

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 de Télécommunications »

Titre :

**Etude et performances d'un dispositif HEMT pour les
applications à haut débit**

Réalisé par :

AYADI sara

LEFRAS Ibtissam

Encadré par :

Mr KADDECH Mourad

Année Universitaire: 2016/2017

Dédicace

Je dédie ce mémoire à :

Mes parents :

A ma très chère mère

Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que tu mérites pour tous les sacrifices que tu n'as cessé de me donner depuis ma naissance, durant mon enfance et même à l'âge adulte. Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin .

Mon père mon tout

Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation.

Mes frères Walid , Souhaib , Abdelouaheb .

Ma très chère sœur Asma , son mari Aïssa et leurs filles Loudjain et Djouri .

Ma belle-famille, ma belle-mère Saïda, mon beau père Ahmed et mon très cher fiancé Sid Ali .

*Ma grande mère khadidja , mes tantes , mes cousins et cousines .
Toutes mes amies et mes collègues.*

Sara

Dédicace

C'est grâce à Allah seul que j'ai pu achever ce travail Je le dédie

à :

Ma très chère mère, qui a toujours été présente pour moi, dans les moments les plus difficiles et qui sans cesse veille sur moi avec ses prières, pour ses grands sacrifices et tout l'amour qu'elle me porte.

Mon très cher père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.

Mon fiancé ET MON COLUEGE Pour leur disponibilité à entendre mes frustrations et les sources de mon stress les plus affectueux Qu'ils trouvent dans ce travail l'expression de mes sentiments.

Ma chère sœur Yasmín et mes frères

A toutes mes amis ASMA HASSIBA Ikhlás

ToutE la famille LEFRAS HANICHE BOUDJMAA ET RAHMOUNE

Stissem

Remerciements

Nous remercions tout d'abord le grand Dieu pour l'achèvement de ce mémoire.

Nous exprimons nos gratitude à Monsieur le président de jury d'avoir accepté examiné ce mémoire.

Nous remercions Messieurs les 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.

Nous remercions Monsieur KADDECH Morad , notre encadreur, pour ses conseils et suggestions avisés qui nous aidés à mener à bien ce travail, et d'avoir rapporté à ce mémoire ces remarques et conseils.

Résumé

La technologie des nitrures est actuellement la plus prometteuse pour la fabrication des dispositifs électriques à haut mobilité L'électronique de puissance comme moyen de contrôle de l'énergie prend une place très importante dans les technologies modernes

Le présent travail a été consacré à l'étude des défèrent propriétés de semi-conducteur Nitrure de Gallium (GaN) et la simulation de la structure Field-Plate HEMTs à base d'hétérostructures AlGaN/GaN. Nous avons présenté une nouvelle conception de ce dispositif pour des applications de hautes puissances, basée sur l'utilisation d'une plaque de champ (Field-Plate) combinée avec un matériau high-k au-dessus d'une couche Nitride(Si_3N_4).

Mots clés :

Transistor à haute mobilité électronique (HEMT), nitrure de gallium (GaN), nitrure d'aluminium de gallium (AlGaN), SILVACO.

Abstract

Nitride technology is currently the most promising for the manufacture of high-mobility electrical devices Power electronics as a means of controlling energy is very important in modern technologies The present work has been devoted to the study of the defect properties of Gallium Nitride (GaN) semiconductor and the simulation of the HEMTs field-based structure based on AlGaN / GaN heterostructures. We have presented a new design of this device for high power applications, based on the use of a Field-Plate combined with a high-k material over a Nitride layer (Si_3N_4).

Keywords :

High electronic mobility transistor (HEMT), gallium nitride (GaN), gallium aluminum nitride (AlGaN), SILVACO.

Liste des figures

- Fig.I.1** : Structure hexagonale würtzite idéale de nitru de Gallium
- Fig.I.2** : la structure cristalline de type zinc blende pour le GaN
- Fig.I.3** : Semi-conducteurs III-V à gap direct et indirect.
- Fig.I.4** : Désorientation des grains suivant a) la direction $\langle 0001 \rangle$ et b) dans le plan associé à la croissance colonnaire des nitrures d'éléments III hétéroépitaxiés.
- Fig.I.5** : Représentation des séquences de couches d'atomes traduisant deux polarités différentes.
- Fig.I.6** : L'hétérostructure AlGa_N/Ga_N
- Fig.I.7** : Schéma de la distribution des charges et diagramme énergétique de la bande de conduction de l'hétérostructure AlGa_N/Ga_N
- Fig.II.1** : Transistor JFET à canal N et symboles des deux types de JFET
- Fig.II.2** : Comportement du JFET en fonction de V_D pour $V_G < 0$
- Fig.II.3** : Vue en coupe du MESFET GaAs
- Fig.II.4** : Jonction Schottky, $V_e = 0$ à l'équilibre. Un équilibre
- Fig.II.5** : $V_e < 0$, équilibre à $(-V_e) + \emptyset_B$, (b): $V_e > 0$, diffusion des électrons.
- Fig.II.6** : Coupe schématique d'un transistor MOSFET à canal N.
- Fig.II.7** : Structure de couche d'un HEMT AlInAs/GaInAs sur In
- Fig.II.8** : Structure de principe d'un HEMT classique associée à son diagramme de bande d'énergie.
- Fig.II.9** : Structure et différentes couches du HEMT AlGa_N/Ga_N
- Fig.II.10** : Structure de bande d'une hétérojonction en présence d'un potentiel de grille
- Fig.II.11** : Variation du courant de drain maximal des dispositifs HEMT à base de GaAs et de GaN contre le niveau de dopage dans la couche de support.
- Fig.II.12** : Variation de la transconductance des dispositifs HEMT à base de GaAs et de GaN contre le niveau de dopage dans la couche support.
- Fig.II.13** : Variation de la capacité de gauchissement des dispositifs HEMT à base de GaAs et de GaN contre le niveau de dopage dans la couche de support.
- Fig.II.14** : Interruption de la variation de fréquence des dispositifs HEMT à base de GaAs et de GaN contre le niveau de dopage dans la couche de support.
- Fig III.1** : Schéma synoptique des modules utilisés dans la simulation par TCAD-SILVACO

Fig III.2: Ordre des groupes des commandes d'Atlas (Les commandes fondamentales les afférentes)

Fig III.3 : spécification de maillage.

Fig III.4 : Spécification des régions et les électrodes

Fig III.5 : Attribution de matériaux pour les régions

Fig III.6 : Organigramme du programme de simulation

Fig III.7 : a) Structure étudiée à base de GaN, b) à base de GaAs

Fig III.8 : Les caractéristiques courant - tension de drain (I_{ds} - V_{ds}) pour les deux structures.

Fig III.9 : Structure FP-HEMT étudiée

Fig III.10 : Les caractéristiques courant - tension de drain (I_{ds} - V_{ds}) pour les deux structures.

Fig III.11: Les caractéristiques courant - tension en fonction de variation de largeur de field plate.

Fig III.12: L'effet de variation de l'épaisseur de la couche donneuse sur la caractéristique (I_{ds} - V_{ds}) du transistor AlGaIn/GaN Field-Plate HEMT.

Fig III.13: L'effet de variation du taux d'Aluminium sur la caractéristique (I_{ds} - V_{ds}) du transistor AlGaIn/GaN FP-HEMT.

Fig III.14: L'effet d'ajout d'une couche cap layer sur la caractéristique (I_{ds} - V_{ds}) du transistor FP-HEMT.

Fig III.15: L'effet de variation de l'épaisseur de cap-layer sur la caractéristique (I_{ds} - V_{ds}) du transistor FP-HEMT.

Fig III.16: Variation du travail de Grille sur la caractéristique (I_{ds} - V_{ds}) de transistor FP-HEMT.

Fig III.17: L'effet de variation du dopage de la couche donneuse AlGaIn sur la caractéristique (I_{ds} - V_{ds}).

Fig III.18: L'effet de variation de l'épaisseur Si₃N₄ sur la caractéristique (I_{ds} - V_{ds}) du transistor FP-HEMT.

Tableau des Matières

Dédicaces

Remerciement

Résumé

Introduction générale.....01

Chapitre I : le nitrure de Gallium (GaN)

I.1.Introduction.....02

I.2 Propriétés de nitrure de Gallium02

I.2.1 Propriétés cristallines02

I.2.1.1 Structure de type wurtzite02

I.2.1.2 Structure de type zinc blende03

I.2.1.3 Comparaison entre les deux structures04

I.2.2 Propriétés physiques04

I.2.3 Propriétés mécaniques.....05

I.2.4 Propriétés électroniques05

I.2.5 Propriétés électriques06

I.2.5.1 La polarisation spontanée06

I.2.5.2 La polarisation piézoélectrique08

I.2.5.3 La polarisation totale dans le GaN08

I.2.6 Propriétés optiques09

I.2.7 Propriétés thermiques09

I.2.7.1.Dilatation thermique09

I.2.7.2 Chaleur spécifique10

I.2.7.3 Température de Debye10

I.2.7.4 Conductivité thermique.....10

I.2.8 Propriétés chimiques.....10

I.3.Avantage du GaN cubique10

I.4. Le Dopage	12
I.4.1.Le dopage de type n.....	12
I.4.2.Le dopage de type p.....	12
I.5. Hétérostructure AlGa _N /Ga _N	12
I.6 comparaison entre le Ga _N et le GaAs	14
I.6.Conclusion	15

Chapitre II : Le transistor HEMT à base de Ga_N et de GaAs.

II.1 Introduction.....	16
II.2 Généralité a transistor à effet de champ.....	16
II.2.1 Le transistor à effet de champ à jonction (JFET)	16
II.2.1.1 Description	16
II.2.1.2 Principe de fonctionnement du JFET.....	16
II.2.2 Transistor a effet de champ à grille isolée (MESFET)	18
II.2.2 Le MESFET	18
II.2.2.1 Description	18
II.2.2.2 Principe de fonctionnement.....	19
II.2.3 Transistor à effet de champ a grille isolée (MOSFET)	20
II.2.3.1 Description	20
II.2.3.2 Principe de fonctionnement	20
II.3 Le transistor HEMT.....	22
II.3.1 Historique	22
II.3.2 Le transistor HEMT à base d'AlGaAs/GaAs.....	23
II.3.2.1 Structure d'un HEMT	23
II.3.2.2 Description des couches.....	23
II.3.2.3 Principe de fonctionnement.....	24
II-2 HEMTS à base de nitrure de gallium AlGa _N /Ga _N	26
II.2.1 Structure d'un HEMT.....	26
II.2.2Description des couches.....	26

II.2.3 Principe de fonctionnement	27
II.4 Comparaison d'ALGaN/GaN et d'ALGaAs/GaAs à base de dispositif HEMT	28
II.5 Conclusion	31
<u>Chapitre III</u> : Simulation et interprétation des résultats	
III.1 Introduction.....	32
III.2 Présentation de TCAD-SILVACO	32
III.2.1 Le logiciel ATHENA.....	33
III.2.2 le logiciel ATLAS.....	33
III.2.3 Le logiciel Atlas	34
III.2.2 Spécification de la structure	36
III.2.2.1 Le maillage	36
III.2.2.2 Spécification des régions et les électrodes	37
III.2.2.3 Attribution de matériaux pour les régions	38
III.2.2.4 Doping	39
III.2.2.5 Modèles	39
III.2.2.6 Beam	40
III.2.2.7 Contact	40
III.2.3 Sélection de la méthode numérique	40
III.2.4 Spécification des solutions.....	41
III.2.4.1 Log	41
III.2.4.2 Solve	41
III.2.4.3 Load et save	41
III.2.5 Analyse des résultats	41
III.2.6 Organigramme de simulation	42
III.3 Résultats de simulation et interprétation.....	44
III.3.1 Etudes comparatif entre le HEMT à base de GaN et le HEMT à base de GaAs.....	44
III.3.1. 1 Structure conventionnel étudiée (choix du matériau).....	44

III.3.1. 2 Les caractéristiques électriques du HEMT.....	45
III.3.2 Etudes comparatif entre le HEMT conventionnel et la technologie Field-Plate HEMT proposée à base de GaN.....	47
III.3.2.1 Topologie de structure étudiée (proposée) en utilisant la technologie Field- Plate HEMT	47
III.3.2.2 L'effet de la variation de la largeur de Field-Plate de la structure AlGaN/GaN FP-HEMT.....	49
III.3.2.3 L'effet de la variation de l'épaisseur de la couche donneuse de la structure AlGaN/GaN FP-HEMT	50
III.3.2.4 L'effet de la variation du taux d'aluminium de la couche donneuse de la structure AlGaN/GaN FP-HEMT	51
III.3.2.5 L'effet de l'ajout d'une couche cap-layer sur la caractéristique (I_{ds} - V_{ds}) du transistor FP-HEMT.....	52
III.3.2.6 L'effet de la variation de l'épaisseur de cap-layer de la structure AlGaN/GaN FP-HEMT	53
III.3.2.7 Variation du travail de sortie de la grille sur la caractéristique (I_{ds} - V_{ds}) du transistor FP-HEMT GaN.....	54
III.3.2.8 L'effet de variation du dopage de la couche donneuse AlGaN sur la caractéristique (I_{ds} - V_{ds}) du transistor FP-HEMT.....	55
III.3.2.9 L'effet de variation de l'épaisseur de Si ₃ N ₄ sur la caractéristique (I_{ds} - V_{ds}) du transistor FP-HEMT.....	56
III .4 Conclusion	57
Conclusion générale	58

Bibliographie

Annexe

Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale

Les technologies de l'information et de communication (TIC), Ainsi que l'électronique de puissance nécessitent l'apport de nouvelles technologies afin d'améliorer les performances des systèmes. Des matériaux tels que l'arséniure de Gallium (GaAs) ou le silicium sont déjà largement employés dans grand nombre d'applications mais leurs limites physique ne permettent pas de satisfaire aux besoins crée par la société moderne.

Des matériaux III-V tel que le nitrure de Gallium (GaN), sont très attractif car leurs utilisation permet d'atteindre simultanément de forts courants et de fortes tensions et donc de fortes puissances, c'est en particulier le conséquence des propriétés remarquable des composés III-Nà parmi celle-ci se démarquent la large bande interdite, le fort champs de claquage la forte vitesse de saturation, ce qui a mené au développement des transistors HEMTs (High Electron Mobility Transistors) à base du GaN en fonctionnant aux hautes fréquences et aux hautes températures. Les transistors HEMTs à base d'hétéro-structure AlGaN/GaN ont montré ces dernières années des résultats extrêmement prometteurs pour des applications hyperfréquences nécessitant des tensions et des puissances élevées.

Ce travail comportera les chapitres suivants:

Le premier étant destiné à la description du nitrure de Gallium et son alliage le AlGaN, matériau de base servant à cette étude, et où on a abordé ses propriétés structurales,électriques et électroniques, au travers des propriétés d'un autre semi-conducteur (GaAs) afin de mettre une comparaison entre ces deux semi-conducteurs.

Dans le second chapitre, nous présentons l'aspect physique et électrique des différentes technologies existantes des composants FETs utilisés pour l'amplification de puissance telsque les JFET, MOSFET, MESFET, et la technologie HEMTs

Dans le troisième chapitre, et dans une première partie, on s'est consacré à la présentation du 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 nouvelle technologie des composant HEMT c'est la technologie FP-HEMT (HEMT avec Field Plate) et de déterminer les caractéristiques électriques I_{ds} - V_{ds} , avec l'influence des déférents paramètres technologiques.

Chapitre 1

LE NITRURE DE GALLIUM (GaN)

I.1.Introduction

Les matériaux semiconducteurs à large bande interdite de la famille des nitrures de gallium (GaN, AlGaN, AlInN) possèdent des propriétés physiques excellentes qui leur offre une position importante pour les applications surtout en hyperfréquence de puissance.

En vue de ses qualités, nous présentons dans ce chapitre, les propriétés générales des nitrures à savoir leurs structures cristallines ainsi que leurs propriétés électroniques.

I.2 Propriétés de nitrure de Gallium

I.2.1 Propriétés cristallines

Le nitrure de gallium peut s'organiser selon deux arrangements cristallographiques différents : [1]

- Zinc blende : Le polytype cubique est thermo dynamiquement métastable
- Wurtzite : Le polytype thermo dynamiquement stable est la phase hexagonale.

L'obtention d'un arrangement plutôt qu'un autre est liée aux conditions de croissance ainsi qu'à la nature du substrat. Ainsi la structure cristalline zinc blende sera obtenue avec des substrats de structure cubique suivant l'axe $\{0 1 1\}$ tels que SiC Si ; MgO ,GaAs.

I.2.1.1 Structure de type wurtzite

Comme le montre la figure I.1, la structure wurtzite du GaN est formée de deux réseaux hexagonaux, l'un constitué d'atomes de gallium et l'autre constitué d'atomes d'azote. Ces deux réseaux sont imbriqués et décalés suivant l'axe c de 5/8 ème de la maille élémentaire.

Le nitrure de gallium de type Wurtzite présente un gap direct au centre de la première zone de Brillouin. [2]

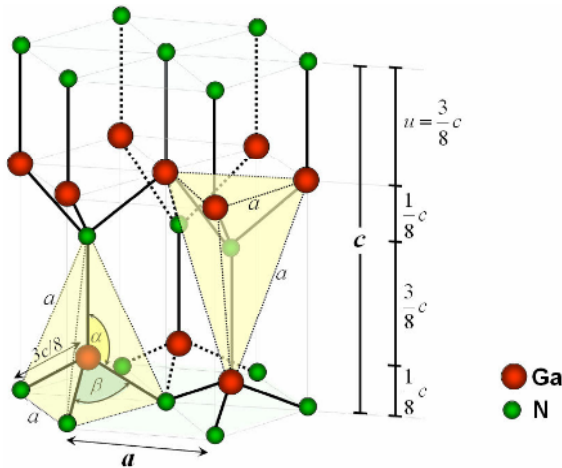


Figure I.1 : Structure hexagonale wurtzite idéale de nitrure de Gallium [3].

L'épitaxie d'un film mince de GaN est constituée d'un empilement des deux réseaux le Gallium et celui de l'Azote par alternance en fonction du type d'atomes déposés en dernier lieu, (définissant la surface d'épitaxie obtenue), on distingue deux types de film : le GaN à face gallium (avec atomes de gallium en dernier réseau) et le GaN à face Azote (ayant l'Azote en réseau final déposé) [4].

I.2.1.2 Structure de type zinc blende

Dans la structure zinc blende les atomes d'azote forment un empilement cubique à faces centrées dans lequel les atomes de gallium occupent la moitié des sites tétraédriques (voir la figure I-3). Cette structure est caractérisée par le paramètre de maille a , il varie entre (4,51 et 4,52) Å [5].

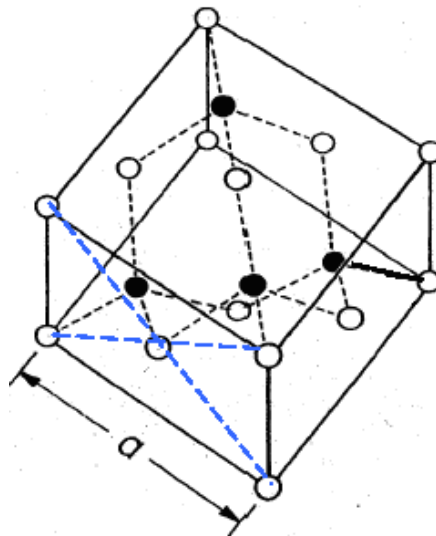


Figure I.2: la structure cristalline de type zinc blende pour le GaN. [6]

I.2.1.3 Comparaison entre les deux structures

Les deux structures cristallines sont similaires dans le cas où chaque atome de Ga est lié par quatre atomes de N et vis versa. La différence principale est la séquence d'empilement des plans cristallins, pour la structure hexagonale la croissance est suivant l'axe c (0001), pour la structure zinc blende, la croissance est suivant l'axe (111) [7]. Il en résulte que l'entourage cristallographique de chaque atome ne diffère d'une structure à l'autre, qu'à partir de la position de troisième voisin.

I.2.2 Propriétés physiques :

Comme beaucoup de matériaux III-V, le GaN est un semi-conducteur à gap direct, et est donc très adapté pour les applications optoélectroniques. Sur la (figure I.3)les énergies de bande interdite de quelques semi-conducteurs dont les nitrures sont reportées en fonction de leur paramètre de maille .Les nitrures permettent de couvrir une large gamme en énergie : du très proche infrarouge à l'ultra-violet , en passant notamment par le bleu qui est "inaccessible" aux autres semi-conducteurs III-V. Hormis les difficultés de croissance des hétéros structures nitrurées, la principale discutée pour réaliser des diodes électroluminescentes (DEL) bleues à base de GaN était de maîtriser le dopage p. [8]

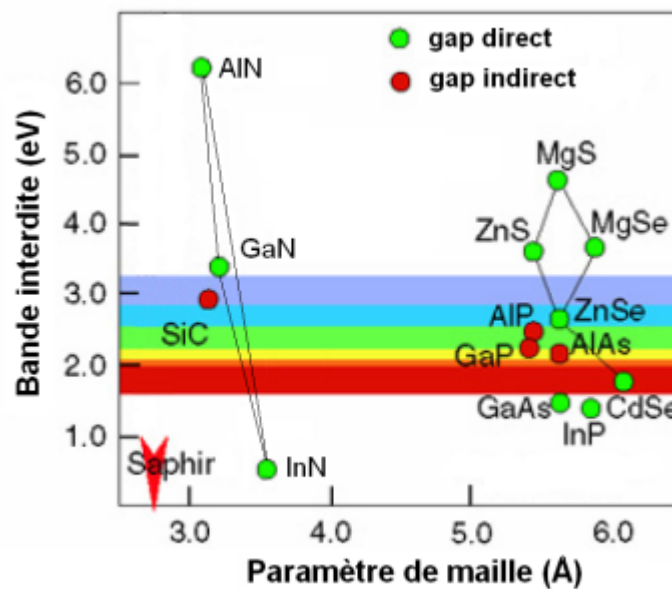


Figure I.3 :Semi-conducteurs III-V à gap direct et indirect [8].

I.2.3 Propriétés mécaniques

La quasi-absence de substrat issu de germe de nitru de gallium nécessite d’avoir recours à la croissance épitaxiale. L’épitaxie de GaN sur un substrat de nature différente (silicium, saphir ou carbure de silicium) débute par la formation d’îlots de quelques dizaines à quelques centaines de nanomètres de diamètre. Ce type de croissance (hétéro-épitaxie) est dite colonnaire en raison de la longueur de cohérence élevée des grains suivant l’axe de croissance [0001] et réduite dans le plan de croissance (L_{\parallel} assimilée à la taille moyenne des grains cristallographiques). Ces îlots coalescent rapidement, mais les désorientations relatives de leurs axes de croissance [0001] (appelées tilt, Figure I.4.a) et leurs désorientations dans le plan (appelées twist, Figure I.4.b) sont responsables de la formation de dislocations traversantes aux joints de grains [9].

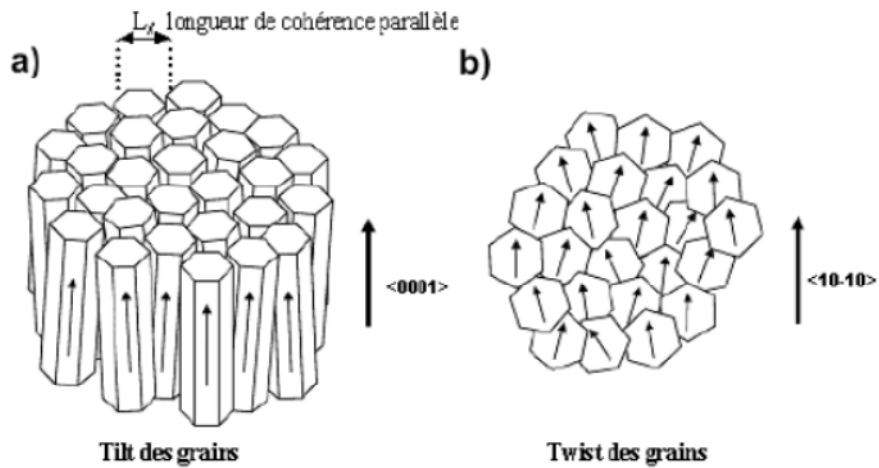


Figure I.4 : Désorientation des grains suivant a) la direction $\langle 0001 \rangle$ et b) dans le plan associé à la croissance colonnaire des nitrures d’éléments III hétéroépitaxiés [9].

I.2.4 Propriétés électroniques

Les deux polytypes du GaN présentent comme la plupart des matériaux III-V, une bande interdite directe au point (Γ) centre de la première zone de Brillouin. La largeur de cette bande a été estimée à 3.4 eV à température ambiante.

Le tableau qui suit résume quelques propriétés du GaN ainsi que d’autres semi-conducteurs candidats pour les applications électroniques.

	Si	GaAs	SiC	GaN
Energie du gap à 300°k (eV)	<i>1.11</i>	<i>1.43</i>	<i>3.2</i>	<i>3.4</i>
Champ de claquage E V/cm	<i>6.5×10⁵</i>	<i>6.5.10⁵</i>	<i>3.5×10⁵</i>	<i>3.5×10⁵</i>
Vitesse de saturation cm/s	<i>10×10⁷</i>	<i>2.0×10⁷</i>	<i>2.0×10⁷</i>	<i>2.5×10⁷</i>
Mobilité des électrons cm²/Vs	1350	6000	800	1600
Conductivité thermique W/cm.K	1.5	0.46	3.5	1.7

Tableau I.1: Comparaison des propriétés de différents s/c dont le GaN [10].

I.2.5 Propriétés électriques

I.2.5.1 La polarisation spontanée

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

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 $\bar{1}$]. La vectrice polarisation spontanée est orientée de l'atome d'azote vers l'atome de gallium. Les structures (a) et (b) de la Figure 1-6 présentent une polarisation spontanée de signe opposé [11].

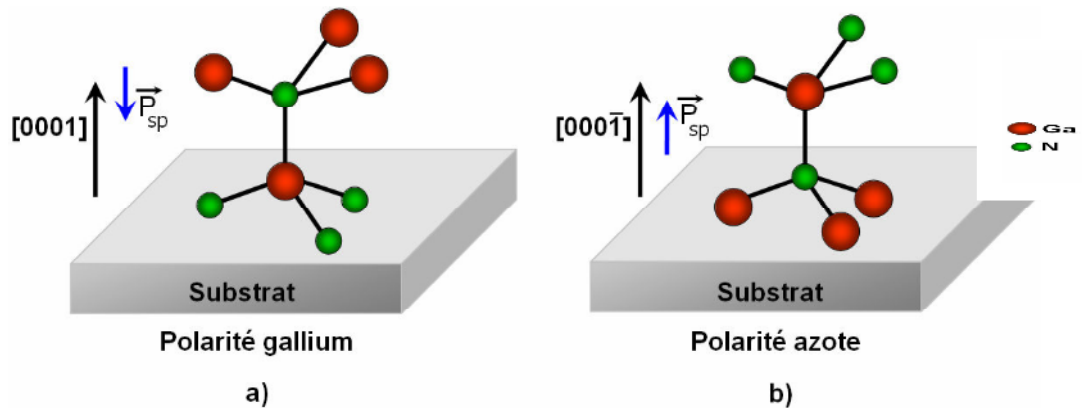


Figure 1-5 : Représentation des séquences de couches d’atomes traduisant deux polarités différentes [11].

Même en l’absence de toute contrainte dans une couche de nitrure wurtzite, celle-ci peut donc présenter une polarisation macroscopique non nulle. La structure wurtzite est la structure de plus haute symétrie permettant ce phénomène. Cette polarisation spontanée s’explique par une non-superposition des barycentres de charges positives avec celui des charges négatives.

Ce décalage entre les deux barycentres des charges a deux origines :

- La première est le non idéalité de la structure de wurtzite, plus précisément l’irrégularité des tétraèdres formant le cristal. Les distances entre les atomes à fort caractère ionique varient suivant l’axe de croissance, chaque tétraèdre possèdera donc un dipôle élémentaire. Ces dipôles élémentaires s’ajoutent pour donner dans la structure une polarisation spontanée macroscopique dirigée suivant l’axe de croissance du matériau. Cette première contribution est prédominante par rapport à la seconde.
- La seconde est une raison de rupture de symétrie dans le cristal à partir du troisième voisin.

Effectivement le cristal n’est plus centro-symétrique à partir du troisième voisin ce qui engendre la création d’un dipôle électrique suivant la direction [0001] dans la phase hexagonale.

Ainsi ce matériau est par définition naturellement polarisé sans l’apport extérieur d’un champ électrique : c’est la polarisation spontanée [11].

La valeur numérique de la polarisation spontanée du GaN ainsi que quelques éléments III-V est reportée sur le tableau I.2.

<i>Matériaux</i>	<i>AlN</i>	<i>GaN</i>	<i>InN</i>
$a_0(A^0)$	3.112	3.189	3.540
$C_0(A^0)$	4.982	5.185	5.705
(C_0 / a_0)	1.6010	1.6259	1.6116
$P_{sp}(C/m^2)$	-0.081	-0.029	-0.032
$e_{31}(C/m^2)$	-0.60	-0.49	-0.57
$e_{33}(C/m^2)$	1.46	0.73	0.97
$C_{13}(Gpa)$	108	103	92
$C_{33}(Gpa)$	373	405	224

Tableau I-2 : Liste des paramètres usuellement utilisés pour le (GaN) –AlN et InN [10].

I.2.5.2 La polarisation piézoélectrique

Lorsqu’une maille cristalline du GaN est soumise à une excitation extérieure ou bien à une contrainte, les positions des atomes changent les uns par rapport aux autres. La variation des distances inter-atomique entraîne une modification des moments dipolaires entre les atomes qui est à l'origine d'une polarisation suivant l'axe "c" appelée piézoélectrique car sa valeur varie en fonction de la contrainte exercée [12].

I.2.5.3 La polarisation totale dans le GaN

La polarisation totale du GaN est l’effet des deux polarisations générées dans le cristal et sera égale à :

$$P(\text{GaN}) = P_{sp}(\text{GaN}) + P_{pz}(\text{GaN}) \dots \dots \dots (I.1)$$

La valeur positive ou négative de cette polarisation dépendra du sens de l’orientation des deux polarisations. Ce sens est lui-même définit selon que la structure est sous traction ou compression. Si le cristal du GaN est sous contrainte tractive ou extensive, la polarisation spontanée et la polarisation piézoélectrique sont de même sens et la polarisation totale s’en trouve augmentée. Par contre si le cristal est sous contrainte compressive, les deux polarisations sont de sens opposés, donc la polarisation totale diminue [10].

I.2.6 Propriétés optiques

Comme attendu avec un gap direct, le coefficient d'absorption est élevé, atteignant $8 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ pour des énergies juste supérieures au gap. L'indice optique du GaN est égal à 2.45 pour des énergies inférieures au gap et augmente jusqu'à 2.8 environ au niveau du gap. Cet indice est inférieur à celui de GaAs par exemple. Ceci entraîne un coefficient de réflexion à l'interface air/matériau inférieur dans le GaN et a comme conséquences pour les détecteurs, un meilleur couplage avec la lumière [1].

I.2.7 Propriétés thermiques

On permet de définir les propriétés thermiques du nitrure de gallium par : La dilatation thermique, la chaleur spécifique, la température de Debye et la conductivité thermique.

I.2.7.1 Dilatation thermique

La dilatation thermique a été mesurée en fonction de la température sur monocristaux. Selon a, le coefficient de dilatation thermique est constant sur toute la gamme de température. Selon c, la composante principale -parallèle à l'axe c- dépend de la température, la dilatation thermique connaissant une rupture de pente à 700K La valeur du coefficient de dilatation thermique est importante à connaître pour l'élaboration de dispositifs électroniques. En effet ; dans le cas de couches hétéroépitaxiées, si la dilatation thermique du substrat est différente de celle de la couche, il peut se créer des contraintes résiduelles induisant des fissures du substrat et de la couche épitaxiée. Ceci intervient alors fortement sur l'efficacité du dispositif considéré [13].

Le tableau (1.3) donne les coefficients de dilatation de GaN et les substrats les plus souvent utilisés lors de l'hétéroépitaxie de GaN. Bien que le carbure de silicium 6H-SiC soit le plus adapté en terme de compatibilité de la dilatation thermique aux températures de travail (autour de 300 K), c'est le saphir qui est le plus souvent utilisé en raison de son coût bien moins élevé

Matériaux	GaN	GaN	Saphir	6H-SiC	3C-SiC	ZnO	GaAs
	300-700 K	700-900 K	300 K	300 K	300 K	300 K	300 K
$\alpha_a(10^{-6} K^{-1})$	5.59	5.59	7.5	4.2	2.7	2.9	6
$\alpha_c(10^{-6} K^{-1})$	3.17	7.75	8.5	4.7	2.7	4.75	6

Tableau I.3 : Coefficients de dilatation thermique α de GaN et divers substrats selon Krukowski et Al [13].

I.2.7.2. Chaleur spécifique

Dans un composant semi-conducteur, l'augmentation de la température entraîne une augmentation du nombre de phonons. La chaleur spécifique est le paramètre physique qui permet de relier les variations de la température du réseau au nombre de phonons présents dans le semi-conducteur, sa valeurs peut être calculée à partir de la relation de debye. [2]

$$C_p(T) = \frac{12\pi^4 R}{5} \left(\frac{T}{T_D} \right)^3 \dots\dots\dots (1.2)$$

Avec $R = 8.3144 \text{ J/mol.K}$, T_D : température de Debye

I.2.7.3 Température de Debye

La température de Debye T_D caractérise la valeur maximale des énergies des vibrations.

Elle a été calculée par Polian et Al. À partir de la chaleur spécifique ou encore par Demidienko et Al. À partir des propriétés élastiques, les valeurs obtenues de T_D sont respectivement de 700 K et 650 K. Ces valeurs sont cohérentes avec les calculs de Kim et Al. Christensen et Al , et Azuhaka et Al qui prédisent T_D entre 620 et 690 K [13].

I.2.7.4 Conductivité thermique

La conductivité thermique k est la propriété cinétique qui est déterminée par les contributions des degrés de liberté électronique, rotationnelle et vibrationnelle. Dans les semi-conducteurs, à cause des faibles densités d'électrons de conduction et de trous, la contribution

principale au transport de chaleur vient des phonons. Dans un cristal pur, la diffusion des phonons est le processus limitant. Dans un cristal réel, la conductivité thermique est déterminée par les défauts ponctuels et étendus. De toutes les propriétés thermiques, la conductivité est la plus affectée par les défauts de structure [13].

La conductivité thermique a été mesurée sur différents types d'échantillons : couche mince sur substrat saphir par la méthode MVPE (Sichel et Al) et monocristaux de GaN. Les valeurs de conductivité thermique K obtenues sont respectivement $1,3 \text{ W.cm}^{-1}\text{K}^{-1}$ et $1,7 \text{ W.cm}^{-1}\text{K}^{-1}$ (voire tableau I.1)

La valeur obtenue sur couche mince est inférieure aux calculs théoriques de Slack, prédisant une valeur de $1,7 \text{ W.cm}^{-1}\text{K}^{-1}$ du fait de la forte concentration en impuretés de l'échantillon (10^{18} cm^{-3}) [13].

I.2.8 Propriétés chimiques

Le nitrure d'aluminium présente une résistance à la gravure chimique comme GaN. Il y a eu un grand nombre d'expériences de gravures d'AlN ; mais ne sont pas nombreuses celles qui ont donnée l'AlN de bonne qualité. L'AlN développe en surface de l'oxyde d'épaisseur 50-100 Å lorsqu'il reste exposé pendant une journée à température ambiante. Toutefois, cette couche d'oxyde sert comme protection, et aucune décomposition des échantillons de l'AlN, n'a été observée. [13]

I.3 Avantage du GaN cubique

Si le développement du GaN à phase cubique est resté modéré par rapport au GaN hexagonal, (retard principalement dû à la métastabilité de cette phase, et qui rend difficile l'obtention d'un matériau de bonne qualité sans inclusions de phase hexagonale), l'utilisation de la phase cubique devrait présenter certains avantages pour la réalisation et le fonctionnement des composants. En effet, la propagation des dislocations est moins efficace dans les structures cubiques d'orientation $\langle 100 \rangle$, puisqu'elles peuvent interagir et s'annihiler à leur intersection. De plus, les propriétés de transport électronique pourraient être améliorées, puisque, les masses effectives des porteurs de charge sont plus faibles dans le GaN cubique on atteint des mobilités supérieures à celles atteintes dans la phase hexagonale [10].

Pour la réalisation de diodes émettrices de lumière, le c-GaN bénéficie d'une bande interdite moins large que celle du h-GaN. Il serait donc possible d'atteindre les longueurs d'onde visibles en utilisant les alliages InGaN avec un plus faible pourcentage d'Indium dans

le système cubique. Cet élément constitue un avantage par rapport au système hexagonal car l'indium est difficile à incorporer en grande quantité sans dégrader la qualité du matériau. De plus, l'absence d'effets piézoélectriques (dont le GaN hexagonal est le siège) dans les couches cubiques sur substrats (100) permet d'obtenir un meilleur effet de confinement dans les structures quantiques. Enfin, le cristal cubique épitaxié sur substrat (100) se clive plus aisément, ce qui facilite la réalisation de cavités laser [10].

I.4. Le Dopage

I.4.1. Le dopage n

Le dopage n est réalisé avec le silicium qui donne un niveau donneur peu profond dont l'énergie d'ionisation est de l'ordre de 60 meV. L'implantation ionique est réalisée avec des tensions d'accélération de l'ordre de 100 keV, et des doses d'implantation variant entre 10^{13} et 10^{16} cm⁻². Le silicium se met en site gallium à relativement basse température et devient électriquement actif après un recuit à haute température, qui annihile les antisites créés lors de l'implantation. Il faut noter que la solubilité du silicium dans GaN est importante. D'autre part le seuil d'amorphisation de GaN sous implantation ionique est élevé (2.1016 cm⁻² comparé à 4.1013 cm⁻² pour GaAs). Ces caractéristiques permettent d'atteindre des taux de dopage n très importants [14].

I.4.2. Le dopage p

Le dopage p pose généralement un problème dans les semi-conducteurs à grand gap, car les énergies d'ionisation des accepteurs sont toujours relativement élevées. Ceci limite le nombre d'accepteurs ionisés, et par suite le nombre de trous, à la température ambiante. L'accepteur le moins profond dans GaN est le magnésium, son énergie d'ionisation est néanmoins comprise entre 150 et 170 meV.

En outre la solubilité de Mg dans GaN et AlGaN est limitée. Ceci entraîne des concentrations de trous limitées, qui sont généralement insuffisantes pour assurer des contacts ohmiques de faible résistance. Il n'en demeure pas moins, qu'en l'état actuel des connaissances, le magnésium semble être le dopant p le plus performant [14].

I.5. Hétérostructure AlGaN/GaN

L'hétérostructure formée par la juxtaposition de deux matériaux (figure I. 6), dont les largeurs des bandes interdites sont différentes, l'un présentant un large gap « AlGaN » et l'autre a un plus faible gap « GaN ».

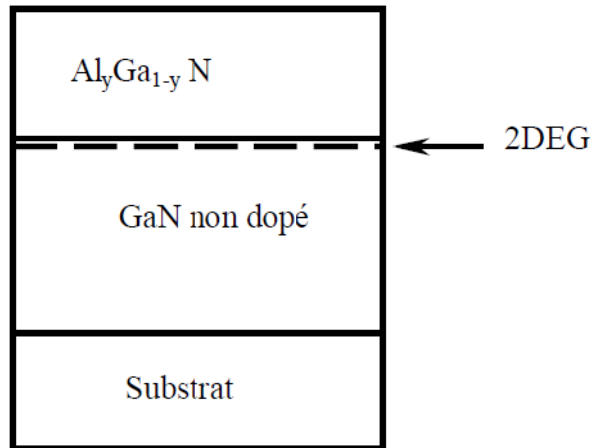
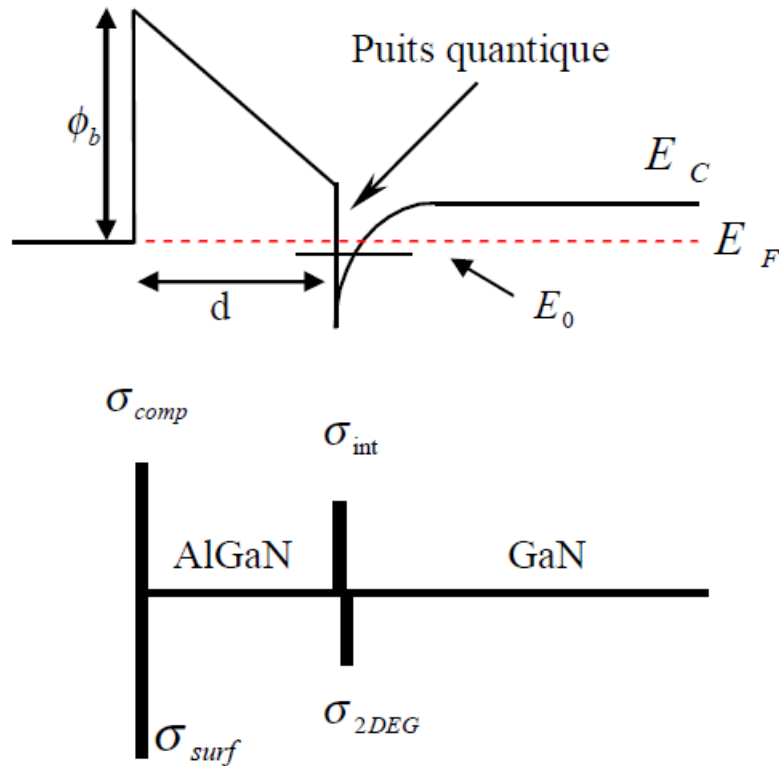


Figure I-6 : L'hétérostructure AlGaN/GaN [10] .

Les deux semi-conducteurs sont à gap différents, leur juxtaposition impose, à l'équilibre thermodynamique, l'alignement des deux niveaux de Fermi ce qui cause une courbure des bandes de conduction et de valence. La bande de conduction du GaN se trouve alors très proche du niveau de Fermi à l'interface formant ainsi un puits de potentiel triangulaire entre E_F et E_C (figure I-7) où les électrons provenant de l'AlGaN (grand gap, petite affinité électronique) sont confinés dans le puits dans des niveaux d'énergie distincts. Selon la structure, on peut avoir un ou plusieurs niveaux d'énergie E_i . Mais en pratique, seuls les deux premiers niveaux sont quasi pleins à température ambiante. Avec l'hétérointerface d'un côté et le potentiel de barrière N d'un autre côté, les électrons sont libres seulement dans le plan de l'interface. La discontinuité entre les bandes énergétiques est donc la cause de la formation du gaz bidimensionnel 2-DEG mais pas l'origine des fortes concentrations évaluées, ceci ne peut être dû qu'à la densité de charges positives créée par la polarisation à l'interface des deux matériaux [10].



FigureI-7: Schéma de la distribution des charges et diagramme énergétique de la bande de conduction de l'hétérostructure AlGaN/GaN [10].

I.6. Comparaison entre le GaN et le GaAs

La technologie GaN bénéficie d'une combinaison remarquable des caractéristiques des matériaux à large bande interdite qui la prédestine naturellement à des applications de forte puissance :

- un champ de claquage élevé ($(3,5 \times 10^6 \text{ V.cm}^{-1})$) associé à un faible taux d'ionisation par impact, permet d'obtenir des puissances de sortie élevées
- la forte conductivité thermique du GaN ($1.7 \text{ W.cm}^{-1}.\text{K}^{-1}$ contre 0.46 W.cm^{-1} pour le GaAs) est avantageuse pour l'évacuation des calories.
- la forte bande interdite rend les dispositifs plus immuns aux agressions de type électromagnétiques.
- des vitesses de saturation relativement importantes ($2.5.10^7 \text{ cm/s}$) favorisent les applications à haute fréquence.

Les propriétés optiques du GaN le rendent aussi attractif pour les applications de l'optoélectronique mais nous n'aborderons ici que la partie relative aux applications

hyperfréquence, et plus particulièrement celles qui mettent en jeu les transistors à haute mobilité électronique (HEMT) AlGa_N/Ga_N.

C'est alors que le nitrure de gallium a focalisé l'attention des recherches au niveau composant. Ce matériau présente de très bonnes propriétés électroniques pour la puissance aux hautes fréquences.

I.7 conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons introduit le nitrure de gallium, matériau de base pour la réalisation du transistor à haute mobilité d'électrons HEMT et différents paramètres à prendre en compte.

Nous avons passé en revue ses principales propriétés électriques, mécaniques et thermiques, aussi nous avons étudié les polarisations spontanée et piézoélectrique.

Ce matériau possède des propriétés physiques très intéressantes telles que la largeur de la bande d'énergie interdite, la vitesse de saturation des porteurs.

Chapitre 2

**Le transistor HEMT à
base de GaN et GaAs**

II.1 Introduction

Le HEMT (High Electron Mobility Transistor) est un transistor à haute mobilité d'électrons connu sous le nom aussi de transistor à effet de champ à hétérostructure. Il est composé de deux semi conducteurs de bande interdite différente (ex: AlGaAs et GaAs ou AlGaN/GaN).

Ce chapitre est consacré à l'étude du transistor HEMT AlGaN/GaN et AlGaAs/GaAs commençant par une généralité sur les transistors a effet de champ, après, une étude détaillé sur le HEMT à base de l'AlGaN/GaN et AlGaAs/GaAs et la Comparaison entre les deux.

II.2 Généralité a transistor à effet de champ

II.2.1 Le transistor à effet de champ à jonction (JFET)

Le transistor JFET fait parti de la famille des transistors à effet de champ FET : Field Effect Transistor [15].

II.2.1.1 Description

Le transistor JFET (Junction Field Effect Transistor) est un composant de structure homologue . Il se compose par une fines couche de matériau semi conducteur de type N (pour un JFET canal N), sur un substrat de type P.

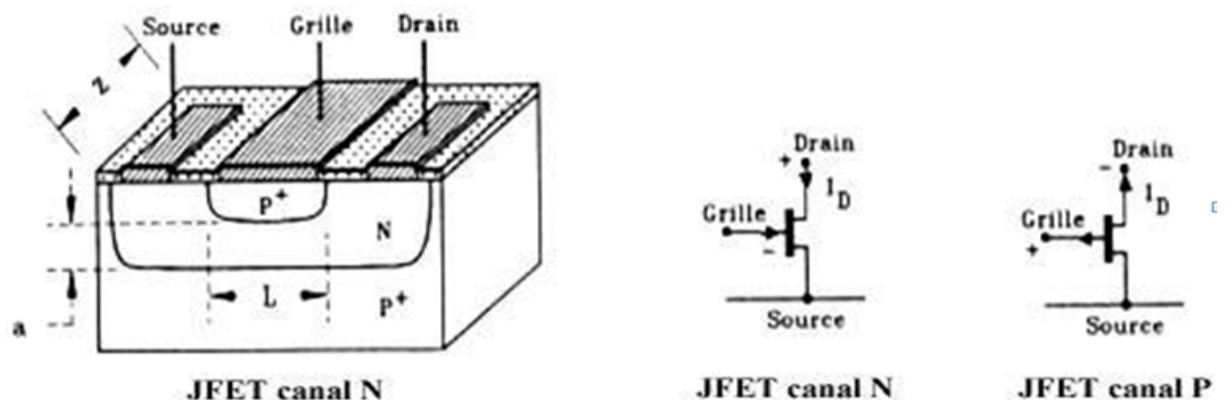


Figure II-1 : Transistor JFET à canal N et symboles des deux types de JFET [16].

II.2.1.2 Principe de fonctionnement du JFET

Dans le transistor à effet de champ à jonction (JFET), la variation de la tension de polarisation permet la modulation de la largeur de la zone de charge d'espace de la jonction latérale "P⁺N". Autrement dit, la variation de la polarisation module la variation de la section

conductrice du canal. Sans polarisation, il peut y avoir une zone de désertion sur une certaine profondeur dans le canal. La désertion est liée à différents paramètres tels que le matériau de la grille et les propriétés d'interface.

Pour une tension drain-source (V_D) nulle, la variation de la tension grille (V_G) module la profondeur de la zone de désertion, et donc la partie conductrice du canal. Pour une polarisation $V_G < 0$ (et $V_D \approx 0$ volt), la zone de désertion se développe plus profondément dans le canal, provoquant le rétrécissement de celui-ci et donc une augmentation de sa résistance. Pour une tension $V_G = V_p$ (tension de pincement), la zone de charge d'espace occupe la totalité du canal. La résistance entre drain et source devient très élevée.

Pour une tension V_D non nulle et une tension V_G négative, on a un canal conducteur. Un courant I_D circule entre le drain et la source. Si V_D devient de plus en plus positive, le champ électrique à travers le canal augmente ainsi que la vitesse des électrons. La distribution de tension à travers le canal aura pour conséquence une différence de potentiel entre la grille et le canal sur la longueur de celui-ci. Ceci explique la différence observée pour la profondeur de la zone de désertion le long du canal, qui augmente vers le drain (voir Fig II-1).

Si la tension V_D atteint la valeur V_{Dsat} (tension de saturation), le régime de pincement apparaît. Le courant I_D atteint sa valeur de saturation. L'augmentation de la tension V_D au-delà de V_{Dsat} n'affecte pas l'évolution du courant I_D qui garde une valeur relativement constante. [17]

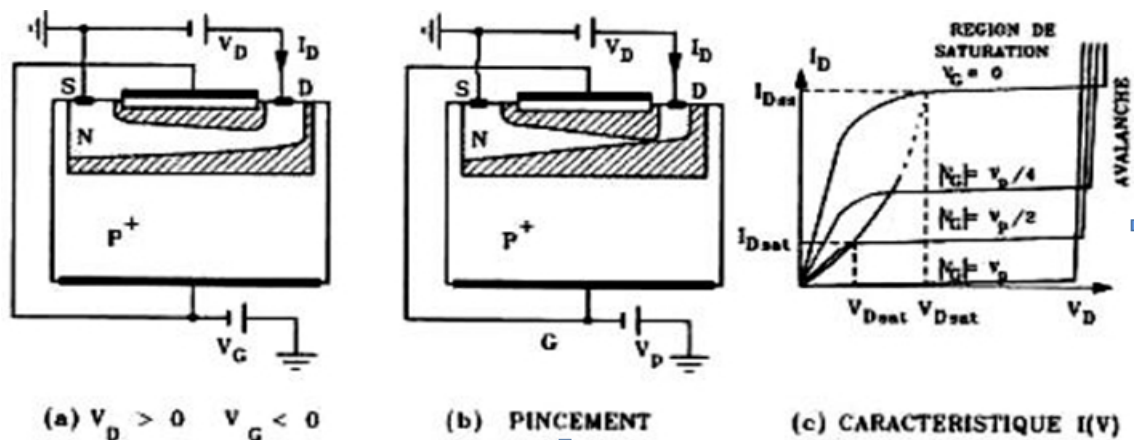


Figure II-2 : Comportement du JFET en fonction de V_D pour $V_G < 0$ [18].

II.2.2 Transistor a effet de champ à grille isolée (MESFET)

II.2.2 Le MESFET

II.2.2.1 Description

MESFET (Métal Semi-conducteur Field Effect Transistor) considéré est conçu sur un substrat GaAs semi-isolant qui doit être le moins conducteur possible et qui constitue essentiellement un support mécanique pour le reste du composant.

Dans la technologie MESFETs auto-alignés la couche active est directement implantée dans le substrat semi isolant, la grille en métal réfractaire est déposée. Puis les zones N⁺ sont implantées en se servant du métal comme d'un masque pour obtenir deux zones d'accès auto-alignées sur la grille. Il est à noter que tous les MESFETs ne sont pas toujours auto-alignés.

La figure II.3 présente une coupe schématique d'un MESFET dans sa version la plus élaborée (implantée, auto alignée). La structure présentée met en évidence les différentes couches utilisées pour sa réalisation. La couche active est généralement une couche du type N qui repose sur un substrat semi isolant.

Les contacts de source et de drain sont des contacts ohmiques contrairement au contact Schottky de grille [18].

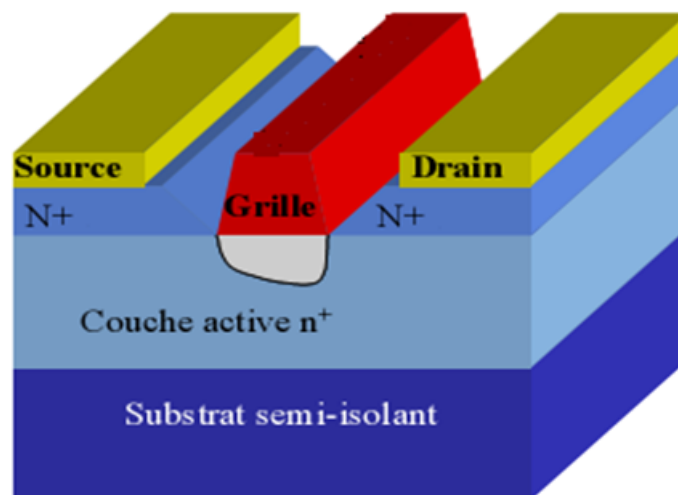


Figure II-3 :Vue en coupe du MESFET GaAs [6]

II.1.2.2 Principe de fonctionnement

Le principe de base du MESFET repose sur les caractéristiques d'une jonction Schottky.

Lorsqu'un métal (grille) est mis en contact avec un semi conducteur (SC) de type N, les électrons du semi conducteur au voisinage du métal diffusent dans ce dernier laissant ainsi une zone dépeuplée sous la grille sur une profondeur d . Perdant des électrons, le semi conducteur devient de plus en plus positif par rapport au métal, ce qui donne naissance à un champ électrique E_i comme l'indique la figure II.4 [19].

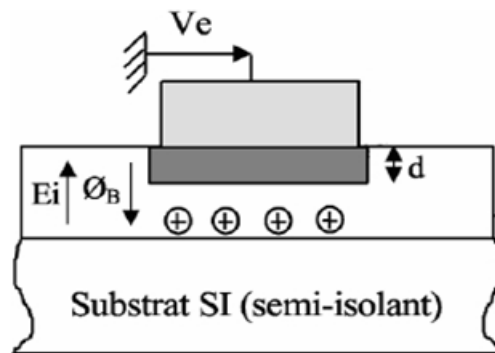


Figure II.4 : Jonction Schottky, $V_e = 0$ à l'équilibre [19].

S'établit lorsque le potentiel atteint une valeur ØB appelée hauteur de barrière, par conséquent les électrons ne peuvent plus diffuser dans le métal. Lorsque l'on applique une tension extérieure V_e négative entre le métal et le semi-conducteur, le champ électrique total augmente entraînant ainsi la reprise du processus de diffusion sur une profondeur $d' > d$ (figure I.5 a). Un nouvel équilibre s'établit lorsque l'intégrale du champ atteint la valeur $(-V_e) + \text{ØB}$ et par conséquent aucun courant ne circule dans le circuit extérieur sauf un courant inverse de saturation de valeur négligeable.

Si la tension V_e est positive, le champ électrique total ($E_{ex} - E_{in}$) diminue et tend vers une valeur nulle lorsque V_e atteint ØB (figure II.5 b). L'épaisseur d diminue et les électrons diffusent du semi conducteur vers le métal donnant naissance à un courant I_e

- U_T est le potentiel thermodynamique (25 mV à 300 °K)
- n est le facteur d'idéalité de la diode compris entre 1 et 2
- V_j est la tension intrinsèque appliquée à la jonction [13].

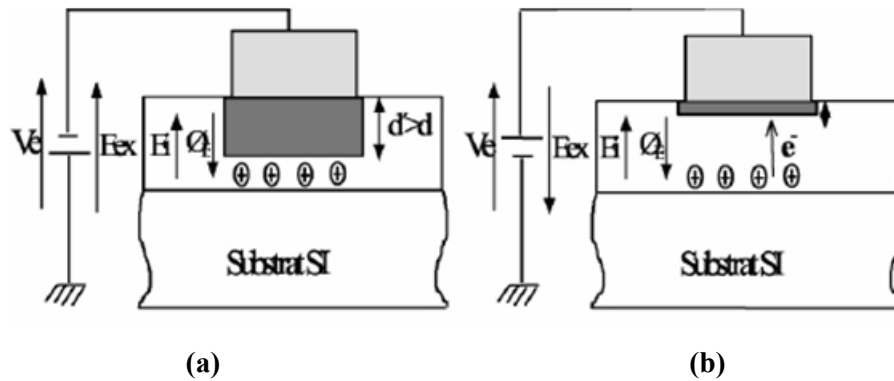


Figure II.5: $V_e < 0$, équilibre à $(-V_e) + \text{ØB}$, (b): $V_e > 0$, diffusion des électrons [13].

II.2.3 Transistor à effet de champ à grille isolée (MOSFET)

II.2.3.1 Description

Le MOSFET est un composant dont la structure est proche du MESFET. La différence est que le MOSFET (figure (II.7)) se caractérise par le dépôt d'une couche d'oxyde isolante entre la grille et le substrat constituant une capacité MOS (Métal Oxyde Semi-conducteur). Cette structure est basée sur la commande par une polarisation sur une électrode isolée de porteurs libres dans une zone peu dopée. La modulation du nombre de porteurs permet d'établir un canal de conduction entre deux zones conductrices semi-conductrices très dopées. Une capacité MOS est réalisée sur le substrat entre la source et le drain. L'électrode de commande de la capacité MOS constitue la grille du transistor.

II.2.3.2 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement de ce FET à grille isolée consiste à moduler par la tension de grille, la conductivité du canal drain source résultant de la couche d'inversion créée à la surface du semi-conducteur. En effet, quand la capacité MOS est en régime d'inversion, un canal N à la surface du semi-conducteur relie la source et le drain.

Il en résulte qu'une polarisation drain-source V_{DS} donne naissance à un courant de drain important. Pour une tension V_{DS} donnée, le courant est important quand le régime d'inversion de la capacité est prononcé. On module donc le courant de drain par la tension de polarisation de la grille V_{GS} . Si la capacité MOS est en régime de forte inversion en l'absence de polarisation, le transistor est normalement conducteur. Le courant de drain peut alors être diminué par une tension de grille de polarité convenable. On dit que le transistor fonctionnée

régime d'appauvrissement. Si au contraire la couche d'inversion n'existe pas en l'absence de polarisation, très peu de courant circule entre la source et le drain (conduction sous le seuil).

La grille doit être polarisée par une tension supérieure à la tension de seuil $V_{GS} > V_{th}$ (où V_{th} est la tension à partir de laquelle apparaît le régime d'inversion : apparition du canal) pour que le courant drain circule, on dit alors que le transistor fonctionne en régime d'enrichissement. Comme dans le cas du JFET et MESFET, deux régimes peuvent être distingués. Pour des tensions V_{DS} faibles, la variation de la conductance du canal est négligeable. C'est le régime linéaire. Le courant varie proportionnellement à la tension V_{DS} . Quand la tension V_{DS} augmente, la conductance du canal diminue suite à la diminution de la variation de la densité des porteurs dans la couche d'inversion. Pour une certaine valeur de $V_{DS} \approx V_{D\text{ sat}}$ (tension de saturation), la capacité MOS n'est plus en régime d'inversion côté drain, la conductivité du canal s'annule au voisinage du drain, c'est le régime de pincement. Quand la tension drain continue à augmenter (au-delà de $V_{D\text{ sat}}$), le point de pincement se déplace vers la source [17].

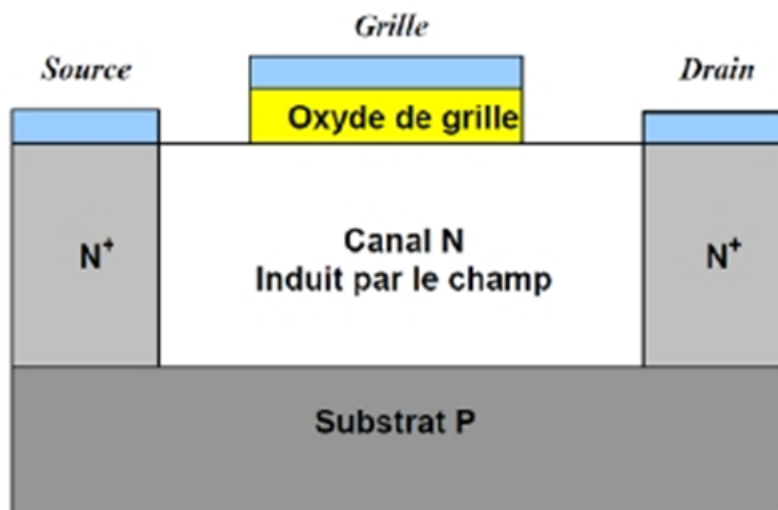


Figure II .6 : Coupe schématique d'un transistor MOSFET à canal N [17].

II.3 Le transistor HEMT

II.3.1 Historique

Cette nouvelle famille de composants a été élaborée en 1980 par les équipes de Thomson CSF [20] et de Fujitsu [21] sous les dénominations respectives de TEGFETs (two dimension Electron GaAs Field Effect Transistor) et de HEMTs (High Electron Mobility Transistors). Les dénominations de MODFETs (Modulation Doped FET) et de HFET (Hetero Junction FET) ont également été employées par le passé mais c'est sous l'appellation HEMTs que sont le plus connus ces transistors.

En 1985, le HEMT est présenté comme un composant micro-onde unique ayant les plus faibles caractéristiques en bruit.

Initialement, ce transistor était utilisé dans un radiotélescope à Nobeyama (Japon) qui présente un diamètre de 45 mètres. En refroidissant le composant à la température de l'hélium liquide, il est possible de capter un signal provenant d'une molécule interstellaire située à mille années lumière de la Terre. Plus tard, HEMT est implanté dans des récepteurs de télévision pour capter les signaux des satellites géostationnaires (36000 km d'altitude). Puis petit à petit, ce composant se fera une place dans notre quotidien. Le HEMT constitue une évolution majeure du MESFET (FET à jonction métal/semi-conducteur) et prend le pas sur ce dernier depuis le début des années 1990.

Les premiers HEMTs GaN sur substrat saphir, silicium et carbure de silicium, apparaissent au milieu des années 90. Cependant, des résultats très intéressants en termes de puissance et de fréquence sont trouvés seulement à la fin des années 90. En 1999, S.T. Sheppard présente des travaux sur un transistor HEMT GaN (substrat SiC) avec une densité de puissance de 6,9 W/mm à 10 GHz. Au sein du laboratoire IRCOM, un transistor HEMT GaN sur substrat SiC issu du laboratoire Tiger de 1,2 mm de développement de grille a délivré une puissance de sortie de 6,7 W (5,6 W/mm) avec un PAE de 40 % et un gain en puissance associé de 6,5 dB à une fréquence de 10 GHz lors de mesures grand signal en régime CW. De très bons résultats sont aussi obtenus à partir de transistors HEMTs-GaN sur substrat silicium avec des densités de puissance de 1,9 W/mm à 10 GHz allant jusqu'à 12 W/mm à 2,14 GHz.

Très récemment, des sociétés comme CREE et SOITEC commencent à proposer des Wafers GaN, tout en continuant leur production de wafers SiC beaucoup plus matures.

Les travaux de K.K. Chu font état d'un transistor HEMT AlGaIn/GaN sur substrat GaN polarisé à 50 V sur le drain, ayant une densité de puissance de 9,4 W/mm avec un PAE

associé de 40 % à 10 GHz. Nous constatons donc que tous les résultats présentés jusqu'ici, et obtenus avec des transistors HEMTs à structure conventionnelle, ne dépassent pas les 10W/mm pour des applications bande X Or début 2004, un saut technologique vient d'être accompli avec l'ajout d'une métallisation de grille, appelée « Field plate » ou

« overlappinggate », située au-dessus de la couche de passivation du composant. Ces nouvelles structures Field plate permettent d'atteindre des densités de puissance exceptionnelles. Ce composant est désormais largement utilisé en tant que composant faible bruit dans les systèmes de télécommunications terrestres et spatiales, dans les radiotélescopes, dans les récepteurs de télévision par satellite... Dans bon nombre de systèmes électroniques, des téléphones portables aux véhicules automobiles [22] .

II.3.2 Le transistor HEMT à base d'AlGaAs/GaAs

II.3.2.1 Structure d'un HEMT

La solution trouvée au problème des dopants qui limitent la mobilité dans le canal consiste à transférer des électrons, contenus dans un plan de dopage, directement dans le canal non dopé.

Le plan de dopage est contenu dans un matériau à grand gap, qui est aussi le matériau semi conducteur qui définira le contact Schottky avec le métal de grille. C'est sur ce principe que reposent les HEMTs : celui d'une hétérojonction entre un matériau grand gap (couche barrière Schottky) et un matériau à petit gap (le canal) et qui vont permettre de séparer spatialement les charges coulombiennes de la couche donneuse (plan de dopage) des électrons libres du canal.

II.3.2.2 Description des couches

La structure d'un HEMT AlInAs/GaInAs classique sur substrat InP est composée des couches suivantes : (figure II.7)

La couche de contact ohmique: c'est un matériau à petit gap (ici GaInAs) fortement dopé qui sert à former des contacts ohmiques de source et drain de faible résistivité

La couche nommée «couche barrière» non intentionnellement dopée (n.i.d.) qui est constituée d'un matériau grand gap (ici AlInAs). Elle même est divisée en trois zones:

La couche de contact Schottky ainsi nommée du fait de la jonction avec la grille

Le plan de dopage, obtenu en dopant fortement une fine couche d'AlInAs. Le dopage peut être aussi réalisé en volume dans la couche barrière Schottky.

L'espaceur, composé du même matériau à grand gap que la couche de contact Schottky, qui va permettre le confinement des électrons dans le canal grâce à la grande discontinuité de bande de conduction avec le matériau du canal

Le canal, constitué d'un matériau à petit gap (ici GaInAs). Il va permettre un transit rapide des électrons grâce à la forte mobilité électronique et au caractère non dopé de ce matériau. La couche tampon, du même matériau que l'espaceur, qui va, grâce à la forte discontinuité de bande de conduction avec la couche canal, améliorer le confinement des électrons dans le canal. Toutes ces couches sont épitaxiées sur un substrat semi-isolant qui sert de support mécanique.

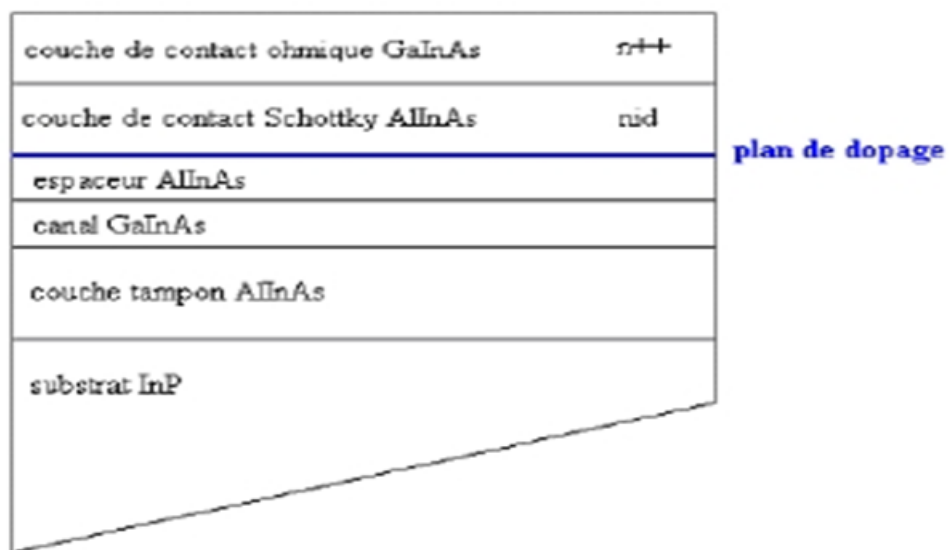


Figure II .7 : Structure de couche d'un HEMT AlInAs/GaInAs sur In [23].

II.3.2.3 Principe de fonctionnement

Ce transistor est apparu grâce au bon confinement des porteurs qui sont séparés de leurs donneurs et qui se trouvent dans un canal séparé et de la couche donneuse pas une couche intrinsèque appelée espaceur.

Le principe de base consiste à mettre à profit les propriétés de haut mobilités d'un gaz bidimensionnel d'électron formé à l'interface d'une hétérojonction.

L'idée de base est de séparer spatialement les électrons libres, des donneurs ionisés dont ils proviennent. Le HEMT se compose, comme le montre la figure II.8 d'un empilement de plusieurs couches semi conductrices. Le canal actif est formé à l'interface du GaAs et du AlGaAs (entre deux matériaux à petite et large bandes interdites) [24].

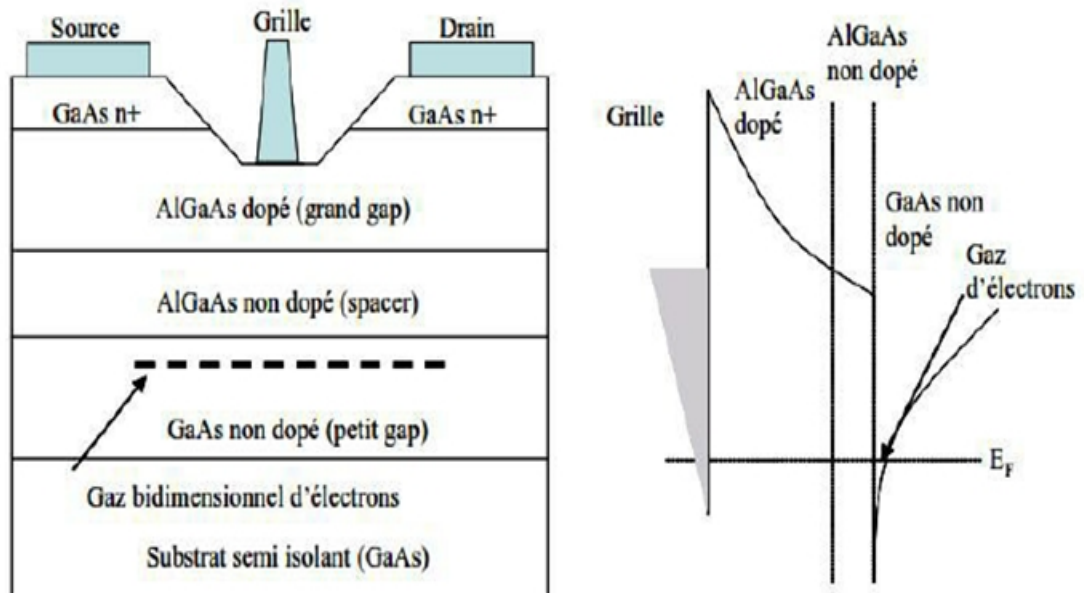


Figure II.8: Structure de principe d'un HEMT classique associée à son diagramme de bande d'énergie [24].

Le principe du HEMT est basé sur l'hétérojonction entre semi-conducteur à grand gap et petit gap. Les premiers HEMTs furent les où on fait croître une couche non intentionnellement dopée de GaAs suivie d'une couche d'AlGaAs fortement dopée N⁺.

A l'interface métal semi-conducteur apparaît une barrière de potentiel pour les électrons qui correspond à la différence de travail de sortie entre le métal et le semi-conducteur. Le comportement électrique de ce contact est celui d'une diode et en polarisation inverse, cette jonction se comporte comme un condensateur. La commande de grille étant de type Schottky, sa tension de diffusion et sa polarisation mettent la couche de AlGaAs en déplétion totale [13]. Les électrons libérés par les donneurs sont transférés alors depuis le matériau ayant le plus grand gap vers celui ayant le plus petit c'est-à-dire le GaAs où ils forment un gaz d'électrons bidimensionnel. On découvrit alors que les électrons pouvaient y atteindre une très grande vitesse en raison de l'absence d'ions donneurs. Dès lors de telles structures ont été à l'origine de transistors à effet de champ à hautes performances. Ainsi et grâce aux meilleures propriétés de transport des électrons, les HEMTs répondent aux besoins de la réalisation des circuits à des hautes fréquences, et leur performances en bruit sont meilleurs que celle des MESFETs.

De cela plusieurs types de transistors à effet de champ à hétérojonction ont été élaborés :

- TEGFET : Two dimensional electron gas field transistor

- HFET : Hétéro-structure field effect transistor
- MODFET : Modulation doped field effect transistor
- PHEMT : Pseudomorphic high électron mobility transistor

Les appellations TEGFET, MODFET et HFET indiquent des transistors à hétérojonctions à maille cristalline accordées ou quasi-accordées, c'est-à-dire que tous les matériaux épitaxiés sont en accord de maille sur le substrat, le paramètre cristallin est alors identique pour tous les Matériaux. Les PHEMTs sont élaborés à l'aide de deux composés III-V à tailles de maille cristalline différentes mais peu éloignées, ils représentent la filière pseudo- morphique [25].

Il est préférable d'avoir deux matériaux à propriétés cristallines semblables ou quasi proches pour former une bonne hétérojonction, le désaccord de maille joue un rôle important sur la qualité du produit.

Les HEMTs AlGaAs/GaAs ont été étudiés et exploités à leurs limites dans des domaines De fréquences allant de 50Ghz à 60Ghz et plus encore pour le PHEMT AlGaAs/InGaAs/GaAs. On s'intéressa alors à de nouveaux matériaux : les nitrures[10].

II-2 HEMTS a base de nitrure de gallium AlGaN/GaN

II.2.1 Structure d'un HEMT

La structure du HEMT est représentée sur la figure (II-9). Elle est constituée des matériaux suivants : [26]

- le substrat
- un matériau à grand gap
- un matériau à petit gap

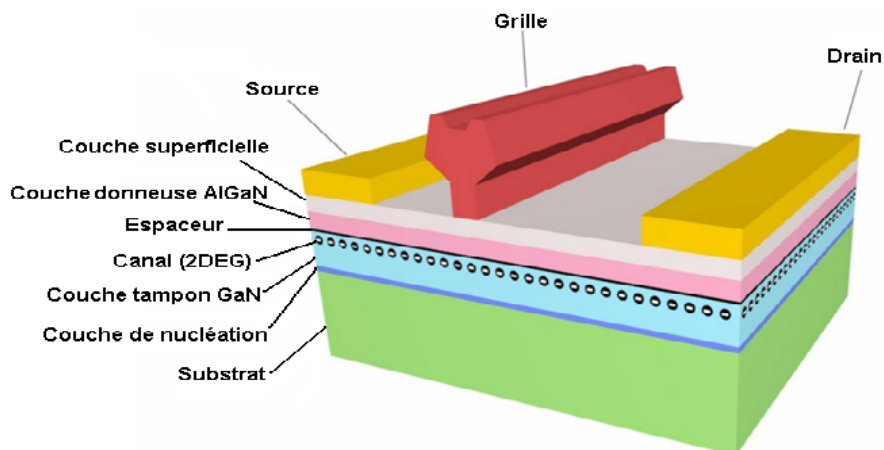


Figure II- 9 : Structure et différentes couches du HEMT AlGaN/GaN [6].

II.2.2 Description des couches

- Cap layer : C'est la couche superficielle, elle 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.
- La couche à grand gap non dopée : elle est destinée à la réalisation du contact Schottky de grille, qui est déposé après gravure du cap layer (structure à grille creusée).
- La couche à grand gap dopée : son rôle est de fournir les électrons libres à la structure,
- appelée la couche donneuse. Ce dopage pouvant être volumique réalisé généralement par un plan de dopage silicium 'Si'.
- Espaceur (spacer): une couche de matériau à grand gap non intentionnellement dopée
- permettant de séparer les atomes donneurs d'électrons de la couche donneuse des électrons du canal. Les interactions à distance sont ainsi réduites. A l'inverse, plus cette couche sera moins épaisse, plus la mobilité des électrons dans le canal sera meilleure. Le transfert des électrons de la couche donneuse dans le canal est favorisé par un Espaceur fin.
- Le canal : il est constitué d'un matériau à petit gap non dopé. cette couche est importante dans la mesure où elle reçoit le gaz d'électron bidimensionnel (2DEG) qui déterminera les performances du composant à travers les propriétés de transport des électrons dans le matériau.
- La couche tampon : appelée aussi buffer, permet d'améliorer le confinement des électrons dans le canal en réduisant l'injection des porteurs vers le substrat.
- Le substrat : cette couche permet également d'avoir un matériau de base de bonne qualité cristallographique nécessaire à la croissance des autres couches [27].

II.2.3 Principe de fonctionnement

Comme tous les transistors à effet de champ à grille Schottky de type MESFET, l'idée de base du HEMT est le contrôle du courant drain-source par l'action électrostatique d'une électrode de commande dénommée "grille". A l'équilibre thermodynamique les niveaux de Fermi s'alignent. Le principe de conservation des paramètres physiques de part et d'autre de l'hétérojonction implique la formation d'une courbure de bandes de conduction et de valence

entraînant la formation d'un puit de potentiel dans le matériau à petit gap «GaN» où les électrons provenant de la couche donneuse «AlGaN» s'accumulent (figure II.9). Ce transfert de porteurs,

s'il est favorisé par un potentiel de grille approprié, provoque la circulation dans un plan parallèle à l'hétérojonction d'un courant de gaz d'électrons bidimensionnel. Le gaz d'électrons étant situé dans le matériau faiblement dopé, le déplacement des électrons sera plus rapide. C'est pour cette raison qu'on prévoit que ce transistor à hétérojonction est plus rapide et présente une fréquence de coupure plus élevée que les transistors à effet de champ GaAs classique [28].

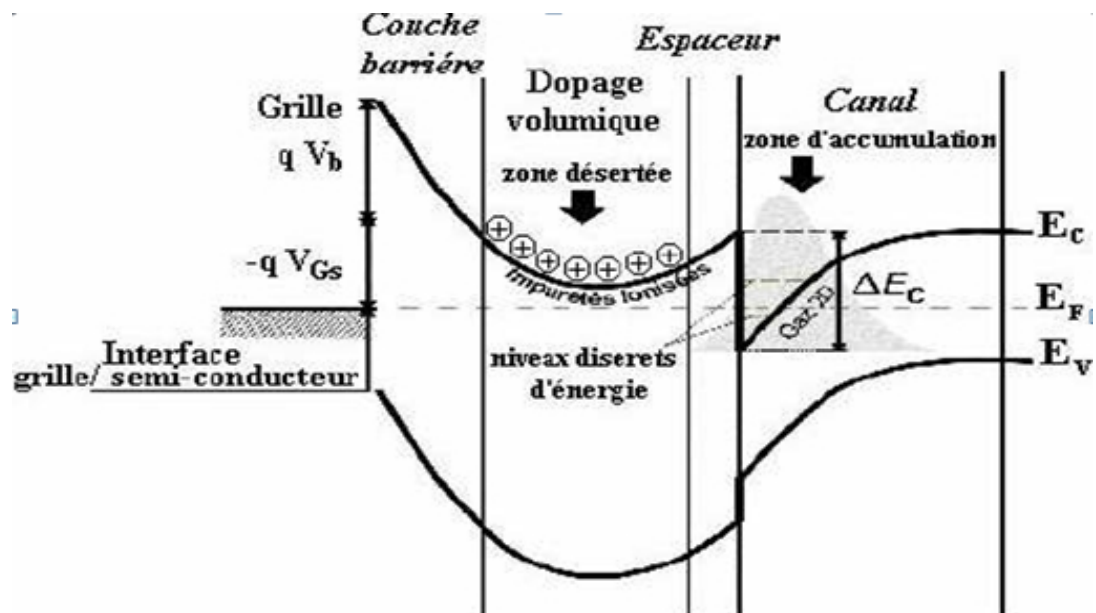


Figure II.10: Structure de bande d'une hétérojonction en présence d'un potentiel de grille [28].

II.4 Comparaison d'AlGaN/GaN et d'AlGaAs/GaAs à base de dispositif HEMT

En comparaison avec les GaAs, les dispositifs HEMT à base de HEMT GaN présentent des performances caractéristiques différentes en considération de dopage. En raison du fort dopage et de l'effet de polarisation, la tension de seuil change brusquement, ce qui signifie l'accumulation de porteurs de charge à l'interface AlGaN / GaN. Encore une fois l'effet de la polarisation peut être analysé sur le courant de drain maximum, il augmente à mesure que le niveau de dopage augmente. L'utilisation d'une transconductance HEMT à base de nitrure n'est pas significativement modifiée par rapport à la HEMT GaAs. La fluctuation de la capacité n'est pas considérable dans les dispositifs HEMT de GaN, bien que la capacité soit très influencée par le dopage dans le contexte de l'HEMT de GaAs. En dépit de la même

variation dans le dopage, la fréquence de coupure est considérablement élevée dans le GaN. Le HEMT signifie une réponse haute fréquence [29].

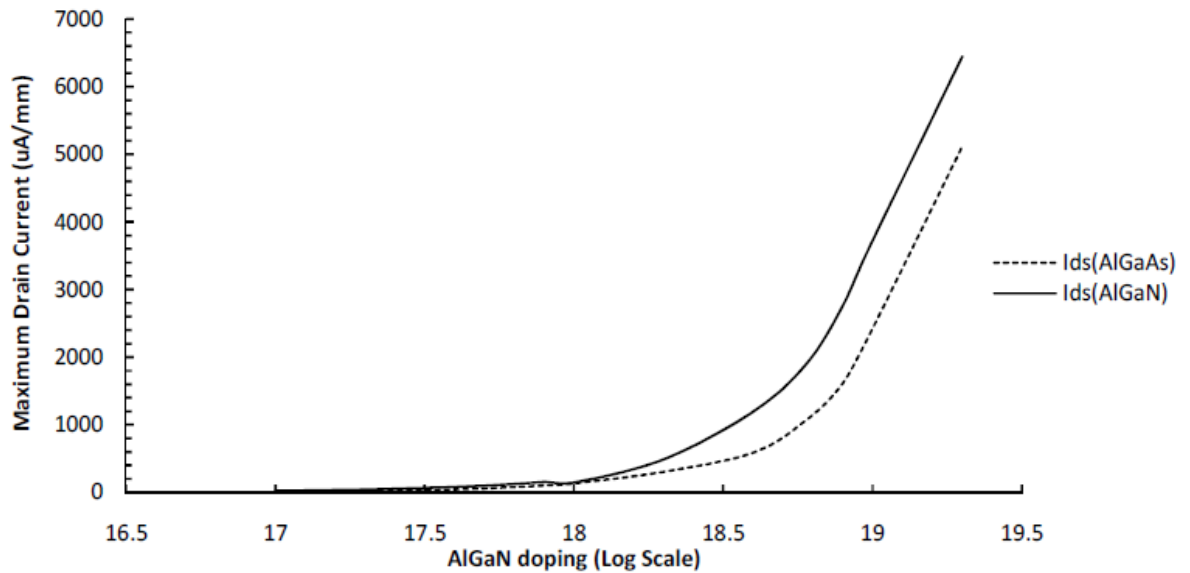


Figure II.11. Variation du courant de drain maximal des dispositifs HEMT à base de GaAs et de GaN contre le niveau de dopage dans la couche de support [30].

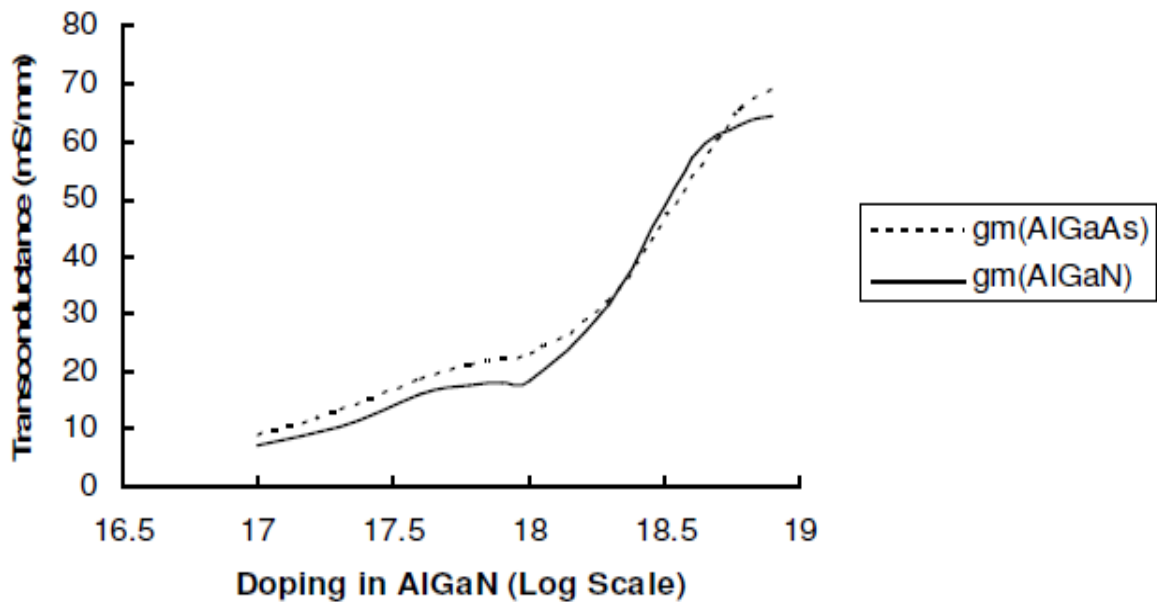


Figure II.12 Variation de la transconductance des dispositifs HEMT à base de GaAs et de GaN contre le niveau de dopage dans la couche support [30]

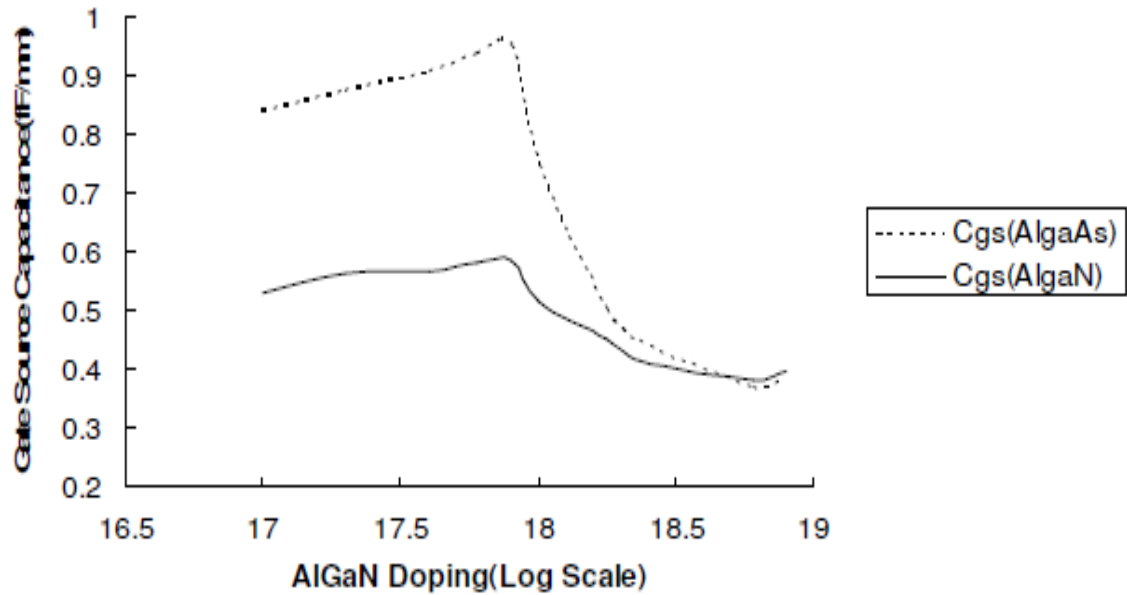


Figure II.13 Variation de la capacité de gauchissement des dispositifs HEMT à base de GaAs et de GaN contre le niveau de dopage dans la couche de support [30].

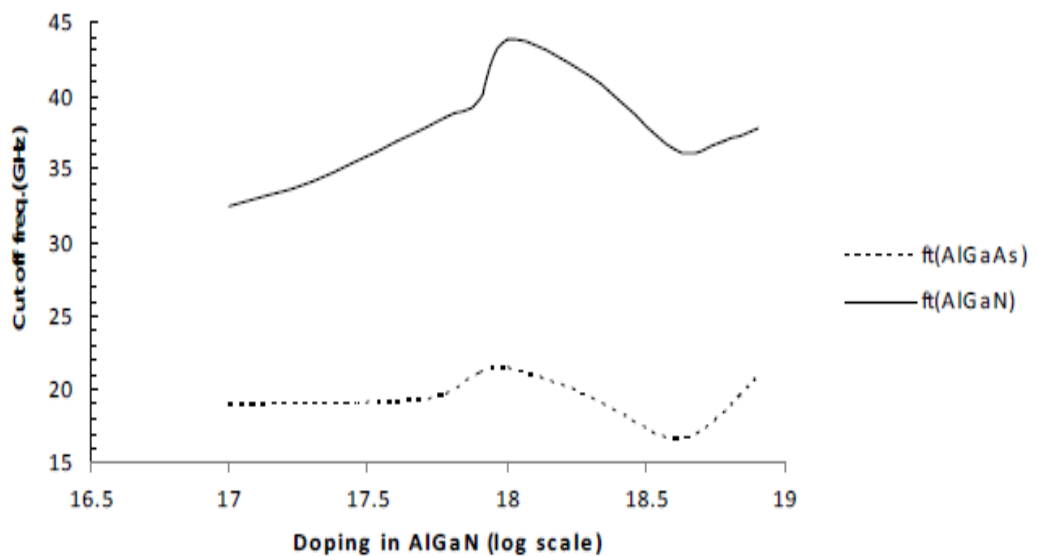


Figure II.14 : Interruption de la variation de fréquence des dispositifs HEMT à base de GaAs et de GaN contre le niveau de dopage dans la couche de support [30]

Pour une application à grande vitesse et puissance, les dispositifs HEMT à base de GaN sont supérieurs aux dispositifs à base de GaAs .Un dopage plus élevé peut se traduire

par un courant de drain élevé mais conduit à une fréquence de coupure plus faible plus la tension seuil diminue en valeur négative à un niveau de dopage plus élevé [31].

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, et dans un premier volet, nous avons présenté les différents composants FETs utilisées pour l'amplification de puissance. Mais les transistors à haute mobilité d'électrons HEMTs présentent les meilleures performances en fréquences et en puissances. Cependant les HEMTs à structure conventionnelle, ne dépassent pas les 10W/mm. Afin d'augmenter la densité de puissance, l'utilisation de la technologie FP-HEMTs est parmi les solutions attendues.

Chapitre 3

Simulation et
interprétation des
résultats

III.1 Introduction

La capacité à simuler avec précision un dispositif semi-conducteur est cruciale pour l'industrie et milieux de recherche. L'outil de simulation ATLAS est spécialement conçu pour la modélisation 2D et 3D de composants basés sur la physique des semi-conducteurs, en incluant les propriétés électriques, optiques et thermiques. Il possède une bibliothèque regroupant des matériaux prédéfinis comme il permet à l'utilisateur de définir d'autres matériaux propres à leur choix.

Dans le présent chapitre, nous allons présenter le logiciel de simulation « Silvaco-Atlas », en expliquant les étapes suivies pour la simulation et l'amélioration de la structure étudiée du HEMT à base de l'hétérostructure AlGaIn/GaN.

III.2 Présentation de TCAD-SILVACO

Silvaco (Silicon Valley Corporation) est un environnement de logiciels qui permet de concevoir et prévoir les performances des dispositifs à semi-conducteur. Cet outil de conception des dispositifs à semi-conducteur avant leur fabrication. Il est très utile dans le développement de beaucoup de projets de recherches. Le TCAD-SILVACO inclut de nouveaux modèles physiques qui emploient des méthodes et des algorithmes numériques efficaces, de nouvelles techniques de maillage, l'optimisation solutions linéaires, etc., toutes en permettant d'obtenir des résultats de simulation très proches de celles de la pratique. L'avantage majeur de ce type de simulateurs est qu'il donne la possibilité de visualiser des phénomènes physiques difficilement accessibles et donc observables. Les modules de TCAD-SILVACO peuvent être utilisés pour:

- La simulation des étapes de fabrication technologique par le module Athena
- La simulation électrique des dispositifs par le module Atlas **[32]**.

III.2.1 Le logiciel ATHENA

Le logiciel de simulation ATHENA de TCAD-SILVACO fournit des possibilités générales pour la simulation des processus utilisés dans l'industrie des semi-conducteurs : diffusion, oxydation, implantation ionique, gravure, lithographie, procédés de dépôt. Il permet des simulations rapides et précises de toutes les étapes de fabrication utilisées dans la technologie CMOS, bipolaire, SOI, optoélectronique, MEMS, et les composants de puissances [33]. Là aussi, le logiciel permet de fournir des informations importantes pour la conception et l'optimisation des procédés technologiques telles que les concentrations des porteurs, les profondeurs de jonctions, etc. Le programme de simulation (défini comme entrée) des différentes étapes technologiques et les phénomènes physiques, s'établit avec le module DECKBUILD de TCAD-SILVACO, puis la visualisation de la structure de sortie s'effectue avec le module TONYPLOT.

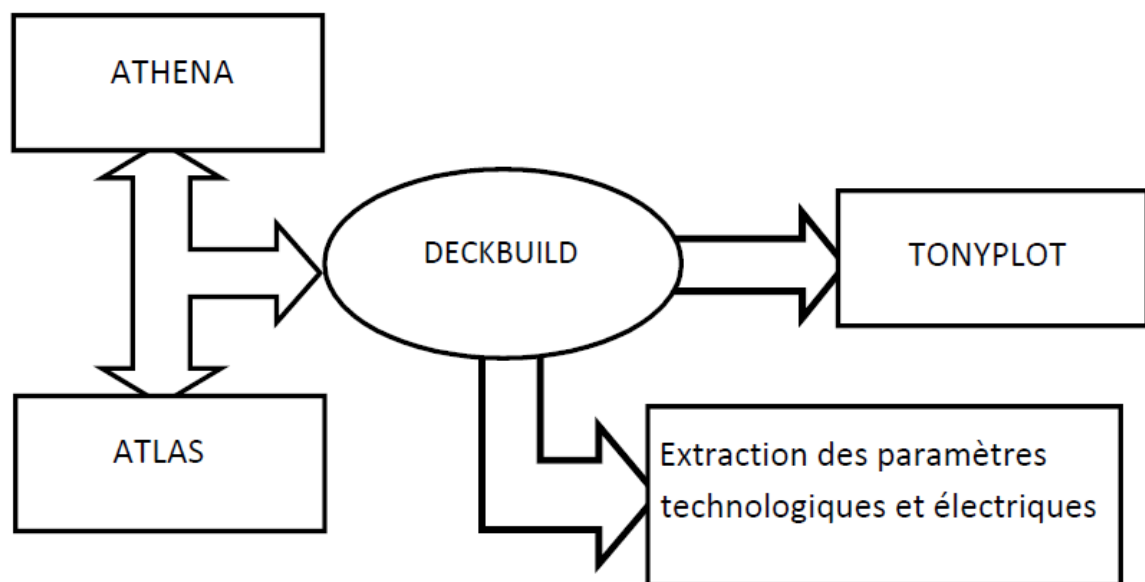


Figure III.1 : Schéma synoptique des modules utilisés dans la simulation par TCAD-SILVACO [34].

III.2.2 le logiciel ATLAS

Le logiciel de simulation ATLAS est un simulateur de modélisation bidimensionnelle de composants capable de prédire les caractéristiques électriques de la plupart des composants semiconducteurs en régime continu, transitoire ou fréquentiel. En plus du comportement électri

que "externe", il fournit des informations sur la distribution interne de variables telles que les lignes de courant, le champ électrique ou le potentiel. Ceci est réalisé en résolvant numériquement l'équation de Poisson et les équations de continuité des électrons et des trous (à deux dimensions) en un nombre fini de points formant le maillage de la structure défini par l'utilisateur ou par le programme.[35]

III.2.1 Le logiciel Atlas

Le logiciel de simulation ATLAS est un simulateur de modélisation bidimensionnelle de composants capable de prédire les caractéristiques électriques de la plupart des composants semi-conducteurs en régime continu, il existe cinq groupes de commandes, ces groupes doivent être organisés correctement (Figure III.2). Si l'ordre n'est pas respecté, un message d'erreur apparaît et le programme ne s'exécute pas d'une façon correcte. Par exemple, si les paramètres ou les modèles de matériaux ne sont pas placés dans l'ordre idoine, le simulateur ne les prend pas en compte.[35]

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) [35].

Les commandes fondamentales sont :

MESH : cette commande produit un maillage ou lit un maillage qui a été défini auparavant. L'élément de maille utilisé est le triangle.

REGION : c'est une instruction qui définit une région dans une structure.

ELECTRODE : indique l'endroit et les noms des électrodes dans une structure

DOPING : indique le type et le profil de dopage.

MATERIAL : associe des paramètres physiques aux matériaux utilisés dans la simulation par exemple : affinité électronique, énergie de gap, la fonction de la densité des états, les vitesses de saturation, les durées de vie des porteurs minoritaires, etc.... (Il faut faire attention parce que le logiciel a des paramètres de matériau définis par défaut pour les semi-conducteurs standards)

MODELS : Cette instruction permet de faire appel aux modèles physiques existants dans le logiciel, nous pouvons citer comme exemples les modèles de recombinaison Shockley Read Hall (SRH), Auger et les modèles concernant les statistiques des porteurs de Boltzmann, Fermi, etc ...

CONTACT : indique les attributs physiques d'une électrode : anode, cathode, drain, etc ...

INTERFACE : indique les paramètres d'interface aux frontières de semi-conducteur/isolant, comme exemple, la vitesse de recombinaison en surface et la densité de charge à l'interface.

METHOD : place les méthodes numériques à employer pour résoudre les équations et les paramètres liés à ces algorithmes. Les méthodes numériques qui peuvent être spécifiées par cette instruction incluent des méthodes telles que celles de Gummel et de Newton.

LOG : permet à toutes les caractéristiques finales de simulation d'être sauvées dans un fichier (ouvre un fichier de type log (log en minuscule veut dire le type de fichier, LOG en majuscule veut dire la commande dans le programme)). N'importe quel type de donnée, qu'elle soit C.C., transitoire ou C.A., générée par la commande SOLVE est sauvée après la commande LOG (donc les informations sauvées sont de type électrique et elles sont, par exemple, en fonction de la tension de polarisation ou de la source de lumière). Si dans le programme il y a

plusieurs commandes LOG, chaque fois le fichier log qui a été ouvert avant est fermé et un nouveau fichier log est ouvert.

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

LOAD : charge des solutions précédentes à partir de fichiers en tant que conditions initiales à d'autres points de polarisation.

SAVE : sauve toutes les informations d'un point nœud du maillage dans un fichier de sortie (les fichiers de sortie sont de type structure). Les informations sauvées correspondent à un état électrique bien précis.

EXTRACT : les commandes de ce type sont utilisées pour extraire les valeurs bien précises des paramètres des deux types des fichiers log ou solution.

TONYPLOT : démarre le programme « TonyPlot » de post processus graphique des donnés. Elle permet de présenter les solutions trouvées pendant la simulation sous forme de graphe.

Une autre commande importante est **BEAM**, sa position est au niveau 4 des groupes de commande. BEAM indique un signal d'entrée optique sous forme d'un faisceau de lumière (mono ou multi-spectrale) collimatée. Le faisceau ainsi déclaré est allumé et utilisé par la commande SOLVE, dans ce cas le module **Luminous** est activé. Donc BEAM est utilisé pour simuler des courants sous lumière ou des réponses spectrales.

III.2.2 Spécification de la structure

Silvaco Atlas reçoit les fichiers d'entrée qui contient les programmes de simulation de DeckBuilt. Atlas est appelé à exécuter ces derniers par la commande suivante : **go atlas** Le format des commandes d'Atlas est le suivant

< STATEMENT > < PARAMETER > = < VALUE >

III.2.2.1 Le maillage

Le maillage est une série de lignes horizontales et verticales espacées entre elles, il joue un rôle important pour l'obtention de bonnes simulations. Celui ci doit être fait avec la plus grande attention pour garantir la fiabilité des résultats.

Le maillage adopté dans notre travail est bidimensionnel. Par conséquent on définit seulement les paramètres x et y, la figure III.3, indique un maillage d'une structure.

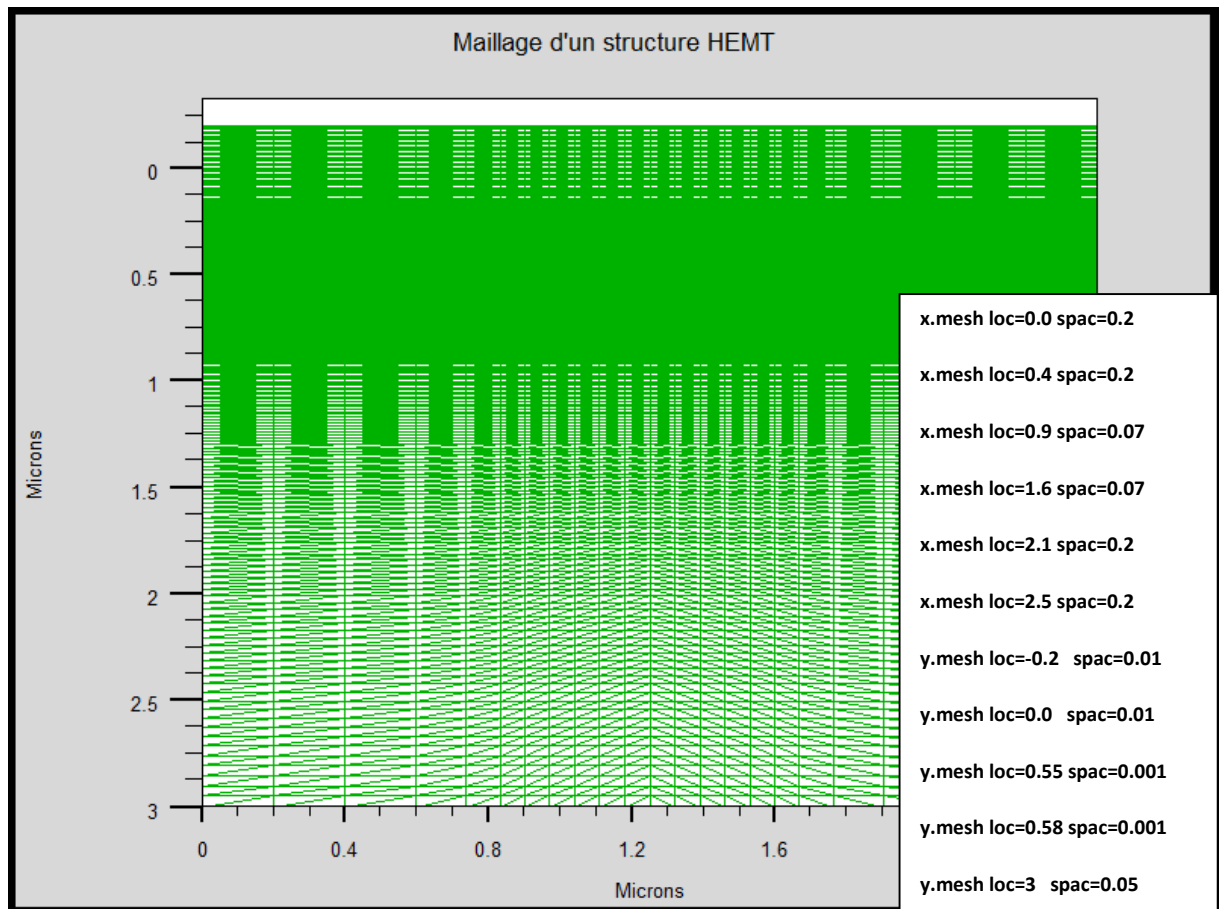


Figure III.3 : spécification de maillage

III.2.2.2 Spécification des régions et les électrodes

Il est nécessaire de définir les régions constituant le composant microélectronique. La définition de ces régions est faite par déclaration de type de matériau et de sa position dans les deux dimensions qui traduisent l'épaisseur et la largeur. Aussi Les électrodes peuvent être définies en ATLAS par l'identification de leur position en x et y et leurs profondeurs. La Figure III.2 montre les régions du maillage. Les limites de chaque région sont explicitement identifiés dans les axes x et y et la position de la source, grille et drain

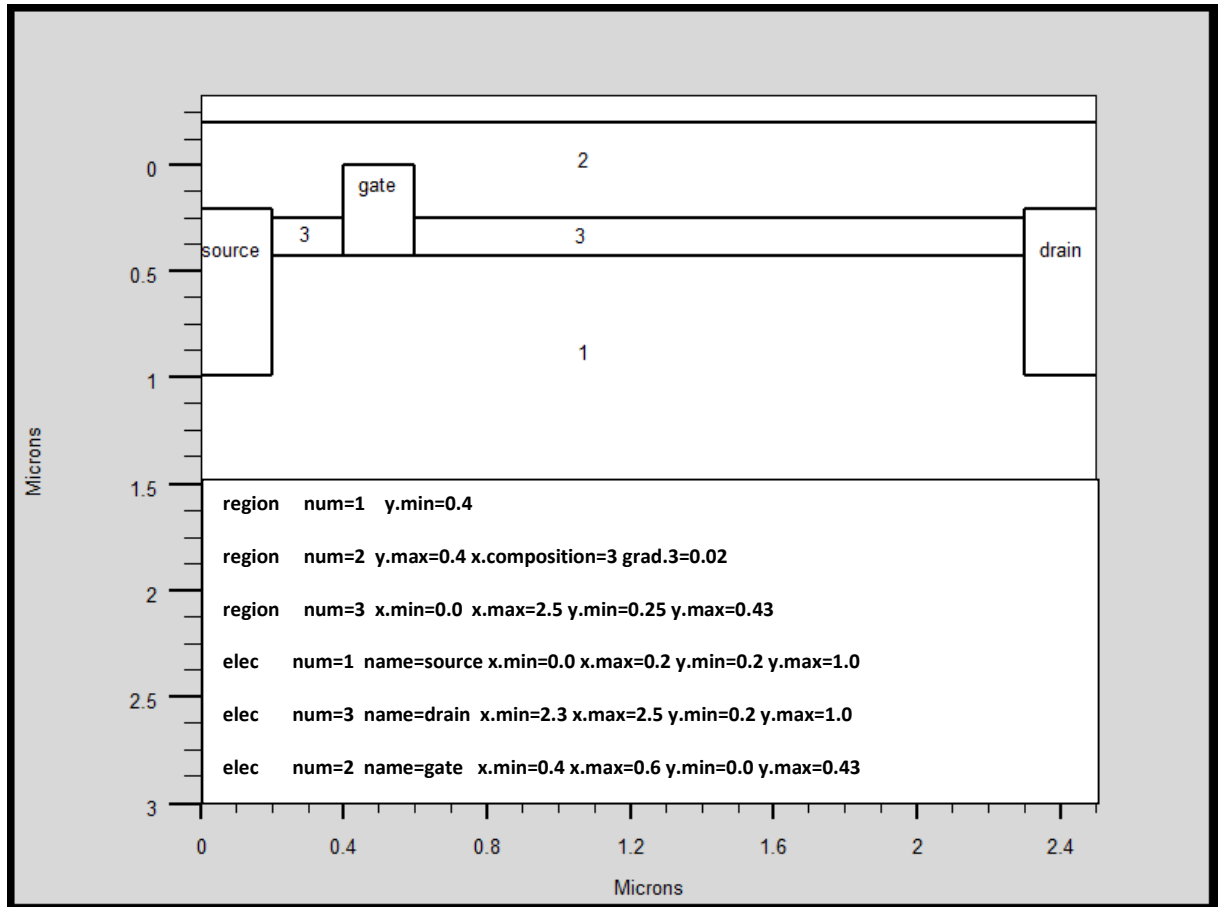


Figure III.4 : Spécification des régions et les électrodes

III.2.2.3 Attribution de matériaux pour les régions

Les transistors a haute mobilité électronique peuvent être fabriqués à partir de plusieurs types de matériaux tels que le nitrure de Galium, l'arséniure de Galium et plusieurs d'autres substrats, Dans notre cas, le choix est porté après de faire une étude comparatif entre le GaN et le GaAs.

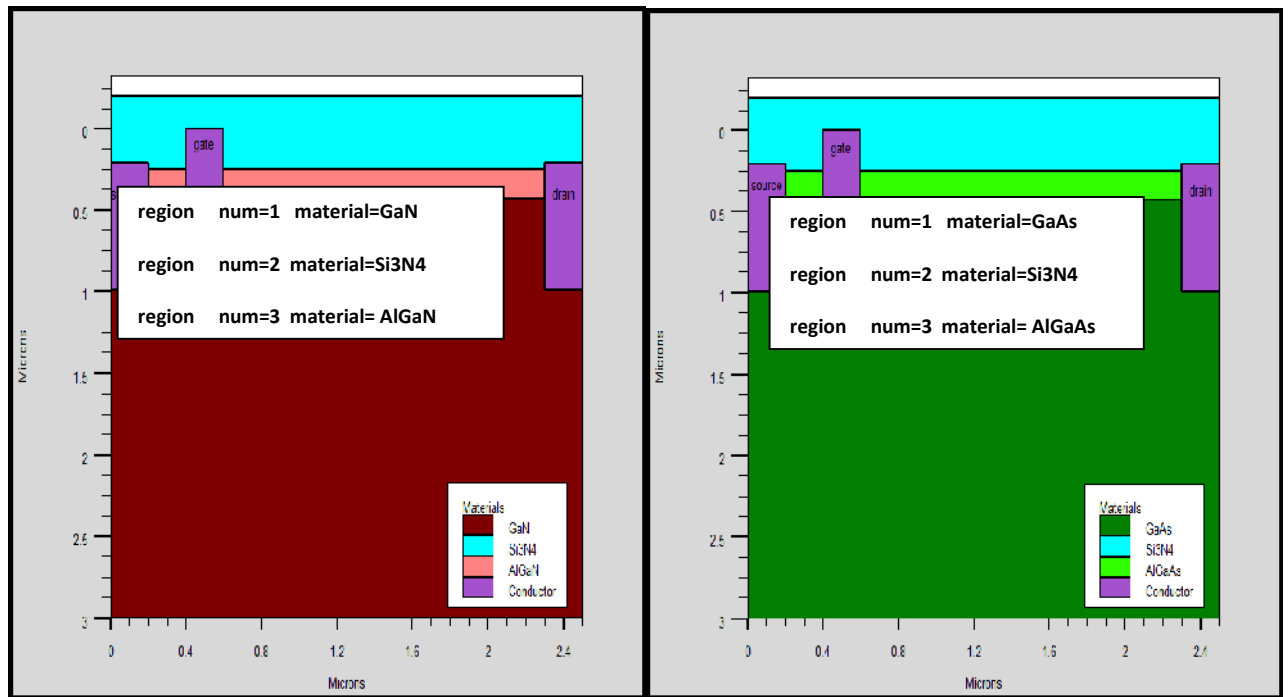


Figure III.5 : Attribution de matériaux pour les régions

III.2.2.4 Doping

La dernière spécification de la structure est le dopage. Le format pour définir le dopage est le suivant :

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

III.2.2.5 Modèles

Les modèles physiques se répartissent en cinq catégories: la mobilité, recombinaison, statistiques des transporteurs, l'ionisation d'impact, et de tunnels. La syntaxe de la commande Model est la suivante:

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

Le choix du modèle dépend des matériaux choisis pour la simulation. L'exemple ci-dessous active plusieurs modèles. **MODELS CONMOB FLDMOB SRH CONMOB** est le modèle de la concentration dépendante. FLDMOB est le modèle de dépendance du champ électrique. SRH est le modèle de Shockley-Read-Hall.

III.2.2.6 Beam

Lorsque l'illumination est importante pour un dispositif (comme dans les cellules solaires), il y'a la possibilité d'utiliser un certain nombre de sources de lumière et d'ajuster leurs localisation, orientation et intensité. Le spectre de la lumière peut être décrit dans tous les détails nécessaires. Polarisation, réflectivité et lancer le tracé de rayons est aussi parmi les caractéristiques du simulateur.

III.2.2.7 Contact

Contact détermine les attributs de l'électrode. La syntaxe de contact est comme suit:
CONTACT NUMBER=<n> |**NAME**=<ename>|**ALL**

Ce qui suit est un exemple de la commande Contact.

CONTACT NAME=anode current

III.2.3 Sélection de la méthode numérique

Après la spécification du modèle des matériaux, le choix de la méthode numérique doit être spécifié. La seule commande qui s'applique pour la sélection de la méthode numérique est **Method**. Il existe plusieurs méthodes numériques pour calculer des solutions aux problèmes des dispositifs à semiconducteur. Trois types de techniques de solution sont utilisés dans le simulateur Silvaco Atlas:

- Découplée (Gummel)
- Entièrement couplé (NEWTON)
- BLOC

La méthode Gummel résout pour chaque inconnue en gardant tous les autres inconnus constants. Le processus est répété jusqu'à ce qu'il y est une solution stable. La méthode de Newton résout toutes les inconnues simultanément. La méthode BLOC résout quelques équations avec la méthode Gummel et les autres avec La méthode NEWTON. Le Procédé Gummel est utilisé pour un système d'équations qui sont faiblement couplées et lorsqu'il ya convergence linéaire. Procédé NEWTON est utilisé lorsque les équations sont fortement couplés avec convergence quadratique. L'exemple suivant montre L'utilisation de la commande Method. **METHOD GUMMEL NEWTON** Dans cet exemple, les équations sont

résolues par la méthode Gummel. Si la convergence ne sera pas atteint, alors les équations doivent être résolu en utilisant la La méthode de Newton.

III.2.4 Spécification des solutions

Après avoir terminé la sélection de la méthode numérique, la prochaine étape est la spécification de solution. La spécification de solution se décompose des commandes suivantes log, solve, load, et save.

III.2.4.1 Log

LOG enregistre toutes les caractéristiques du terminal dans un fichier. Toute donnée de type DC, transitoire, ou AC générée par la commande SOLVE après une commande LOG est enregistrée. La commande suivante montre un exemple de la commande LOG: **LOG OUTFILE=myoutputfile.log** L'exemple enregistre les informations de courant-tension dans le fichier myoutputfile.log.

III.2.4.2 Solve

La commande SOLVE suit l'instruction LOG. SOLVE effectue une Solution pour un ou plusieurs points de polarisation. Ce qui suit est un exemple de la commande SOLVE. **Solveinit** : spécifié la valeur 0 pour l'électrode

III.2.4.3 Load et save

La commande LOAD entre les solutions précédentes à partir de fichiers comme estimation initiale à d'autres points de polarisation. L'instruction SAVE entre toutes les informations d'un point de noeud dans un fichier de sortie. Ce qui suit sont des exemples des instructions LOAD et SAVE. **SAVE OUTF=HEMT.STR** Dans ce cas, les informations sont enregistrées dans le fichier HEMT.STR après une commande SOLVE. Puis, dans une simulation différente, HEMT.STR peut être chargé comme suit:

LOAD INFILE=HEMT.STR

III.2.5 Analyse des résultats

Une fois qu'une solution a été trouvée pour un problème de dispositif semi-conducteur, les informations peuvent être affichées graphiquement avec l'instruction TONYPLOT. En

outre, les paramètres du dispositif peuvent être extraits avec la commande EXTRACT, comme la montre la Figure III.7 Dans l'exemple ci-dessous, l'instruction EXTRACT obtient la caractéristique courant/tension d'un transistor. Ces informations sont enregistrées dans le fichier IVcurve.dat. Ensuite, TonyPlot trace le graphe reliant les informations contenues dans le fichier IVcurve.dat.

III.2.6 Organigramme de simulation

En vue d'intensifier la compréhension, à contribuer à développer davantage de part et d'autre et pour éviter toutes répétitions et confusion inutiles, l'organigramme de la figure III.8 permet de présenter le programme de simulation d'une cellule solaire qui contient des sections principales structurées.

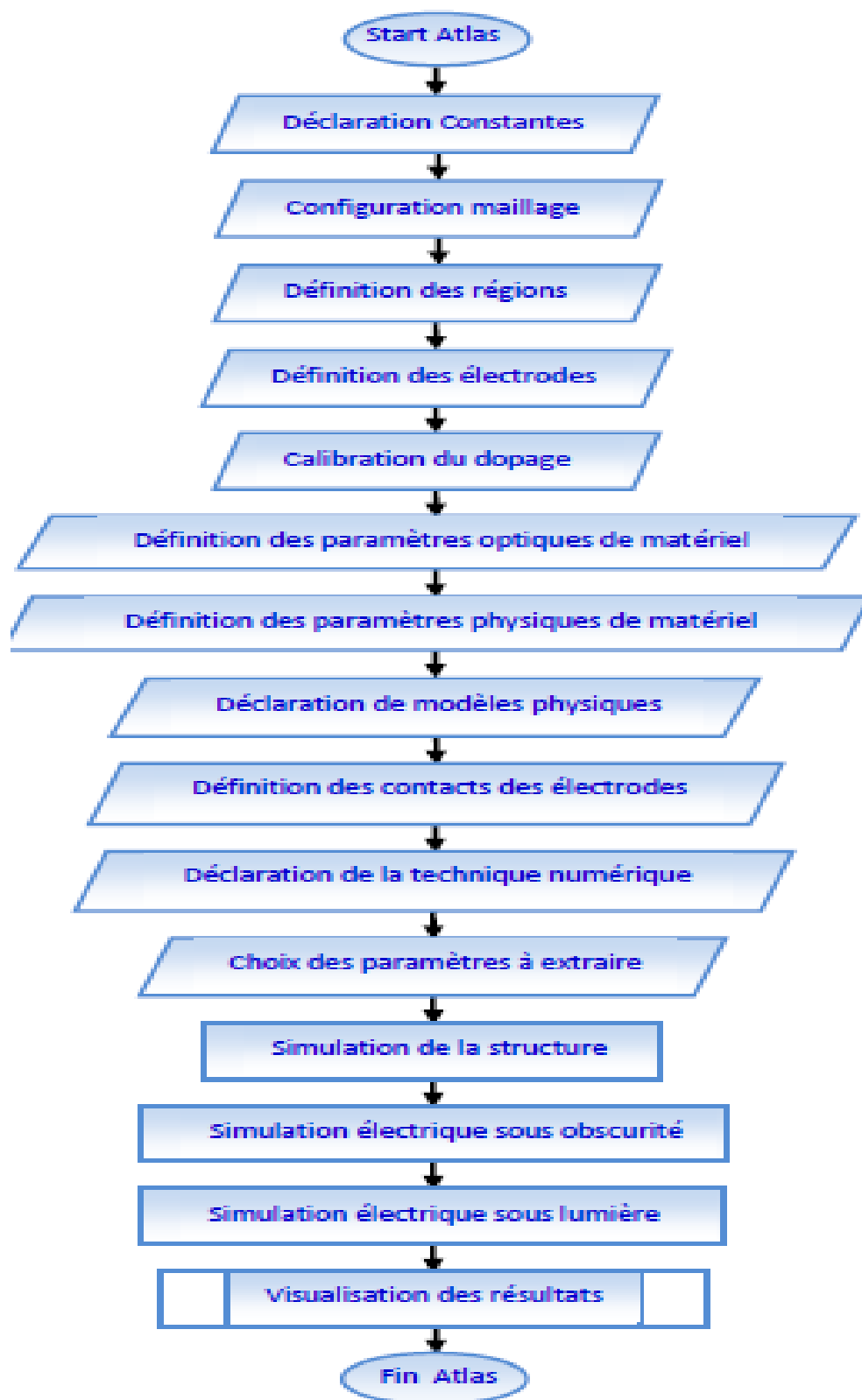


Figure III.6: Organigramme du programme de simulation

III.3 Résultats de simulation et interprétation

Les transistors HEMTs à base des semi-conducteurs III-N constituent une évolution importante dans la technologie hyperfréquence qui n'était destiné que pour des applications militaires (radar, guidage, etc...) et que, de nos jours, a envahit le domaine grand public, et on leur trouve sans cesse de nouvelles utilisations (GPS, etc...).

Dans ce chapitre, nous exposons les résultats de simulation numérique bidimensionnelle des caractéristiques courant-tension de transistor AlGaIn/GaN FP-HEMTs avec différents paramètres technologiques et physiques tels que le dopage du canal, la fraction molaire et longueur du Field-Plate etc... Selon les modèles présentés dans le chapitre II, la simulation de la structure est faite en utilisant logiciel SILVACO.

Nous décrivons l'évolution des caractéristiques électriques, $I_{ds}(V_{ds})$ et de la tension de grille V_{gs} , et la transconductance, tout en étudiant l'influence des différents paramètres physiques et technologiques du HEMT.

III.3.1 Etudes comparatif entre le HEMT à base de GaN et le HEMT à base de GaAs

III.3.1.1 Structure conventionnel étudiée (choix du matériau)

Les transistors à haute mobilité électronique peuvent être fabriqués à partir de plusieurs types de matériaux tels que le nitrure de Gallium, l'arséniure de Gallium et plusieurs d'autres semi-conducteurs, Conséquemment, il est bien connu que certain paramètre technologique influe sur les performances du transistor HEMT et par suite affecte ces caractéristiques de sortie surtout dans le domaine de hautes fréquences. Dans notre cas, nous avons fait une étude comparative entre le GaN-HEMT et le GaAs-HEMT afin de choisir le type de matériau à utiliser. Nous fixons les dimensions de la structure étudiée avec les paramètres technologiques qui sont représentés sur la figure suivante:

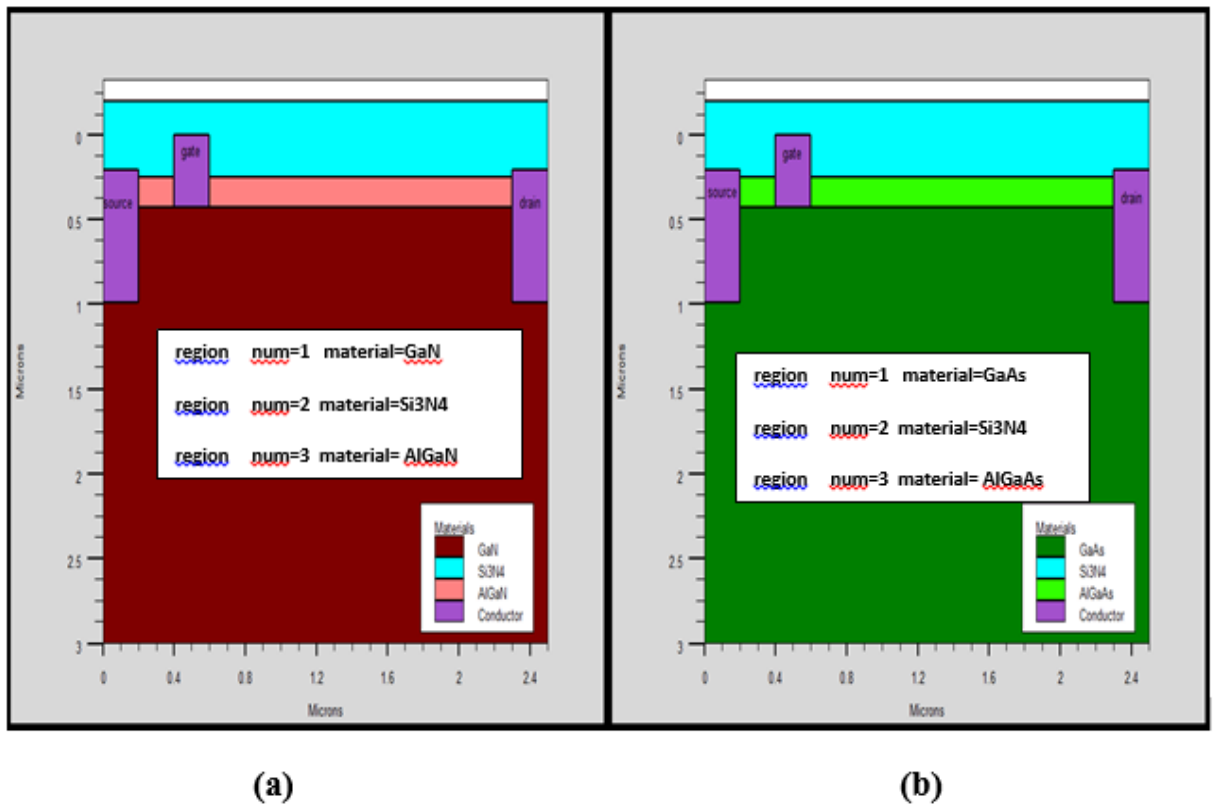


Figure III.7 : a) Structure étudiée à base de GaN, b) à base de GaAs

III.3.1.2 Les caractéristiques électriques du HEMT

Les caractéristiques courant- tension (I_{ds} - V_{ds}) est une figure de mérite principal de tous les composants électroniques d'où nous les ramenant un intérêt majeur afin de les explorer. Il s'agit ici de calculer le courant I_{ds} circulant entre le Drain et la Source lorsque l'on fait croître la tension V_{ds} en maintenant la tension de commande Grille-Source V_{gs} à une valeur constante.

Les caractéristiques de transfert du HEMT (I_{ds} - V_{ds}) sont illustrées par la figure III.8. pour les deux structure GaN-HEMT et le GaAs-HEMT.

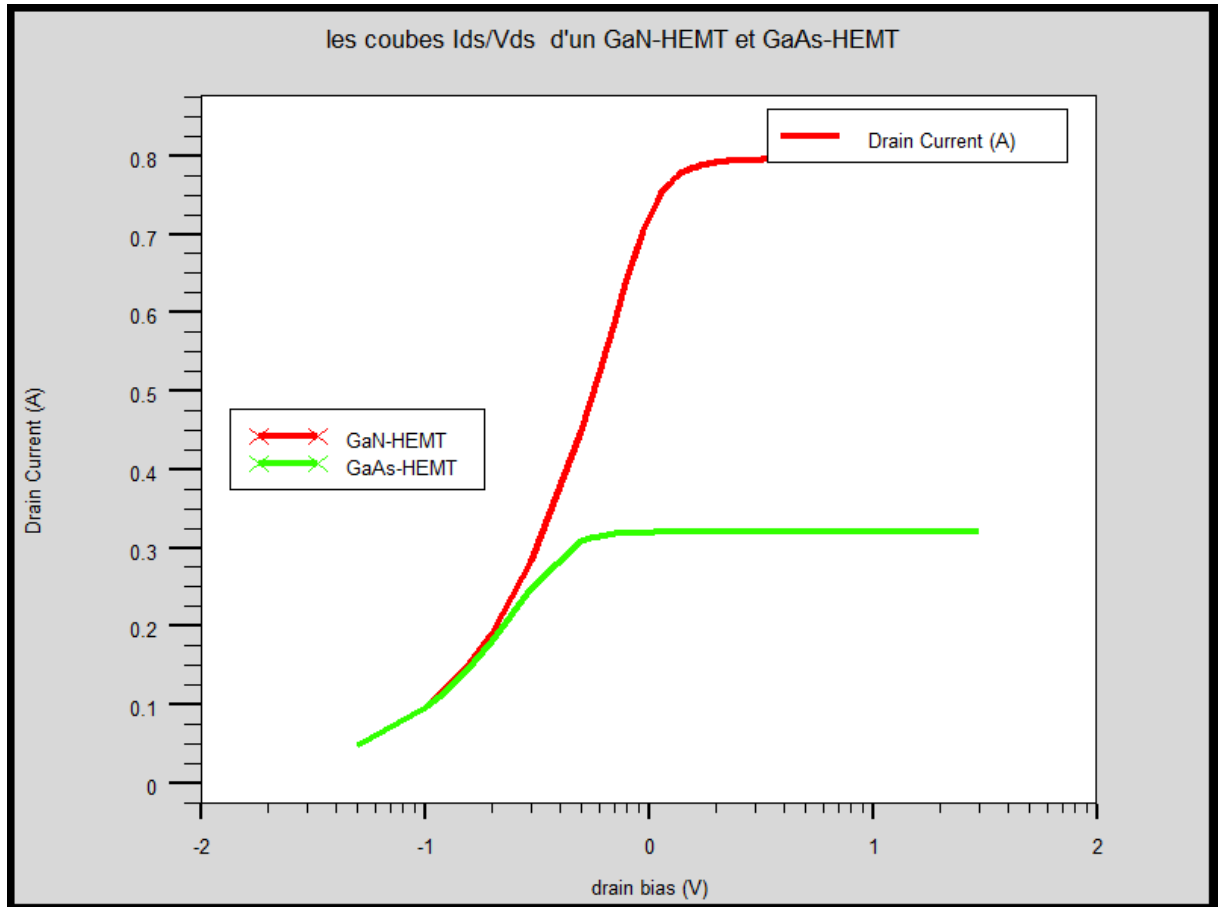


Figure III.8: Les caractéristiques courant - tension de drain (I_{ds} - V_{ds}) pour les deux structure.

Sur ces courbes, deux régimes de fonctionnement sont observés :

- Le régime ohmique: le courant I_{ds} croît de façon linéaire en fonction des tensions V_{ds} et V_{gs} , plus la tension Drain-Source augmente et plus la mobilité des électrons dans le canal augmentent, induisant un accroissement du courant I_{ds} .

- Le régime de saturation: le courant I_{ds} est quasi-constant vis-à-vis de la tension Drain- Source mais croît avec la tension Grille-Source. Au-delà de la tension coude: les électrons du canal atteignent leur vitesse de saturation. En conséquence, le courant I_{ds} atteint un certain niveau de saturation pour une tension de commande donnée.

L'introduction du GaN dans la structure HEMT entraînant une augmentation de la densité d'électrons dans le canal 2DEG et donc une augmentation du courant I_{ds} de l'ordre de 70%.

III.3.2 Etudes comparatif entre le HEMT conventionnel et la technologie Field-Plate HEMT proposée à base de GaN

III.3.2.1 Topologie de structure étudiée (proposée) en utilisant la technologie Field-Plate HEMT

La structure Field-Plate considérée dans ce travail est une extension de grille au-dessus de couche de passivation (Si_3N_4) où le FP est directement connectée à la grille. La figure III.9 représente la structure étudiée d'AlGaIn/GaN HEMT avec FP, où tous les paramètres importants ont été définis. Les régions en dessous de la source et du drain sont dopées de manière uniforme à $N_d^+ = 3.10^{19}\text{m}^{-3}$, tandis que l'électrode de grille est une barrière de Schottky placée sur la couche de AlGaIn. La longueur du Field-Plate (L_{FP}) est définie comme étant la distance entre les bords de la grille et celle du FP avec la condition $L_{FP} < L_{GD}$, l'épaisseur totale de la couche AlGaIn est $0.18\mu\text{m}$ l'épaisseur de substrats GaN est $2.5\mu\text{m}$ et l'épaisseur de Si_3N_4 est $0.6\mu\text{m}$.

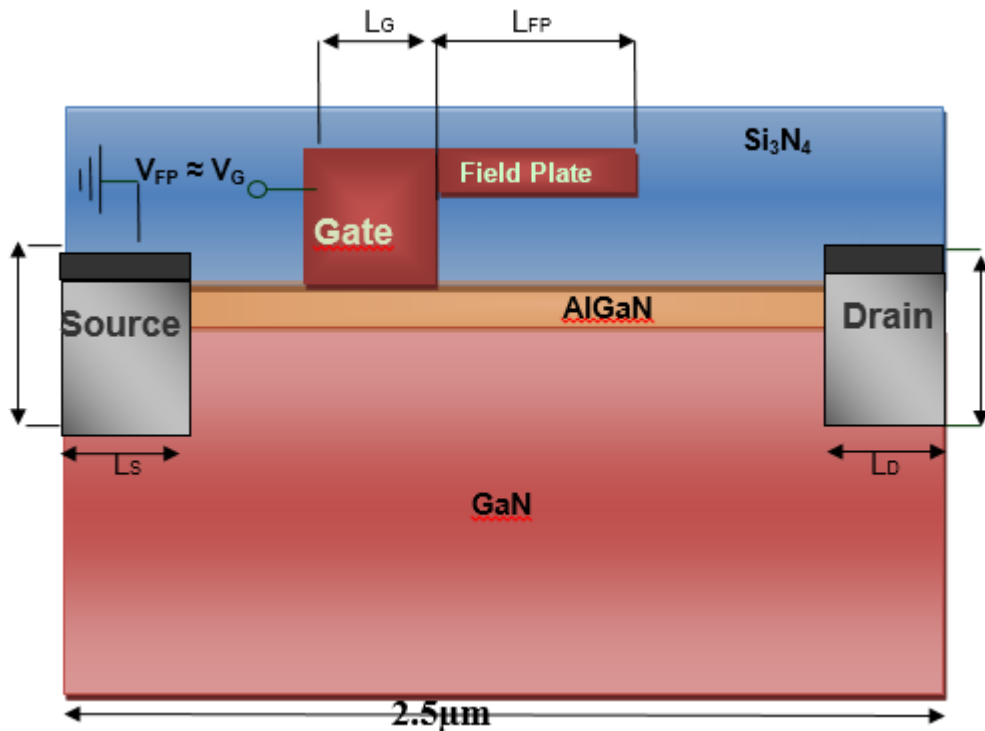


Figure III.9: Structure FP-HEMT étudiée

La figure III.10, représente les caractéristiques de transfert du HEMT (I_{ds} - V_{ds}) pour les deux structure FP-HEMT et le HEMT conventionnel à base d'hétérostructure AlGaIn/GaN .

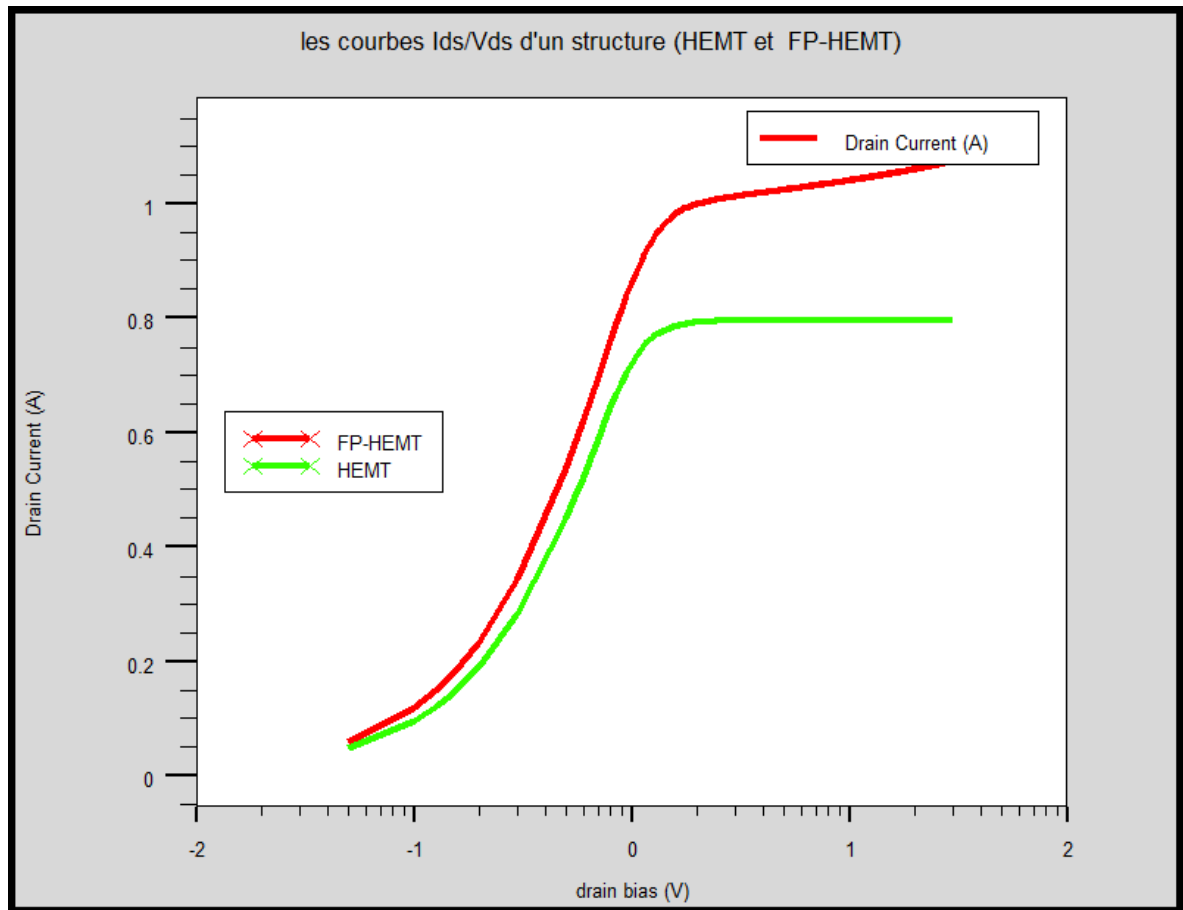


Figure III.10: Les caractéristiques courant - tension de drain (I_{ds} - V_{ds}) pour les deux structures.

En raison des impacts de la couche diélectrique (forte permittivité, $\epsilon=7$) et de la structure FP, le courant a été améliorée. Cette observation peut être expliquée par l'effet important de la structure FP qui permet le contrôle du champ électrique et réduit efficacement sa valeur intense dans le canal 2DEG. Ce résultat est dû à la diminution du courant de fuite de la grille en appliquant un diélectrique high-k. Kumar et al montre que la réduction du champ électrique à proximité des bornes de drain conduit ainsi à la réduction de l'effet du canal-court (SCE) supprimées, ce qui améliore l'efficacité du transport dans le transistor et par conséquents une amélioration des caractéristiques (I_{ds} - V_{ds}) .

III.3.2.2 L'effet de la variation de la largeur de Field-Plate de la structure AlGaIn/GaN FP-HEMT

L'effet de la variation de la largeur de Field-Plate de la structure étudiée, sur les caractéristiques (I_{ds} - V_{ds}) du transistor AlGaIn/GaN FP-HEMT est représenté sur la figure III.11.

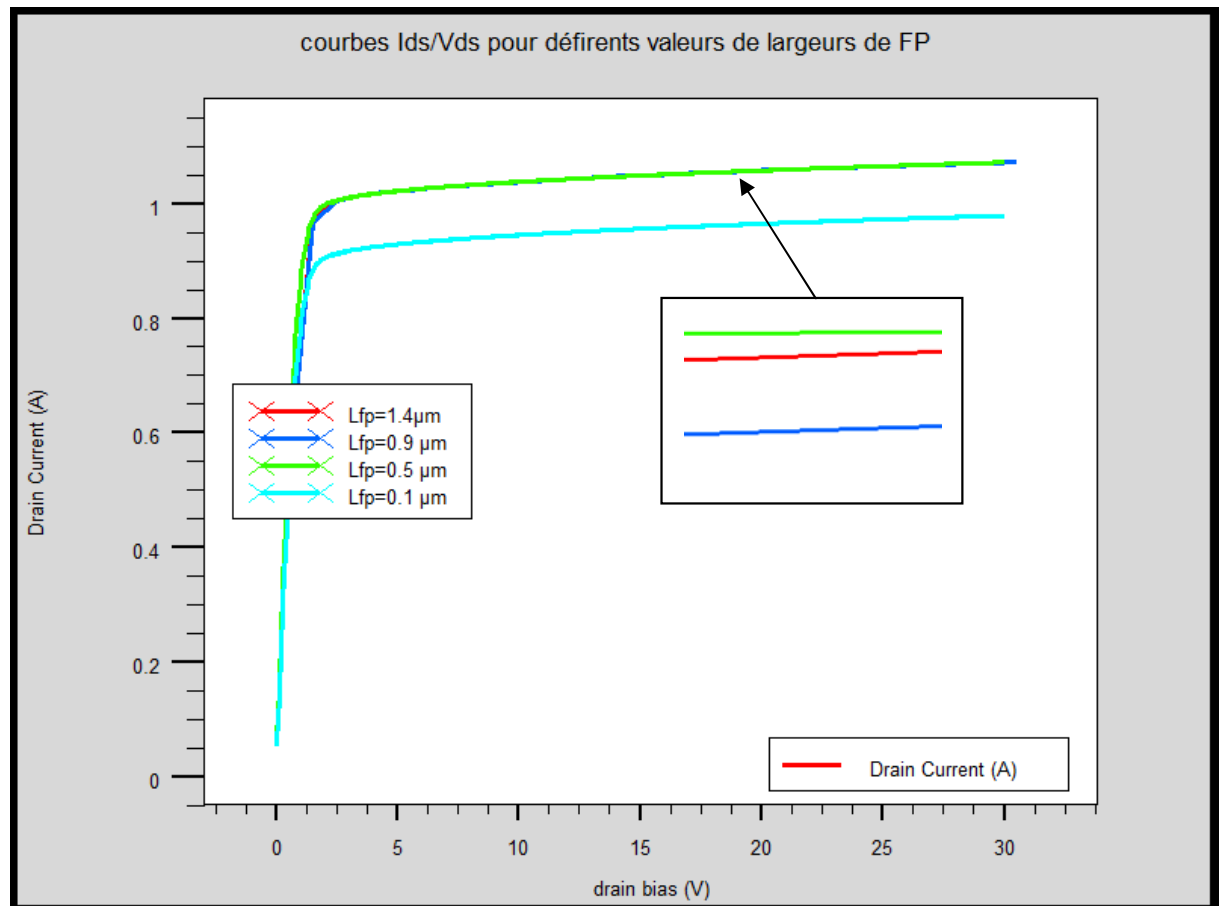


Figure III.11: Les caractéristiques courant - tension en fonction de variation de largeur de field plate.

A partir de cet figure on peut observer que l'augmentation de la longueur de Field-Plate engendre une amélioration dans les caractéristique I_{ds} - V_{ds} (augmentation du courant Drain-Source) par conséquent pour des longueur plus élevée de Field-Plate (1.4 μm) provoque la diminution du courant Drain-source on peut noter qu'il y a une valeur optimale de L_{fp} égale 0.5 μm .

III.3.2.3 L'effet de la variation de l'épaisseur de la couche donneuse de la structure AlGaN/GaN FP-HEMT

L'effet de la variation de l'épaisseur de la couches donneuse de la structure étudiée, sur les caractéristiques (I_{ds} - V_{ds}) du transistor AlGaN/GaN FP-HEMT est représenté sur la figure III.12.

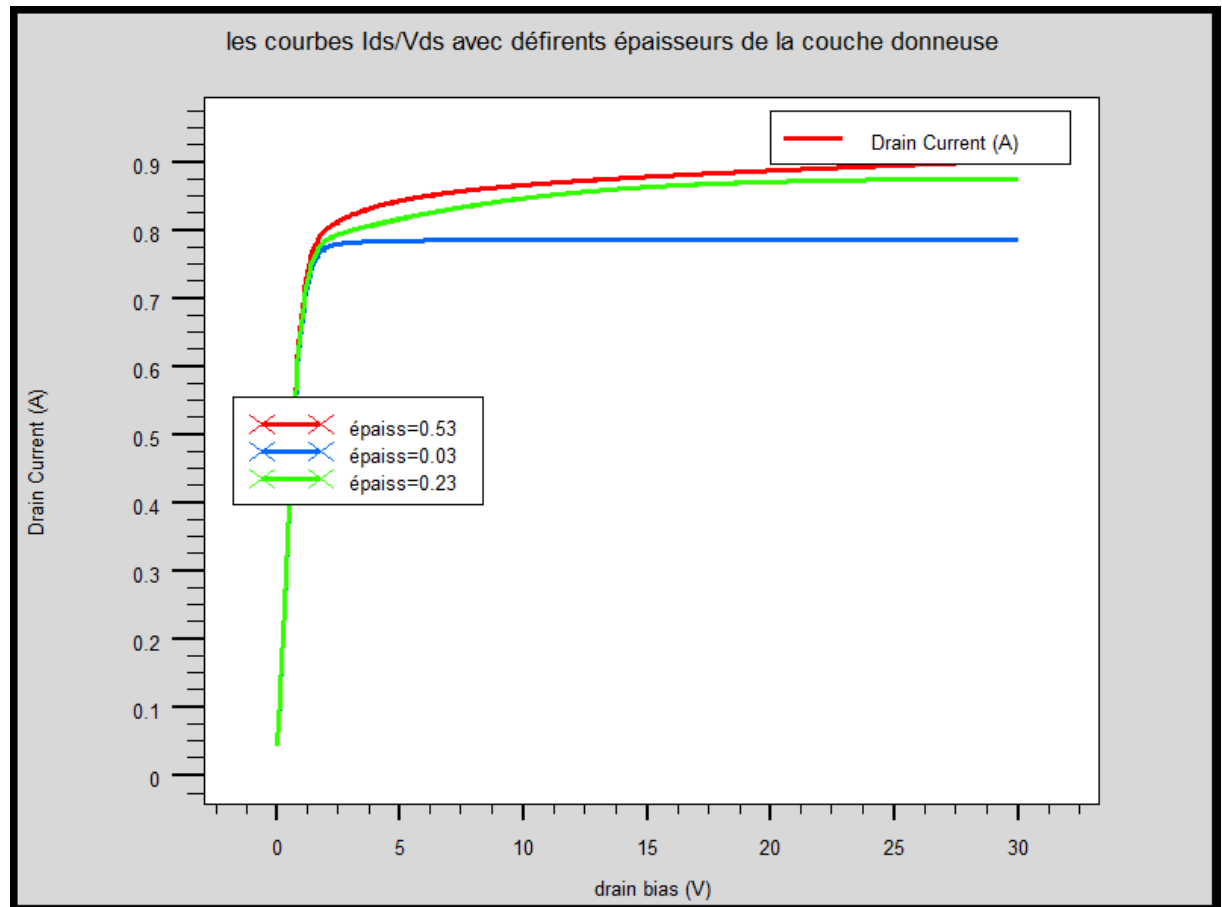


Figure III.12: L'effet de variation de l'épaisseur de la couche donneuse sur la caractéristique (I_{ds} - V_{ds}) du transistor AlGaN/GaN Field-Plate HEMT.

Nous pouvons observer que le courant Drain-Source augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche donneuse AlGaAN, à cause de la disponibilité d'un plus grand nombre d'électrons libres qui se confinent dans le puits de potentiel et forment le gaz bidimensionnel d'électrons (2DEG) dans le canal et par conséquent une amélioration des performances du dispositif. Les meilleurs résultats sont effectués avec une épaisseur de 0,53 μm de la couche donneuse.

III.3.2.4 L'effet de la variation du taux d'aluminium de la couche donneuse de la structure AlGa_N/Ga_N FP-HEMT

Les caractéristique $I_{ds}(V_{ds})$ sont représentées sur la figure III.13 à différentes fractions molaires d'Aluminium de la couche donneuse AlGa_N. Dans ce cas, nous fixons les paramètres de notre transistor AlGa_N/Ga_N HEMT tels que la couche tampon Ga_N non intentionnellement dopée, l'épaisseur de la couche donneuse AlGa_N est de $0.03\mu\text{m}$ et son dopage est de 3.10^{19} atomes/ cm^{-3} . Puis nous faisons varier le taux d'aluminium de 0.25 à 0.4, pour tension $V_{gs} = 0$

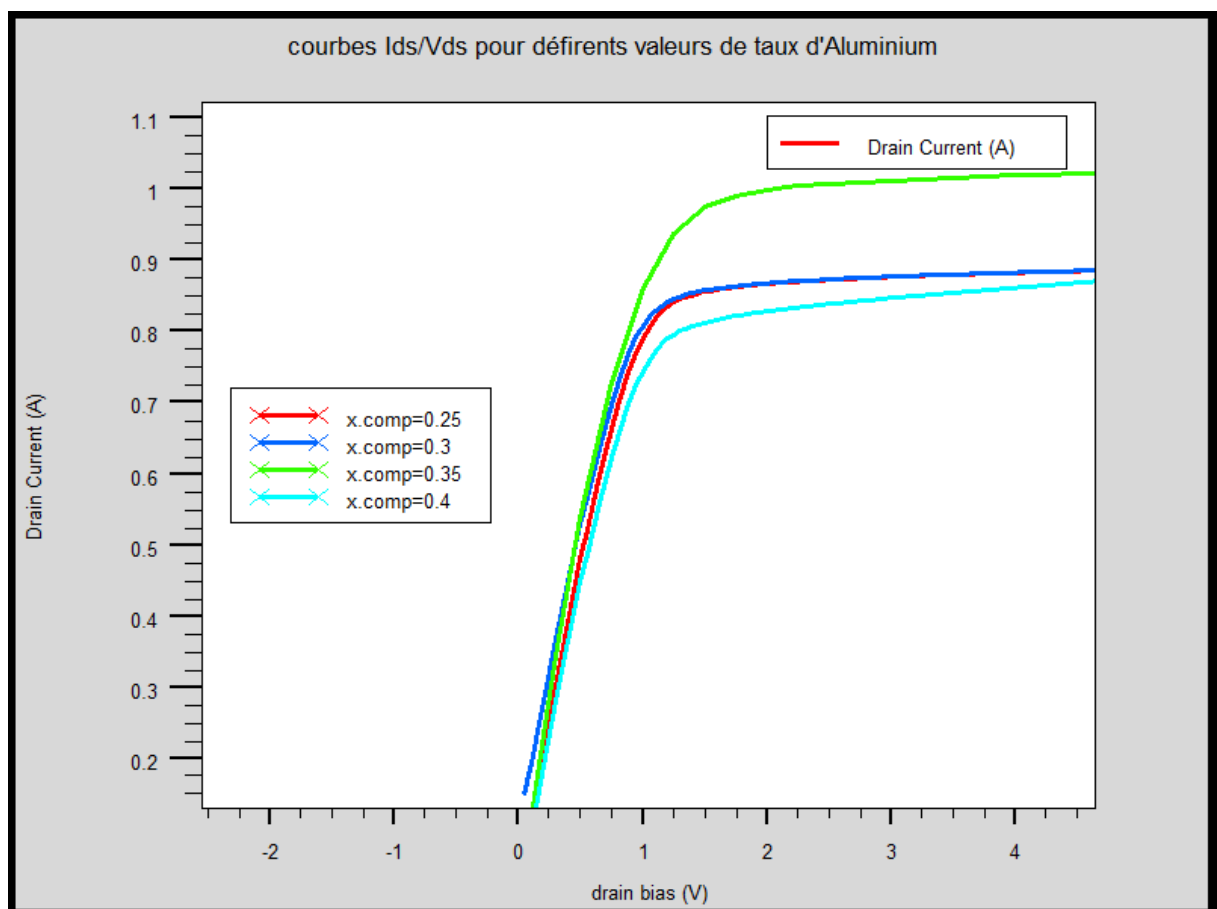


Figure III.13: L'effet de variation du taux d'Aluminium sur la caractéristique ($I_{ds} - V_{ds}$) du transistor AlGa_N/Ga_N FP-HEMT.

A partir de cette figure, on peut voir que le courant diminue pour une forte augmentation de la fraction molaire ($m=0.4$) d'Aluminium de la couche donneuse. Cet effet est dû au désaccord de maille entre AlGa_N et Ga_N avec forte discontinuité de la bande de conduction, pour cette raison la valeur optimale de la fraction molaire est de l'ordre de 35% pour laquelle le courant est maximum.

III.3.2.5 L'effet de l'ajout d'une couche cap-layer sur la caractéristique (I_{ds} - V_{ds}) du transistor FP-HEMT

L'effet de l'ajout d'une couche cap layer sur la caractéristique (I_{ds} - V_{ds}) du transistor AlGaIn/GaN HEMT est représenté sur la figure III.14.

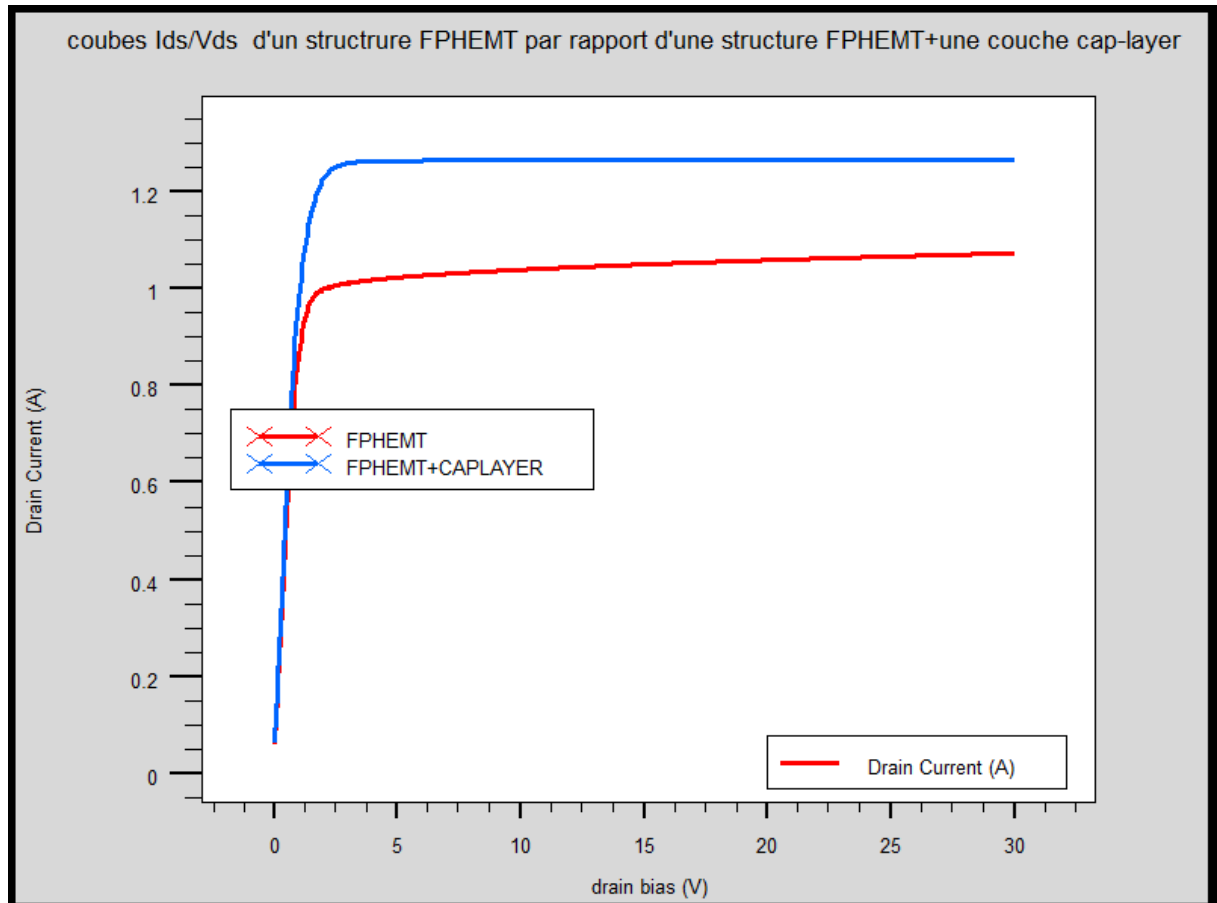


Figure III.14: L'effet d'ajout d'une cap layer sur la caractéristique (I_{ds} - V_{ds}) du transistor FP-HEMT.

L'ajout d'autre couches dans la structure AlGaIn/GaN FP-HEMT, influent sur la fonction I_{ds} - V_{ds} , mais le plus important c'est d'ajouter une couche cap-layer entre la couche donneuse et la grille, s'exprime dans la figure par une augmentation de 1.05 A à 1.25 A.

III.3.2.6 L'effet de la variation de l'épaisseur de cap-layer de la structure AlGaIn/GaN FP-HEMT

L'effet de variation de l'épaisseur de cap-layer sur la caractéristique (I_{ds} - V_{ds}) du transistor AlGaIn/GaN HEMT est représenté sur la figure ci-dessous.

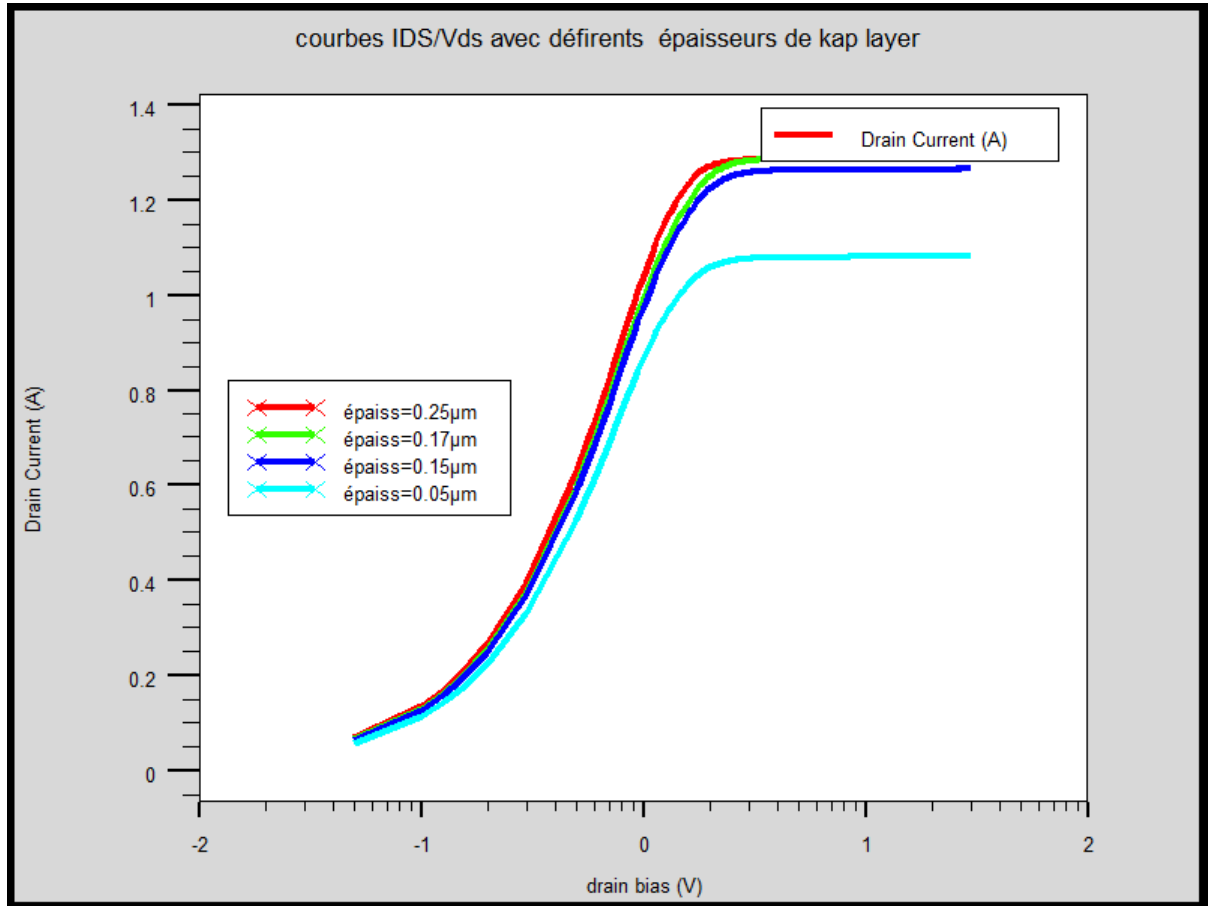


Figure III.15: L'effet de variation de l'épaisseur de cap-layer sur la caractéristique (I_{ds} - V_{ds}) du transistor FP-HEMT.

A partir de cette figure, on peut noter que le courant drain-source augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de cap-layer à cause de la barrière de Schottky (barrière) qui réduit le courant de fuite à travers la grille, donc il redresse le passage des électrons de la source vers le drain par conséquent l'augmentation du courant.

III.3.2.7 Variation du travail de sortie de la grille sur la caractéristique (I_{ds} - V_{ds}) du transistor FP-HEMT GaN

L'effet de variation du travail de sortie de la grille sur la caractéristique (I_{ds} - V_{ds}) du transistor AlGaIn/GaN HEMT est représenté sur la figure ci-dessous.

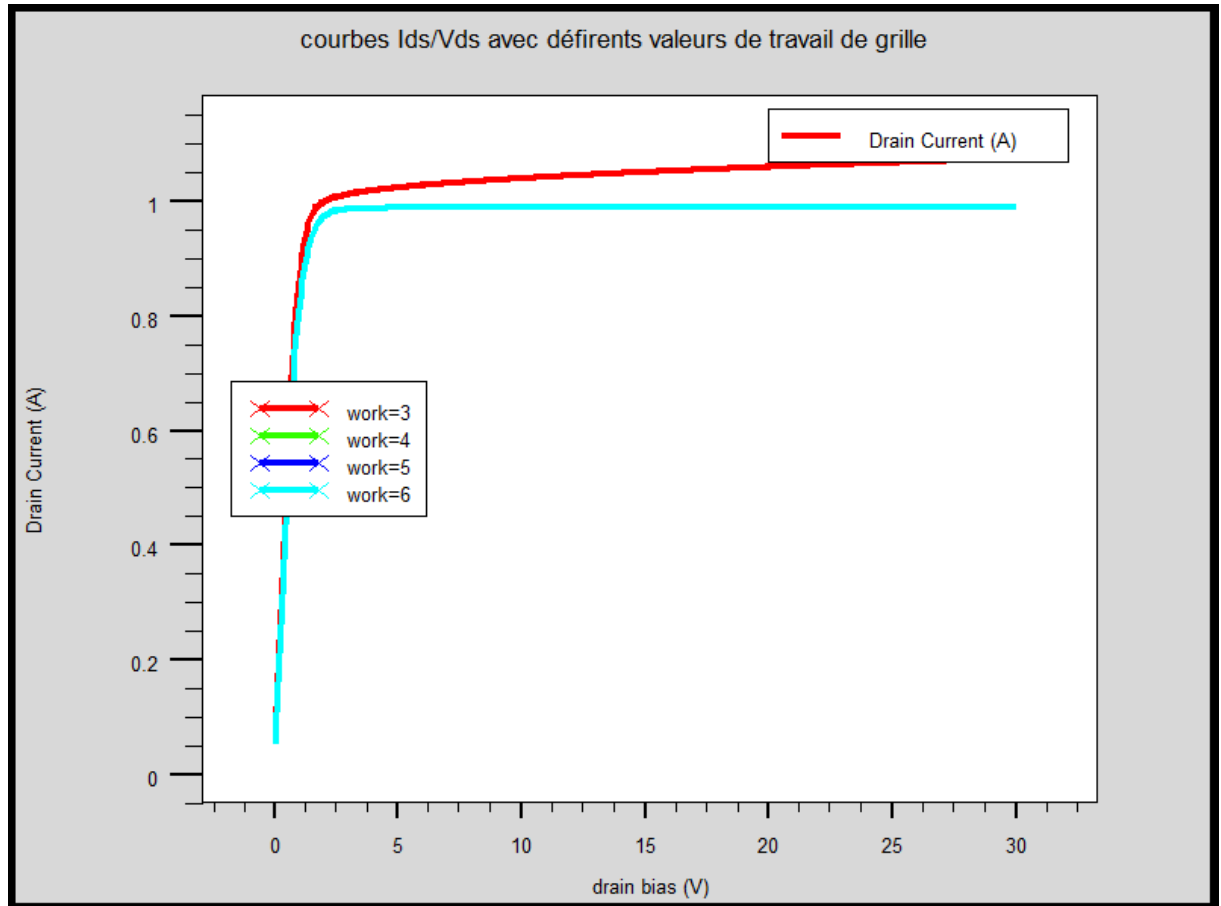


Figure III.16: Variation du travail de Grille sur la caractéristique (I_{ds} - V_{ds}) de transistor FP-HEMT.

A partir de cette figure, le courant Drain-Source diminue avec l'augmentation du travail de sortie de la grille. Pour un travail de sortie entre 3 et 4, on a pratiquement le même courant. Puis il diminue pour des travaux de sortie plus élevés (5 et 6). Cela est dû à l'augmentation des dislocations du réseau cristallin, suite au désaccord de maille. Afin d'obtenir un meilleur résultat (I_{ds}/V_{ds}) la valeur optimale du travail de la grille est de l'ordre de 3 jusqu'à 4.

III.3.2.8 L'effet de variation du dopage de la couche donneuse AlGaIn sur la caractéristique (I_{ds} - V_{ds}) du transistor FP-HEMT

La figure III.15 montre la variation du profil du courant le long du canal 2DEG pour différentes valeurs de la concentration (N_D) du dopage de la couche donneuse AlGaIn.

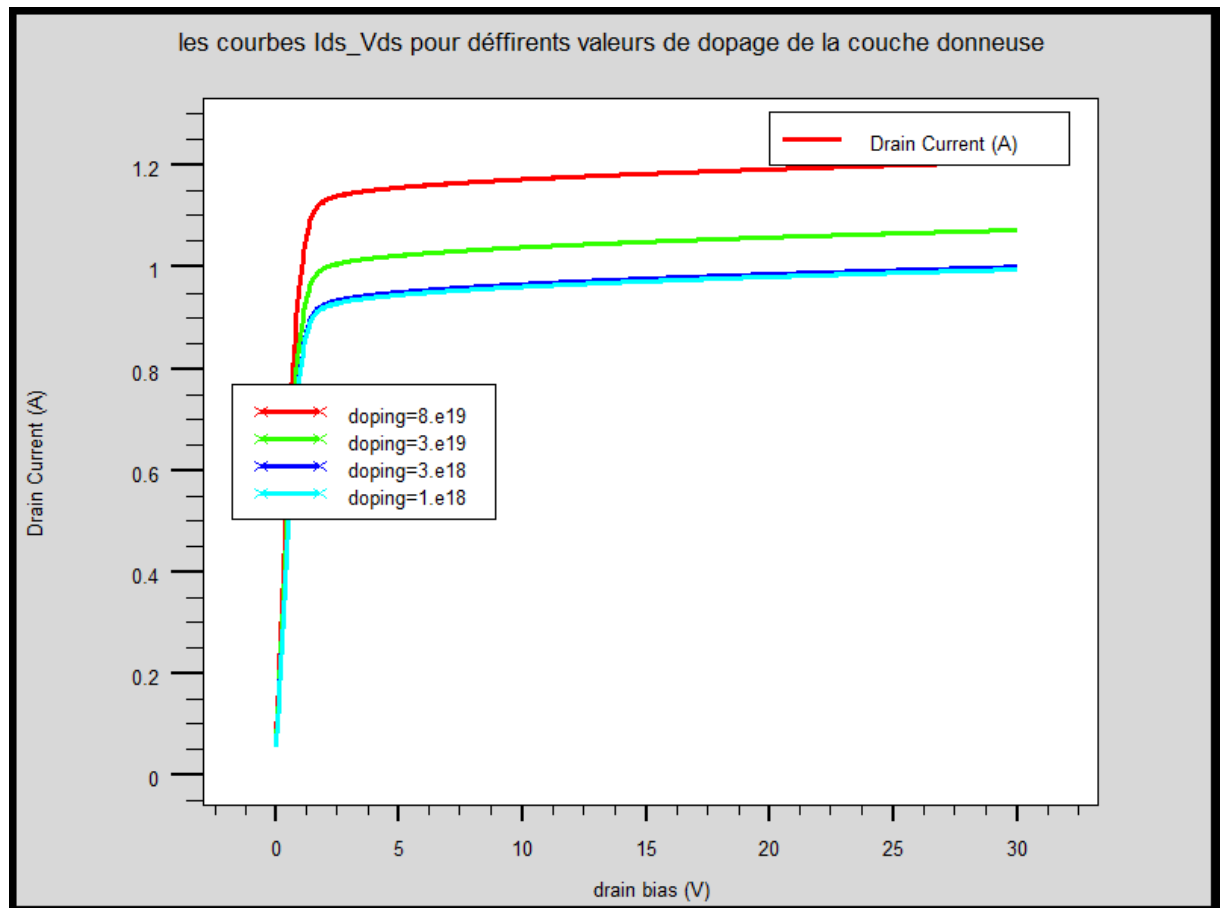


Figure III.17: L'effet de variation du dopage de la couche donneuse AlGaIn sur la caractéristique (I_{ds} - V_{ds}).

On observe que la densité du courant augmente avec l'augmentation de la concentration de dopage (N_D) de la couche donneuse AlGaIn. La densité du gaz bidimensionnel d'électrons augmente à cause de la disponibilité d'un plus grand nombre d'électrons libres qui se confinent dans le puits de potentiel et forment le gaz bidimensionnel d'électrons (2DEG).

III.3.2.9 L'effet de variation de l'épaisseur de Si₃N₄ sur la caractéristique (I_{ds} - V_{ds}) du transistor FP-HEMT

La figure III.18 montre l'influence de variation de l'épaisseur de Si₃N₄ sur la caractéristique (I_{ds} - V_{ds}) du transistor FP-HEMT

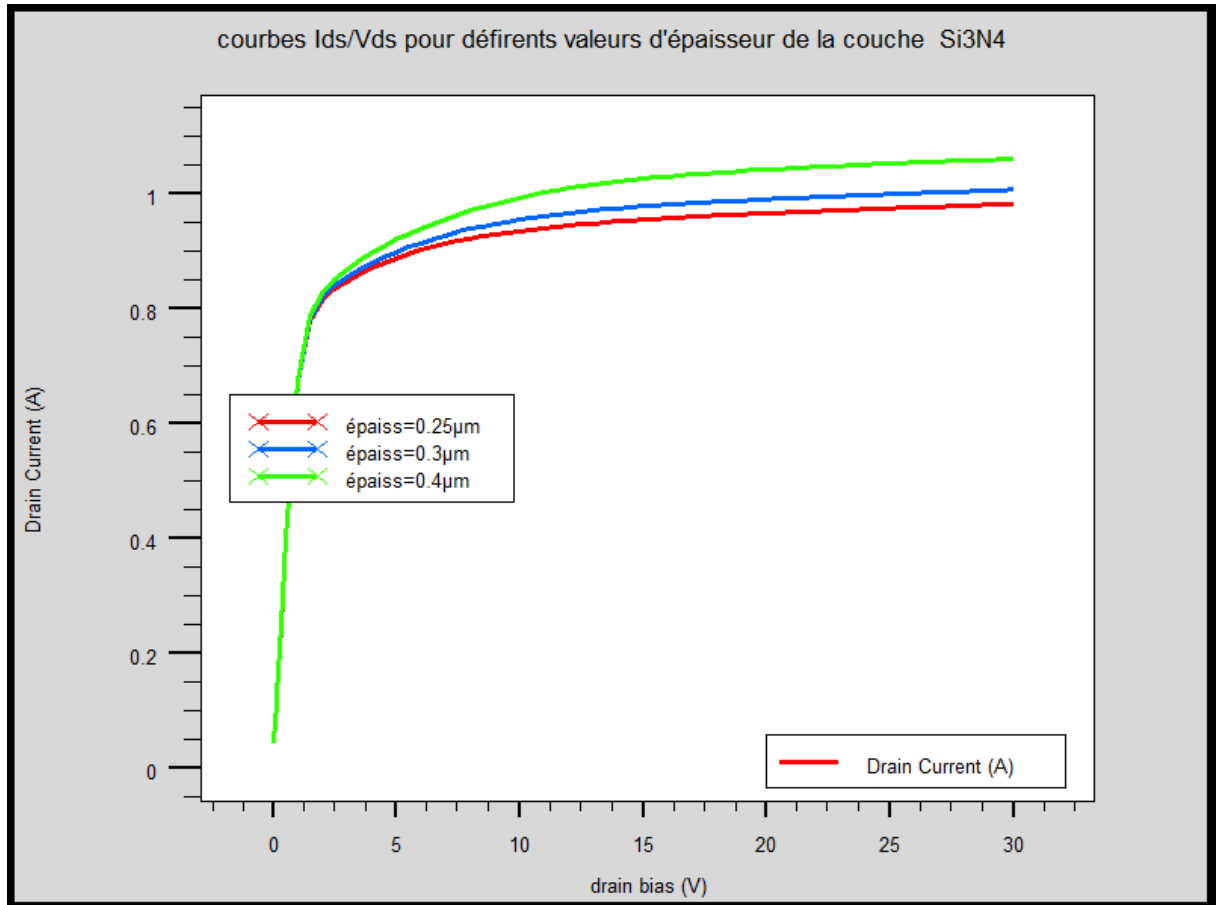


Figure III.18: L'effet de variation de l'épaisseur Si₃N₄ sur la caractéristique (I_{ds} - V_{ds}) du transistor FP-HEMT.

Il est évident que les épaisseurs de la couche diélectrique ont également une influence importante sur la caractéristique (I_{ds} - V_{ds}), Une grande épaisseur de Si₃N₄ donne de meilleurs résultats. C'est à dire l'augmentation de l'épaisseur de la couche diélectrique provoque l'augmentation du courant drain/source

Ces comportements améliorent la fiabilité du dispositif lorsqu'il fonctionne sous haute tension

III .4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons simulé le transistor AlGa_N/Ga_N FP-HEMT qui représente une nouvelle conception de dispositif HEMTs, est basée sur l'utilisation d'une plaque de champ (Field-Plate) combinée avec un matériau diélectrique, après la présentation du logiciel SILVACO nous avons modélisé cette structure d'une façon de trouver les meilleurs caractéristiques électriques, afin d'obtenir les valeurs optimales de la structure Field-Plate HEMT à base de l'hétérostructure AlGa_N/Ga_N.

Conclusion générale

Conclusion Générale

Dans ce travail on a contribué à l'étude de la technologie FP-HEMT à base de l'hétérostructure AlGaN/GaN, côté structurale et propriétés électriques utilisant le logiciel de simulation SILVACO-ATLAS

Le premier chapitre concerne l'étude des différentes propriétés de semi-conducteur Nitrure de Gallium (GaN) tels que les propriétés électriques, électronique, structurales, mécaniques et thermiques. Ce matériau présente des très importantes caractéristiques (large gap direct qui est de 3.4 eV, sa grande conductivité thermique (1.7 W/cmK) et son champ de claquage élevé (3.5×10^5 V/cm). De plus l'effet de la polarisation spontanée et piézoélectrique existant toutes les deux au sein du GaN s'ajoute à ses qualités.

Ces dernières assurent le nitrure de Gallium comme un candidat idéal pour les applications de fortes puissances en hyperfréquence.

Nous avons donné dans le deuxième chapitre une généralité sur les transistors à effet de champ (Field effect transistor) tels que le JFET, MOSFET et MESFET, après nous avons étudié le transistor HEMT (High-electron-mobility transistor) à base de l'hétéro-structure AlGaN/GaN, Nous avons montré les différentes couches constituant ce transistor puis le principe de fonctionnement du HEMT AlGaN/GaN et ces caractéristiques.

Dans le troisième chapitre, nous avons étudié dans un premier volet, les caractéristiques électriques des AlGaN/GaN HEMT conventionnelles sans Field plate et dans un deuxième volet des structures FP-HEMT en variant plusieurs paramètres physiques et technologiques.

Les résultats obtenus dans ce travail à l'aide du logiciel SILVACO, montrent bien que le FP a une forte influence sur les performances du transistor à effet de champ HEMT à base de GaN. Nous avons pu montrer que le Field-Plate qui représente une métallisation au-dessus de la couche de passivation, permet d'améliorer les propriétés électriques, augmentant ainsi la tension de polarisation pour des applications haute fréquence, par conséquent une amélioration des performances des HEMTs à structure conventionnelle.

Ce travail ouvre sur plusieurs perspectives d'études complémentaires de caractérisations de la technologie FP-HEMT à base de matériaux III-V.



Bibliographie

- [1] Ludovic Lacheze, « étude et simulation physique des effets parasites dans les HEMTs ALGaN/CaN » thèse doctorat université de bordeaux 2009
- [2] B. Benbakhti, « Analyses physique et thermique de transistors a effet de champ de lafilère GaN optimisation de structures pour l'amplification de puissance hyperfréquence » Thèse de doctorat Université de Lille 2006 .
- [3] thi dak ha nguyen, « réalisation et caractérisation de hemts algan/gan sur silicium pour applications à haute tension » thèse de doctorat universite paris sud 2013 .
- [4] samira Bouzide, « Réalisation et caractérisation de transistors HEMTs GaN pour des application dans le domaine Milimetrique » Thèse de doctorat Université de Lille 2013 .
- [5] Annaig Denis, « Elaboration cristallogénèse et caractérisations physico-chimiques des nitrures des éléments de la colonne IIIa et en particulier de GaN » thèse de Doctorat, Université de Bordeaux 2003.
- [1] Kaddeche Mourad , « Modélisation et Analyse de l'effet du field plate avec couche diélectrique HIGH-K sur propriétés électriques » Thèse de Doctorat Université de Costantine 2014.
- [7] Adil Mahmood MALIK, « Technology and Physics of Gate Recessed GaN/AlGaN FETs, thèse M.Sc » Université de Stuttgart 2003.
- [8] Ali DJAFOUR, « Les_proprietes_des_semi-conducteurs_SiGe-SiC-GaN-GaAs » mémoire master université de Mouloud Mammeri Tizi ousou.
- [9] Stéphanie RENNESSON, « Développement de nouvelles hétérostructures HEMTs à base de nitrure de gallium pour des applications de puissance en gamme d'ondes millimétriques » thèse doctorat universite de nice-sophia antipolis – ufr 2013.
- [10] Mme ABDELAZIZ FARES Zakia, « Caracterisation électrique des HEMTs A BASE DE Nitrure de galium AlGaN/GaN » Thème master université mentouri de Constantine 2005 .
- [11] Audrey Philippon Martin « Étude d'une nouvelle filière de composants sur technologie nitrure de gallium. Conception et réalisation d'amplificateurs distribués de puissance large bande à cellules cascades en montage FLIIP--CHIIP et technologie MMIIC ». Thèse doctorat université de Limoges 2007

[12] BOUTITA LAKHDAR « Modélisation des effets de la contrainte en surface et étude des effets thermiques dans les composants à base GaN » thème de Magister Université Mentouri de Constantine 2008

[13] belarbi abdelmalik, « transistor DHFET à base d'InGaN simulation et optimisation de ses performances dc et rf par le logiciel silvaco » thème magister Université Abou-Bakr Belkaïd-Tlemcen 2014 .

[14] Henry Mathieu Hervé, « Fanet Physique des semiconducteurs et des composants électroniques » 6eme édition .

[15] Fabrice Sincère , « Le transistor JFET Junction Field Effect Transistor version» 1.1.0

[16] Polytech'Nice Sophia , « Transistors a effet de champ » c. PETER – V 3.0 .

[17] Guiza Douadi, « Analyse des transistors à effet de champ MESFET GaAs » thèse de Magister, université de Mentouri Costantine 2009 .

[18] Kaddeche Mourad , « Etude des effets du field plate sur les caractéristiques électriques des transistors HEMTs à base de GaN » thème de magistère, Université de Costantine 2008.

[19] M. ALSHAIKH-EID, « Etude par simulation des propriétés électriques des Transistor HEMTs à base D'AlGaIn/GaN» mémoire de Magister, Université Mentouri Constantine 2006.

[20] D. Delagebeaudeuf, P. Delescluse, P Etienne, M. Laviron, J. Chaplart, T. Linh Nuyen, «Two dimensional electron gas MESFET structure », Electronics Letters, vol. 16, n°17, pp 66 7-668, 1980 .

[21] T. Mimura et al, « A new field effect transistor with selectively doped GaAs/n AlGaAs heterojunction » .

[22] Melle Abdelmoumene Mestaria, « Etude et modélisation d'un transistor HEMT AlGaIn/GaN » thèse de Magister, Université de Abou-Bakr Belkaid, Tlemcen 2012.

[23] :Melle Ikram El Makoudi, « etude et fabrication de transistors a enrichissement de la filiere InAlAs/InGaAs pour applications millimetriques faible bruit » doctorat de livre par l'universite de lille 2010 .

[24] S. Augaudy, « Caractérisation et modélisation des transistors micro-ondes, application à l'étude de la linéarité des amplificateurs à fort rendement » université de Limoges, 2002.

[25] P. Chevalier , « Transistors à effet de champ à hétéro jonction sur matériaux III-V pour application hyperfréquence » Ecole polytechnique universitaire de Lille, 1999.

[26] T. Gasseling , « Caractérisation non linéaire avancée de transistors de puissance pour la validation de leur modèle CAO » , thèse doctorat, Université de Limoges 2003.

[27] Djimli Chahrazed Etude par simulation des phénomènes de polarisations et les contacts ohmiques dans les transistors HEMTS base de GaN » Diplôme de Magister Université de Constantine 2005

[28] F. HUIN, « Etude des formes d'ondes permettant une optimisation des performances des amplificateurs de puissance. Application à la conception d'amplificateurs, à faible tension de polarisation, pour les communications mobiles» , Thèse de Doctorat, Université DE LIMOGES, 2001 .

[29] R. J. Trew, L. Yueying, L. Bilbro, WeiweiKuang, R. Vetury, and J. B. Shealy ,«Nonlinear source resistance in high-voltage microwave AlGa_N/Ga_N HFETs» Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on, vol. 54, pp. 2061-2067, 2006.

[30] Sana Firoz1, R.K. Chauhan2, « Comparision of algan/gan and algaas/gaas based hemt device under doping consideration » Department of Electronics and Communication Engineering M.M.M. Engineering College may 2011.

[31] : MADANI Hassan , « Caractérisation de l'effet d'irradiation sur les transistors LDD MOSFET par les méthodes basées sur le pompage de charge », mémoire de magister , université de Boumerdas 2013 .

[32] www.silvaco.com

[33] KAGHOUCHE Bessem , « Etude par tcad-silvaco d'une structure mos pour la réalisation de capteurs ISFET : paramètres technologiques et électriques », diplôme de magister Université de Constantine 2010 .

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

[35] MECHGOUG Amina, « Simulation d'un transistor AlGa_N/InGa_N/Ga_N a effet de champ (HEMT) », Mémoire Master soutenue en 2014 Université Med Khider Biskra .

Annexe

Programme de simulation

go atlas

SECTION 1: Mesh input

mesh

x.mesh loc=0.0 spac=0.2
x.mesh loc=0.4 spac=0.2
x.mesh loc=0.9 spac=0.07
x.mesh loc=1.6 spac=0.07
x.mesh loc=2.1 spac=0.2
x.mesh loc=2.5 spac=0.2

y.mesh loc=-0.2 spac=0.01
y.mesh loc=0.0 spac=0.01
y.mesh loc=0.55 spac=0.001
y.mesh loc=0.58 spac=0.001
y.mesh loc=3 spac=0.05

SECTION 2: Structure Specification

region num=1 material=GaN y.min=0.4
region num=2 material=nitride y.max=0.4 x.composition=3 grad.3=0.02
region num=3 material= AlGaN x.min=0.0 x.max=2.5 y.min=0.25 y.max=0.43

elec num=1 name=source x.min=0.0 x.max=0.2 y.min=0.2 y.max=1.0
elec num=3 name=drain x.min=2.3 x.max=2.5 y.min=0.2 y.max=1.0
elec num=2 name=gate x.min=0.4 x.max=0.6 y.min=0.0 y.max=0.43

doping uniform y.max=0.4 n.type conc=3.e19
doping uniform y.min=0.4 n.type conc=3.e19
doping uniform x.min=0.0 x.max=2.5 y.min=0.25 y.max=0.43 n.type conc=3.e19

SECTION 3: Material Models

model bgn fldmob srh
#contact name=gate workfun=4.87

SECTION 4: Initial solution

solve init
save outf=hemt_0.str

SECTION 5: Bias gate

method gummel newton trap itlimit=20 maxtrap=6
output con.band val.band e.mobility h.mobility
solve vgate=0.0 vstep=-0.2 name=gate vfinal=-0.6

SECTION 6: Drain ramp

log outf=hemt.log master
solve vdrain=0.05
solve vdrain=0.10
solve vdrain=0.125
solve vdrain=0.15
solve vdrain=0.20
solve vdrain=0.30

method newton trap itlim=20 maxtrap=6
solve vdrain=0.50 vstep=0.05 name=drain vfinal=30.0

go atlas

#

SECTION 1: Mesh input

#

mesh

x.mesh loc=0.0 spac=0.2

x.mesh loc=0.4 spac=0.2

x.mesh loc=0.9 spac=0.07

x.mesh loc=1.6 spac=0.07

x.mesh loc=2.1 spac=0.2

x.mesh loc=2.5 spac=0.2

y.mesh loc=-0.2 spac=0.01

y.mesh loc=0.0 spac=0.01

y.mesh loc=0.55 spac=0.001

y.mesh loc=0.58 spac=0.001

y.mesh loc=3 spac=0.05

#

SECTION 2: Structure Specification

#

region num=1 material=GaN y.min=0.4

region num=2 material=nitride y.max=0.4 x.composition=3 grad.3=0.02

region num=3 material= AlGaN x.min=0.0 x.max=2.5 y.min=0.25 y.max=0.43

#

elec num=1 name=source x.min=0.0 x.max=0.2 y.min=0.2 y.max=1.0

elec num=3 name=drain x.min=2.3 x.max=2.5 y.min=0.2 y.max=1.0

elec num=2 name=gate x.min=0.4 x.max=0.6 y.min=0.0 y.max=0.43

elec num=2 name=gate0 x.min=0.6 x.max=0.7 y.min=0.0 y.max=0.09

#

doping uniform y.max=0.4 n.type conc=3.e19

doping uniform y.min=0.4 n.type conc=3.e19

doping uniform x.min=0.0 x.max=2.5 y.min=0.25 y.max=0.43 n.type conc=3.e19

#SECTION 3: Material Models

model bgn fldmob srh

contact name=gate workfun=4.87

contact name=field plate common=gate short

SECTION 4: Initial solution

solve init

save outf=fphemt_0.str

SECTION 5: Bias gate

method gummel newton trap itlimit=20 maxtrap=6

output con.band val.band e.mobility h.mobility

solve vgate=0.0 vstep=-0.2 name=gate vfinal=-0.6

#SECTION 6: Drain ramp

log outf=fphemt.log master

solve vdrain=0.05

solve vdrain=0.10

solve vdrain=0.125

solve vdrain=0.15

solve vdrain=0.20

solve vdrain=0.30

#

method newton trap itlim=20 maxtrap=6

solve vdrain=0.50 vstep=0.05 name=drain vfinal=30.0

tonyplot -overlay hemt.log fphemt.log -set hemt.set

tonyplot hemt_0.str fphemt_0.str -set hemt_0.set