

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Djilali Bounaama Khemis Miliana



Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Technologie

Mémoire du Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme de

Master

En

« Télécommunications »

Option :

« Systèmes des Télécommunications »

Thème

Étude et performance d'un dispositif HEMT pour les applications à haut débit

Réalisé par :

Kaddouri Hadjer

Encadré par :

Dr. Mourad Kaddeche

Année universitaire : 2023/2024

Dédicace

Je dédie humblement ce travail à mes parents aimants, en particulier à ma mère, qui a toujours sacrifié tout ce qu'elle avait pour que je devienne ce que je suis aujourd'hui. Elle m'a encouragé et s'est assurée de mon succès depuis l'enfance jusqu'à aujourd'hui, et tout ce qu'elle me disait, je veux le compléter avec toi.

Spécialement dédiée aux enseignants qui m'ont guidée et n'ont pas lésiné sur l'aide et m'ont appris à ne pas perdre espoir sur le chemin de la réussite. Je les considère comme une source de fierté et d'inspiration.

Avant tout, à Dieu tout-puissant, donne-moi toujours la force, la connaissance et la sagesse dans tout ce que je fais.

REMERCIEMENTS

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

"Au nom d'Allah, le bienfaisant, le miséricordieux "

J'exprime ma profonde gratitude à ALLAH Tout-Puissant pour m'avoir donné les connaissances, la santé, le temps et l'opportunité d'atteindre ce point, qui est le début de la réussite, et de voir ce rêve se réaliser, et pour m'avoir donné la force de supporter les circonstances et de continuer à lutter et à travailler dur pour atteindre mes objectifs, et que les prières et la paix soient sur notre Saint Prophète Muhammad ainsi que sur sa famille et ses compagnons.

Je tiens à remercier le président de jury d'avoir accepté examiné ce mémoire.

Mes remerciements aux membres de jury, d'avoir accepté de prendre part à ce jury ainsi que pour l'intérêt qu'ils l'ont portés à ce travail.

Je voudrais remercier mon encadreur, le Dr Mourad KEDDECHE, pour ses conseils et suggestions avisés qui nous aidés à mener à bien ce travail.

Je tiens à exprimer ma plus vive gratitude à mon enseignant, Mahdeb Salim, qui m'a apporté son soutien et ses conseils.

Ma sincère gratitude va également à mon père et à ma mère bien-aimée qui ont été si tolérants et m'ont soutenu pendant toutes ces années, que ce soit moralement ou financièrement.

Je voudrais également remercier ma tante bien-aimée Kaddouri Meriem et ses fils, la famille Ayouni et tous mes amis (Ikram, Mounia, Wafaa et Radia) qui m'ont aidée techniquement et mentalement tout au long de mon parcours pour mener à bien mon projet. Je remercie sincèrement du fond du cœur tous ceux qui ont participé à mon projet.

Résumé

Les transistors à haute mobilité électronique au nitrure de gallium (GaN HEMTs) ont suscité l'intérêt de nombreux chercheurs ces dernières années. En raison de sa hyperfréquence de fonctionnement, de sa tension de claquage élevée, de sa capacité à haute température, de sa résistance réduite à l'état passant, de sa vitesse de saturation électronique importante, une densité de puissance plus élevée et une efficacité suffisante, les dispositifs HEMT rivalisent avec les transistors à effet de champ (FET) classiques et les remplacent. Le présent travail consiste à l'étude du dispositif HEMTs à base de d'hétérostructures AlGaN/GaN par la simulation des caractéristiques électriques à l'aide du logiciel ATLAS-SILVACO, afin d'améliorer ces performances pour des applications en haute fréquence.

Mots clés : GaN HEMTs, tension de claquage, vitesse de saturation, transistors à effet de champ (FET), hétérostructures, AlGaN/GaN, Silvaco.

Abstract

Gallium nitride high electron mobility transistors (GaN HEMTs) have attracted the interest of many researchers in recent years. Due to their high operating frequency, high breakdown voltage, high temperature capability, reduced on-state resistance, high electron saturation rate, higher power density and sufficient efficiency, HEMT devices rival and replace conventional field effect transistors (FETs). The present work involves the study of HEMTs based on AlGaN/GaN heterostructures by simulating their electrical characteristics using ATLAS-SILVACO software, in order to improve their performance for high-frequency applications.

Keywords: GaN HEMTs, breakdown voltage, saturation velocity, field effect transistors (FETs), heterostructures, AlGaN/GaN, Silvaco.

Table des matières

Table des matières

Dédicace

REMERCIEMENTS

Résumé

Introduction générale :.....	2
I.1. Introduction :.....	5
I.2 Nitrure de gallium :.....	5
I.3 Propriétés du nitrure de galium (GaN) :	5
I.3.1. Propriété cristallographique :	5
I.3.1.1. Structure de wurtzite :.....	6
I.3.1.2. Structure de type zinc-blende :	7
I.3.2. Comparaison des semi-conducteurs GaN zinc-blende et wurtzite avec polarisation spontanée et effets de champ piézoélectrique :.....	7
I.3.3. Propriété thermodynamique :	8
I.3.4. Propriétés élastiques :.....	8
I.3.5. Propriétés électroniques :	8
I.3.6. La zone de Brillouin :.....	9
I.3.7. Propriétés électriques :	10
I.3.7.1. La polarisation :.....	10
I.3.8 Propriétés mécaniques :.....	13
I.3.8.1. Contrainte biaxiale :.....	13
I.3.9. Propriétés optoélectronique :.....	13
I.3.9.1. Indice de réfraction :.....	14
I.3.9.2. Gap d'énergie interdite dans le GaN :	14
I.3.9.3. Le champ de claquage et la mobilité électronique :	15
I.3.9.4. Le coefficient d'absorption :.....	16
I.3.10. Propriétés thermiques :.....	16

I.3.10.1. Evolution du gap d'énergie interdite en fonction de la température :	17
I.3.10.2. La conductivité thermique du GaN :	18
I.3.10.3. La température de Debye et la chaleur spécifique de GaN :	18
I.3.10.4. La dilatation thermique :	19
I.4. Les composées ternaires :	20
I.4.1. Propriétés physiques de l'hétérostructure de type $Al_mGa_{1-m}N$ /GaN :	21
I.5. Les substrats adéquats pour le GaN hexagonal :	24
I.5.1. Le saphir (Al_2O_3) :	24
I.5.2 Le carbure de silicium (SiC) :	25
I.5.3 Le silicium (Si) :	26
I.5.4. Le diamant :	26
I.6. Applications :	26
I.6.1. Optoélectronique :	27
I.6.2. Électronique Radiofréquence :	27
I.6.3. Électronique de puissance :	28
I.6.4 Application militaires :	29
I.7. Conclusion :	29
II.1. Introduction :	31
II.2. Les transistors à effet de champ (FETs) à base de GaN :	31
II.2.1 Le transistor LDMOS :	32
II.2.2 Le transistor MESFET :	33
II.2.3. Le transistor HEMT :	33
II.2.3.1. Historique du transistor HEMT :	33
II.2.3.2. Origine de la structure HEMT :	34
II.2.3.4. Présentation du HEMT en GaN :	35
II.2.3.5. Définition de la structure du transistor HEMT GaN :	35
II.2.3.6. Description des couches :	36

II.2.3.7. Hétérojonction $\text{Al}_m\text{Ga}_{1-m}\text{N} / \text{GaN}$:.....	38
II.2.3.8. Types de porte HEMT :.....	39
II.2.3.8.1. Normally on :	39
II.2.3.9. Principe de fonctionnement d'un HEMT :.....	Erreur ! Signet non défini.
II.2.3.10. Formation de 2DEG :.....	Erreur ! Signet non défini.
II.2.3.11. Les caractéristiques électriques :.....	Erreur ! Signet non défini.
II.2.3.12. La polarisation des HEMT AlGaIn/GaN :.....	Erreur ! Signet non défini.
II.2.3.13. Recherche actuelle :.....	Erreur ! Signet non défini.
II.2.3.15. Les applications du HEMT :	Erreur ! Signet non défini.
II.2.3.16. Les inconvénients des HEMTs :.....	50
II.3. Conclusion :.....	Erreur ! Signet non défini.
Partie 1 : Modélisation physiques et outils de simulation.....	52
III.1. Introduction :.....	52
III.2. Description du logiciel SILVACO :.....	52
III.2.1. Le logiciel ATHENA :.....	52
III.2.2. Le logiciel ATLAS :.....	53
III.2.3. Spécification de la structure :	56
III.2.3.1. Le Maillage :.....	56
III.2.3.2. Spécification des régions et les électrodes :.....	57
III.2.3.3. Attribution de matériaux pour les régions :	57
III.2.3.4. Dopage :.....	58
III.2.3.5. Modèles physiques :.....	58
III.2.3.6. Beam :.....	58
III.2.3.7. Contact :.....	59
III.2.4. Méthode de la solution :	59
III.2.5. Spécification de la solution :.....	59
III.2.5.1. Log :.....	59

Table des matières

III.2.5.2. Solve :	59
III.2.5.3. Load et save :	60
III.2.7. Organisation de simulation :	60
Partie2 : Résultat et interprétation	62
III.3. Introduction :	62
III.4. Interprétation des Résultats :	62
III.5. Les caractéristiques électriques du HEMT :	63
III.5.1. Variation du taux d'aluminium :	63
III.5.2. Variation de l'épaisseur de la couche donneuse :	64
III.5.3. Variation de dopage de la couche donneuse AlGaN :	65
III.5.4. L'influence de la température :	65
III.6. Conclusion :	67
Conclusion générale :	69
Bibliographie	72

Liste des acronymes et abréviations

AlGa_N	Alliage composé de GaN et Aluminium
AlGaInN	Nitride de gallium-indiumAluminium
AlGaAs	Arsénure gallium
AlN	Nitride d'Aluminium
Al₂O₃	Saphire
CMOS	Semi-conducteur complémentaire à l'oxyde de métal
2DEG	Gaz électronique bidimensionnel
FET	Transistor à effet de champ
GaN	Nitride de gallium
g_m	Transconductance
HEMT	Transistor à haute mobilité électronique
I_{ds}	Courant de drain
InN	Nitride indium
LD MOS	Semi-conducteur à oxyde métallique diffusé latéralement
MESFET	Transistor à effet de champ à semi-conducteur métallique
MOS	Semi-conducteur à oxyde métallique
MOSFET	Transistor à effet de champ à grille à oxyde métallique
N_A	Densité des accepteurs
N_C	Densité d'états effective dans la bande de conduction
N_D	Densité des donneurs
P_{pz}	Polarisation piézoélectrique
P_{sp}	Polarisation spontanée
Si	Silicium
SiC	Carbure de silicium
SILVACO	Silicon Valley Corporation (Société de la vallée du silicium)
SRH	Shockley-Read-Hall
V_{ds}	Tension de drain
V_{gs}	Tension de la grille

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : structure cristalline hexagonale du GaN.....	6
Figure I.2: structure wurtzite à face Ga et à face N	6
Figure I.3: Structure de zinc-blende du GaN.....	6
Figure I.4: Les deux zones de Brillouin des deux structures : a) - wurtzite et b) - zinc-blende...	10
Figure I.5: Moments dipolaires P_x d'une maille élémentaire de GaN wurtzite de polarisation face azote (a) et face gallium (b)	11
Figure I.6 : sens des polarisations pour les faces Ga et N des HEMTs AlGaN/GaN Relaxé et sous contrainte	11
Figure I.7 : Polarisation spontanée dans le GaN.....	12
Figure I.8 : Indice de réfraction (ordinaire) pour le GaN et l'AlGaN en fonction de la longueur d'onde.....	14
Figure I.9 : La bande interdite pour le groupe III nitrides en fonction du paramètre de maille.....	15
Figure I.10 : Le spectre d'absorption de GaN à la température ambiante.....	16
Figure I.11 : Evolution du gap d'énergie de GaN en fonction de la température. Les courbes A, B et C font référence aux excitons du même nom.....	18
Figure I.12 : La chaleur spécifique calculée (trait plein) et mesurées (cercles ouverts) par rapport à la température.....	19
Figure I.13 : hétérojonction de type $Al_mGa_{1-m}N/GaN$	22
Figure I.14: Niveaux d'énergie dans l'AlGaN et le GaN.....	22
Figure I.15 : Niveaux d'énergie des matériaux à l'hétérojonction pour une tension appliquée non nulle.....	22

Chapitre II

Figure II.1 : Vue en coupe d'un transistor à effet de champ, montrant les bornes de la source, de la grille et du drain.....	31
Figure II.2 : Schéma du transistor LDMOS avec la double couche RESURF dans la zone de dérive.....	32
Figure II.3 : Vue en coupe du MESFET GaAs implanté auto-aligné.....	33
Figure II.4 : structure physique de base d'un HEMT AlGaN/GaN.....	36
Figure II.5 : Diagrammes des bandes d'énergie des matériaux constituent l'HEMT GaN (pris séparément) à l'équilibre thermodynamique.....	38
Figure II.6 : Diagrammes des bandes après jonction des deux couches qui constituent l'HEMT AlGaN/GaN l'équilibre thermodynamique.....	39
Figure II.7 : Formation de 2DEG à l'interface AlGaN/GaN.....	42
Figure II.8 : Puissance de sortie d'un amplificateur de puissance MMIC à HEMT GaN avec variation de fréquence en modes impulsionnel et continu.....	44
Figure II.9 : Comparaison de l'efficacité des commutateurs HEMT GaN avec des commutateurs IGBT à corps Si et des commutateurs IGBT à corps SiC.....	45

Chapitre III

Figure III.1 : Schéma synoptique des modules utilisés dans la simulation par TCAD-SILVACO.....	53
Figure III.2: Ordre des groupes des commandes d'Atlas (Les commandes fondamentales afférentes).....	54
Figure III.3 : spécification de maillage.....	56
Figure III.4 : Spécification des régions et les électrodes.....	57
Figure III.5 : Attribution de matériaux pour les régions.....	58
Figure III.6 : Organigramme du programme de simulation.....	61
Figure III.7 : Coupe schématique de la structure HEMT AlGaN/GaN étudié.....	62

Figure III.8 : Le courant de drain I_d en fonction de la tension de drain v_d , pour différents taux d'aluminium.....	63
Figure III.9 : le courant de drain en fonction de la tension Drain-Source, pour différentes épaisseurs de la couche donneuse AlGaN.....	64
Figure III.10: le courant de drain en fonction de la tension Drain-Source, pour différentes valeurs de dopage AlGaN.....	65
Figure III.11 : L'influence de la température sur le courant de drain en fonction de la tension Drain-Source pour différentes valeurs de température.....	66

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1: Récapitulatif de quelques propriétés physiques importantes de différents semi-conducteurs Si, GaAs, GaN et InN à température ambiante.....	9
Tableau I.2 : Paramètres de Varshni et gap d'énergie du GaN et de l'AlN.....	17
Tableau I.3 : Propriétés matérielles du SiC et du GaN par rapport à celles du silicium et du diamant.....	24
Tableau I.4 : Avantages de performance des propriétés des matériaux.....	27

Introduction

générale

Introduction générale :

La nécessité d'obtenir des taux de commutation rapides, tels que ceux requis dans les communications à micro-ondes et la technologie RF, a poussé les transistors à évoluer avec une mobilité élevée des électrons et d'excellentes caractéristiques de transport. T. Mimura a inventé les dispositifs HEMT alors qu'il travaillait au laboratoire de Fujitsu Ltd à Kobe, au Japon, sur des dispositifs semi-conducteurs composés III-V à haute fréquence et à grande vitesse. Par la suite, le HEMT a été utilisé pour la première fois commercialement comme amplificateur cryogénique à faible bruit à l'Observatoire radio de Nobeyama (NRO) à Nagano, au Japon, en 1985.

Pour répondre aux exigences des applications à haute fréquence, à faible bruit et à haute densité de puissance, les MOSFET et MESFET conventionnels sont conçus avec des canaux très courts afin de minimiser la diffusion des impuretés pour la plupart des porteuses et de réduire la dégradation des performances. De telles applications imposent également des contraintes de conception et de performances nécessitant des courants de saturation élevés et des transconductances importantes, qui peuvent être obtenues avec un dopage important. Pour surmonter ces limitations, les dispositifs HEMT intègrent une hétérojonction entre deux matériaux avec des bandes interdites différentes, où les électrons sont confinés dans des puits quantiques pour empêcher la diffusion des impuretés.

Les transistors HEMTs à base d'AlGaIn/GaN ont montré ces dernières années des résultats extrêmement prometteurs pour des applications hyperfréquences nécessitant des tensions et des puissances élevées. Ces applications comprennent aussi les communications à large bande et les communications radar, les constituants spatiaux et les capteurs, les détections d'ADN, de protéines et de pH.

Afin d'exploiter les qualités de ces transistors (fréquences de fonctionnement élevées, niveau de puissance de sortie important) et avant toute réalisation, il est nécessaire de prédire les caractéristiques des dispositifs par la simulation avec des logiciels commerciaux qualifiés. Ainsi l'objectif de notre travail est de présenter une étude sur le transistor à effet de champ HEMT à base Nitrure de Galium (GaN) utilisant le logiciel ATLAS-SILVACO.

Ce travail comporte trois chapitre :

Dans le premier chapitre, nous décrivons les propriétés physiques, électriques, mécaniques et thermiques de nitrure de galium GaN citons quelques applications du GaN en optoélectronique comme les LEDs, les LDs ou encore les détecteurs UV ainsi en électronique de puissance, électronique radiofréquence et les applications militaires.

Dans le deuxième chapitre, concerne une brève généralité sur les transistors à effet de champs FET tels que MESFET, LDMOS et la technologie HEMT. Ensuite, nous décrivons la structure du transistor HEMT et leur principe de fonctionnement et les caractéristiques électrique. Enfin, les recherches les plus récentes permettent de prévoir les tendances futures de la recherche et certaines applications des dispositifs HEMT ont été identifiées.

Dans le troisième chapitre et dans une première partie, nous présentons le principe de fonctionnement du logiciel de simulation numérique bidimensionnelle ATLAS-SILVACO, pour l'étude du composant GaN-HEMT.

La deuxième partie, est consacrée à l'étude de la structure HEMT AlGa_N/Ga_N et à la présentation des résultats obtenus a partir de la simulation numérique, en tenant compte les effets de la tension de grille et des paramètres technologiques et physiques sur les caractéristiques électriques du transistor HEMT à base d'hétérostructures AlGa_N/Ga_N, est accomplie. En fin de ce mémoire, nous donnerons une conclusion générale avec les perspectives.

Chapitre I

Propriétés physiques et
structurales du GaN

I.1. Introduction :

Les cristaux de Nitrure de Gallium GaN offrent des qualités uniques répondant aux exigences attendues. En raison de leurs propriétés cristallines, les transistors à effet de champ offrent la robustesse et les performances requises pour les applications à haute puissance et très haute température. Le nitrure de gallium GaN est un semi-conducteur III-V à large bande interdite (3,39 eV), une technologie qui diffère des matériaux traditionnels à bande interdite étroite tels que le silicium et l'arséniure de gallium. Outre ses propriétés physiques et thermiques, le GaN a la particularité d'être un matériau pyroélectrique et piézoélectrique. Cette particularité a permis la réalisation de transistors HEMT de type AlGaN/GaN.

L'objectif de ce chapitre est de présenter les propriétés physiques, électriques, mécaniques et thermiques du GaN et décrire les types de croissance ainsi que les problèmes liés aux choix du substrat. Nous expliquons les notions de polarisation spontanée et piézoélectrique.

I.2. Nitrure de gallium :

Le nitrure de gallium (GaN) est un semi-conducteur appartenant à la famille des semi-conducteurs III-V associant un élément de la troisième colonne du tableau de Mendeleïev, tels que Gallium Ga et Indium In, à un élément de la cinquième colonne tel que l'azote N et l'arsenic As. Plus précisément, le GaN appartient à la sous-famille des nitrures de semi-conducteurs élémentaires III ou dits III-N. Cette sous-famille comprend Gallium (GaN), Indium (InN), Aluminium (AlN) et leurs alliages ternaires. Éléments quaternaires tels que AlGaN et AlGaInN. Affectations de semi-conducteurs binaires III-V « tels que le GaN et le GaAs, à un alliage ternaire de la même sous-famille, comme AlGaN et AlGaAs » permet la réalisation de transistors HEMT (High Electron Mobility transistor) à base d'hétérojonctions AlGaN/GaN et AlGaAs/GaAs. Le principe de Ces transistors sont basés sur la formation d'un gaz d'électrons bidimensionnel appelé 2DEG à la transition hétéro. L'idée est d'empêcher les électrons de circuler à l'intérieur du canal semi-conducteur dopés intentionnellement, ces transistors sont capables de fournir une densité de courant Les performances dépassent celles des MOSFETs Si [1].

I.3. Propriétés du nitrure de galium (GaN) :

I.3.1. Propriété cristallographique :

Les semi-conducteurs à base de nitrure III existent sous deux formes cristallines principales de GaN : la structure wurtzite (ou hexagonale) et la structure zinc-blende(cubique).

I.3.1.1. Structure de wurtzite :

Dans les conditions normales (la température et la pression) la structure est thermodynamiquement stable. Elle est composée de deux sous réseaux fermés hexagonaux : l'un avec les atomes de Gallium Ga (cation groupe III), l'autre avec les atomes d'Azote (anion groupe V). Ils sont interpénétrés et décalés suivant l'axe c de 5/8ème de la maille élémentaire (l'hexagonal simple avec une base de quatre atomes). Chaque atome de Ga est lié à quatre atomes de Nitrogène [2]. La structure est représentée dans la figure I.1 ci-dessous :

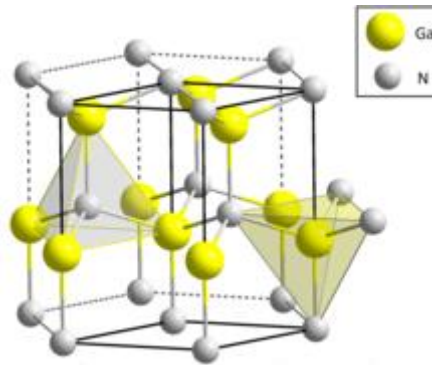


Figure I.1 : structure cristalline hexagonale du GaN [3]

Dans la direction $[0001]$ (également appelée axe c), il est non Centro symétrique. En conséquence, deux des orientations distinctes des cristaux de GaN peuvent être distinguées c.-à-d. face Ga et face N. Si le matériau est produit avec du Ga ou du N sur le dessus, comme le montre la figure I.2. La propriété non Centro symétrique induit un effet de polarisation (P_{sp}) en raison d'une grande différence dans l'électronégativité de l'atome Ga et de l'atome N. C'est un aspect majeur pour GaN HEMT et formation spontanée de 2DEG.

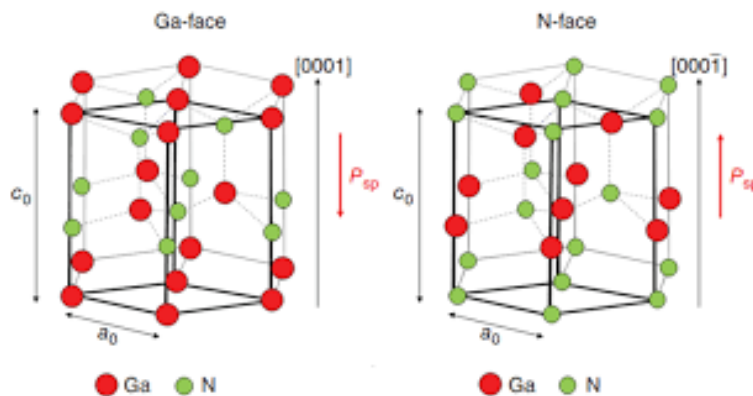


Figure I.2: structure wurtzite à face Ga et à face N [4]

I.3.1.2. Structure de type zinc-blende : est une structure thermodynamiquement métastable et se compose de deux sous-réseaux cubiques à faces centrées d'atomes de gallium et d'azote décalés d'un quart par rapport à la diagonale de la maille ; la contrepartie réciproque de cette structure est un octaèdre tronqué [2].

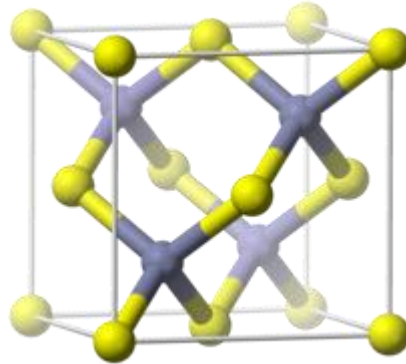


Figure I.3: Structure de zinc-blende du GaN [3]

I.3.2. Comparaison entre les deux structures :

Les propriétés électroniques des cristaux de zinc-blende orientés (001), (111) et de wurtzite orientés (0001) sont étudiées théoriquement, où la polarisation spontanée et les effets de champ piézoélectrique (PZ) sont pris en compte. Nous montrons que les hamiltoniens de Luttinger–Kohn $6 \times 6 \times 6$ pour les bandes de valence des cristaux de zinc-blende écrits dans les bases de wurtzite pour les orientations cristallines (001) et (111) et l'hamiltonien pour l'orientation (0001) de la wurtzite les cristaux peuvent tous être diagonalisés par bloc en deux hamiltoniens $3 \times 3 \times 3$, qui ont des solutions analytiques pour les valeurs propres et les vecteurs propres.

Nous dérivons ensuite des expressions analytiques pour les masses effectives de bord de bande dépendantes de la contrainte et les éléments de matrice optique inter bande des cristaux de zinc-blende et de wurtzite GaN et comparons leurs résultats numériques ainsi que les structures de bande de valence. Bien que les puits quantiques de mélange de zinc contraints en compression dans des matériaux tels que les systèmes à base de GaAs et de ZnSe présentent des densités de porteurs de seuil réduites en raison de la masse effective dans le plan plus faible, nous constatons que pour le GaN, la réduction de la masse effective avec la compression biaxiale la déformation n'est pas significative dans les structures de zinc-blende et de wurtzite. Une méthode alternative est l'application d'une déformation uniaxiale pour réduire les masses effectives dans le plan dans les deux structures.

On a également constaté que les structures de bande de valence et l'intégrale de chevauchement des fonctions d'onde d'électrons et de trous des structures à puits quantiques GaN / AlGaN sont affectées de manière significative par le champ PZ pour les structures de mélange de zinc (111) et par à la fois la polarisation spontanée et Champs PZ pour (0001) structures wurtzite [5].

I.3.3. Propriété thermodynamique :

Le nitrure de gallium, avec son énergie de liaison très élevée (9,12 eV/atome), est un semi-conducteur très robuste et chimiquement très stable. Cette propriété se manifeste par des valeurs de température et de pression de fusion très élevées (($T_f=2800$ K) et ($P_f = 4,5$ GPa)) et une très faible énergie libre de Gibbs (-210 Kcal/mol). A pression atmosphérique, le GaN est stable jusqu'à sa température de décomposition de 1200 K [6].

I.3.4. Propriétés élastiques :

Lors de la croissance de couches de GaN sur différents types de substrats (paramètres de maillage et dilatation thermique), des contraintes apparaissent. Elle est due aux différences entre les caractéristiques cristallographiques des deux matériaux en contact [2].

I.3.5. Propriétés électroniques :

Les semi-conducteurs III-N à base de GaN ont une large bande interdite (band gap) qui présentent un gap direct de 3.42eV et qui est indirect pour le Silicium Si (le terme direct indique que le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande de conduction sont alignés au centre de la première zone de Brillouin, dans la vallée de conduction Γ), ce qui permet aux dispositifs à base de GaN tels que les HEMT de résister à des champs électriques internes qui sont en moyenne cinq fois plus élevés que Si et GaAs. Sa tension de claquage élevée supérieure à 50 V (environ 30 V pour GaAs) est un attribut idéal pour les applications à haute puissance [7].

Par rapport à d'autres semi-conducteurs couramment utilisés, les propriétés électroniques des matériaux GaN sont présentées dans le Tableau ci-dessous :

Matériaux Semi-conducteurs	Semi-conducteurs classiques		Semi-conducteurs grand gap	
	Si	GaAs	GaN	InN
Bande interdite	1.12	1.42	3.39	2,17
Mobilité électrons	1450	8500	1350	3200
Mobilité des trous	4504	4001	130	250
Vitesse de saturation	1.10^7	$0,9 \cdot 10^7$	2.10^7	$1,4.10^7$
Champs électrique critique	3.10^5	4.10^5	5.10^6	5.10^5
Conductivité thermique	130	46	130	280
Permittivité relative	11,8	11,5	10	15,3

Tableau I.1: Propriétés physiques des différents semi-conducteurs à 300 K [8]

I.3.6. La zone de Brillouin :

Les propriétés électroniques et optiques sont déterminées par la structure de la bande électronique autour des maximums de la bande de valence et des minimums de la bande de conduction. Pour les cristaux périodiques, les paramètres internes ont la périodicité du réseau. Les réseaux directs sont définis par la première zone Brillouin. Les quantités physiques dans les cristaux sont périodiques dans l'espace immédiat, et les connaître dans l'unité fondamentale du réseau suffit à les identifier dans tout le cristal. Il en est de même dans l'espace réciproque, où elles suffisent pour la première zone de Brillouin. Rappelons que la zone de Brillouin d'un réseau cfc a la forme d'un octaèdre tronqué par six faces d'un cube, comme le montre la Figure I.4, elle a un centre de symétrie noté Γ à l'origine et un axe de symétrie : l'axe $\langle 100 \rangle$ Il a une symétrie d'ordre 4 (Δ), l'axe $\langle 111 \rangle$ a une symétrie d'ordre 6 (Λ) et l'axe $\langle 011 \rangle$ a une symétrie d'ordre 2 (Σ).

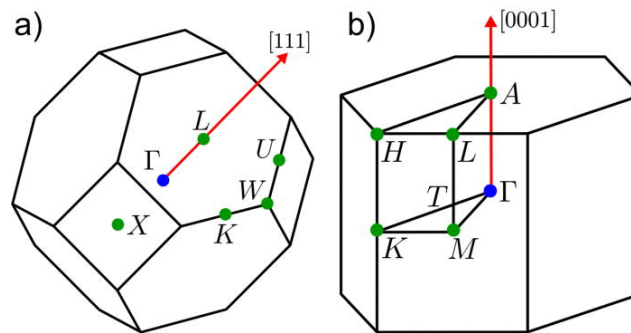


Figure I.4: Les deux zones de Brillouin des deux structures : a) - wurtzite et b) - zinc-blende [9]

Les intersections de chacun de ces axes avec les limites de la zone de Brillouin jouent un rôle important dans la théorie des bandes. Point X de coordonnées $(2\pi/a, 0, 0)$ sur l'axe $\langle 100 \rangle$, point L de coordonnées $(\pi/a, \pi/a, \pi/a)$ sur l'axe $\langle 111 \rangle$, point K $\langle 011 \rangle$ de coordonnée $(0, 3\pi/2a, 3\pi/2a)$ sur l'axe [9].

I.3.7. Propriétés électriques :

I.3.7.1. La polarisation :

Les matériaux semi-conducteurs de type wurtzite III-N tels que GaN, AlN et InN de type wurtzite appartiennent à la classe des matériaux pyroélectriques et possèdent les propriétés de polarisation spontanée et polarisation piézoélectrique. L'importance de la polarisation totale dans les composés de nitrure est d'un grand intérêt par rapport à d'autres semi-conducteurs composés III-V tels que GaAs [7].

I.3.7.1.1. Polarisation piézoélectrique :

La polarisation piézoélectrique désigne la polarisation (un état électrique) induite par une contrainte mécanique dans un matériau. Les nitrures du groupe III, comme le GaN, présentent de très forts effets de polarisation piézoélectrique - un ordre supérieur aux autres semi-conducteurs III-V.

La polarisation piézoélectrique peut être comprise intuitivement comme suit : la symétrie de liaison dans l'arrangement tétraédrique des matériaux constitutifs (figure I.5) est perturbée par une contrainte dans le réseau cristallin. Si l'on suppose que le cristal semi-conducteur n'est pas contraint dans la direction de croissance (axe c ; (0001)), la déformation est limitée aux plans orthogonaux. Une déformation dans le plan (0001) , en compression ou en traction, modifie les angles de liaison des atomes aux sommets de base, modifiant ainsi leurs composantes verticales - un moment dipolaire apparaît le long des directions (0001) [10].

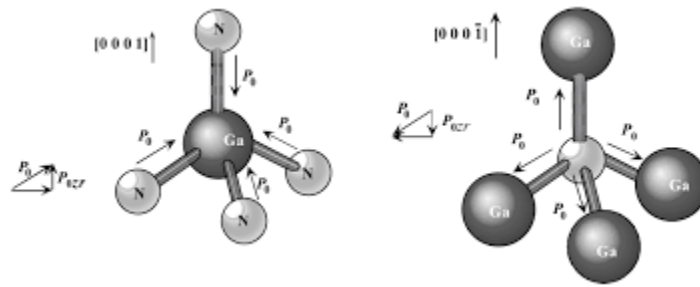


Figure I.5: Moments dipolaires P_x d'une maille élémentaire de GaN wurtzite de polarisation face azote (a) et face gallium (b) [10]

La polarisation piézoélectrique est liée à la contrainte (à la fois en amplitude et en orientation) présente dans le matériau. Une déformation plus importante provoque une polarisation plus importante ; une déformation en compression induit une polarisation opposée à une déformation en traction [10]. Ceci est représenté en figure :

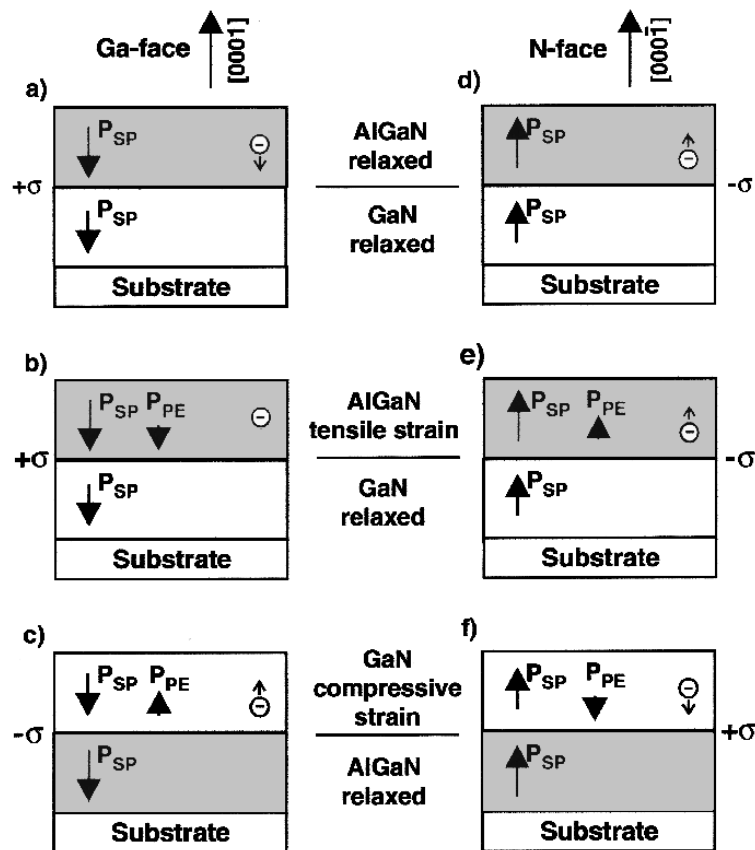


Figure I.6 : sens des polarisations pour les faces Ga et N des HEMTs AlGaIn/GaN Relaxé et sous contrainte [11]

I.3.7.1.2. La polarisation spontanée :

La polarisation spontanée ne peut être mesurée que par rapport à un autre matériau « sans contrainte ». Ainsi, seule la différence de polarisation spontanée entre deux matériaux (comme à un hétéro-interface) sont importantes et non pas leur magnitude absolue. L'orientation du vecteur de polarisation (c'est-à-dire le « signe ») est déterminée par la polarité du matériau. L'effet de polarisation spontanée ($\overrightarrow{P_{sp}}$) se produit dans les composés ferroélectriques et pyroélectriques (nitrides III, par exemple).

La polarisation spontanée est le résultat direct du manque de symétrie d'inversion le long de l'axe c de la structure cristalline de wurtzite influençant la nature de liaison du matériau et ne peut pas être modifiée par l'application d'un champ électrique (contrairement aux ferroélectriques). L'inéquivalence entre les liaisons des voisins les plus proches (Figure I.5), où une liaison, le long de la direction [0001], a une ionicité différente (liaison plus longue) par rapport aux trois autres, fait que les centres géométriques de la charge négative (électrons) et de la charge positive (noyaux) ne coïncident pas et un moment dipolaire se produit. Tous les nitrides III ont une valeur négative pour $\overrightarrow{P_{sp}}$ (en prenant la direction selon l'axe c, [0001], positive) [10].

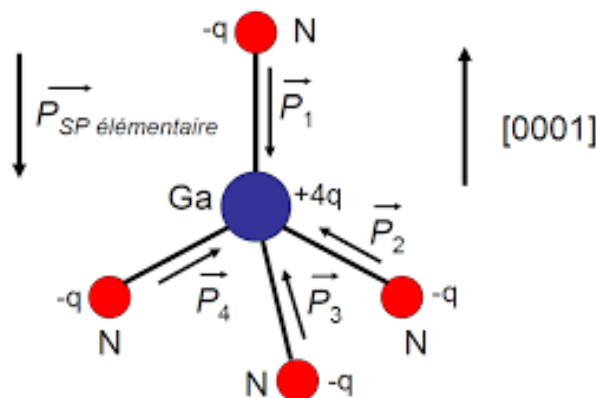


Figure I.7 : Polarisation spontanée dans le GaN [12]

I.3.7.1.3. Polarisation pyroélectrique :

Les mêmes propriétés cristallines qui confèrent aux nitrides III leur propriété de polarisation conduisent également à l'effet pyroélectrique. L'effet pyroélectrique se produit dans le cristal en raison d'un petit déplacement d'atomes dû à un changement de température conduisant à un champ électrique temporaire induit thermiquement. Cet effet peut être

important dans les amplificateurs et lasers de forte puissance. Pour simuler l'effet pyroélectrique, un modèle de transport d'énergie est nécessaire, mais pas considéré ici [10].

I.3.8 Propriétés mécaniques :

Les performances des composants optoélectroniques dépendent fortement des techniques de croissance de couche épitaxiale et de la sélection du substrat. La création et les effets de la contrainte biaxiale et de la dilatation thermique sont décrits ci-dessous :

I.3.8.1. Contrainte biaxiale :

La première contrainte mécanique apparaît lors de la croissance de la couche due à la déformation du réseau du matériau hétéroépitaxié. La couche appliquée doit s'adapter dans le réseau au matériau qui lui sert de support.

Au-delà d'une certaine épaisseur critique, les contraintes se relâchent, le matériau trouve ses propres paramètres de réseau qui génèrent des défauts qui sont traversant généralement les dislocations à l'interface. Sous épaisseur critique on parle de croissance pseudo-morphique. Le substrat et la couche ont le même paramètre de réseau dans le plan de croissance, il n'y a pas de relaxation des contraintes. Plus le décalage de grille est petit, plus l'épaisseur critique est grande. Pour les hétérojonctions GaN/Al_mGa_{1-m}N de faible composition, il s'agit de plusieurs centaines de nanomètres.

L'utilisation d'une couche de nucléation déposée entre le substrat et la couche épitaxiale permet de relaxer le désaccord de maille. Ceci permet d'augmenter la valeur de l'épaisseur critique pour assurer une croissance pseudo-morphique de l'ensemble de la structure.

Les couches d'intérêt pour le composant (couches actives) sont ajustées pour avoir le même paramètre de maille que la couche de nucléation : elles sont parfaitement contraintes. Le nombre de défauts est ainsi limité dans la zone active et les performances de la structure s'améliore. L'utilisation d'un substrat GaN (homoépitaxie) réduit presque complètement le désajustement de maille entre les couches actives et le substrat. Cela aide à réduire le nombre de défauts et améliore ainsi les propriétés optiques [7].

I.3.9. Propriétés optoélectronique :

Parmi les propriétés optiques du matériau figurent principalement son indice de réfraction et son coefficient d'absorption. Ces propriétés sont essentielles pour les composants optoélectroniques car elles contrôlent le mouvement de la lumière dans le composant. Par exemple, dans un appareil composé de différents matériaux, la lumière a tendance à se propager

dans les matériaux ayant le plus fort indice de réfraction. Ensuite, nous pouvons limiter la lumière dans une certaine couche, comme avec les lasers. Cette propriété est également très intéressante pour les applications de cellules solaires pour augmenter l'efficacité d'absorption de la lumière. Les nitrures d'élément III présentent une large gamme de structure de bande [13].

I.3.9.1. Indice de réfraction :

L'indice de réfraction est un paramètre très utile dans les structures laser, pour cela, la connaissance de ce paramètre est indispensable pour le confinement optique, la propagation des photons dans le guide d'onde ...etc. Dans le cas du GaN, l'indice de réfraction est égal à environ 2.3, alors que pour l'InN il vaut environ 2.9 dans l'infrarouge. Anani et al ont estimé expérimentalement la variation de l'indice de réfraction des alliages de nitrures d'éléments III en fonction de l'énergie d'un photon absorbé par le matériau. Le tracé de l'indice de réfraction en fonction de la composition reportée sur la Figure (I.8) montre que l'équation qui relie ces valeurs est de type quadratique. La variation de l'indice de réfraction ordinaire n en fonction de la longueur d'onde λ , dans la gamme de transparence, est décrite par une loi de type Sellmeier[13] :

$$n(\lambda) = \sqrt{a + \frac{b \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - c^2}} \quad (\text{Eq.I.1})$$

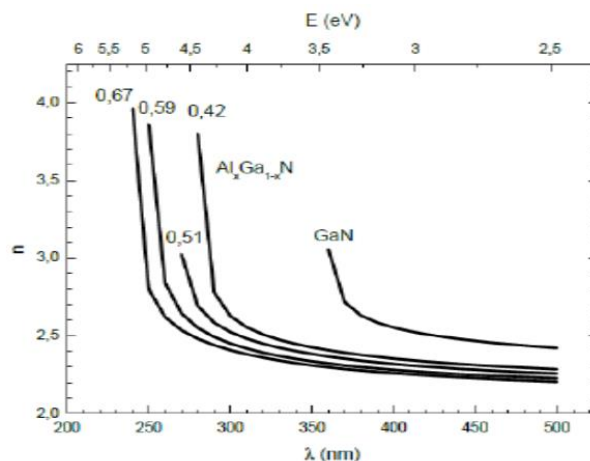


Figure I.8 : Indice de réfraction (ordinaire) pour le GaN et l'AlGaN en fonction de la longueur d'onde[13]

I.3.9.2. Gap d'énergie interdite dans le GaN :

La nature du gap joue un rôle fondamental dans l'interaction du semi-conducteur avec un rayonnement électromagnétique (en particulier lumineux), et donc dans le fonctionnement des composants utilisés en optoélectronique. On peut remarquer, pour l'instant, que dans un SC à

gap direct un électron du haut de la B_v qui acquière une énergie E_g passe dans la B_c sans changer de quantité de mouvement ce qui n'est pas le cas dans un SC à gap indirect.

La largeur de la bande interdite joue aussi un rôle important selon l'application envisagée. Les semi-conducteurs à grand gap permettent d'atteindre des tensions de claquage et des températures de fonctionnement assez élevées, ce qui rend possible leur utilisation dans les dispositifs à haute tension d'alimentation. III-nitrides présentent toujours une bande interdite directe, qui couvre une large gamme d'énergie qui va du mi- infrarouge pour InN à l'UV profond pour AlN (Figure I.9). SiC et GaN possèdent un gap deux à trois fois plus grand et le champ de claquage est de l'ordre de grandeur plus grand que celles de Si, le GaAs ou InP [13].

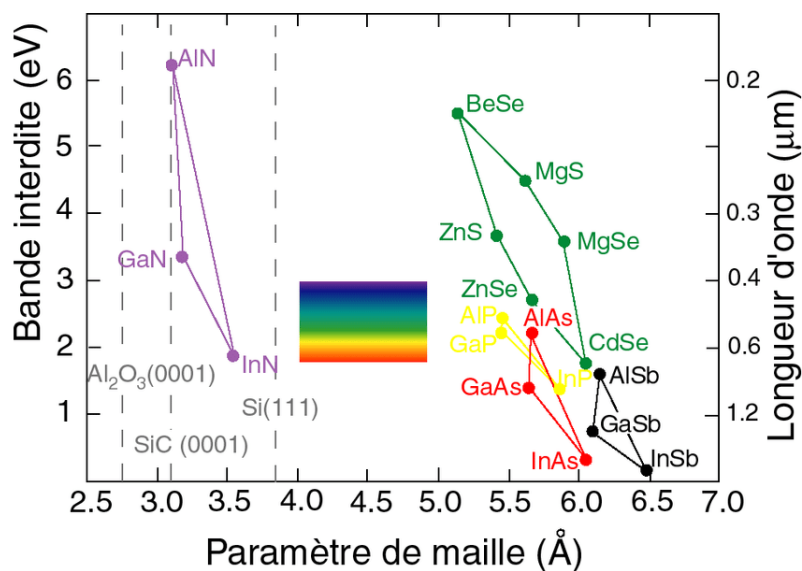


Figure I.9 : La bande interdite pour le groupe III nitrides en fonction du paramètre de maille [13]

I.3.9.3. Le champ de claquage et la mobilité électronique :

Une propriété électrique importante dans les semi-conducteurs est la capacité de déplacement des électrons sous l'effet d'un champ électrique, appelée mobilité électronique. La mobilité électronique dépend fortement de la qualité cristallographique du matériau. Le GaN possède une mobilité électronique satisfaisante, ce qui favorise la montée en fréquence des composants électroniques (les HEMTs par exemples). Le champ de claquage d'un matériau représente le champ électrique maximal qu'il peut supporter. Comme pour tous les matériaux à large bande interdite, le champ de claquage du GaN est très élevé. Les composés III-N sont des matériaux de choix pour la réalisation de dispositifs microélectroniques hyperfréquence et de puissance. La combinaison d'un champ de claquage important ($>3.3 \text{ MV.cm}^{-1}$ pour GaN) avec la possibilité d'atteindre des mobilités et des densités électroniques élevées permet à la

technologie GaN d'être aujourd'hui largement acceptée comme un véhicule pour les applications haute fréquence/haute puissance [13].

I.3.9.4. Le coefficient d'absorption :

Dans la Figure I.10, le spectre d'absorption de GaN à la température ambiante est présenté. L'encart est une vue agrandie de la structure excitonique à 77oK. A température ambiante, les excitons A et B se chevauchent en raison de l'élargissement de phonon pour former un pic alors que l'exciton C apparaît comme un changement de pente. À 77oK, les excitons A, B, et C sont clairement résolus montrant l'absorption excitonique en raison des trois bandes de valence [13].

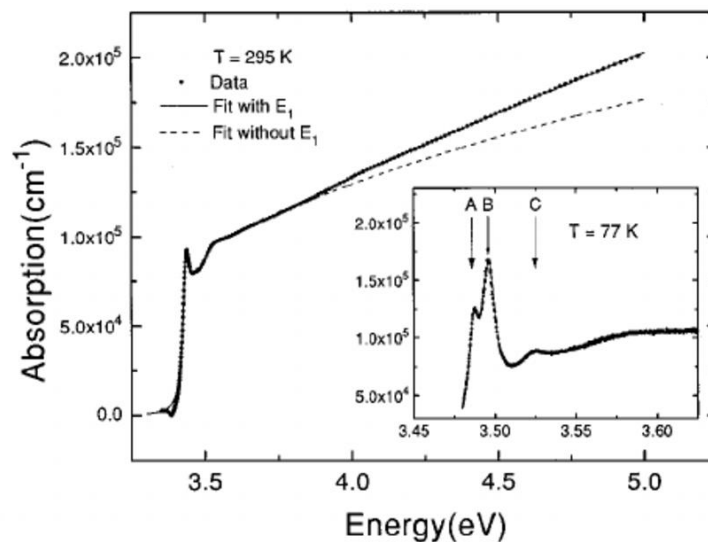


Figure I.10 : Le spectre d'absorption de GaN à la température ambiante [13]

I.3.10. Propriétés thermiques :

Suivant le développement des technologies, notamment dans le domaine des puits quantiques, le GaN et ces alliages ont récemment attiré beaucoup d'attention pour leur importance remarquable dans le domaine des applications telles que les diodes laser. Les composants en technologie GaN présentent des effets parasites dus aux matériaux et à leur « faible maturité », ce qui limite leurs propriétés optoélectroniques. Plusieurs paramètres tels que la chaleur spécifique, la conductivité thermique, la bande interdite, la température de Debye et la dilatation thermique peuvent définir les propriétés thermiques du nitrure de gallium. Des études ont été menées pour améliorer la dissipation thermique voire l'effet de la température sur ces paramètres, ce qui implique une limitation importante du fonctionnement des composants à base de GaN, Il est donc primordial dévaluer exactement la température du composant pendant la caractérisation [13].

I.3.10.1. Evolution du gap d'énergie interdite en fonction de la température :

La taille de la bande interdite confère des propriétés optoélectroniques importantes à tout semi-conducteur. En effet, la bande passante interdite fixe la limite de température en dessous de laquelle le dispositif peut fonctionner sans dommage, ainsi que la capacité du semi-conducteur à résister aux radiations.

Selon [14,15], deux mécanismes sont responsables de la diminution de l'énergie de la bande interdite d'un semi-conducteur lorsque sa température augmente :

- ❖ *La dilatation thermique*, qui ajuste les positions des bandes de valence et de conduction.
- ❖ *Interactions électron-phonon*, qui provoquent un décalage des positions relatives des bandes de valence et de conduction. C'est ce phénomène qui contribue le plus aux fluctuations de température.

La loi Varshni est généralement utilisée pour décrire la variation de l'écart avec la température, où il est écrit :

$$E_g(T) = E_g(T_0) - \frac{\alpha T^2}{\beta + T} \quad (\text{Eq.I.2})$$

Où : $E(T_0)$ est le gap à la température ;

T_0 , α et β sont des paramètres ajustables qui dépendent de la nature du semi-conducteur.

Tableau (I.2) Paramètres de Varshni et gap d'énergie du GaN et de 'AlN

Matériau	$E_g(300\text{K})$ [eV]	α [eV.K ⁻¹]	β [K]
GaN	3.4	$9.09 \cdot 10^{-4}$	800
AlN	6.2	$18.0 \cdot 10^{-4}$	1462

Tableau I.2 : Paramètres de Varshni et gap d'énergie du GaN et de l'AlN [13]

La variation de la bande interdite avec la température a été mesurée pour GaN à partir d'une analyse Monemar du spectre de réflexion de photoluminescence d'exciton de masse du nitride de gallium et donne une relation empirique exacte de l'évolution de la bande interdite en fonction de la température :

$$E_g(T) = 3.503 - \frac{(5,08 \cdot 10^{-4} T^2)}{T - 996} \text{ eV pour } T < 265 \text{ K} \quad (\text{Eq.I.3})$$

La validité de cette expression est limitée à des températures inférieures à la température ambiante $T < 300^\circ K$, avec une incertitude de 0.002 eV [13].

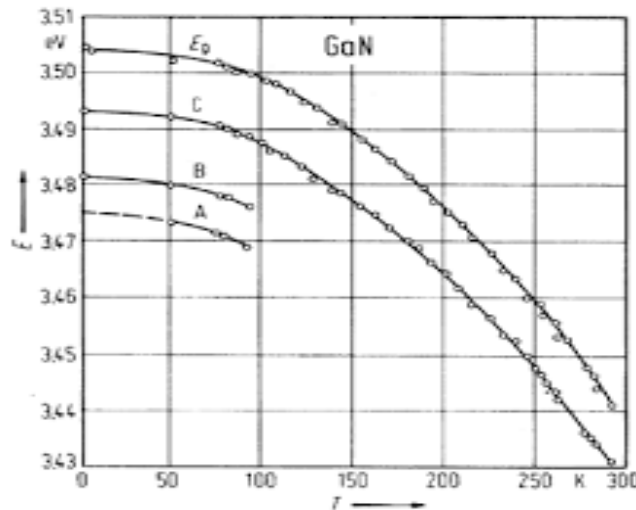


Figure I.11 : Evolution du gap d'énergie de GaN en fonction de la température. Les courbes A, B et C font référence aux excitons du même nom [13]

I.3.10.2. La conductivité thermique du GaN :

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} ($W.K^{-1}$),

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{P_{diss}} \quad (\text{Eq.I.4})$$

Où ΔT est l'élévation la température en K, P_{diss} est la puissance dissipée en W

On voit donc que la résistance thermique est directement liée à la puissance dissipée. Cela signifie que la conductivité thermique élevée du matériau permet d'évacuer la puissance dissipée (sous forme de chaleur) sans l'échauffer de manière significative. Dans le cas de l'amplification de puissance, où les puissances délivrées sont élevées, une augmentation de la température pour une dissipation de puissance donnée sera beaucoup plus faible pour les transistors à grand gap [13].

I.3.10.3. La température de Debye et la chaleur spécifique de GaN :

Pour la température de Debye, θ_D caractérise la valeur maximale des énergies vibrationnelles calculées par Polian et al à partir de la chaleur spécifique ou Demidienko et al à partir des propriétés élastiques. Les valeurs obtenues sont $700^\circ K$ et $650^\circ K$. En termes de chaleur

spécifique, dans les semi-conducteurs, l'énergie appliquée a pour effet d'augmenter le nombre de phonons présents, tandis que les électrons de la bande de conduction et les trous de la bande de valence sont généralement insuffisants pour jouer un rôle important par rapport aux les phonons. La capacité calorifique est une fonction monotone croissante de la température.

Il y a un fort écart par rapport à la courbe prédite par la théorie de Debye, dans laquelle la capacité calorifique suit la formule :

$$C_L(T) = C_L(T_0) \frac{20 - (\theta_D - T)^2}{20 - (\theta_D/300^\circ K)^2} \quad (\text{Eq.I.5})$$

Avec $C_L(T_0)$ est la capacité à l'ambiante (en $\text{cal. mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), θ_D est la température de Debye et ρ est la densité. La chaleur spécifique pour GaN a été calculée à pression constante en fonction de la température pour des températures comprises en 298 et 1773°K[13].

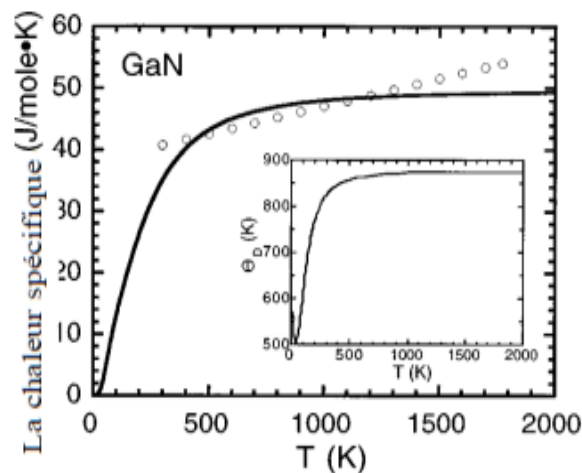


Figure I.12 : La chaleur spécifique calculée (trait plein) et mesurées (cercles ouverts) par rapport à la température [13]

I.3.10.4. La dilatation thermique :

Le coefficient de dilatation thermique est important à connaître pour la réalisation de couches hétéro-épitaxiales, mais aussi pour l'étude des propriétés des semi-conducteurs à différentes températures. Il est donc très important de connaître ces coefficients des matériaux épitaxiés et substrats afin de connaître les déformations se produisant dans la couche, éventuellement dans le substrat, mais aussi pour étudier les propriétés des semi-conducteurs à différentes températures.

Tout matériau exposé à un changement de température se déforme : c'est le phénomène de dilatation thermique. Il doit être pris en compte lors de l'étude des propriétés des semi-

conducteurs à différentes températures, mais aussi dans la croissance du matériau, car cela se produit à haute température. Ainsi, une couche hétéro-épitaxiale complètement relaxée à la température de croissance peut être déformée à température ambiante. Les coefficients de dilatation thermique permettent d'évaluer la déformation du réseau cristallin en fonction de l'évolution de la température. Le coefficient de dilatation thermique enregistré décrit la dilatation du réseau cristallin après un changement de température. Elle dépend du matériau, mais aussi de la stœchiométrie, des défauts étendus et de la concentration de charges libres dans le matériau [13].

$$\frac{l_f - l_0}{l_0} = \alpha_l (T_f - T_0) \quad (\text{Eq.I.6})$$

Où

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \alpha_l \Delta T \quad (\text{Eq.I.7})$$

- Le coefficient thermique volumique :

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \alpha_V \Delta T \quad (\text{Eq.I.8})$$

- Pour un matériau isotrope :

$$\alpha_l = 3\alpha_v \quad (\text{Eq.I.9})$$

I.4. Les composées ternaires :

L'alliage ternaire $\text{Al}_m\text{Ga}_{1-m}\text{N}$ est souvent utilisé comme barrière dans les structures microélectroniques à base de nitrure ou comme couche donneuse pour les HEMT (transistors à haute mobilité électronique). La connaissance de ses propriétés et la maîtrise de sa croissance sont donc des objectifs fondamentaux pour le développement de nouveaux composants. En première approximation, les paramètres de réseau de $\text{Al}_m\text{Ga}_{1-m}\text{N}$ peuvent être dérivés de paramètres GaN et AlN par interpolation linéaire en utilisant la loi de Vegard. Les poids effectifs, les coefficients mécaniques de $\text{Al}_m\text{Ga}_{1-m}\text{N}$ peuvent souvent être approximés par interpolation linéaire des coefficients GaN et AlN. Cependant, cette interpolation n'est pas suffisante pour obtenir des valeurs plus précises.

$$a_{\text{Al}_m\text{Ga}_{1-m}\text{N}} = m a_{\text{AlN}} + (1 - m) a_{\text{GaN}} \quad (\text{Eq.I.10})$$

D'autre part, la variation de l'énergie de la bande interdite de l'alliage en fonction de sa composition n'est pas linéaire mais quadratique. Le coefficient du terme de second ordre b (bowing en anglais) a une valeur d'environ 1 eV pour $\text{Al}_m\text{Ga}_{1-m}\text{N}$ hexagonal.

$$E_g(\text{Al}_m\text{Ga}_{1-m}\text{N}) = mE_g(\text{AlN}) + (1-m)E_g(\text{GaN}) - m(1-m)b \quad (\text{Eq.I.11})$$

La croissance d' $\text{Al}_m\text{Ga}_{1-m}\text{N}$ est relativement complexe. De plus, les fluctuations locales de la composition de l'alliage sont assez importantes. Premièrement, l'alliage peut subir un réarrangement atomique au cours de la croissance, ce qui génère spontanément une série de super-réseaux AlN/GaN avec une périodicité variable en fonction des rapports de flux des différentes espèces. Deuxièmement, l'aluminium a tendance à s'accumuler autour des dislocations, créant des régions appauvries en aluminium à quelques nanomètres des noyaux de dislocation. Les zones riches en Al ont des teneurs jusqu'à 70 % supérieures à celles des zones appauvries [7].

I.4.1. Propriétés physiques de l'hétérostructure de type $\text{Al}_m\text{Ga}_{1-m}\text{N} / \text{GaN}$:

Une hétérostructure formée par l'association de deux matériaux (Figure I.13) avec des bandes interdites différentes, l'un présentant un large gap "AlGaN" et l'autre un gap plus faible "GaN", entraînant une discontinuité de la bande de conduction à l'interface (ΔE_c) (Figure I.14). Cette structure (hétérojonction AlGaN/GaN) permet la formation d'un gaz électronique bidimensionnel (2DEG) dans un canal faiblement dopé, favorisant ainsi une augmentation de fréquence. Selon les règles d'Anderson, lors de la jonction de deux matériaux, les niveaux de Fermi s'égalisent et le niveau de vide ne peut pas subir de discontinuités, ce qui entraîne une discontinuité de la structure de la bande d'énergie d à l'interface. Ici, nous nous limitons au cas simplifié d'une hétérojonction idéale, où il n'y a pas de charges à l'interface en raison, par exemple, de pièges associés à une désadaptation de réseau, à une non-stœchiométrie ou même à des impuretés accumulées à l'interface lors de la croissance épitaxiale de l'hétéro-transition[7].

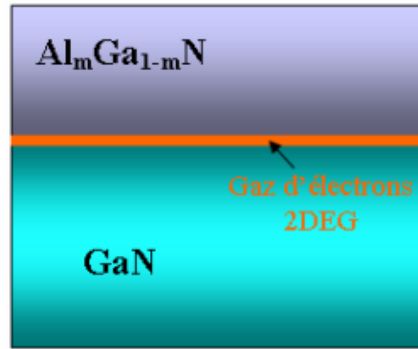


Figure I.13 : hétérojonction de type $\text{Al}_m\text{Ga}_{1-m}\text{N}/\text{GaN}$ [7]

La Figure I.14 représente les diagrammes de bandes des deux semi-conducteurs supposés fictivement séparés par un espace infinitésimal suffisant. Le niveau du vide est par contre continu à travers cette séparation. Les deux semi-conducteurs sont supposés homogènes (composition, dopage...) et électriquement neutres. Tous les niveaux d'énergie y sont plats :

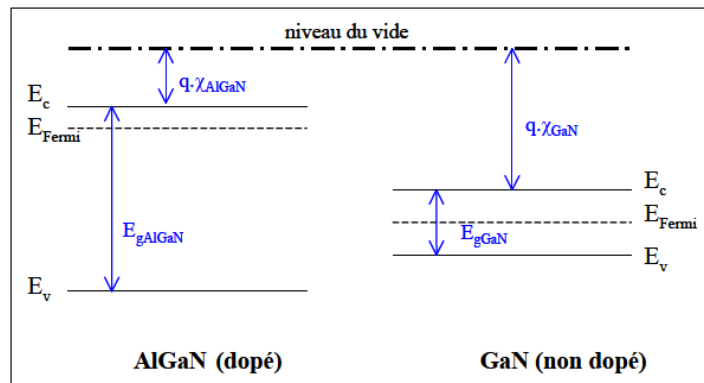


Figure I.14: Niveaux d'énergie dans l'AlGaN et le GaN [16]

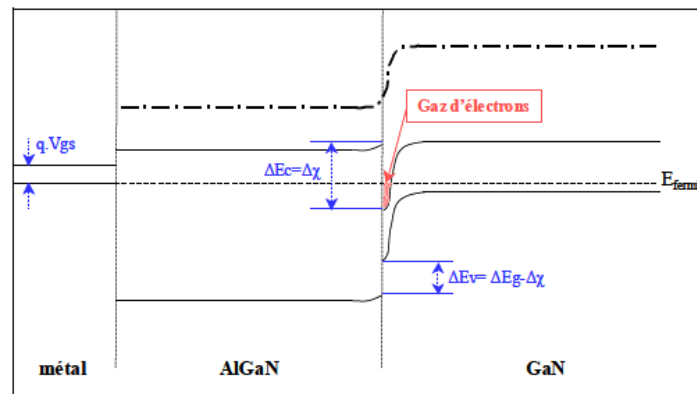


Figure I.15 : Niveaux d'énergie des matériaux à l'hétérojonction pour une tension appliquée non nulle

[16]

Ou E_0 = niveau du vide, E_{c1} et E_{c2} = niveaux du bas de bandes de conduction, E_{f1} et E_{f2} = niveaux de Fermi, E_{v1} et E_{v2} = niveaux du haut de bandes de valence.

Les affinités électroniques sont les énergies requises pour extraire un électron du bas de la bande de conduction :

$$\chi_1 = E_0 - E_{c1} \quad (\text{Eq.I.12})$$

$$\chi_2 = E_0 - E_{c2} \quad (\text{Eq.I.13})$$

Ce sont des grandeurs intrinsèques caractéristiques des deux matériaux, au même titre que leur « énergie de bande interdite » ou gap :

$$E_{G1} = E_{c1} - E_{v1} \quad (\text{Eq.I.14})$$

$$E_{G2} = E_{c2} - E_{v2} \quad (\text{Eq.I.15})$$

La figure (I.15) représente les diagrammes de bande raccordés après avoir recollé les deux semi-conducteurs formant ainsi une hétérojonction. Les porteurs de charges sont à présent libres de se redistribuer entre les deux semi-conducteurs. Ceux-ci ne forment plus qu'un seul système dont le niveau de Fermi E_F est constant, puisque nous le considérons à l'équilibre thermodynamique ($E_F = E_{F1} = E_{F2}$). Le niveau du vide étant continu, le bas de bande de conduction doit présenter la même discontinuité que l'affinité électronique :

$$\Delta E_c = \chi_1 - \chi_2 \quad (\text{Eq.I.16})$$

Le haut de la bande de valence doit, par conséquent, présenter une discontinuité complémentaire par rapport à celle du gap :

$$\Delta E_v = \Delta E_G - \Delta E_c \quad (\text{Eq.I.17})$$

Notons que la répartition $\Delta E_c / \Delta E_v$ est une constante puisqu'elle ne dépend que des affinités électroniques et des gaps des deux matériaux. Infiniment loin de l'interface, de chaque côté de l'hétérojonction, le diagramme de bande doit tendre asymptotiquement vers chacun des diagrammes initiaux. Cela implique donc que les bandes de conduction et de valence sont courbées au voisinage de l'hétérojonction. Cette courbure de bande et la constance du niveau de Fermi sont assurées par la redistribution des porteurs et la création associée d'une zone de charge d'espace dont les épaisseurs x_{Tn} et x_{Tp} de part et d'autre de l'hétérojonction peuvent être obtenues par intégration de l'équation de Poisson [7].

I.5. Les substrats adéquats pour le GaN hexagonal :

La croissance de couches hexagonales de haute qualité est conditionnée par le choix du substrat. Le principal problème rencontré avec l'épitaxie au nitrure de gallium est qu'il n'y a pas de substrat de réticulation pour ces matériaux. Les candidats susceptibles d'être utilisés pour l'hétérostructure AlGaN/GaN sont le saphir (Al_2O_3), le silicium (Si) et le carbure de silicium (SiC type 4H). Les caractéristiques de ces substrats sont présentées dans le Tableau I.3.

Paramètre	Silicium	4H-SiC	GaN	Diamant
W_g [eV]	1.12	3.26	3.39	5.47
E_{crit} [MV/cm]	0.23	2.2	3.3	5.6
ϵ_r	11.8	9.7	9.0	5.7
μ_n [$\text{cm}^2/\text{V.s}$]	1400	950	800/1700 ²	1800
BFoM ¹ par rapport à Si	1	500	1300/2700 ²	9000
n_i [cm^{-3}]	1.10^{10}	8.10^{-9}	2.10^{-10}	1.20^{-20}
λ [W/cm.K]	1.5	3.8	1.3/3 ³	20

Tableau I.3 : Propriétés matérielles du SiC et du GaN par rapport à celles du silicium et du diamant [17].

La désadaptation de maille entre le substrat et la couche épitaxiale génère des contraintes dans la couche. Cette contrainte crée une déformation de la maille dans la couche qui accumule de l'énergie élastique. A partir de l'épaisseur critique, la couche se libère en créant des dislocations préjudiciables à la qualité du matériau. Pour résoudre ce problème, une couche de nucléation ou tampon est déposée à l'intérieur de celle-ci, à l'intérieur de laquelle une relaxation complète des contraintes est supposée pour obtenir une homo-épitaxie des couches sans contraintes. Malgré l'utilisation d'un tel procédé, il y a toujours des contraintes résiduelles. Son origine vient de la différence de coefficients de dilatation thermique entre la couche et le substrat [7].

I.5.1. Le saphir (Al_2O_3) :

Au début du premier développement du matériau GaN, la plupart des couches développées étaient déposées sur un substrat en saphir. Ce substrat présente l'avantage d'un coût

relativement faible, d'une disponibilité aisée, d'une semi-isolation et d'une stabilité à haute température. Ses inconvénients sont : sa faible conductivité thermique ($\sigma = 0,5 \text{ W/cm.K}$) et sa forte désadaptation de réseau. Ce décalage de réseau entre les plans basaux du GaN hexagonal et du saphir est de 30%, cependant lors de l'épitaxie, le réseau est tourné de 30° par rapport au réseau des atomes d'aluminium du saphir et le décalage réel se situe dans ces derniers.

conditions inférieures à 15 % , malgré cet important décalage de maille et une différence de coefficients de dilatation thermique de l'ordre de 35 % , le saphir est néanmoins traditionnellement utilisé pour des raisons de coût. Afin de corriger au maximum la formation de dislocations dans le GaN, les épitaxis déposent au préalable une couche de nucléation d'AlN d'une taille de l'ordre de la dizaine à la centaine de nanomètres . Cette couche est le siège de nombreux défauts cristallins, mais elle permet de limiter la propagation des dislocations dans le GaN.

Cependant, le désappariement de réseau résiduel conduit à la présence d'une forte densité de dislocations de l'ordre de 10^{10} cm^{-2} . Malgré cela, ce substrat a tout de même permis le développement de dispositifs à base de GaN en optoélectronique et hyperfréquences avec de très bonnes performances. Cependant, ce matériau atteint aujourd'hui ses limites pour les applications de puissance micro-ondes en raison de sa faible conductivité thermique [7].

I.5.2 Le carbure de silicium (SiC) :

Quant au substrat SiC(4H) à structure wurtzite d'orientation [0001], les conditions d'épitaxie sont beaucoup plus favorables. Les coefficients de désadaptation de réseau et les coefficients de dilatation thermique sont de 3,5 % et 25 % pour le GaN. De ce fait, les couches épitaxiées sur ce substrat ont une meilleure qualité cristalline que celles formées sur le saphir. La mobilité des transporteurs y est beaucoup plus élevée. Pour améliorer encore la qualité cristalline du GaN sur SiC, une couche de nucléation Al d'environ 100 nm d'épaisseur est d'abord déposée sur le substrat. L'AlN a une désadaptation de réseau inférieure à celle du SiC (environ 1%) et le même coefficient de dilatation thermique que le substrat. Une croissance de GaN est ensuite réalisée sur cette couche de nucléation.

Le SiC a également environ sept fois la conductivité thermique du saphir, ce qui en fait un excellent candidat pour les applications micro-ondes. Par contre, un gros inconvénient est que ce matériau est très cher [7].

I.5.3 Le silicium (Si) :

Le substrat de silicium est très attractif non seulement parce qu'il a une bonne morphologie de surface et est disponible à faible coût, mais aussi parce qu'il permet l'intégration de dispositifs à base de GaN dans la microélectronique silicium. Cependant, le GaN présente une désadaptation de réseau avec Si (111) d'environ 17 %, associée à un coefficient de désadaptation de dilatation thermique de plus de 35 %.

Contrairement aux substrats (Al₂O₃) et SiC, le silicium Si a un réseau plus important que GaN. Ainsi, GaN est par définition en extension lorsqu'il est épitaxial sur Si (111), provoquant la formation de dislocations et de fissures. Par la suite, une couche de nucléation plus complexe composée de plusieurs sous-couches d'AlN et de GaN (super-réseau) se forme, dont les conditions de croissance sont différentes de celles utilisées pour les substrats précédents. Une couche de GaN (tampon) est ensuite développée sur ce super-réseau [7].

I.5.4. Le diamant :

Le diamant offre la meilleure conductivité thermique par rapport aux autres matériaux. La chaleur se dissipe horizontalement dans le diamant puis se dissipe latéralement dans un autre substrat. Il existe également un intérêt à isoler électriquement la couche tampon du substrat en raison de sa faible conductivité électrique [7].

I.6. Applications :

Les propriétés matérielles inhérentes aux nitrures III-stabilité à haute température, tensions de fonctionnement élevées et vitesses maximales de dérive des électrons élevées - donnent naissance aux arguments de vente des dispositifs GaN : manipulation des hautes fréquences, des niveaux de puissance élevés et une linéarité opérationnelle plus élevée. Ce sont des caractéristiques requises par les technologies qui sont, ou deviendront bientôt, économiquement significatives. Les revenus des appareils GaN pour 2010 ont été estimés à près de 7 000 millions de dollars américains. Ces revenus sont presque exclusivement attribués aux LED et lasers à haute luminosité actuellement, mais le GaN présente une gamme d'autres domaines d'application qui sont appelés à se développer. Il est coûteux de maintenir plusieurs technologies dans une chaîne de production, ce qui rend favorable la présence d'une seule technologie, comme le pistolet, qui peut couvrir un large éventail d'applications [10].

Le tableau résume les avantages de performance que les propriétés intrinsèques du matériau de nitrures III sur. Celles-ci sont discutées dans le contexte des différents domaines d'application ci-dessous.

Nécessité	Fonctionnalité d'activation	Avantage de performance
Fonctionnement à haute tension	Champ de ventilation élevé	Réduire l'abaissement de tension
Fonctionnement à haute température	Large bande interdite d'énergie	Fiabilité; refroidissement réduit
Rendement élevé	Tension de fonctionnement élevée	Économie d'énergie; refroidissement réduit
Haute fréquence	Vitesse maximale élevée des électrons	Bande passante; micro-ondes

Tableau I.4 : Avantages de performance des propriétés des matériaux GaN [10]

I.6.1. Optoélectronique :

Le nitrure de gallium, avec sa large bande interdite d'énergie directe, est un énorme catalyseur technologique pour les applications envisagées dans le domaine spectral du vert à l'ultraviolet. L'avènement des LED bleues GaN efficaces a ouvert la voie à la réalisation de LED "blanches" auto-propagatives dans l'éclairage général efficace (qui représente environ 20% de la consommation électrique mondiale). Les LED GaN vertes sont également un développement clé pour des applications quelque peu banales telles que les feux de circulation. Les lasers bleus à base de GaN ont franchi une nouvelle étape technologique dans le stockage optique haute densité (par exemple BluRay) que l'on trouve dans l'électronique grand public. Les lasers à base de GaN sont également utilisés dans les applications médicales et les imprimantes laser [10].

I.6.2. Électronique Radiofréquence :

Les trois principaux domaines d'application de l'électronique radiofréquence (RF) pour les transistors GaN sont la communication sans fil, la défense et la transmission de données ; les principaux marchés des dispositifs GaN dans l'électronique RF sont les stations d'émission-réception de base cellulaires (BTS) et les radars militaires. La valeur marchande des transistors GaN RF était estimée à plus de 100 millions de dollars américains en 2010.

Les applications militaires concernent principalement les radars à détection électronique et les équipements de guerre électronique, notamment dans la bande X5. Les radars multiéléments peuvent avoir jusqu'à 1 000 antennes, chacune devant être contrôlée séparément par un amplificateur de puissance (PA). Les performances du radar sont très dépendantes de sa puissance. La puissance requise peut être facilitée par des hautes tensions au lieu de courants élevés en raison de la tension de claquage élevée du GaN, qui permet des conducteurs plus fins. La stabilité à haute température du GaN permet également un refroidissement réduit, contribuant à une conception plus compacte.

Environ 60 % des coûts d'électricité des opérateurs de réseaux mobiles sont attribués au PAS dans les seules stations de base mobiles. Les nouvelles architectures d'amplificateurs à découpage (classe E/F) promettent des gains d'efficacité allant jusqu'à 75 %. Une implémentation utilisant Si-LDMOS - la technologie dominante actuelle sur le marché 3G BTS - n'est viable qu'à des fréquences allant jusqu'à 1 GHz. Les avantages de performance du GaN sont essentiels pour les implémentations à haute fréquence requises pour les protocoles de communication sans fil de nouvelle génération, par exemple, WiMax et LTE Advanced. La densité de puissance plus élevée des transistors de puissance GaN ($10 \times$ par rapport aux dispositifs GaAs) permet l'utilisation d'amplificateurs de puissance plus petits, car ils peuvent être installés sur le mât BTS, évitant les pertes de câble des configurations actuelles. Les applications de diffusion de données incluent la télévision par câble et les satellites à très petite ouverture (VSAT), qui peuvent bénéficier des capacités de sortie de puissance accrues des transistors GaN [10].

I.6.3. Électronique de puissance :

On estime que 40 % de l'énergie mondiale est consommée sous forme d'électricité, et ce chiffre devrait atteindre 60 % d'ici 2040. La conversion d'énergie (redresseurs et onduleurs) joue un rôle clé dans de nombreuses technologies liées à l'énergie électrique, par exemple les éoliennes, le photovoltaïque, les véhicules hybrides. La large bande interdite du GaN permet aux dispositifs basés sur cette technologie de gérer directement les hautes tensions, sans abaissement, améliorant ainsi l'efficacité de la conversion et réduisant l'encombrement. Les dispositifs GaN offrent une très faible impédance thermique (lorsqu'ils sont développés sur des substrats SiC) et un fonctionnement fiable à des températures élevées, ce qui réduit la charge de la gestion thermique.

Les avantages susmentionnés du GaN dans l'électronique de puissance s'appliquent également au SiC - une technologie compétitive déjà établie. Cependant, le fort développement de la technologie GaN dans l'optoélectronique et les dispositifs RF peut affecter l'avantage économique qui peut être obtenu, puisque le savoir-faire acquis peut être partagé entre plusieurs secteurs d'application [10].

I.6.4 Application militaires :

Plusieurs programmes de recherche sont orientés vers l'obtention de bonnes valeurs de densités de courant et de densités de puissance de sortie aux fréquences micro-ondes. Cependant, de nouveaux programmes commencent par les bases (croissance du matériel, gravure, contacts) et progressent à travers la phase de dispositif discret pour aboutir à l'objectif ultime des circuits intégrés micro-ondes monolithiques à base de GaN (MMIC). L'accent est maintenant mis sur la compréhension des causes physiques de la défaillance de l'appareil et le développement de modèles physiques pour prédire les performances afin d'augmenter la reproductibilité et la fiabilité.

En général, les programmes de recherche de défense se concentrent sur le développement de la technologie GaN pour une utilisation dans des composants tels que les radars de surface, les brouilleurs, les communications sur le champ de bataille, les liaisons de communication par satellite, les modules émetteurs-récepteurs et les amplificateurs à faible bruit (LNA). Les fréquences d'intérêt pour ces applications vont de 2 GHz à 40 GHz [6].

I.7. Conclusion :

Nous avons décrit les propriétés physiques et optoélectroniques de base des matériaux III-V avant de présenter quelques-unes de leurs applications pour les composants optoélectroniques. Nous avons rappelé l'intérêt de la structure cristalline du wurtzite GaN, qui donne lieu à des polarisations spontanées et piézoélectriques. Ces polarisations créent une densité de charge qui permet la formation d'un gaz d'électrons bidimensionnel (2DEG) à l'interface de l'hétérostructure AlGaIn/GaN.

Chapitre II

Les transistors HEMTs à
base de l'hétérostructure

AlGaN/GaN

II.1. Introduction :

Les transistors à effet de champ à haute mobilité électronique HEMTs basés sur l'hétérostructure AlGaIn/GaN sont des candidats intéressants pour les applications à tension élevée et haute puissance aux fréquences micro-ondes. Grâce à la présence de la polarisation spontanée et piézoélectrique, ils ont la capacité de produire un gaz d'électrons bidimensionnel (2DEG) dans le canal avec une concentration de l'ordre de 10^{13} cm^{-2} sans dopage intentionnel.

Dans ce chapitre nous donnerons une généralité sur les transistors à effet de champs FET à base du GaN et leurs structures (LDMOS, MESFET et HEMT) et le principe de fonctionnement des HEMT à base d'hétérojonction AlGaIn/ GaN avec une description de leur géométrie et quelques caractéristiques physiques et électriques du dispositif ainsi que leur inconvénient.

II.2. Les transistors à effet de champ (FETs) à base de GaN :

Les dispositifs électroniques à trois bornes appelés FET (Field Effect Transistors) sont utilisés pour contrôler le flux de courant en plaçant une tension sur la grille. Les bornes du drain, de la source et de la grille de ce composant sont illustrées à la Figure II.1. Le champ électrique produit par la tension de la grille d'entrée, qui est à l'origine du terme "effet de champ électrique", est ce qui contrôle leur fonctionnement.

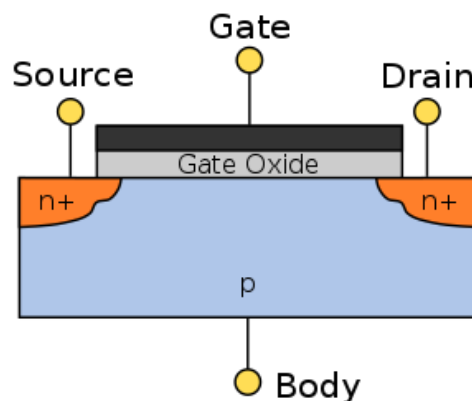


Figure II.1 : Vue en coupe d'un transistor à effet de champ, montrant les bornes de la source, de la grille et du drain [3]

Les trois électrodes du FET sont définies comme :

- ❖ **Source (S)** : Il s'agit du port par lequel les porteurs de charge majoritaires entrent dans le TEC. Le courant dans le canal S est noté I_S .
- ❖ **Drain (D)** : où les porteurs de charge quittent le canal. Traditionnellement, les flux entrant dans le canal en D sont désignés par I_D . La tension drain-source est V_{DS} .
- ❖ **Gate (G)** : la borne de grille est formée en diffusant des semi-conducteurs de type n et de type p pour créer une région de jonction. Vous pouvez contrôler I_D en appliquant une tension à G [3].

II.2.1 Le transistor LDMOS :

L'un des procédés développés pour surmonter les limites de puissance du MOSFET est le procédé LDMOS (MOS à diffusion latérale) (Figure II.2). Il diffère d'un MOSFET en ce que le p^+ bien dopé agit comme une masse RF entre la source et l'arrière du composant.

Les transistors LDMOS sont des composants largement utilisés dans les stations de base pour la téléphonie mobile. Dans une bande de fréquence limitée à environ 3 GHz, ils présentent des tensions de claquage très élevées, autorisant de fortes distorsions. Ericsson-Infineon a développé un transistor LDMOS avec une tension de claquage BV_{dss} de 110 V qui fournit une densité de puissance de 1 W/mm à 3,2 GHz pour une polarisation de 50 V et de 2 W/mm à 1 GHz pour une polarisation de 70 V. La tension LDMOS dépend directement de la distance séparant la grille du drain.

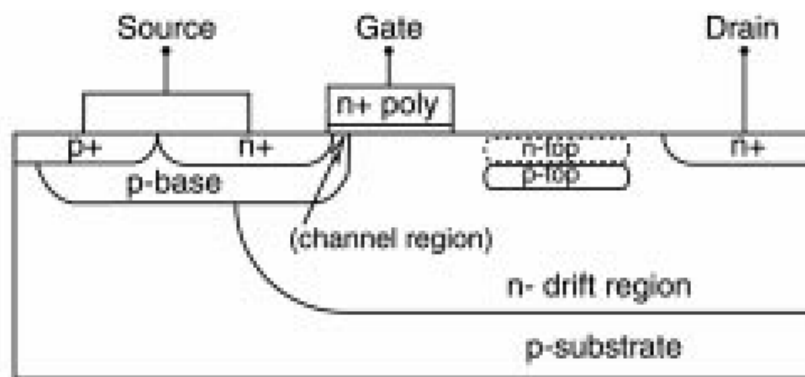


Figure II.2 : Schéma du transistor LDMOS avec la double couche RESURF dans la zone de dérive[18]

Les mesures sur LDMOS de 10mm montrent qu'une variation de la distance grille drain de 2 à 4 μ m entraîne une augmentation de la tension de drain de 32 à 40V. Cependant, un gain en puissance élevé à haute fréquence nécessite que le canal soit le plus court possible, favorisant

le transit rapide des électrons. Ce constat s'oppose à l'augmentation de la distance grille drain. Ce type de transistor est donc limité pour des fréquences d'utilisations inférieures à 2.1GHz [7].

II.2.2 Le transistor MESFET :

Cette section détaille les principes de fonctionnement de transistor MESFET GaAs. La structure idéalisée de MESFET GaAs en 3D est illustrée à la figure

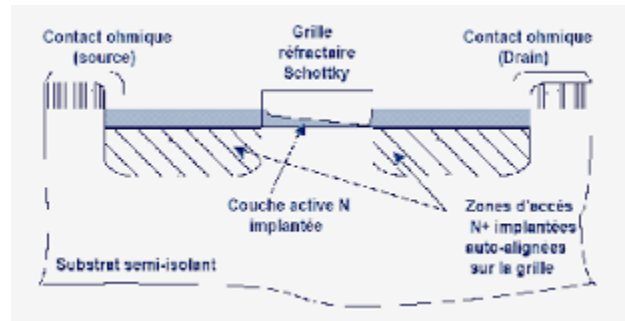


Figure II.3 : Vue en coupe du MESFET GaAs implanté auto-aligné [19]

Dans l'état actuel de la technique, la structure du transistor à effet de champ à contact Schottky est basée sur une couche active (canal) directement implantée dans un substrat semi-isolant. Une grille en métal réfractaire est ensuite déposée pour réaliser un contact Schottky. Les régions N+ sont ensuite implantées en utilisant le métal comme masque, ce qui donne deux régions d'accès auto-alignées sur la grille. La Figure II.3 montre une vue en coupe schématique d'un MESFET. La structure présentée met en évidence les différentes couches utilisées pour sa réalisation. La couche active est généralement une couche de type N recouvrant un substrat semi-isolant. Les contacts de source et de drain sont des contacts ohmiques par opposition aux contacts de grille Schottky [19].

II.2.3. Le transistor HEMT :

II.2.3.1. Historique du transistor HEMT :

Les transistors HEMT (High Electron Mobility Transistors) également connus dans la littérature sous le nom de TEGFET (Two Electron Gas Field Effect Transistors) ou MODFET (Modulation Doped Field Effect Transistors) ou SDHT (Selectively Doped Heterojunction Transistors) ont été inventés à la même époque. Conçu et fabriqué en 1980 par deux laboratoires : Thomson, France et Fujitsu, Japon. HEMT a été introduit en 1985 en tant que composant des

micro-ondes unique avec les performances de bruit les plus faibles au monde. Ce transistor a été utilisé pour la première fois dans le radiotélescope de 45 mètres de diamètre à Nobeyama, au Japon. En refroidissant le dispositif à la température de l'hélium liquide, il peut capter les signaux de molécules interstellaires à des milliers d'années-lumière de la Terre. Le HEMT est ensuite embarqué dans un récepteur de télévision pour recevoir les signaux des satellites géostationnaires (à une altitude de 36 000 km). Après cela, cette composante imprègne progressivement notre quotidien. Le HEMT représente une évolution majeure des MESFET (FET à jonction métal/semi-conducteur), passant à ces derniers depuis le début des années 1990[20].

II.2.3.2. Origine de la structure HEMT :

Le fonctionnement des transistors à effet de champ, tels que les MOSFET, est basé sur le concept de contrôle de charge, c'est-à-dire la capacité d'influencer la concentration de porteurs dans le plan du potentiel de grille.

Les nitrures du groupe III ne permettent pas d'utiliser la structure MOSFET pour des transistors performants car il n'existe pas de diélectrique de grille de bonne qualité comme c'est le cas en technologie silicium avec son oxyde natif SiO₂. Une structure MESFET de technologie GaN a été utilisée, mais il était difficile d'obtenir le dopage et la proximité grille-canal souhaités pour les dispositifs hautes performances (canal court). La structure HEMT offre les attributs attrayants d'une proximité étroite entre la grille et le canal conducteur (transconductance implicitement élevée) et d'une efficacité de drain élevée, qui, associées à une mobilité de champ faible élevée, une vitesse de dérive de crête élevée et une densité de feuille d'électrons élevée, font des HEMT GaN des dispositifs idéaux pour une puissance élevée. Applications RF et micro-ondes. La haute performance par largeur des transistors GaN se traduit par des dispositifs plus petits qui sont plus faciles à fabriquer et ont une impédance plus élevée, simplifiant l'adaptation d'impédance.

La structure du transistor HEMT a été inspirée par des expériences avec des puits quantiques et des super-réseaux AlGaAs/GaAs, où une forte concentration spatialement connotée de porteurs à l'hétérointerface a été découverte. La structure HEMT exploite ce phénomène en "enterrant" le 2DEG à l'hétérointerface, loin de l'interface de surface "rugueuse", et en le contrôlant par courbure de bande avec un potentiel de grille [10].

II.2.3.4. Présentation du HEMT en GaN :

Le HEMT apparaît comme une évolution majeure du MESFET. La différence est que le HEMT utilise une hétérojonction, c'est-à-dire une jonction entre des matériaux avec des bandes d'énergie différentes, pour laisser passer les électrons formant le courant drain-source dans un semi-conducteur non dopé afin de réduire le temps de transit et donc augmenter les performances en fréquence. En effet, la vitesse des électrons est d'autant plus grande que le dopage du semi-conducteur est faible, car la diffusion d'impuretés ionisées est réduite. Le transistor HEMT Al_xGa_{1-x}N/GaN est un dispositif à effet de champ au nitrure [21].

Les principaux avantages du HEMT Al_mGa_{1-m}N /GaN par rapport à ses concurrents sont :

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

Le but de la structure HEMT est de séparer les électrons libres de la couche semi-conductrice contenant des impuretés pour augmenter la mobilité des électrons. Pour cela, un matériau GaN à gap relativement faible est mis en contact avec un matériau ternaire Al_mGa_{1-m}N à gap important [22].

II.2.3.5. Définition de la structure du transistor HEMT GaN :

La structure d'un transistor de type HEMT au nitrure de gallium est très similaire à celle d'un transistor dans lequel le matériau semi-conducteur est l'arséniure de gallium, avec quelques différences distinctes. Une structure typique de transistor HEMT AlGa_xN/GaN est illustrée à la Figure II.4. Il se compose des matériaux suivants :

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

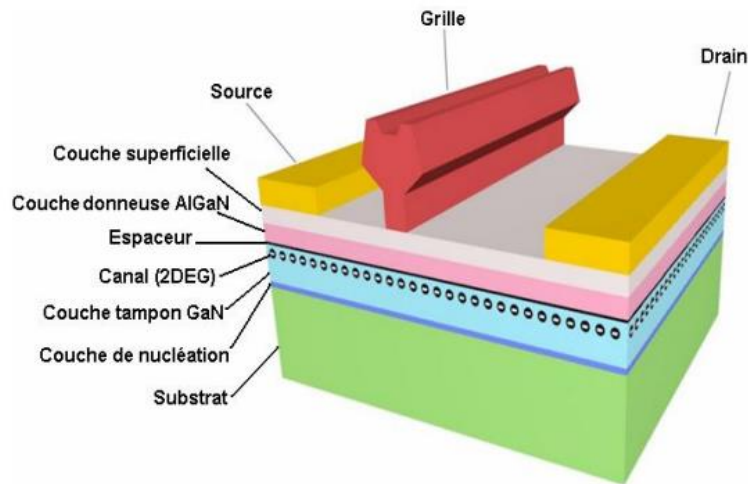


Figure II.4 : structure physique de base d'un HEMT AlGaN/GaN

II.2.3.6. Description des couches :

- **Couche cap layer (superficielle) :** Il s'agit d'une couche superficielle en matériau à faible bande interdite pour réaliser des contacts ohmiques pour la source et le drain. Cette couche est généralement fortement dopée pour réduire la résistance de contact et réduire la résistance d'accès [9].
- **Couche Schottky :** le métal Schottky en surface épuise tous les états de surface. Le potentiel à la surface est fixé par la hauteur de la barrière Schottky et la tension de grille appliquée. La densité élevée de défauts dans les dispositifs GaN introduit de nombreux états de surface qui rendent difficile l'obtention d'une barrière Schottky à faible fuite[10].
- **Couche donneuse :** Comme son nom l'indique, elle fournit des électrons libres à la structure. Le dopage, qui est généralement effectué à des niveaux de dopage au silicium, y joue un rôle important car il contribue à augmenter la concentration d'électrons fournis[9].
- **Espaceur (Spacer) :** Cette couche de matériau volontairement non dopé à grand gap permet de séparer les atomes donneurs d'électrons de la couche donneuse des électrons du canal. Les interactions électron-impureté sont ainsi réduites, il est à noter que plus cette couche est épaisse, meilleure est la mobilité des électrons dans le canal, en revanche, un espaceur plus fin (mince) favorise un meilleur transfert des électrons dans le canal [9].

- **Le canal :** C'est la partie la plus importante de HEMT. C'est là qu'un canal reçoit le gaz d'électrons bidimensionnel, et c'est cette couche qui va déterminer les performances du composant à travers ses propriétés de transport des électrons dans le matériau [9].
 - **La couche tampon :** En général, cette couche présente des propriétés structurales communes à celles du substrat et du matériau du canal. Elle permet une meilleure croissance du GaN, le type de face dépend en partie de cette couche et facilite le confinement des électrons en intercalant l'injection des porteurs vers le substrat [9].
 - **Couche de nucléation :** le but de cette couche est d'absorber une partie des contraintes liées au désaccord de maille entre le substrat et le GaN et de limiter la propagation de ces dislocations dans le reste de la structure [7].
 - **Le substrat :** C'est la couche sur laquelle poussent les matériaux épitaxiés. Sa sélection est déterminante pour la qualité de la pièce et son fonctionnement. Un mauvais choix du substrat peut en fait provoquer des dislocations pendant la croissance, ce qui peut rendre le composant non fonctionnel [9].
 - **La grille :** les empilements de grille Schottky et MIS (Metal-Insulator-Semiconductor) sont les empilements de grille les plus couramment utilisés dans les HEMT GaN. En raison de la couche isolante supplémentaire, les empilements MIS ont un courant de fuite inférieur à celui des empilements Schottky, mais ont également une transconductance réduite, c'est-à-dire le contrôle de grille sur le canal est le réservoir commun Ni / Au pour les grilles Schottky et Al₂O₃, SiN_x, SiO₂ sont les isolants les plus utilisés dans les SIG. Il peut également être avantageux d'avoir une couche de recouvrement (AlN ou GaN) sur l'AlGa_N. Une couche de recouvrement en AlN permet d'obtenir un courant plus élevé tout en réduisant considérablement le courant de fuite de grille. Cependant, l'utilisation d'un matériau AlN au lieu d'une couche de recouvrement à base de GaN atteint approximativement le même courant à l'état bloqué [4].
- Contact source et drain :** Ce sont généralement des contacts ohmiques. Un contact ohmique est une jonction non redresseuse à faible résistance qui permet au courant de circuler d'un métal à un semi-conducteur et vice versa. Le courant devrait théoriquement augmenter ou diminuer linéairement avec la tension appliquée. Les contacts ohmiques se forment lorsque le travail de sortie du métal est supérieur au travail de sortie du semi-conducteur de type p et inversement pour le semi-conducteur de type n. Cela assure le contact avec le 2DEG avec une tension appliquée. Cela garantit un contact avec le 2DEG avec le moins de résistance possible. Pour les HEMT, les contacts de source et de drain sont du même type [4].

II.2.3.7. Hétérojonction Al_mGa_{1-m}N / GaN :

L'un des avantages du nitrure de gallium est qu'il peut former des hétérostructures avec d'autres semi-conducteurs II-N. L'hétérostructure est constituée d'une couche de GaN juxtaposée (épitaxiée en continu) à une couche adjacente d'un alliage II-N. La plus intéressante des hétérostructures pour l'électronique de puissance est l'Al_mGa_{1-m}N/GaN, communément notée AlGa_mN / GaN.

La différence d'énergie de la bande interdite de deux matériaux formant la jonction entraîne un déplacement des bandes de conduction et de valence. Ce déplacement à l'interface joue un rôle important dans les propriétés électroniques de l'hétérostructure [6].

II.2.3.7.1. Diagramme des bandes de la structure HEMT AlGa_mN/GaN et fonctionnement de celui-ci :

Une couche de matériau ternaire Al_xGa_{1-x}N est appliquée sur la couche de GaN. Les deux matériaux ont des bandes interdites différentes. Dans notre structure, le matériau ternaire a le plus grand gap, il est de 3,96 eV pour Al_{0,3}Ga_{0,7}N. En revanche, GaN a un gap plus faible : 3,39 eV. C'est la juxtaposition de ces deux couches qui crée la discontinuité des bandes de conduction et de valence au niveau du diagramme de bande [22]. Il est illustré dans les figures ci-dessous.

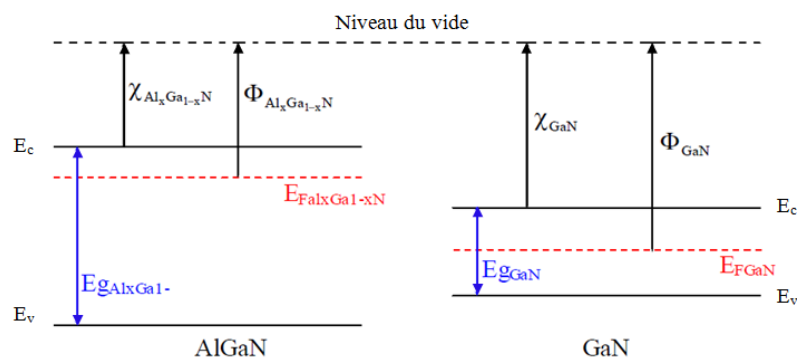


Figure II.5 : Diagrammes des bandes d'énergie des matériaux constituant l'HEMT GaN (pris séparément) à l'équilibre thermodynamique [22]

La différence de gaps est évidente ici, de sorte que le puits de potentiel sera situé sur le côté à faible gap du matériau, comme indiqué sur la Figure II.5.

Selon les règles développées en 1960 par R.L.Anderson, qui permettent la construction de diagrammes d'énergie associés à des structures à hétérojonction, les niveaux de Fermi des matériaux doivent correspondre. Ceci provoque une discontinuité dans les bandes de valence et de conduction, le niveau de référence (niveau de vide) devant rester strictement continu. Aussi, les bandes de conduction, de valence et de vide doivent rester parallèles entre elles tout en respectant les règles décrites ci-dessus. Ensuite, nous obtenons le diagramme de bande ci-dessous(FigureII.6) [22].

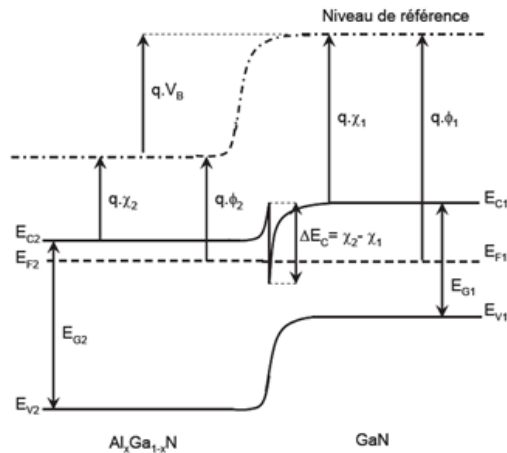


Figure II.6 : Diagrammes des bandes après jonction des deux couches qui constituent l'HEMT AlGa_xN/GaN l'équilibre thermodynamique [22]

II.2.3.8. Types de porte HEMT :

II.2.3.8.1. Normally on :

Comme son nom l'indique, l'appareil est normalement allumé. Ces dispositifs sont également appelés dispositifs en mode déplétion. Le canal de ces HEMT est formé intrinsèquement (sans dopage), ce qui se traduit par une tension de seuil négative. Ils nécessitent une tension de grille négative pour éteindre le dispositif. Tirant parti de la haute densité et de la mobilité des électrons dans un gaz d'électrons 2D, les HEMT sont des dispositifs à mode d'appauvrissement. Gaz d'électrons 2D, les HEMT ont montré un potentiel considérable pour les applications énergétiques à haut rendement énergétique en raison de l'amélioration des caractéristiques du GaN. Cependant, ce mode d'appauvrissement n'est pas souhaitable pour des applications à hautes puissances [4].

II.2.3.8.2. Normally off :

Les HEMT Normalement éteints sont des dispositifs à tension de seuil positive. Cette caractéristique est essentielle pour assurer la sécurité de fonctionnement de tout dispositif

d'alimentation électronique. Selon les recherches, l'augmentation d'AlGa_N (de 0 nm à 400 nm) augmente le V_{th} pour des grilles plus longues. Avoir une grille p-GaN sous la grille et un oxyde entre la grille et la barrière AlGa_N en fait un dispositif normalement éteint. Une couche de p-GaN partiellement encastrée sous la grille peut décaler le V_{th} positif d'environ 0,5 V et améliorer la stabilité. De même, l'utilisation de portes avec des fonctions de travail différentes peut déplacer la tension de seuil vers le côté positif. Ces techniques de recherche rendraient les HEMT GaN plus souhaitables aux applications haute puissance et RF [4].

II.2.3.9. Principe de fonctionnement d'un HEMT :

Une hétéro-interface entre deux matériaux avec une bande interdite suffisante est nécessaire pour obtenir la courbure de bande nécessaire pour former un 2DEG. Les électrons des impuretés du donneur dans le matériau à plus grande bande interdite (AlGa_N) près de la jonction avec le plus petit matériau à bande interdite (Ga_N) diffusent à travers l'hétéro-interface dans la bande de conduction inférieure, où ils sont confinés en raison de la barrière de potentiel formée par l'hétéro-interface. Le 2DEG résultant est spatialement séparé des atomes donneurs ionisés et ne bénéficie donc d'aucun (ou peu) transport de diffusion d'ions dans la région Ga_N non dopée, augmentant considérablement la mobilité électronique dans le canal, d'où le nom de transistor à haute mobilité électronique ou HEMT. Ce 2DEG formé à l'hétéro-interface peut être contrôlé en appliquant un potentiel sur la grille du transistor qui courbe les bandes d'énergie. De forts effets de polarisation dans les nitrures III (structure wurtzite) induisent des champs électriques élevés dans la structure, ce qui augmente encore la concentration de porteurs et le confinement spatial du 2DEG. La redistribution des électrons libres et faiblement liés se produit dans une tentative de protéger la charge induite par la polarisation. Pour la structure HEMT étudiée ici, une charge positive est induite sur la dalle à l'interface entre deux matériaux de polarisations différentes. Cette charge fixe positive attire les électrons mobiles, qui ont tendance à s'accumuler à l'interface, augmentant la concentration d'électrons dans le 2DEG. En théorie, les différences de polarisation aux interfaces métal/GaN et GaN/substrat doivent également être prises en compte. Cependant, la charge induite à l'interface de surface est complètement protégée par les porteurs au contact de la grille métallique. La charge de la feuille de l'interface GaN/substrat peut réduire la concentration de porteurs dans le canal si la masse est très mince, mais si l'on considère une masse épaisse, la charge de la feuille est protégée par le dopage de fond dans la masse. La source des électrons mobiles dans le 2DEG reste un sujet de débat. S'il

n'y a pas de contact métallique sur la surface du dispositif, la charge de la feuille des états de surface fournit les électrons, sinon la couche d'AlGa_N dopée à l'azote ou l'injection de porteur depuis la grille fournit les électrons. Le 2DEG sert de canal de courant qui permet une densité de courant élevée. La concentration d'électrons est principalement déterminée par le décalage de la bande de conduction, la concentration de dopage dans la ou les couches barrières et les effets de polarisation. Des anomalies dans le fonctionnement des HEMT AlGa_N / Ga_N peuvent se produire lorsque les électrons du canal sont piégés dans des états de surface non passivés d'AlGa_N, de Ga_N en vrac, entraînant un effondrement du courant, des « plis » I-V et une instabilité à long terme [10].

II.2.3.10. Formation de 2DEG :

Un gaz d'électrons bidimensionnel (2DEG) est un gaz d'électrons qui peut circuler librement dans deux dimensions mais qui est fortement contraint dans la troisième. Les HEMT Ga_N consistent en une hétérostructure AlGa_N/Ga_N qui produit un gaz d'électrons bidimensionnel. Le composé ternaire AlGa_N agit comme un canal pour le HEMT. La section suivante explique comment créer un 2DEG.

Le long de l'axe *c*, Ga_N peut être développé sous forme de plat Ga ou de plat N (Figure II.7). La direction de la polarisation spontanée est donnée par l'atome en vis-à-vis en raison de l'asymétrie de la taille des atomes. La polarisation spontanée des films d'AlGa_N à face Ga libérés est dirigée vers le substrat. Dans ces films épitaxiaux, il existe également une polarisation induite par la tension, connue sous le nom de polarisation piézoélectrique, en raison du décalage de réseau entre Ga_N et AlGa_N. La direction de polarisation est déterminée par les constantes élastiques du matériau. La polarisation piézoélectrique est positive pour les contraintes de compression et négative pour les couches soumises à des contraintes de traction à l'interface Ga_N/AlGa_N. La bande d'énergie, y compris le niveau de Fermi, s'incline vers l'interface AlGa_N/Ga_N en raison de la polarisation, et les électrons donneurs de surface AlGa_N se déplacent vers les interfaces AlGa_N et AlGa_N. Ga_N. Du fait de la différence de niveau de Fermi, ces électrons se propagent vers Ga_N et correspondent au niveau de Fermi. Cela provoque la courbure de la bande dans le Ga_N, créant un puits de potentiel triangulaire et confinant les électrons pour former un 2DEG. Puisqu'aucune impureté n'est présente, la diffusion des impuretés est limitée, ce qui entraîne une mobilité élevée [4].

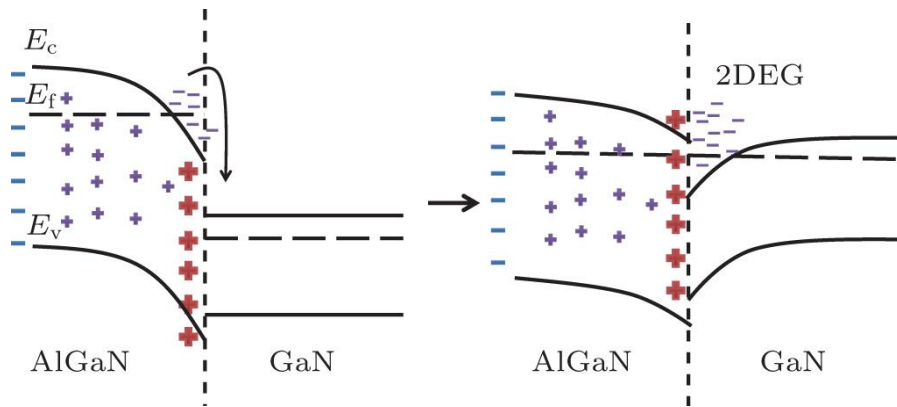


Figure II.7 : Formation de 2DEG à l'interface AlGaN/GaN [4]

II.2.3.11. Les caractéristiques électriques :

Le comportement électrique d'un HEMT est défini par les grandeurs qui déterminent leurs performances. Ces paramètres sont fortement liés à la technologie, tant au niveau du matériau qu'au niveau du processus [9].

II.2.3.11.1. Le courant drain-source I_{ds} :

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

$$I_{ds} = qW_s v(E(y)) \quad (\text{Eq.II.1})$$

Avec :

y : la position sur l'axe source-drain, w : la largeur de grille du composant. Sachez que $E(y)$ représente le champ électrique longitudinal sous la grille. $v(E(y))$ La vitesse des électrons dans le canal. La densité de charge dans le puits peut être augmentée en augmentant le dopage barrière. Cette limite est fixée par le champ électrique au niveau de la jonction Schottky, qui devient de plus en plus important avec l'augmentation du dopage et le risque d'induire un claquage [9].

II.2.3.11.2. La transconductance :

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

$$g_m = \left[\frac{\partial I_{ds}}{\partial v_{gs}} \right]_{v_{ds}=cst} \quad (\text{Eq.II.2})$$

g_m convertit l'efficacité de modulation du courant dans le canal par la tension appliquée à la grille. Nous chercherons donc à le maximiser [9].

II.2.3.11.3. La conductance de sortie :

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

$$g_d = \left[\frac{\partial I_{ds}}{\partial v_{ds}} \right]_{v_{gs}=cst} \quad (\text{Eq.II.3})$$

La conductance g_d traduit la conduction drain-source parasite de la structure. Elle peut servir d'indicateur de régime de saturation. Elle est principalement due aux états énergétiques introduits dans la bande interdite et aux effets de canal court [9].

II.2.3.12. La polarisation des HEMT AlGaIn/GaN :

Les HEMT GaN typiques peuvent avoir des densités de charge de canal supérieures à 1.10^{13} charge.cm⁻² sans dopage intentionnel de la structure. En effet, on constate qu'il y a un dopage résiduel de 1.10^{16} cm⁻³.

Ceci est principalement dû à la structure du transistor lui-même, où il existe deux types de polarisation : la polarisation piézoélectrique et la polarisation spontanée [23].

II.2.3.13. Recherche actuelle :

Avec la popularité croissante la recherche sur les dispositifs HEMT se poursuit. Cette section présente brièvement quelques projets de recherche récemment achevés qui ont été publiés dans des revues scientifiques réputées [23].

II.2.3.13.1. Oscillateur à cavité accordable RF utilisant un HEMT GaN :

Un oscillateur à base de GaN pour la bande X accordé par des systèmes micro électromécaniques à radiofréquence (RFMEMS) a été présenté par Hörberg et al. Pour un décalage de 100 kHz, le bruit de phase serait réduit de 140 à 129 dBc/Hz, ce qui est une valeur très faible. Les modulateurs à haute fréquence avec moins de bruit peuvent utiliser cet oscillateur [23].

II.2.3.13.2. Un MMIC avec un petit amplificateur de puissance GaN HEMT :

Récemment, un petit amplificateur de puissance en bande X MMIC a été publié avec une étude approfondie des performances. Cet amplificateur produit une bonne gamme de puissance de sortie (47,5-48,7 dBm). Les systèmes électroniques qui ont besoin d'émetteurs satellites ou de réseaux de radars à phase aéroportés peuvent être construits avec un tel amplificateur. La stabilité, la fiabilité et les performances de ces systèmes électroniques sont toutes améliorées par l'augmentation de la puissance de sortie de l'amplificateur. La Figure II.8 montre la puissance de sortie de cet amplificateur de puissance en mode impulsionnel et en mode onde continue (CW) avec variation de fréquence [23].

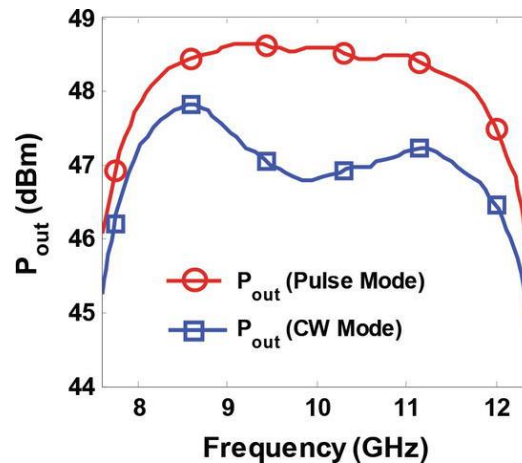


Figure II.8 : Puissance de sortie d'un amplificateur de puissance MMIC à HEMT GaN avec variation de fréquence en modes impulsionnel et continu [23]

II.2.3.13.3. Le "Q-spoiling" basé sur des HEMT à mode de déplétion :

Les bobines d'IRM sont désaccordées par le biais d'une procédure connue sous le nom de "Q-spoiling" pour des raisons de sécurité et de protection. Historiquement, les diodes PIN ont été utilisées pour ce type de découplage ou d'étouffement du Q, ce qui se traduit par un courant important et une forte consommation d'énergie. Lu et al ont mis au point une méthode différente d'étouffement Q, qui utilise des HEMT GaN en mode de déplétion à la place des diodes PIN. Il a été démontré que la méthode proposée désynchronise efficacement les bobines d'IRM tout en utilisant moins d'énergie et de courant que les solutions d'aspillage Q conventionnelles. En outre, elle offre les précautions de sécurité nécessaires pour désaccorder les bobines d'IRM [23].

II.2.3.13.4. Oscillateurs GaN HEMT à faible bruit de phase :

Un faible bruit de phase a été intégré avec succès dans une excellente figure de mérite (FOM) pour les oscillateurs à base de GaN HEMT. La conception a prouvé que la faible puissance de polarisation et le bruit de phase minimal sont compatibles. Le résultat est confirmé par les oscillateurs à résistance négative et de Colpitt, qui présentent tous deux les meilleurs FOM à ce jour [23].

II.2.3.13.5. La technologie utilisant des HEMT GaN présente un effet de coude :

L'effet de coude (KE) dans la technologie HEMT GaN avancée a été étudié par Crupi et al. Une recherche complète sur l'effet de coude est effectuée avec des changements de température et de conditions de polarisation pour une meilleure compréhension. Il est démontré que la transconductance du dispositif est principalement responsable de la dépendance de l'effet

KE aux conditions de fonctionnement. Les ingénieurs en hyperfréquences qui ont besoin de comprendre le KE pour construire et modéliser des dispositifs avec des HEMT GaN pourraient bénéficier de la caractérisation du KE anormal [23].

II.2.3.13.6. Commutateurs GaN HEMT pour convertisseurs de puissance à 600 V :

Des démonstrations expérimentales de commutateurs GaN HEMT à 600 V ont été réalisées afin de comparer leurs performances à celles des commutateurs à transistors à base de silicium tels que les IGBT et les MOSFET. Bien qu'ils soient nouveaux, les commutateurs HEMT surpassent en termes de performances leurs homologues MOSFET à base de silicium, plus expérimentés. Il a été démontré que les commutateurs GaN ont une efficacité de conversion supérieure à celle des commutateurs MOSFET. Ensuite, des comparaisons expérimentales sont effectuées entre les IGBT et les commutateurs GaN. Les IGBT à corps SiC et Si ont tous deux été pris en considération. Comme le montre la figure 10, on a découvert qu'à des fréquences de commutation plus élevées, les commutateurs IGBT perdent de l'efficacité relativement rapidement, tandis que les commutateurs HEMT perdent de l'efficacité de manière monotone. Par conséquent, pour les applications de commutation de convertisseurs de puissance à haute fréquence, les HEMT sont plus performants que les MOSFET et les IGBT à base de Si.

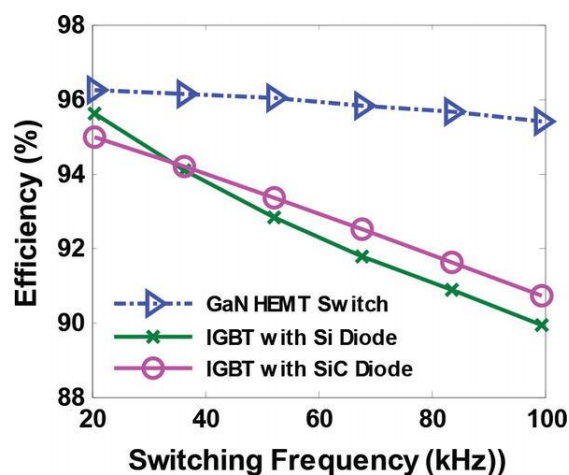


Figure II.9 : Comparaison de l'efficacité des commutateurs HEMT GaN avec des commutateurs IGBT à corps Si et des commutateurs IGBT à corps SiC [23]

Les développements futurs dans les domaines de l'électronique, des communications, de la physique et autres semblent particulièrement prometteurs pour les dispositifs HEMT basés sur le confinement bidimensionnel des porteurs. Les HEMT à base de GaAs, d'InP et de GaN continueront à évoluer dans le sens d'une plus grande intégration, d'une plus grande fréquence, d'une plus grande puissance, d'une plus grande efficacité, d'un fonctionnement plus silencieux et d'un coût plus faible. Le GaN, en particulier, offre des tubes à vide à haute puissance et à

haute fréquence et rend les systèmes de communication plus légers, plus efficaces et plus fiables.

Afin d'exploiter les caractéristiques particulières du 2DEG dans divers systèmes de matériaux, les HEMT continueront à se transformer en d'autres types de FET. Les HEMT à base de GaN dans l'électronique de puissance peuvent avoir un impact significatif sur les systèmes utilisés dans les applications grand public, industrielles, de transport, de communication et militaires. Les structures MOS-HEMT ou MISFET, en revanche, sont plus susceptibles d'être utilisées dans un mode d'amélioration avec très peu de courant de fuite.

Si CMOS technology is moving quickly in the direction of 10 nm gates. Future generation ultra-dense chips' power dissipation management will present a significant challenge in achieving this. Ce problème pourrait être résolu par une diminution de la tension de fonctionnement. Avec le CMOS Si, il est actuellement difficile d'y parvenir tout en maintenant des performances élevées. Les dispositifs construits sur des puits quantiques, tels que les HEMT InGaAs ou InAs, ont un potentiel très élevé. Par conséquent, les HEMT pourraient permettre à la loi de Moore de se poursuivre pendant encore plusieurs années, ce qui serait énorme pour la société.

D'après les recherches précédentes, on peut prédire que l'étude de nouveaux modèles et topologies de dispositifs HEMT ouvrira sans aucun doute de nouvelles perspectives sur la physique des électrons quantifiés, qui laisse souvent perplexe. L'exposant le plus élevé pour la pureté sans défaut et l'ordre atomique, l'effet Hall quantique fractionnaire (FQHE), a été observé dans le ZnO, le SiGe et le GaN, ce qui garantit l'avenir fructueux des dispositifs HEMT.

Pour ces types de dispositifs, l'idée de divers types de capteurs physiques et biologiques est encore assez nouvelle. Les micro-capteurs de Hall à haute sensibilité sont rendus possibles par l'ultra-haute mobilité du système à base d'InAlSb/InAsSb, qui peut être utilisé pour une variété d'applications, telles que la bio reconnaissance et la microscopie à sonde de Hall à balayage. Des HEMT micro-usinés à base d'AlGaAs/GaAs ont été présentés comme des capteurs magnétiques à effet Hall à trois axes. Les futurs compas électroniques et la navigation pourraient utiliser ces gadgets. Les dispositifs construits sur l'architecture 2DEG peuvent également utiliser la détection, le mélange et la multiplication de fréquence THz². Le GaN et les matériaux similaires sont des semi-conducteurs chimiquement stables avec une polarisation piézoélectrique significative. Il est possible de créer des capteurs complexes en combinant des

dispositifs 2DEG à base de GaN fonctionnalisés avec des résonateurs autonomes. Ceux-ci peuvent fournir des techniques pour mesurer une variété de variables, y compris la viscosité, le pH et la température.

Sans citer de sources, il est prévu que le développement de cette technologie dans l'industrie machine à machine (M2M) sera utilisé dans diverses tâches de détection basées sur l'informatique en nuage. La nouvelle technologie de détection, qui possède des propriétés de vitesse, de mobilité et de sensibilité élevées, peut considérablement profiter à une variété d'applications, y compris la recherche environnementale, la biotechnologie et l'analyse structurelle. Au niveau des dispositifs, la technologie HEMT devrait modifier de manière significative l'infrastructure sociale intelligente. Cette technologie peut être une exception dans certaines situations, comme dans les systèmes de villes intelligentes, les systèmes de transport, l'industrie alimentaire, la logistique, l'agriculture, les sciences de l'environnement et les systèmes éducatifs.

Un marché de consommation robuste entraînera des progrès constants dans les matériaux, les substrats et les technologies à mesure que l'éclairage à semi-conducteurs à base de III-N se répandra. Par analogie, l'électronique III-N s'occupera de l'équivalent électronique des ampoules électriques, les tubes, tandis que l'optoélectronique III-N s'occupera des ampoules électriques [23].

II.2.3.15. Les applications du HEMT :

La mondialisation rapide des communications multimédias basées sur l'internet nécessite l'expansion de la capacité du réseau de transmission. Les options les plus intéressantes pour dépasser la limite de vitesse sont les dispositifs à base de HEMT, qui présentent un gain élevé et des mécanismes sans bruit. De nombreuses applications potentielles ont été proposées pour les dispositifs à base de HEMT, qui sont développés et produits par diverses entreprises dans le monde. Certaines applications importantes sont présentées dans cette section sans tenir compte de toutes ces options [23].

II.2.3.15.1. Communication à large bande :

En remplaçant les transistors Si, la communication cellulaire est devenue l'une des applications non militaires les plus importantes des dispositifs HEMT. L'utilisation de ces applications de communication à large bande/multi-bande présente de nombreux avantages. L'un d'entre eux est l'augmentation de la largeur de bande relative pour un niveau de puissance

spécifique. Certains concepts innovants de circuits et de systèmes permettent d'obtenir une largeur de bande plus efficace. Tout en conservant la même puissance de sortie, la linéarité s'est améliorée. Il a également été prouvé que l'utilisation de dispositifs GaN HEMT réduisait les effets de mémoire [23].

II.2.3.15.2. Composants radar et applications spatiales :

Les deux qualités les plus importantes pour la création de composants radar sont un gain élevé et des amplificateurs à faible bruit. Les HEMT GaN constituent l'une des premières options pour de tels composants. Les HEMT à base de GaN sont utilisés pour construire des réseaux de capteurs électroniques actifs pour les radars aériens, les radars de défense aérienne au sol et les radars navals. La littérature a également abordé les applications des missiles en bande Ka à 35 GHz. En raison de leurs excellentes propriétés de faible bruit, les HEMT discrets sont presque toujours utilisés comme préamplificateur dans un récepteur DBS typique, suivi par un ou plusieurs circuits intégrés hyperfréquences monolithiques (MMIC) GaAs MESFET. Pour un coût supplémentaire relativement faible, l'utilisation d'un préamplificateur HEMT à faible bruit a considérablement amélioré les performances du système. Un HEMT de 0,25 µm et trois puces MMIC GaAs utilisés dans un convertisseur abaisseur à faible bruit ont démontré des performances incroyables pour un système commercial, avec un facteur de bruit du système inférieur à 1,3 dB et un gain d'environ 62 dB de 11,7 GHz à 12,2 GHz. Étant donné qu'ils ont besoin d'une protection supplémentaire contre l'environnement hostile de l'espace pour survivre, l'équipement micro-ondes utilisé pour les applications spatiales est très coûteux. En outre, les engins spatiaux doivent être lancés, ce qui signifie que l'équipement doit être capable de résister à des niveaux élevés de vibrations et de chocs sans subir de dommages. Les HEMT ont une large gamme d'applications et peuvent être fabriqués pour résister à ces circonstances. Un composant hyperfréquence est souvent dix à cent fois plus cher pour les applications spatiales que pour les applications commerciales. Les performances cryogéniques exceptionnelles des HEMT ont été utilisées par le personnel du NRAO pour capter des signaux lors du passage de la sonde Voyager sur Neptune [23].

II.2.3.15.3. Applications des capteurs :

Les capteurs chimiques sont devenus de plus en plus importants au cours des dix dernières années pour des utilisations telles que la sécurité alimentaire, la surveillance environnementale et médicale et la sécurité intérieure. Le résultat souhaité est de pouvoir détecter sélectivement

un analyste cible avec une spécificité et une sensibilité élevées tout en analysant simultanément une large gamme de gaz et de liquides environnementaux et biologiques sur le terrain. Le canal conducteur 2DEG des HEMT est situé extrêmement près de la surface et est très sensible à l'adsorption d'analytes. Pour détecter les gaz, les ions et les produits chimiques, les capteurs HEMT peuvent être un bon substitut [23].

II.2.3.15.4. Détection de l'ADN :

En tant que couche de liaison à la surface AlGaIn, les HEMT AlGaIn/GaN fonctionnalisés dans la région de la grille à l'aide d'oligonucléotides 3' modifiés par des thiols sans étiquette peuvent détecter l'hybridation d'ADN cibles appariés. L'ADN modifié par des thiols et lié de manière covalente à l'or sur la zone de grille est immobilisé, comme le montre la XPS. Lorsque cet ADN cible apparié est introduit dans l'ADN sonde sur la surface, le courant drain-source diminue clairement de 115 A, ce qui démontre le potentiel de la détection des séquences d'ADN pour la détection biologique [23].

II.2.3.15.5. Détection des protéines :

Les structures HEMT AlGaIn/GaN non traitées peuvent être activées en utilisant de l' amino-propyl silane dans la zone de la grille, qui peut agir comme une couche de liaison à la surface AlGaIn pour la fixation de la biotine. Les protéines constituées de streptavidine ont une très grande affinité pour la biotine. Les charges des produits chimiques attachés ont un impact sur le courant du dispositif lorsqu'ils sont attachés aux HEMT AlGaIn/GaN. Dès que cette protéine est rassemblée à la surface, le dispositif diminue clairement en 4 A, ce qui indique la détection de protéines [23].

II.2.3.15.6. Détection du pH :

Dans la région de la grille, le diélectrique de grille Sc₂O₃ est plus performant que l'oxyde natif ou l'oxyde induit par l'ozone UV. Une variation linéaire du courant de 37 A/pH est observée dans les HEMT non gérés avec Sc₂O₃ dans la zone de la grille entre pH 3 et 10. Sur l'ensemble de la gamme de pH, les capteurs de pH HEMT fonctionnent de manière cohérente avec une résolution de 0,1 pH. Les résultats suggèrent que les HEMT peuvent être utiles pour surveiller les changements de pH de la solution dans la plage de 7 à 8, ce qui est pertinent pour l'évaluation du sang humain [23].

II.2.3.16. Les inconvénients des HEMTs :

L'existence d'une conduction horizontale entraîne deux lacunes importantes dans les (MOS)HEMT. Le 2DEG, un puits d'électrons remarquablement petit situé près de la surface, est l'endroit où passe tout le courant. L'épaisseur de ce canal conducteur n'est que de 50 nanomètres environ. À ce stade, un échauffement important est produit, ce qui dégrade les caractéristiques de transport et active les pièges en profondeur déjà présents dans la structure, ce qui réduit les performances du dispositif. Une conduction verticale est nécessaire pour permettre au courant de traverser la plaquette ou le semi-conducteur en vrac et de disperser la chaleur de manière plus uniforme afin de surmonter cet inconvénient. La proximité du canal conducteur avec la surface est le deuxième inconvénient des (MOS) HEMTs. Des tensions de drainage élevées créent un champ électrique très fort sous la grille côté drain, ce qui soumet le système électrique à des contraintes. Les électrons de la grille peuvent passer d'un état de surface à l'autre sur la surface AlGa_N grâce à des pièges et à des liaisons pendantes, ce qui entraîne la formation d'un courant de fuite de surface entre la grille et le drain. Le courant drain-source s'effondre en conséquence et la grille se désintègre prématurément. La conduction verticale est nécessaire pour distribuer et restreindre le champ électrique dans le matériau afin de trouver une solution à ce problème [24].

II.3. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons discuté des transistors à effet de champ et nous nous sommes concentrés sur les HEMT. Les caractéristiques des dispositifs HEMT et leurs performances ont été abordées. En outre, ces derniers temps, les oscillateurs, les amplificateurs, les commutateurs et les diodes basés sur les HEMT AlGa_N/Ga_N ont gagné en popularité. Ils ont été passés en revue sur la base des recherches récemment publiées. Les tendances futures de la recherche sur les HEMT ont été examinées sur la base de ces études de recherche les plus récentes. Enfin, de nombreuses applications HEMT importantes ont été présentées pour souligner l'énorme potentiel de la technologie HEMT basés sur l'hétérostructure AlGa_N/Ga_N. Ces applications comprennent les communications à large bande et les communications radar, les constituants spatiaux et les capteurs, les détections d'ADN, de protéines et de pH.

Chapitre 3

Simulation et
interprétation des
résultats

Partie 1 : Modélisation physiques et outils de simulation

III.1. Introduction :

La première partie du chapitre trois décrit le simulateur SILVACO -TCAD, son principe de fonctionnement et son module de simulation pour le comportement électrique des composants de transistor HEMT AlGaIn/GaN. Une brève description des outils et les différentes étapes de simulation utilisées ont été fournies.

Le but de cette partie est de faire un lien entre le monde expérimental et le monde théorique afin d'économiser le temps et le coût de développement, Cet outil permet donc l'optimisation et la calibration des simulateurs de procédés et de dispositifs.

III.2. Description du logiciel SILVACO :

Silvaco (Silicon Valley Corporation) est un environnement logiciel utilisé pour développer et prévoir les performances des dispositifs semi-conducteurs. Il s'agit d'un dispositif utilisé pour développer des dispositifs semi-conducteurs avant qu'ils ne soient produits. Il est très utile pour la création de nombreuses initiatives de recherche. TCAD-SILVACO propose de nouveaux modèles physiques qui utilisent des méthodes et des algorithmes numériques efficaces, de nouvelles techniques de maillage, l'optimisation des solutions linéaires, etc. qui permettent aux résultats de la simulation d'être très proches de ceux de la pratique. Le principal avantage de ces simulateurs est qu'ils permettent de visualiser des processus physiques difficilement accessibles mais néanmoins observables. Vous pouvez utiliser les modules TCAD-SILVACO pour :

- La simulation des processus technologiques de production par le module Athena ;
- La simulation des dispositifs électriques par le module Atlas [23].

III.2.1. Le logiciel ATHENA :

Pour les processus utilisés dans l'industrie des semi-conducteurs, notamment les processus de diffusion, d'oxydation, d'implantation d'ions, de gravure, de lithographie et de dépôt, le logiciel de simulation ATHENA de TCAD-SILVACO offre des capacités de simulation générales. Il permet des simulations rapides et précises de tous les processus de production utilisés dans les composants CMOS, bipolaires, SOI, optoélectroniques, MEMS et de puissance. Une fois de plus, le logiciel offre des données cruciales pour la conception et l'amélioration des processus techniques tels que les concentrations de porteurs, les profondeurs

de jonction, etc. Le module DECKBUILD de TCAD-SILVACO est utilisé pour créer le programme de simulation (spécifié en entrée) afin de simuler divers processus techniques et phénomènes physiques. Le module TONYPLOT est ensuite utilisé pour visualiser la structure du résultat [25].

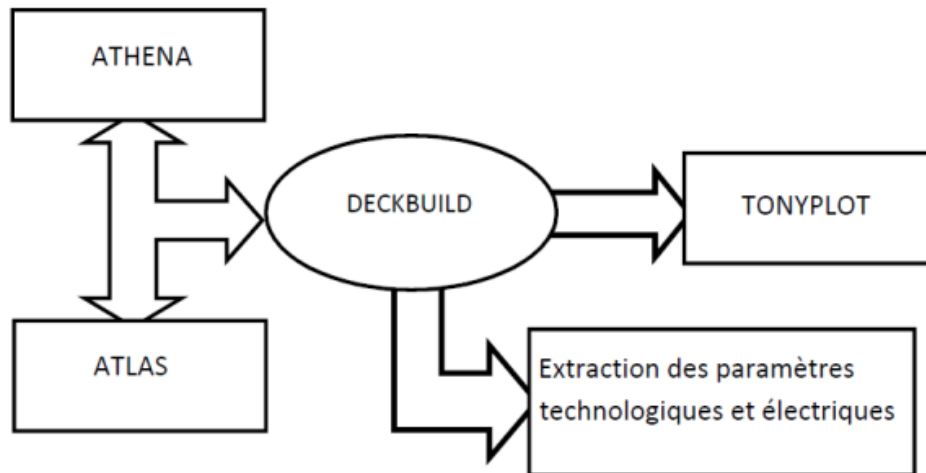


Figure III.1 : Schéma synoptique des modules utilisés dans la simulation par TCAD-SILVACO [25]

III.2.2. Le logiciel ATLAS :

Le logiciel de simulation ATLAS est un simulateur bidimensionnel de modélisation de composants qui permet de prévoir les propriétés électriques de la majorité des composants semi-conducteurs en régime continu, transitoire ou fréquentiel. Il fournit des détails sur la distribution interne de variables telles que les lignes de courant, le champ électrique ou le potentiel, en plus du comportement électrique "externe". Pour ce faire, il calcule numériquement l'équation de Poisson et les équations de continuité des électrons et des trous (en deux dimensions) en un nombre fini de points créant le maillage de la structure choisie par l'utilisateur ou par l'ordinateur. Il existe cinq groupes de commandes cinq et ils doivent être correctement organisés (Figure III.2). Un avis d'erreur apparaît et le programme ne fonctionne pas correctement si l'ordre n'est pas respecté. Par exemple, le simulateur ne prendra pas en considération les paramètres ou les modèles de matériaux qui ne sont pas dans l'ordre approprié [26].

Groupe		Commandes
1. Spécification de la structure	—————	MESH REGION ELECTRODE DOPING
2. Spécification des modèles des matériaux	—————	MATERIAL MODELS CONTACT INTERFACE
3. Sélection de la méthode	—————	METHOD
4. Spécification des solutions	—————	LOG SOLVE LOAD SAVE
5. Analyse des résultats	—————	EXTRACT TONYPLOT

Figure III.2: Ordre des groupes des commandes d'Atlas (Les commandes fondamentales afférentes)[26]

-Les commandes fondamentales sont :

MESH : Cette commande permet de générer un maillage ou de lire un maillage déjà défini. Le triangle est le composant du maillage qui est utilisé.

ELECTRODE : indique l'emplacement et les noms des électrodes dans la structure.

DOPING : Définit la nature et le profil du dopage.

MATERIAU : relie des paramètres physiques aux matériaux utilisés dans la simulation, par exemple : affinité électronique, énergie de gap, fonction de densité d'états, taux de saturation, durées de vie des porteurs minoritaires, etc... (Attention car le logiciel a des paramètres matériaux par défaut pour les semi-conducteurs standards).

MODELES : Avec l'aide de cette instruction, vous pouvez utiliser les modèles physiques intégrés au logiciel. Les modèles de Shockley Read Hall (SRH), d'Auger et les modèles relatifs aux statistiques des porteurs de Boltzmann, ainsi que les modèles de Fermi et autres modèles de recombinaison, sont quelques exemples de logiciels.

CONTACT : indique les propriétés physiques de l'électrode : anode, cathode, drain, etc.

INTERFACE : Indique les caractéristiques de l'interface à la limite semi-conducteur/isolant, telles que la densité de charge et le taux de recombinaison de surface.

METHODE : énumère les techniques numériques à appliquer aux équations ainsi que les variables qui affectent ces procédures. Les techniques numériques telles que celles de Gummel et de Newton sont des exemples de techniques qui peuvent être décrites à l'aide de cette instruction.

LOG : sauvegarder toutes les caractéristiques finales de la simulation dans un fichier (ouvre un fichier journal (log en minuscules signifie le type de fichier, LOG majuscule signifie la commande dans le programme)). Tout type de données, qu'elles soient CC, transitoires ou CA, générées par la commande SOLVE sont stockées après la commande LOG (les informations stockées sont donc de type électrique et sont fonction de la tension de polarisation ou de la source lumineuse, par exemple). S'il existe plusieurs instructions LOG dans le programme, chaque fois que le fichier journal précédemment ouvert est fermé et qu'un nouveau fichier journal est ouvert.

SOLVE : demande à Atlas d'exécuter une solution pour un ou plusieurs points de polarisation.

LOAD : charge les solutions précédentes à partir de fichiers comme conditions initiales pour d'autres points de polarisation.

SAVE : enregistre toutes les informations relatives à un point nodal du maillage dans un fichier de sortie (les fichiers de sortie sont de type structure). Les informations sauvegardées correspondent à un état électrique spécifique.

EXTRACT: commands of this type are used to extract the precise values of the parameters of the parameters of the two types of log or solution files.

TONYPLOT : lance l'outil "TonyPlot" pour le post-traitement graphique des données. Il permet de représenter graphiquement les solutions obtenues tout au long de la simulation.

BEAM est une autre commande importante qui se trouve au niveau 4 des groupes de commandes. BEAM indique un signal d'entrée optique sous la forme d'un faisceau lumineux collimaté (mono ou multi-spectral). Le faisceau ainsi déclaré est activé et utilisé par la commande SOLVE, en l'occurrence par le module Luminous. Par conséquent, BEAM est utilisé pour simuler des courants en réponse à des réponses lumineuses ou spectrales.

DECKBUILD : pour les dispositifs de développement de processus et de simulation de plate-forme d'entrée, Deck Build est un environnement d'exécution graphique interactif. Il comporte une fenêtre pour la construction de la plate-forme d'entrée, une fenêtre pour la sortie et le contrôle du simulateur, et un ensemble de fenêtres contextuelles pour chaque simulateur qui

offrent des capacités complètes de langage et d'exécution [26].

III.2.3. Spécification de la structure :

Silvaco Atlas reçoit des fichiers d'entrée contenant des programmes de simulation de DeckBuilt. Ces commandes sont exécutées en invoquant Atlas avec la commande suivante : go atlas Le format de la commande Atlas est le suivant <STATEMENT><PARAMETER>=<VALUE>

III.2.3.1. Le Maillage :

Les maillages jouent un rôle important dans l'obtention d'une bonne simulation. Cela doit être fait avec beaucoup de soin pour garantir la fiabilité des résultats. La méthode numérique utilisée pour résoudre les équations physiques est la méthode des éléments finis. Son principe de base est de discrétiser les équations à traiter par éléments. Les éléments qui définissent la cellule unitaire utilisée par le simulateur sont des prismes. Afin d'obtenir des résultats fiables et précis, la finesse du maillage doit être définie en termes de variations de grandeurs physiques. Le choix du maillage doit être fait de manière à réaliser un compromis entre rapidité d'exécution et précision du résultat. Le maillage à l'interface barrière/canal doit être dense pour positionner le gaz 2D le long de l'axe y. Il est également très fin sous les électrodes de grille et de part et d'autre de chaque électrode le long de l'axe des abscisses. La grille conçue pour notre appareil est illustrée dans l'image ci-dessous [26].

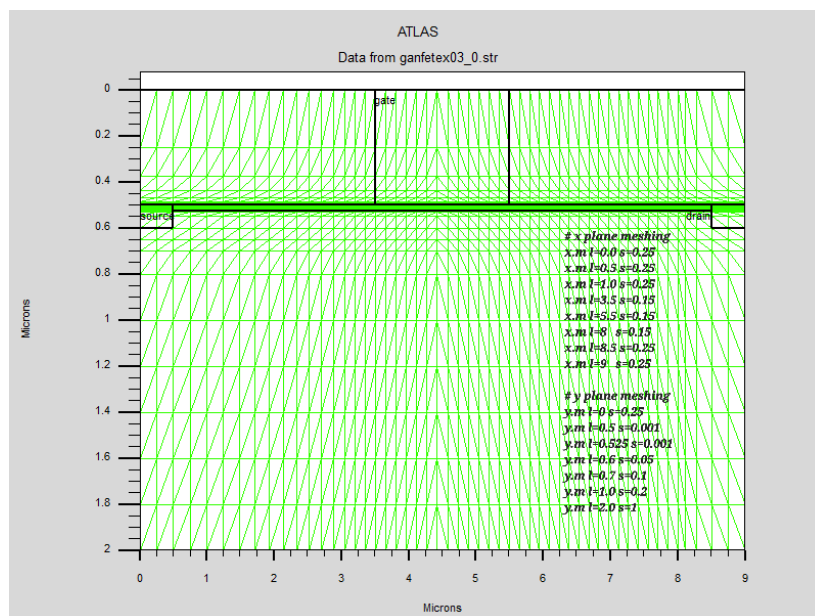


Figure III.3 : spécification de maillage

III.2.3.2. Spécification des régions et les électrodes :

Il est nécessaire de définir les régions qui constituent les composants microélectroniques. La définition de ces régions se fait en déclarant le type de matériau et sa position dans les deux dimensions qui traduisent épaisseur et largeur. Les électrodes peuvent également être définies dans ATLAS en identifiant leur position en x et y et leur profondeur. La Figure III.2 montre les régions du maillage. Les limites de chaque région sont clairement identifiées dans les axes x et y et l'emplacement de la source, de la porte et du drain [26].

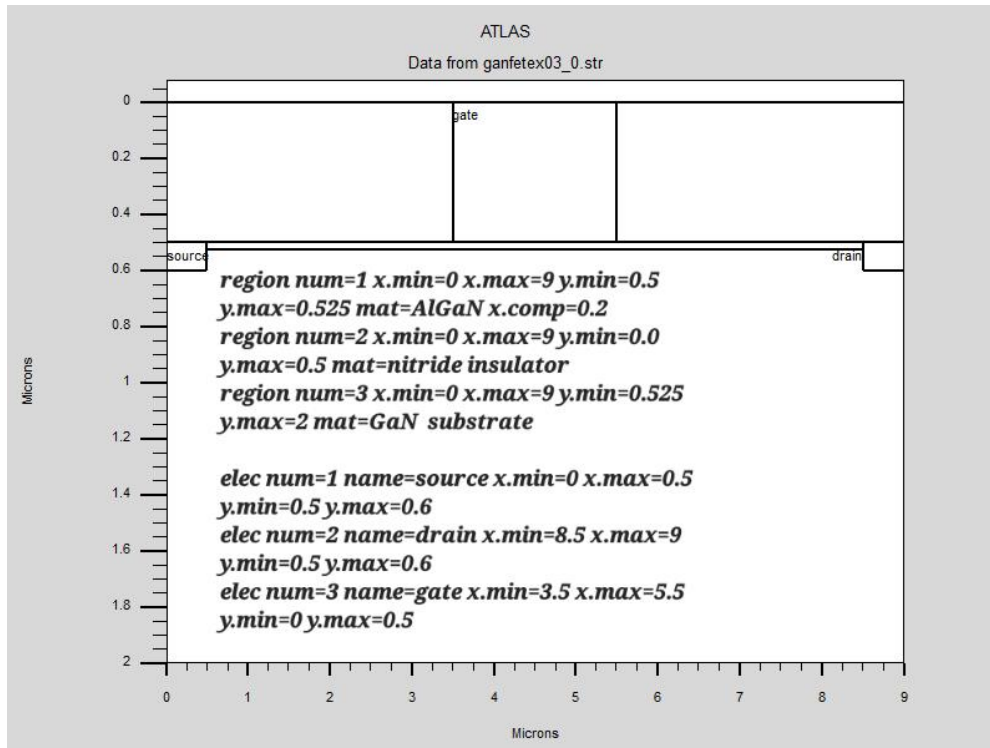


Figure III.4 : Spécification des régions et les électrodes

III.2.3.3. Attribution de matériaux pour les régions :

Les transistors à haute mobilité électronique peuvent être fabriqués à partir de nombreux types de matériaux différents tels que le nitrure de gallium, l'arséniure de gallium et plusieurs autres substrats [26].

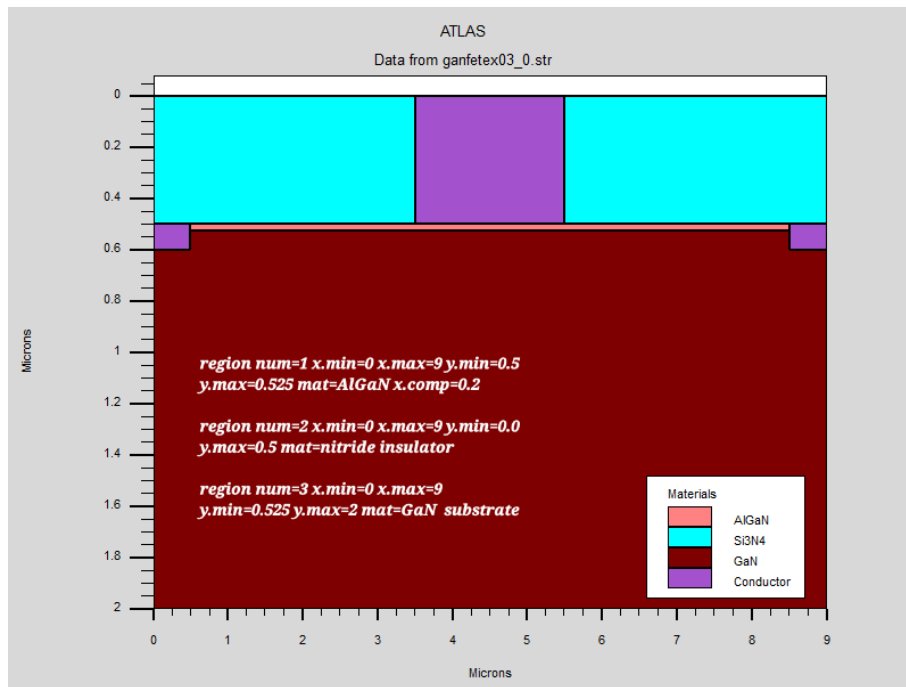


Figure III.5 : Attribution de matériaux pour les régions

III.2.3.4. Dopage :

La spécification structurale finale est le dopage. Le format pour définir le dopage est :

DOPING <distribution type> <dopant_type> <position parameters>

III.2.3.5. Modèles physiques :

Les modèles physiques peuvent être classés en cinq catégories : la mobilité, recombinaison, les statistiques des transporteurs, l'ionisation par impact et l'effet tunnel. La syntaxe de commande du modèle est :

MODELS <model flag> <general parameter> <model dependent parameters>

La sélection du modèle dépend du matériau sélectionnés pour la simulation. L'exemple suivant active plusieurs modèles. Modèle CONMOB FLDMOB SRH CONMOB est un modèle dépendant de la concentration du dopage. FLDMOB est un modèle dépendant du champ électrique parallèle. SRH est un modèle de Shockley-Read-Hall pour les statistiques des porteurs de charge [26].

III.2.3.6. Beam :

Lorsque l'éclairage est essentiel pour un dispositif (comme dans les cellules solaires), il est possible d'utiliser de nombreuses sources lumineuses et de modifier leur emplacement, leur

orientation et leur intensité. Le spectre lumineux peut être décrit en profondeur. Le simulateur inclut également la polarisation, la réflectivité et le traçage des rayons.

III.2.3.7. Contact :

Les caractéristiques de l'électrode sont déterminées par le contact. La syntaxe de contact est la suivante :

CONTACT NUMBER=<n> |NAME=<ename>|ALL

Ci-dessous un exemple de commande Contact :

CONTACT NAME=anode current

III.2.4. Méthode de la solution :

ATLAS comprend plusieurs méthodes numériques pour calculer des solutions aux problèmes des dispositifs à semi-conducteurs. Il existe trois grands types de méthodes numériques. La première méthode est la méthode GUMMEL. Ceci est utile lorsque le système d'équations est faiblement couplé mais n'a qu'une convergence linéaire. La méthode suivante est la méthode de NEWTON, qui est utile lorsque le système d'équations est fortement couplé et converge quadratiquement. Cette méthode prend intrinsèquement plus de temps à résoudre pour des quantités constantes ou faiblement couplées et nécessite également une estimation initiale plus précise du problème pour parvenir à la convergence. La dernière méthode est la méthode de blocage, qui peut réduire le temps de simulation.

III.2.5. Spécification de la solution :

Après avoir choisi une méthode numérique, l'étape suivante consiste à spécifier la solution. Les spécifications de la solution sont classées en commandes log, solve, load et save.

III.2.5.1. Log :

Toutes les caractéristiques du terminal sont enregistrées dans un fichier par LOG. Après une commande LOG, toutes les données DC, transitoires ou AC créées par la commande SOLVE sont enregistrées. La commande LOG est illustrée par la commande suivante : **LOG OUTFILE =myoutputfile.log**. L'exemple enregistre les données de courant et de tension dans le fichier myoutputfile.log.

III.2.5.2. Solve :

La commande SOLVE suit l'instruction LOG. SOLVE effectue une résolution pour un ou plusieurs points de polarisation. Voici un exemple de la commande SOLVE.

Solveinit : la valeur d'électrode spécifiée est 0.

III.2.5.3. Load et save :

La commande LOAD permet d'introduire des solutions antérieures à partir de fichiers, à titre d'estimation initiale pour d'autres tâches de polarisation. SAVE écrit toutes les informations d'un point nodal dans un fichier de sortie. Les méthodes LOAD et SAVE sont illustrées ici. **SAVE OUTF=HEMT.STR** Après une commande SOLVE, les informations sont enregistrées dans le fichier HEMT.STR. Ensuite, dans une nouvelle simulation, chargez HEMT.STR comme suit :

LOAD INFILE=HEMT.STR

III.2.6. Analyse des résultats :

Lorsqu'une solution à un problème de dispositif semi-conducteur a été trouvée, les informations peuvent être représentées graphiquement à l'aide de l'instruction TONYPLOT. En outre, comme illustré à la figure III.6, les paramètres du dispositif peuvent être extraits à l'aide de la commande EXTRACT. L'instruction EXTRACT est utilisée pour extraire la caractéristique courant/tension d'un transistor dans l'exemple suivant. Ces données sont sauvegardées dans le fichier IVcurve.dat. TonyPlot crée ensuite un graphique en connectant les données du fichier IVcurve.dat [26].

III.2.7. Organisation de simulation :

L'organigramme de la figure III.8 est utilisé pour décrire le programme de simulation de cellules solaires, qui comprend des composants clés structurés, afin d'améliorer la compréhension, de contribuer au développement continu des deux parties et de minimiser les répétitions et les confusions inutiles [26].

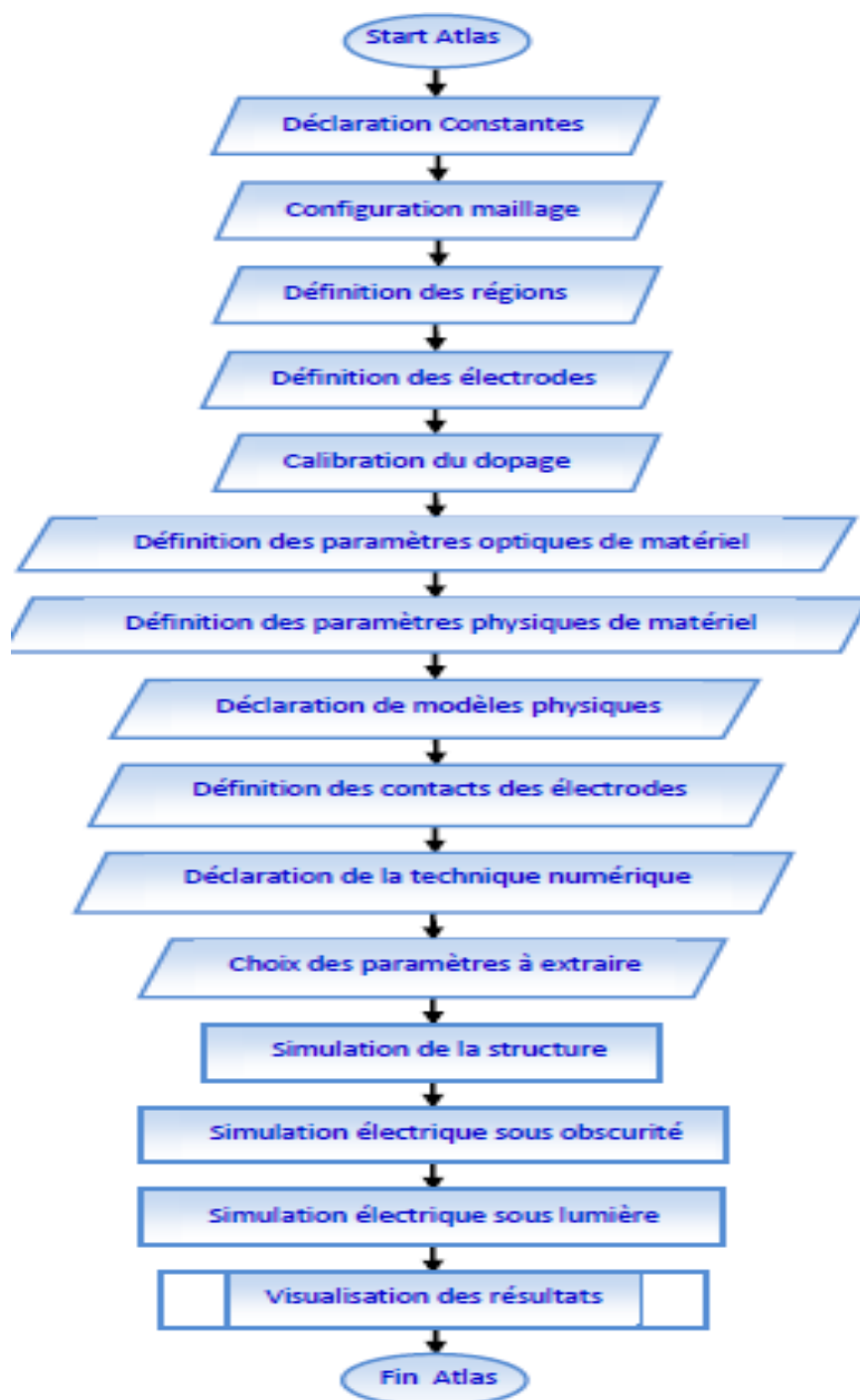


Figure III.6 : Organigramme du programme de simulation [26]

Partie2 : Résultat et interprétation

III.3. Introduction :

Dans cette partie, nous exposons les résultats de simulation numérique bidimensionnelle des caractéristiques courant-tension du transistor HEMT à base d'AlmGa_{1-m}N/GaN avec différents paramètres technologiques et physiques tels que la longueur, la profondeur de la grille et le dopage du canal. La simulation de la structure est faite en utilisant logiciel ATLAS-SILVACO. Nous décrivons l'évolution des caractéristiques, courant du drain Ids en fonction de la tension du drain Vds et de la tension de grille Vgs, et la transconductance, tout en étudiant l'influence des différents paramètres physiques et technologiques du transistor GaN-HEMT.

III.4. Interprétation des Résultats :

Nous donnons à la figure III.7, une vue en coupe schématique de la structure du transistor que nous allons étudier à l'aide du logiciel ATLAS-SILVACO.

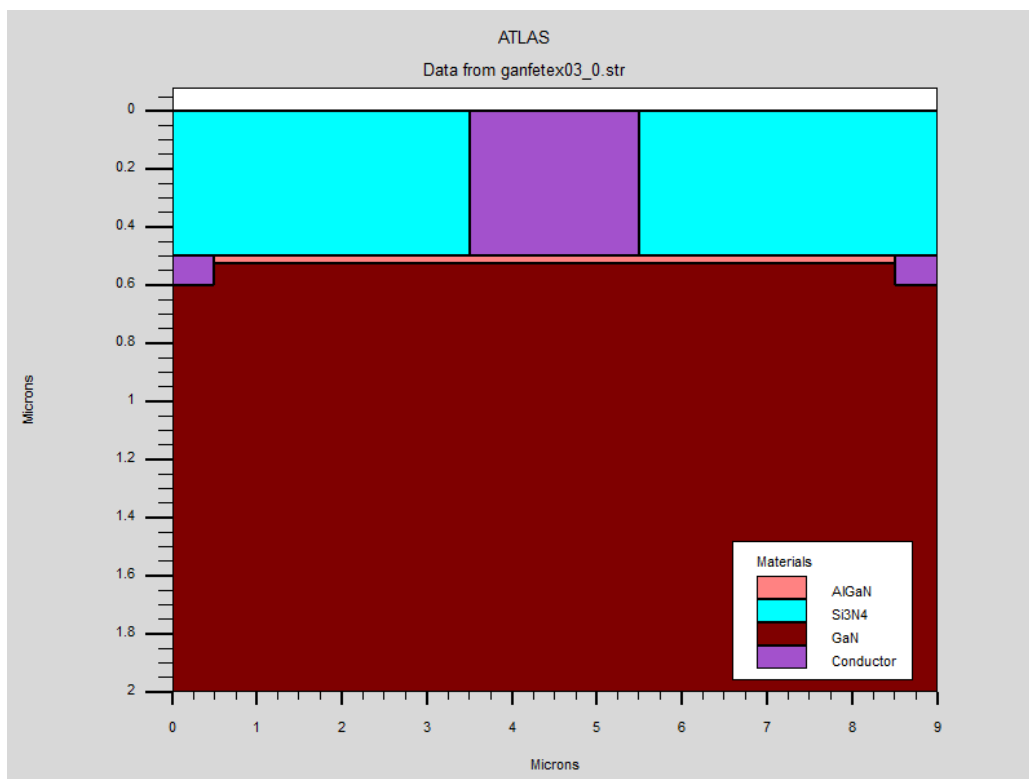


Figure III.7 : Coupe schématique de la structure HEMT AlGaIn/GaN étudié.

III.5. Les caractéristiques électriques du HEMT :

III.5.1. Variation du taux d'aluminium :

La figure ci-dessous montre les caractéristiques courant-tension (le courant de drain en fonction de la tension Drain-Source, ainsi le courant de drain en fonction de la tension de la grille) de la structure AlGa_xN/GaN, à la température de 300 K, avec la variation du taux d'aluminium (20% ; 30 % ; 40% ; 50%).

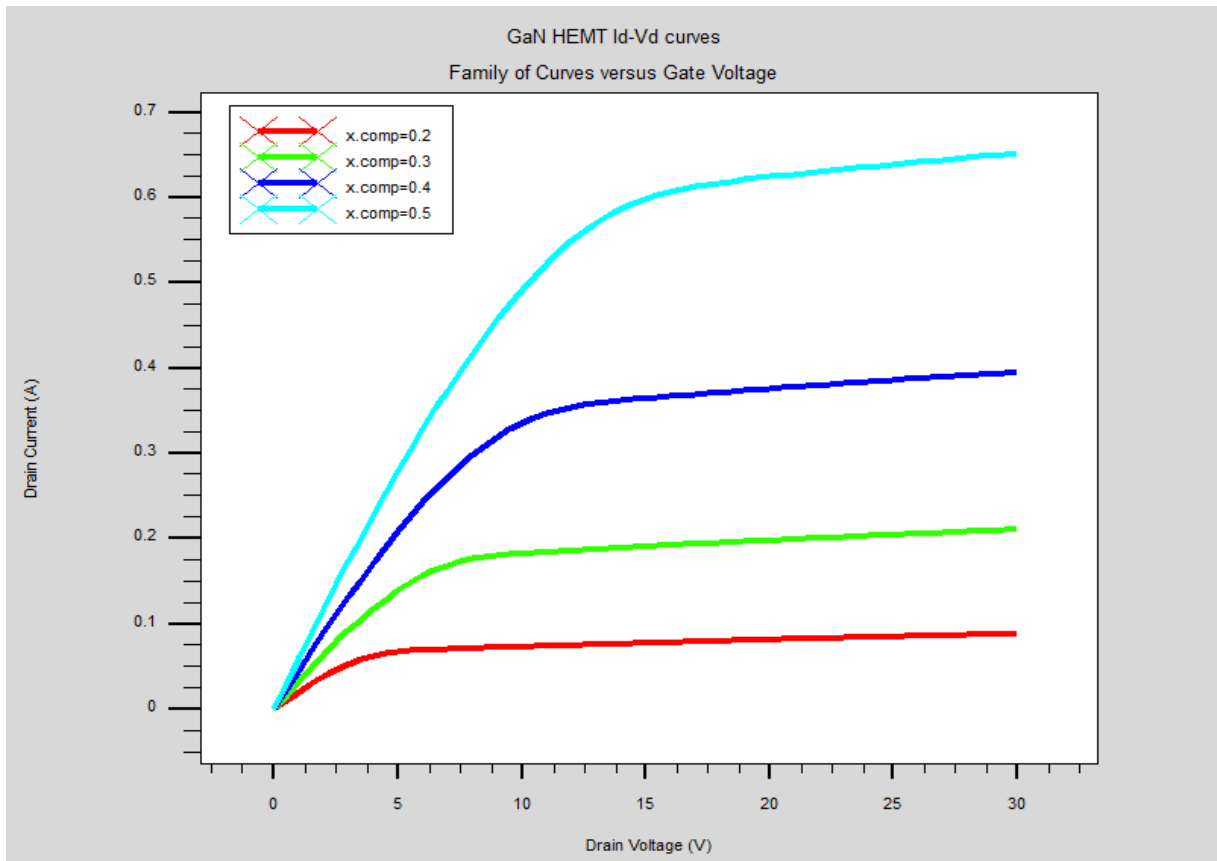


Figure III.8 : Le courant de drain I_d en fonction de la tension de drain v_d , pour différents taux d'aluminium

Nous pouvons observer que le courant Drain-Source I_{ds} diminue avec l'augmentation de la fraction molaire (x) d'Aluminium de la couche donneuse AlGa_xN. Ce comportement est dû à l'augmentation des dislocations par l'introduction de l'aluminium, suite au désaccord de maille entre AlGa_xN et GaN avec forte discontinuité de la bande de conduction, pour cette raison la valeur optimale de la fraction molaire est de l'ordre de 30%.

III.5.2. Variation de l'épaisseur de la couche donneuse AlGaN :

La figure ci-dessous représente l'influence de l'épaisseur de la couche donneuse sur la caractéristique courant-tension (le courant de drain en fonction de la tension Drain-Source), de la structure HEMT AlGaN /GaN. Nous faisons varier l'épaisseur de la couche donneuse (10nm, 15nm, 20nm, 25nm, 30nm).

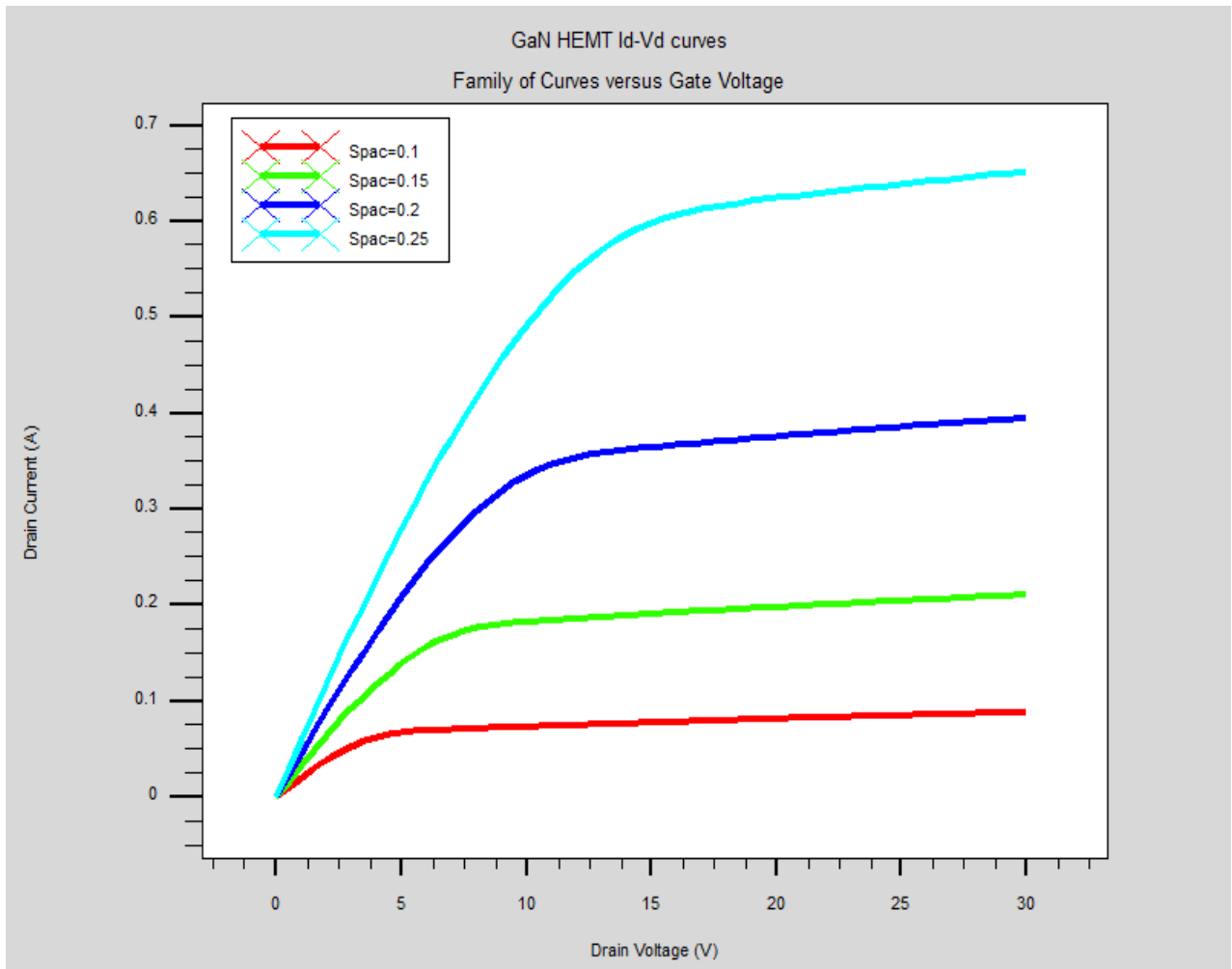


Figure III.9 : le courant de drain en fonction de la tension Drain-Source, pour différentes épaisseurs de la couche donneuse AlGaN

On sait que la densité électronique dans le canal étant importante, la conductivité est meilleure et donc le courant I_{ds} max est également plus élevé, mais cela n'arrive pas toujours, notamment dans les hétérojonctions de dimensions nanométrique, ce qui est principalement dû au phénomène de dispersion.

III.5.3. Variation de dopage de la couche donneuse AlGaN :

La figure montre les résultats de la simulation de courant de drain en fonction de la tension Drain-Source, ainsi le courant de drain en fonction de la tension de la grille pour différentes valeurs de dopage Nd. Nous faisons varier le dopage de la couche AlGaN ($2 \cdot 10^{18}$, $3 \cdot 10^{18}$, $3 \cdot 10^{19}$, $4 \cdot 10^{19}$) atomes/cm³.

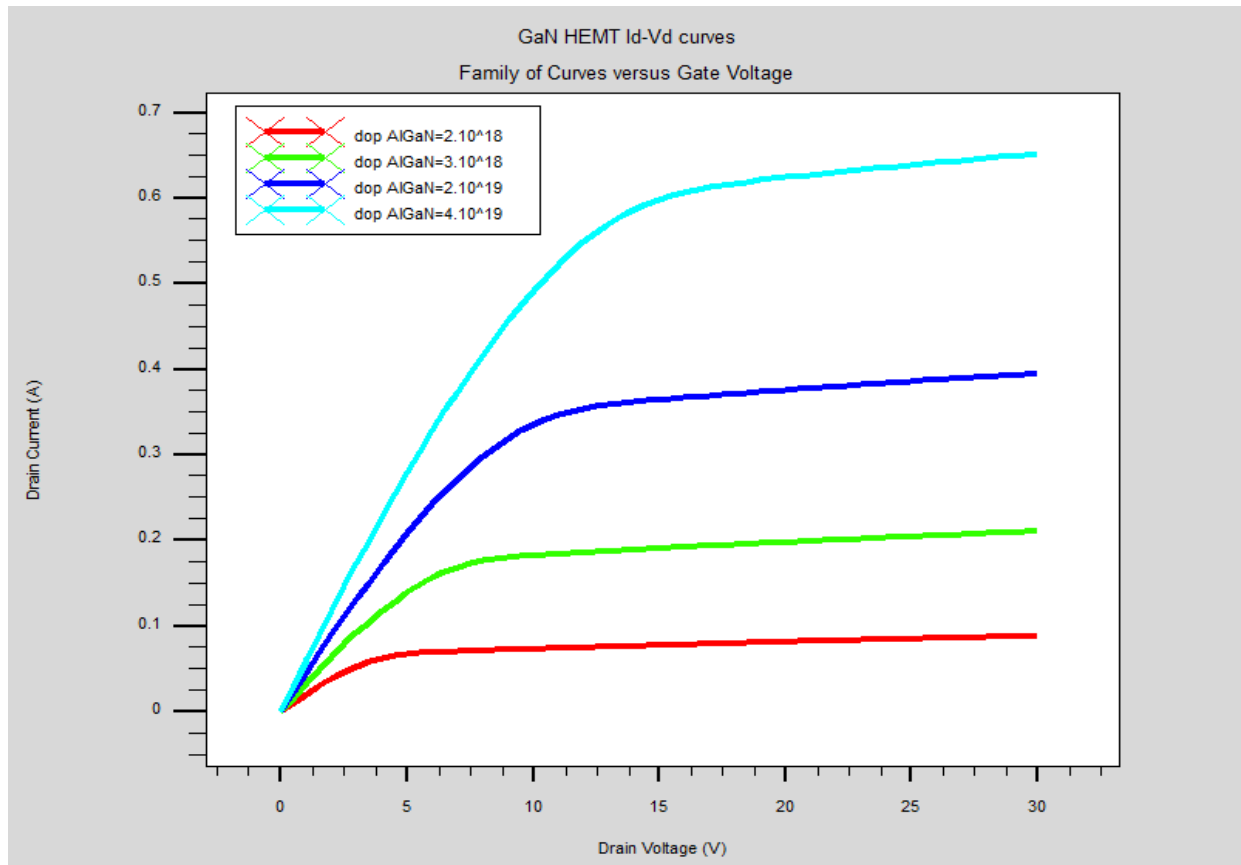


Figure III.10: le courant de drain en fonction de la tension Drain-Source, pour différentes valeurs de dopage AlGaN

On observe que la densité de courant augmente lorsque la concentration de dopage (Nd) de la couche donneuse d'AlGaN augmente. La densité du gaz d'électrons bidimensionnel augmente car davantage d'électrons libres sont disponibles pour se confiner au puits de potentiel et former le gaz d'électrons bidimensionnel dans le canal (à l'interface AlGaN/GaN).

III.5.4. L'influence de la température :

L'effet de de température sur la caractéristique (I_{ds} - V_{ds}) du transistor AlGaN/GaN HEMT est représenté sur la figure figure III.11.

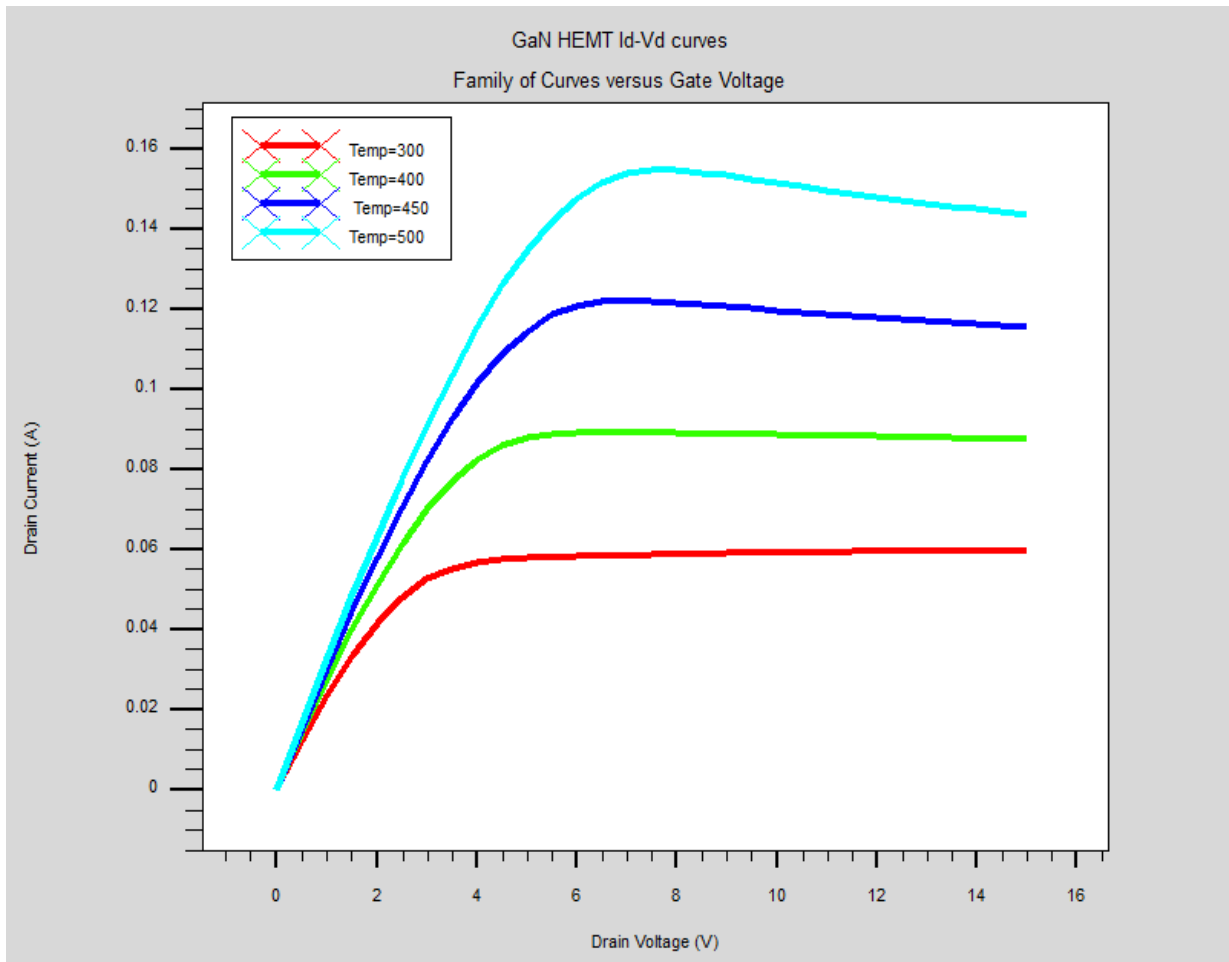


Figure III.11 : L'influence de la température sur le courant de drain en fonction de la tension Drain-Source pour différentes valeurs de température

De ce résultat pour 4 températures différentes (exemple de 300°K à 500°K), quand la température augmente, on observe une légère décroissance du courant de Drain I_{ds} . L'augmentation de température se traduit au total par une baisse relative de la puissance du HEMT.

On remarque aussi que le courant diminue à mesure que la température augmente dans la région de saturation. En revanche, le courant est différent de la température dans la région linéaire

III.6. Conclusion :

Dans la première partie de ce chapitre, nous décrivons le simulateur Silvaco-Tcad, son principe de fonctionnement et son module de simulation pour le comportement électrique des composants de HEMT AlGa_N/Ga_N.

Dans la deuxième partie, nous avons modélisé la structure du transistor d'une façon de trouver les meilleurs caractéristiques électriques, afin d'obtenir les valeurs optimales de la structure HEMT à base de l'hétérostructure AlGa_N/Ga_N, par conséquent une amélioration des performances des FP-HEMTs, pour des application en haute fréquence et à haute température.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Les transistors HEMT au nitrure de gallium présentent de nombreux avantages. Les HEMT GAN, largement utilisés dans les télécommunications, sont appréciés pour leurs propriétés semi-conductrices, leurs applications à haute puissance et l'émergence de matériaux à large bande interdite, en particulier les technologies à base de GaN. Dans ce travail, nous discuterons plus en détail des composants de transistors à haute mobilité électronique à base de GaN. Notre travail contient principalement trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous avons présenté le nitrure de gallium (GaN) avec leurs propriétés physiques et électriques. Grâce à son large gap direct qui est de 3.4 eV, sa conductivité thermique élevée (1.3 W/cmK), son champ de claquage élevé (3.3 M V/cm) et sa vitesse de saturation qui est de 2.5×10^7 cm /s, le HEMT à base de nitrure de gallium présentent de bonnes performances à haute fréquence dans les applications de puissance et température élevés. En outre, nous avons rappelé l'intérêt de la structure cristalline du wurtzite GaN, qui donne lieu à des polarisations spontanées et piézoélectriques. Ces polarisations créent une densité de charge qui permet la formation d'un gaz d'électrons bidimensionnel (2DEG) à l'interface de l'hétérostructure AlGaN/GaN.


Dans le deuxième chapitre, un bref historique de HEMT a été présenté et leur principe de fonctionnement ainsi que la formation d'un gaz électronique bidimensionnel dans une hétérostructure ALGaN/GaN a été étudiée. L'objectif de cette étude était d'examiner le contact entre deux matériaux présentant des lacunes différentes, où les électrons sont déplacés du matériau à grande lacune vers le matériau à petite lacune, ce qui entraîne la formation d'un puits de potentiel.

La première partie du chapitre trois décrit le simulateur SILVACO-ATLAS. Une vue d'ensemble de la plate-forme de simulation ATHENA et TCAD, avec une brève description des outils de simulation utilisés et des différents types de modèles de simulation disponibles a été fournie.

Dans la deuxième partie, nous avons simulé le transistor HEMT à base de $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ par le logiciel de simulation SILVACO-ATLAS. Les résultats obtenus dans ce manuscrit montrent bien que ces paramètres physiques et technologiques ont une forte influence sur les performances du transistor à effet de champ HEMT à base de GaN. Ainsi, nous pourrions dire que le transistor AlGaN/GaN HEMT a été optimisé. Ce travail ouvre sur plusieurs perspectives d'études

complémentaires de caractérisations de la structure HEMT AlGaN/GaN pour des applications en haute fréquence et à haute température.

Bibliographie



Bibliographie

[1] : Albany, Florent. Evaluation de la robustesse d'une technologie HEMT GaN normally-off à implantation d'ions fluorures co-intégrée avec une technologie HEMT GaN normally-on. Diss. Université de Bordeaux, 2021.

[2] : Aoudé, Ouloum. Etude des propriétés excitoniques de GaN par spectroscopies continue et résolue en temps à l'échelle de la femto seconde. Diss. Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II, 2006.

[3]: Wikipedia

[4]: Krishna Murthy, Hithiksha. « Characterisation of GaN HEMTs on Different Substrates for Power Electronics Applications. » (2022).

[5]: Park, Seoung-Hwan, and Shun-Lien Chuang. « Comparison of zinc-blende and wurtzite GaN semiconductors with spontaneous polarization and piezoelectric field effects. » *Journal of Applied Physics* 87.1 (2000) : 353-364.

[6] : BOUZID, Fayçal. Simulation des propriétés électriques d'une jonction à base de nitrure de gallium. Application au détecteur de rayonnement. Thèse de doctorat.

[7] : Kaddeche, Mourad, and A. Telia. « Modelisation et analyse de l'effet du field plate avec couche diélectrique High-K sur les propriétés électriques des Hemts AlGa_{1-m}N/GaN. » (2017).

[8] : Site web : http://world-telecommunication.blogspot.com/2012/11/transistor-hemt-en-gan-pour-les_16.html

[9] : Dahmane, Khalida. Étude et simulation d'un transistor AlGa_{1-m}N/GaN HEMT. Diss. Université Med Khider Biskra, 2014.

- [10]: LEUZZI, G. Simulation of GaN/AlGaIn heterostructures for a HEMT simulator. 2011. Thèse de doctorat. UNIVERSITY of L'AQUILA.
- [11] : Mohammed, Allaf. Etude du comportement du transistor HEMT en HF. Diss. Université Mouloud Mammeri, 2017.
- [12] : LEHMANN, Jonathan. Caractérisation électrique d'hétérostructures AlGaIn/GaN pour des applications de puissance. 2015. Thèse de doctorat. Université Grenoble Alpes.
- [13]: Leghrib, Lazhar, and Lazhar Hadjéris. « Etude par simulation de nitrure de gallium (GaN) et ses alliages. » (2019).
- [14] : R. Aubry, J.-C. Jacquet, J. Weaver, O. Durand, P. Dobson, G. Mills, M.-A. di Forte-Poisson, S. Cassette, and S.-L. Delage, IEEE Trans. Electron Devices 54, 385(2007).
- [15]: I. Ahmad, V. Kasisomayajula, D. Y. Song, L. Tian, J. M. Berg, and M. Holtz, Self-heating in a GaN based heterostructure field effect transistor: Ultraviolet and visible Raman measurements and simulations J. Appl. Phys. 100, 113718 (2006).
- [16] : CHIHANI, Omar. Etude de la fiabilité de composants GaN en conversion d'énergie. 2018. Thèse de doctorat. Université de Bordeaux.
- [17]: Zhang, Yuanhang. «Comparison between competing requirements of GaN and SiC family of power switching devices. » IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 738. No. 1. IOP Publishing, 2020.
- [18]: Olsson, Jörgen, et al. « 1 W/mm RF power density at 3.2 GHz for a dual-layer RESURF LDMOS transistor. » IEEE Electron Device Letters 23.4 (2002): 206-208.
- [19]: Mohammed, Allaf. Etude du comportement du transistor HEMT en HF. Diss. Université Mouloud Mammeri, 2017.
- [20] : Bryan, Charlotte. Etude et développement de capteurs thermiques pour composants de puissance. Diss. Université Grenoble Alpes, 2020.
- [21] : Charbonniaud, Christophe. Caractérisation et modélisation électrothermique non linéaire de transistors à effet de champ GaN pour l'amplification de puissance micro-onde. Diss. Limoges, 2005.
- [22]: HADDOUCHE, Hichem et HADDOU, Mohamed Amine. Modélisation du transistor HEMT en technologie GaN sur substrat 4H-SiC. Thèse de doctorat.

[23]: Aadit, Muhammad Navid Anjum, et al. « High electron mobility transistors: performance analysis, research trend and applications. » Different Types of Field-Effect Transistors-Theory and Applications » (2017): 45-64.

[24] : PÉPIN, Marie-Clara. « CONCEPTION D'UN TRANSISTOR VERTICAL DE TYPE MOSVFET À BASE DE NITRURE DE GALLIUM. » (2018).

[25]: Atlas user's manual, Silvaco international, 2004.

[26] : AYADI sara, LEFRAS Ibtissam. « Etude et performances d'un dispositif HEMT pour les applications à haut débit Réalisé. », 2017.

