la fréquence. Nous simulons Performances de puissance micro-ondes, puis nous utilisons le mode impulsion Évaluez le niveau de la grille et les pièges dans le tampon.

Nous utilisons le logiciel C++ est utilisé pour définir des modèles de matériaux qui n'existent pas dans SILVACO.

III.2 TCAD-SILVACO

III.2.1 Principes et conditions d'utilisation

Le terme TCAD est l'acronyme anglo-saxon de "Technology Computer Aided Design". Cet outil de conception assistée par ordinateur permet de simuler le comportement électrique d'un composant électronique en tenant compte de sa structure (dopages, matériaux, géométries,). Il permet en même temps, de concevoir des dispositifs et/ou de comprendre les mécanismes physiques qui régissent leur fonctionnement. Nous mettrons en évidence les mécanismes physiques parasites qui dégradent les performances des HEMTs à base de matériaux GaN.

Le logiciel va résoudre de façon auto-cohérente les équations de continuité et de Poisson en tout point de la structure simulée. Les équations des différents modèles physiques pris en compte (modèle de mobilité, effet des pièges, ...) seront résolues en fonction des paramètres des matériaux introduits tels que la mobilité, la largeur de bande interdite, les densités d'états, etc. La

Résultats et interprétation de simulation HEMT-LNA

précision des simulations dépend du maillage établi à la structure, une meilleure précision est obtenue pour un meilleur maillage. Le temps de calcul est proportionnel au nombre de nœuds composant le maillage. Comme la résolution des équations, est effectuée par la méthode de Newton ; la convergence et donc la résolution des équations, se complique grandement avec un élargissement du maillage. Il y a donc un compromis entre précision, temps de calcul et convergence. Les simulations par différences fines sont très consommatrices de ressources informatiques en comparaison avec les modèles compacts ; mais elles permettent de connaître spatialement les différentes grandeurs physiques utiles à la compréhension du fonctionnement du composant, telles que le champ électrique, les densités d'électrons et de trous, les bandes de conduction et de valence, et le niveau de Fermi. Les limites des simulations TCAD sont liées au maillage et aux approximations induites par les modèles utilisés. Nous utilisons DevEdit qui propose un large choix de modèles pré-implémentés ; mais ceux-ci ont été développés principalement pour le silicium et l'arséniure de gallium. Il est donc nécessaire d'adapter ces modèles et de les choisir avec justesse pour le nitrure de gallium (GaN) et le nitrure d'indium-aluminium (InAlN).

III.2.2 ATHENA TCAD-SILVACO

Le module de simulation ATHENA de TCAD-SILVACO fournit la possibilité de simuler les processus utilisés dans l'industrie des semi-conducteurs : diffusion, oxydation, implantation ionique, gravure, lithographie, procédés de dépôt. Il permet des simulations rapides et précises de toutes les étapes de fabrication utilisées dans les technologies HEMT, bipolaire, MESFET, optoélectronique, MEMS, et les composants de puissance [1]. Il permet de fournir des informations importantes pour la conception et l'optimisation des procédés technologiques telles que les concentrations des porteurs, les profondeurs de jonctions, etc. Le programme de simulation (défini comme entrée) des différentes étapes technologiques et des phénomènes physiques, s'établit avec le module DECKBUILD de TCAD-SILVACO ; puis le fichier de sortie de la structure s'effectue avec le module TONYPLOT.

III.2.3 ATLAS TCAD-SILVACO

Le module ATLAS est un simulateur de modélisation bidimensionnelle des composants ; il est capable de prédire les caractéristiques électriques de la plupart des composants semi-conducteurs en régime continu, alternatif, transitoire ou fréquentiel. En plus du comportement électrique externe, il fournit des informations sur la distribution interne de variables telles que les lignes de courant, le champ électrique ou le potentiel. Atlas résout numériquement l'équation de Poisson et les équations de continuité des électrons et des trous (à deux dimensions) en un nombre fini de

Résultats et interprétation de simulation HEMT-LNA

points formant le maillage défini pour la structure. Ce simulateur est composé de deux parties : - une partie traitement numérique (méthode d'intégration, de discrétisation...) - une partie formée des modèles physiques des composants semi-conducteurs les plus courants : Modèle de recombinaison (Shockley Read Hall), modèle d'ionisation par impact (Pearson et Monte Carlo), modèles de mobilité, statistiques de Fermi-Dirac et Boltzmann.

III.2.4 DECKBUILD

DECKBUILD est l'environnement où l'on définit le programme de simulation à travers des commandes spécifiques. Plusieurs simulateurs considérés comme des entrées peuvent être utilisés avec le DECKBUILD : ATHENA, ATLAS, SSUPREM3, etc. L'affichage des résultats de simulation tels que les paramètres technologiques (profondeur de jonction, concentration des porteurs) et les paramètres électriques (tension de seuil, courant, etc.) s'effectue à l'aide d'une fenêtre d'information (Output Windows).

III.2.5 TONYPLOT

TONYPLOT est l'environnement où sont visualisés 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).

TONYPLOT peut donner des caractéristiques de sortie en une dimension (1D), deux dimensions (2D), ou trois dimensions (3D). Dans cette thèse, nous présenterons les résultats de la simulation en deux dimensions.

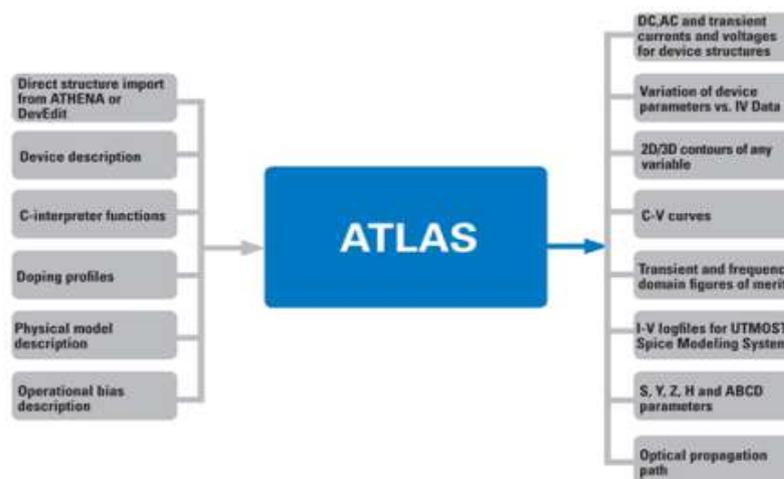


Figure III-1 : Entrées et sorties ATLAS [1].

III.3 HEMT A BASE DE GAN ETUDIÉS

III.3.1 Structures des HEMT

Comme illustré dans la figure III-2 (a), nous voyons une section transversale de la structure, et cette structure située sur la couche de substrat (4H-SiC). Le contact du dispositif a utilisé un Schottky Au.

Les électrodes de source/drain et de grille, la conception du dispositif comprend une hétérostructure InAlN/GaN, où l'oxyde périphérique Al₂O₃ de la grille est différent des conceptions conventionnelles [2], et le diélectrique de passivation qui minimise les fuites de surface et crée une haute densité de pièges peu profonds à la surface [3]. Par conséquent, après une couche de dopage, la densité de courant de fuite est éliminée du dispositif, ce qui donne une barrière InAlN non dopée [4]. Cela élève la forme de la bande de conduction pour la barrière qui, pour la même concentration de porteurs de feuille basée sur le modèle de Fujitsu [5], La mobilité de Hall et la concentration de porteurs de feuille étaient de $1300 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-2}$ et $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$.

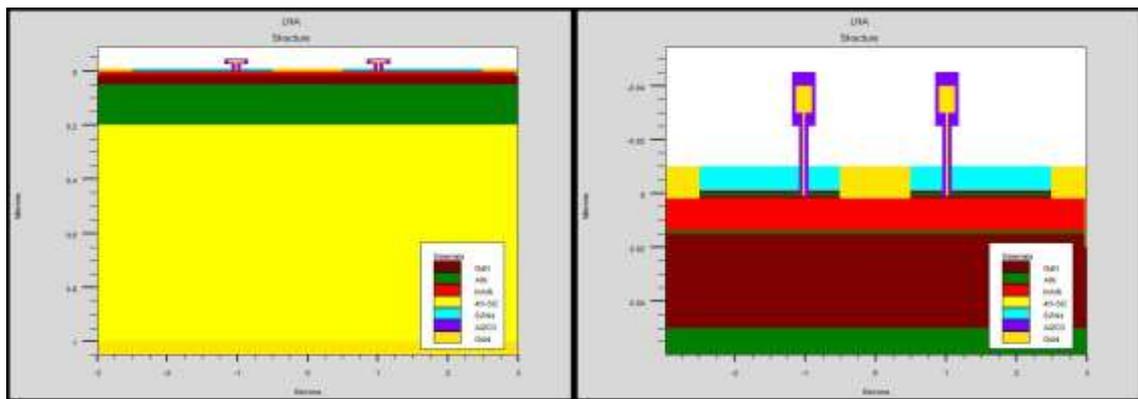


Figure III-2 : Vue 2D des structures a) HEMT GaN/InAlN/AlN/GaN.

III.4 RESULTATS ET DISCUSSION

Dans cette étude, des simulations bidimensionnelles ont été réalisées à l'aide du logiciel de simulation de dispositifs SILVACO International, qui s'est avéré être un outil approprié pour l'analyse des dispositifs hétéro-structures. Atlas a exécuté les fonctions générales tandis que BLAZE, GIGA et C-INTERPRETER ont exécuté les fonctions spécialisées requises pour les dispositifs d'hétérojonction III-V, calculs thermiques et équations définies par l'utilisateur, respectivement. Afin de contrôler et de modifier les modèles utilisés DECKBUILD, DEVEDIT et TONYPLOT ont été utilisés.

III.4.1 Performances de DC

III.4.1.1 Caractéristique de transfert IDS-VGS

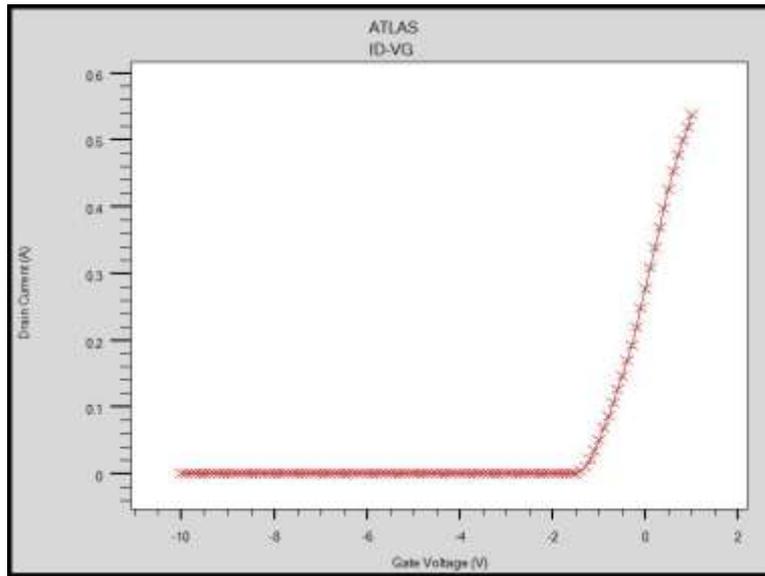


Figure III-3 : caractéristiques de transfert du HEMT InAlN/GaN étudié.

La caractéristique de transfert consiste à représenter le courant drain-source I_{ds} en Fonction de la tension grille-source V_{gs} , pour une tension drain-source V_{ds} donnée. Il est possible de déterminer ainsi la tension de pincement V_p définie comme étant la tension de grille à appliquer à -1.5 V, afin de vider le puits de potentiel de ses porteurs. On définit aussi la transconductance comme étant la pente de la caractéristique I_{ds} - V_{gs}

III.4.1.2 Caractéristique de sortie IDS-VDS

La Figure III-4 montre les caractéristiques IDS-VDS de notre HEMT simulée avec tension $V_{GS} = 0.0$ à -2.0 V.

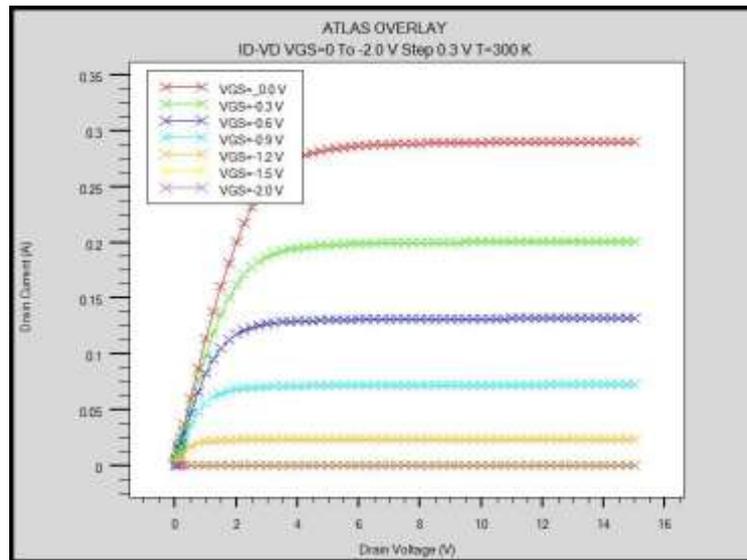


Figure III-4 : Caractéristiques de sortie du HEMT InAlN/GaN simulé.

L'un des avantages les plus importants de l'hétérostructure InAlN/GaN est la densité de charge interfaciale élevée qui devrait permettre une densité de niveau de courant très élevée. Nos HEMT AlInN/GaN présentent une densité de courant maximale de 290 mA/mm à $V_{GS}=0V$ comme le montre la Figure III-4.

III.4.1.3 Caractéristique de transconductance g_m - V_{GS}

La transconductance g_m est un paramètre important qui doit être optimisé pour les performances micro-ondes des transistors HEMT.

Dans la Figure III-5, la transconductance est tracée en fonction de V_{GS} . Cette figure présente les caractéristiques g_m - V_{GS} . La caractéristique de transfert est utilisée pour déterminer la tension de seuil, V_{TH} et la transconductance g_m . Notre appareil présentait un excellent pincement de -1,5 V, une faible tension au genou et une transconductance de crête élevée de 275 mS / mm à $V_{DS} = 5V$.

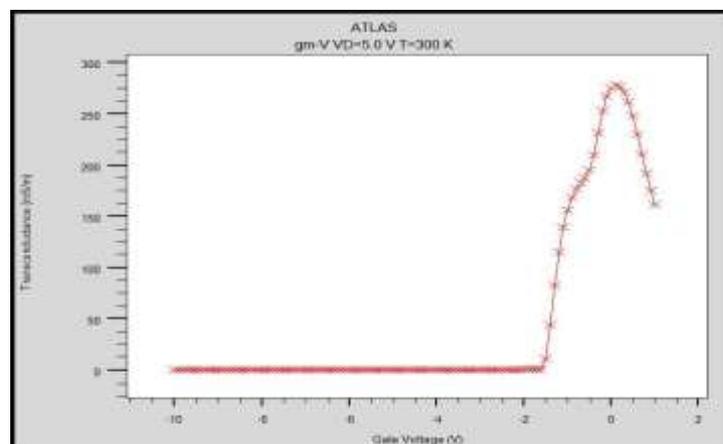


Figure III-5: Transconductance du HEMT InAlN/GaN étudié.

III.4.2 Caractéristiques AC

Les performances du dispositif de fréquence sont étudiées par analyse AC à petit signal. La Figure III-6 montre les résultats de simulation que nous avons obtenus permettant de déterminer le gain de courant H21 de notre appareil, son gain de puissance maximal du transducteur et son gain de puissance unilatéral.

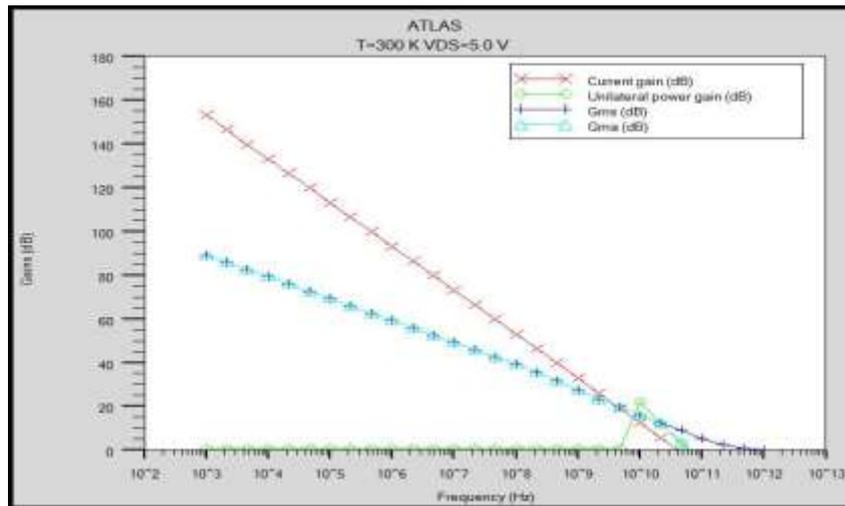


Figure III-6 : Gain de courant simulé (H21), gain de puissance unilatéral (U) et gain de puissance du transducteur max. unilatéral (U) et gain de puissance maximal du transducteur (MTG) en fonction de la fréquence pour le HEMT InAlN/GaN.

Le gain de courant maximal H21 obtenu pour notre HEMT est égal à 160 dB, le gain de puissance maximal du transducteur est égal à 90 dB et le gain de puissance stable maximal est égal à 90 dB. Nos résultats de simulation indiquent également que la structure a une fréquence de coupure fT de 40 GHz et une fréquence maximale fmax de 71 GHz.

III.4.2.1 Capacités en fonction de tension

Cet figure a représenté les différences capacités (Cds/Cgs/Cgd) en fonction de tension ; On remarque il y a une stabilité dans les trois capacités avant la valeur de tension -5V ; et après il y a une augmentation de Cgs et une diminution de Cds avec fréquence de 10 GHz.

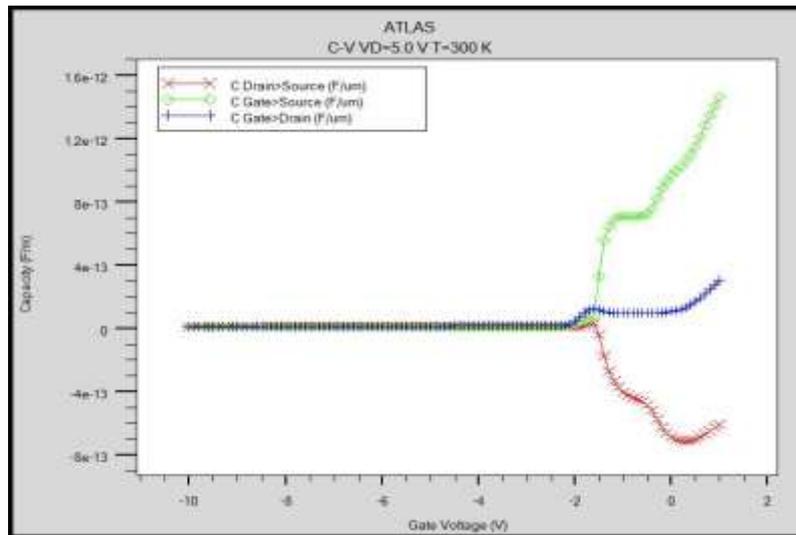


Figure III-7 : Les différences capacités (Cds/Cgs/Cgd) en fonction de tension

III.4.2.2 Capacités en fonction de fréquence

La figure III-8 représente les différences capacités (Cds/Cgs/Cgd) en fonction de fréquence. Les capacités (Cgs/Cgd) qui donne une valeur stable dans la bande de fréquence entre $[10^3 - 10^{12}]$; et par contre la capacité (Cds) elle donne une valeur instable dans le même bande de fréquence des autres capacités ; et une diminution après 100 GHz pour les trois capacités .

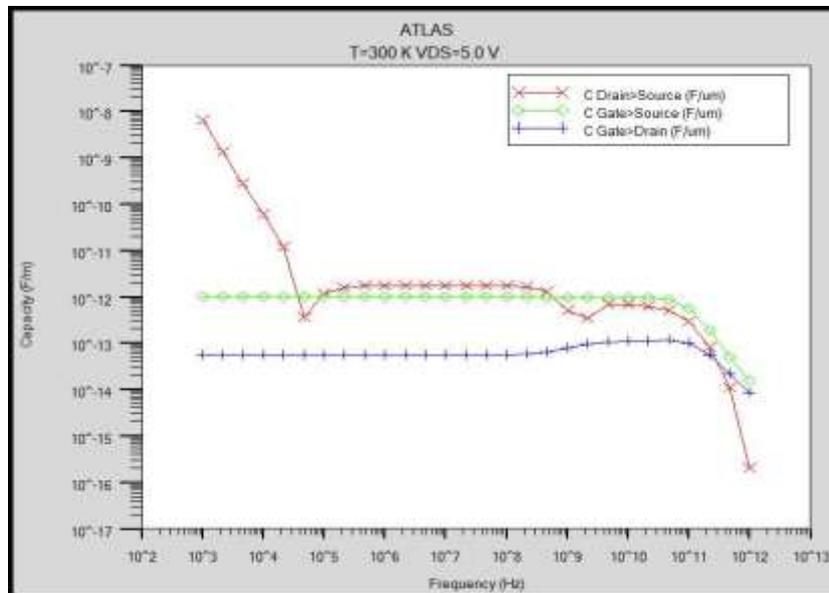


Figure III-8 : les différences capacités (Cds/Cgs/Cgd) en fonction de fréquence.

III.4.3 Caractéristiques du bruit

La performance sonore des dispositifs HEMT dépend fortement de l'épaisseur de l'espaceur, en effet, la fine couche d'espacement séparant les électrons de leurs donneurs permet de réduire la diffusion des électrons par les donneurs chargés positivement. Ceci est réalisé en introduisant une fine couche d'espacement d'AlN non dopé entre la couche donneuse InAlN et la couche de canal GaN afin de séparer le 2-DEG chargé négativement des atomes dopants ionisés. Les principaux avantages de l'InAlN étudiés par rapport à la structure AlGaN comprennent la correspondance du réseau avec le GaN avec une teneur en indium de 17% et une polarisation spontanée élevée, permettant de créer des densités de porteurs de charge élevées dans le gaz d'électrons 2DEG formé aux interfaces InAlN / GaN. Ces propriétés permettent d'améliorer le contrôle électrostatique du courant de l'appareil qui circule à travers la diapositive. Dans notre étude, une fine couche d'espacement d'environ 1 nm d'épaisseur a été utilisée pour les dispositifs à faible bruit et à faible puissance en raison de la résistance réduite des sources parasites et de l'augmentation de la densité de courant et de la transconductance, ce qui permet de réduire la rugosité de l'interface liée à l'alliage et d'améliorer considérablement la mobilité des électrons. Afin d'effectuer une analyse du bruit avec SILVACOTCAD, le module Noise combiné à Blaze permet d'analyser le bruit de petit signal généré dans les dispositifs semi-conducteurs. Le module de simulation du bruit dans l'atlas utilise la méthode du champ d'impédance dérivée par Shockley and.al [6]. Il fournit une caractérisation précise de toutes les sources de bruit de petits signaux et permet d'extraire toutes les figures de mérite essentielles à l'optimisation de la conception des circuits [6].

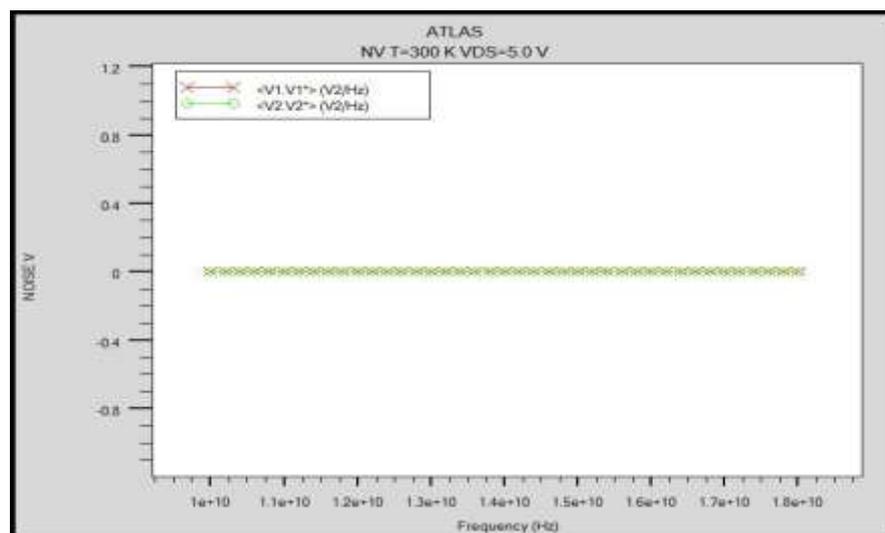


Figure III-9 : Densité spectrale de tension de bruit de notre dispositif simulé à VDS=5V.

Résultats et interprétation de simulation HEMT-LNA

La Figure III-9 montre les dépendances de fréquence de la densité de bruit spectral. Comme le montre la Figure III-10, les spectres de bruit affichent une dépendance typique au bruit de $1/f$. Il est important d'identifier le bruit de scintillement et de connaître sa valeur, car ce type de bruit est le chiffre limite pour tous les types de HEMT. Le bruit à basse fréquence dans les structures HEMT est important car il devient une limitation significative des performances de l'appareil. Bien que découvert très tôt et presque partout, la source du bruit de scintillement n'est toujours pas claire. De nos jours, il existe plusieurs théories qui sont établies par divers groupes pour divers appareils et même pour les mêmes appareils, mais considérées dans différentes régions de fonctionnement. Les deux modèles importants de bruit de scintillement sont ceux de McWhorther (piégeage-piégeage) [7] et de Hooge (fluctuation de la mobilité) [8]. Cependant, le bruit de scintillement est toujours associé au flux de courant continu circulant à travers l'appareil. Le bruit $1/f$ est le bruit de basse fréquence qui affecte les performances de l'appareil et qui peut être ignoré à des fréquences très élevées. La Figure III-11 montre la dépendance du biais de drainage du bruit à basse fréquence à température ambiante. Nous pouvons observer que le bruit de scintillement domine à basse fréquence. Il est important d'identifier le bruit de scintillement, car ce bruit de basse fréquence est le chiffre limitant pour tous les types d'appareils HEMT. La densité spectrale du bruit varie en fonction de la variation de fréquence. Notre appareil a un faible bruit de sortie. Nos résultats soulignent clairement que le bruit de basse fréquence est affecté par la tension de polarisation VDS. L'augmentation de la tension de polarisation génère une augmentation nette de la densité spectrale du bruit. Nous pouvons alors conclure qu'avec l'augmentation du biais de vidange, la densité de puissance sonore de la pièce haute fréquence augmente. Cela signifie qu'il y a plus de piégeage et de piégeage constants dans le temps qui ont lieu à un biais VDS élevé ou à un champ électrique élevé entre le drain et la porte. Nous pouvons ajouter que dans ces structures dans le gaz d'électrons bidimensionnel, on suppose que le bruit de scintillement domine à basse fréquence. En effet, la densité spectrale du bruit de tension diminue lorsque le VDS diminue, ce qui implique qu'une faible tension de polarisation entraîne un niveau de bruit plus faible. L'effet de la tension de polarisation sur l'intensité du bruit est évident. La linéarité montrée dans nos résultats reflète le fait que le bruit provient principalement du canal. Il convient de noter qu'aux hautes fréquences, la principale source de bruit ajoutée par le transistor est liée à la dissipation de puissance dans les résistances de l'appareil. Les paramètres de bruit extraits permettant d'effectuer une analyse du bruit sont la figure de bruit, la conductance de bruit et l'impédance de bruit Z_o . Le chiffre de bruit est le paramètre le plus utilisé permettant de qualifier les performances sonores des circuits. Il est utilisé comme mesure des performances sonores d'un réseau bruyant à 2 ports. Il est défini

Résultats et interprétation de simulation HEMT-LNA

comme le rapport Signal/Bruit sur le port d'entrée divisé par le rapport Signal/Bruit sur le port de sortie. NF est généralement affecté par l'impédance d'entrée source au port d'entrée du réseau et les sources de bruit dans le réseau à 2 ports lui-même.

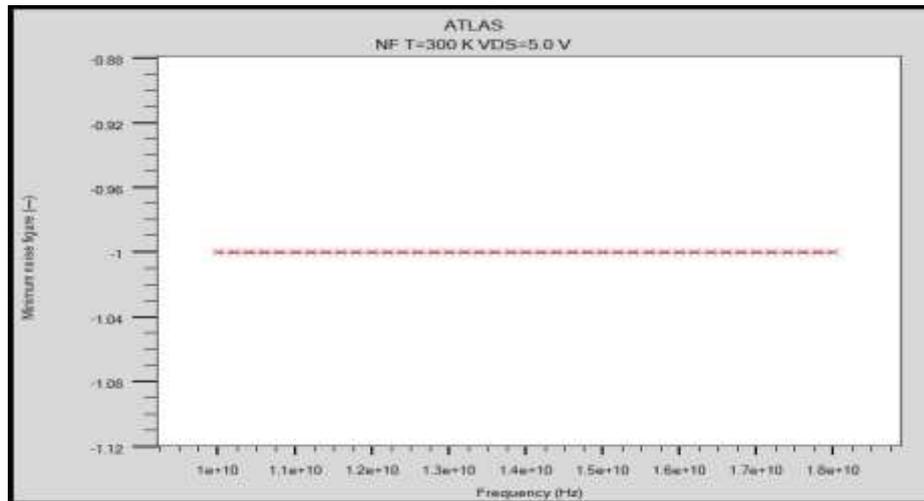


Figure III-10: Facteur de bruit minimum en fonction de la fréquence. La tension de polarisation du drain est égale à 5V.

Les Figures III-9 et III-10 montrent respectivement le bruit de conductance simulé et le chiffre de bruit minimum simulé pour le dispositif extrinsèque que nous avons obtenu en utilisant la simulation Atlas Silvaco et L'interpréteur C qui permettent de définir des modèles de bruit. Comme le montrent nos résultats, le chiffre de bruit augmente avec l'augmentation de la fréquence. Notre modèle simulé a un chiffre de bruit de -1 dB à bande fréquence Ku. Les chiffres de bruit des HEMT peuvent être encore améliorés en réduisant les contributions de bruit supplémentaires des parasites, en particulier à haute fréquence. Il est également important de noter que le bruit a une relation avec fT et f_{max} telle que les améliorations dans l'une de ces quantités signifient une amélioration dans les autres. Pour finir, il y a la question du biais LNA-HEMT. Au fur et à mesure que le biais CC du transistor changeait, les paramètres de bruit changeaient en conséquence. Afin d'observer la variation NF_{min} avec la variation V_{DS} , NF_{min} est simulé par rapport à la fréquence à un biais V_{GS} fixe.

Les transistors en LNA sont biaisés à des courants et des tensions faibles pour des performances NF maximales et pour réduire la consommation d'énergie. Il est donc important de savoir comment les paramètres de bruit changent avec les biais de LNA-HEMT. Il est à noter qu'il n'y a pas d'augmentation significative de NF_{min} dans la partie haute fréquence où NF_{min} est essentiellement constant avec l'augmentation de V_{DS} et cela est principalement dû au fait que l'augmentation de V_{DS} n'est pas si significative. Pour un V_{DS} plus élevé, NF_{min} augmente et

Résultats et interprétation de simulation HEMT-LNA

cela est dû à certains facteurs qui sont la réduction g_m , l'augmentation du courant de vidange et l'augmentation de la puissance dissipée.

III.4.4 Caractéristique HEMT-LNA en bande Ku

La figure III-11 représente la transconductance en fonction de la fréquence en température de 300 K. Nous observons que la valeur de transconductance diminuée dans une bande de fréquence entre [10 – 18] GHz de la bande Ku entre 278 et 264.

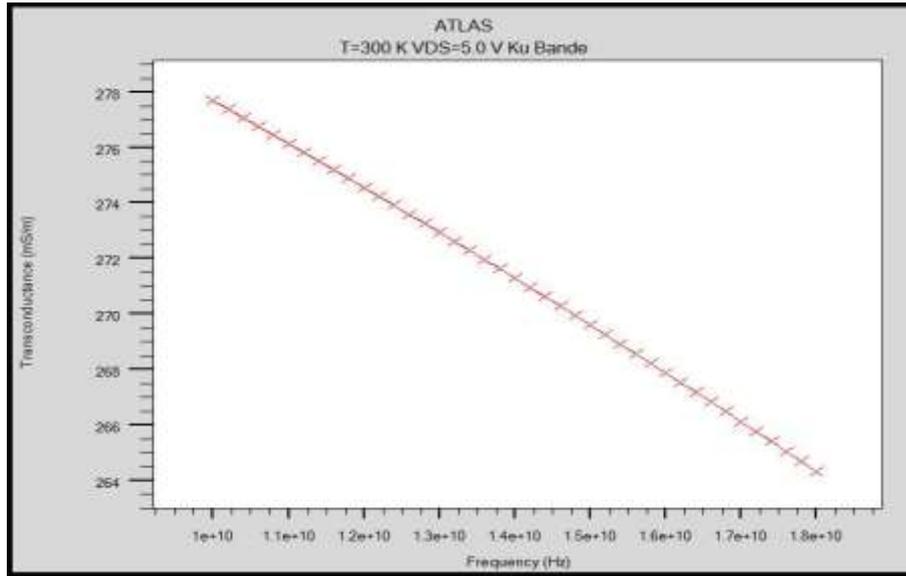


Figure III-11 : la transconductance en fonction de la fréquence.

Nous observons que la valeur des gains de courant H21 diminuée dans une bande de fréquence entre [10 – 18] GHz :

- La valeur de gain de courant H21 est dans les valeurs 12 et 7.
- La valeur de gain de puissance U_T est dans les valeurs 22 et 16.
- La valeur de GMS est dans les valeurs 16 et 15.
- La valeur de GMA est dans les valeurs 16 et 15.

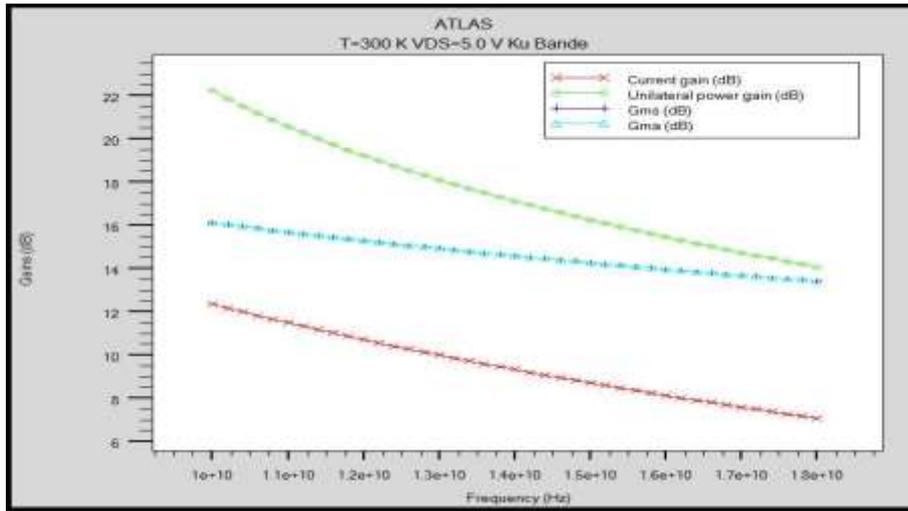


Figure III-12 : les gains en fonction de la fréquence.

III.5 CONCLUSION

En résumé, ce travail a évalué les performances de longueurs de grille HEMT InAlN/GaN de 30 nm sur des substrats 4H-SiC, en utilisant le logiciel SILVACO-TCAD pour effectuer des analyses DC et AC.

Dans ce travail, la contribution du bruit est également étudiée. Le LNA-HEMT étudié a montré de bonnes caractéristiques. Une caractéristique de bruit minimale prometteuse a été obtenue. En réduisant la contribution au bruit causée par les interférences, nous pouvons encore réduire le nombre de bruit minimum de notre équipement. Au terme de cette étude, nous pouvons dire que nos résultats de simulation ont confirmé la faisabilité d'utiliser des HEMT InAlN/GaN dans des amplificateurs de forte puissance. Nos résultats prouvent également la faisabilité de l'InAlN / GaN HEMT pour des amplificateurs robustes et à faible bruit. On peut ajouter que les dispositifs HEMT InAlN/GaN présentent des caractéristiques de bruit micro-ondes prometteuses comparables aux HEMT AlGaIn/GaN.

Conclusion

Générale

Conclusion générale

Nous essayons de contribuer et d'utiliser nos maigres connaissances pour la recherche Transistor à haute mobilité électronique (HEMT) basé sur GaN.

Les résultats de simulation que nous avons obtenus pour notre structure de dispositif HEMT LNA ont démontré une excellente densité de courant aussi élevée avec une valeur de 290 mA/mm, tension de pincement -1,5 V ; transconductance 275 mSmm, une fréquence de coupure de 40 GHz, une fréquence maximum de 71 GHz, un courant de gains maximum de 12 et un gain de puissance maximum de 22 pour la bande Ku.

Ces résultats ont été obtenus en utilisant des modèles de transport hydrodynamiques. Dans toutes nos simulations, le modèle de simulation physique adopté était le modèle de transport hydrodynamique qui rend compte des particularités du matériau GaN. Tous les modèles utilisés dans notre étude ont été implémentés dans nos simulations et soigneusement calibrés. Une grande précision pour toutes les caractéristiques pertinentes a été obtenue.

Bonnes performances, il y a de nombreux avantages dans les applications à grande échelle Alimentation haute fréquence.

RÉFÉRENCES

Chapitre 1

- [1] R. J. Kaplar, A. A. Allerman, A. M. Armstrong, M. H. Crawford, J. R. Dickerson, A. J. Fischer, A. G. Baca, and E. A. Douglas, *ECS J. Solid State Sci. Technol.* 6, Q3061 (2017).
- [2] K. Nagata, K. Takeda, Y. Oshimura, K. Takehara, H. Aoshima, S. Ito, M. Iwaya, T. Takeuchi, S. Kamiyama, I. Akasaki, H. Amano, H. Yoshida, M. Kuwabara, Y. Yamashita, and H. Kan, *Phys. Status Solidi C* 8, 2384 (2011).
- [3] H. Yoshida, Y. Yamashita, M. Kuwabara, and H. Kan, *Appl. Phys. Lett.* 93, 241106 (2008).
- [4] C. Pernot, S. Fukahori, T. Inazu, T. Fujita, M. Kim, Y. Nagasawa, A. Hirano, M. Ippommatsu, M. Iwaya, S. Kamiyama, I. Akasaki, and H. Amano, *Phys. Status Solidi A* 208, 1594 (2011).
- [5] V. Adivarahan, W. H. Sun, A. Chitnis, M. Shatalov, S. Wu, H. P. Maruska, and M. A. Khan, *Appl. Phys. Lett.* 85, 2175 (2004).
- [6] H. Hirayama, S. Fujikawa, N. Noguchi, J. Norimatsu, T. Takano, K. Tsubaki, and N. Kamata, *Phys. Status Solidi A* 206, 1176 (2009).
- [7] Z. G. Shao, D. J. Chen, H. Lu, R. Zhang, D. P. Cao, W. J. Luo, Y. D. Zheng, L. Li, and Z. H. Li, *IEEE Electron Device Lett.* 35, 372, (2014).
- [8] L. H. Yang, K. R. Lai, B. H. Zhang, X. L. Fu, J. J. Wang, and W. Wei, *Phys. Status Solidi A* 212, 698 (2015).
- [9] W. Chikhaoui, "Etude des mécanismes physiques responsables des dysfonctionnements des transistors HEMTs à base d'hétérostructures AlGa_N/Ga_N et AlIn_N/Ga_N," Ph. D. dissertation, Université de Lyon, France, 2011.
- [10] B. Benbakhti, « Analyses physique et thermique de transistors a effet de champ de la filière Ga_N optimisation de structures pour l'amplification de puissance hyperfréquence. »Thèse de doctorat soutenue le 14 Décembre 2006, Université de Lille.
- [11] S. Anceau, «Etude des propriétés physiques des puits quantiques d'alliages quaternaires (Al, Ga, In) N pour la conception d'émetteurs ultraviolets. » Thèse de doctorat soutenue le le 20 septembre 2004, Université de Lille.
- [12] Yuancheng Chang, Yimen Zhang, Yuming Zhang , K.Y Tong, « A thermal model for static current characteristics of AlGa_N/Ga_N high electron mobility transistors including self-heating effect. », *Journal of Applied Physics*, vol.99, pp.044501-1-5, 2006.

Références

- [13] N. Vellas, « Etudes expérimentales de transistors HFET de la filière nitrure de gallium pour des applications de puissance hyperfréquences » Thèse de doctorat soutenue le 18 Décembre 2003, Université de Lille.
- [14] Anon., 2011. Optical constants of GaN. Available at: <http://refractiveindex.info/?group=CRYSTALS&material=GaN>. [Accès le 23 12 2011].
- [15] CASTAGNE, R. M. C., 1989. GaAs integrated circuits. Paris: s.n.
- [16] Ioffe, P., 2011. Basic parameters. [Online] Available at: <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/InN/index.html> Ioffe, P., 2011. InN - Indium Nitride. s.l.: Technical Institute.
- [17] K.S. P. Blaha, G. K.H.Madsen, D. Kvasnicka, J. Luittz. , "WIEN 2K, An augmented plane wave+local orbitals program for calculating crystal properties ", Karlheinz Schwarz, Techn. Universitat, Wien,Austria, 2001.
- [18] J.P. Perdew, Y. Wang, "Accurate and simple analytic representation of the electron-gas correlation-energy", *Physical Review B*, 45 (1992) 13244-13249.
- [19] J.P. Perdew, K. Burke, M. Ernzerhof, "Generalized gradient approximation made simple", *Physical Review Letters*, 77 (1996) 3865-3868.
- [20] S.H.V. E. Engel, "Exact exchange-only potentials and the virial relation as microscopic criteria for generalized gradient approximations", *Physical Review B*, 47 (1993) 13164-13174.
- [21] F.Tran, P. Blaha, "Accurate Band Gaps of Semiconductors and Insulators with a Semilocal Exchange-Correlation Potential", *Phys. Rev. Lett*, 102 (2009) 226401.
- [22] F.D. Murnaghan, "On the Theory of the Tension of an Elastic Cylinder", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 30 (1944) 382-384.
- [23] N.E. Christensen, I. Gorczyca, "Optical and structural properties of III-V nitrides under pressure", *Phys. Rev. B*, 50 (1994) 4397--4415.
- [24] C.Y. Yeh, Z.W. Lu, S. Froyen, A. Zunger, "Zinc-blende-wurtzite polytypism in semiconductors", *Physical Review B*, 46 (1992) 10086-10097.
- [25] J.S.N. A. F. Wright, "Consistent structural properties for AlN, GaN, and InN", *Phys Rev B*, 51 (1995) 7866--7869.
- [26] A. Munoz, K. Kunc, "Structure and static properties of indium nitride at low and moderate pressures", *Journal of Physics Condensed Matter*, 5 (1993) 6015.
- [27] J.P. V. Cimalla, G. Ecke, R. Kosiba, O. Ambacher, L. Spieß, G. Teichert, H. L., W. J. Schaff "Growth of cubic InN on r-plane sapphire", *Appl. Phys. Lett.*, 83 (2003) 3468-3470.
- [28] I. Vurgaftman, J.R. Meyer, "Band parameters for nitrogen-containing semiconductors", *Journal of Applied Physics*, 94 (2003) 3675-3696.

Références

- [29] J.R.M. I Vurgaftman, L R Ram-Mohan, "Band parameters for III–V compound semiconductors and their alloys", *Journal of Applied Physics* 89 (2001) 5815.
- [30] J.R. S Strite, D J Smith J. Sariel, N. Manning, H. Chen, W. J. Choyke, H. Morko,c, "An investigation of the properties of cubic GaN grown on GaAs by plasma-assisted molecular beam epitaxy Properties of cubic GaN grown on GaAs", *Bull. Am. Phys. Soc*, 37 (1992) 346 .
- [31] V.Y. Davydov, A.A. Klochikhin, R.P. Seisyan, V.V. Emtsev, S.V. Ivanov, F. Bechstedt, J. Furthmüller, H. Harima, A.V. Mudryi, J. Aderhold, O. Semchinova, J. Graul, "Absorption and emission of hexagonal InN. Evidence of narrow fundamental band gap", *Phys Status Solidi B*, 229 (2002) R1-R3.
- [32] P.a.K. Hohenberg, W., "Inhomogeneous Electron Gas", *Phys. Rev.*, 186 (1964) B864-B871.

Chapitre 2

- [1] Bougrov, V. L. M. R. S. Z. A., 2001. In *Properties of Advanced Semiconductor Materials GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe*. John Wiley & Sons, pp. 1-30.
- [2] F. Frédéric «Spectroscopie infrarouge des fils et boîtes quantiques d'AnAs/InAlAs/Inp (001)» Thèse de doctorat, Université de Paris-Sud, Octobre 2002.
- [3] H. Mathieu, "physique des semi-conducteurs et des composants électroniques". Édition Masson, France 1998.
- [4] Rashmi, A.Kranti, S.Haldar, R.s.Gupta, "An accurate charge control model for spataneous and piezoelectric polarization dependent two-dimensional electron gas sheet charge density of lattice-mismatched AlGaIn/GaN". *HEMTs solid state electronics* 46 (2002).
- [5] I. P. Smorchkova, L. Chen, T. Mates, L. Shen, S. Heikman, B. Moran, S. Keller, S. P. DenBaars, J. S. Speck, U. M. Mishra, "AlN/GaN and (Al,Ga)N/AlN/GaN twodimensional electron gas structures grown by plasma-assisted molecular beam epitaxy," *Journal of Applied Physics*, vol. 90, no. 10, pp. 5196-5201, 15 November 2001.
- [6] autre exemple manip ampli en tete
- [7] Corinne Boutez "Noise characterization of HEMTs" Microwave department of technology, University of Chalmers, Goteborg, Sweden, 1996
- [8] G. Dambrine, H. Happy, F. Danneville and A. Cappy "A New Method for On Wafer Noise Measurement" *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 41, no. 3, pp. 375-381, March 1993
- [9] F. Diette, D. Langrez, J. L. Codron, E. Delos, D. Theron and G. Salmer "1510 mS 1 mm 0.1 Jlm gate length pseudomorphic HEMTs with intrinsic current gain cutoff frequency of 220 GHz" *Electronics Letters*, 25th April 1996, vol. 32, no. 9, pp. 848-850

Références

- [10] Niklas Rorsman "Heterostructure Field Effect Transistors and Millimeter Wave Integrated Circuits" Technical Report No. 267, Chalmers University of Technology, 1995
- [11] N. Rorsman; M. Garcia, C. Karlsson, and H. Zirath "Reduction of the Feedback Capacitance of HFETs by Changing Transistor Layout and Using Via Holes for Source Grounding" Proc. 24th European Microwave Conference, pp. 764-769, 1994.
- [12] R. Vetry, N. Q. Zhang, S. Keller, and U. K. Mishra, "The impact of surface states on the DC and RF characteristics of AlGaIn/GaN HFETs," IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 48, pp. 560-566, March 2001.
- [13] C. Meliani, "Circuit intégrés amplificateurs à base de transistors HEMT pour les transmissions numériques à très haut débit", thèse doctorat, université Paris VII denis diderot, 2003.

Chapitre 3

- [1]. ATLAS User's Manual DEVICE SIMULATION SOFTWARE. Santa Clara: Silvaco
- [2]<http://www.silvaco.com/examples/tcad/section31/example3/index.html>, —25-nm n-MOSFET with quantum correction
- [3] Massachusetts Institute of Technology (MIT) and IQE —RF LLC have used an aluminum gallium nitride (AlGaIn) back-barrier to improve the frequency performance of indium aluminum nitride (InAlN) high-electron-mobility transistors (HEMTs) [Dong Setup Lee et al, IEEE Electron Device Letters, Mar (2011), USA.
- [4] N. Ramanan, B. Lee and V. Misra, "Device Modeling for Understanding AlGaIn/GaN HEMT Gate-Lag", IEEE Transactions On Electron Devices, Vol. 61, No.
- [5] http://www.silvaco.com/products/vwf/atlas/noise/noise_06.pdf.
- [6] A. L. McWhorter, R. H. Kinston, Ed. Philadelphia: Univ. of Pennsylvania Press, 207 (1956).
- [7] F. N. Hooge, T. G. M. Kleinpenning, L. K. J. Vandamme, Rep. Prog. Phys, 44(5), 479 (1981). 6, pp 2012-2018, (2014).
- [8] D.-H. Kim et al, —30-nm InAsPseudomorphic HEMTs on an InP Substrate With a Current-Gain Cutoff Frequency of 628 GHz, IEEE Electron Device Letters, vol. 29, no 08, p. 830-833, (2008).

Résumé

L'évolution de la nouvelle technologie pour les applications civile et militaire est aujourd'hui d'un intérêt stratégique et commercial majeur. Ces applications permettent de disposer des transistors rapides ayant des caractéristiques intéressantes. Le type de transistor (HEMT) est le plus étudié actuellement pour leurs performances en grande puissance, haute température et en hyperfréquence.

Le travail porte sur l'étude et la simulation des comportements statiques et hyperfréquences des transistors HEMT à base InAlN/GaN matériel. Il permet l'analyse détaillée des performances statiques et dynamiques de ces transistors en termes des extraites tous les caractéristiques pour les différents paramètres qui peuvent varier afin de les optimiser dans la bande Ku-Vsat, et obtenir une amélioration significative des performances

Mots clés : HEMT, III-V, LNA, fréquence élevée.

Abstract :

The evolution of new technology for civil and military applications is of major strategic and commercial interest today. These applications make it possible to have fast transistors having interesting characteristics. The type of transistor (HEMT) is currently the most studied for their high power, high temperature and microwave performance.

The work focuses on the study and simulation of static and microwave behavior of HEMT transistors based on InAlN / GaN material. It allows the detailed analysis of the static and dynamic performance of these transistors in terms of extracting all the characteristics for the different parameters which can vary in order to optimize them in the Ku-Vsat band, and obtain a significant improvement in performance.

Keywords: HEMT, III-V, LNA, high frequency.

تلخيص :

يعد تطور التكنولوجيا الجديدة للتطبيقات المدنية والعسكرية ذا أهمية استراتيجية وتجارية كبيرة اليوم. هذه التطبيقات تجعل من الممكن الحصول على ترانزستورات سريعة لها خصائص مثيرة للاهتمام. يعتبر نوع الترانزستور (HEMT) هو الأكثر دراسة حالياً لقدرته العالية ودرجة حرارته العالية وأدائه الميكروويف.

يركز العمل على دراسة ومحاكاة السلوك الساكن والميكروويف لترانزستورات HEMT بناءً على مادة InAlN / GaN. يسمح بالتحليل التفصيلي للأداء الثابت والديناميكي لهذه الترانزستورات من حيث استخراج جميع الخصائص للمعلمات المختلفة التي يمكن أن تختلف من أجل تحسينها في نطاق Ku-Vsat ، والحصول على تحسن كبير في الأداء. **كلمات البحث :** HEMT ، III-V ، استطاعة مرتفعة، ذات التردد العالي.