



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



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

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

Filière : **Electronique**

Spécialité : **Instrumentation**

Présentée par : **ZAGHBA Samia**

RAHOUANI Amina

Thème

Etude par simulation d'un transistor HEMT à base InAlN/GaN

Soutenu le , 12/07/2021

Devant le Jury :

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

Année universitaire : 2020-2021

DEDICACE

*Nous dédions ce travail à
Nos parents et nos familles
Respectives et à tous ceux
Qui nous sont chers pour leurs
Encouragements permanents,
Leurs appuis et leur soutien moral.*

Merci d'être toujours là pour nous.

REMERCIEMENTS

*Nous tenons à exprimer toute notre reconnaissance
A notre encadreur **Mr.DOUARA Abdelmalek** qui nous
a accompagné durant la période de
réalisation de ce travail.*

*Nous remercions également tous les membres
De jury qui nous ont fait l'honneur
D'examiner ce travail.*

Cordialement.

SOMMAIRE

Sommaire

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

Chapitre I : Le transistor à haute mobilité électronique (HEMT)

I.1 Introduction	03
I.2 Techniques de croissance du matériau nitrure de gallium	04
I.2.1 Croissance par MOCVD du GaN sur saphir.....	04
I.2.2 Croissance par MBE du GaN sur Si	04
I.3 Les transistors à effet de champ.....	05
I.3.1 Présentation générale.....	05
I.3.1.1 Historique et principes de fonctionnement.....	05
I.3.2 Le MESFET.....	05
I.3.3 Le HEMT.....	06
I.3.3.1 Le HEMT à base de InAlN/GaN.....	06
I.4 Les hétérostructures de matériaux.....	07
I.5 Généralités sur les transistors à haute mobilité HEMT.....	08
I.5.1 Historique.....	08
I.5.2 Structure générale d'un transistor HEMT.....	08
I.5.3 Description des couches.....	09
I.5.4 Principe de fonctionnement d'un HEMT.....	10
I.6 Présentation générale d'un transistor HEMT InAlN/GaN.....	11
I.7 Performances des composants HEMT à base de GaN.....	12
I.8 Conclusion.....	14
Références Bibliographiques	15

Chapitre II : Généralités sur le nitrure de Gallium (GaN)

II.1 Introduction.....	17
II.2 Les matériaux III-V.....	18
II.3 Le nitrure de gallium.....	18
II.3.1 Structure cristalline et substrats de croissance du GaN.....	18
II.3.1.1 Structure cristalline wurtzite des nitrures.....	19
II.3.1.2 Structure cristalline zinc blende des nitrures.....	19
II.3.2 Les différents substrats utilisés pour la croissance de GaN.....	19
II.3.3 Les hétérostructures à base de nitrures.....	21
II.3.4 Propriétés des matériaux III-N.....	21
II.4 Les caractéristiques générales du nitrure de galium.....	22
II.4.1 Les matériaux grand-gap.....	22
II.4.2 Champ critique ou champ de claquage.....	22
II.4.3 Conductivité électrique, résistivité, conductivité thermique.....	22
II.4.4 Mobilité des électrons	23
II.4.5 Largeur de bande interdite (gap)... ..	23
II.4.6 Polarisation spontanée et piézoélectrique.....	24
II.4.6.1 Polarisation spontanée.....	24
II.4.6.2 Polarisation piézoélectrique	26
II.5 Concentration de porteurs dans une hétérojonction AlGaN/GaN.....	28
II.6 Domaines d'applications de matériau III.V.....	29
II.7 Conclusion.....	31
Références Bibliographiques	32

Chapitre III : Simulation d'un HEMT InAlN/GaN

III.1. Introduction	34
III.2 Présentation du logiciel Nextnano.....	35
III.2.1 Définition.....	35
III.2.2 Méthodologie du programme.....	36
III.2.3 Les flux de programme et leur structure	37
III.2.4 Les données nécessaires au logiciel.....	38

III.2.5	Type de donnée calculée par Nextnano.....	38
III.2.6	Organisation du calcul.....	38
III.3	Présentation du Modèle de simulation.....	39
III.4	Concentration d'électrons (N_S) en fonction de la tension de grille (V_G).....	39
III.4.1	Influence de l'épaisseur de la couche AlN.....	39
III.4.2	Influence de fraction molaire (x).....	40
III.4.3	Influence de la concentration de donneurs (N_D).....	41
III.5	Conclusion	44
	Références Bibliographiques	45
	Conclusion générale	46

LISTE DES FIGURES

Liste des Figures

Chapitre I : Le transistor à haute mobilité électronique (HEMT)

Figure I.1 : Transistor à effet de champ à grille Schottky, le MESFET.....	06
Figure I.2 : Diagrammes schématiques montrant les différents types d'hétérojonction.....	07
Figure I.3 : Structure générale d'un transistor HEMT.....	09
Figure I.4 : Structure de bande d'un HEMT en présence d'un potentiel de grille.....	11
Figure I.5 : Structure générale du transistor HEMT AlGa _N /Ga _N	12
Figure I.6 : Feuille de route des domaines de commercialisation des HEMTs à base de Ga _N en fonction des fréquences de fonctionnement	13

Chapitre II : Généralités sur le nitrure de Gallium (Ga_N)

Figure II.1 : structures (a) Wurtzite (b) zinc-blende de Ga _N . Les sphères rouges et blue indiquer les atomes Ga et N, respectivement.....	19
Figure II.2 : Représentation des séquences de couches d'atomes donnant lieu à deux polarités différentes	25
Figure II.3 : Génération d'un champ électrique E par la polarisation spontanée	25
Figure II.4 : Plan d'atomes d'une structure wurtzite de Ga _N contrainte et répartition des moments dipolaires (Face Ga).....	26
Figure II.5 : Polarisation piézoélectrique	27
Figure II.6 : Structure AlGa _N /Ga _N à face Ga, où Ga _N est relaxé et AlGa _N contraint en tension.....	29
Figure II.7 : Gammes de puissances accessibles en fonction de la fréquence pour différents matériaux semi-conducteurs	30

Chapitre III : Simulation d'un HEMT InAlN/GaN

Figure III.1 : Organigramme du simulateur Nextnano.....	38
Figure III.2 : Structure de transistor HEMT InAlN/GaN étudié	39
Figure III.3 : Concentration d'électrons (N_S) en fonction de la tension de grille (V_G) pour les différentes valeurs de l'épaisseur de couche AlN.....	40
Figure III.4 : Concentration d'électrons (N_S) en fonction de la tension de grille (V_G) pour les différentes valeurs de fraction molaire (x)	41
Figure III.5 : Concentration d'électrons (N_S) en fonction de la tension de grille (V_G) pour les différentes valeurs de N_D (δ)	42
Figure III.6 : Concentration d'électrons (N_S) en fonction de la tension de grille (V_G) pour les différentes valeurs de températures.....	42
Figure III.7 : Comparaison entre les résultats de simulations de Concentration d'électrons (N_S). D'un transistor HEMT.....	43
Figure III.8 : Comparaison entre les résultats de simulations de capacité de grille (C_g), d'un transistor HEMT.....	44

LISTE DES TABLEAUX

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Propriétés des principaux substrats pour le GaN	20
Tableau II.2 : Propriétés des matériaux III-N.....	21
Tableau II.3 : Paramètres de la variation de la bande interdite en fonction de la température.....	24
Tableau II.4 : Valeurs numériques théoriques de PSP	26
Tableau II.5 : Valeurs numériques des constantes piézoélectriques et élastiques de GaN, AlN, InN	28

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le développement spectaculaire notamment des communications mobiles au cours des dernières années a conduit à une recherche de technologies robustes et fiables, à des coûts relativement raisonnables dans le domaine de l'électronique. Les études développées dans le cadre de nouveaux marchés militaires et civils sont à l'origine d'une évolution importante de tous les secteurs d'activités de l'électronique hyperfréquence.

Les semiconducteurs sont présents sous de multiples formes dans la vie de tous les jours aussi bien pour des applications électroniques qu'optoélectroniques et hyperfréquences. Parmi ces semiconducteurs, le nitrure de gallium (GaN) a su démontrer sa supériorité pour la réalisation de transistors à haute mobilité électronique (HEMTs) à forte densité de puissance dans des gammes de fréquences allant typiquement jusqu'à 20 GHz. En effet, le GaN (semiconducteur à large bande interdite) présente une tension de claquage élevée, et la présence de charges de polarisation électrique interne permet de confiner les électrons avec une densité importante dans le canal, Cette spécificité permet de réaliser des transistors HEMTs de type AlGaN/GaN dont la densité d'électrons à l'interface peut aisément dépasser $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ sans dopage intentionnel de la barrière AlGaN.

Cependant, malgré les continuels efforts et améliorations dont bénéficient les composants à base de nitrure de gallium, leurs performances se voient restreintes par les phénomènes de pièges. Une alternative à l'hétérostructure AlGaN/GaN, qui est aujourd'hui la plus répandue, repose sur l'utilisation de matériaux InAlN/GaN. Cette dernière semble moins pénalisée par les phénomènes de pièges et possède des propriétés prometteuses pour les applications de puissance des années à venir.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres :

Le premier chapitre donnera un aperçu sur les transistors à effet de champs. Nous nous intéresserons dans notre étude aux transistors à hétérostructure de type HEMT InAlN / GaN , avec une description sa structure, et on expliquera son principe de fonctionnement.

Dans le deuxième chapitre, nous exposons une étude bibliographique sur les matériaux Semi-conducteurs III-V.

Le chapitre trois est consacré aux résultats de simulation réalisé sous Nextnano³ qui décrivent l'influence des différents paramètres physique sur la densité n_s du gaz électronique 2DEG et ceci pour le HEMT à base de InAlN/GaN et comparé avec Hétérostructure AlGaIn/GaN . Nous terminerons notre étude par une conclusion générale.

CHAPITRE I

Le transistor à haute mobilité électronique (HEMT)

I.1 Introduction

Les composants actifs sont les éléments de base de la conception de circuits intégrés monolithiques microondes. Les éléments actifs sont constitués de transistors et de diodes. Aujourd'hui, on doit concevoir des transistors et des diodes capables de répondre aux besoins en termes de puissance et de montée en fréquence [1].

Les matériaux semi-conducteurs III-N sont de bons candidats pour la fabrication de ces types de transistors et de diodes. Les matériaux semi-conducteurs III-N présentent plusieurs avantages tels qu'une large bande interdite, une grande stabilité chimique, des propriétés mécaniques exceptionnelles ainsi que d'autres propriétés physiques remarquables. Ces semi conducteurs possèdent les qualités indispensables pour fabriquer des composants de puissance[2].

Durant plusieurs années, les recherches ont été consacrées aux HEMTs (**H**igh **E**lectron **M**obility **T**ransistors) à base de GaAs à cause de ses propriétés électriques et physiques, son utilisation dans les applications à haute puissance s'avère limitée d'où les chercheurs s'intéressent à d'autres matériaux à base de nitrure, en particulier le nitrure de gallium GaN dont les propriétés physiques, électroniques, et structurales sont importantes [3].

Ce chapitre sera structuré en deux parties :

Dans la première partie Nous présenterons les techniques de croissance des matériaux à base de nitrure de galium.

Dans la deuxième partie nous présenterons des notions générales sur les transistors à haute mobilité HEMTs avec une description de leurs différentes couches. Ensuite, on expliquera son principe de fonctionnement basé sur les propriétés de haute mobilité d'un gaz d'électron bidimensionnel 2DEG (Two Dimensional Electron Gaz.)

I.2 Techniques de croissance du matériau nitrure de gallium

La croissance consiste à déposer sur un substrat (saphir, Si ou SiC), des couches de GaN en conservant l'ordre cristallographique et la nature monocristalline de ce dernier. Pour une couche de type HEMT InAlN/GaN, les techniques les plus utilisées pour la croissance sont la MOCVD (Metal-Organic Chemical Vapor Deposition) dans les cas d'un substrat de saphir ou SiC et la MBE (Molecular Beam Epitaxy) dans le cas du substrat de Si.

I.2.1 Croissance par MOCVD du GaN sur saphir

L'épitaxie par MOCVD consiste à réaliser une pyrolyse de l'ammoniac avec un composé organométallique à la surface du substrat chauffé. Ces composés sont généralement liquides à température ambiante. Cette méthode permet de réaliser des couches de GaN d'environ 10 μm d'épaisseur à des vitesses de quelques $\mu\text{m/h}$. On utilise notamment le triéthylgallium (TEGa) ou le triméthylgallium (TMGa), comme source du gallium. L'ammoniac (NH_3), est utilisé comme source d'azote. L'hydrogène purifié est utilisé comme gaz vecteur pour entraîner les composés organiques vers le réacteur [4,5].

Pour réaliser la croissance, le substrat est tout d'abord chauffé à haute température (environ 1000°C) sous un flux d'ammoniac. Il se produit alors une nitruration du substrat qui permettra une meilleure nucléation de la couche tampon. Cette couche est ensuite déposée à plus basse température, environ 550 °C. Elle est ensuite cristallisée à la température de croissance de la couche, environ 1000 °C, avant l'épitaxie d'une couche épaisse de GaN [5]. Les paramètres de croissance optimaux tels que les températures où l'épaisseur de la couche tampon varient suivant les bâtis d'épitaxie, et donc, suivant les laboratoires. Pour la MOCVD, la croissance s'effectue dans la direction (0001) et le dernier plan atomique est constitué d'atomes de gallium (face Ga) [4].

I.2.2 Croissance par MBE du GaN sur Si

Les applications électroniques nécessitent des matériaux d'une très grande qualité cristallographique. Les hétérojonctions doivent être les plus abruptes possibles, L'épitaxie par MBE, est une méthode de croissance permettant de respecter ces exigences. Dans le principe, les bâtis de MBE sont constitués d'une chambre à ultra vide (10^{-10} Torr) [1].

Les différents éléments de croissance sont fournis par des cellules d'effusion situées en face du substrat. Étant donné le vide très poussé, il y a entre les cellules et le substrat des flux moléculaires caractérisés par un angle solide. Les flux émergents des différentes cellules

convergent à la surface du substrat. Des caches situés devant les cellules permettent de protéger ou d'exposer le substrat au flux des différents éléments. La combinaison d'ouverture et de fermeture des caches ainsi que le contrôle des flux des différents éléments par l'intermédiaire des températures des cellules d'effusion, permet alors la croissance des différents matériaux. La qualité des couches obtenues par cette méthode repose pour beaucoup sur la qualité du vide, mais surtout sur la pureté des matériaux sources et des gaz employés. Pour la MBE, la croissance s'effectue dans la direction (0001) et le dernier plan atomique est constitué d'atomes de nitrure (face Ga) [6].

I.3 Les transistors à effet de champ

I.3.1 Présentation générale

I.3.1.1 Historique et principes de fonctionnement

Le transistor à effet de champ a été inventé à la fin des années 1920 par J. E. Lilienfeld, mais n'a peut-être été réalisé avant la fin des années 1950 [7]. Son principe repose sur l'utilisation d'un champ électrique pour contrôler la conductivité d'un canal dans un matériau semi-conducteur. Contrairement au transistor bipolaire, le transistor à effet de champ présente une structure horizontale, ce qui signifie que les contacts ohmiques se trouvent sur le même plan. Un TEC peut reposer sur deux principes différents. Il peut être constitué d'un simple canal dopé négativement N dont la largeur dépend de la zone désertée sous la grille (transistors type MESFET). Dans le cas des transistors HEMTs, le canal de conduction est créé grâce à la formation d'un gaz d'électrons à deux dimensions (2DEG) à l'aide d'une hétérojonction. Dans chacun des cas le flux d'électrons est contrôlé par la section du canal et la densité de porteurs. Il est contrôlé par la tension appliquée à la grille Schottky (V_{GS}), la tension V_{DS} permet de déterminer la puissance qui sera disponible.

I.3.2 Le MESFET

Ce type de transistor, apparu expérimentalement dans les années 1970 [8], consiste à moduler la conductance d'un canal dans une zone dopée située entre deux contacts ohmiques sous l'action électrostatique d'une électrode de commande.

Dès les années 1980, le MESFET a été délaissé petit à petit au détriment d'une nouvelle filière de transistor de type HEMT et à forte densité de porteurs (GaAs, InP, GaN). Cette technologie a donc été abandonnée dans les années 1990, au profit du HEMT pour l'amplification de puissance en hyperfréquence [9].

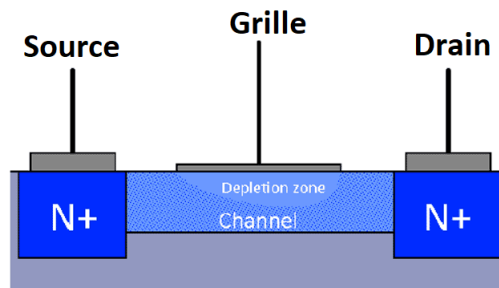


Figure I.1 : Transistor à effet de champ à grille Schottky, le MESFET.

I.3.3 Le HEMT

Le HEMT apparaît comme une évolution majeure du MESFET. En effet, pour contourner le problème du transport dans un matériau dopé, est arrivé le HEMT dans lequel le transport électronique s'effectue au voisinage d'une interface entre un matériau à grand gap fortement dopé et un matériau à petit gap non intentionnellement dopé. Cette interface est encore appelée "hétérojonction". La présence de cette hétérojonction permet d'obtenir une importante densité de porteurs dans le matériau intrinsèque où la mobilité et les vitesses électroniques sont plus élevées[1].

Ce type de transistor peut être désigné sous des appellations différentes : HFET, TEGFET ou plus communément HEMT. Le MODFET est une variante du HEMT pour lequel la couche barrière est dopée séquentiellement. La filière nitrure de gallium est développée depuis plusieurs années notamment pour ses potentialités en terme de puissance hyperfréquence.

I.3.3.1 Le HEMT à base de InAlN/GaN

Le transistor HEMT InAlN/GaN, est un type de transistor à effet de champ de la filière nitrure de gallium. Les principaux avantages de ce type de transistor par rapport à ses concurrents sont [10,11] :

- Une charge surfacique élevée
- Une tension de claquage élevée
- Une vitesse de saturation élevée

I.4 Les hétérostructures de matériaux

Les transistors HEMTs sont des composants dont le fonctionnement repose sur l'existence d'hétérojonctions semi-conducteur/semi-conducteur. En effet, le changement abrupt de structure de bandes à l'hétéro-interface entre deux semi-conducteurs conduit à l'apparition de discontinuités (offsets) à la jonction des bandes de conduction ou de valence, c'est-à-dire à des sauts de potentiel. Cela est illustré par le diagramme de bandes d'une hétérojonction dont l'établissement nécessite la connaissance de l'affinité électronique des deux semi-conducteurs. L'application des règles d'Anderson permet de déterminer les positions respectives des bandes de valence et de conduction à l'interface. La forme de la barrière dépend alors de la différence des travaux d'extraction et de la position du niveau de Fermi dans les deux matériaux.

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

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

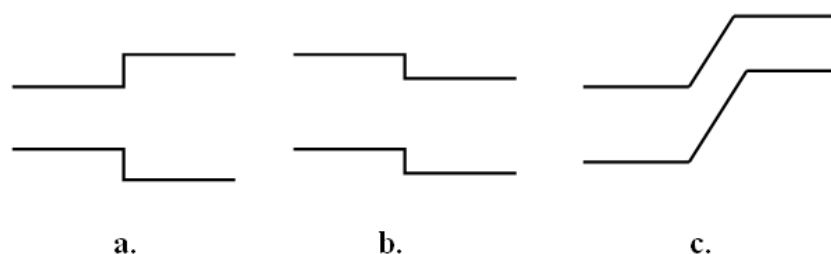


Figure I.2 : Diagrammes schématiques montrant les différents types d'hétérojonction.

I.5 Généralités sur les transistors à haute mobilité HEMT

I.5.1 Historique

Les premiers transistors HEMTs (High Electron Mobility Transistor) sont apparus en 1980 (Fujitsu, Thomson) [3] [12], où ils sont apparus comme une évolution des transistors de type MESFET (Metal Semiconductor Field Effect Transistor) élaborés à partir des semi-conducteurs III-V de type GaAs. En 1985, le HEMT est présenté comme un composant micro-onde unique au monde, ayant les plus faibles caractéristiques en bruit. Dans les premiers temps, ce transistor a été utilisé dans un radiotélescope. Plus tard, ce composant sera implanté dans les récepteurs de télévision pour capter des signaux des satellites (36000km d'altitude) [13]. De plus en plus, les applications à faible bruit et à faible consommation, mais les hautes fréquences restent son application naturelle.

Ce composant est largement utilisé dans les systèmes de télécommunications terrestres et spatiales, dans les radiotélescopes, dans les récepteurs de télévision par satellite, ...ect, dans bons nombres de systèmes électroniques, des téléphones portables aux véhicules automobiles [1].

I.5.2 Structure générale d'un transistor HEMT

Le principe de base d'un HEMT consiste à mettre en profit les propriétés de haute mobilité d'un gaz d'électron bidimensionnel 2DEG. La structure des couches épitaxiées des HEMT est réalisée de façon à séparer physiquement les électrons libres dans le canal des atomes donneurs ionisés, ceci afin d'augmenter la mobilité des électrons par la réduction de la répartition des impuretés ionisés. La différence essentielle entre les MESFET et les HEMT se situe au niveau du principe même du contrôle du courant dans le canal. Alors que dans le cas du MESFET, l'électrode de grille contrôle la section du canal disponible pour la conduction, alors que dans le cas du HEMT, elle contrôle la densité d'un gaz d'électron libres dans une zone non dopée sous l'hétéro interface qui constitue le canal du transistor.

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

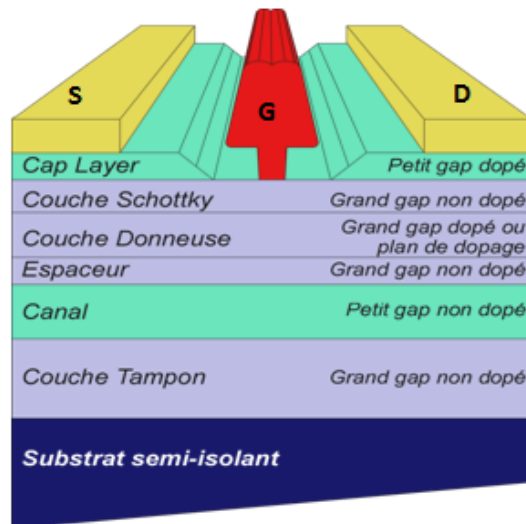


Figure I.3 : Structure générale d'un transistor HEMT.

I.5.3 Description des couches [1].

- La couche superficielle (appelée Cap Layer) est formée par un matériau de faible bande interdite, pour permettre la réalisation des contacts ohmiques de source et de drain. Cette couche est généralement fortement dopée afin de diminuer la valeur des résistances de contact et donc celle des résistances d'accès.
- La couche à grand gap non dopée est destinée à la réalisation du contact Schottky de grille, qui est déposé après gravure du Cap Layer (fossé de grille ou recess).
- La couche de matériau à grand gap dopé a pour rôle de fournir les électrons libres à la structure ; c'est la couche donneuse. Ce dopage, pouvant être volumique, est généralement réalisé par un plan de dopage silicium.
- Vient ensuite l'espaceur (spacer), une couche de matériau à grand gap non intentionnellement dopé (nid), permettant de séparer les atomes donneurs d'électrons de la couche donneuse, des électrons du canal. Les interactions à distance électrons-impuretés sont ainsi réduites. Plus cette couche ne sera épaisse, meilleure sera la mobilité des électrons dans le canal. A l'inverse, le transfert des électrons de la couche donneuse dans le canal est favorisé par un espaceur fin.
- Le canal est constitué d'un matériau à petit gap non intentionnellement dopé. Cette couche, importante dans la mesure où elle reçoit le gaz bidimensionnel d'électrons,

déterminera les performances du composant à travers les propriétés de transport des électrons dans le matériau.

- Une couche tampon, communément appelée buffer, permet d'améliorer le confinement des électrons dans le canal en réduisant l'injection des porteurs vers le substrat. Cette couche permet également d'avoir un matériau de base de bonne qualité cristallographique nécessaire à la croissance des autres couches.
- Enfin, le substrat semi-isolant (SI) est un matériau binaire qui identifie la filière (GaAs, InP, SiC....etc).

I.5.4 Principe de fonctionnement d'un HEMT

Son principe de fonctionnement est basé sur la formation d'une hétérojonction qui est définie par la juxtaposition d'un matériau à grand gap E_{g1} et un matériau à petit gap E_{g2} qui implique la création d'une discontinuité de bande de conduction à l'interface entre deux matériaux (modèle d'Anderson). Lors de la jonction de deux semi-conducteurs à bandes interdites différentes, les niveaux de Fermi s'alignent. La conservation des paramètres physiques de part et d'autre de l'interface entraîne des courbures des bandes de conduction et de valence, ainsi que des discontinuités à l'interface pour ces deux bandes.

Cette hétérojonction illustrée par la figure I.4 entraîne la formation d'un puits de potentiel dans le matériau à petit gap où les électrons provenant de la couche donneuse se transfèrent et s'accumulent. L'hétérojonction est caractérisée par la discontinuité de bande de conduction Δ_{Ec} entre les deux matériaux, plus la valeur de Δ_{Ec} sera élevée, le transfert des électrons de la couche donneuse vers le canal sera meilleur. En outre, plus le matériau constituant le canal sera à petit gap, les propriétés de transport (vitesse, mobilité) seront meilleurs. On note que dans la plus part des cas, $\Delta_{Ec} = (3/2)\Delta_{Eg}$ [14].

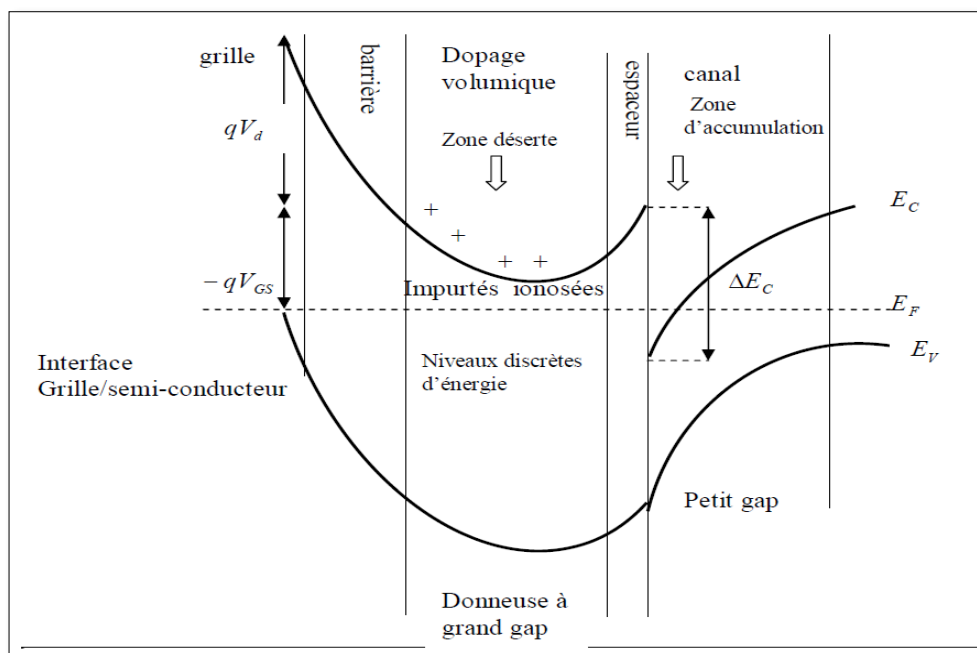


Figure I.4 : Structure de bande d'un HEMT en présence d'un potentiel de grille [15].

Le transfert de charges génère dans la couche donneuse une zone désertée. Le profil électrique des charges détermine la courbure de bande de part et d'autre de l'hétérojonction ce qui se traduit par la formation d'un puits de potentiel de forme triangulaire dans le canal. Pour une largeur de puits inférieure à la longueur d'onde de Broglie, apparaissent les effets quantiques. Ces effets se traduisent par la quantification des niveaux d'énergie des électrons et par la restriction du mouvement des porteurs dans un plan parallèle à l'hétérojonction. On appelle gaz d'électrons bidimensionnel (2DEG) l'accumulation des électrons dans ce puits. L'hétérojonction permet la séparation spatiale des atomes donneurs ionisés des électrons libres. Ces électrons ne sont donc plus soumis aux interactions sur impuretés ionisées, et peuvent alors atteindre des mobilités importantes.

I.6 Présentation générale d'un transistor HEMT InAlN/GaN

La structure générale d'un HEMT InAlN/GaN est constituée essentiellement de trois matériaux différents : le substrat, un matériau à large bande interdite et un matériau à plus faible bande interdite. Comme nous l'avons déjà vu précédemment, c'est la jonction de ces deux derniers matériaux qui conduit à la formation d'un gaz d'électrons à l'interface, modulé par la tension appliquée au composant. La figure I.5 présente la structure de base d'un HEMT InAlN/GaN.

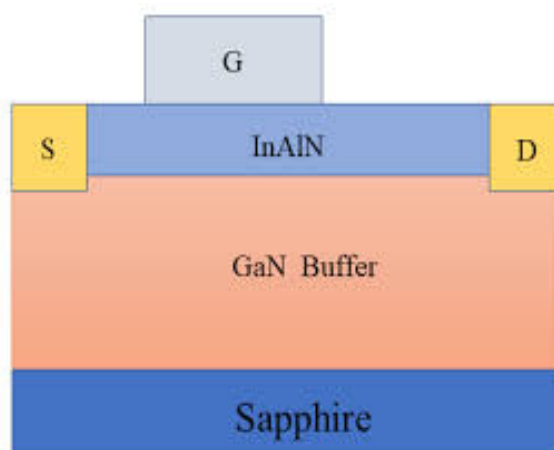


Figure I.5 : Structure générale du transistor HEMT AlGaIn/GaN [16].

I.7 Performances des composants HEMT à base de GaN

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

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

Des composants peuvent atteindre un rendement en puissance de 50 % et fonctionnent dans la gamme 2,9 à 3,3 GHz sous une polarisation de 65V sur le drain en régime pulsé [17]. Sur substrat de silicium, Nitronex a annoncé en 2004 un HEMT AlGaIn/GaN à 12W/mm de grille [1].

Dans la bande C (4-8 GHz), principalement utilisée dans les stations de base et les applications radar, Oku et *al.* ont réussi à atteindre en 2008 une puissance de 140 W. Cette excellente performance a été obtenue en utilisant une couche de passivation de SiN à la surface par Cat-CVD (Catalytic Chemical Vapor Deposition) pour minimiser les défauts à l'interface SiN/AlGaIn. Fujitsu a obtenu un amplificateur à base de GaN avec une puissance de sortie de 343 W. La même société a sorti récemment le premier amplificateur dans la bande X (8-12 GHz) avec une puissance de 100 W et un rendement de 50% [18]. Dans cette

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

Les performances en hautes fréquences ont été également démontrées dans la bande K (12-40 GHz). Kasahara et al. ont développé un HEMT avec une largeur de grille de 0,36 μm délivrant une puissance de 1,48 W (4,1 W/mm) à 30 GHz [18]. Avec une structure MOS GaN, Toshiba a sorti un transistor qui peut atteindre une puissance de 65,4 W à 14,5 GHz et une polarisation $V_{DS} = 30V$. Aujourd'hui, les évolutions technologiques dans le domaine des hyper fréquences ciblent des gammes de fréquence encore plus élevées ($> 40GHz$) [19]. La figure (I.6) montre la feuille de route qu'est en train de suivre la commercialisation des HEMTs à base de GaN dans les différents domaines de fréquences .

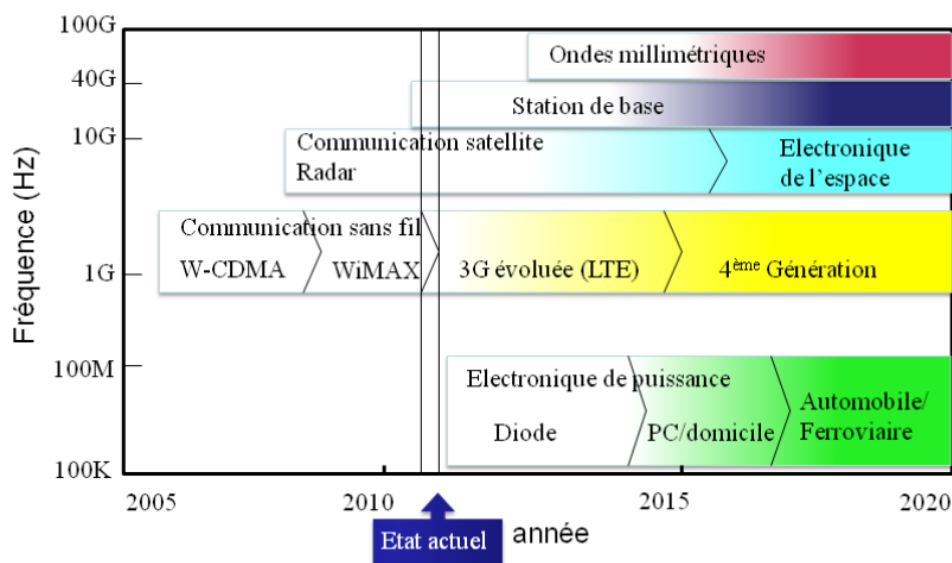


Figure I.6 : Feuille de route des domaines de commercialisation des HEMTs à base de GaN en fonction des fréquences de fonctionnement [20].

I.8 Conclusion

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

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

Références Bibliographiques

- [1] A. DOUARA,
Etude par simulation d'un transistor HEMT à base de AlGa_N/Ga_N ,
Mémoire de magister, Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbès , 2013.
- [2] A. FERADJI,
Modélisation TLM de diffusion thermique dans la composants semi-conducteurs grand à
Grand gap, Thèse de doctorat, Université USTO de Oran, 2017.
- [3] M. ABOU DAHER,
Réalisation et optimisation de Transistors HEMT Ga_N forte puissance et haute fréquence
par technologie de transfert de couches sur substrat hôte, Thèse de doctorat,
UT3 Paul Sabatier, 2020.
- [4] R. ALCOTTE,
Epitaxie en phase vapeur aux organométalliques de semiconducteurs III-As sur substrat
silicium et formation de contacts ohmiques pour les applications photoniques et RF sur
silicium, Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes, 2016.
- [5] M. Jérôme ,
Étude par Epitaxie en Phase Vapeur aux OrganoMétalliques
de la croissance sélective de Nano-Hétéro-Structures de matériaux à base de Ga_N, Thèse
de doctorat, Université Paule Verlaine de Metz et à Supélec, 2009.
- [6] E. MONROY,
Epitaxie par jets moléculaires des nitrures III-V: physique de la croissance de couches
minces et de nanostructures, Mémoire d'habilitation, Université Joseph Fourier –
Grenoble I, 2005.
- [7] G. CALLET,
Caractérisation et Modélisation de Transistors HEMT AlGa_N/Ga_N et InAl_N/Ga_N
pour l'Amplification de puissance en Radiofréquences, thèse de doctorat, université
Limoges, 2011.
- [8] R. Touhami, M.C.E. Yagoub et H. Baudrand,
Nouvelle approche de modélisation des transistors micro-ondes MESFET et HEMT,
thèse de doctorat, Can. J. Phys.79: 1075–1084 (2001)
- [9] M. Bouya, N.Malbert, N.Labat, D. Carisetti, P. Perdu, J.C. Clement, B. Lambert,
M.Bonnet, “Analysis of traps effect on AlGa_N/Ga_N HEMT by luminescence techniques”
Microelectronics Reliability ; Vol.48, pp.1366-1369, septembre 2008.

- [10] S.TAHRAOUI,
Modélisation d'un transistor HEMT GaN large signal par la méthode d'Angélov,
Mémoire de master ,université de blida 1,2016.
- [11] Cai, Y et al.
Control of Threshold Voltage of AlGaIn/GaN HEMTs by Fluoride-Based Plasma
Treatment: From Depletion Mode to Enhancement Mode. IEEE Transactions on
Electron Devices 53.9 (2006): 2207–2215.
- [12] C. Charbonniaud,
Caractérisation et modélisation électrothermique non linéaire de transistors à effet de
champ GaN pour l'amplification de puissance micro-onde, Thèse de doctorat soutenue
2005, Université de Limoges.
- [13] C. Djimli , Etude par simulation des phénomènes de polarisations et les contacts
ohmiques dans les transistors HEMTs a base de GaN Mémoire de Magister en
électronique, Université Mentouri - Constantine, 2005.
- [14] J. Y. Duboz,
Matériaux semi-conducteurs à grand gap III-V à base de GaN.
- [15] M. Werquin, «Etudes théoriques et expérimentales des transistors HEMTs de la filière
nitrure de gallium pour les applications de puissance hyperfréquences» Thèse de
doctorat soutenue le 14 Décembre 2005, Université de Lille .
- [16] J. H. Edgar, « Properties of group III Nitrides »
INSPEC publication, ISBN 0-85296-818-3.
- [17] H. Mathieu, «Physique des semiconducteurs et des composants électroniques»
DUNOD, ISBN 2-10-005654-9.
- [18] F. Bernardini, V. Fiorentini, D. Vanderbilt, «spontaneous polarization and piezoelectric
constants of III-V nitrides» Physical Review B, volume 56, numéro 16, octobre 1997,
pp.10024-10027 .
- [19] P. Chevalier, «Transistors à effet de champ à hétérojonction sur matériaux III-V pour
applications hyperfréquences». Cours Tec 35, Eudil, Ecole polytechnique universitaire
de Lille, (1999).
- [20] N. Vellas, « Etudes Expérimentales De Transistors HFET De La Filière Nitrure De
Galium Pour Des Applications De Puissance Hyperfréquences » Thèse de doctorat
soutenue 2003, Université de Lille.

CHAPITRE II

Généralités sur le nitrure de Gallium (GaN)

II.1 Introduction

Le nitrure de gallium GaN est un matériau sur lequel les recherches ont commencé dans les années 60. Cependant le développement des nitrures a été limité par la mauvaise qualité du matériau obtenu et par la difficulté du dopage (p). Néanmoins avec l'évolution des recherches, on arrive aujourd'hui à obtenir un GaN de bonne qualité ainsi qu'une mise au point d'un dopage type p. Ces réalisations ont fait du nitrure de gallium l'axe de recherche principal dans plusieurs domaines, optoélectronique et micro-ondes.

Le GaN a l'avantage d'avoir une bande interdite directe et large de 3,4 eV à 300K, de plus, par le fait de sa structure cristalline wurtzite et sa forte ionicité, il exhibe une variété de propriétés qui n'est pas présente (ou d'une façon moins importante) dans les semi-conducteurs conventionnels. L'élément principal est l'effet de la polarisation spontanée et piézoélectrique dont plusieurs études expérimentales et théoriques ont révélé son importance dans la conception et l'analyse des composants à base des hétérostructures de nitrures. L'intérêt dans ce chapitre sera donc de reporter un bref résumé sur les principales propriétés connues sur le GaN.

II.2 Les matériaux III-V

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

Des semi-conducteurs binaires comme le nitrure de gallium (GaN), l'antimoniure de gallium (GaSb), le phosphore d'indium (InP), l'arséniure d'indium (InAs), l'arséniure d'aluminium (AlAs), mais également les alliages ternaires et quaternaires qui en découlent, présentent des propriétés très intéressantes pour les applications hyper fréquences. Ces alliages ternaires et quaternaires sont réalisés par substitution partielle de l'un des éléments par un élément de la même colonne. On sait, par exemple, obtenir des alliages du type $Ga_x Al_{1-x} As$ ou un type $Ga_x In_{1-x} As$.

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

II.3 Le nitrure de gallium

Le nitrure de gallium GaN est un semi-conducteur III-V, souvent considéré comme un matériau dont les caractéristiques sont les plus prometteuses pour les applications de puissance en hyperfréquence à haute température. Le nitrure de gallium offre également la possibilité de réaliser des hétérojonctions avec l'AlN et l'AlGaN, permettant la fabrication de transistors HEMTs [1].

De plus, les hétérostructures à base de GaN hexagonal permettent, par la maîtrise du champ piézoélectrique et de polarisation spontanée, d'obtenir des densités de porteurs dans le canal très importantes de l'ordre de 10^{12}cm^{-2} et un courant de saturation important.

II.3.1 Structure cristalline et substrats de croissance du GaN

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

II.3.1.1 Structure cristalline wurtzite des nitrures

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

II.3.1.2 Structure cristalline zinc blende des nitrures

Dans la structure zinc blende les atomes d'azote forment un empilement cubique à faces centrées dans lequel les atomes de gallium occupent la moitié des sites tétraédriques (voir la figure II.1 (b)). Cette structure est caractérisée par le paramètre de maille a , il varie entre 4.51 et 4,52 Å [2].

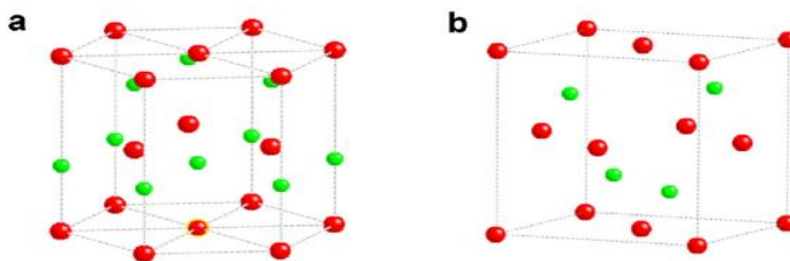


Figure II.1 structures (a) Wurtzite (b) zinc-blende de GaN. Les sphères rouges et bleues indiquent les atomes Ga et N, respectivement.

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

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

Le saphir Al_2O_3 : est semi-isolant, sa qualité cristalline est très bonne et il est disponible, à moindre coût et dans de grandes dimensions. Ce substrat révèle aussi plusieurs inconvénients, tels que: son fort désaccord de maille avec le GaN d'environ 16% et son fort désaccord de coefficient de dilatation thermique avec le GaN suivant l'axe « a ». De plus, la conductivité thermique du saphir est mauvaise (0.5K/W), ce qui est un facteur hautement limitatif pour les applications aux fortes puissances. Pour atténuer l'effet de désaccord de maille, on dépose une

couche mince d'AlN. Le désaccord de maille résiduel reste important et induit une forte densité de dislocations (de l'ordre de 10^{10}cm^{-2}) [1].

Le silicium : est utilisé, lui aussi, comme substrat de croissance pour le GaN. Ce substrat offre l'avantage d'être disponible et à très faible coût, ainsi qu'une meilleure conductivité thermique. C'est pourquoi, le Si couramment utilisé comme substrat de croissance pour les couches de GaN. Les points faibles de ce substrat sont : un fort désaccord de maille de l'ordre de 17% avec le GaN, et une différence du coefficient de dilatation thermique supérieure à 35% [3], ce qui produit une plus grande densité de dislocations. Des techniques de croissance appropriées où des couches de nucléation complexes, composées d'AlN et de GaN réalisées avant la couche GaN principale, sont déposées permettant de réduire ces risques.

Le substrat carbure de silicium SiC : contrairement aux autres cités précédemment, présente un meilleur accord de maille avec le nitrure de gallium GaN, alors il offre des conditions d'épitaxie plus favorables à cause d'un plus faible désaccord de maille et de coefficient thermique respectivement de 3.5% et 25% [4]. De plus, il a l'avantage d'avoir de bonnes propriétés physiques telles qu'une conductivité thermique excellente (4.9W/cmK) permettant une dissipation aisée de la chaleur. Cependant, les inconvénients majeurs de ce substrat sont principalement leur coût important et leur taille réduite disponible.

Le tableau II.1 résume les caractéristiques des substrats usuels pour GaN. Ces dernières sont données en rapport avec les paramètres du GaN, soit un paramètre de maille $a = 3.189 \text{ \AA}$ et un coefficient d'expansion thermique de $5.59 \times 10^{-6} / \text{K}$ [5].

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

Tableau II.1 Propriétés des principaux substrats pour le GaN.

II.3.3 Les hétérostructures à base de nitrures

La réalisation d'alliages ternaires à base de nitrure est un grand avantage du GaN par rapport au SiC. En effet, les hétérostructures réalisables telles qu' $\text{Al}_m\text{Ga}_{1-m}\text{N}/\text{GaN}$ permettent d'avoir des LEDs et LASER couvrant l'ensemble du spectre visible. En microélectronique, les différents gaps des matériaux de ces hétéro-structures permettent d'obtenir des grandes discontinuités de bande de conduction, qui, associées aux polarisations spontanée et piézoélectrique, donnent des densités de porteurs très grandes à l'interface. La gravure du GaN est difficile par voie chimique, c'est pourquoi la plupart des composants à base de ce matériau ont une structure planaire. Ainsi, les *MESFET* ont été les premiers composants réalisés pour la simplicité de leur structure [6]. L'inconvénient de cette structure est que les électrons se déplacent dans une couche dopée qui limite leur mobilité. Afin de surmonter le problème de la mobilité faible du MESFET, des hétéro-structures à haute mobilité électronique ont été réalisées. Ces structures nommées HEMT (High Electron Mobility Transistor) ont une grande vitesse de porteurs.

II.3.4 Propriétés des matériaux III-N

Le tableau II.2 donne à la température 300 K les paramètres de l' AlN , GaN et InN quand ces matériaux sont totalement relaxés [28].

<i>Paramètres de Structure wurtzite à 300K</i>	<i>Unité</i>	<i>GaN</i>	<i>AlN</i>	<i>InN</i>
<i>Constante diélectrique statique</i>	<i>1</i>	8.9	8.5	15.3
<i>Gap</i>	<i>eV</i>	3.39	6.2	1.89
<i>Masse effective à 300k</i>	<i>m_0</i>	0.2	0.48	0.11
<i>Mobilité électronique</i>	<i>Cm^2/Vs</i>	1000	135	3200
<i>Vitesse de saturation</i>	<i>Cm/s</i>	$2.5 \cdot 10^7$	$1.4 \cdot 10^7$	$2.5 \cdot 10^7$
<i>Champ de claquage</i>	<i>V/cm</i>	$>2.5 \cdot 10^6$		
<i>Conductivité thermique</i>	<i>W/cmK</i>	1.3	2.85	
<i>Température de fusion</i>	<i>$^\circ\text{C}$</i>	>1700	3000	1100
<i>a_0 [7]</i>	<i>Å</i>	3.189	3.112	3.54
<i>c_0 [8]</i>	<i>Å</i>	5.185	4.982	5.705
<i>α [9]</i>	<i>10^{-6}K^{-1}</i>	5.6/7.7	4.2/5.3	
<i>a_0/c_0 [8]</i>	<i><i>exp</i></i>	1.6259	1.601	1.6116
<i>a_0/c_0 [10]</i>	<i><i>cal</i></i>	1.6336	1.619	1.6270

Tableau II.2 Propriétés des matériaux III-N.

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

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

$$a_0 (In_mGa_{1-m}N) [\text{Å}] = a_0 (GaN) - 0.351m = 3.189 - 0.351m [\text{Å}]$$

II.4 Les caractéristiques générales du nitrure de gallium

II.4.1 Les matériaux grand-gap

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

II.4.2 Champ critique ou champ de claquage

Le champ de claquage ou champ critique (noté E_{cr} , unité : V/cm) est la valeur du champ ou de la tension maximum que peut supporter le composant. Les matériaux grand gap ont un champ de claquage très important. La valeur de ce champ est directement liée à la largeur de bande interdite par la fonction suivante :

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

Ce qui signifie que plus le gap d'énergie est important, plus le champ de claquage est élevé, mais aussi, le champ de claquage diminue lorsque la température augmente. Ce paramètre est un des plus importants à prendre en compte pour les performances en puissance d'un transistor. Il traduit, en effet, la tension maximale de fonctionnement du composant. Cette propriété engendre donc une limitation de la puissance RF. Plus le champ critique est élevé et plus on pourra réaliser des transistors de petites dimensions avec des dopages plus importants. En conséquence, le composant présentera entre autre une transconductance élevée, un meilleur gain en puissance, des fréquences plus élevées et un meilleur rendement dû aux résistances d'accès plus faibles.

II.4.3 Conductivité électrique, résistivité, conductivité thermique

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

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

En effet, une faible résistivité des substrats provoque des courants de fuites importants, ce qui augmente la puissance dissipée du dispositif et diminue ainsi la puissance transmise par celui-ci. Cependant, si on considère l'aspect thermique des matériaux, le contraire se produit. La conductivité électrique est directement liée à la conductivité thermique (notée K) :

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

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

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

II.4.4 Mobilité des électrons

La mobilité (notée μ , unité : $cm^2/V \cdot s$) étant liée au libre parcours sans choc dans le semiconducteur, toute modification du réseau cristallin entraîne une modification de celle-ci. En effet, l'ajout d'atomes dopants et/ou l'élévation de température, créent des perturbations dans le cristal et affectent la mobilité. La mobilité des électrons influe sur la valeur de la tension de coude V_{knee} . Une faible mobilité de charges induira une augmentation de la résistance parasite, soit plus de pertes et donc moins de gain. De plus, ces effets s'intensifieront pour des fonctionnements aux hautes fréquences et /ou à des températures élevées.

II.4.5 Largeur de bande interdite (gap)

L'énergie de bande interdite est un facteur de la capacité du matériau à supporter une forte température, elle définit la température maximale de fonctionnement du transistor. Le matériau est considéré comme un semiconducteur à grand gap pour des valeurs supérieures à $2eV$ [5]. Les variations de la largeur de la bande interdite peuvent être décrites approximativement par la fonction suivante [11].

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

Où les valeurs des paramètres $E_g(0)$, a et b sont résumées dans le Tableau II.3 suivant pour différents matériaux [2].

<i>Semiconducteur</i>	<i>E_g(0)(eV)</i>	<i>a(eV/K)</i>	<i>b(k)</i>
<i>GaAs</i>	<i>1.519</i>	<i>5.405</i>	<i>204</i>
<i>Si</i>	<i>1.17</i>	<i>4.73</i>	<i>636</i>
<i>Ge</i>	<i>0.7437</i>	<i>4.774</i>	<i>235</i>
<i>GaN</i>	<i>3.509</i>	<i>7.32</i>	<i>700</i>
<i>AlN</i>	<i>6.118</i>	<i>17.99</i>	<i>1432</i>

Tableau II.3 Paramètres de la variation de la bande interdite en fonction de la température.

II.4.6 Polarisation spontanée et piézoélectrique

La piézoélectricité est l'aptitude de certains matériaux à produire une charge électrique dipolaire proportionnelle à la contrainte mécanique (traction ou compression) qui les déforme. L'effet piézoélectrique direct résulte essentiellement de l'existence de dipôles électriques internes créés par la séparation à l'échelle de la maille du centre de gravité des charges positives de celui des charges négatives sous l'effet d'une contrainte externe. Ce phénomène est réversible par l'application d'un champ électrique externe. Par le fait qu'ils sont non-centrosymétriques, les composés III-V sont piézoélectriques. Cette dernière propriété est très importante pour les nitrures à cause de la forte polarisation de la liaison IIIN, alors les électrons sont totalement localisés sur l'atome d'azote. En l'absence de contrainte ou de champ externes, certains cristaux présentent une polarisation électrique dite spontanée. Cette classe de cristaux est appelée pyroélectriques, à cause de la variation de la polarisation spontanée avec la température. Cette classe est composée de matériaux ferroélectriques tels que les nitrures d'éléments III (GaN, AlN, InN et leurs alliages).

II.4.6.1 Polarisation spontanée

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

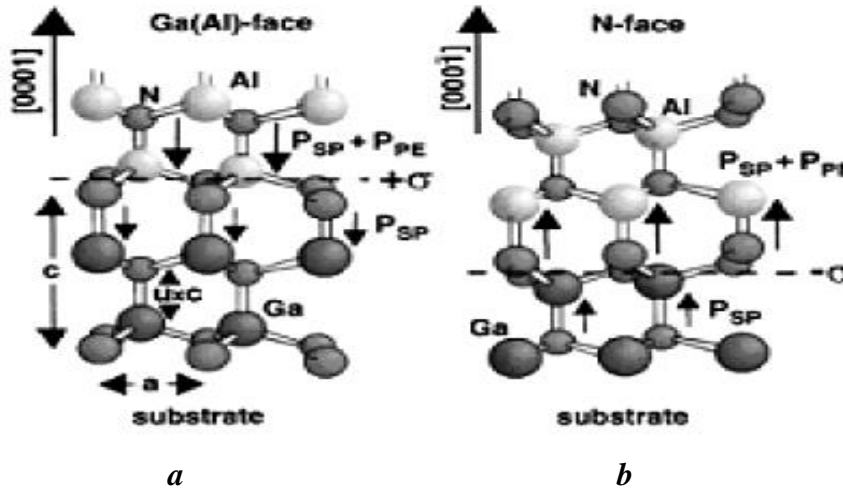


Figure II.2 Représentation des séquences de couches d'atomes donnant lieu à deux polarités différentes.

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

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

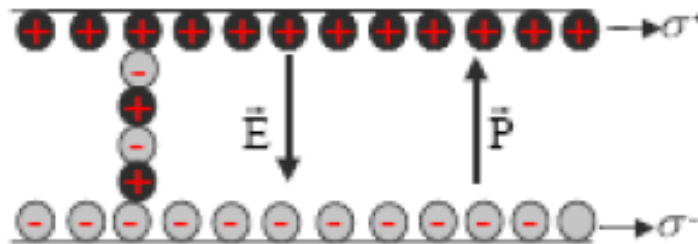


Figure II.3 Génération d'un champ électrique E par la polarisation spontanée.

En d'autres termes, un échantillon de GaN, wurzite épitaxié suivant l'axe « c », présente sur chacune de ses deux faces des densités de charges fixes identiques mais de signes opposés. Ce matériau est par définition naturellement polarisé sans l'apport extérieur d'un champ

électrique : c'est la polarisation spontanée. Dans une hétérostructure AlGaN/GaN, les valeurs numériques de la polarisation spontanée suivant l'axe « c » de différents nitrures d'éléments III sont résumées dans le tableau II.4. Ces données issues de la littérature ont été déterminées théoriquement par F. Bernardini *et al* [12].

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

Tableau II.4 Valeurs numériques théoriques de PSP.

Les valeurs des polarisations spontanées du tableau II.4 sont négatives, signifiant que le vecteur P_{SP} est orienté dans le sens opposé à la direction [0001], c'est dans le cas d'une hétérostructure GaN à face Ga. Par contre, si la structure est à face N, l'orientation du vecteur de polarisation spontanée est dans le sens inverse soit $P_{SP} > 0$. Une loi linéaire représentant l'évolution de la polarisation spontanée du composé ternaire $Al_mGa_{1-m}N$ en fonction du taux d'aluminium m peut être établie à partir des valeurs de polarisation spontanée de AlN et GaN.

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

II.4.6.2 Polarisation piézoélectrique

Les matériaux piézo-électriques sont des diélectriques particuliers qui permettent de transformer l'énergie de déformation élastique en énergie électrique, et inversement. Plus précisément, la piézoélectricité est la capacité de certains matériaux à se polariser lorsqu'ils sont contraints mécaniquement, la charge apparaissant à leur surface étant proportionnelle à la déformation engendrée. Si ces matériaux sont des cristaux constitués par des paires non centrosymétriques tel que le GaN (cubique ou hexagonal), on observe une modification des moments dipolaires liés à la variation des distances inter atomiques.

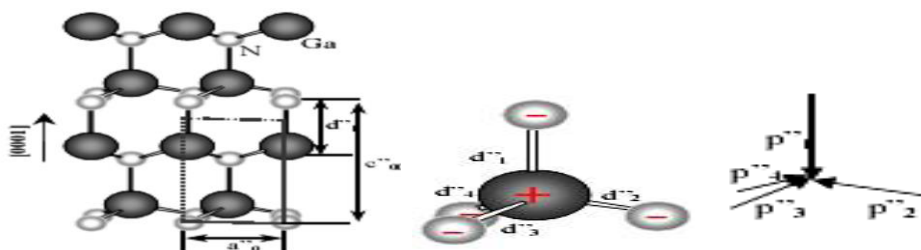


Figure II.4 Plan d'atomes d'une structure wurtzite de GaN contrainte et répartition des moments dipolaires (Face Ga).

La figure II.4 illustre le phénomène piézoélectrique d'une couche de nitrure de gallium contrainte. Dans le cas d'une hétérostructure $\text{Al}_m\text{Ga}_{1-m}\text{N}/\text{GaN}$, les forces externes sont générées par le désaccord de maille existant entre les deux matériaux. Cette polarisation sera notée P_{pZ} et elle donnée par l'expression [13] :

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

Avec:

- e_{31} , e_{33} : sont les coefficients piézo-électriques.
- C_{13} , C_{33} : sont les constantes élastiques.
- a_0 , c_0 : sont les constantes de maille d'un matériau sous aucune contrainte.
- a : est la constante de maille d'un matériau contraint.

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

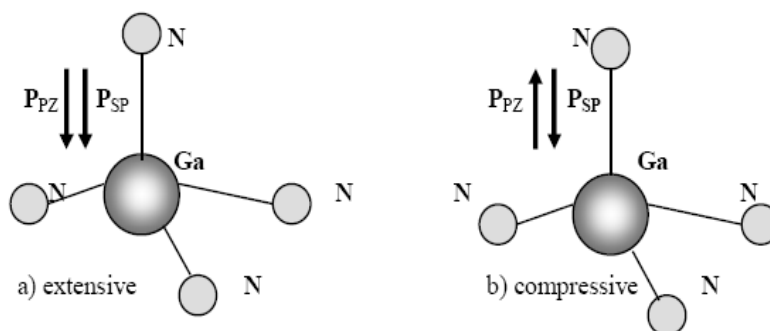


Figure II.5 Polarisation piézoélectrique dans le GaN.

Le tableau II.5 résume les valeurs numériques des constantes piézoélectriques et élastiques de GaN, AlN et InN issues de la littérature [14].

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

Tableau II.5 Valeurs numériques des constantes piézoélectriques et élastiques de GaN, AlN, InN.

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

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

$$e_{33} = (0.73m + 0.73) (C/m^2)$$

$$C_{13} = (5m + 103) (GPa)$$

$$C_{33} = (-32m + 405) (GPa)$$

Les polarisations spontanées et piézoélectriques pour les matériaux GaN et AlN sont environ dix fois plus importantes que dans les matériaux III-V conventionnels (GaAs, InP). La polarisation spontanée peut générer des champs électriques de 3 MV/cm dans les matériaux de type III-N et la contrainte de la couche supérieure des hétérostructures AlGaN/GaN ou InGaN/GaN peut produire un champ piézoélectrique d'environ 2 MV/cm. Ceci engendre des champs électriques permettant la formation d'un gaz bidimensionnel d'électrons avec des densités de porteurs très élevées.

II.5 Concentration de porteurs dans une hétérojonction AlGaN/GaN

À partir des données précédentes, nous avons calculé la densité de charges fixes σ développées à l'interface d'une hétérostructure $Al_mGa_{1-m}N/GaN$ à face Ga, en supposant que le GaN est totalement relaxé et le AlGaN contraint en tension. La structure est représentée dans la figure II.6, où seules les charges fixes positives et négatives ont été représentées. La couche du GaN, n'étant pas contrainte, elle présente des charges positives et négatives moins importantes que dans l'AlGaN, ces dernières ne sont pas représentées sur la figure II.6

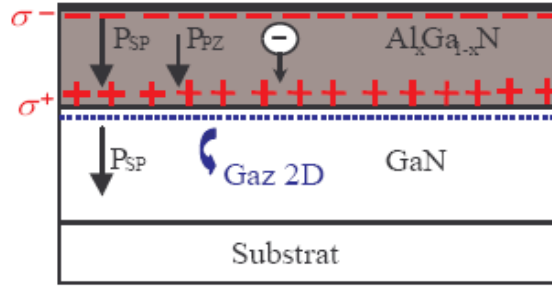


Figure II.6 Structure AlGaIn/GaN à face Ga, où GaN est relaxé et AlGaIn contraint en tension.

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

$$\sigma = P_{SP_{AlGaIn}}(m) + P_{PZ_{AlGaIn}}(m) - P_{SP_{GaN}} \quad (II.7)$$

Avec

$$P_{PZ_{AlGaIn}}(m) = 2 \frac{(a-a_0(m))}{a_0(m)} \left(e_{31}(m) - e_{31}(m) \frac{c_{13}(m)}{c_{33}(m)} \right) \frac{c}{m^2} \quad (II.8)$$

$$P_{SP_{AlGaIn}} = -0.052m - 0.029 \quad C/m^2 \quad (II.9)$$

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

Les premières recherches effectuées sur les semiconducteurs à grand gap ont été dirigées vers des applications optoélectroniques. Cela est dû au fait que le bleu était la couleur qui manquait sur le marché des diodes électroluminescentes (LED). Avant que les LEDs à base de GaN ne deviennent disponibles, le SiC a été utilisé, mais sa bande interdite indirecte conduisait à une efficacité de recombinaison radiative plutôt faible. En utilisant le système d'alliages de nitrure InGaAlN, des LEDs de longueurs d'onde allant de l'ultraviolet (UV) au bleu/vert peuvent être réalisées avec une très bonne efficacité. De nombreuses autres applications sont possibles telles que les écrans de télévision à base de LED, l'éclairage automobile et peut-être l'éclairage général dans le futur. Les LEDs blanches peuvent être réalisées par revêtement de l'intérieur d'une LED UV avec un luminophore (par exemple du phosphore) pour convertir les photons ultraviolets en lumière visible.

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

enregistreurs DVD appelés Blue-Ray Disc utilisés par Sony pour la première fois en 2003. Dans le domaine de la microélectronique, la plupart des applications sont dirigées vers le développement de dispositifs haute fréquence/haute puissance. Les deux technologies à base de SiC et de GaN offrent l'avantage d'une densité de puissance élevée et de bonnes propriétés thermiques, ce qui permet d'obtenir des petits modules de puissance assez performants. Dans les systèmes nitrures, la structure couramment utilisée est la structure latérale de type HEMT. Aujourd'hui, le plus gros marché potentiel concerne les stations de base destinées aux communications (satellites, téléphonie mobile...). Compte tenu de leurs avantages, les dispositifs à base de GaN rentrent en concurrence avec les technologies LDMOS (laterally diffused metal oxide semiconductor) à base de silicium et les HEMTs pseudomorphiques GaAs qui sont beaucoup moins chers mais aussi moins performantes. La réalisation des transistors bipolaires à hétérojonction (TBH) à base de GaN est complexe en raison de la difficulté d'atteindre un dopage de type p suffisamment fort dans la base. En outre, la présence des dislocations peut générer des chemins de conduction parallèle dans ces dispositifs à conduction verticale et affecter leur fiabilité.

La figure II.7 montre les gammes de puissance accessibles en fonction des fréquences de fonctionnement pour certains semi-conducteurs utilisés aujourd'hui dans la microélectronique.

Nous remarquons que, contrairement au GaAs ou au silicium, dont l'utilisation se limite à des gammes bien déterminées en fréquence et en puissance, le GaN apparaît comme un bon candidat pour couvrir des domaines plus larges avec un bon compromis puissance-fréquence [15].

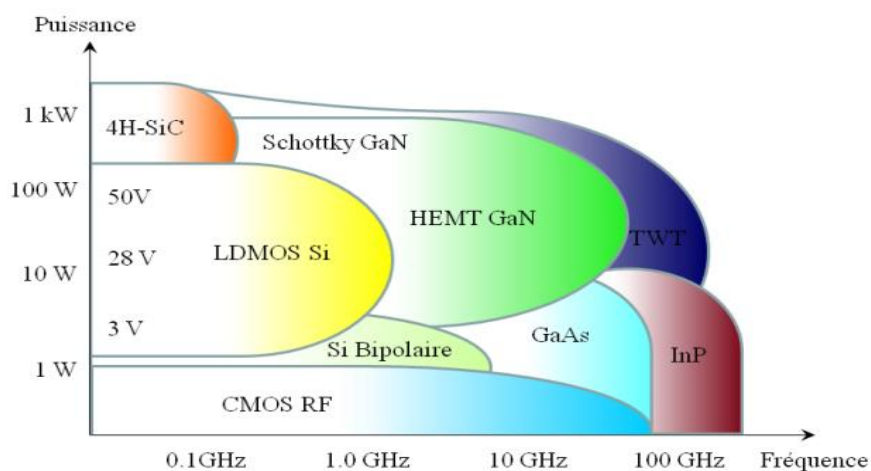


Figure II.7 Gammes de puissances accessibles en fonction de la fréquence pour différents matériaux semi-conducteurs [16].

Un autre domaine d'application est l'électronique haute température. Habituellement, les systèmes électroniques qui contrôlent les compartiments à haute température, comme un moteur à réaction, sont situés dans les régions froides. Cela nécessite un câblage entre le système électronique et les capteurs. Si ces systèmes pouvaient être placés dans la zone à haute température, la quantité totale de câblage pourrait être réduite. L'utilisation des composants à base de GaN présente un avantage du fait de leur capacité de fonctionnement dans un environnement qui peut atteindre 600°C. Cette température de fonctionnement est deux fois supérieure à celle des composants à base de Si sur isolant (SOI) qui ne dépasse pas 300°C.

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté un résumé sur les nitrures de gallium, ses propriétés structurales, électriques et électroniques, ainsi que les substrats utilisés pour la croissance de ce matériau.

L'élément important est la polarisation spontanée et la polarisation piézoélectrique et leur influence sur les propriétés et comportement des composants.

Le GaN possède une polarisation spontanée permanente d'une valeur de -0.029 C/m^2 , valeur élevée par rapport aux autres semi-conducteurs AlN et InN et une polarisation piézoélectrique dont les coefficients sont encore supérieurs.

L'effet de la combinaison de ces deux polarisations fait surgir une densité de charge qui sera l'origine de la concentration n_s du 2DEG dont la valeur s'évalue à 10^{12} cm^{-2} à l'interface des hétérojonctions en l'absence de tout dopage dans la structure.

Références Bibliographiques

- [1] S. de Mayer,
Etude d'une nouvelle filière de composants HEMTs sur technologie nitrure de gallium.
Conception d'une architecture flip-chip d'amplificateur distribué de puissance à très large bande. » Thèse de doctorat soutenue le 12 Septembre 2005, Université de Limoges.
- [2] N. Ghalichechian, « Silicon Carbide Overview of Physical Properties and Thin Film Deposition». ENEE793, Solid State Electronics Fall 2002.
- [3] S.M. Sze, «Semiconductor Devices - Physics and Technology».
1985, ISBN 0-471-87424-8
- [4] S. J. Pearton, J. C. Zolper, et F. Ren, « GaN: Processing, defects and devices
J. Appl. Phys. Vol. 86. pp. 1-78. 1999
- [5] Y. Cordier, « Influence of substrate choice on the electrical properties of MBE AlGaN/GaN HEMTs». GAAS 2002 work shop: Wide Band-Cap Research for Microwave Applications: Device and Circuit Issues, 2002.
- [6] O. Ambacher; J. Smart; J. R. Shealy; N. G. Weimann; K. Chu. M. Murphy; W. J. Schaff; et L. F. Eastman, « Two dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization charges in N- and Ga-face AlGaN/GaN heterostructures » Journal of Applied Physics, volume 85, numéro 6, September 1999, pp.3222-3233.
- [7] D. Delage beaudeuf, P. Delescluse, P. Etienne, M. Laviron, J. Chaplart, N. T. Linh, « Two dimensionnal electron gas MESFET structure »
- [8] T. Mimura; S. Hiyamizu ; T. Fujii ; K. Nanbu, « A new field-effect transistor with selectively doped GaAs/n-Al_xGa_{1-x}As heterojunctions» Aplanes Journal of Applied Physics, Vol.19, No 5, Mai 1980, pages L225 à L227.
- [9] E. Byk, "Méthodes d'analyse couplés pour la modélisation de composants et modules millimétriques de forte puissance", Thèse de Doctorat, Université de Limoges, 2002.
- [10] M. Feneyrol, « Télécommunication : réalités et virtualités, un avenir pour le XXIème siècle ». Editions MASSON, 1996.
- [11] C. Charbonniaud, « Caractérisation et modélisation électrothermique non linéaire de transistors à effet de champ GaN pour l'amplification de puissance micro-onde »
Thèse de doctorat soutenue 2005, Université de Limoges.
- [12] Pascal Chevalier, transistors à effet de champ à hétérojonction sur matériaux III-V pour applications hyperfréquences cours Tec 35, Eudil, Ecole polytechnique

- universitaire de Lille, (1999).
- [13] J. Johnson, E. Piner, A. Vescan, R. Therrien, P. Rajagopal, J. Roberts, J. Brown, S. Singhal, et K. Linthicum, “12 W/mm AlGa_N-Ga_N HFETs on silicon substrates,” *Electron Device Letters, IEEE*, vol. 25, pp. 459 – 461, july 2004.
- [14] E. Mitani, M. Aojima, and S. Sano, “A kW-class AlGa_N/Ga_N HEMT pallet amplifier for S-band high power application,” pp. 176 –179, oct. 2007.
- [15] T. Oku, Y. Kamo, and M. Totsuka, “AlGa_N/Ga_N HEMTs passivated by Cat-CVD Si_N Film,” *Thin Solid Films*, vol. 516, no. 5, pp. 545 –547, 2008. Proceedings of the Fourth International Conference on Hot-Wire CVD Cat-CVD Process.
- [16] T. Kikkawa, K. Makiyama, T. Ohki, M. Kanamura, K. Imanishi, N. Hara, et K. Joshin, “High performance and high reliability AlGa_N/Ga_N HEMTs,” *physica status solidi (a)*, vol. 206, no. 6, pp. 1135–1144, 2009.

CHAPITRE III

Simulation d'un HEMT InAlN/GaN

III.1. Introduction

Durant ces dernières années, et cause des coûts élevés de l'expérimentation, les chercheurs se sont orientés vers la simulation. La simulation est donc largement utilisée dans le domaine électronique et permet en effet de déterminer les paramètres les plus importants pour le fonctionnement des dispositifs, de minimiser les pertes et d'optimiser les paramètres physiques et géométriques de ces dispositifs [1].

Dans ce travail nous utilisons le simulateur Nextnano pour résoudre de façon auto-cohérente les équations de continuité et de poisson en tout point de la structure simulée.

Nous présenterons dans un premier temps l'architecture étudiée de transistor HEMT à base de InAlN/GaN, dans un deuxième temps nous présenterons les résultats simulés sur ce transistor, et enfin nous comparé avec le transistor HEMT AlGaN/GaN.

III.2 Présentation du logiciel Nextnano

III.2.1 Définition

Nextnano est un outil de simulation de nano-dispositifs semi-conducteurs et qui a été développé pour la prédiction et la compréhension d'un large éventail de propriétés optiques et électroniques des nanostructures semi-conductrices. L'idée sous-jacente est de fournir un cadre solide et générique pour la modélisation et la simulation dans le domaine des semi-conducteurs nanométriques et hétérostructures.

Le simulateur de traite avec des géométries réalistes et presque toutes les combinaisons de matériaux. Il met l'accent sur un traitement précis et fiable des effets de la mécanique quantique et offre une solution auto-cohérente des équations de Schrödinger, Poisson, et de courant. Les effets d'échange-corrélation sont pris en compte en termes de l'approximation de la densité locale. La structure électronique est calculée dans le cadre de la méthode (k.p).

Le code n'est pas destiné à être une boîte noire, mais nécessite une bonne compréhension de la mécanique quantique. La syntaxe du logiciel fournit un certain nombre d'outils qui simplifient la mise en place de la géométrie du dispositif et la composition matérielle ainsi que les tâches répétitives.

Nextnano est un simulateur de calcul de la structure électronique en trois dimensions des dispositifs semi-conducteurs et de leur densité de charge en équilibre.

La structure électronique est calculée en se basant sur la mécanique quantique, alors que le courant est déterminé en utilisant un concept semi-classique.

Les équations utilisées dans le simulateur nextnano sont [2] :

- **L'équation de Poisson :**

$$\nabla^2\psi = \frac{q}{\epsilon} \cdot (n - p - c) \quad (\text{III.1})$$

Où ψ est le potentiel électronique, q est la charge de l'électron, ϵ est la constante diélectrique du milieu, n est la densité des électrons, p est la densité des trous et c la densité des donneurs et accepteurs.

- L'équation de continuité du courant pour les électrons et les trous :

$$\nabla \vec{j}_n - q \cdot \frac{\partial n}{\partial t} = q \cdot R \quad (\text{III.2})$$

$$\nabla \vec{j}_p - q \cdot \frac{\partial p}{\partial t} = -q \cdot R \quad (\text{III.3})$$

Où \vec{j}_n est le courant des électrons, \vec{j}_p est le courant des trous, et R le taux de génération recombinaison.

- L'équation de courant pour les électrons et les trous :

$$\vec{j}_n = q \cdot n \cdot \mu_n \cdot \vec{E}_n + q \cdot D_n \cdot \nabla n \quad (\text{III.4})$$

$$\vec{j}_p = q \cdot p \cdot \mu_p \cdot \vec{E}_p - q \cdot D_p \cdot \nabla p \quad (\text{III.5})$$

Où μ_n , μ_p sont les mobilités des électrons et des trous, E est l'intensité du champ électrique et D est la constante de diffusion.

III.2.2 Méthodologie du programme

Le logiciel de simulation Nextnano résout les équations de Poisson et de Schrödinger pour des différentes géométries de dispositifs semi-conducteurs et pour toutes les combinaisons de matériaux et alliages. Il inclut le calcul de l'énergie de déformation élastique, la tension induite par la redistribution de charge, les effets piézo-électriques et pyro-électriques, ainsi que les charges de surface.

La densité de charge est calculée pour une tension appliquée donnée en supposant que les porteurs sont en équilibre thermodynamique [3].

$$n_c(x) = \sum_i |\psi_{ic}(x)|^2 f\left(\frac{E_{Fc}(x) - E_{ic}}{k_B T}\right) \quad (\text{III.6})$$

$E_{Fc}(x)$ est l'énergie du niveau de Fermi pour les porteurs de la bande de conduction (électron).

Ces niveaux de Fermi sont déterminés par la conservation de courant

$$\nabla \cdot j_c = 0$$

Pour une nanostructure donnée, les calculs commencent par la minimisation de l'énergie totale élastique en utilisant la méthode du gradient conjugué. Cela détermine la distribution de charge, les potentiels de déformation et les décalages de bande. Par la suite, on résout l'équation de

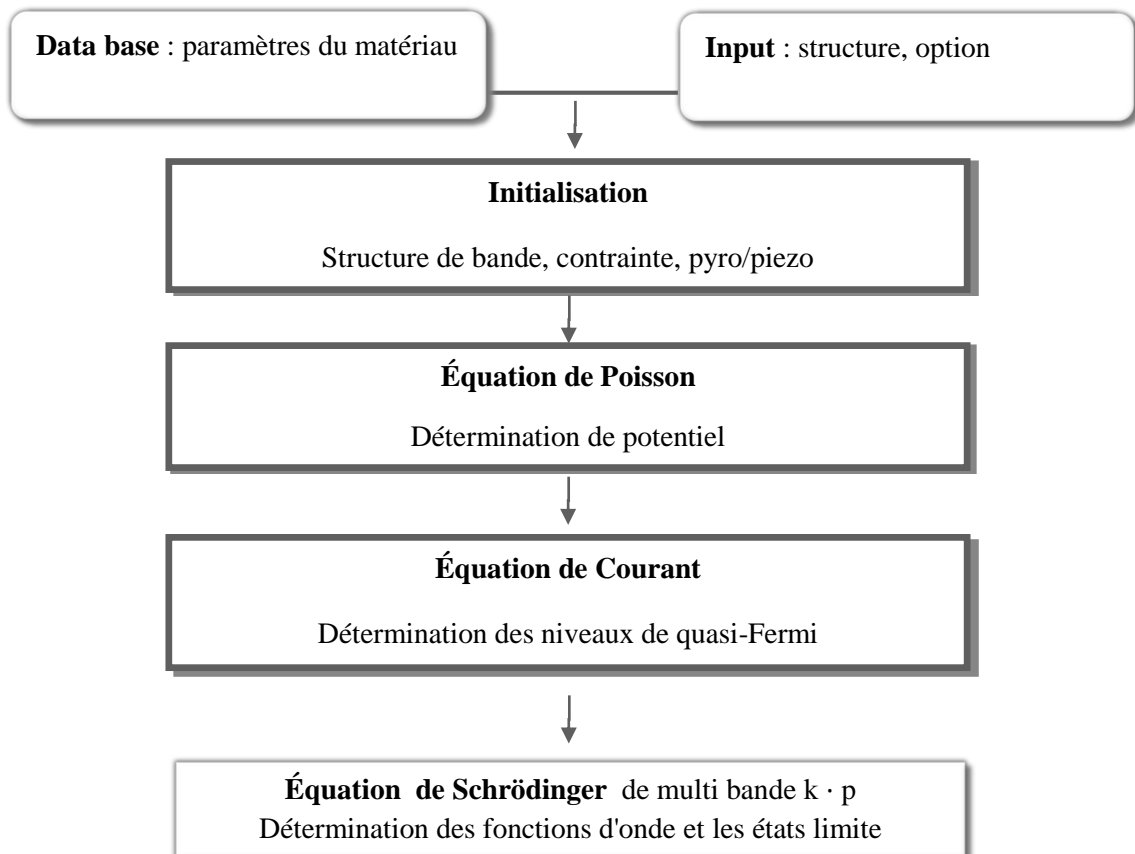
Schrödinger, Poisson, et l'équation de continuité de courant de manière itérative. Toutes les équations sont discrétisées selon la méthode des différences finies.

III.2.3 Les flux de programme et leur structure

La figure (III.1) illustre l'organigramme de programme Nextnano, les flux de programme peut être résumés comme suit. L'utilisateur spécifie l'entrée en utilisant un fichier texte qui définit la géométrie et les matériaux de la nanostructure, le contact partialité, et toute autre information nécessaire pour décrire le système physique à l'étude.

La syntaxe de ce fichier d'entrée est concise et permet même des structures très complexes pour être caractérisé par quelques lignes. Puis, dans la phase initiale, le programme évalue les structures de bandes en vrac de tous les constituants des matériaux, effectue un calcul de déformation globale, et détermine les bords de la bande de nouvelles charges piézoélectriques.

Par la suite, l'équation de Poisson, et l'équation de Schrödinger multi bande sont résolues auto-cohérente. Enfin, dans une étape de post-traitement des éléments de matrice optiques et courants balistiques peuvent être calculés.



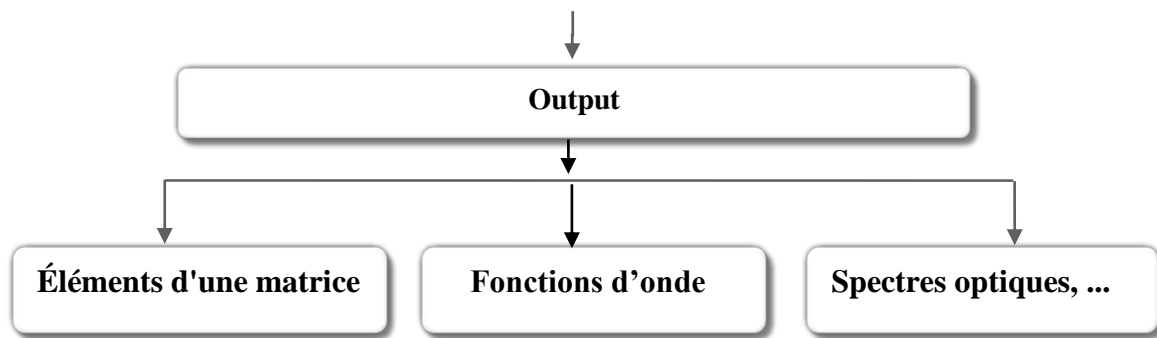


Figure III.1 : Organigramme du simulateur Nextnano [3].

III.2.4 Les données nécessaires au logiciel

- Dimension de la structure étudiée (1D, 2D ou 3D).
- Matériaux et forme de la structure.
- Potentiel de polarisation appliquée à la structure.
- Dopage le cas échéant.
- Définition des valeurs à calculer et des fichiers de sortie.

III.2.5 Type de donnée calculée par Nextnano

- Structure de bande.
- Charges piézo-électriques et pyro-électriques.
- Densités d'électrons/trous (charge d'espace).
- Potentiel électrostatique.
- Courant.
- Fonctions d'onde.

III.2.6 Organisation du calcul

- Le fichier d'entrée est traité, à savoir les données matérielles seront lues à partir de la base de données et de la géométrie.
- Les extrémités de bandes seront calculées et les charges pyro-électriques et piézo-électriques de polarisation seront déterminées.
- Le programme met en place des régions quantique et alloue les états, et toutes les autres variables qui contiennent les solutions physiques.
- Le démarrage du programme principal.
- Une valeur de départ pour le potentiel est déterminée.

- L'équation non-linéaire de Poisson sera résolue.
- Ensuite, le programme peut continuer selon le type de résultat souhaité.
- Finalement, les résultats seront inscrits dans les fichiers spécifiés.

III.3 Présentation du Modèle de simulation

Nous utilisons le Al_2O_3 comme un substrat pour le structure HEMT InAlN/GaN, La figure (III.2) montre une représentation schématique de la structure de HEMT à un et deux dimensions. Le canal est à base de GaN non intentionnellement dopée (nid). La concentration de dopage dans cette couche est $N_{D1} = 2 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ de type n. La largeur du canal est de $1 \mu\text{m}$. Le canal est inséré sous une couche d'espaceur d'épaisseur (d) avec un dopage de $N_{D2} = 10^{17} \text{cm}^{-3}$ dans laquelle est insérée une couche de dopage N_D (δ). Le dispositif à une longueur de grille de $L_g = 0,6 \mu\text{m}$.

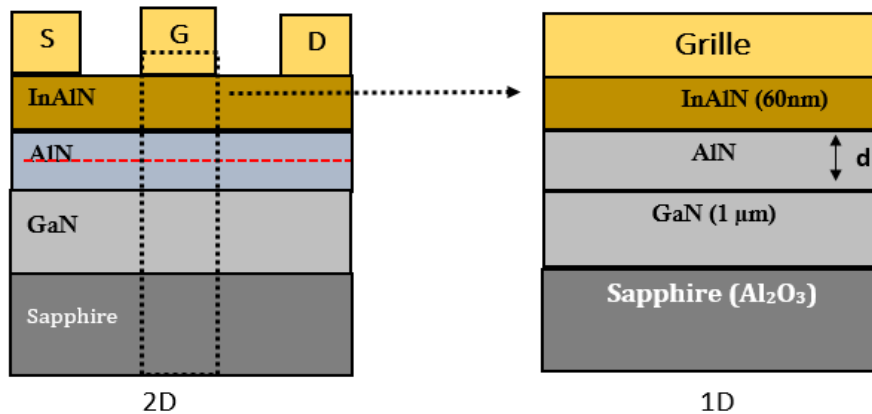


Figure III.2 : Structure de transistor HEMT InAlN/GaN étudié.

III.4 Concentration d'électrons (N_S) en fonction de la tension de grille (V_G)

III.4.1 Influence de l'épaisseur de la couche AlN :

Nos calculs ont été effectués afin d'étudier l'impact de la tension de grille sur la densité 2-DEG. Nous avons montré l'influence des différents paramètres sur la caractéristique $N_S = f(V_G)$.

La figure (III.3) montre la variation de la densité de 2-DEG par rapport à la tension de grille V_G calculée pour différentes épaisseurs de couche d'espaceur AlN ici, nous dopant la couche de barrière à $N_D = 3 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ et révèle que, lorsque l'on augmente une largeur (d) de cette couche, la concentration de 2-DEG augmente avec V_G .

L'augmentation de la densité électronique est due à l'effet de la polarisation piézoélectrique et spontanée. L'espaceur AlN peut provoquer une augmentation de la diffusion dipolaire en raison d'un fort effet de polarisation et donc détériorer la mobilité de 2DEG. En dessous de cette épaisseur critique, l'espaceur améliore le décalage de la bande de conduction, ce qui réduit efficacement la pénétration de la fonction d'onde dans la barrière AlN et réduit ainsi l'effet de la diffusion des désordres de l'alliage.

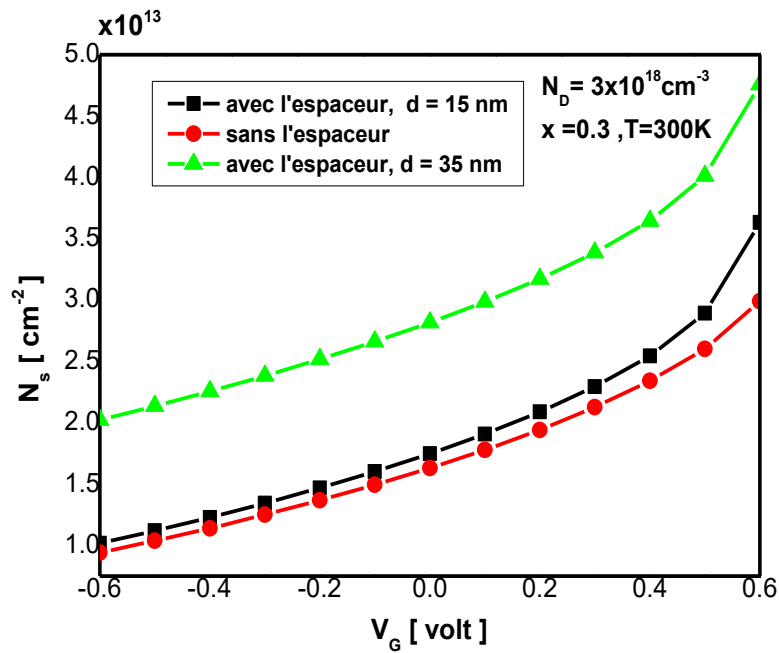


Figure III.3 : Concentration d'électrons (N_s) en fonction de la tension de grille (V_G) pour les différentes valeurs de l'épaisseur de couche AlN.

III.4.2 Influence de fraction molaire (x) :

En utilisant le modèle de contrôle de charge de variation, nous avons calculé la variation de la densité 2DEG en fonction de la tension de grille pour le même modèle de Figure (III.2) et nous prenons ici $d = 15 \text{ nm}$ pour trois fractions molaires d'aluminium différentes ($x = 0, 1, 0, 2$ et $0, 3$). Les résultats de ces calculs, illustrés sur la figure (III.4), indiquent que l'effet principal des valeurs plus élevées de la fraction molaire sur le 2DEG. Lorsque les fractions molaires Al dans la structure augmentent l'électron, la densité augmente également pour $x=0,3$.

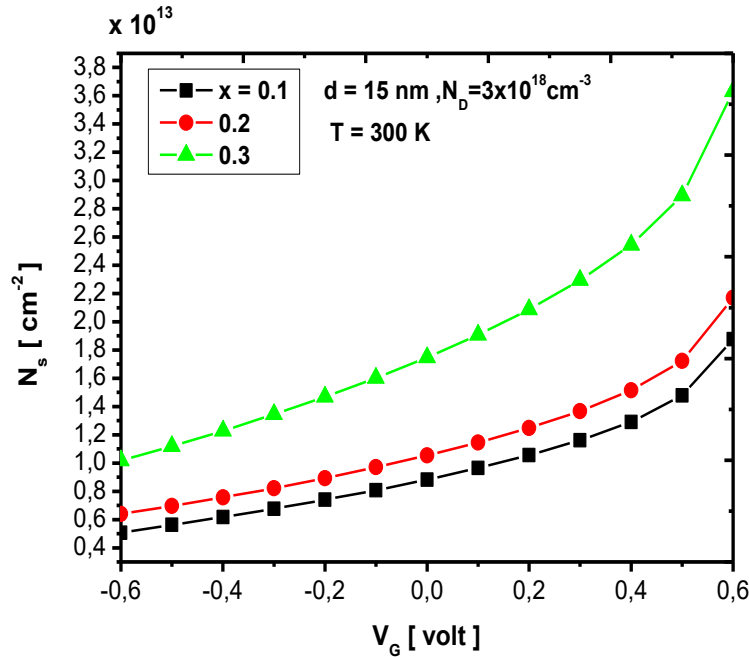


Figure III.4 : Concentration d'électrons (N_s) en fonction de la tension de grille (V_G) pour les différentes valeurs de fraction molaire (x).

III.4.3 Influence de la concentration de donneurs (N_D):

La concentration de donneurs (N_D) sur la couche barrière de $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{N}$ est un autre facteur qui influence la densité de 2DEG. La Figure (III.5) montre la dépendance de la concentration d'électrons sur N_D , tandis que d'autres paramètres sont choisis pour être les mêmes que ceux de la Figure (III.2).

Nous observons que la concentration d'électrons augmente lorsque la densité de dopage est augmentée, et les résultats révèlent également que la contribution d'impuretés donneuses supplémentaires à la concentration d'électrons devient dans le canal.

L'influence de la température T , sur la d'autre part, est relativement faible comme nous l'avons vu sur la figure (III.6). Seul le comportement de saturation devient plus distinct si T diminue considérablement en dessous de la température ambiante.

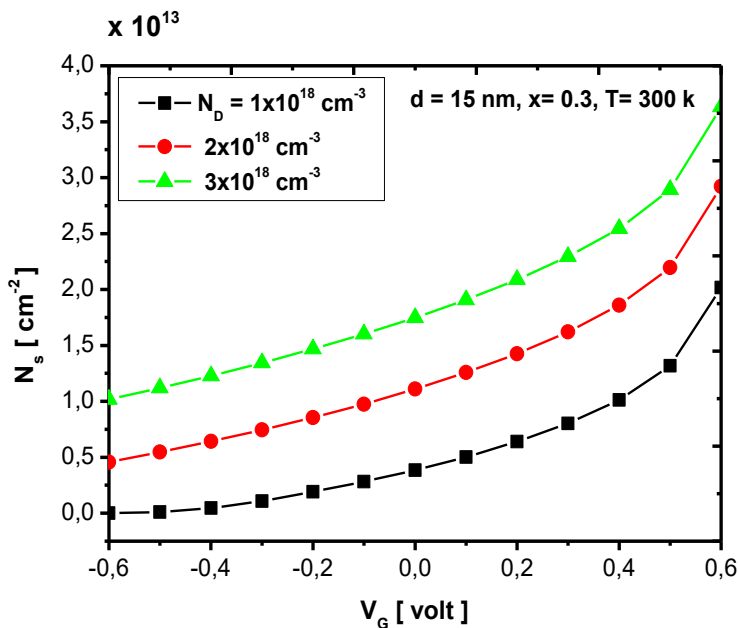


Figure III.5 : Concentration d'électrons (N_s) en fonction de la tension de grille (V_G) pour les différentes valeurs de N_D (δ).

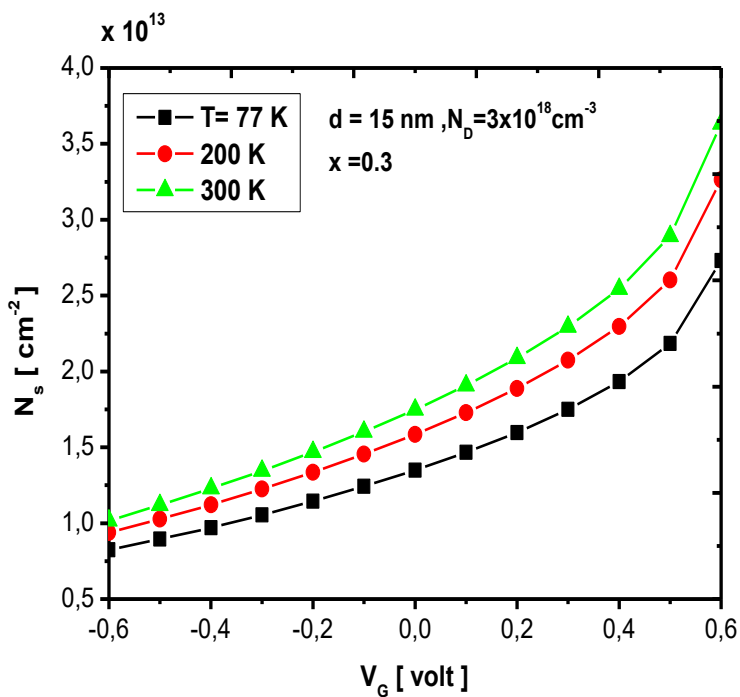


Figure III.6 : Concentration d'électrons (N_s) en fonction de la tension de grille (V_G) pour les différentes valeurs de températures.

La densité 2DEG avec la variation de la tension de grille de -0,6 V à 0,6 V, pour les HEMT à base de AlGaIn/GaN et à base de InAlN/GaN est calculée et est illustrée à la Figure (III.7), Il est intéressant de noter à partir de cette figure que la densité de 2DEG pour le HEMT à base de InAlN atteint un pic de $3,63 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ à une tension de grille de 0,6 V, et pour que les HEMT à base de AlGaIn, la densité 2DEG atteint un pic de $2,57 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. On peut aussi calculer la capacité de la grille à chaque point de polarisation, dérivez la concentration d'électrons (N_s) en fonction de V_G , Comme dans la relation suivante :

$$C_G = q \frac{\partial N_s}{\partial V_G} \quad (\text{III. 7})$$

Par les caractéristiques C-V illustrées à la figure (III.8), on voit que la capacité augmente avec l'augmentation de la tension de grille à mesure que la densité de charge de la feuille 2DEG augmente également de manière linéaire.

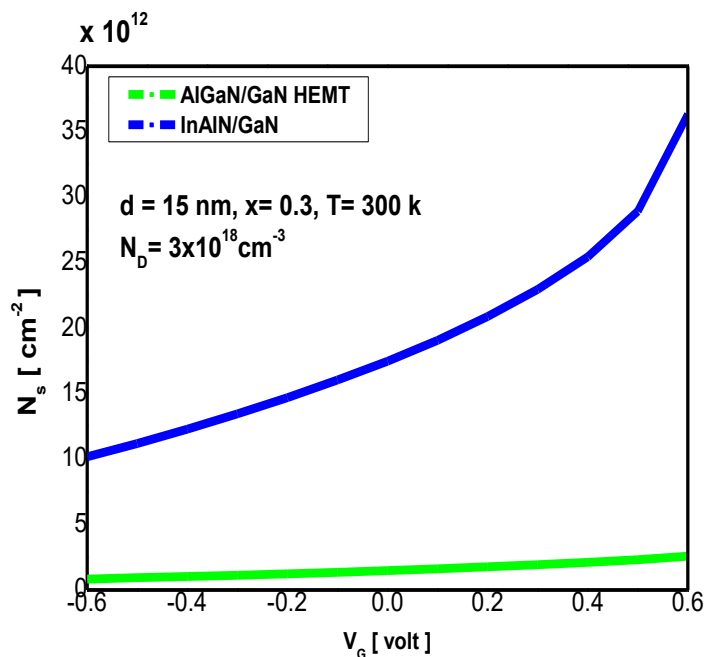


Figure III.7 : Comparaison entre les résultats de simulations de Concentration d'électrons (N_s), d'un transistor HEMT.

Nous remarquons sur la figure (III.8) que la capacité de grille pour le HEMT InAlN/GaN atteint un pic de $1,18 \times 10^{-5} \text{ F/cm}^2$ à une tension de grille de 0,6 V, tandis que pour le HEMT à base de AlGaN, la capacité de grille atteint un pic de $4 \times 10^{-7} \text{ F/cm}^2$

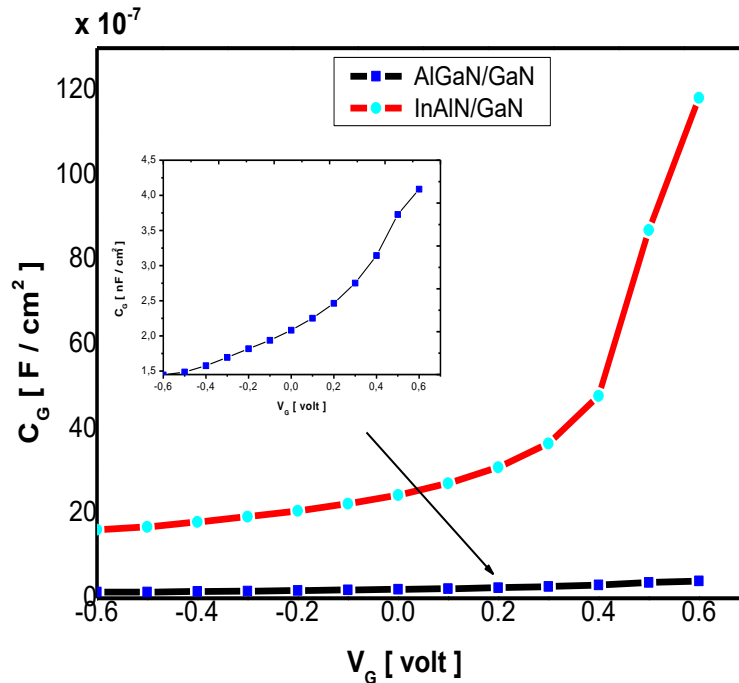


Figure III.8 : Comparaison entre les résultats de simulations de capacité de grille (C_g), d'un transistor HEMT.

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons calculé la densité d'électrons pour le HEMT InAlN/GaN sous des valeurs de tension de grille V_G . L'effet de la contrainte et l'effet piézoélectrique sur la charge dans le canal bidimensionnel a été inclus. Nous constatons qu'une densité de charge d'électrons très élevée peut être produite en raison du fort effet piézoélectrique à l'interface.

La densité d'électrons augmente avec l'augmentation de la fraction de Al dans la barrière, et nous avons également vu que l'influence de certains paramètres est importante comme la largeur de la couche d'espaceur et les concentrations d'un donneur.

L'augmentation de la densité d'électrons est principalement due à la charge piézoélectrique plus élevée, et dans ce travail, nous avons également réalisé que la structure HEMT $\text{Al}_{0,3}\text{In}_{0,7}\text{N}/\text{GaN}$ induit plus de densité de 2DEG de l'ordre de 10^{13} cm^{-2} par rapport à $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{N}/\text{GaN}$ HEMT.

Références Bibliographiques

- [1] A. KORICHI,
TCAO et Simulation : Vers une plate-forme d'analyse et de conception de systèmes de production orientée groupe, thèse de doctorat, université el hadj lakhdar-batna 2009.
- [2] A. DOUARA,
Etude par simulation d'un transistor HEMT à base de AlGaIn/GaN ,
Mémoire de magister, Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbès , 2013.
- [3] T. Andlauer, M. Bayer, S. Birner, T. Kubis, J. A. Majewski, M. Sabathil, A. Trellakis (project leader), C. Uhl, P. Vogl, T. Zibold , Nextnano³ - A powerful tool for the simulation of 3D nanometer semiconductor structures ,Physik Department and Walter Schottky Institut, TU München.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce mémoire avait pour but une étude le transistor HEMT de la filière Gan. L'objectif visé était de faire une étude comparative de deux différentes structures de transistor HEMT, d'une structure à base de InAlN et AlGaN et de mettre en évidence l'effet de la suppression d'une couche qui constitue ces structures.

C'est de ce fait là qu'on a entamé le deuxième aspect de notre étude et qui concernera les caractéristiques électroniques des HEMTs InAlN/GaN à unidimensionnelle par logiciel Nextnano. L'intérêt a été porté particulièrement sur la concentration de porteurs libres ns dans le canal et l'effet de la variation de quelques paramètres.

On a constaté qu'une variation de couche d'espaceur sur la concentration N_s qui varie pour $d= 35$ nm de $2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ à $4.7 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$. On note aussi l'effet de l'aluminium sur le N_s puisqu'on a remarqué qu'en augmentant le taux d'aluminium (x), .De plus l'augmentation de N_s on a terminé par un tracé le courbe $C(V)$ et comparé avec HEMT basé sur AlGaN/GaN.

Par conséquent, InAlN/GaN HEMT devrait être un candidat potentiel pour les applications micro-ondes et ondes millimétriques en raison de ses excellentes caractéristiques par rapport à AlGaN/GaN HEMT conventionnel.

Résumé

Dans le domaine de la microélectronique de puissance hyperfréquence, Les transistors à haute mobilité électronique (HEMTs) sont utilisés dans les applications à forte puissance, Les matériaux GaN sont de bons candidats pour la fabrication de ces types de transistors.

Aujourd'hui, l'utilisation de matériaux InAlN/GaN moins pénalisée par des plusieurs phénomènes et possède des propriétés prometteuses pour les applications de puissance et les fréquences.

Le sujet de ce mémoire, nous proposons un modèle de simulation du transistor HEMT basé sur InAlN/GaN, Où l'on voit l'influence des différents paramètres physique sur la densité électronique à l'aide du logiciel Nextnano, les résultats de simulation qui sont comparables avec les résultats de HEMT AlGaIn/GaN.

Mot-clé : HEMT , InAlN/GaN, la densité électronique, Nextnano

ملخص

في مجال الإلكترونيات الدقيقة ذات التردد العالي ، تُستخدم الترانزستورات ذات التنقل الإلكتروني المرتفع (HEMTs) في التطبيقات ذات الطاقة العالية ، وتعتبر مواد GaN مرشحة جيدة لتصنيع هذه الأنواع من الترانزستورات .

اليوم ، استخدام مواد InAlN/GaN أقل تأثراً من عديد الظواهر ولها خصائص واعدة لتطبيقات الطاقة والتردد.

في موضوع هذه الرسالة ، نقترح نموذج محاكاة لترانزستور HEMT المبني على InAlN / GaN ، حيث نرى تأثير العوامل الفيزيائية المختلفة على الكثافة الإلكترونية باستخدام برنامج Nextnano ، نتائج المحاكاة التي يمكن مقارنتها مع نتائج محاكاة الترانزستور المبني على AlGaIn / GaN.

الكلمات الرئيسية: InAlN/GaN, HEMT , الكثافة الإلكترونية, Nextnano