

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



## MEMOIRE

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

**En** : Télécommunications

**Spécialité** : Systèmes et Télécommunications

**Par**: BOUCHENAFHA Halima Nadjat

BOUAYED Nor El Houda

### Thème

## Etude et Simulation du Transistor HEMT AlGaN/GaN/BGaN

Soutenu publiquement, le 26 / 09 / 2020, devant le jury composé de :

Mme. BELHADEF Yamina	MCA	Univ. Tlemcen	Présidente
Mlle. DJELTI HAMIDA	MCB	Univ. Tlemcen	Directrice de mémoire
Mme. BENOSMAN Hayat	MCB	Univ. Tlemcen	Examinatrice

## Remerciements

Nous tenons particulièrement à remercier ALLAH le tout puissant, ce mémoire n'aurait jamais été réalisé sans sa bénédiction.

Nous adressons nos remerciements à notre encadreur Melle **Djelti Hamida**, Maître de Conférences au Département de Télécommunication de la Faculté de Technologie de l'Université de Tlemcen, pour son aide consistante, ses conseils judicieux, pour ses remarques objectives et pour son encadrement afin de mener à bien ce modeste travail.

Nous exprimons notre profonde gratitude à Mme **Belhadef Yamina** Maître de Conférences au Département de Télécommunication de la Faculté de Technologie de l'Université de Tlemcen, pour l'intérêt qu'il a accordé à ce travail en acceptant de le juger et de présider le jury.

Nous sommes très honorées de la présence dans ce jury de mémoire de Mme **Benosman Hayat**, Maître de Conférences au Département de Télécommunication de la Faculté de Technologie de l'Université de Tlemcen, qu'elle trouve ici le témoignage de nos sincères remerciements pour avoir accepté de juger et d'évaluer ce travail.

Nous profitons de cette opportunité pour exprimer notre gratitude à tous les enseignants qui ont contribué par leur collaboration, disponibilité et sympathie, à notre formation.

# *Dédicaces*

## *Je dédie ce travail*

*Tout d'abord, Dieu merci qui m'a aidée à réaliser ce modeste travail*

*A mes chers parents ma mère et mon père*

*Pour leur patience, leur amour, leur soutien et leur*

*Encouragements*

*A mes frères : Abdeslam, Diden, Mohamed*

*A mon binôme Houda*

*A Tous Mes Collègues et Mes Amies*

*Et Mes Proches : Aicha, Kawter\**

*A tous ceux que j'aime.*

*Dédicaces*  
*Je dédie ce travail*

*A Mon adorable mère pour ses sacrifices, ses soutiens et ses*

*Encouragements : Merci maman*

*Mon cher père pour leur générosité et ses sacrifices*

*A mon fiancé Mohamed pour son soutien et ses encouragements*

*A mes sœurs : Nadjat, Imy*

*A mon frère unique : Feth Allah*

*A toute la famille Bouayed*

*A mon binôme Nadjat*

*A Tous mes proches, mes amies et camarades de promotion*

*A tous ceux que j'aime*

## Résumé

Les HEMTs AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> sont très prometteurs pour les applications haute puissance et haute fréquence grâce à leur gaz bi-dimensionnel d'électrons (2DEG) de forte densité ( $>10^{13}\text{cm}^{-2}$ ) et de haute mobilité ( $\sim 1500\text{ cm}^2/\text{Vs}$ ) ainsi qu'à leur champ de claquage très élevé ( $\geq 3\text{MV/cm}$ ). Pour ces applications, les HEMT Ga<sub>N</sub> concurrencent avantageusement les technologies bipolaires et BiCMOS basées sur SiGe, les LDMOS Si et SiC, ainsi que les PHEMT GaAs. Ce projet de fin d'études porte sur l'étude et la simulation des performances statiques du transistor AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>/BGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMT sur substrat Silicium.

Dans ce cadre, un modèle physico-électrique issu d'un modèle de dérive-diffusion est basé sur la méthode des éléments finis sera développé pour le transistor HEMT boré à base de nitrure de gallium. Ce modèle décrit les mécanismes impliqués dans le transport des porteurs tout en prenant en compte les spécificités des HEMTs et des matériaux nitrurés (telles que les phénomènes de polarisation spontanée et piézoélectrique). Ainsi, il permet l'amélioration de l'isolation de la couche tampon et du confinement des porteurs dans le puits du transistor HEMT Ga<sub>N</sub> boré. Aussi, ce modèle sera exploité pour examiner l'influence de certains paramètres technologiques sur le comportement statique du transistor HEMT tels que l'épaisseur de la couche tampon (BGa<sub>N</sub>) et la hauteur des couches barrière/canal (AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>).

**Mots clés:** HEMT, Ga<sub>N</sub>, AlGa<sub>N</sub>, BGa<sub>N</sub>, Silvaco, Eléments finis.

## Abstract

AlGaN / GaN HEMTs are very promising for high power and high frequency applications thanks to their two-dimensional electron gas (2DEG) with high density ( $> 10^{13}\text{cm}^{-2}$ ) and high mobility ( $\sim 1500 \text{ cm}^2 / \text{Vs}$ ) as well as their very high breakdown field ( $\geq 3\text{MV} / \text{cm}$ ). For these applications, HEMT GaN advantageously compete with bipolar and BiCMOS technologies based on SiGe, LDMOS Si and SiC, as well as PHEMT GaAs.

This end of study project concerns the study and simulation of the static performances of the AlGaN / GaN / B GaN / GaN HEMT transistor on Silicon substrate. In this context, a physico-electric model derived from a drift-diffusion model is based on the finite element method will be developed for the borated HEMT transistor based on gallium nitride.

This model describes the mechanisms involved in the transport of carriers while taking into account the specificities of HEMTs and nitrided materials (such as the phenomena of spontaneous and piezoelectric polarization). Thus, it improves the isolation of the buffer layer and the confinement of the carriers in the well of the HEMT GaN borated transistor.

Also, this model will be used to examine the influence of certain technological parameters on the static behavior of the HEMT transistor such as the thickness of the buffer layer (B GaN) and the height of the barrier / channel layers (AlGaN / GaN).

**Keywords:** HEMT, GaN, AlGaN, B GaN, Silvaco, Finite elements.

## ملخص

تعد AlGaIn / GaN HEMTs واعدة للغاية للتطبيقات ذات الطاقة العالية والترددات العالية بفضل غاز الإلكترون ثنائي الأبعاد (2DEG) وبكثافة عالية ( $>10^{13}$  سم<sup>-2</sup>) وحركة عالية ( $\sim 1500$  سم<sup>2</sup>/Vs) أيضًا مما كانت عليه في مجال الانهيار العالي ( $\geq 3\text{MV}/\text{سم}$ ).

بالنسبة لهذه التطبيقات، تتنافس HEMT GaN بشكل مفيد مع تقنيات ثنائية القطب و BiCMOS القائمة على SiGe و Si و LD MOS Si، بالإضافة إلى PHEMT GaAs.

يتعلق هذا المشروع في نهاية الدراسة بدراسة ومحاكاة الأداء الثابت للترانزستور AlGaIn / GaN / B GaN / GaN HEMT على ركيزة السيليكون.

في هذا السياق، يقوم نموذج فيزيائي كهربائي يعتمد على نموذج نشر الانجراف على طريقة العناصر المحدودة التي سيتم تطويرها لترانزستور HEMT مدفوع على أساس تبريد الغايوم.

يصف هذا النموذج الآليات المتضمنة في نقل الموجات الحاملة مع مراعاة خصائص HEMTs والمواد النيتريدية (مثل ظاهرة الاستقطاب العفوي والكهروضغطية).

وبالتالي، فإنه يحسن عزل الطبقة العازلة وحبس الناقلت في بئر الترانزستور HEMT GaN المنبعث

أيضًا، سيتم استخدام هذا النموذج لفحص تأثير بعض المعلمات التكنولوجية على السلوك الثابت لترانزستور HEMT مثل سمك الطبقة العازلة (B GaN) وارتفاع طبقات الحاجز / القناة. (AlGaIn / GaN)

**الكلمات الرئيسية:** HEMT، GaN، AlGaIn، B GaN، Silvaco، العناصر المحدودة.

# Table des matières

Remerciements .....	I
<i>Dédicaces</i> .....	III
Résumé .....	IV
Abstract.....	V
ملخص.....	VI
Liste des tableaux.....	IX
Liste des figures.....	X
Introduction générale.....	1
<b>Chapitre I: Contexte général sur la filière High Electron Mobility Transistor (HEMT)</b>	
I.1 Introduction.....	4
I.2 Architecture des transistors de puissance .....	4
I.2.1 Transistor HEMT .....	4
I.2.1.1 Principe de fonctionnement .....	5
I.2.1.2 Structure technologique du HEMT conventionnelle .....	5
I.2.1.3 Structure du HEMT sur substrat GaAs.....	6
I.2.1.4 Principe de fonctionnement .....	6
I.2.2 Transistor HEMT Pseudo morphique.....	8
I.2.3 HEMT adapté en maille AlInAs/GaInAs sur InP .....	8
I.2.4 HEMT AlInAs/GaInAs métamorphique sur GaAs.....	9
I.2.5 Comparaison entre le HEMT et le PHEMT .....	10
I.3 Applications du HEMT en hyperfréquence .....	11
I.4 Transistor MOS-PHEMT .....	12
I.5 Filières technologiques .....	14
I.5.1 Silicium et matériaux III-V .....	14
I.5.2 Matériaux ternaires InAlAs/InGaAs .....	17
I.5.2.1 Propriétés cristallines .....	17
I.5.2.2 Bande d'énergie .....	18
I.5.2.3 Propriétés de transport de l'InGaAs.....	18
I.6 Paramètres statiques.....	20
I.6.1 La transconductance gm .....	20
I.6.2 La conductance de sortie gd .....	20
I.6.3 Tension de seuil $V_{th}$ et tension de pincement $V_P$ .....	20
I.7 Paramètres dynamiques .....	21
I.7.1 Mesure des paramètres S .....	21
I.7.2 Le gain en courant de court-circuit.....	21
I.7.3 Le gain maximum disponible ou MAG (Maximum Available Gain).....	21
I.7.4 Gain unilatéral U ou gain de Masson.....	22
I.8 Etat de l'art des filières HEMT et HBT.....	22
I.9 Conclusion .....	25
<b>Chapitre II : Modèle physico- électrique du transistor HEMT</b>	
II.1 Introduction.....	27
II.2 Le Nitrure de Gallium matériau approprié a un HEMT.....	27
II.2.2 Propriété électronique du GaN .....	27
II.2.2 Propriétés structurales .....	28

II.2.2.1	Structure de type Wurtzite .....	28
II.2.2.2	Structure de type zinc blende .....	29
II.3	Alliages $Al_xGa_{1-x}N$ et $B_xGa_{1-x}N$ .....	30
II.4	Substrats utilisés pour la croissance de nitrure de gallium .....	30
II.4.1	Le silicium(Si) .....	31
II.4.2	Le <b>Saphir <math>Al_2O_3</math></b> .....	31
II.4.3	La courbure de silicium (SiC) .....	31
II.5	Effets de polarisations dans le GaN .....	32
II.5.1	Polarisation dans les HEMTs AlGaN/GaN .....	32
II.5.2	Polarisation spontanée .....	32
II.5.3	Effets piézoélectriques.....	33
II.5.4	Les différents types d'interface .....	34
II.5.5	La polarisation résultante .....	35
II.6	Modèle physico-électrique du HEMT AlGaN/GaN .....	36
II.6.1	Modèle de transport de porteurs de charges .....	36
II.6.2	Génération et Transfert de la chaleur.....	38
II.7	Résolution numérique par la méthode des éléments finis.....	40
II.7.1	Paramètres d'entrée du modèle numérique .....	40
II.8	Configuration de la densité de charges qui constitue le 2DEG .....	40
II.9	Conclusion .....	42
<b>Chapitre III : Résultats et Interprétations</b>		
III.1	Introduction.....	44
III.2	Description des modules de simulateur SILVACO .....	44
III.2.1	Les outils de simulation ATLAS .....	44
III.3	Topologie de la structure étudiée .....	46
III.3.1	Maillage.....	47
III.3.2	Diagramme de bandes d'énergie .....	48
III.4	Résultats et discussions .....	49
III.4.1	Caractéristiques de sortie Ids-Vds .....	49
III.4.2	Caractéristiques de transfert Ids-Vgs .....	50
III.4.3	Effet d'auto-échauffement sur le comportement DC du HEMT AlGaN/GaN/BGaN	52
III.4.4	Effet des paramètres technologiques sur les caractéristiques du HEMT en GaN	54
III.4.4.1	Effet de la longueur de la grille .....	54
III.4.4.2	Effet de la longueur de la couche barrière (AlGaN) .....	54
III.4.4.3	Impact du matériau de substrat.....	55
III.4.5	Distribution des grandeurs électriques dans le HEMT AlGaN/GaN/BGaN .....	56
III.4.5.1	Carte du potentiel.....	56
III.4.5.2	Carte de la densité du courant .....	57
III.4.5.3	Carte de la température de réseau .....	58
III.4.6	Caractéristiques hyperfréquences du HEMT AlGaN/GaN/BGaN Fréquence de transition.....	60
III.5	Conclusion .....	61
Conclusion générale .....		62
Références Bibliographiques .....		63

## Liste des tableaux

<i>Tableau I- 1: Les principales réalisations en technologie HEMT. ....</i>	<i>12</i>
<i>Tableau I- 2: Les principaux composés III–V, <math>E_g</math> est l'énergie de la bande interdite, <math>m^*/m_0</math> est la masse effective, <math>\lambda_g</math> est la longueur d'onde et <math>a_0</math> est le paramètre cristallin. ....</i>	<i>15</i>
<i>Tableau I- 3[5,6] : Principales caractéristiques physiques, électriques et thermiques du silicium et des semi-conducteurs composés .....</i>	<i>16</i>
<i>Tableau I- 4: Comparaison des propriétés des alliages III-V à 300 K [21]. ....</i>	<i>19</i>
<i>Tableau II- 1: Propriétés électroniques et thermiques concernant plusieurs semi-conducteurs connus [42]. ....</i>	<i>28</i>
<i>Tableau II- 2: Paramètres de la structure wurtzite idéale et réelle de GaN [44] .....</i>	<i>28</i>
<i>Tableau II- 3: Caractéristiques cristallographiques des substrats utilisés pour la croissance. .</i>	<i>31</i>
<i>Tableau III- 1 : propriétés (à 300K) des principaux matériaux utilisés dans la simulation. ....</i>	<i>47</i>

## Liste des figures

Figure I- 1 ;Vue en coupe d'un transistor à haute mobilité électronique (à gauche) et sa schématisation lorsque la grille est polarisée (à droite). .....	5
Figure I- 2: Impact de la polarisation de la grille sur le diagramme de bande [3]. .....	5
Figure I- 3: Structure du HEMT sur GaAs [8]. .....	6
Figure I- 4 : Diagramme de bandes dans l'hétérojonction $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ .....	7
Figure I- 5 : Technologie du PHEMT [8] .....	8
Figure I- 6 : Structure du HEMT $\text{AlInAs}/\text{GaInAs}$ adaptée en maille sur InP [8]. .....	9
<b>Figure I- 7 : Structure du HEMT métamorphique [18].</b> .....	10
Figure I- 8 : Comparaison de la structure de la bande d'énergie de conduction des transistors HEMT et PHEMT [6]. .....	11
Figure I- 9 : Structure d'un transistor $\text{InGaP}/\text{InGaAs}$ MOS-PHEMT.....	13
Figure I- 10 : Structures PHEMT et MOS-PHEMT .....	13
Figure I- 11 : Paramètre de maille et énergie de bande interdite pour divers matériau III-V (des alliages des composés III-V) [15]......	17
Figure I- 12 : Vitesse de dérive en fonction de champ électrique Pour les matériaux non dopés ( $N_d = 0$ ) [20]. .....	19
Figure I- 13 : Evolution de la fréquence de transition des HEMT et du HBT en production industrielle d'après l'ITRS. ....	23
Figure I- 14 : Evolution de la fréquence maximale d'oscillation des HEMT et HBT en production industrielle d'après l'ITRS. ....	23
Figure I- 15 : Evolution du gain des HEMT et HBT en production industrielle d'après .....	24
Figure I- 16 : Evolution du bruit des HEMT et HBT en production industrielle d'après l'ITRS. ..	24
Figure II- 1: Structure würtzite de nitrure de Gallium [45]. .....	29
Figure II- 2 : Structure zinc blende de Nitrure de Gallium.....	30
Figure II- 3: Structure wurtzite [44]. .....	32
Figure II- 4: Valeur expérimentale de NS en fonction de la fraction molaire d'Aluminium pour différentes techniques d'épitaxie des structures HFET $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ [42] .....	34
Figure II- 5 : Représentation des deux polarités différentes d'une structure GaN : .....	35
Figure II- 6 : Bilan des polarisations spontanées et piézoélectriques. a) GaN de type Ga-face, b) GaN de type N-face [1]. .....	35
Figure II- 7 : Polarité des couches de GaN hexagonales. (a)polarité gallium (b) polarité azote [43]......	36
Figure II- 8 :Orientation des polarisations spontanée et piézoélectrique pour les nitrures de polarité gallium suivant la contrainte : (1) la couche A est en tension sur la couche B, (2) la couche A est en compression sur la couche [43]. .....	36
Figure II- 9 : Mécanisme physique de génération de la chaleur. ....	39
Figure III- 1: Schéma synoptique des modules utilisés dans la simulation par SILVACO. ....	45
Figure III- 2 : Menu de commandes de DeckBuild .....	45
Figure III- 3 : Fenêtre de module TonyPlot.....	45
Figure III- 4 : Topologie de la structure HEMT $\text{Al}_{0.26}\text{Ga}_{0.74}\text{N}/\text{GaIn}/\text{BGaN}$ simulée. ....	46
Figure III- 5 : Structure maillée du transistor HEMT $\text{Al}_{0.26}\text{Ga}_{0.74}\text{N}/\text{GaIn}/\text{BGaN}$ .....	47
Figure III- 6 : Diagramme de bandes d'énergie du HEMT $\text{Al}_{0.26}\text{Ga}_{0.74}\text{N}/\text{GaIn}/\text{BGaN}$ à l'équilibre thermodynamique.....	48
Figure III- 7: Caractéristiques de sortie $I_{ds}-V_{ds}$ pour $V_{gs}$ variant de 0 à -5V avec un pas de 1. 49	49

Figure III- 8: Caractéristiques de sortie $I_{ds}$ - $V_{ds}$ pour $V_{gs}$ variant de 0 à -5V avec un pas de 1V associé à la référence [62].	50
Figure III- 9: Caractéristiques de transfert $I_{ds}$ - $V_{gs}$ simulées d'un HEMT	50
Figure III- 10 : Caractéristiques de transfert $I_{ds}$ - $V_{gs}$ d'un HEMT	51
Figure III- 11 : Caractéristiques de sortie thermiques pour $V_{gs}$ variant de 0 à -5V avec un pas de 1.	52
Figure III- 12: Comparaison entre les caractéristiques de transfert thermiques (en rouge) et iso-thermique (en bleue) d'un HEMT $Al_{0.26}Ga_{0.74}N/GaN/BGaN$ .	53
Figure III- 13: Influence de la longueur de grille sur les caractéristiques de sortie $I_{ds}$ - $V_{ds}$	54
Figure III- 14: Influence de l'épaisseur de la couche barrière sur les caractéristiques $I_{ds}$ - $V_{ds}$	55
Figure III- 15: Influence du substrat (a) 4H-SiC, (b) Saphir et (c) Silicium sur les caractéristiques de sortie $I_{ds}$ - $V_{ds}$ pour $V_{gs} = 0$ et -1 V.	56
Figure III- 16: Carte 2D de potentiel de réseau pour une tension appliquée de 15 V	57
Figure III- 17 : Carte 2D de la densité du courant pour $V_{ds} = 15$ V.	58
Figure III- 18: Carte 2D de la mobilité des électrons pour $V_{ds} = 15$ V.	58
Figure III- 19: Carte 2D de la température de réseau pour $V_{ds} = 15$ V.	59
Figure III- 20: Carte 2D de la température de réseau pour $V_{ds} = 15$ V.	59
Figure III- 21 : Evolution de la température du réseau dans le composant pour $V_{gs} = 0$ et -2 V.	60
Figure III- 22: La fréquence de coupure du HEMT $AlGaN/aN/BGaN$ pour $V_{gs} = 0$ V et $V_{ds} = 15$ V.	61

## Introduction générale

Les dispositifs électroniques ont de nos jours une importance économique et stratégique considérable. Leur importance est née avec la découverte du transistor dont le concept date des années 30. Dans les années 70, le développement de l'industrie de la microélectronique s'est par la suite accéléré avec l'arrivée des circuits intégrés. Au fil des années, l'industrie de la microélectronique s'est concentrée sur trois objectifs afin de garantir sa croissance : réaliser des composants électroniques toujours plus miniaturisés, plus rapides et moins chers.

Les transistors à haute mobilité électronique tels que les HEMTs à base de nitrure de gallium (GaN) sont, depuis peu, capable de concurrencer les transistors LDMOS à base de silicium (Si) et les pHEMT à base d'arséniure de gallium (GaAs) sur le marché des commutateurs des amplificateurs de puissance et d'amplificateurs faible bruit. Ainsi, des stations de bases utilisées pour les télécommunications (3G, 4G, WiMAX,...). Grâce à ces composants pouvant atteindre 150W à 2GHz pour une polarisation de 48V, la technologie GaN pourrait être implantée dans les 2 millions de stations de bases d'employées pour la téléphonie mobile ainsi que dans les infrastructures émergentes utilisées pour la technologie WiMAX. Néanmoins, le marché des technologies à haute bande interdite les prédispose naturellement aux fréquences plus élevées. C'est pourquoi, les principaux laboratoires industriels Européens, Japonais et Américains les dédient aux applications allant de la bande X (8GHz) à la bande E (90GHz).

Cependant, malgré les continuels efforts et améliorations dont bénéficient les composants à base de nitrure de gallium, leurs performances se voient restreintes par les phénomènes de pièges. Une alternative à l'hétéro structure AlGaN/GaN, qui est aujourd'hui la plus répandue, repose sur l'incorporation du bore dans les alliages B<sub>0.5</sub>GaN, qui permet de varier voire d'ajuster la résistivité électrique du matériau, a permis la réalisation des transistors HEMT très performants. Les mécanismes à l'origine de ces performances ne sont pas simples et nécessitent une étude approfondie des phénomènes de transport dans ces composants. C'est l'objet de notre travail qui s'intitule " Etude et simulation du transistor HEMT AlGaN/GaN/B<sub>0.5</sub>GaN".

Le but du premier chapitre est de définir les différentes filières technologiques du transistor HEMT tels que les HEMT conventionnel, HEMT métamorphique (MHEMT), HEMT pseudomorphique (PHEMT), et le MOS-PHEMT. Une définition de ces transistors à haute mobilité électronique sera donnée. Nous expliquerons comment se forme un gaz bidimensionnel de porteurs, et quelles sont les grandeurs qui le caractérisent. Ce chapitre sera clos par les diverses caractérisations électriques réalisées sur un transistor : les caractéristiques statiques et les caractéristiques de puissance hyperfréquences.

Le second chapitre, sera consacré à la description des propriétés des matériaux III-N comme l'AlGaN le GaN et le B<sub>0.5</sub>GaN puis nous justifierons le choix de la filière GaN face aux filières Si, GaAs, InP. Ce chapitre décrira aussi les effets de polarisation dans le transistor HEMT à hétérostructure AlGaN/GaN/B<sub>0.5</sub>GaN. Ainsi, la description de l'approche bidimensionnelle physico-thermique utilisée, basée sur la méthode des éléments finis. Dans cette optique, nous présenterons les équations différentielles utilisées, le couplage du modèle physique avec le modèle thermique.

Le dernier chapitre, expose les résultats de simulation obtenus concernant les performances électriques et thermiques de la structure HEMT AlGaN/GaN/B<sub>0.5</sub>GaN. Cette partie présente l'impact des effets thermiques sur les caractéristiques statiques telles que les caractéristiques courant-tension, les distributions du potentiel et de la concentration en électrons, ainsi que l'influence de certains paramètres technologiques sur le fonctionnement des transistors.

Enfin, une conclusion et des orientations pour des travaux futurs sont établies de ce manuscrit.

## **Chapitre I:**

**Contexte général sur la filière High Electron**

**Mobility Transistor (HEMT)**

## I.1 Introduction

Récemment, les recherches scientifiques dans le monde des semi-conducteurs ont été consacrées aux dispositifs HEMTs (High Electron Mobility Transistors) à base des matériaux III-N qui ont fait l'objet de plusieurs recherches approfondies. En effet, ces composés présentent des performances bien supérieures par rapport à matériaux semi-conducteurs tels que le GaAs, AlGaAs, ...En fait, L'étude du fonctionnement des différents types de composants électroniques passe par une maîtrise préalable des phénomènes physiques régissant les propriétés des électrons dans le semi-conducteur. Il est donc primordial de comprendre le principe de fonctionnement de ces composants ainsi que les mécanismes de formation des hétéro-structures pour maîtriser au mieux la technologie des composants réalisés,

Dans ce chapitre, nous allons présenter l'aspect physique et électrique des différentes technologies de la filière HEMT notamment le PHEMT (pour Pseudomorphique High Electron Mobility Transistor). A l'heure actuelle, peu de transistors associent, une forte densité de puissance et une fréquence de travail élevée. En effet, les technologies existantes permettent généralement de réaliser un compromis entre ces paramètres.

Afin d'expliquer de manière théorique l'intérêt de ces types de composants, nous présenterons les propriétés physiques, chimiques, électriques et thermiques relatives aux HEMTs utilisant les hétéro structures AlGaAs/GaAs, nous aborderons également les effets limitatifs basses fréquences connus, inhérents à ces composants, qui restreignent les performances en puissances et impactent la fiabilité des composants.

## I.2 Architecture des transistors de puissance

### I.2.1 *Transistor HEMT*

Le HEMT (High Electron Mobility Transistors) appartient à la famille des transistors à effet de champ. Il s'agit de commander le courant circulant dans un semi-conducteur nommé canal, entre deux contacts ohmiques (source et drain). Ce contrôle s'effectue via une troisième électrode : la grille. La polarisation de la grille induit un champ électrique qui crée une zone de désertion, modifiant ainsi la section conductrice du canal (voir Figure I.1). La modulation de la tension de grille entraîne la modulation du courant entre la source et le drain  $I_{DS}$  : c'est l'effet transistor à effet de champ [1]. Le HEMT est un cas particulier du MESFET (Métal Semi-conducteur Field Effect Transistor). Ce composant possède plusieurs dénominations dans la terminologie anglo-saxonne, TEGFET (Two-dimensional Electron Gas Field Effect Transistor), MODFET (Modulation Doped Field Effect Transistor) mais également HFET (Heterojunction Field Effect Transistor) [2]. Ce dernier terme est toutefois généralement plutôt réservé à un autre composant à hétéro-structure dans lequel le transport s'effectue dans un matériau dopé alors qu'il est non dopé pour le HEMT.

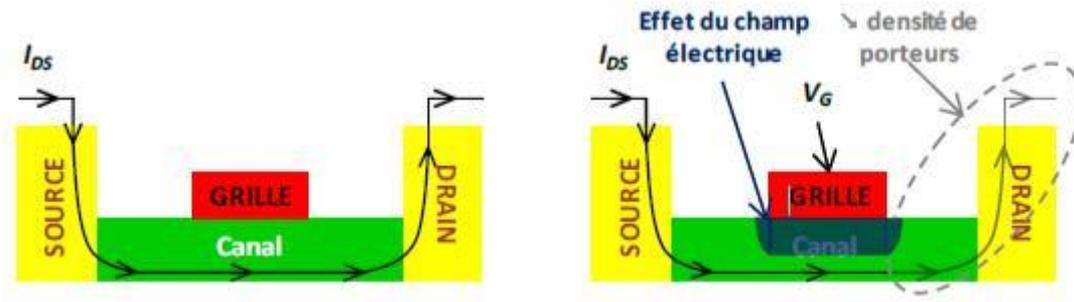


Figure I-1 ; Vue en coupe d'un transistor à haute mobilité électronique (à gauche) et sa schématisation lors que la grille est polarisée (à droite).

### 1.2.1.1 Principe de fonctionnement

La structure des couches des HEMTs est réalisée de façon à séparer physiquement les électrons libres dans le canal des donneurs ionisés, ceci afin d'augmenter la mobilité des électrons par la réduction de la répartition des impuretés ionisées. Ainsi la différence essentielle entre les MESFET et les HEMT se situe au niveau du principe même du contrôle du courant dans le canal. Alors que dans le cas du MESFET, l'électrode de grille contrôle la section du canal disponible pour la conduction, dans le cas du HEMT, elle contrôle la densité d'un gaz d'électrons libres dans une zone non dopée située sous l'hétéro-interface qui constitue le canal du transistor [3].

Le gaz d'électrons étant créé, il est possible de contrôler la densité de porteurs dans le canal par l'intermédiaire de la tension appliquée sur la grille.

La figure I.2 illustre les diagrammes de bande de la zone située sous la grille en fonction de la polarisation de grille appliquée. Lorsque la tension  $V_{gs}$  augmente, le puits de potentiel devient de plus en plus profond, permettant à un nombre plus grand d'électrons de diffuser dans le GaAs. Comme pour le MESFET, la tension  $V_{ds}$  crée un champ électrique dans le canal qui entraîne les électrons de la source vers le drain, formant ainsi un courant  $I_{ds}$  (drain-source). Pour des tensions de grille suffisamment négatives, la densité de porteurs dans le canal devient négligeable et aucun courant significatif ne circule dans le canal [4], le composant est alors pincé. L'évolution du courant de drain en fonction de la tension de drain et pour différentes valeurs de la tension de grille est sensiblement la même que pour le MESFET. De plus, un effet de saturation de courant intervient également pour le HEMT. Il provient de la limite de vitesse des électrons [3, 4].

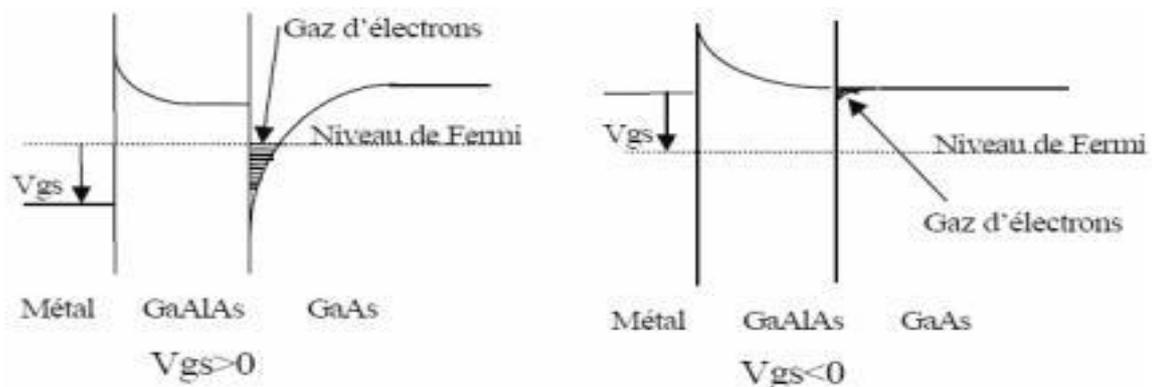


Figure I-2: Impact de la polarisation de la grille sur le diagramme de bande [3].

### 1.2.1.2 Structure technologique du HEMT conventionnelle

Le transport électronique dans le HEMT s'effectue au voisinage de l'interface de matériau à grand gap fortement dopé et de matériau à petit gap non intentionnellement dopé. Cette interface dite hétérojonction permet d'obtenir une importante densité de porteurs dans le

matériau intrinsèque non dopé où la mobilité et les vitesses électroniques sont plus élevées [5].

L'idée est d'intégrer un canal de conduction non dopé dans lequel les porteurs bénéficient de très fortes valeurs de mobilité des matériaux III-V (GaAs ou GaInAs). Cette idée a été réalisée au moyen d'hétérostructures  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  dans les quelles seule la couche d' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  est dopée [6]. La bande interdite du GaAs étant plus petite que celle de l' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  (respectivement 1.42 eV et 1.79 eV pour  $x = 0.3$ ) et son affinité électronique étant plus grande, la discontinuité de bande qui en résulte conduit à la création d'un gaz bidimensionnel d'électrons (gaz 2D) du côté GaAs de l'interface de l'hétérojonction  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ . Ce phénomène n'est pas limité uniquement au système de matériaux  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  [7].

### 1.2.1.3 Structure du HEMT sur substrat GaAs

La figure I.9 représente la structure technologique du transistor HEMT sur substrat GaAs. Le cœur du HEMT est constitué d'une couche du matériau ternaire à grand gap et fortement dopé. Sur un substrat semi-isolant, on fait croître une couche de GaAs Non Intentionnellement Dopée (NID). On dépose ensuite une couche d' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  non intentionnellement dopée dite espaceur pour limiter les interactions coulombiennes entre les impuretés de dopage du matériau  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  et les électrons du gaz-2D, leur conférant ainsi une grande mobilité [60]. Sur l'espaceur, on fait croître une couche de  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  dopé N et on dépose ensuite la couche de contact GaAs dopé N+ sur la quelles ont réalisées les électrodes métalliques de source et de drain.

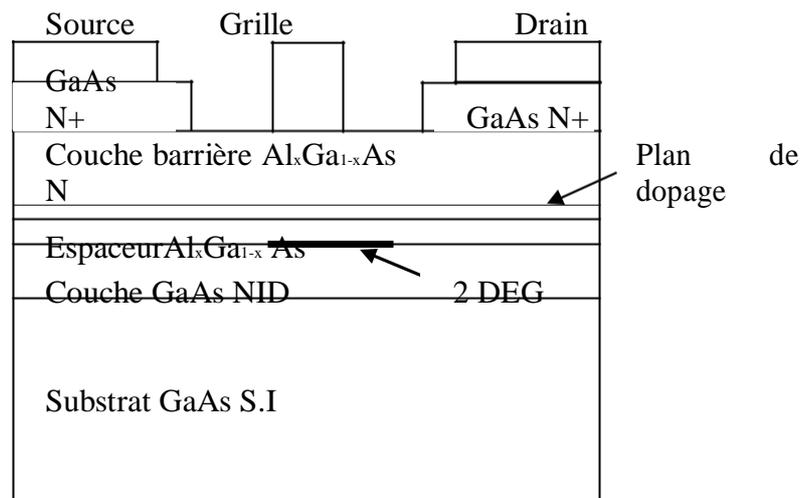


Figure I- 3: Structure du HEMT sur GaAs [8].

### 1.2.1.4 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement du HEMT est basé sur l'hétérojonction entre deux semi-conducteurs à grand et à petit gap. La figure I.4 représente le diagramme de bandes de l'hétérojonction  $\text{GaAs}-\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  avant contact. Selon le modèle d'Anderson [9], après contact des deux matériaux et à l'équilibre thermodynamique, les électrons vont migrer de matériaux à grand gap fortement dopé vers le matériau à faible gap non dopé. Les niveaux de Fermi des deux semi-conducteurs s'alignent et il apparaît une discontinuité des bandes à l'interface métallurgique, un puits de potentiel est ainsi réalisé à l'interface de l'hétérojonction du côté de semi-conducteur de faible gap.

La bande de conduction du matériau à plus faible gap se courbe et sera traversée par le niveau de Fermi de la structure. De ce niveau va dépendre la concentration des porteurs dans le puits de potentiel qui regroupent toutes les charges libres responsables de la conduction dans le GaAs et qui présentent une grande mobilité (Figure I.4.b).

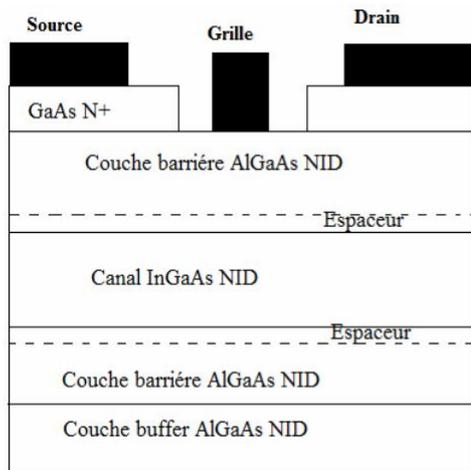


Les performances du HEMT conventionnel sont limitées par la faible valeur de la discontinuité de bande de conduction  $\Delta E_c$ , à l'interface de l'hétérojonction GaAlAs/GaAs ( $\Delta E_c \approx 0,15 \text{ à } 0,2 \text{ eV}$ ) et donc par la faible valeur de la densité de charges accumulées dans le GaAs ( $N_s \approx 0,7 \text{ à } 0,8 \cdot 10^{16} \text{ m}^{-2}$ ). Ses applications sont limitées à l'amplification faible signal bien que des structures à multiples hétérojonctions aient été proposées pour l'amplification de puissance [11].

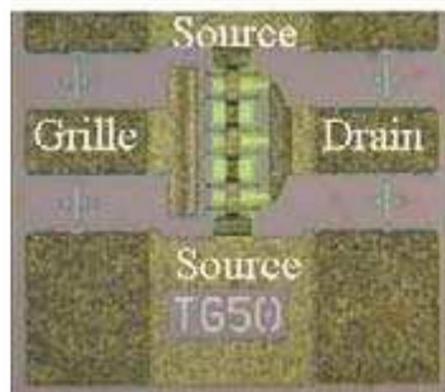
### I.2.2 Transistor HEMT Pseudo morphique

Le développement et la maîtrise des procédés de croissance a permis de réaliser des dispositifs à deux hétérojonctions de paramètre de maille différent mais pas trop éloigné de type AlGaAs/InGaAs/AlGaAs (barrière AlGaAs, canal InGaAs, couche tampon AlGaAs) sur substrat GaAs (figure I. 5) [8, 12].

La réalisation d'une double hétéro-structure de part et d'autre du canal permet un meilleur confinement des porteurs dans le canal. Par conséquent, la densité d'électrons peuplant le puits quantique est augmentée par rapport au PHEMT simple [13]. De plus la tension de claquage, plus élevée avec AlGaAs non intentionnellement dopé en surface, peut être encore améliorée en réalisant un double sillon de grille [8].



a) Structure du PHEMT sur GaAs.



b) Photographie du PHEMT issu de la fonderie UMS.

**Figure I- 5 : Technologie du PHEMT [8]**

La supériorité du HEMT pseudo morphique sur le HEMT conventionnel réside dans une plus grande discontinuité  $\Delta E_c$ , à l'interface de l'hétérojonction GaAlAs/GaInAs ( $\Delta E_c \approx 0,3 \text{ eV}$ ), donc à une plus grande charge accumulée à l'interface ( $N_s \approx 1,5 \cdot 10^{16} \text{ m}^{-2}$ ) et à une meilleure efficacité de commande.

Un des problèmes critiques limitant les performances radio fréquences des PHEMTs est le courant de fuite de la grille [14, 15].

### I.2.3 HEMT adapté en maille AlInAs/GaInAs sur InP

La montée en fréquence est conditionnée par les paramètres de transport des Matériaux utilisés. Les filières basées sur l'hétérojonction InAlAs/InGaAs sur substrat d'InP ont utilisées en particulier en gamme d'onde millimétrique et en numérique vers la centaine de Gb/s. Les fréquences de coupures de ces filières InP qui sont de l'ordre de 600 GHz ont permis le développement d'amplificateur faible bruit jusqu'en bande G (140-220GHz)[16].

Le HEMT  $\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}/\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$  adapté en maille sur InP (figure I.12) bénéficie de la discontinuité de bande de conduction au niveau de l'hétérojonction  $\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}/\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$  ( $\Delta E_c$  de 0,52eV) et des propriétés de transport de GaInAs qui sont excellentes (forte mobilité électronique associée à l'utilisation du matériau  $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ , écart énergétique inter- vallées important  $\Delta E_{\Gamma L} = 0,6\text{eV}$ ) [16]. Ceci induit une grande densité de porteurs [63]. Par ailleurs la bonne conductivité thermique de l'InP permet de réaliser des composants mieux adaptés aux densités de puissance élevées [17].

Cette filière qui présente de bonnes performances en fréquence et en bruit est adaptée aux applications faible bruit (radar, radio astronomie, observations terrestres...) en bande W (75 à 110GHz) et au-delà. Ces propriétés peuvent encore être améliorées par une couche active GaInAs en contrainte sur InP (en particulier pour une concentration d'indium supérieure à 53% en tendant vers le composé InAs). En contrepartie, ces composants ne peuvent travailler qu'à faible tension drain-source car le faible gap du matériau  $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$  ( $E_g = 0,8\text{eV}$ ) induit de l'ionisation par chocs dans le canal et limite fortement les applications de puissance [11].

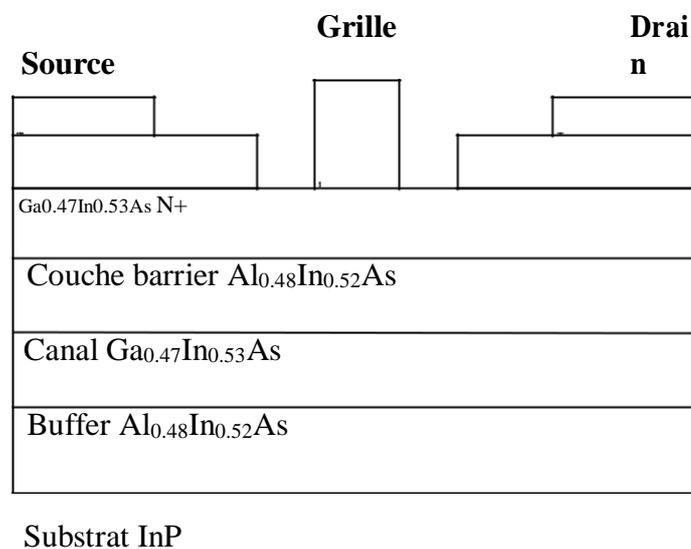
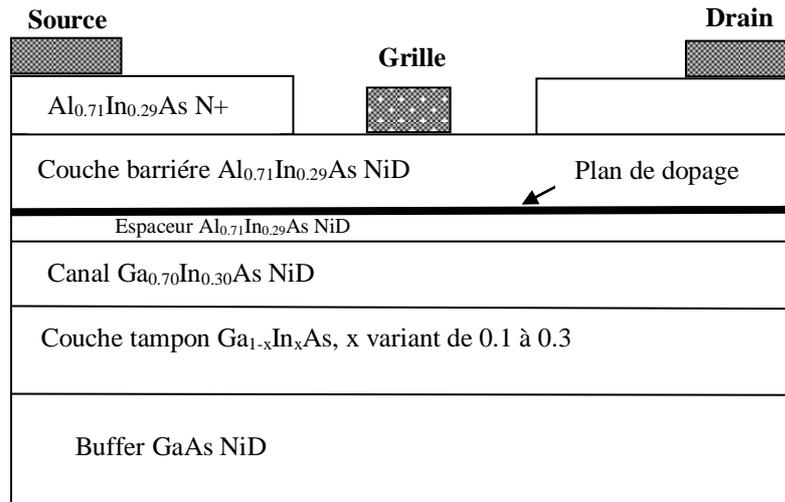


Figure I- 6 : Structure du HEMT AlInAs/GaInAs adaptée en maille sur InP [8].

#### I.2.4 HEMT AlInAs/GaInAs métamorphique sur GaAs

La filière métamorphique (M-HEMT) utilise des matériaux sur un substrat de paramètre cristallin différent. On réalise ainsi la croissance d'une couche sacrificielle (10 à 20nm) où se produit la relaxation de contraintes par formations de dislocations [14]. L'avantage d'une telle filière est de pouvoir faire croître des hétéro-structures AlInAs/GaInAs sur un substrat GaAs. L'utilisation de GaAs comme substrat permet d'avoir un composant moins cher et qui peut être fabriqué avec des wafers (GaAs) de grands diamètres contrairement aux wafers InP qui sont plus fragiles.

La figure I.7 représente la structure multicouche du HEMT métamorphique (M-HEMT)  $\text{Al}_{0.71}\text{In}_{0.29}\text{As} / \text{Ga}_{0.70}\text{In}_{0.30}\text{As}$  non contraint sur GaAs.



**Figure I- 7 : Structure du HEMT métamorphique [18].**

Le principe de cette approche consiste à insérer entre un substrat de paramètre de maille cristallin  $a_1$  et une couche active de paramètre  $a_2$ , une couche tampon « métamorphique » qui permet par la génération contrôlée de dislocations due au désaccord de maille de passer de  $a_1$  à  $a_2$ . La couche tampon  $Ga_{1-x}In_xAs$  présente un taux d'indium graduel (de 10 à 30%) et une épaisseur comprise entre 0,5 et 1  $\mu m$  qui va « absorber » les 2% d'écart de maille atomique qui existe entre les matériaux  $GaAs$  et  $Ga_{0,7}In_{0,3}As$ . De ce fait, le canal est complètement relaxé [8]. Pour les applications de puissances, un taux d'indium de 30% environ permet d'obtenir des discontinuités de bandes de conduction et de valence maximales de 0,7 eV et 0,35 eV respectivement ainsi qu'une largeur de bande interdite de 2 eV pour la couche barrière [19].

L'intérêt principal de cette technologie est de réaliser des dispositifs de puissance ayant des Performances comparables à des HEMTs sur substrat InP avec le coût et le rendement comparables à ceux de la technologie PHEMT sur substrat GaAs.

D'autres structures utilisent l'antimoine Sb (AlSb/InAs), le canal du transistor est constitué de InAs qui a une énergie de gap (0.36 eV) plus faible que l'InGaAs (0,72 eV) tandis que la vitesse de saturation pour les électrons dans le cas de InAs ( $4 \cdot 10^7$  cm/sec) est plus grande que dans le cas de InGaAs ( $2,7 \cdot 10^7$  cm/sec). Cette différence permet d'avoir des transistors de fréquences de transition plus élevées [20].

### 1.2.5 Comparaison entre le HEMT et le PHEMT

Les performances fréquentielles des HEMTs sont liées au temps de transit entre la source et le drain. Monter en fréquence revient donc à miniaturiser les dimensions du composant, mais également à utiliser des matériaux présentant des mobilités électroniques élevées.

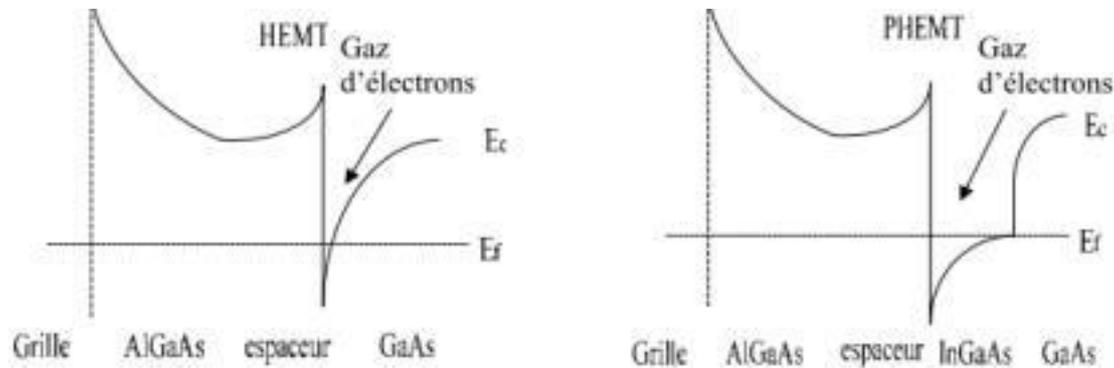
Pour satisfaire aux besoins sans cesse croissants de montée en fréquence, l'idée de base a été de remplacer le GaAs du canal par un autre matériau à faible gap autorisant une vitesse à fort champ électrique la plus élevée possible ajoutant une couche InGaAs. Les progrès technologiques en matière d'épitaxie ont donc donné naissance à un nouveau type de transistor à hétérojonction : le HEMT pseudomorphique (PHEMT).

Il est possible de contrôler la densité gaz d'électrons créé, à l'aide de la tension de grille.

Lorsque la tension de grille augmente, le puits de potentiel devient plus profond.

Un plus grand nombre d'électrons libérés par les atomes donneurs du semi-conducteur peuvent alors diffuser dans le canal. Inversement, lorsque la tension de grille diminue, le puits de potentiel diminue jusqu'à ce qu'il ne puisse plus contenir de porteurs. Le transistor est alors

pincé, Le courant  $I_{ds}$  est alors contrôlé par la densité de porteurs. Le PHEMT présente des performances nettement supérieures à celles du HEMT classique, adapté en maille, en démontrant un faible niveau de bruit, puisque les porteurs sont mieux confinés dans un puits plus profond, et une fréquence de coupure élevée, puisque la mobilité électronique dans InGaAs est plus élevée. Compatible avec les lignes de fabrication de MMIC existantes, des filières commerciales n'ont pas tardé à voir le jour, y compris en Europe (Philips devenu OMMIC en 2000, Thomson et Daimler associés dans UMS en 1996, GMMT devenu Bookham en 2002) [6].



**Figure 1- 8 : Comparaison de la structure de la bande d'énergie de conduction des transistors HEMT et PHEMT [6].**

### I.3 Applications du HEMT en hyperfréquence

Les transistors HEMT sur substrat GaAs ou InP présentent une puissance en sortie de l'ordre de quelques centaines de milliwatt dans la gamme des fréquences millimétriques [21]. Des applications telles que la détection atmosphérique à distance, atterrissage d'avions, imagerie hyperfréquence, radar anticollision sont alors envisageables [22,23,24]. Des circuits performants ont été rapportés. On peut citer par exemple les doubleurs de fréquences jusqu'à 164 GHz [25], les mélangeurs à 94 GHz [26], les multiplexeurs à 100Gb/s [27], les amplificateurs faible bruit et les amplificateurs de puissance fonctionnent de 1GHz à 300GHz [28].

Les meilleurs  $f_t$  rapportées dans la littérature et concernant le HEMT métamorphique sur substrat GaAs sont de l'ordre de 440GHz pour un composant de longueur de grille  $L_g=35\text{nm}$  [24], et 515GHz pour un composant de longueur  $L_g =35\text{nm}$  et de largeur de grille  $2 \times 10\mu\text{m}$ , la transconductance maximum  $g_m$  est de 2500 ms/mm. Les principales réalisations à base du transistor HEMT qu'on retrouve dans la littérature sont résumées dans le tableau I-1 suivant.

	Technologie	Application	Source	Ft/fmax
[25]	InP-HEMT	Doubleur de Fréquence à 164GHz	Northrop Grumman Corporation	/60GHz
[26]	GaAs70nm - MHEMT	Mélangeur à 94 GHz	Dongguk University- Korea	320/430GHz
[27]	InP HEMT	MUX à 100Gb/s Et Dff 140Gb/s	Fujitsu-japan	165GHz
[28]	InAs/AlSb HEMT	Amplificateur à 100GHz	Rockwell Scientific Company, UCSB	235GHz
[29]	InP HEMT	--	FUJITSU	547/400GHz
[30]	AlSb/InAs HEMT	--	Northrop Grumman Space Technology	260/280GHz
[31]	InP HEMT	Circuit intégré Logique à 100 Gb/s	NTT-Japan	175/350GHz
[32]	GaAs MHEMT	Amplificateur à 4 étages	Fraunhofer Inst. For Appl. Solid State Phys. (IAF), Freiburg, Germany	19.5dB pour 350 GHz 15dB entre 240 et 320GHz

**Tableau I- 1: Les principales réalisations en technologie HEMT.**

#### I.4 Transistor MOS-PHEMT

La figure I.9 montre une coupe schématique du transistor MOS-PHEMT développée par dépôt chimique en phase vapeur métallique (MOCVD) sur un substrat semi isolant GaAs. La mesure Hall indique que la mobilité des électrons est de  $4000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ , et la densité d'électrons est de  $2,2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  à température d'oxyde. Cette dernière est formée par le TiO<sub>2</sub> dont l'épaisseur de l'oxyde environ 30 nm après la post oxydation à 350 ° C pendant 1 min [32] ambiante. Les métaux les plus fréquemment utilisés pour réaliser les contacts ohmiques de la source et du drain sont Au/Ge /Ni. La profondeur de la grille est de 110 nm pour le PHEMT de référence et 100 nm pour le MOS-PHEMT. L'électrode de grille a été réalisé avec l'or (Au) et déposé sur la couche

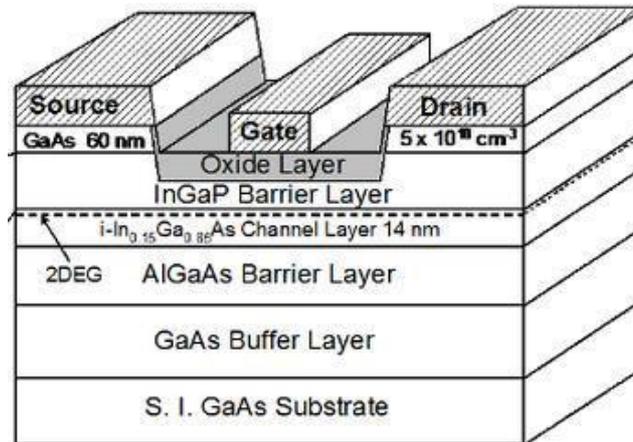


Figure I-9 : Structure d'un transistor InGaP/InGaAs MOS-PHEMT.

En effet, le MOS-PHEMT possède non seulement les avantages de la structure MOS (comme par exemple, un courant de fuite plus faible et une tension de claquage plus élevée), mais il possède également une grande mobilité grâce au canal 2DEG. Autrement dit, le MOS-PHEMT présente l'avantage d'un courant de fuite de grille réduit, par l'ajout d'un diélectrique high-k à l'empilement de grille. Toutefois, l'ajout de la couche semi-isolante dans l'empilement de grille va augmenter la distance électrode de grille et électrons du canal, ce qui peut affaiblir le contrôle de la grille sur les électrons du canal. De plus, si la couche semi-isolante insérée est trop épaisse, on risque d'y accumuler des électrons.

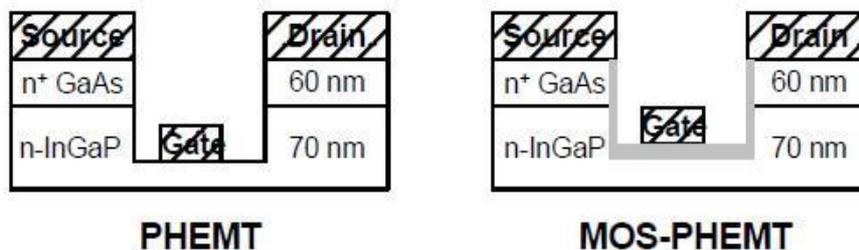


Figure I-10 : Structures PHEMT et MOS-PHEMT

Cependant, en raison de la barrière de potentiel plus élevée entre la grille et la couche Schottky, le MOS-PHEMT présente de bonnes caractéristiques de pincement et de saturation, en fait, le MOS-PHEMT peut fonctionner à des tensions de grille source ( $V_{gs}$ ) et une tension drain source ( $V_{ds}$ ) élevées que celles du PHEMT, ce qui permet d'améliorer les performances de ce composant [9, 10]. Cependant, la région qui sépare l'InGaP et le canal InGaAs pour le MOS-PHEMT est plus grande que celle du PHEMT [32], de sorte que la densité de courant de drain du PHEMT est inférieure à celle de MOS-PHEMT pour la même polarisation de grille-source.

$V_{gs}$  dû à la diminution de la concentration en électron dans le canal InGaAs 2DEG. Le film d'oxyde offre une amélioration de la tension de claquage en fonction du courant de fuite de la grille de la structure MOS-PHEMT InGaP/InGaAs.

## I.5 Filières technologiques

### I.5.1 Silicium et matériaux III-V

L'abondance du silicium (Si) substrat existant à l'état naturel, sa robustesse et l'existence du dioxyde de silicium qui est un très bon isolant, permettent de réaliser des composants électroniques à faible coût (diamètre des tranches Si nettement supérieur à celui des tranches des composants III-V). Le rapport de la mobilité des trous / mobilité des électrons du silicium qui est supérieur à celui du matériau GaAs offre la possibilité de réaliser des composants MOS complémentaire CMOS (NMOS et PMOS). Enfin la maturité de la technologie Si permet la réalisation de circuits plus fiables à forte densité d'intégration. L'ensemble de ces avantages font du Si le matériau le plus utilisé pour la fabrication des composants électroniques et des circuits intégrés analogiques et numériques [23]. Le tableau I-1 qui compare les différents matériaux donne quelques caractéristiques du silicium.

Les matériaux III-V sont issus d'une association d'éléments de la colonne III et d'éléments de la colonne V du tableau de la classification périodique des éléments. L'étude de leur structure de bandes montre, en particulier, que les éléments les plus légers donnent des composés dont la bande interdite est large et indirecte et dans lesquels la masse effective des électrons est élevée. Ces matériaux présentent peu d'intérêt pour l'électronique rapide. C'est le cas du Bore, de l'Aluminium, de l'Azote et du phosphore de gallium GaP. Par contre les composants à base de gallium (arséniure ou antimoniure de gallium respectivement GaAs ou GaSb) ou d'indium InP, InAs, InSb), ont des propriétés très intéressantes [35, 36]. Le tableau I-1 présente les principales caractéristiques des composés III-V [37]. Le tableau I-2 présente les principales caractéristiques du GaAs comparées à celles des matériaux Si, 4H-SiC, InP et GaN à la température  $T = 300$  K [35, 37].

Comparé au Si, les composés III-V dispose des caractéristiques plus intéressantes pour la fabrication de composants hyperfréquences comme par exemple, la vitesse de saturation des électrons et leur mobilité plus grandes, le faible bruit HF et une plus grande tension de claquage. On peut citer les filières GaAs (MESFET, TBH) qui permettent de réaliser des applications 40 GHz et les filières InP (TBDH, MHEMT, PHEMT) pour les applications largement supérieures à 100GHz [38, 39, 40].

Composé		Eg(eV)	$\lambda_g(m)$	$m^*/m_0$	$a_0(A^\circ)$	Structure de la bande Interdite
III-V						
B	N	7.5	0.17		36150	Indirecte
Al	P	2.45	0.51		5463	
Al	As	2.16	0.57		5661	
Al	Sb	1.58	0.75	0.12	6138	
Ga	P	2.26	0.55	0.82	5449	
Ga	As	1.42	0.87	0.063	5653	directe
Ga	Sb	0.72	1.85		6095	
In	P	1.35	0.92	0.08	5868	
In	As	0.36	3.44		6058	
In	Sb	0.17	7.30		6479	

**Tableau I- 2: Les principaux composés III–V, Eg est l'énergie de la bande interdite,  $m^*/m_0$  est la masse effective,  $\lambda_g$  est la longueur d'onde et  $a_0$  est le paramètre cristallin.**

Les propriétés thermiques d'un matériau semi-conducteur sont importantes dès qu'on envisage de réaliser des dispositifs de puissance et/ou d'augmenter la densité d'intégration. La conductivité thermique ( $K(T)$ ) a tendance à décroître en fonction de la température. Ceci peut conduire à des difficultés de dissipation thermiques. En effet, plus la conductivité thermique est importante, plus l'évacuation des calories est favorisée, moins il y a d'auto échauffement pour une puissance dissipée donnée. Ce paramètre n'est que de  $0,5 \text{ W.cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  pour le GaAs contre  $1.5 \text{ W.cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  pour le silicium à 300 K . On constate par ailleurs que  $K_L$  diminue lors qu'on fait croître la densité des porteurs libres (le dopage).

	Si	GaAs	InP	GaN	4H-SiC
<b>Structure de bande</b>	Indirecte	Directe	Directe	Directe	Indirecte
<b>Gap (e v) à 300 K</b>	1,12	1,424	1,34	3,36	2,99
<b>Gap (e v) à 0 K</b>	1,17	1,52	1,42	3,50	3,03
<b><math>\alpha</math> (A°)</b>	5,43	5,65	5,87	5,18	15,11
<b><math>n_i</math> (cm<sup>-3</sup>)</b>	1,5 10 <sup>10</sup>	2,2 10 <sup>6</sup>	2 10 <sup>7</sup>	1,9 10 <sup>-10</sup>	8,2 10 <sup>-9</sup>
<b><math>m^*/m_0</math></b>	0,98/0,19	0,067	0,078	0.2	--
<b><math>\mu_n</math> (cm<sup>2</sup>/V.s)</b>	1500	8500	5100	1400	700
<b><math>\mu_p</math> (cm<sup>2</sup>/V.s)</b>	450	400	150	295	115
<b><math>V_{sat}</math> (cm/s)</b>	10 <sup>7</sup>	10 <sup>7</sup>	2.10 <sup>7</sup>	2,5.10 <sup>7</sup>	2. 10 <sup>7</sup>
<b><math>\epsilon_r</math></b>	11.8	12.8	12.4	8.9	10
<b><math>\xi_m</math>(V/cm)</b>	3,7 10 <sup>5</sup>	4 10 <sup>5</sup>	5 10 <sup>5</sup>	3,3 10 <sup>6</sup>	2 10 <sup>6</sup>
<b><math>K_L</math> (W/cm.K)</b>	1,5	0,5	0,7	1,7	5
<b>Hétérostructures possibles</b>	Si/SiGe	AlGaAs/GaAs InGaP/GaAs  AlGaAs/InGaAs (InAlAs/InGaAs)	(InAlAs/  InGaAs)	AlGaN/GaN  InGaN/GaN	--

**Tableau I- 3[5,6] : Principales caractéristiques physiques, électriques et thermiques du silicium et des semi-conducteurs composés**

Le Gap est largeur de la bande interdite,  $V_{sat}$ , est la vitesse limite des électrons,  $a$  est le paramètre cristallin,  $n_i$  est la concentration intrinsèque

$m^*/m_0$  : Masse effective des électrons

$\mu_n$  : Mobilité des électrons

$\mu_p$  : Mobilité des trous

$\xi_m$  : Champ de claquage.

$\epsilon_r$ : permittivité relative

$K_L$  : conductivité thermique

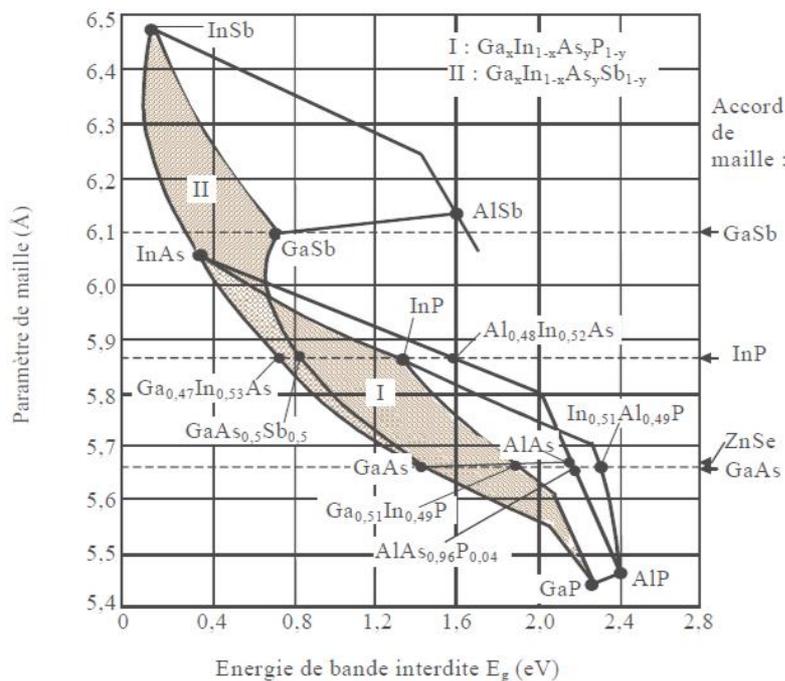
## I.5.2 Matériaux ternaires InAlAs/InGaAs

### I.5.2.1 Propriétés cristallines

La contrainte élastique due au désaccord de maille modifie les propriétés optiques et électriques du matériau, en particulier l'énergie de sa bande interdite. Une couche barrière AlInAs réalisée sur le substrat GaAs permet d'obtenir un accord de maille suffisant.

La figure I.11 présente le paramètre de maille en fonction de l'énergie de la bande interdite pour les principaux alliages utilisés [14].

Les points du graphe indiquent la position des composés binaires stœchiométriques, et les lignes représentent l'évolution du gap  $E_g$  et du paramètre cristallin  $a$ , en fonction de la composition des alliages ternaires.



**Figure I- 11 : Paramètre de maille et énergie de bande interdite pour divers matériau III-V (des alliages des composés III-V) [15].**

Certaines lignes présentent un point anguleux qui dénote une transition entre un gap direct et un gap indirect. Ce diagramme permet de connaître la composition de tout alliage ternaire qui pourrait être déposé par épitaxie, sur un substrat binaire comme GaAs ou InP [16].

Le paramètre de maille (paramètre  $a$ ) d'une telle structure dépend de la nature des éléments chimiques. Une maille cristalline est d'autant plus grande que le numéro atomique des éléments la constituant est grand. Ainsi dans le cas d'une structure ternaire d' $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , l'incorporation d'indium dans la maille cristalline du GaAs augmente le paramètre de maille de l'alliage [17].

Les paramètres de maille des composés ternaires sont calculés à partir des paramètres des deux composés binaires correspondants et pour les composés quaternaires, on considère

les quatre composés ternaires associés. La loi d'interpolation dite de Vegard est utilisée pour calculer le paramètre de maille des composés ternaires [18, 19].

Les exemples suivants expliquent le calcul du paramètre  $a$  :

- Calcul du paramètre  $a$  pour le matériau ternaire  $\text{Ga}(x)\text{In}(1-x)\text{As}$  :

$a(\text{InGaAs}) = x.a. (\text{InAs}) + (1-x).a.(\text{GaAs})$  avec  $x$  la fraction molaire de gallium

$$P(\text{GaInAsP}) = \frac{x(1-x)(yP(\text{InAsP}) + (1-y)P(\text{GaAsP})) + y(1-y)(xP(\text{GaInP}) + (1-x)P(\text{GaInAs}))}{x(1-x) + y(1-y)}$$

Avec  $y$  la fraction molaire d'arsenic.

### 1.5.2.2 Bande d'énergie

Les alliages  $\text{InAlAs}$  et  $\text{InGaAs}$  ont une structure de bande interdite directe comme les matériaux III-V. La transition, recombinaison des électrons de la bande de conduction avec les trous de la bande de valence, s'effectue dans ce cas avec la conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement. Ces matériaux à bande interdite directe sont en particulier exploités pour la réalisation des composants optoélectroniques.

L' $\text{Al}_{0.60}\text{In}_{0.40}\text{As}$  possède une très grande largeur de bande interdite (1.72 eV). Son utilisation tant que barrière pour l'hétérojonction  $\text{AlInAs}/\text{GaInAs}$  est possible. La discontinuité de bandes de conduction de cette hétéro structure permet une grande concentration d'électrons dans le puits de potentiel formé à l'interface de ces matériaux.

### 1.5.2.3 Propriétés de transport de l'InGaAs

La figure I.12 donne l'évolution de la vitesse de dérive en fonction du champ électrique des matériaux ternaires. A titre de comparaison, elle présente aussi celle du Si, Ge et celle du GaAs (matériaux intrinsèques,  $N_D = 0$ , température ambiante).

La caractéristique liant la vitesse de dérive au champ électrique appliqué présente deux régions :

- Une région linéaire (champ électrique faible ou champ électrique inférieur au champ critique) : La forte courbure de la bande de conduction au voisinage de son minimum  $k=0$  conduit à des masses effectives très faible et donc à une mobilité électronique importante. La vitesse varie donc linéairement en fonction du champ électrique.
- Une région de saturation de vitesse (champ électrique élevé) : lorsque le champ électrique devient important, les électrons acquièrent une énergie suffisante qui leur permet d'atteindre les vallées satellites. Leur masse effective augmente et leur mobilité s'affaiblit. Cette situation explique le phénomène de saturation de vitesse de transport des électrons observés dans les matériaux III-V et qui se traduit par une variation non linéaire de la vitesse de dérive des porteurs.

Nous présentons sur le tableau I-4 les principales caractéristiques de transport de quelques alliages III-V.

La mobilité électronique de l’InGaAs :  $\mu_n \approx 10000 \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$  à 300K, ainsi que sa vitesse de pic importante et son énergie de bande interdite (0.75 eV) permettent de réaliser de transistors plus rapides. La hauteur de barrière Schottky (0.5 à 0.8 eV à 300K) de l’AlInAs et la grande bande interdite de la couche Schottky InAlAs (2 eV) permet d’obtenir une caractéristique de diode de bonne qualité [14].

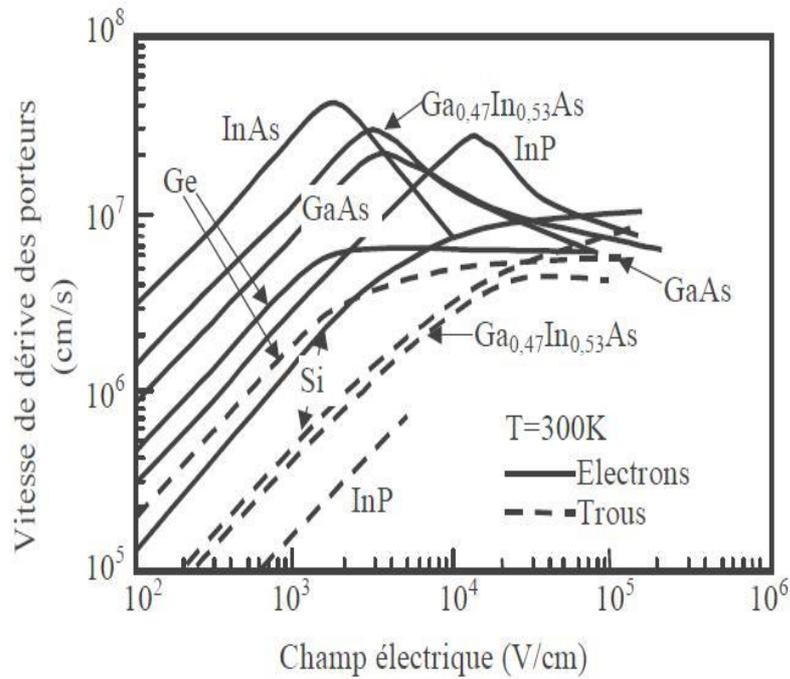


Figure I- 12 : Vitesse de dérive en fonction de champ électrique Pour les matériaux non dopés ( $N_d = 0$ ) [20].

	Legap $E_g$ (eV)	Paramètre de maille( $\text{\AA}^\circ$ )	Mobilité Electronique du matériau Nid ( $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ )	Mobilité des Trous du matériau Nid ( $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ )	Vitesse maximale électronique ( $10^7 \text{cm/s}$ )
<b>Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As</b>	1,798	5,656	3000	100	1
<b>Al<sub>0.48</sub>In<sub>0.52</sub>As</b>	1,46	5,869	4000	180	0,4
<b>In<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As</b>	1,14	5,71	11000	--	>2,1
<b>In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As</b>	0,78	5,869	13000	300	2,7

Tableau I- 4: Comparaison des propriétés des alliages III-V à 300 K [21].

## I.6 Paramètres statiques

### I.6.1 La transconductance $g_m$

La transconductance  $g_m$  est définie comme la variation du courant  $I_D$  en fonction de la tension  $V_{GS}$  à  $V_{DS}$  constant :

$$g_m = \left| \left( \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} \right) \right. (V_{DS} = cste) \quad I.1$$

Elle traduit l'efficacité de la modulation du courant dans le canal par la tension appliquée sur la grille. On cherchera donc à la rendre maximale.

Nous distinguerons la transconductance extrinsèque  $g_{mext}$  qui prend en compte les accès du transistor, de la transconductance intrinsèque  $g_{mint}$  qui traduit comme son nom l'indique, le comportement intrinsèque du transistor. Ces deux grandeurs sont approximativement reliées par la formule I.2 :

$$g_{mext} = \frac{g_{mint}}{1 + R_S * g_{mint}} \quad I.2$$

Où  $R_S$  désigne la résistance de source Il apparaît ici que la résistance de source est un paramètre essentiel dans l'optimisation des transistors HEMTs, du fait de la forte dépendance de  $g_{mext}$  avec  $R_S$ .

### I.6.2 La conductance de sortie $g_d$

La conductance de sortie  $g_d$  est définie comme la variation du courant  $I_D$  en fonction de  $V_{DS}$  à  $V_{GS}$  constant :

$$g_d = \left( \frac{\partial I_D}{\partial V_{DS}} \right) (V_{GS} = cste) \quad I.3$$

La conductance  $g_d$  traduit la conduction parasite drain-source de la structure. Il sert d'indicateur de régime de saturation : en fonctionnement linéaire, le canal a une faible résistance (la zone désertée ne s'est pas encore étendue) donc  $g_d$  est grand. Par contre, en régime saturé, la zone de charge d'espace occupe tout le canal côté drain, sa résistance augmente et  $g_d$  diminue. On cherchera donc à minimiser  $g_d$  en régime saturé.

Par ailleurs,  $g_d$  illustre également les phénomènes limitatifs du transistor HEMT comme l'ionisation par impact et l'effet « Kink », les effets de canal court, qui se traduisent par une augmentation de la conductance de sortie en régime saturé.

### I.6.3 Tension de seuil $V_{th}$ et tension de pincement $V_P$

On parle de transistor pincé lorsque la zone désertée dans le canal s'étend jusqu'à venir contacter l'interface avec la couche tampon (buffer). La tension de grille correspondante est alors appelée tension de pincement  $V_P$ . C'est la tension appliquée sur la grille pour laquelle il n'existe aucune charge libre sous la grille. On peut aussi définir la tension de seuil  $V_T$  en fonctionnement du transistor, qui va correspondre à la fermeture du transistor en termes de courant de drain. Pour des transistors longs et idéaux (en particulier pas de courant de fuite), la tension de pincement et la tension de seuil sont identiques. Pour des transistors courts, les effets de canal court vont engendrer une différence entre ces deux tensions. En effet, il sera

plus difficile d'annuler le courant drain du transistor à grille courte, pour de fortes valeurs de tension drain source. Cette variation peut par exemple être évaluée par le DIBL. Toutefois ces deux tensions sont très étroitement liées, la tension de seuil dépendant directement de la tension de pincement. Cette dernière tension peut être extraite de simulations de commande de charge (par exemple par Schrödinger-Poisson auto cohérents), ou des caractéristiques à tension drain-source nulle, telles que la mesure de la capacité de grille en fonction de  $V_{GS}$  (ou appelé  $C(V)$ ). La tension de seuil est la grandeur la plus pertinente, entre autres pour la conception de circuits. C'est elle qui va déterminer le mode de fonctionnement du transistor : à désertion pour une tension de seuil négative ou bien à enrichissement pour une tension de seuil positive.

## I.7 Paramètres dynamiques

### I.7.1 Mesure des paramètres S

La mesure des paramètres S se fait grâce à un analyseur de réseaux. C'est le principal appareil de mesures en hyperfréquences. Il en existe deux types :

- Les analyseurs scalaires qui ne mesurent que le module des paramètres S
- Les analyseurs vectoriels qui fournissent le module et la phase

Une étape importante avant toute mesure de paramètres S consiste à calibrer l'analyseur de réseaux. Ceci permet de corriger les erreurs systématiques introduites par l'analyseur : désadaptation de la source et/ou de la charge, directivité imparfaite du système de mesure, réponse en fréquence des câbles et des adaptateurs de test non constante, pertes entre l'analyseur de réseau et le dispositif sous test, etc. Le calibrage s'effectue à l'aide de standards ou étalons connus : charge adaptée de  $50 \Omega$ , court-circuit, circuit ouvert, ligne adaptée.

### I.7.2 Le gain en courant de court-circuit

Il est obtenu à partir des paramètres S mesurés puis convertis en paramètres H, selon l'expression I.4 suivante :

$$H_{21} = \frac{-2S_{21}}{(1 - S_{11})(1 + S_{22}) + S_{12}S_{21}} \quad \text{I.4}$$

Ce gain en courant permet d'obtenir la fréquence de transition du gain en courant (FT) qui correspond à un gain en courant égal à 0 dB.

La fréquence de transition est un facteur clé pour les applications numériques et les applications hyperfréquences en général.

### I.7.3 Le gain maximum disponible ou MAG (Maximum Available Gain)

C'est le gain en puissance obtenu en adaptant l'entrée et la sortie d'un quadripôle actif. Il correspond au maximum de transfert de puissance entre l'entrée et la sortie, réalisé dans des conditions d'adaptation optimales en entrée et en sortie.

Ces conditions sont obtenues lorsque le coefficient de stabilité  $k$  est supérieur à 1. Dans le cas contraire, on calcule le gain maximum stable, noté MSG (Maximum Stable Gain). On a ainsi :

$$\begin{aligned}
 \bullet \quad k > 1 \quad |MAG| &= \frac{|S_{21}|}{|S_{12}|} \left( k - \sqrt{k^2 - 1} \right) \quad \text{avec} \quad k = \frac{1 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 + |S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}|^2}{2|S_{12}||S_{21}|} \\
 \bullet \quad k \leq 1 \quad MSG &= \frac{|S_{21}|}{|S_{12}|}
 \end{aligned}$$

I.5

A partir du MAG, on détermine la fréquence FMAG qui est une extrapolation du gain à 0 dB.

#### 1.7.4 Gain unilatéral U ou gain de Masson

C'est le gain du transistor lorsque celui-ci est adapté en puissance à l'entrée et à la sortie et qu'une contre-réaction annule le paramètre S12.

Le gain unilatéral est donné par l'équation I.6 suivante :

$$U = \frac{1}{2} \frac{\left| \frac{S_{21}}{S_{12}} - 1 \right|^2}{\left( k \frac{|S_{21}|}{|S_{12}|} - \operatorname{Re} \left( \frac{S_{21}}{S_{12}} \right) \right)} \quad \text{I.6}$$

Ce gain permet de déterminer la fréquence maximale d'oscillation  $F_{MAX}$  pour  $U = 1$ , au-delà de laquelle le quadripôle est passif. Par ailleurs les transitions des gains U et MAG convergent à la même fréquence ( $F_{MAG} = F_{MAX}$ ). Ces fréquences caractérisent les performances en puissance des transistors micro-ondes et permettent de les comparer entre eux. Elles sont plus adaptées aux applications analogiques.

### 1.8 Etat de l'art des filières HEMT et HBT

Les figures I.13-I.16 représentent un état de l'art des différentes filières HEMTs et de la technologie HBT en termes de performances dynamiques d'après l'ITRS (International Technology Roadmap for Semi-conducteurs) [41].

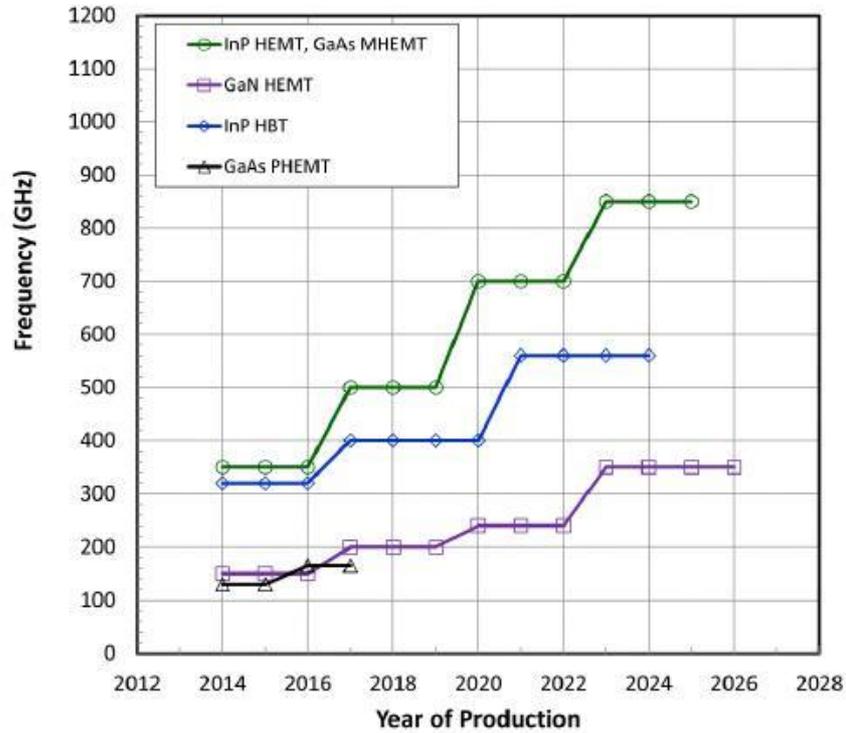


Figure I- 13 : Evolution de la fréquence de transition des HEMT et du HBT en production industrielle d'après l'ITRS.

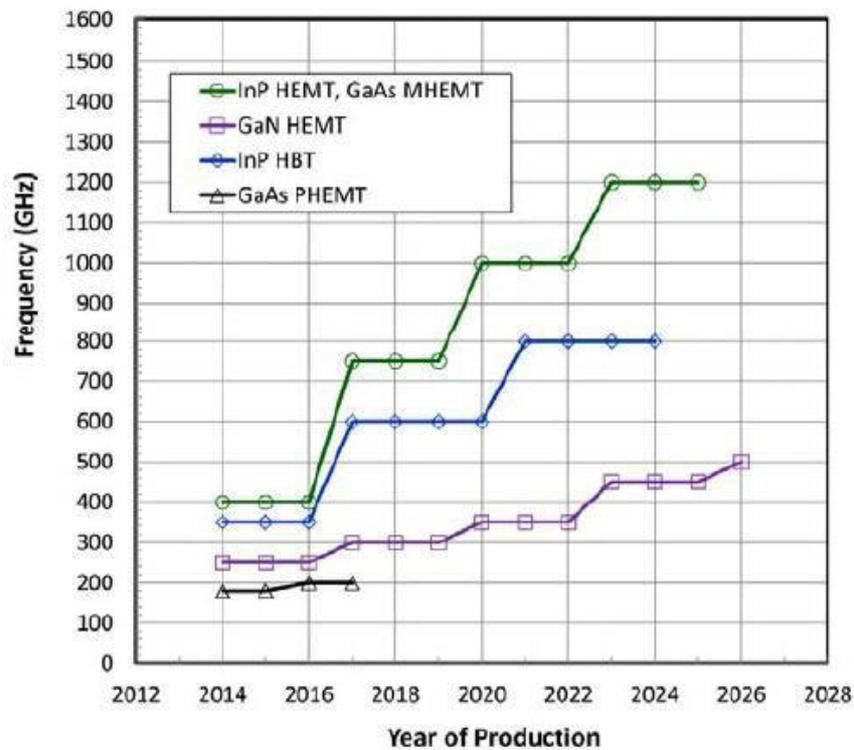


Figure I- 14 : Evolution de la fréquence maximale d'oscillation des HEMT et HBT en production industrielle d'après l'ITRS.

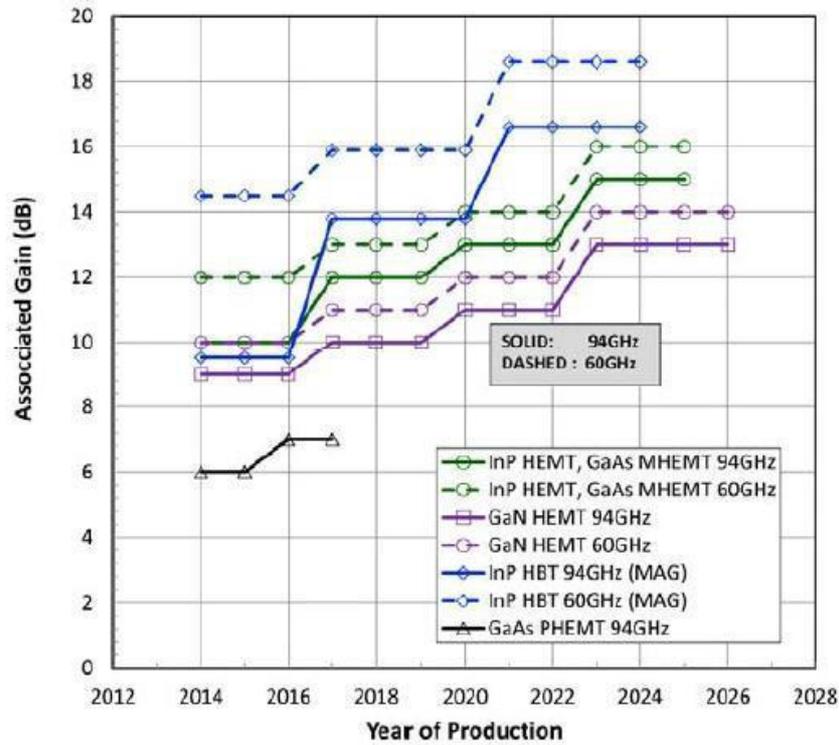


Figure I- 15 : Evolution du gain des HEMT et HBT en production industrielle d'après

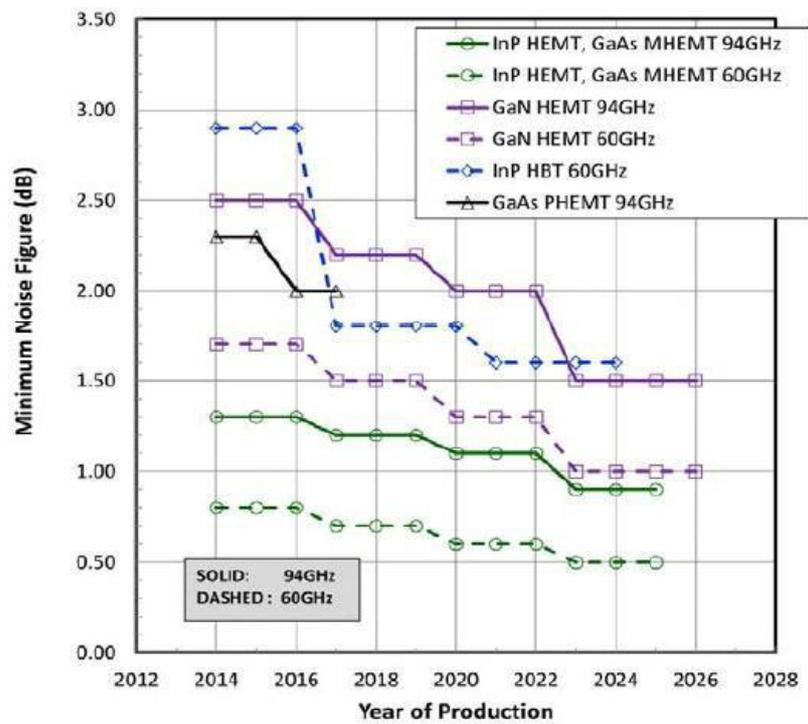


Figure I- 16 : Evolution du bruit des HEMT et HBT en production industrielle d'après l'ITRS.

## I.9 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté brièvement le principe de fonctionnement des transistors HEMT, PHEMT et MOS-PHEMT en termes structure de couche physique et diagrammes de bandes d'énergie, par la suite nous avons rappelé les principales propriétés physiques et électriques des matériaux semi-conducteurs binaires et ternaires tels que le GaAs, l'AlGaAs et l'InGaAs. Nous avons aussi rappelé les paramètres statiques et dynamiques des dispositifs HEMTs.

Le chapitre suivant décrira le modèle de transport de charges dans les structures HEMT/AlGaN/GaN.

## **Chapitre II**

### **Modèle physico- électrique du transistor HEMT**

## II.1 Introduction

Les nouveaux systèmes de Télécommunications requièrent des circuits très rapides et à faible bruit. Les matériaux III-N tels que l'AlGaN et le GaN sont les plus indiqués pour ce type d'application RF de par leurs propriétés physiques comparées au silicium. Ils sont ainsi des candidats idéaux pour la réalisation de mélangeurs, d'oscillateurs contrôlés en tension (VCO) ou encore d'amplificateurs faible bruit (LNA).

Ce chapitre décrit brièvement les propriétés et les paramètres d'AlGaN et de GaN, il décrit aussi les effets de polarisation dans le transistor HEMT à hétéro structure AlGaN/GaN/BGaN. Ainsi, il propose les modèles physico-électrique et physico-thermique développés pour le transistor HEMT AlGaN/GaN/BGaN.

## II.2 Le Nitrure de Gallium matériau approprié a un HEMT

### II.2.2 Propriété électronique du GaN

La conception des composants semi-conducteurs repose principalement sur le choix des matériaux semi-conducteurs utilisés. Pour le HEMT les concepteurs cherchent à distinguer celui qui permettra de délivrer une forte puissance à haute fréquence. En ce qui concerne la puissance, le matériau semi-conducteur doit satisfaire les conditions suivantes : permettre le passage d'un fort courant et présenter une tension de claquage élevée. Cette tension est définie par le champ de claquage qui est lui-même relié à l'énergie de la bande interdite du semi-conducteur. Plus un matériau possède une énergie de bande interdite importante et plus son champ de claquage est élevé. Par ailleurs, pour atteindre de hautes fréquences, il est nécessaire de choisir un semi-conducteur ayant une vitesse de saturation électronique élevée. Au plus les électrons transitent rapidement sous la grille, au plus la fréquence de travail du transistor peut être élevée. Notons que le GaN possède une vitesse de saturation électronique qui figure parmi les plus élevées du Tableau II.1. Le GaN démontre sa supériorité face au GaAs et aux semi-conducteurs à faible largeur de bande interdite.

Le GaN possède une mobilité électronique satisfaisante, ce qui favorise la montée en fréquence du transistor. Il est à noter que les valeurs indiquées dans le tableau représentent les mobilités électroniques du semi-conducteur massif. En revanche, les valeurs étoilées correspondent aux mobilités électroniques dans un canal à « 2 dimensions », induit par une hétérojonction. Le GaN se démarque à nouveau du SiC via la mobilité électronique, d'un ordre de grandeur supérieure, et ce grâce à la possibilité de former une hétérojonction. Ainsi, une hétérojonction à base de GaN permet d'obtenir une mobilité électronique deux fois plus élevée que dans le cas du SiC massif. Bien que la mobilité au niveau d'une hétérojonction AlGaN/GaN soit environ 5fois inférieure à celle trouvée dans AlGaAs/GaAs ou InAlAs/InGaAs, la densité de porteurs du gaz 2D dans AlGaN/GaN est nettement supérieure et la vitesse de saturation des électrons est au moins 2 fois plus élevée, ce qui est un avantage pour atteindre une puissance de sortie élevée. Pour finir, le GaN possède une conductivité thermique satisfaisante, bien qu'inférieure à celle du carbure de silicium, de l'AlN et du diamant, ce qui est primordial pour évacuer la chaleur dissipée par le composant [4, 9, 42].

Propriétés à 300 K	Si	GaAs	InP	4H-SiC	GaN	AlN	Diamant
Energie de Bande Interdite $E_g$ (eV)	1,12	1,43	1,35	3,25	3,43	6,0	5,45
Champ de Claquage $F_d$ (MV/cm)	0,3	0,4	0,45	3	3	12	10
Vitesse de Saturation des Electrons $v_s$ ( $\times 10^7$ cm/s)	1	1	1	2	1,75	1,5	2,7
Facteur de Mérite de Johnson normalisé $(F_d v_s / 2\pi)^2 / (F_d^{Si} v_s^{Si} / 2\pi)^2$	1	1,8	2,3	400	625	5184	8100
Mobilité des Electrons $\mu_e$ ( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )	1500	8500 10000*	4600 10000**	800	1000 2000***	300	1800
Densité d'Electrons par Unité de Surface $n_s$ ( $\times 10^{12}$ $\text{cm}^{-2}$ )	-	0,2*	3**	-	10***	-	-
Conductivité Thermique $\theta_K$ (W/cm.K)	1,5	0,5	0,7	4,9	1,5	2	22

**Tableau II- 1: Propriétés électroniques et thermiques concernant plusieurs semi-conducteurs connus [42].**

## II.2.2 Propriétés structurales

Le nitrure de gallium se cristallise sous deux formes différentes. Le poly type thermodynamiquement stable est la phase hexagonale (structure Wurtzite). Le polytype cubique (structure blende de zinc) est thermo dynamiquement métastable. Elles sont obtenues en choisissant des conditions de croissance adaptées. Nous présentons ici les deux structures cristallographiques et les constantes de maille de chacune des deux phases du GaN [43].

### II.2.2.1 Structure de type Wurtzite

C'est une structure thermodynamiquement très stable, constituée par deux sous-réseaux hexagonaux compacts, l'un contenant les atomes de gallium (Ga) et l'autre les atomes d'azote (N), interpénétrés et décalés suivant l'axe c de 5/8ème de la maille élémentaire.

La structure est idéale \_ quand elle est composée de tétraèdres réguliers, ce qui est le cas lorsque, le rapport  $c / a = \sqrt{3} = 1, 633$  et  $u = 8/3$ .

La maille Wurtzite est caractérisée par trois paramètres : a représente la longueur limite de l'hexagone de base, c'est la hauteur de la maille élémentaire, et u est la longueur de la liaison Ga-N suivant l'axe c.

Ga N wurtzite	c/a	u
Structure idéale	1.633	0.376
Structure réelle	1.627	0.377

**Tableau II- 2: Paramètres de la structure wurtzite idéale et réelle de GaN [44]**

Les cristaux würtzites réels sont stables si  $c / a \leq 1, 633$ . Pour  $c / a < 1, 633$  le paramètre u est donné par :

$$u = \frac{1}{3} \frac{a^2}{c^2} + \frac{1}{4}$$

Cela signifie que : quand  $c/a$  diminue,  $u$  augmente de sorte que les longueurs des 4 liaisons tétraédriques soient égales. Mais cette interaction entraîne une distorsion pour les angles entre les liaisons.

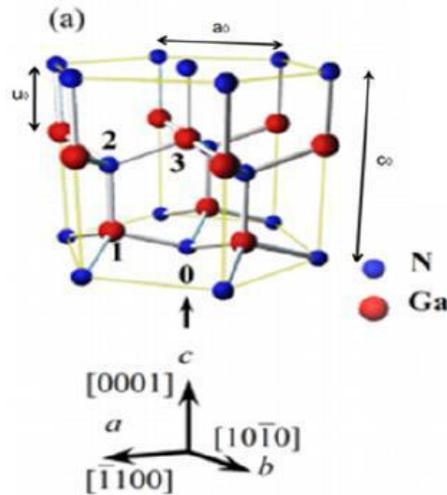


Figure II- 1: Structure wurtzite de nitrure de Gallium [45].

### II.2.2.2 Structure de type zinc blende

Thermodynamiquement métastable, elle est constituée de deux sous-réseaux cubiques à faces centrées d'atomes de gallium et d'azote décalés d'un quart par rapport à la diagonale de la maille ; le réseau réciproque de cette structure est un octaèdre à faces tronquées. Le tableau suivant indique les paramètres de maille pour les trois composés binaire nitrurés utilisés.

	GaN	AlN	InN
A	4.52	4.37	4.98

La figure II.2 représente la structure cristalline de type blende de zinc du GaN,  $a_0$  est sa valeur de maille élémentaire, à température ambiante  $a_0 = 4,511 \text{ \AA}$  [46].

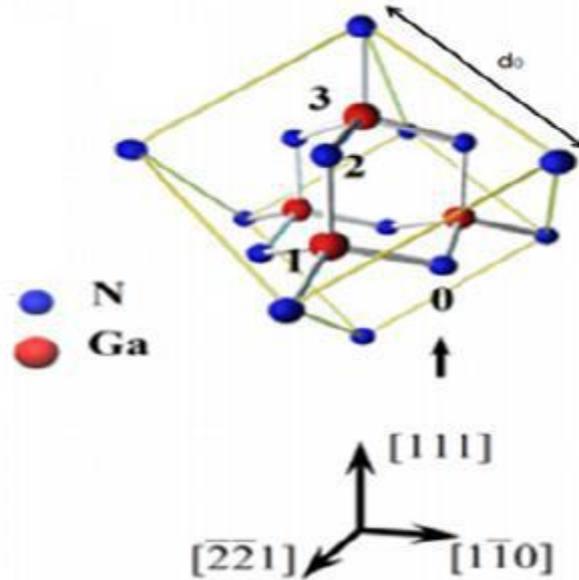


Figure II- 2 : Structure zinc blende de Nitrure de Gallium.

### II.3 Alliages $Al_xGa_{1-x}N$ et $B_xGa_{1-x}N$

Les alliages  $Al_xGa_{1-x}N$  et  $B_xGa_{1-x}N$  sont des semi-conducteurs à gap direct quel que soit le taux d'aluminium ou la portion du bore. Par contre, la variation de la largeur de bande interdite d' $Al_xGa_{1-x}N$  et du  $B_xGa_{1-x}N$  en fonction de  $x$  n'est pas tout à fait linéaire. Elle s'exprime par [47, 48]:

$$E_g(Al_xGa_{1-x}N) = E_g(AlN)x + E_g(GaN)(1 - x) - 1.3x(1 - x)$$

II.1

$$E_g(B_xGa_{1-x}N) = E_g(BN)x + E_g(GaN)(1 - x) - 7.28x(1 - x)$$

II.2

La variation de la permittivité d' $Al_xGa_{1-x}N$  et de  $B_xGa_{1-x}N$  s'exprime au moyen des équations II.3 et II.4 respectivement :

$$\varepsilon(Al_xGa_{1-x}N) = 8.5x + 8.9(1 - x)$$

II.3

$$\varepsilon(B_xGa_{1-x}N) = 7.1x + 8.9(1 - x)$$

II.4

### II.4 Substrats utilisés pour la croissance de nitrure de gallium

Le choix du substrat est déterminant pour ce qui concerne la qualité de l'hétéroépitaxie. La croissance des matériaux III-N est possible sur différents types de substrats. L'idéal est d'assurer directement la croissance du nitrure de gallium sur un substrat de GaN massif, afin de réduire les défauts structuraux.

Les caractéristiques de ces substrats sont répertoriées dans le tableau II.5.

Substrats	Structure cristalline	Paramètre de maille (Å°)	Conductivité thermique ( $W.cm^{-1} . K^{-1}$ )
$Al_2O_3$	Hexagonale	a =4.758 c =12.99	0.5
4H-SiC	Wurtzite	a =3.08 c =15.12	3.3
Si(111)	Cubique	a =5.4301	1.5

**Tableau II- 3: Caractéristiques cristallographiques des substrats utilisés pour la croissance.**

#### II.4.1 Le silicium(Si)

Le substrat silicium est très attractif non seulement parce qu'il présente une bonne morphologie de surface et est disponible à coût bas, mais également parce qu'il permet une intégration des dispositifs à base de GaN dans la microélectronique Silicium. Néanmoins, le GaN montre un désaccord de maille avec le Si (111) d'environ 17% associé à un désaccord de coefficients de dilatation thermique supérieur à 35%. Contrairement aux substrats  $Al_2O_3$  et SiC, le silicium Si possède une maille plus importante que celle du GaN. Par conséquent, le GaN se trouve par définition en extension lorsqu'il est épitaxié sur le Si (111) engendrant la formation de dislocations et de craquelures. Une couche de nucléation plus complexe composée de plusieurs sous couches d'AlN et de GaN (super réseau) est alors réalisée dont les conditions de croissance sont différentes de celles utilisées pour les substrats précédents. La croissance de la couche de GaN (buffer) est alors réalisée sur ce super réseau.

#### II.4.2 Le Saphir $Al_2O_3$

À l'origine des premières élaborations du matériau GaN, la majorité des couches élaborées étaient déposées sur substrat saphir. Ce substrat présente l'avantage d'un coût relativement faible, d'être facilement disponible, d'être semi isolant et d'avoir une grande stabilité en température. Les inconvénients sont : sa faible conductivité thermique (0.5 W/cm.k) et un fort désaccord en maille. Ce désaccord en maille entre les plans de base du GaN hexagonale étude saphir est de 30%, cependant lors de l'épitaxie, la maille est tournée de  $30^\circ$  par rapport à la maille des atomes d'Aluminium du saphir et le désaccord réel est dans ces conditions inférieur à 15%, malgré ce désaccord de maille important et une différence de coefficients de dilatation thermique de l'ordre de 35%, le saphir est néanmoins traditionnellement utilisé pour des raisons de coûts. Pour remédier au maximum à la formation de dislocation dans le GaN, on dépose tout d'abord une couche de nucléation d'AlN d'une dizaine à une centaine de nanomètre. Le désaccord de maille résiduel entraîne cependant la présence d'une grande densité de dislocation de l'ordre de  $10^{10-2}$ . Malgré cela, ce substrat a tout de même permis l'élaboration des dispositifs à base de GaN dans les domaines de l'optoélectronique et des hyperfréquences présentant de très bonnes performances. Cependant, ce matériau atteint aujourd'hui ses limites du fait de sa mauvaise conductivité thermique.

#### II.4.3 La courbure de silicium (SiC)

En ce qui concerne le substrat SiC (4H) de structure Wurtzite d'orientation [0001], les conditions d'épitaxie sont bien plus favorables. Le désaccord de maille et les coefficients de dilatation thermique sont respectivement de 3.5% et 25% avec le GaN. Par conséquent, les couches épitaxiées sur ce substrat présentent une meilleure qualité cristalline que celle élaborée sur Saphir. Afin d'améliorer encore la qualité cristalline du GaN sur SiC, une couche de nucléation en AlN de 100 nm environ est déposée dans un premier temps sur le substrat. Le AlN présente un désaccord de maille plus faible que le SiC (environ 1%) et un coefficient de

dilatation thermique identique au substrat. La croissance du GaN est alors réalisée sur cette couche de nucléation. Le SiC possède également une conductivité thermique environ sept fois plus élevée que celle du Saphir, mais il est très coûteux.

## II.5 Effets de polarisations dans le GaN

### II.5.1 Polarisation dans les HEMTs AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>

Les transistors HEMTs Ga<sub>N</sub> typiques peuvent posséder une densité de charge dans le canal atteignant plus de  $1.10^{13}$  charges.cm<sup>-2</sup> sans pour autant doper la structure de manière intentionnelle. En effet, on pourra constater la présence d'un dopage résiduel de  $1.10^{16}$  cm<sup>-3</sup>. Ceci est dû à la structure même du transistor qui est le siège de deux types de polarisation, la polarisation piézoélectrique et la polarisation spontanée [48].

### II.5.2 Polarisation spontanée

Il existe également des effets de polarisation spontanée au sein même du volume de Ga<sub>N</sub> dus à la structure hexagonale du cristal et à la non-superposition des barycentres des charges positives avec ceux des charges négatives. Il en résulte une succession de dipôles orientés de l'atome d'azote vers l'atome de gallium que l'on notera  $P_{sp}$  (Figure II.3) et qui s'exprime en fonction de la fraction d'aluminium introduite dans la barrière d'AlGa<sub>N</sub> selon l'équation (II.5)

$$P_{sp,Al_x,Ga_{(1-x)}N}(x) = -0.052x - 0.029 \text{ C/m}^2 \quad \text{II.5}$$

Cette polarisation est indépendante de l'état de contrainte du matériau et est due à la liaison polaire existant entre l'atome de Gallium et les atomes d'azote. Le vecteur qui en résulte est orienté selon l'axe [0001] et a une valeur négative de  $-0,029 \text{ C.m}^{-2}$  pour une couche de Ga<sub>N</sub> pure et de  $-0,045 \text{ C/m}^2$  pour une structure composée de 30 % d'aluminium, la convention étant de prendre la direction positive de l'atome de gallium vers l'atome d'azote le plus proche (Figure II-3). Il est à noter que la polarisation spontanée est exclusive à la structure hexagonale du Ga<sub>N</sub> car la symétrie cubique empêche toute création de polarisation spontanée. C'est une des raisons pour lesquelles la structure hexagonale est la seule exploitée pour l'épitaxie de couches semi-conductrices utilisées dans les transistors de types HEMT à base de Ga<sub>N</sub>.

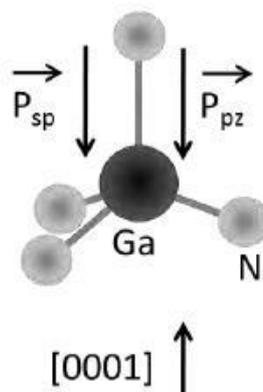


Figure II- 3: Structure wurtzite [44].

### II.5.3 Effets piézoélectriques

Les matériaux piézoélectriques sont caractérisés par leur propension à répondre à des contraintes mécaniques par un champ électrique de manière proportionnelle. La réciprocité est aussi vraie. En d'autres termes, la polarisation piézoélectrique dans une couche semi-conductrice apparaît lorsque celle-ci est soumise à une contrainte qui modifie la symétrie du cristal.

Tous les matériaux III-N sont sujets aux effets piézoélectriques à cause de leur géométrie non centrosymétrique. Les nitrures, du fait de la polarisation forte de la liaison III-N, sont plus particulièrement sensibles à ces effets. Dans le cas de l'hétérojonction AlGaIn/GaN c'est la couche supérieure d'AlGaIn qui vient créer la contrainte mécanique, elle s'exprime en fonction des déformations selon les trois axes à l'aide de l'équation (II.6) :

$$P_{pz} = e_{33} \cdot \varepsilon_z + e_{31} \cdot (\varepsilon_x + \varepsilon_y) \quad \text{II.6}$$

Où  $e_{ij}$  sont les éléments du tenseur piézoélectrique (en C/m<sup>2</sup>) et  $\varepsilon_i$  les déformations selon les trois axes x,y et z. Par convention, ces déformations prennent des valeurs négatives dans le cas d'une couche d'AlGaIn en tension, et positive dans le cas d'une couche d'AlGaIn en compression.

Il est possible d'exprimer la polarisation piézoélectrique formée en fonction de la déformation dans le plan de la couche uniquement, car dans les épitaxies minces comme la barrière d'AlGaIn, les contraintes sont appliquées dans le plan la couche.

On exprime donc la déformation selon l'axe z en fonction de celle selon le plan de la barrière d'AlGaIn par l'équation (II.7) :

$$\varepsilon_z = -2 \cdot \frac{C_{13}}{C_{33}} \cdot \varepsilon_x \quad \text{II.7}$$

Où  $C_{13}$  et  $C_{33}$  sont les constants élastiques du matériau utilisé pour réaliser la couche, ici l'AlGaIn. La polarisation piézoélectrique selon l'axe z s'écrit alors par l'équation (II.8) :

$$P_{pz} = 2 \cdot \varepsilon_x \left( e_{31} - e_{33} \frac{C_{13}}{C_{33}} \right) \quad \text{II.8}$$

Etant donné que le terme  $e_{31} - e_{33} \frac{C_{13}}{C_{33}}$  est négative, et en considérant ce qui a été dit sur les déformations, cette polarisation piézoélectrique est négative dans une structure où la couche d'AlGaIn est en tension, et positive dans une structure où elle est en compression. Dans le cas de l'interface AlGaIn/GaN, la couche d'AlGaIn est en tension.

Le champ électrique ainsi créé permet l'apparition de fortes densités de porteurs dans le canal bidimensionnel des structures au niveau de l'interface AlGaIn/GaN. L'impact de ce champ sur la concentration de porteurs est conditionné par la fraction molaire d'aluminium dans la barrière (Figure II.4) ainsi que par son épaisseur. Plus la fraction molaire d'aluminium augmente et plus l'extension de la maille cristalline n'est pas grande, créant ainsi un champ électrique orienté vers l'AlGaIn augmentant la densité de porteurs dans le canal. La quantité d'aluminium présent dans la barrière est cependant limitée par les effets cités plus haut. Pour un alliage comprenant 30% d'aluminium, la polarisation piézoélectrique a été estimée à 0,011 C/m<sup>2</sup>, ce qui la rend minoritaire devant la polarisation spontanée inhérente à une telle structure.

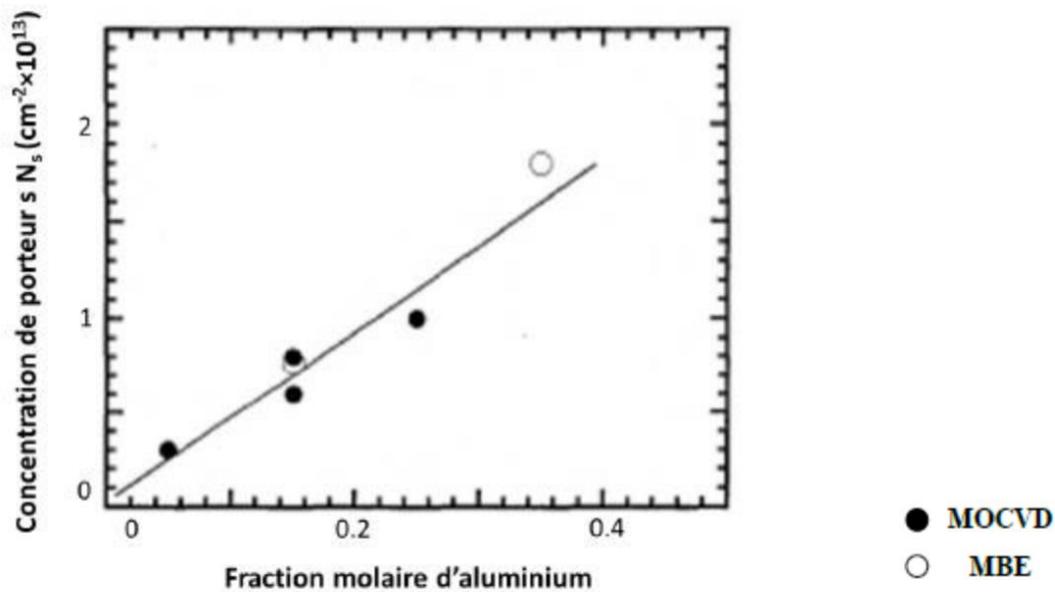


Figure II- 4: Valeur expérimentale de  $N_s$  en fonction de la fraction molaire d'Aluminium pour différentes techniques d'épitaxie des structures HFET AlGaIn/GaN[42]

#### II.5.4 Les différents types d'interface

Il existe deux types d'interfaces entre le GaN et l'AlGaIn. En effet, les structures peuvent être épitaxiées de façon à créer une interface "Ga-face" (Figure II.5a) ou une interface "N-face" (Figure II.5b). Dans le cas du GaN "N-face", les structures épitaxiées doivent être de type GaN/AlGaIn/GaN car le gaz bidimensionnel d'électrons est formé dans le volume de GaN supérieur du fait des effets piézoélectriques (Figure II.6 b) et de la polarisation spontanée. La qualité de l'interface AlGaIn/GaN est aussi un axe de recherche important quant à l'amélioration de la fiabilité des transistors et le choix de la terminaison "Ga-face" ou "N-face" du volume de GaN en est un facteur prépondérant. Pour bien des raisons, il apparaît que le choix d'une interface "Ga-face" soit le plus approprié. Citons par exemple les résultats obtenus sur ce genre de structure et pour lesquelles la rugosité de l'interface a été déterminée comme étant inférieure à 1 nm, ainsi que la possibilité de se passer de l'implantation de magnésium en guise d'accepteur pour réaliser les couches isolantes.

Au niveau de la mobilité électronique au sein du gaz bidimensionnel des études comparatives ont été menées sur les deux types d'interfaces. Pour les hétérojonctions "N-face", les mobilités maximales ont été atteintes pour des structures présentant une barrière non dopée d'AlGaIn de 400 Å avec une fraction d'aluminium de 25 % créant une densité de porteurs atteignant  $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  au niveau de l'interface. Pour une température de 300 K la mobilité constatée est de  $1150 \text{ cm}^2/\text{V.s}$  et de  $3450 \text{ cm}^2/\text{V.s}$  à 77 K. De meilleures mobilités ont été par ailleurs constatées sur des structures similaires possédant une interface Ga-face. Des valeurs de  $1432 \text{ cm}^2/\text{V.s}$  à 300 K et  $3900 \text{ cm}^2/\text{V.s}$  à 77 K ont été observées pour ces structures ayant une densité de porteurs de  $1,3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ , une barrière de 200 Å et une fraction d'aluminium dans la barrière d'AlGaIn de 35 %.

Il a également été reporté dans des variations conséquentes de la mobilité dans le gaz bidimensionnel en fonction de l'épaisseur du volume de GaN. Cette variation est directement liée à l'amélioration de l'interface quand le volume de GaN augmente. Pour une structure ayant une barrière dopée d'AlGaIn de 30 Å et pour une température de 300 K, la mobilité électronique a été déterminée comme étant égale à  $1496 \text{ cm}^2/\text{V.s}$  et  $1575 \text{ cm}^2/\text{V.s}$  respectivement pour un volume de GaN de 1,1  $\mu\text{m}$  et 2,2  $\mu\text{m}$ . A 77 K, les mobilités déterminées sont respectivement de  $4436 \text{ cm}^2/\text{V.s}$  et  $7520 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ .

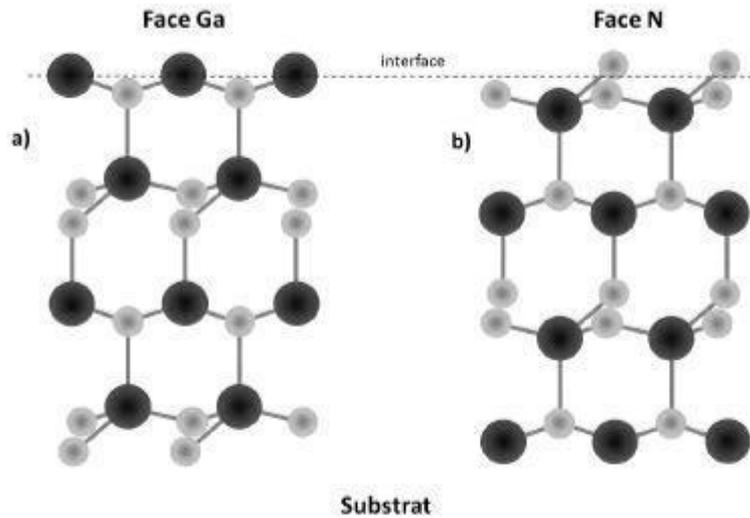


Figure II- 5 : Représentation des deux polarités différentes d'une structure GaN :  
a) Ga-face, b) N-face.

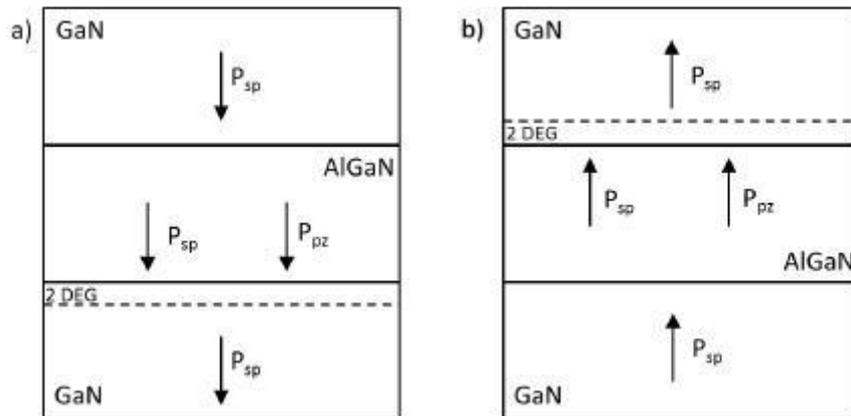


Figure II- 6 : Bilan des polarisations spontanées et piézoélectriques. a) GaN de type Ga-face, b) GaN de type N-face [1].

### II.5.5 La polarisation résultante

D'après Bernardini [48] la contribution de la polarisation spontanée est comparable à celle de la polarisation piézoélectrique dans les nitrures, et ne doit donc pas être négligée. La polarisation totale dans la couche de nitrure en phase hexagonale sera alors la résultante de la somme des deux types de polarisations : piézoélectrique et spontanée, elle s'exprime par l'équation (II .6) :

$$\vec{P} = \vec{P}^{sp} + \vec{P}^{pz}$$

II.9

Dans les nitrures en phase hexagonale une orientation est importante : il s'agit du sens de la liaison Ga-N suivant la direction [0001]. Cette orientation est appelée polarité de la couche comme illustre la figure II.7. Les échantillons que nous avons étudiés sont de polarité gallium.

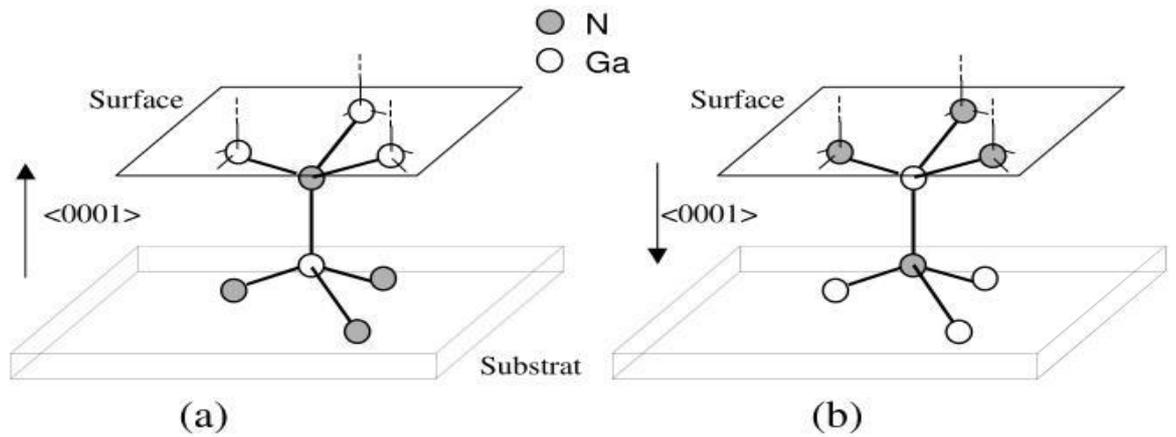


Figure II- 7 : Polarité des couches de GaN hexagonales. (a) polarité gallium (b) polarité azote [43].

Dans les nitrures de polarité gallium la polarisation spontanée est orientée suivant la direction de croissance dans le même sens que celle-ci. Pour ce qui est de la polarisation piézoélectrique elle aussi orientée suivant l'axe de croissance. En revanche son sens dépend du type de contrainte présent dans la couche. Les différentes possibilités sont représentées dans la figure II.8.

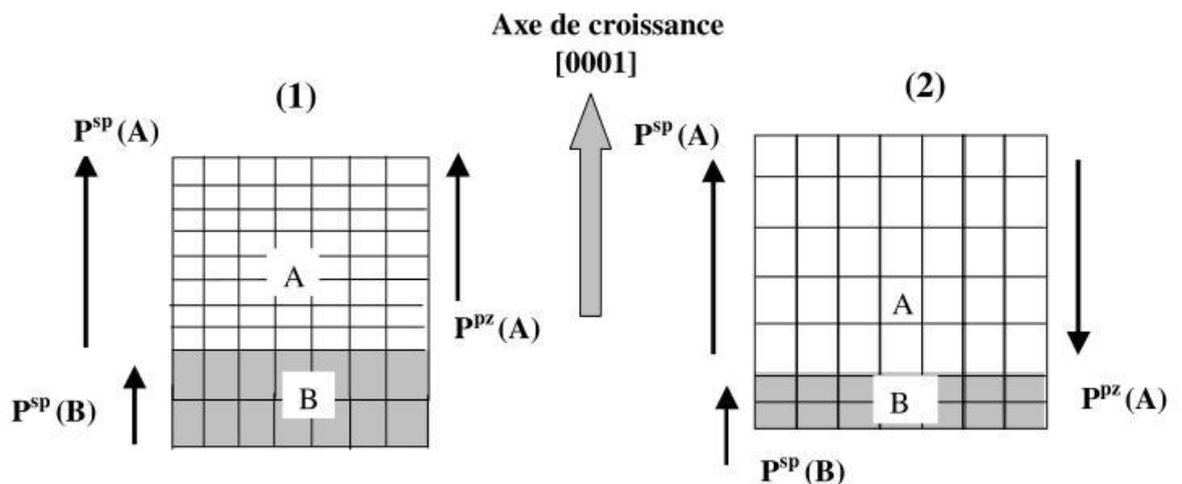


Figure II- 8 :Orientation des polarisations spontanée et piézoélectrique pour les nitrures de polarité gallium suivant la contrainte : (1) la couche A est en tension sur la couche B, (2) la couche A est en compression sur la couche [43].

## II.6 Modèle physico-électrique du HEMT AlGaIn/GaN

### II.6.1 Modèle de transport de porteurs de charges

Il existe principalement deux types de modélisations qui peuvent décrire le fonctionnement du composant à semi-conducteurs :

- Les modèles macroscopiques, qui résolvent numériquement (et non par des expressions analytiques) les équations de transport dans les semi-conducteurs couplés à l'équation de
- Les modèles microscopiques ou particuliers, qui consistent à suivre l'évolution de chaque électron dans l'espace et dans le temps.

La modélisation numérique de la dynamique des porteurs libres dans les composants semi-conducteurs repose sur la résolution de l'équation de transport de Boltzmann :

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{q \cdot \vec{E}}{\hbar} \cdot \overrightarrow{\text{grad}}_k(f) + \vec{v} \cdot \overrightarrow{\text{grad}}_r(f) = \left( \frac{\partial f}{\partial t} \right)_c \quad \text{II.10}$$

Cette équation régit l'évolution de la fonction de distribution  $f$ , qui est la probabilité de présence d'une particule au point  $(r, k)$  de l'espace des phases à l'instant  $t$ . Le second terme rend compte de la force de Coulomb dans un champ  $E$ . Le troisième terme représente les forces de diffusion résultant des gradients de concentration. Le second membre rend compte des collisions avec le réseau cristallin. L'équation de Boltzmann est valable tant que n'interviennent pas les effets quantiques, c'est-à-dire pour des composants ayant des zones actives suffisamment épaisses.

La simulation électrique de composants électroniques tels que les HMETs revient à déterminer les potentiels électriques et les flux de porteurs. Pour déterminer ces quantités, nous utilisons les deux lois suivantes :

- La loi de continuité, qui permet de définir le flux de porteurs et donc le courant électrique
- La loi de Poisson qui permet de définir la densité de charges et donc le potentiel électrostatique (eq. II.11).

$$-\Delta V = \frac{q}{\epsilon_0 \epsilon_r} (p - n + N) \quad \text{II.11}$$

Dans (II.11),  $V$  est le potentiel,  $q$  est la charge électrique élémentaire,  $\epsilon_r$  est la constante diélectrique du semi-conducteur,  $n$  et  $p$  sont respectivement les concentrations des électrons et des trous et  $N$  est la concentration des impuretés ionisées de type donneur.

Les équations de continuité des densités de porteurs libres, électrons (eq. II.12) et trous (eq. II.13) représentent la continuité des flux de porteurs :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \text{div} \vec{J}_n + G_n - R_n \quad \text{II.12}$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \text{div} \vec{J}_p + G_p - R_p \quad \text{II.13}$$

L'expression de la recombinaison de type Shockly Read Hall  $R$  est donnée par (II.14) [49, 50] :

$$R = \frac{np - n_i^2}{\tau_n (n + n_1) + \tau_p (p + p_1)} \quad \text{II.14}$$

$n_i$  est la concentration intrinsèque,  $\tau_n$  et  $\tau_p$  sont les durées de vie des porteurs.

Les vecteurs densités des courants dus au champ électrique sont donnés par les expressions II.15 et II.16 :

$$\vec{J}_n = -qn\mu_n \text{grad } V + qD_n \text{grad } n$$

$$\vec{J}_p = -qp\mu_p \text{grad } V - qD_p \text{grad } p$$

Avec  $\mu_n$  et  $\mu_p$  les mobilités des porteurs et  $D_n$  et  $D_p$  les coefficients de diffusion, reliés entre eux par l'équation d'Einstein (II.17):

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{k.T_L}{q} \quad \text{II.17}$$

TL est la température de la maille cristalline.

Ceci nous conduit à une deuxième formulation des densités de courants :

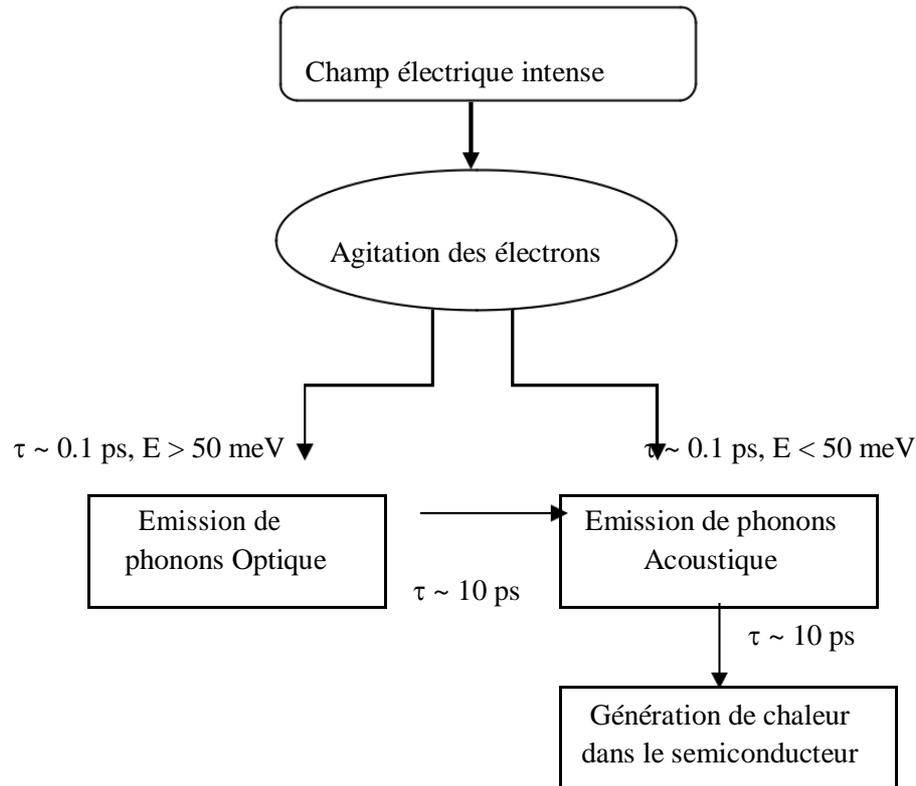
$$\vec{J}_n = -qn\mu_n \vec{E} + \mu_n kT_L \text{grad } n \quad \text{II.18}$$

$$\vec{J}_p = -qp\mu_p \vec{E} - \mu_p kT_L \text{grad } p \quad \text{II.19}$$

## II.6.2 Génération et Transfer de la chaleur

La figure II.9 résume le mécanisme physique de la génération de chaleur dans les composants à semi-conducteurs. Le processus est comme suit :

Les tensions de polarisation  $V_{gs}$  et  $V_{ds}$  appliquées au transistor crée un champ électrique dont le pic se situe à proximité du contact de drain. Ce champ accélère les porteurs de charge (e.g. les électrons dans la bande de conduction dans un transistor à canal de N) qui gagnent de l'énergie et de la chaleur [51,52]. Il s'en suit alors des collisions électroniques. De cette agitation, des phénomènes naissent comme par exemple la génération/recombinaison, collisions d'électrons, ... Des quanta d'énergie sont alors émis sous forme de phonons. Deux types de phonons se distinguent, les phonons optiques lorsque l'énergie des électrons est en-dessous de 50 meV et les phonons acoustiques lorsque leur énergie est au-dessus de 50 meV [52]. L'émission de phonons génère de la chaleur dans le semi-conducteur



**Figure II- 9 : Mécanisme physique de génération de la chaleur.**

Le principe de la modélisation thermique repose sur la résolution de l'équation de diffusion de la chaleur (II.20) [51].

$$\rho C_p \frac{\partial T_L}{\partial t} - \text{div} \left( k_L \vec{\nabla}(T_L) \right) = H \quad \text{II.20}$$

Dans l'expression (II.20),  $\rho$  est la masse volumique du matériau en  $\text{Kg/m}^3$ ,  $C_p$  est la capacité calorifique massique en  $\text{J/Kg}$ ,  $k_L$  est la conductivité thermique du matériau en  $\text{W/mK}$ .

Le terme  $H$  indique le terme de la génération de chaleur qui se manifeste par l'émission des phonons optiques et acoustiques décrite précédemment.

Plusieurs modélisations de la source de chaleur ont été proposées [53, 54] : l'effet Joule [55], Effet Thomson [56], génération-recombinaison des électrons et des trous [57].

Un modèle simplifié pour obtenir le taux de génération calorifique pour un volume donné est couramment admis pour les technologies MOSFET [53]:

$$H = J \cdot E + (R - G)(E_g + 3k_B T) \quad \text{II.21}$$

Le premier terme de l'expression (II.21) est l'effet Joule dû à la résistance électrique du semi-conducteur. Ce terme correspond au produit scalaire du vecteur champ électrique et celui de la densité de courant. Le second terme représente le taux d'échauffement dû aux générations (G) et aux recombinaisons (R) non radiatives des paires électron-trou,  $E_g$  est le gap du semi-conducteur,  $k_B$  est la constante Boltzmann et  $T$  est la température ambiante [33, 38]. Dans la majorité des technologies MOSFETs l'échauffement dû aux recombinaisons des porteurs est très faible comparé à celui lié à l'effet Joule.

Ainsi, une étude thermodynamique rigoureuse sur la génération de chaleur dans les composants à semi-conducteurs a été développée par Wachutka [33, 39]. D'où la génération de la chaleur dans ces composants tels que les DGMESFETs et les HEMTs est due principalement à l'effet Joule. Ce dernier correspond au premier terme de l'équation II.21.

## II.7 Résolution numérique par la méthode des éléments finis

Le système des équations fondamentales du transport des charges dans les semi-conducteurs cités dans le paragraphe II.3 est résolu numériquement, en choisissant des conditions aux limites appropriées.

La méthode des éléments finis est très largement utilisée pour l'étude de comportement statique d'un tel composant. Elle permet de transformer un problème à équations différentielles en un système numérique pouvant être résolu par des techniques numériques. Cette méthode consiste à diviser la structure à étudier, en morceaux de base appelés maillage. On applique à chaque élément du maillage les différentes équations qui décrivent le comportement physique du dispositif étudié et on définit les conditions aux limites du système. Le système d'équations est ensuite résolu à l'aide d'algorithmes appropriés d'analyse numérique.

### II.7.1 Paramètres d'entrée du modèle numérique

La simulation doit être effectuée par l'introduction dans le modèle numérique des constantes, des paramètres physiques, électriques et thermiques des matériaux semi-conducteurs utilisés, ainsi que les paramètres technologiques du transistor étudié. Les principaux paramètres d'entrées du modèle numérique sont :

- Les paramètres technologiques du HEMT AlGa<sub>x</sub>N/GaN/BGa<sub>x</sub>N
- La vitesse des porteurs en fonction de la température.
- La mobilité des porteurs en fonction de la température.
- Les constantes diélectriques.
- Le gap des matériaux (AlGa<sub>x</sub>N, GaN, BGa<sub>x</sub>N) en fonction de la température
- La densité de donneurs ionise.
- Les affinités électroniques des matériaux semi-conducteurs
- Les résistances des contacts ohmiques

## II.8 Configuration de la densité de charges qui constitue le 2DEG

C'est sans aucun doute l'une des étapes les plus importantes dans la conception du composant. C'est à ce niveau-là que l'on configure la structure pour qu'elle tienne compte des polarisations piézoélectriques et spontanées des matériaux GaN et Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N, c'est-à-dire entre la couche barrière et le canal.

C'est donc à cet instant que l'on configure la densité électronique du canal situé au niveau de la partie supérieure de la couche de Nitrure de Gallium et qui s'étend sur quelques angströms afin de constituer le gaz bidimensionnel d'électrons. Or, d'après le tutorial d'ATLAS [58], nous avons deux manières de paramétrer ces charges occasionnées par les deux sortes de polarisations.

- **Configuration utilisant les instructions MATERIAL et REGION:**

D'après le tutorial d'ATLAS [58], la polarisation des matériaux Wurtzite est caractérisée par deux composantes, la polarisation spontanée PSP et la polarisation piézoélectrique PPI. On déduit alors la polarisation totale dans ces matériaux Pt qui correspond à la somme de PSP et PPI. Or, nous avons la possibilité de configurer ces deux paramètres pour chacun des matériaux de type Wurtzite en utilisant les instructions MATERIAL et REGION.

On rappelle que la polarisation piézoélectrique présente au sein d'un matériau Wurtzite est donnée par la relation suivante :

$$P_{PZ_{AlGaN}}(x) = 2 \frac{a-a_0(x)}{a_0(x)} \left[ e_{31}(x) - e_{33}(x) \frac{c_{13}(x)}{c_{33}(x)} \right] \text{ C/m}^2 \quad (\text{II.22})$$

- **Configuration utilisant l'instruction INTERFACE**

C'est par cette méthode que les charges d'interface seront configurées car elle permet de les localiser de manière plus précise à la frontière AlxGa1-xN/GaN. Il s'agit tout d'abord de donner directement le résultat du calcul de  $|\sigma^+|$ , densité de charges à l'interface dont l'expression analytique est rappelée ci-dessous avec l'équation :

$$|\sigma^+| = | \text{PSP AlxGa1-xN}(x) + \text{PPZ AlxGa1-xN}(x) + \text{PPZ GaN} - \text{PSP GaN} | \text{ C/m}^2 \quad (\text{II.23})$$

Les expressions de PSP AlxGa1-xN(x), PPZ AlxGa1-xN(x), PPZ GaN et PSP GaN sont données au paragraphe II-2.

C'est le paramètre **CHARGE** de l'instruction **INTERFACE** qui permet de spécifier la valeur de  $|\sigma^+|$  en unité  $\text{cm}^{-2}$ .

De cette façon, avec un x fixé (par exemple à 26%), on déduit la valeur exacte de  $|\sigma^+|$ . Par ailleurs, il faut préciser qu'il s'agit d'une interface semi-conducteur/semi-conducteur, il faut donc indiquer le paramètre **S.S** dans l'instruction **INTERFACE**.

Enfin, il est nécessaire de préciser la localisation de cette interface. Il faut pour cela utiliser les paramètres de positionnement xmin, xmax, ymin et ymax qui vont constituer une fenêtre. La densité de charge configurée plus haut sera appliquée à toute interface semi-conducteur/semi-conducteur se situant à l'intérieur de cette fenêtre.

Enfin, il est possible de visualiser la répartition de ces charges à l'interface à l'aide du module **TONYPLOT de Silvaco** en lançant la fenêtre graphique qui fait apparaître la structure du composant. Il s'agit alors de trouver un modèle qui permettra de configurer deux paramètres physiques importants : la mobilité des électrons et des trous (même s'ils sont minoritaires car le 2DEG est un canal d'électrons) dans la barrière et le canal lorsque le champ devient plus important, et la vitesse de saturation des porteurs de charges. Cela est rendu possible avec le modèle de mobilité dépendant d'un champ électrique parallèle (c'est un modèle extrait du tutorial d'ATLAS dont le nom est « Parallel Electric Field Dependent Mobility », en effet c'est le model fldmob).

Dans un premier temps, ce modèle de mobilité nous permettra d'effectuer la transition entre le comportement des porteurs de charges en champ faible et leur comportement en champ élevé.

## II.9 *Conclusion*

Dans ce second chapitre, nous avons présenté les principales propriétés électriques et structurales du GaN ainsi que les différents types de polarisations dans le transistor HEMT AlGaIn/GaN/BGaIn tels que la polarisation spontanée, piézoélectrique et la polarisation résultante. Ensuite, nous avons élaboré un modèle de transport des porteurs de charges du transistor HEMT, c'est un modèle numérique qui inclut les lois physiques régissant le fonctionnement et le comportement DC du composant, ainsi, la configuration des différents paramètres de transport de charges sous le module Atlas du simulateur SILVACO.

## **Chapitre III : Résultats et Interprétations**

### III.1 Introduction

Le nitrure de gallium (GaN) et ses alliages à base d'indium et de bore sont très largement utilisés pour fabriquer des transistors à haute mobilité électronique (HEMT, AlGaIn/GaN).

Récemment, l'incorporation du bore dans les alliages B<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N, qui permet de varier voire d'ajuster la résistivité électrique du matériau, a permis la réalisation des transistors HEMTs très performants. Les mécanismes à l'origine de ces performances ne sont pas simples et nécessitent une étude approfondie des phénomènes de transport dans ces topologies.

Dans ce chapitre, nous présenterons l'outil de simulation SILVACO que nous avons utilisé pour l'étude de ce composant. Ensuite, nous étudierons les caractéristiques statiques et Radio fréquences du HEMT AlGaIn/GaN/B<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N. Nous analyserons le diagramme des bandes d'énergie, les distributions du champ électrique et de la vitesse de saturation, l'influence de la température sur les caractéristiques statiques, sur le potentiel, sur la concentration en électron...etc.

### III.2 Description des modules de simulateur SILVACO

Le terme SILVACO « pour SiliconValley Corporation » est une société américaine leader dans la vente de logiciels de TCAD (Technology Computer Assited Design). Cet outil de conception permet de simuler le comportement électrique et thermique d'un composant électronique en tenant compte de sa structure (dopage, nature des matériaux, géométries, propriétés de transport,...). La TCAD permet d'aider à la conception des composants et/ou de comprendre les mécanismes physiques qui régissent leur fonctionnement. L'avantage majeur de ce type de simulateur est qu'il donne la possibilité de visualiser des phénomènes physiques difficilement accessibles et donc observables.

#### III.2.1 Les outils de simulation ATLAS

Le logiciel de simulation ATLAS est un simulateur de modélisation bidimensionnelle des composants, il permet la résolution des équations différentielles issues de la physique des composants comme celles de la diffusion ou du transport pour des géométries discrètes il est donc capable de prédire les caractéristiques électriques de la plupart des composants semi-conducteurs en régime continue, transitoire ou fréquentiel. En plus du comportement électrique "externe". ATLAS a été conçu de façon à pouvoir utiliser d'autres outils qui facilitent son utilisation, ces outils sont les suivants [58].

Ce simulateur est composé principalement de deux parties :

- Une partie traitement numérique (méthode d'intégration, de discrétisation...).
- Une partie formée des modèles physiques des composants semi-conducteurs les plus récents.
- ATLAS a été conçu de façon à pouvoir utiliser d'autres outils qui facilitent son utilisation (figure III.1). Ces outils sont les suivants :
  - DECKBUILD : il s'agit de l'environnement principal, il permet d'ouvrir ou de charger des decks (des fichiers contenant le code pour la description et la simulation de structures nécessaires à Atlas et aux autres modules de Silvaco). Pour lancer le simulateur Atlas à partir de deckbuild, il faut que le deck contienne la commande **go atlas** (figure III.2).
  - TONYPLOT : il s'agit de l'interface d'affichage de structures, de courbes et de résultats de simulations (tensions et courants de polarisation en statique ou paramètre S, température du réseau,...) (voir figure III.3).

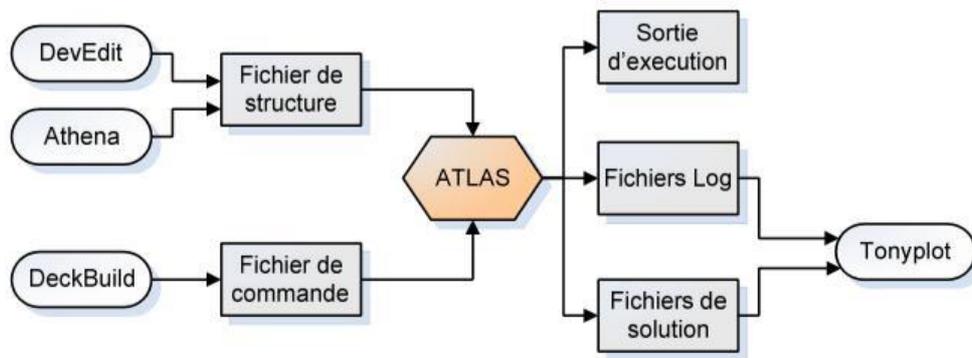


Figure III- 1: Schéma synoptique des modules utilisés dans la simulation par SILVACO.

```

# (c) Silvaco Inc., 2015
go atlas
#Title HEMT B GaN Ids-Vds and Ids-Vgs characteristics
mesh auto width=400

#
# SECTION 1: Mesh input
x.mesh loc=0.0 spac=0.05
x.mesh loc=0.15 spac=0.05
x.mesh loc=0.25 spac=0.05
x.mesh loc=0.5 spac=0.01
x.mesh loc=0.75 spac=0.01
x.mesh loc=1.0 spac=0.01
x.mesh loc=1.02 spac=0.01
x.mesh loc=1.05 spac=0.01
x.mesh loc=1.1 spac=0.02
  
```

Figure III- 2 : Menu de commandes de DeckBuild

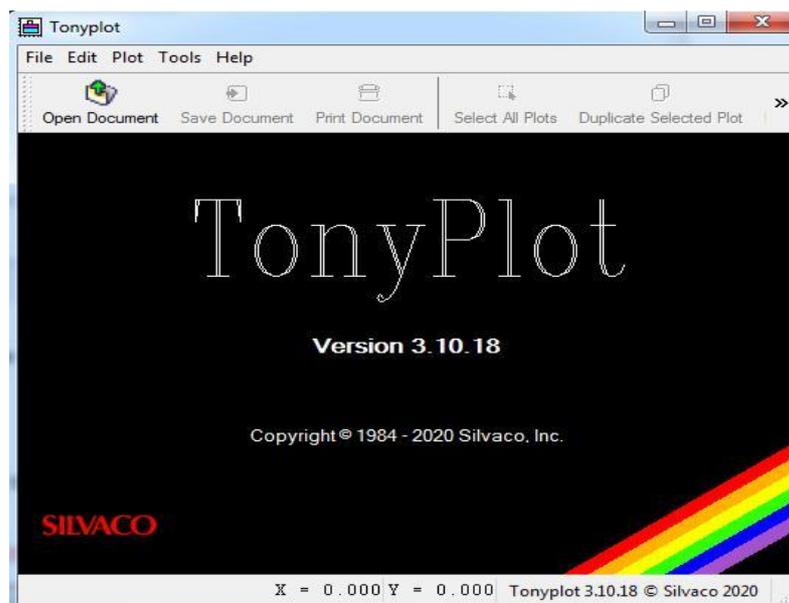


Figure III- 3 : Fenêtre de module TonyPlot.

### III.3 Topologie de la structure étudiée

Afin de définir les paramètres technologiques de la structure à simuler, tels que les épaisseurs et les longueurs des différentes couches, nous avons calibré la structure de la figure III.4.

La topologie de la structure étudiée est celle d'un HEMT  $\text{Al}_{0.26}\text{Ga}_{0.74}\text{N}/\text{GaN}/\text{BGaN}$  épitaxie sur un substrat Si. La taille de substrat est de  $5,4 \times 5 \mu\text{m}^2$ .

L'épitaxie se compose d'une couche d'AlN (Nitrure d'Aluminium), suivie de  $1,775 \mu\text{m}$  d'une couche canal de GaN non dopé contiendra dans sa zone supérieure, le gaz bidimensionnel ou canal d'électrons vient ensuite la couche barrière, elle est fabriquée avec un matériau appartenant à la famille des éléments nitrures :  $\text{Al}_{0.26}\text{Ga}_{0.74}\text{N}$  son épaisseur est de 23 nm. Les longueurs des contacts de source, grille et drain sont de  $1 \mu\text{m}/0,25 \mu\text{m}/1 \mu\text{m}$  respectivement. Les distances source-grille et grille-drain sont de  $0,77 \mu\text{m}$  et  $1,32 \mu\text{m}$  respectivement. La densité de charge à l'interface  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}/\text{GaN}$  est fixée à  $9,5 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ .

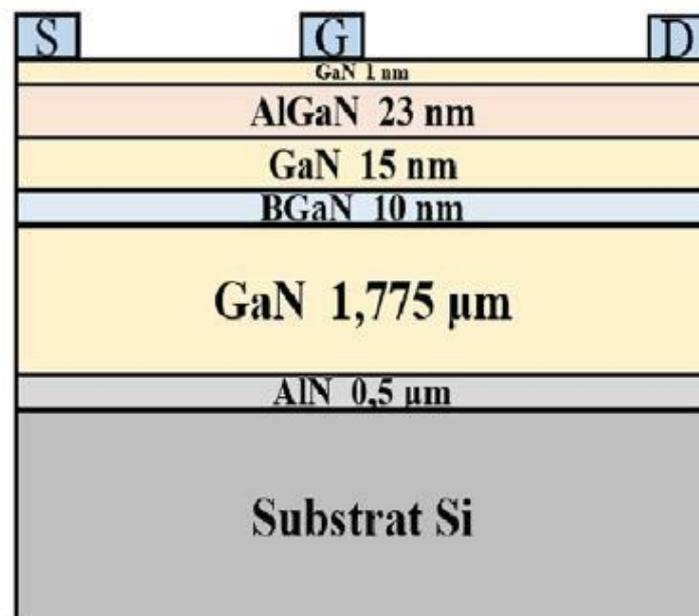


Figure III- 4 : Topologie de la structure HEMT  $\text{Al}_{0.26}\text{Ga}_{0.74}\text{N}/\text{GaN}/\text{BGaN}$  simulée.

Les paramètres physiques du composant ont été instruits dans le logiciel afin de traduire correctement l'épitaxie des couches. Pour cela les paramètres des matériaux employés sont recensés dans le tableau III.1.

	Al <sub>0.26</sub> Ga <sub>0.74</sub> N	w-GaN	B 0.02G.098aN	AlN	4H-SiC	Si	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
<b>Bande interdite (eV)</b>	3,88	3,39	3.33	6,2	3,23	1,12	8,8
<b>Conductivité thermique (W/k.cm)</b>	0,25	1,3	0,35	2,85	3,3	1,3	33
<b>Permittivité relative</b>	8.79	10	8.86	8,5	9,7	11,8	8,6
<b>Affinité des électrons (eV)</b>	3.78	4,1	4.16	1.9	4,05	4,05	4,05
<b>Mobilité des électrons (cm<sup>2</sup>/Vs)</b>	985,5	1350	-	135	460	1500	-
<b>Mobilité des trous (cm<sup>2</sup>/Vs)</b>	13,3	13	-	14	124	450	-

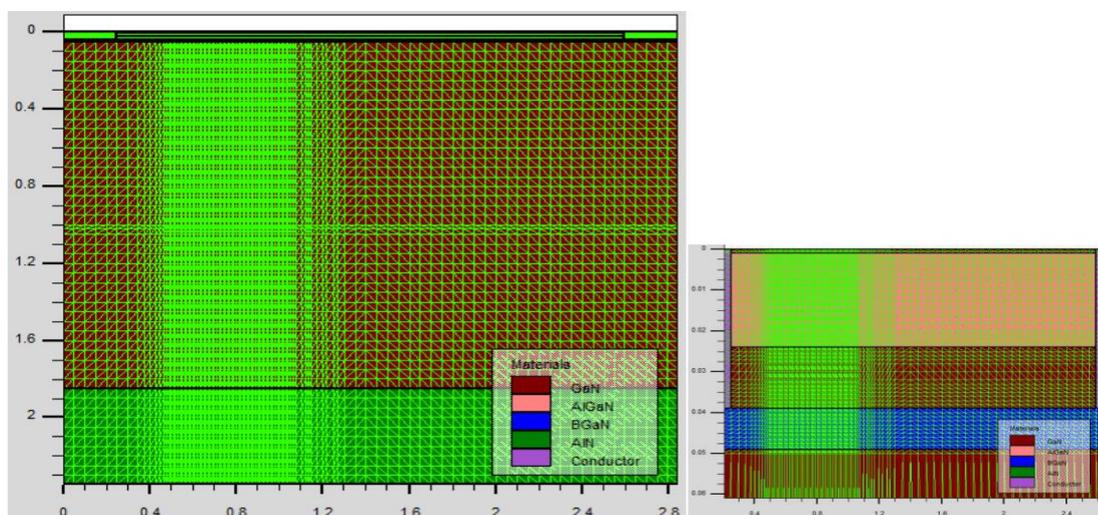
**Tableau III- 1 : propriétés (à 300K) des principaux matériaux utilisés dans la simulation.**

### III.3.1 Maillage

Le maillage définit des zones ou des ensembles de points de calculs de résolution d'équations (issues des modèles activés). Chaque intersection, ou nœud, représente le point où les équations seront résolues. Le temps de calcul, la précision et donc la validité des résultats dépendent de la qualité du maillage. En effet, une maille trop large permettra d'avoir moins de nœuds et donc de réduire le temps de calcul. En revanche, ces nœuds sont plus éloignés les uns des autres, entraînant ainsi des évolutions des différentes grandeurs physiques plus importantes d'un nœud à l'autre.

Les imprécisions sur le résultat final sont donc accentuées ainsi que les risques de divergence lors de la résolution des équations. Ceci peut mener à des résultats incohérents. Une maille trop fine augmente de façon exponentielle le temps de calcul mais permet d'avoir une solution très précise. Le choix de maillage doit être fait de façon à avoir un compromis entre la vitesse d'exécution et l'exactitude des résultats.

Le maillage doit être dense à l'interface barrière/canal pour cibler le gaz bidimensionnel suivant l'axe des y. Il est aussi très fin sous l'électrode de grille et de part et d'autre de chacune des électrodes suivant l'axe des x. La maille conçue pour notre dispositif est montrée sur la figure III.5 ci-dessous.



**Figure III- 5 : Structure maillée du transistor HEMT Al<sub>0.26</sub>Ga<sub>0.74</sub>N/GaN/BGaN.**

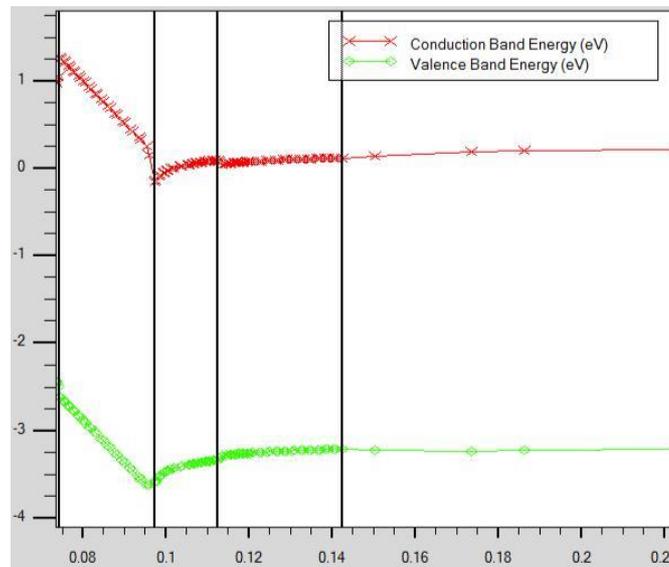
### III.3.2 Diagramme de bandes d'énergie

On connaît la relation qui lie la hauteur de barrière  $\phi_{Bn}$ , l'affinité électronique du semiconducteur se situant sous le contact ( $\chi$ ) et le travail de sortie du métal  $\phi_m$ . Elle est donnée par l'équation suivante :

$$\phi_{Bn} = \phi_m - \chi \quad (\text{III-1})$$

Or, on connaît la valeur de l'affinité électronique du matériau  $\text{Al}_{0,26}\text{Ga}_{0,74}\text{N}$ , elle est d'environ 3,78 eV (tableau III.1) et on connaît aussi la valeur du travail de sortie du métal 5,1 eV (correspond au travail de sortie de l'Or (Au)). Il est donc facile de déduire théoriquement la hauteur barrière qui sera alors de 1,32 eV. Cela a permis de caractériser entièrement le composant du point de vue de son diagramme des bandes d'énergie.

Nous traçons sur la figure III.6 le diagramme des bandes d'énergie en termes de bande de conduction de notre structure étudiée à l'équilibre thermodynamique.



**Figure III- 6 :: Diagramme de bandes d'énergie du HEMT  $\text{Al}_{0.26}\text{Ga}_{0.74}\text{N}/\text{GaN}/\text{BGaN}$  à l'équilibre thermodynamique.**

Ce diagramme des bandes est correct, la hauteur de barrière (marquant la frontière entre le contact Schottky et le barreau de semi-conducteur) avoisinant les 1,32 eV. De plus, les courbures des bandes semblent bons car elles correspondent à ce que l'on attend en théorie. De plus, le puits quantique, créé par l'association des deux couches à accords de mailles différents, est bien présent à l'interface entre les deux matériaux (AlGaN et GaN) et semble avoir une profondeur suffisante pour que les électrons puissent occuper ses niveaux d'énergie.

Ainsi, pour augmenter la fréquence de coupure du composant, une solution consiste à utiliser des barrières de confinement. Il est une question de placer une barrière électrostatique sous le canal GaN afin de bloquer l'injection des électrons dans la couche tampon lorsque le transistor est fortement polarisé.

Récemment, une attention considérable a été accordée au BGaN en tant que « Barrière arrière », possède toutes les caractéristiques distinctives des matériaux en nitrure lorsque seulement plusieurs fractions du bore sont incorporées [59]. En fait, l'incorporation du bore dans le matériau binaire GaN augmente la tension de claquage et le courant de sortie dans les HEMTs [60, 61].

La différence de polarisation dans l'interface canal/barrière arrière induit un champ électrique dans le canal à l'interface avec le confinement barrière, qui bloque l'injection d'électrons dans la couche tampon. Ce qui se traduit par une extension spatiale du gaz 2DEG inférieur et le confinement des électrons sont améliorés.

### III.4 Résultats et discussions

#### III.4.1 Caractéristiques de sortie $I_{ds}$ - $V_{ds}$

Nous avons représenté sur les figures III.7 et III.8 les caractéristiques de sortie donnant l'évolution du courant drain source circulant entre le drain et la source lorsque l'on fait croître la tension  $V_{ds}$  en maintenant la tension  $V_{gs}$  à des valeurs constantes (0, -1, -2, -3, -4 et -5 V). Trois régimes de fonctionnement peuvent être distingués :

- Régime linéaire (le courant  $I_{ds}$  croît avec la tension  $V_{ds}$ ) : Si  $V_{ds} \ll V_{dsat}$ .
- Régime saturé ( $I_{ds}$  est sensiblement indépendant de  $V_{ds}$ ): Si  $V_{ds} \gg V_{dsat}$ .
- Régime non-linéaire : zone de fonctionnement intermédiaire entre les deux régimes cités ci-dessus.

Le transistor passe en régime de saturation lorsque la vitesse des électrons atteint leur vitesse de saturation. Lorsque la tension  $V_{gs}$  augmente en valeur absolue, la diminution de la profondeur du puits de potentiel à l'hétérojonction entraîne celle de la densité surfacique des électrons, et donc du courant  $I_{ds}$ . Pour une tension de grille  $V_{gs}$  suffisamment négative, le canal est pincé. Cette tension de seuil est définie comme une tension de pincement. La concentration des porteurs dans le canal dépendant fortement de l'épaisseur et du dopage de la zone de grand gap (la couche barrière).

Par ailleurs, nos caractéristiques simulées (figure III.7) apparaissent en accord avec les caractéristiques de la figure III.8 [62].

La figure III-8 illustre une comparaison entre le réseau des caractéristiques  $I_{ds}$ - $V_{ds}$  simulé avec effet thermique (courbes continues) et sans effet thermique (courbes en symboles) pour  $V_{gs}$  variant de 0 à -2 V. Ces résultats montrent que le courant de drain (courbe continues) diminue pour des polarisations  $V_{gs}$  vaut 0 V. Par contre pour des polarisations  $V_{gs}$  négatives, on constate que le courant drain obtenu avec la prise en compte des effets thermiques (utilisation du modèle physico-thermique) se compare à celui obtenu lorsque ces effets thermiques ne sont pas inclus dans le modèle (courbe en symboles).

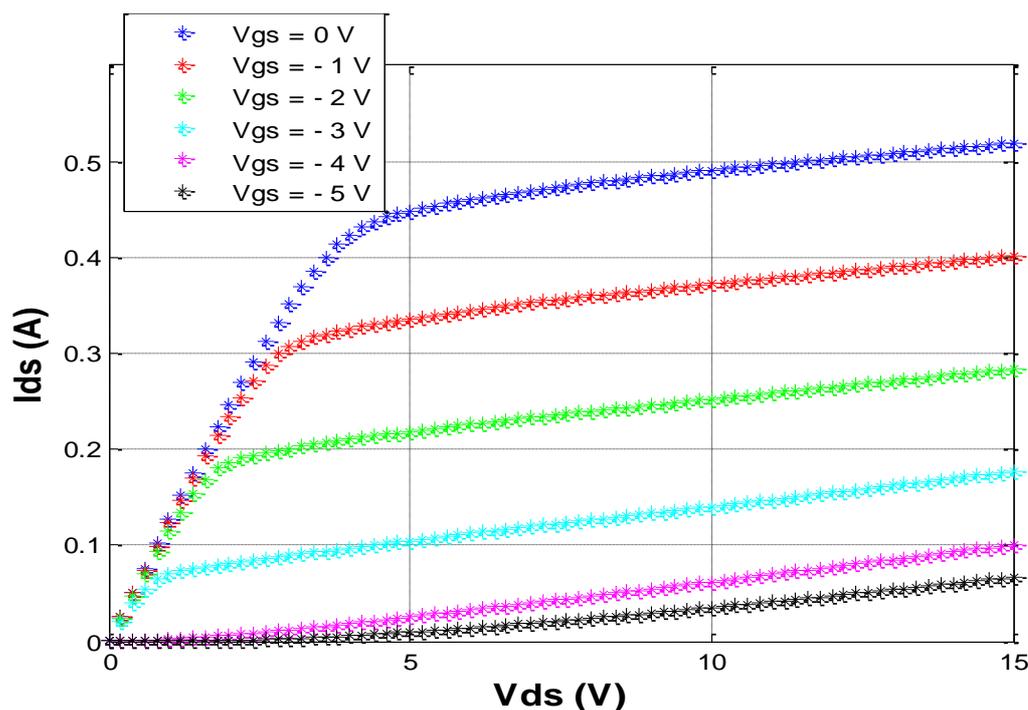


Figure III- 7: Caractéristiques de sortie  $I_{ds}$ - $V_{ds}$  pour  $V_{gs}$  variant de 0 à -5V avec un pas de 1.

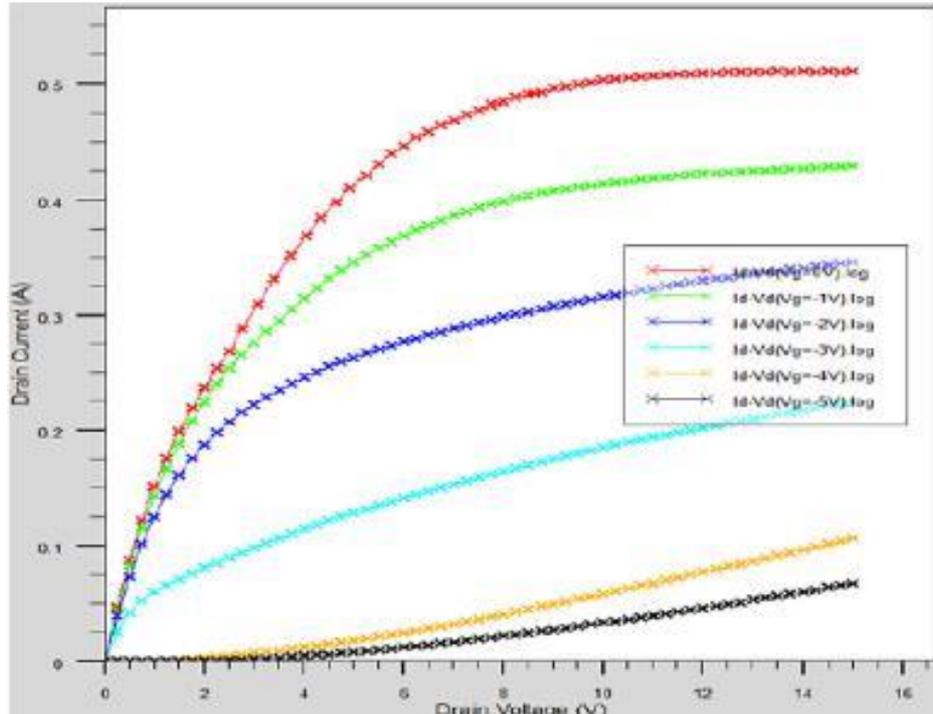


Figure III- 8: Caractéristiques de sortie  $I_{ds}$ - $V_{ds}$  pour  $V_{gs}$  variant de 0 à -5V avec un pas de 1V associé à la référence [62].

#### III.4.2 Caractéristiques de transfert $I_{ds}$ - $V_{gs}$

La figure III-9 illustre les caractéristiques de transfert  $I_{ds}$  ( $V_{gs}$ ) simulées à la température ambiante. Ces caractéristiques sont obtenues pour  $V_{ds}$  égale 3, 6 et 10V. Là encore, nos caractéristiques simulées (figure III.9) apparaissent en accord avec les caractéristiques de la figure III.10 [61]. On note que le courant de saturation maximum vaut 0,48 A pour  $V_{ds} = 10V$ .

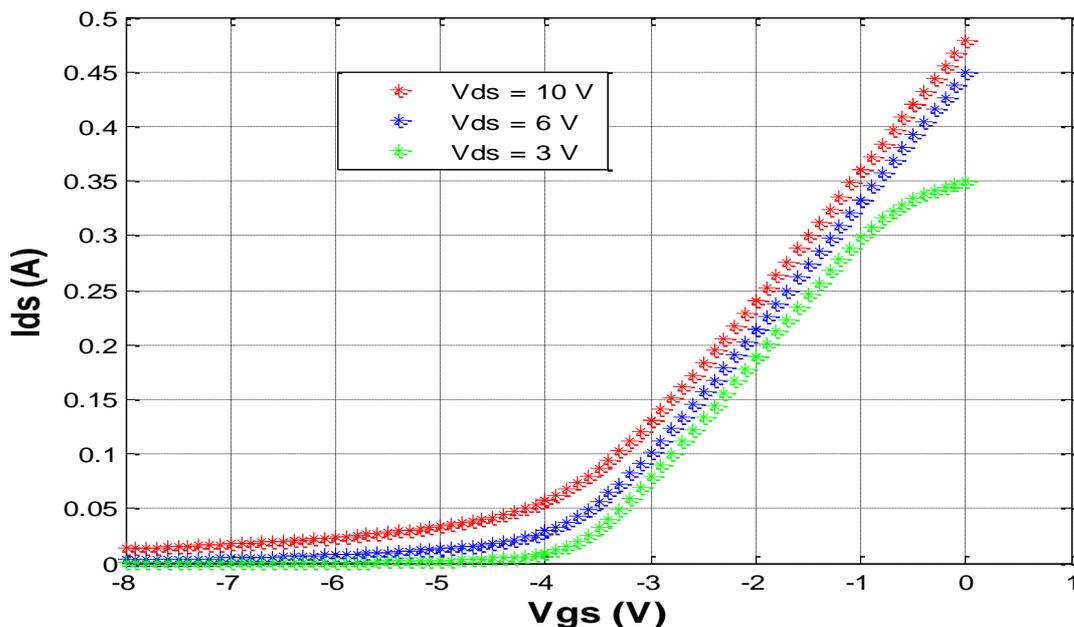


Figure III- 9: Caractéristiques de transfert  $I_{ds}$ - $V_{gs}$  simulées d'un HEMT  $Al_{0.26}Ga_{0.74}N/GaN/BGaN$ .

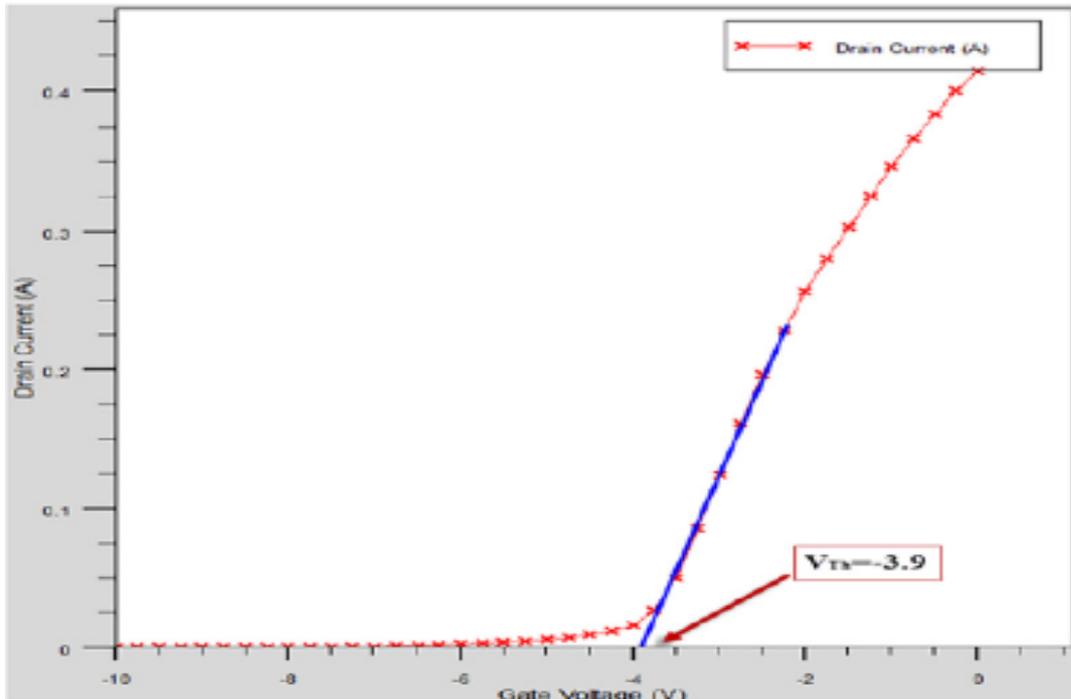


Figure III- 10 : Caractéristiques de transfert  $I_{ds}$ - $V_{gs}$  d'un HEMT  $AlO.26Ga.74N / GaN / BGaN$  [61].

En effet, la caractéristique de transfert est définie par deux grandeurs:

La tension de seuil  $V_{th}$ , qui définit la tension de grille nécessaire pour pincer le canal.

La transconductance  $G_m$ , qui définit le gain de transfert:  $dI_{ds}/dV_{gs}$  à un  $V_{ds}$  donné.

a) **La tension de seuil  $V_{th}$  :**

$V_{TH}$  représente la tension à appliquer sur la grille pour dépléter complètement le canal et ainsi pincer le canal. La différence de potentiel (ddp) entre le contact de grille et le canal induit par  $V_{th}$  doit donc compenser la ddp nette qui réside dans la structure.

En fonctionnement, c'est-à-dire à transistor polarisé, la tension de seuil est la grandeur la plus pertinente, entre autre pour la conception de circuits. C'est elle qui va déterminer le mode de fonctionnement du transistor :

- à désertion pour une tension de seuil négative.
- à enrichissement pour une tension de seuil positive;

a) **La transconductance  $G_m$  :**

Ce paramètre représente le gain en transfert puisque c'est le rapport entre le courant de drain et la tension de grille. Il est déterminé par l'équation III.2 :

$$G_m = \left. \frac{\Delta I_{ds}}{\Delta V_{gs}} \right|_{V_{ds}=cste} \quad (III-2)$$

### III.4.3 Effet d'auto-échauffement sur le comportement DC du HEMT AlGaN/GaN/BGaN

Malgré les performances intéressantes du transistor HEMT, le fonctionnement de ce transistor en particulier pour les applications de puissance génère de l'auto-échauffement dû à l'effet Joule. Cet effet est responsable de la dégradation des propriétés de transport des matériaux et donc de la dégradation des performances de ce transistor. Ces effets thermiques peuvent également entraîner la destruction de ce composant. Il est donc nécessaire de prendre en compte la dissipation thermique et son influence sur l'ensemble des paramètres du composant.

La figure III-11 illustre le réseau des caractéristiques  $I_{ds}$ - $V_{ds}$  simulé avec effet thermique pour  $V_{gs}$  variant de 0 à -5 V. Ces résultats montrent que le courant de drain diminue pour des polarisations  $V_{gs}$  vaut 0, -1, -2, -3 V. Par contre pour des polarisations  $V_{gs}$  vaut -4 et -5 V, on constate que le courant drain obtenu avec la prise en compte des effets thermiques (utilisation du modèle physico-thermique) se compare à celui obtenu lorsque ces effets thermiques ne sont pas inclus dans le modèle (figure III-7).

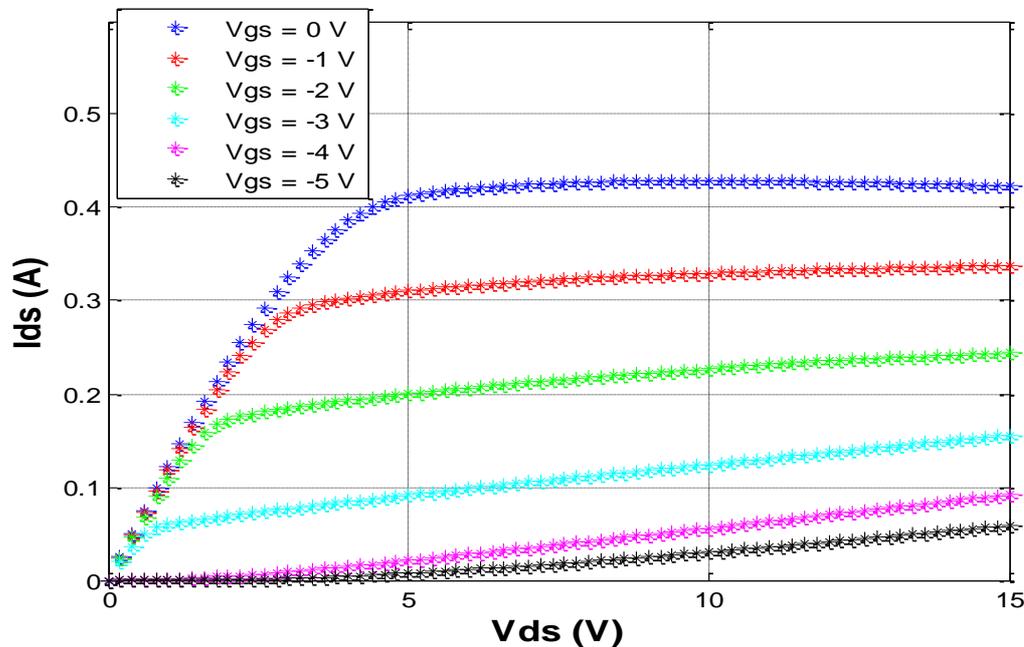


Figure III- 11 : Caractéristiques de sortie thermiques pour  $V_{gs}$  variant de 0 à -5V avec un pas de 1.

La figure III-12 illustre une comparaison entre les caractéristiques de transfert  $I_{ds}$  ( $V_{gs}$ ) simulées (avec et sans effet thermique) à la température ambiante. Ces caractéristiques sont obtenues pour  $V_{ds}$  égale à 15 V. Là encore, le courant simulé diminue avec l'effet de conduction de la chaleur. On note que le courant de saturation maximum vaut 0.48 A et se dégrade à environ 0.42 A pour  $V_{ds} = 15$  V.

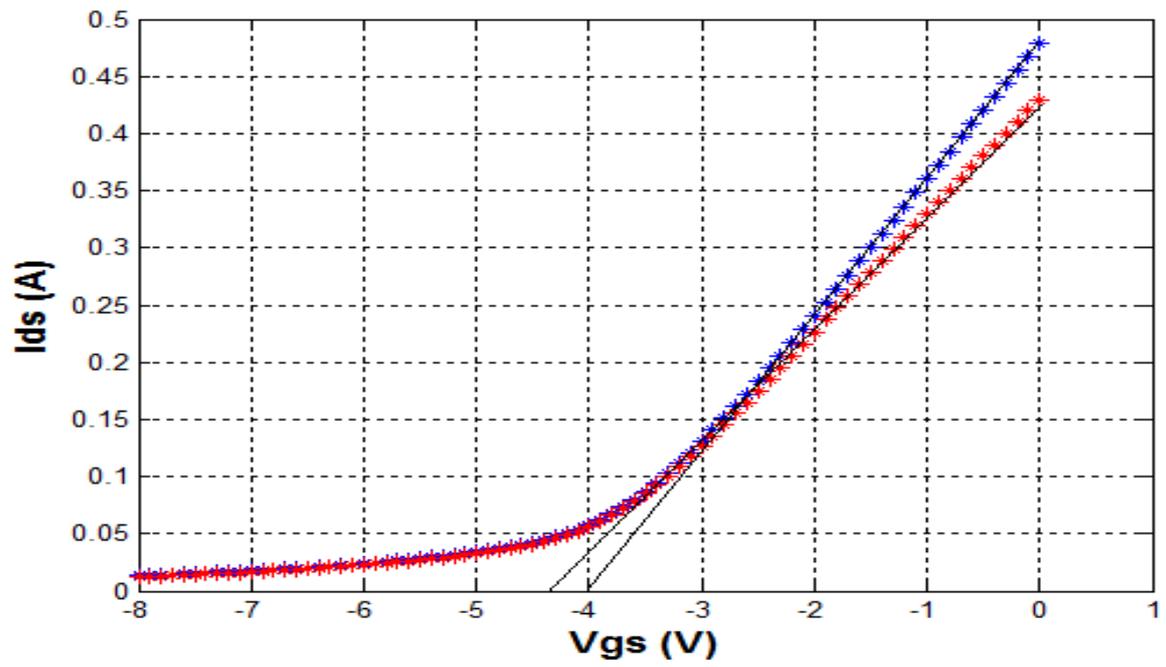


Figure III- 12: Comparaison entre les caractéristiques de transfert thermique (en rouge) et isothermique (en bleue) d'un HEMT  $\text{Al}_{0.26}\text{Ga}_{0.74}\text{N} / \text{GaN} / \text{BGaN}$ .

### III.4.4 Effet des paramètres technologiques sur les caractéristiques du HEMT en GaN

#### III.4.4.1 Effet de la longueur de la grille

Les paramètres technologiques jouent un rôle important dans l'optimisation et l'amélioration des performances électriques d'une telle structure. Dans cette optique, nous nous intéressons à étudier l'influence de la longueur de grille sur le courant du drain.

La figure III-13 représente la variation du courant drain source en fonction de la tension drain-source  $V_{ds}$  pour différentes longueurs des grilles  $L_g$  (0.15  $\mu\text{m}$ , 0.25  $\mu\text{m}$  et 0.45  $\mu\text{m}$ ) dans le HEMT AlGaIn/GaN. On constate que le courant drain de saturation diminue avec l'augmentation de la longueur de la grille. En effet, l'extension latérale de la zone des charges d'espace conduit à un allongement du canal conducteur tout en s'amincissant, ce qui limite le passage des électrons. Cela veut dire que plus la grille est longue, plus le contrôle par la grille est efficace, par contre ceci provoque une augmentation de la capacité grille source  $C_{gs}$  et par conséquent une dégradation des performances en terme de fréquences  $F_{MAX}$  (fréquence d'oscillation) et  $F_T$  (fréquence de transition).

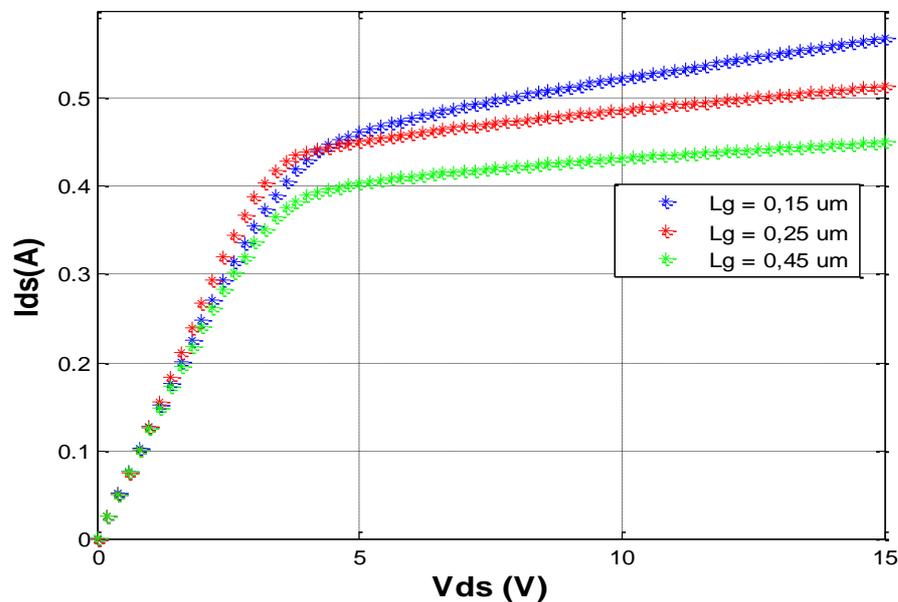
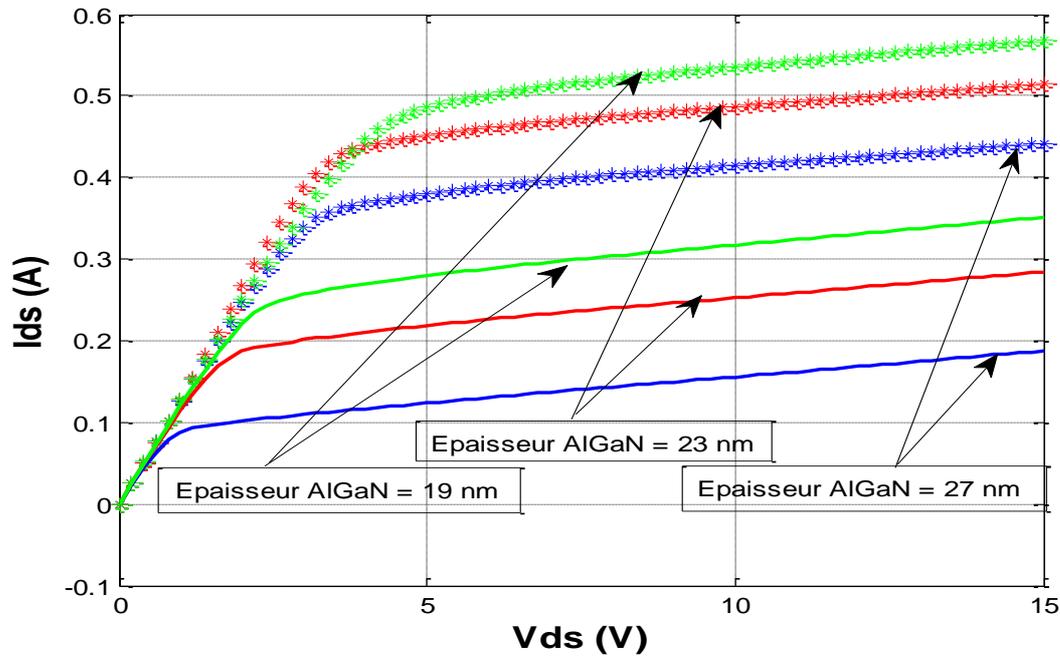


Figure III- 13: Influence de la longueur de grille sur les caractéristiques de sortie  $I_{ds}$ - $V_{ds}$

#### III.4.4.2 Effet de la longueur de la couche barrière (AlGaIn)

Nous représentons dans cette partie de simulation l'effet de l'épaisseur de la couche barrière sur les caractéristiques de sorties  $I_{ds}$ - $V_{ds}$ . La figure III-14 montre ces caractéristiques paramétrées en épaisseur de la couche barrière, cette dernière est fixée à 19, 23 et 27 nm. Les polarisations de grille appliquées sont de 0 et -2 V. On observe que l'augmentation de l'épaisseur de la couche barrière (figure III-14) engendre une augmentation du courant drain-source  $I_{ds}$ .



**Id**  
 Figure III- 14: Influence de l'épaisseur de la couche barrière sur les caractéristiques Ids-Vds

#### III.4.4.3 Impact du matériau de substrat

##### Le Carbure de Silicium 4H- SiC

Le Carbure de Silicium (4H-SiC) présente un désaccord de maille de 4% avec le GaN. Très stable thermiquement et très bon conducteur thermique, il est le substrat le plus attractif.

Les couches de GaN épitaxiées sur ce type de substrat démontrent ainsi une excellente qualité cristallographique : le taux de dislocations restant généralement inférieur à  $3.10^8 \text{ cm}^{-2}$ , notamment grâce à l'ajoute d'une couche de nucléation, ou couche tampon, en AlN, dont les paramètres physiques permettent une plus douce transition entre le réseau cristallin de SiC et celui de GaN. Cette transition est encore améliorée par l'adjonction de super-réseau nucléation, technique consistant à intégrer entre le substrat et le GaN une succession de couches AlN/GaN. Il est ainsi, de tous les substrats, celui qui préfigure en tête lorsque sont envisagées des applications de puissance hyperfréquences. Malheureusement, il demeure extrêmement onéreux.

## Le Silicium – Si

Le Silicium à cela d'avantageux qu'il présente une conductivité thermique convenable, une bonne morphologie de surface, et un pris d'achat très accessible. Ce type de substrat pourrait permettre, à terme, d'intégrer des dispositifs à base de GaN dans les procédés technologiques propre au Silicium la désadaptation de maille avec le GaN s'élève cependant à 17%. Le silicium dispose en outre d'une maille plus grande que celle du GaN. Durant la croissance, ce dernier se trouvera donc dans un état de dilatation, ou d'extension. Ce phénomène provoque irrémédiablement la formation de craquelures et de défauts cristallins tels que les dislocations. De même que pour les substrats précédents, il est nécessaire de recourir à des techniques d'empilement de couches d'Al/GaN en super réseau, et ce l'interface substrat/GaN volumique, également appelé « buffer » ou « bulk GaN ». Nous avons représenté sur les figures III-15 l'effet du substrat (4H-SiC et Silicium) sur les caractéristiques de sortie  $I_{ds}$ - $V_{ds}$  pour les points de polarisation  $V_{gs} = 0$  et  $-2V$ .

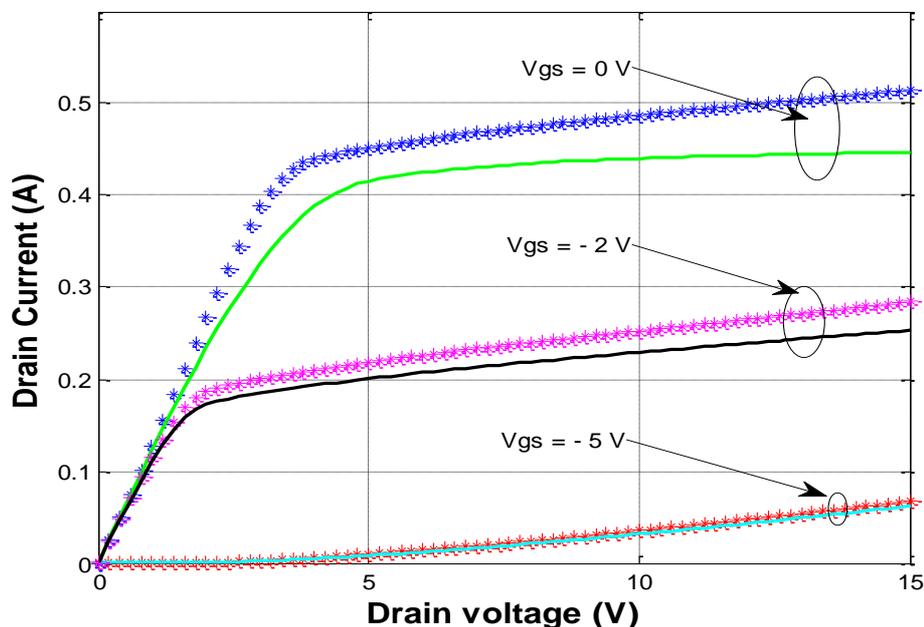


Figure III- 15: Influence du substrat 4H-SiC, Silicium sur les caractéristiques de sortie  $I_{ds}$ - $V_{ds}$  pour  $V_{gs} = 0$  et  $-2$  et  $-5$  V.

Cette étude fait état d'une comparaison avec effet thermique de transistors de type HEMT réalisés sur deux substrats différents (silicium (Si) et carbure de silicium (4H-SiC)).

On remarque que le composant sur substrat silicium possède un courant important par rapport au composant sur substrat 4H-SiC, et ceci pour de forte polarisation de la grille.

### III.4.5 Distribution des grandeurs électriques dans le HEMT AlGaN/GaN/BGaN

#### III.4.5.1 Carte du potentiel

Pour mieux comprendre le profil de distribution du potentiel dans le composant et surtout dans la région de la barrière, nous avons tracé les cartes 2D (figures III.16.a et III.16.b) de potentiel dans le HEMT AlGaN/GaN/BGaN/Si.

La polarisation du composant électronique en régime statique se fait par une tension de grille  $V_{gs} = 0$  V (figure III.16.a) et  $V_{gs} = -5$  V (figure III.16.b) et pour une tension de drain  $V_{ds} = 15$  V.

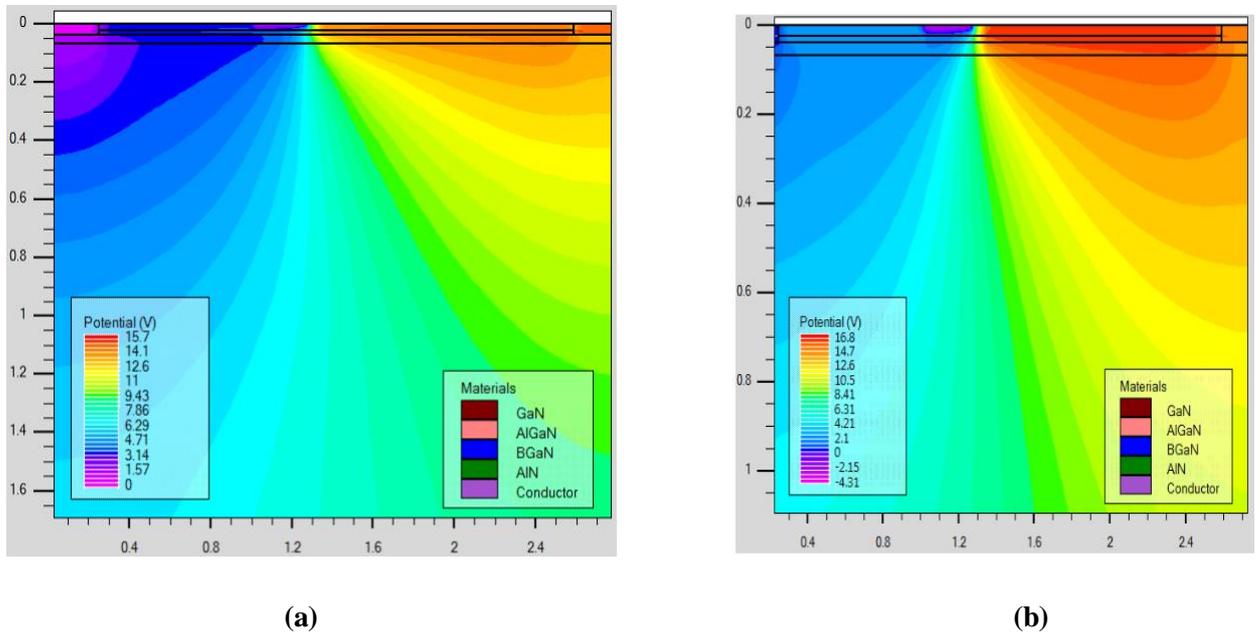


Figure III- 16: Carte 2D de potentiel de réseau pour une tension appliquée de 15 V  
(a)  $V_{gs} = 0$  V et (b)  $V_{gs} = -5$  V.

On peut remarquer une augmentation du potentiel de la région source vers la région drain, quelle que soit la valeur de  $V_{gs}$ . Ces courbes montrent aussi que le potentiel augmente avec la polarisation de la grille.

On remarque que l'allure du profil de distribution du potentiel indiquée un gradient de potentiel plus important dans la région proche du drain, ceci étant dû à la polarisation du drain plus élevées que celle de la source, et à la jonction inverse coté drain qui induit des valeurs de tensions inverses élevées au point de pincement.

Le potentiel diminue d'une manière très rapide quand on va de la zone barrière/drain vers le socle du composant. On peut aussi noter que la distribution de potentiel présente une discontinuité acceptable suivant la direction transversale principalement en raison de la charge piézoélectrique.

On voit clairement sur les figure III.16.a et III.16.b que suivant les tensions de polarisation, la distribution du potentiel pour  $V_{gs} = 0$  V a le même comportement que celui de  $V_{gs} = -5$  V, c'est à dire elle commence par une valeur nulle qui représente la polarisation de la source, puis elle décroît pour des valeurs négatives de la polarisation de la grille, puis elle croît jusqu'à des valeurs positives pour atteindre la tension de polarisation du drain.

#### III.4.5.2 Carte de la densité du courant

Pour mieux connaître le profil de distribution de la densité du courant dans le HEMT AlGaIn/GaN/BGaN, nous avons tracé les cartes 2D (figure III.17) de la densité du courant dans ce composant. Les polarisations du composant se font par une tension de grille  $V_{gs} = 0$  V et  $V_{gs} = -5$  V, La tension de drain appliquée est de 15 V.

On peut remarquer une augmentation de la densité du courant de la région canal vers la région barrière, pour les deux valeurs de  $V_{gs}$ . Ces cartes montrent aussi que la densité du courant augmente avec la polarisation de grille.

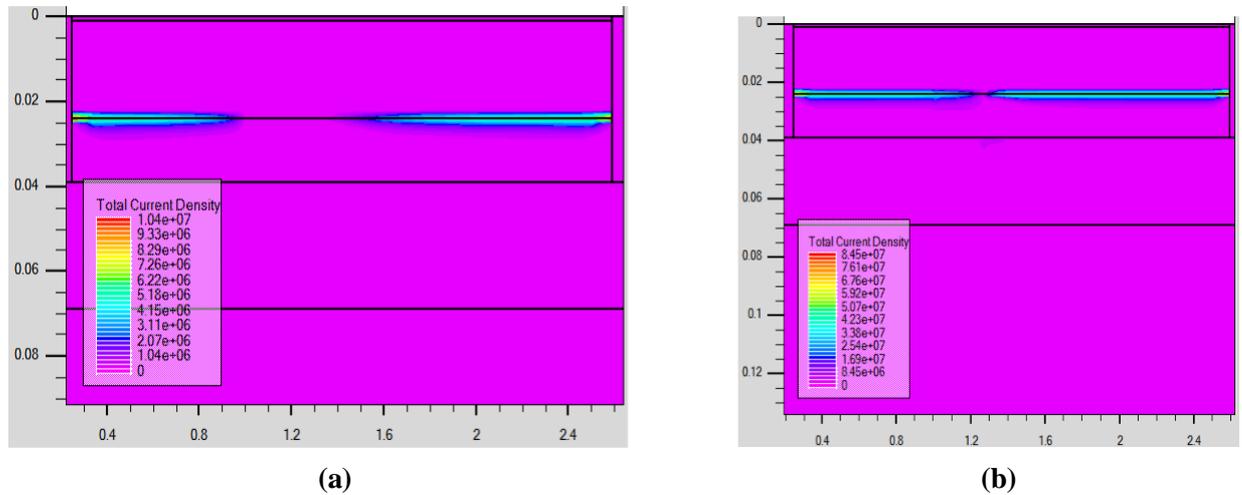


Figure III- 17 :Carte 2D de la densité du courant pour  $V_{ds} = 15$  V.  
(a)  $V_{gs} = 0$  V et (b)  $V_{gs} = -5$  V.

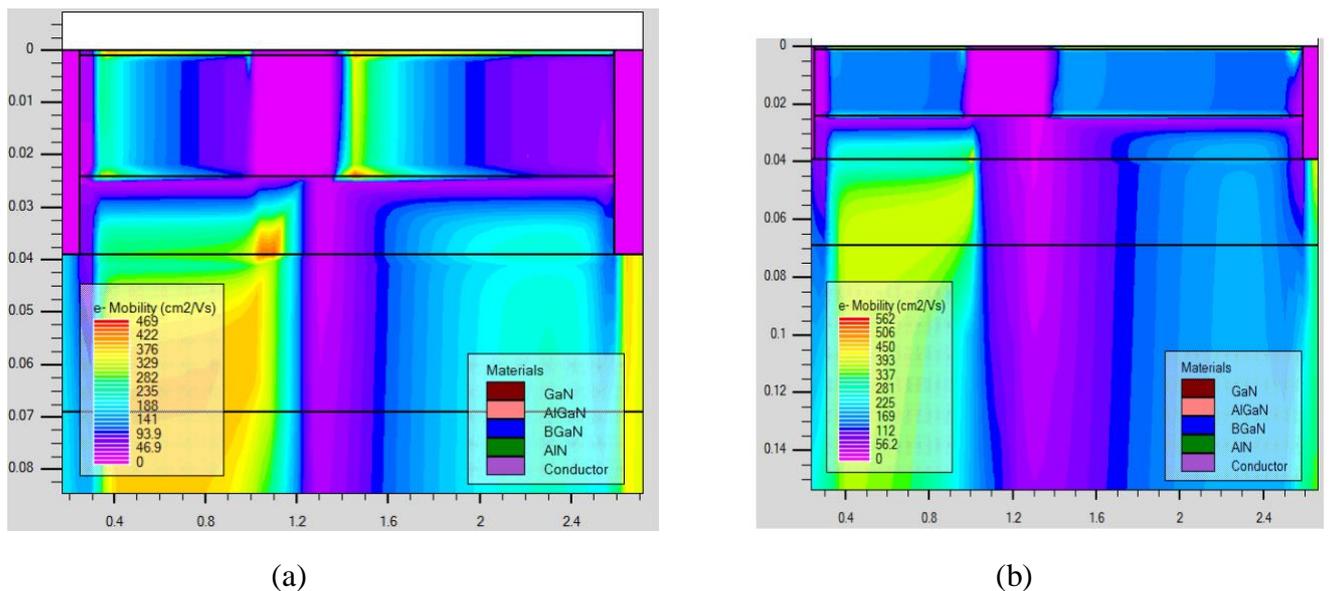


Figure III- 18: Carte 2D de la mobilité des électrons pour  $V_{ds} = 15$  V.  
(a)  $V_{gs} = 0$  V et (b)  $V_{gs} = -5$  V.

### III.4.5.3 Carte de la température de réseau

Nous avons tracé sur les figures III.19 et III.20 les cartes de distribution de la température de réseau dans le HEMT-AlGaIn/GaN/BGaIn sur substrat Si et 4H-SiC respectivement, pour une tension de drain de 15 V et pour deux points de polarisations de grille.

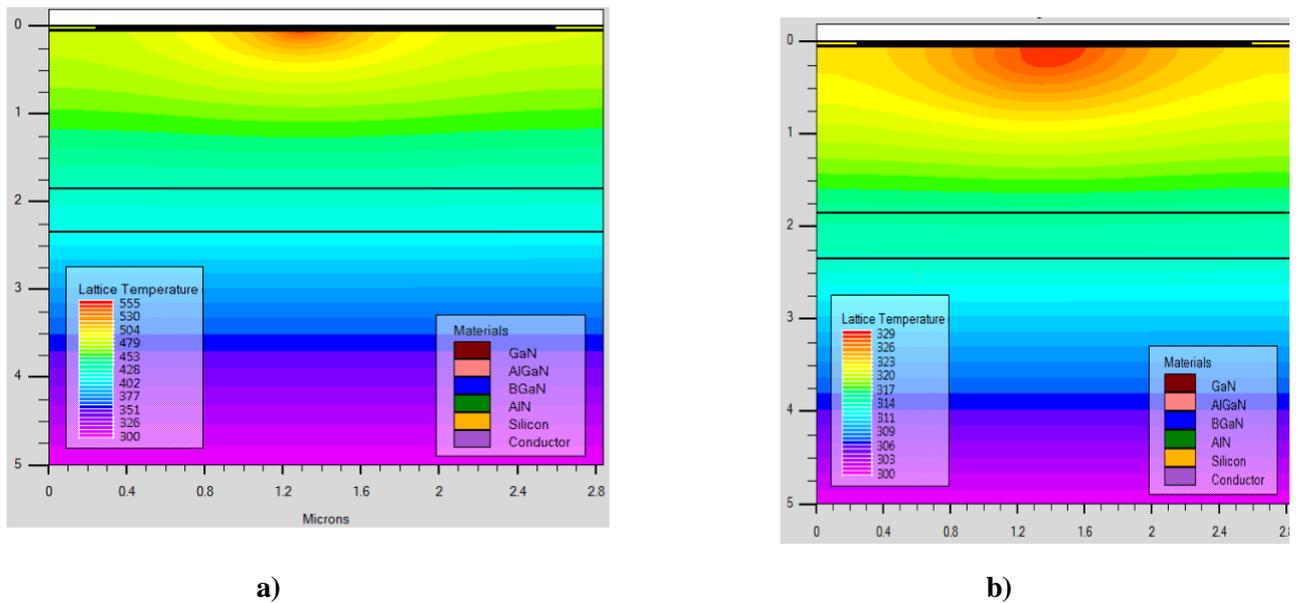


Figure III- 19: Carte 2D de la température de réseau pour  $V_{ds} = 15$  V.  
(a)  $V_{gs} = 0$  V et (b)  $V_{gs} = -5$  V. (sur substrat Si)

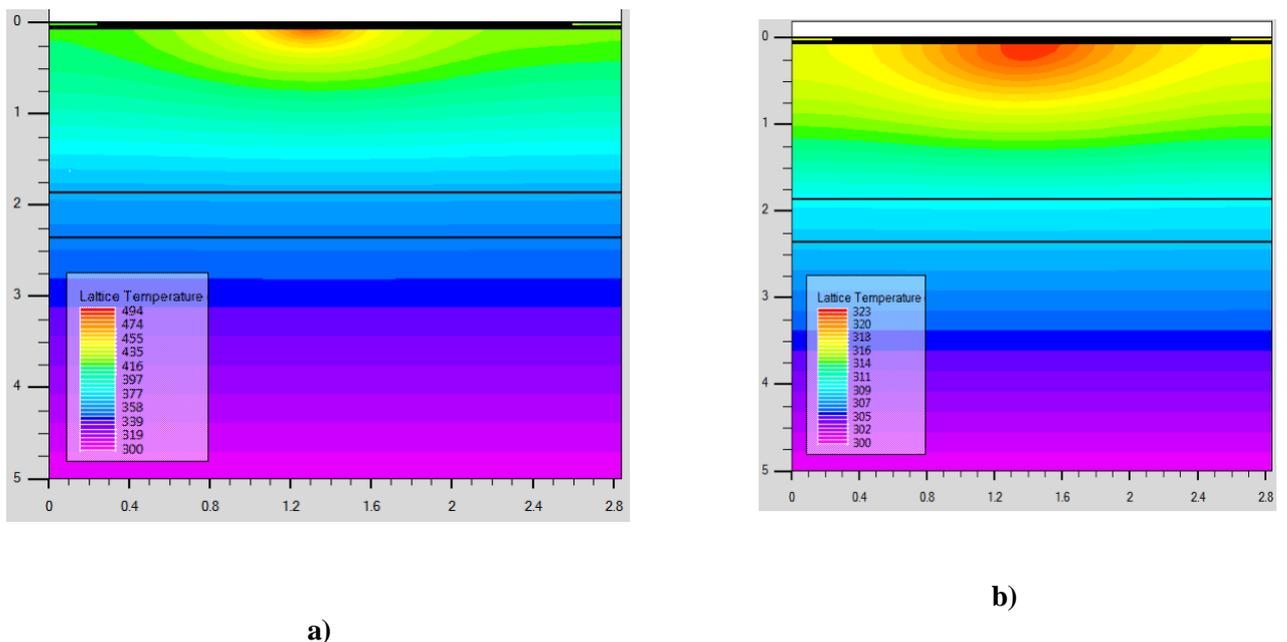


Figure III- 20 Carte 2D de la température de réseau pour  $V_{ds} = 15$  V.  
(a)  $V_{gs} = 0$  V et (b)  $V_{gs} = -5$  V. (sur substrat 4H-SiC):

On peut constater que la température du réseau diminue rapidement quand on va du canal au bas du substrat, on constate aussi que la température du réseau augmente avec l'augmentation de la polarisation de la grille. Le maximum de température du réseau pour le même point de polarisation de la grille ( $V_{gs} = 0$  V) est de 555 K pour le HEMT AlGaIn/GaN/B GaN/Si et il est de 494 K pour le HEMT AlGaIn/GaN/B GaN/4H-SiC.

La figure III.21 illustre la variation de la température de réseau en fonction de la polarisation du drain avec une température de socle de 300 K, pour trois polarisations de grille ( $V_{gs} = 0, -2$  et  $-5$  V), et sur substrat Si (courbes en symboles) et sur substrat 4H-SiC (courbes continues). On peut constater que la température de réseau augmente avec l'augmentation de la polarisation de grille et donc avec l'augmentation de  $V_{ds}$ . On peut dire que le maximum de température qui correspond au point chaud est de 555 K pour  $V_{gs} = 0$  V et  $V_{ds} = 15$  V.

#### III.4.6 Caractéristiques hyperfréquences du HEMT AlGaN/GaN/BGaN Fréquence de transition

Les HEMTs AlGaN/GaN/BGaN destinés aux applications hautes débit doivent avoir de bonnes performances en fréquences.

La fréquence de coupure  $f_r$ , qui est définie comme étant la fréquence à laquelle le gain en courant du transistor est égal à l'unité, traduit la rapidité du transistor.

La figure III.22 représente la variation du gain en courant H21 en fonction de la fréquence sur une échelle logarithmique à la température ambiante.

La figure III.22 montre une bonne amélioration de la fréquence de coupure dans le HEMT avec l'incorporation de BGaN comme barrière de confinement, il est de 60 GHz.

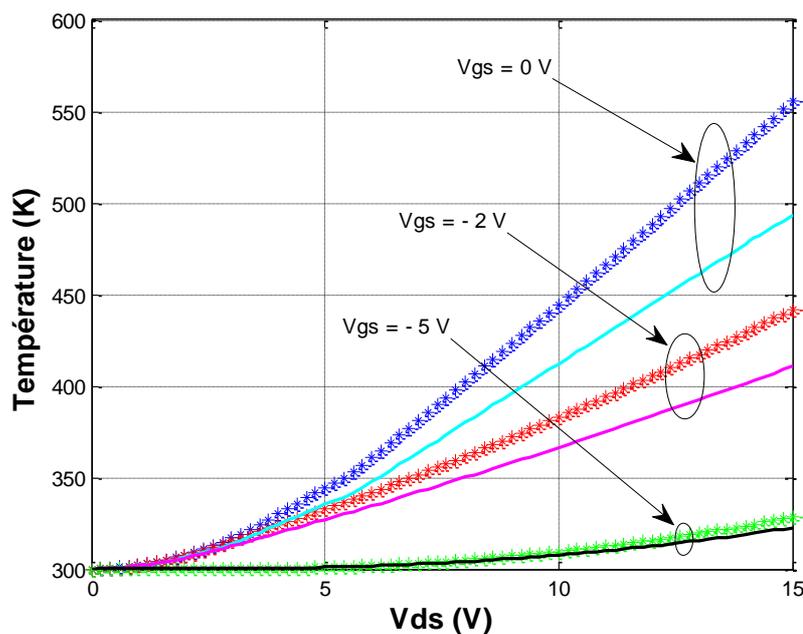


Figure III- 21 : Evolution de la température du réseau dans le composant pour  $V_{gs} = 0$  et  $-2$  V.

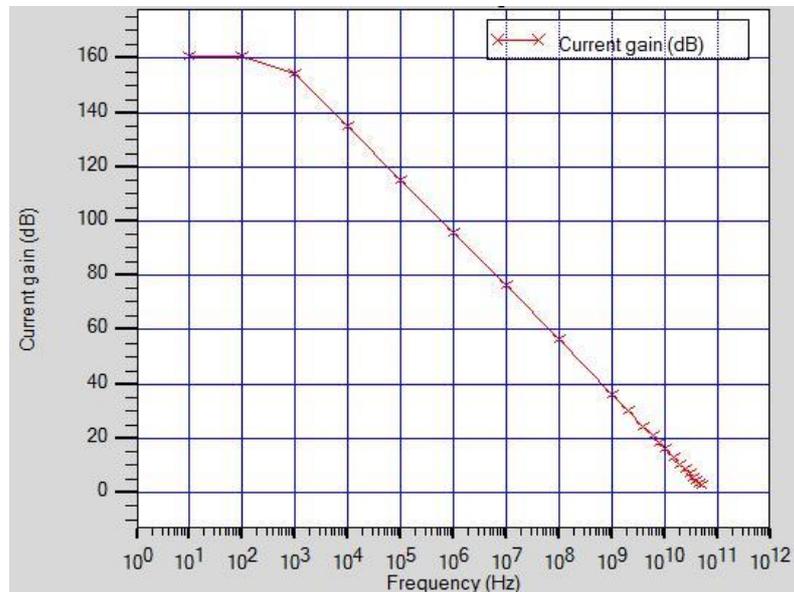


Figure III- 22: La fréquence de coupure du HEMT AlGaIn/aN/BGaIn pour  $V_{gs} = 0\text{ V}$  et  $V_{ds} = 15\text{ V}$ .

### III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats de simulation avec et sans la prise en compte des effets thermiques du transistor paramétré HEMT AlGaIn/GaN/BGaIn sur substrat Si et 4H-SiC. L'étude par simulation a été menée à l'aide du module Atlas du simulateur SILVACO. La prise en compte des paramètres technologiques dans le modèle numérique bidimensionnel proposé a permis d'obtenir des résultats comparables aux résultats expérimentaux du point de vue réseau des caractéristiques  $I_{ds}$ - $V_{ds}$  et  $I_{ds}$ - $V_{gs}$ .

Le modèle numérique développé a permis d'étudier les performances électriques et thermiques du transistor HEMT, et en particulier de montrer l'impact des effets thermiques sur les caractéristiques statiques de ce transistor en analysant les résultats obtenus avec et sans effets thermiques. La distribution des grandeurs électriques et thermiques de ce transistor a été aussi présentée et discutée.

## Conclusion générale

Les composants de puissance ont beaucoup progressé au niveau de leurs structures technologiques, mais actuellement, les limites physiques et thermiques du silicium empêchent l'amélioration de leurs performances statiques et hyperfréquences. Pour surmonter ces limitations, il est nécessaire de disposer de composants de puissance utilisant des matériaux semi-conducteurs à large bande interdite (band gap) pour remplacer le silicium dans les applications de puissance et notamment en haute température. Parmi ces matériaux semi-conducteurs à large bande interdite, on peut citer le carbure de silicium (SiC), le nitrure de gallium (GaN) et le diamant.

Le travail de mémoire s'est intéressé à l'étude et à la modélisation du transistor HEMT AlGaIn/GaN/BGaN utilisant comme outil de simulation le module ATLAS du simulateur SILVACO. Pour un même jeu de paramètres, les résultats de simulations obtenus en régime statique montrent un bon accord entre les mesures et les simulations. Le modèle validé nous a permis d'étudier le comportement DC et RF du transistor HEMT, en particulier la distribution de différentes grandeurs électriques et thermiques. En effet, nous avons déterminé leurs caractéristiques électriques statiques, l'impact des paramètres géométriques tels que la hauteur de la couche barrière et la longueur de la grille. Les conditions de polarisations des grilles et du drain qui provoquent l'effet thermique ainsi que l'évolution de la température du réseau le long du canal conducteur dans le transistor HEMT AlGaInGaN/BGaN de longueurs de grille de 250 nm ont été discutées.

Finalement, ce travail de mémoire a permis une bonne compréhension des phénomènes électriques et thermiques dans la technologie HEMT AlGaIn/GaN/BGaN. Pour ce transistor, l'étude a permis de mettre en évidence l'influence de la dissipation thermique sur leurs paramètres physiques et donc sur leurs performances. La chaleur générée par la puissance dissipée dans la zone active augmente la température de celle-ci et conduit à la dégradation de nombreux paramètres physiques de ces transistors en dégradant en particulier leurs propriétés de transport. Ainsi, la conception du transistor HEMT AlGaIn/GaN/BGaN sur substrat 4H-SiC a permis de réduire la dissipation thermique.

Les perspectives qui se dégagent de ce travail de mémoire peuvent être l'étude des structures plus complexes à partir du modèle proposé pour le HEMT. Deux configurations peuvent être envisagées. La première correspond à des composants multi doigts et à canal composite. La seconde correspond à des composants utilisant un « heat spreader » (substrat d'accueil par le haut) pour améliorer la dissipation thermique vers le haut.

## Références Bibliographiques

- [1] **Damien Bordel**, “Développement de nouveaux substrats compliant pour l’hétéro épitaxie de semi-conducteurs”, Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lyon, Décembre 2007.
- [2] **José Vera Zambrano**, “Etude statique d’un transistor à effet de champ à canal vertical à grille à contact Schottky”, Thèse de Doctorat 3<sup>eme</sup> cycle, Université Paul Sabatier, Toulouse, 1983.
- [3] **S. Augaudy**, “Caractérisation et modélisation des transistors micro-ondes, application à l’étude de la linéarité des amplificateurs à fort rendement”, Thèse de Doctorat, Université de Limoges, Mars, 2002.
- [4] **S. M. Sze**, “High-speed Semiconductor Devices”, Ed., J. Wiley & Sons, 1990.
- [5] **P. Chevalier**, “Conception et réalisation de transistors à effet de champ de la filière AllnAs/GaInAs sur substrat InP : Application à l’amplification faible bruit en onde millimétriques”, Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologie de Lille, Novembre 1998.
- [6] **R. Dingle, H. L. Stormer, A. C. Gossard, W. Wiegmann, M. D. Sturge**, “Electron Mobilities in Modulation-Doped Semiconductor Heterojunction Superlattices”, Appl. Phys. Lett., Vol. 33, pp. 665-667, 1978.
- [7] **Youcef Haddab**, “Etudes des niveaux profonds dans des transistors à gaz bidimensionnel d’électrons sur substrat GaAs et InP”, Doctorat Es sciences,
- [8] **Ismail Noufel**, “Modélisation non linéaire distribuée des transistors à effet de champ: application à l’analyse de la stabilité des transistors et des caractéristiques en bruit dans les circuits millimétriques”, Thèse de Doctorat, Université de Limoges, Mars 2001.
- [9] **R. Castagne, J. Pduchemin, M. Gloanec, CH. Rumelhard**, “Circuits intégrés en Arséniure de Gallium”, Masson, 1989.
- [10] **M. Huenshen et al.**, “Pulse doped MODFETs”, IEEE IEDM Technical Digest, San Francisco, USA, pp. 438-451, 1984.
- [11] **Ming Shi**, “Simulation Monte Carlo de MOSFET à base de matériaux III-V pour une électronique haute fréquence ultra basse consommation”, Thèse de Doctorat, Université de Paris Sud, Janvier 2012.

- [12] **P. Bourel**, “Simulation Monte-Carlo bidimensionnelle et étude expérimentale de transistors à effet de champ à hétérojonction AlInAs/GaInAs adaptés en maille sur InP”, Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologie de Lille, Février 1992.
- [13] **Frédéric Bué**, “Réalisation d’un banc de mesure d’intermodulation biton en bande Ka : Application à l’analyse des causes technologiques de non-linéarité des HEMTs de puissance”, Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, Avril 2003.
- [14] **K. K. Chu, et al.**, "9.4 W/mm power density AlGaN-GaN HEMTs on free-standing GaN substrates," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 25, no. 9, pp. 596–598, Sep. 2004 .
- [15] **Konepachith Ouduangvilai1, Hoon-Ki Lee1, Vallivedu Janardhanam1, P. R. Shekar Reddy, Chel-Jong Choi, and Kyu-Hwan Shim**, “Study of Gate Leakage Current on AlGaN/GaN MOSHEMTs with Atomic Layer Deposited Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Gate Oxide”, *Journal of semiconductor technology and science*, Vol.19, No.6, December, 2019
- [16] **T. Parenty**, “ Etude et perspective des transistors à hétérostructure AlInAs/GaInAs de longueur de grille inférieure à 100 nm et conception de circuits intégrés en bande G”, Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologie de Lille, 20 novembre 2003.
- [17] **X. Li, W. I. Wang, A. Y. Cho, D. L. Sivco**, “Planar-doped n-type InAlAs/InGaAs MODFET’s on InP substrates by molecular beam epitaxie”, *IEEE Elec. Dev. Lett*, Vol. 14, No. 4, pp. 170-172, 1993.
- [18] **O. Pajona**, “Transistor HEMT Métamorphique sur substrat GaAs pour applications de télécommunications à très haut débits : mesures statiques et dynamiques pour intégration des effets parasites dans des modèles”, Thèse de Doctorat, Université de Limoges, Mai 2006.
- [19] **B. Lambert**, “Etude de l’influence du mécanisme d’ionisation par impact sur les performances et la fiabilité des transistors à effet de champ sur substrat III-V”, Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux, Mars, 2001.
- [20] **N. A. Papanicolaou, B. R. Bennett, J. B. Boos, D. Park, R. Ba**, “Sb-based HEMTs with InAlSb/InAs hétérojonction”, *Electronics Letters*, Vol. 41, Issue 19, pp. 1088- 1089, 2005.
- [21] **F. Medjdoub, M. Zaknoune, X. Wallart, C. Gaquiere, F. Dessenne, J. L. Thobel, D. Theron**, “InP HEMT downscaling for power applications at W band”, *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 52, pp. 2136–2143, Oct. 2005.
- [22] **S. C. Kim, D. An, B. O.Lim, T. J. Baek, D. H. Shin, and J. K. Rhee**, “High performance 94-GHz single balanced mixer using 70-nm MHEMTs and surface micro

- machined technology,” IEEE Electron Device Lett., Vol. 27, No. 1, pp. 28–30, Jan. 2006.
- [23] **R. Lai, S. Sarkozy**, “HEMT MMW MMICs for radiometer sensor applications”, [Microwave Symposium Digest \(MTT\), 2010 IEEE MTT-S International](#), pp. 832 – 835, May 2010.
- [24] **Kang-Sung Lee, Young-Su Kim, Yun-Ki Hong, Yoon-Ha Jeong**, “35-nm Zigzag T-Gate  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  Metamorphic GaAs HEMTs With an Ultrahigh  $f_{\text{max}}$  of 520 GHz”, IEEE Electron Device Letters, Vol. 28, No. 8, August 2007.
- [25] **V. Radisic, M. Micovic, M. Hu, P. Janke, C. Ngo, L. Nguyen, L.Samoska, and M. Morgan**, “164-GHz MMIC HEMT doubler”, IEEE Microw. Compon.Lett., Vol. 11, No. 6, pp. 241–243, Jun. 2001.
- [26] **S. C. Kim, D. An, B.O. Lim, T. J.Baek, D. H. Shin, J. K. Rhee**, “High performance 94-GHz single balanced mixer using 70-nm MHEMTs and surface micro machined technology”, IEEE Electron Device Lett., Vol. 27, No. 1, pp. 28–30, Jan. 2006.
- [27] **T. Suzuki, Y. Nakasha, T. Takahashi, et al.**, “144-Gbit/s selector and 100-Gbit/s 4 : 1 multiplexer using InP HEMTs”, IEEE Int MTT Symp. Digest, 2004.
- [28] **J. Bergman, G. Nagy, G. Sullivan, B. Brar, C. Kadow, H.-K. Lin, A. Gossard, M. Rodwell**, “Low-voltage, high-performance InAs/AlSb HEMTs with power gain above 100 GHz at 100 Mv drain bias”, Device Research Conference Proc., pp. 243– 244, June 2004.
- [29] **K. Shinohara, Y. Yamashita, A. Endoh, I. Watanabe, K. Hikosaka, T. Matsui, T. Mimura, S. Hiyamizu**, “547-GHz  $\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}-\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  HEMTs with reduced source and drain resistance”, IEEE Electron Device Letters, Vol. 25, Issue: 5, pp. 241-243, May 2004.
- [30] **R. Tsai, M. Lange, L. J. Lee, P. Nam, C. Namba, P. H. Liu, R. Sandhu, R. Grundbacher, W. Deal, A. Gutierrez**, “260 GHz Ft, 280 GHz  $f_{\text{MAX}}$  AlSb/InAs HEMT technology”, 63<sup>rd</sup> Device Research Conference Digest (DRC '05), Vol. 1, pp. 257 – 258, June 2005.
- [31] **K. Murata, K. Sano, T. Enoki, H. Sugahara, M. Tokumitsu**, “InP-based IC technologies for 100-Gbit/s and beyond”, [Indium Phosphide and Related Materials, 16th IPRM International Conference](#), pp. 10-15, 2004.
- [32] **A. Tessmann, A. Leuther, V. Hurm, H. Massler, M. Zink, M. Riessle, R. Loesch, M. Kuri**, “High-gain submillimeter-wave mHEMT amplifier MMICs”, [Microwave](#)

[Symposium Digest \(MTT\), IEEE MTT-S International, Fraunhofer IAF, Freiburg,](#)

Germany, 2010.

- [33] **Yuen Lam, Jung-Sheng Huang, Yong-JieZou, Kuan-Wei Lee and Yeong-Her Wang**, “Reduced Subthreshold Characteristics and Flicker Noise of an AlGaAs/InGaAs PHEMT Using Liquid Phase Deposited TiO<sub>2</sub> as a Gate Dielectric”, *materials*, 9, 861; doi:10.3390/ma9110861.
- [34] **Lahoual Mohamed**, “Etude de caractérisation d’un MESFET-GaAs hyperfréquence et application en circuit amplificateur linéaire à faible bruit (LNA) en bande étroite autour de 10GHz en technologie MMIC pour les systèmes à communications rapides”, Thèse de Magister, Ecole Normale Supérieure d’Enseignement Technologique d’Oran (ENSET),
- [35] **S. Adachi**, “Properties of Semiconductor Alloys: Group-IV, III-V and II-V Semiconductors”, John Wiley, 2009.
- [36] <http://www.univ-lille1.fr/eudil/tec35/hyper/hyperc2.htm>: “Composants hyperfréquences et arséniure de Gallium”.
- [37] **R. Castagne, J. Pduchemin, M. Gloanec, CH. Rumelhard**, “Circuits intégrés en Arséniure de Gallium”, Masson, 1989.
- [38] **TaiichiOtsuju, Koichi Murata, Koichi Narahara, Kimikazu Sano and Eiichi Sano**, “20-40-Gbit/s-Class GaAs MESFET Digital ICs for Future Optical Fiber Communications Systems”, *International Journal of High Speed Electronics and Systems*, Vol. 9, No. 2, pp. 399-435, 1998.
- [39] **Virginie Nodjladjim**, “Transistor bipolaire à double hétérojonction submicronique InP/InGaAs pour circuits numériques ou mixtes ultra-rapides”, Thèse de Doctorat, Université de Lille I -Sciences et Technologies, 2009.
- [40] **InmgarKallfass, Axel Tessmann, ArnulfLeuther, Hermann Massler, Michael Schlechtweg, Olivier Ambacher**, “Millimeter-Wave Monolithic Integrated Circuits for Imaging and Remote Sensing at 140, 200 and 300 GHz”, *Proc. Of SPIE*, Vol. 7485, pp. 1-10, 2009.
- [41] **International Technology Roadmap for semiconductors 2.0, 2015 Edition, Outside System Connectivity.**
- [42] **StephanieRennesson**, « Développement de nouvelles hétérostructuresHEMTs à base de nitrure de gallium pour des applications de puissance en gamme d’ondes millimétriques », thèse de doctorat, Université de Nice-Sophia Antipolis, 2014.

- [43] **D.Chahrazad** « étude par la simulation des phénomènes de polarisation et les contacts ohmique dans les transistors HEMT base de GaN», thèse de magister, université de
- [44] **D.Yannick**, « étude de HEMT AlGaIn/GaN a grand développement pour la puissance hyperfréquence », thèse de doctorat, Université de Lille, 2012.
- [45] **B.Lakhder**, « modélisation des effets de la contrainte en surface et étude des effets thermiques dans les composants à base de GaN ».
- [46] **Piprek J.** Semiconductor optoelectronic devices: introduction to physics and simulation. UCSB: Academic Press; 2003. p. 22.
- [47] **Azzi S, Zaoui A, Ferhat M.** On the importance of the band gap bowing in Boronbased III-V ternary alloys. Solid State Commun 2007;144:245–8.
- [48] **F.Bernardi, V.Fiorentini, and D.Vanderbilt**, « spontaneous polarization and piezoelectric constants of III-V nitrides, » Phys.Rev.B, vol.56, pp.10024-10027, October 1997.
- [49] **W. Shockley, W.T. Read**, “Statistics of the Recombination of Holes and Electrons”, Phys. Rev. 87, pp. 835-842, 1952.
- [50] **R. N. Hall**, “Electron Hole Recombination in Germanium”, Phys. Rev. 87, pp. 387, 1952.
- [51] **Eric Pop, Sanjiv Sinha, and Kenneth E. Goodson**, “Heat Generation and Transport in Nanometer-Scale Transistors”, Proceedings of the IEEE, Vol. 94, No. 8, August 2006.
- [52] **D. Vasileska, K. Raleva, S.M. Goodnick**, “Modeling heating effects in nanoscale devices: the present and the future”, J Comput Electron, Vol. 7, No. 2, pp. 66–93, 2008.
- [53] **G. K. Wachutka**, “Rigorous thermodynamic treatment of heat generation and conduction in semiconductor device modeling”, IEEE Trans. Comput-Aided Design Integr. Circuits Syst., Vol. 9, No. 11, pp. 1141–1149, Nov. 1990.
- [54] **A. Raman, D.G Walker, T.S. Fisher**, “Simulation of non equilibrium thermal effects in power LDMOS transistors”, Solid-State Electronics, Vol. 47, Issue: 8, pp. 1256-1273, 2003.
- [55] **E. Pop, J. Rowlette, R. W. Dutton, K. E. Goodson**, “Joule heating under quasi-ballistic transport conditions in bulk and strained silicon devices”, in Proc. Int. Conf. Simulation of Semiconductor Processes and Devices (SISPAD), pp. 307–310, 2005.
- [56] **Marc Salleras Freixes**, “Thermal Modeling of Microsystems and Electronic

Components: Model order reduction”, Thèse de Doctorat, Université de Barcelone, 2003.

- [57] **P. Mawby, K. Board**, “A comparison of internal heating and temperature distribution in IGBT and DMOS devices”, IEE Colloquium on Integrated Power Devices, pp. 5/1-5/3,
- [58] Silvaco Atlas User Manual, 2016, <http://www.silvaco.com/>.
- [59] **Sarrah Amor**, « Etude des défauts dans les alliages de semi-conducteurs à grand gap B(AlGa)N et de leur rôle dans les propriétés de transport. Application aux photo-détecteurs UV », thèse de doctorat en cotutelle entre l'Université de Lorraine en France et l'Université Sidi-Mohamed Ben Abdellah de Fès au Maroc, 2017.
- [60] **Gautier S, Patriarche G, Moudakir T, Abid M, Orsal G, Pantzas K, et al.** “Deep structural analysis of novel B GaN material layers grown by MOVPE”. J Cristal Growth 2011;315:288–91.
- [61] **Orsal G, Maloufi N, Gautier S, Alnot M, Sirenko AA, Bouchaour M, et al.** “Effect of boron incorporation on growth behavior of B GaN/GaN by MOVPE”. J Cristal Growth 2008;310:5058–62.
- [62] **Moujahed GASSOUMI, Abdelhamid HELALI, Hassen MAAREF, Malek GASSOUMI**, “DC and RF characteristics optimization of AlGaN/GaN/B GaN/GaN/Si HEMT for microwave-power and high temperature application”, Results in Physics, 12 (2019), pp. 302–306.